

引用格式: 袁照威, 杨易凡. 压缩空气储能技术研究现状及发展趋势 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(2): 146-153. YUAN Zhaowei, YANG Yifan. Research status and development trend of compressed air energy storage technology [J]. Southern energy construction, 2024, 11(2): 146-153. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.14.

压缩空气储能技术研究现状及发展趋势

袁照威^{1,✉}, 杨易凡²

(1. 中能建数字科技集团有限公司, 北京 100022;
2. 中国能源建设股份有限公司, 北京 100022)

摘要: [目的] 压缩空气储能具有储能容量大、安全性高、寿命长、经济环保、建设周期短等优势, 是未来和抽水蓄能相媲美的长时储能技术, 成为未来储能重点布局的方向。在此背景下, 文章通过对压缩空气储能技术现状进行综述, 分析不同压缩空气储能技术的工作原理、面临挑战及解决方案, 以期对压缩空气储能技术的发展提供参考。[方法] 文章首先对压缩空气储能技术原理进行了介绍; 对系统中的压缩机、透平膨胀机和换热器等关键设备进行了阐述, 分析了大规模压缩空气储能用的关键设备; 并从地面关键工艺技术和地下储气设施两个角度介绍了大规模压缩空气储能系统的常用关键技术、发展现状及工程案例; 最后对压缩空气储能技术的未来发展趋势进行了分析。[结果] 结果表明: 蓄热式压缩空气储能是当前国内的主流技术, 且高温储热成为未来压缩空气储能发展方向, 也是压缩空气储能提高效率的重要途径。同时, 系统关键设备和技术优化、成本降低、应用场景发展等方面尚有一定改进空间。[结论] 压缩空气储能作为一种长时储能, 对未来构建新型电力系统具有重要的支撑作用。

关键词: 新型电力系统; 压缩空气储能; 压缩机; 透平膨胀机; 换热器

中图分类号: TK01; X382

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)02-0146-08

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.14

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Research Status and Development Trend of Compressed Air Energy Storage Technology

YUAN Zhaowei^{1,✉}, YANG Yifan²

(1. China Energy Digital Technology Group Co., Ltd., Beijing 100022, China;
2. China Energy Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100022, China)

Abstract: [Introduction] Compressed air energy storage (CAES), as a long-term energy storage, has the advantages of large-scale energy storage capacity, higher safety, longer service life, economic and environmental protection, and shorter construction cycle, making it a future energy storage technology comparable to pumped storage and becoming a key direction for future energy storage layout. By summarizing the current status of CAES technology, the working principles, challenges, and solutions of different CAES technologies are analyzed, which is provided for the development of CAES technology through research. [Method] Firstly, the principle of CAES was introduced, the key equipment, such as compressors, turbo-expanders, and heat exchangers, was analyzed, and the key equipment suitable for the CAES was proposed. Then, the commonly used key technologies, development trends, and engineering cases of large-scale CAES were introduced from the perspective of ground key process technologies and underground gas storage facilities. Finally, the future development trend of CAES technology was analyzed. [Result] The results show that regenerative CAES is currently the mainstream technology in China, and high-temperature heat storage has become the future development direction of CAES, and is also an important

收稿日期: 2023-08-31 修回日期: 2023-10-11

基金项目: 中国能源建设股份有限公司科技项目(CEEC2021-KJZX-04); 湖北楚韵储能科技有限责任公司(HBCY-CN-FW2022-16); 中国能源建设集团有限公司工程研究院资助项目(CEECEI-KJ-2022-W01)

way to improve the efficiency of CAES. At the same time, there is still room for improvement in key equipment and technology optimization, cost reduction, and application scenario development of the system. [Conclusions] CAES, as a long-term energy storage method, plays an important supporting role in the construction of future new power systems.

Key words: new power system; compressed air energy storage; compressor; turbo-expander; heat exchanger

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

“碳达峰、碳中和”背景下,太阳能、风能等可再生能源发展迅速,但其存在一定的随机性和不稳定性,对电网造成一定的冲击。储能作为能源供给与需求时间不匹配的重要解决方案,是构建新型电力系统的关键支撑^[1-3]。

储能具有多种类型,如抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能、电化学储能等,不同类型储能其功率、容量、响应特征等不同,适用于不同的应用场景^[4-5]。随着可再生能源比例的增加,长时储能成为未来发展的趋势。压缩空气储能作为一种长时储能,其具有储能容量大、安全性高、寿命长、经济环保等优势,成为唯一和抽水蓄能媲美的储能技术^[6-8]。目前,压缩空气储能逐渐受到政府的重视,先后出台了相关政策,进一步促进了技术的发展^[9-10]。

众多学者围绕着压缩空气储能系统,从地面工艺技术、地下储气设施、系统关键设备都开展相关研究。万明忠等^[11-12]对压缩空气储能地下选址关键因素进行了分析,并提出了压缩空气储能地下盐穴关键问题及相应的处理技术;梅生伟等^[13]从压缩空气储能电站建模、能效提升、运行规划及市场运营等方面分析了先进压缩空气储能的研究现状;陈海生等^[14]对压缩空气储能原理、关键技术及应用领域等进行了详细分析,指出了未来压缩空气储能的发展趋势;姜小峰等^[15]从工艺流程、系统集成度、整体

经济性和运行维护方便等角度分析了压缩空气储能电站主厂房设计优化。

在前人研究基础上,对压缩空气储能的技术原理、关键设备、地上工艺技术、储气设施等技术现状分析,探讨技术存在的难点和未来发展趋势,明确后期应用研究重点,为后续压缩空气储能技术、设备的发展提供理论和实际应用支撑。

1 技术现状

1.1 技术原理

压缩空气储能技术是一种利用压缩空气储存能量的物理储能技术^[16-17],分为非补燃式压缩空气储能和补燃式压缩空气储能,目前国内主要以非补燃式压缩空气储能技术为主,主要包含了能量输入、能量解耦、能量耦合和能量输出4个过程(图1)。

1)能量输入:在用电低谷时,电动机驱动压缩机将环境中的空气吸入并压缩成高温高压空气,将电能转换为内能,完成能量的输入过程。

2)能量解耦:通过压缩侧换热器将换热后的低温空气储存至储气单元,升温后的高温换热介质存储至储热单元,将内能分离成热能和势能,完成压缩热能和压力势能的解耦。

3)能量耦合:通过膨胀侧换热器将储气单元释放的高压空气与储热单元中的高温换热介质进行热量交换,换热后的介质返还至储热单元中,空气进入膨胀侧,完成压缩热能和压力势能的耦合。

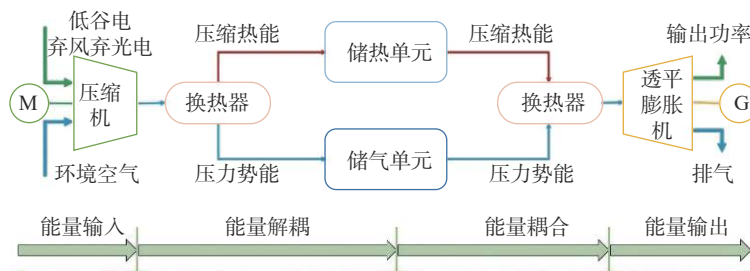


图1 非补燃式压缩空气储能技术原理示意图

Fig. 1 Schematic principle diagram of non-supplementary combustion CAES technology

4)能量输出:在用电高峰时,换热后的空气转换为高温高压空气,驱动透平膨胀机做功,带动发电机发电,内能转换为机械能,机械能转换为电能,从而完成能量的输出。

1.2 关键设备

压缩空气储能电站关键设备主要包含压缩机、膨胀机、换热器、发电机、蓄热装置等,相关设备制造能力已基本成熟,重点介绍压缩机、透平膨胀机和换热器三大关键设备。

1)压缩机:压缩空气储能电站使用的压缩机具有流量大、高温高压、频繁启停、宽负荷等特点,总压比较大,为防止压缩机出口材料因高温发生蠕变,采用多级压缩,从而降低单级压缩机出口温度。根据国内外已投运的大型压缩空气储能电站发展情况及不同类型压缩机使用范围,大规模压缩空气储能电站主要以离心式和轴流式等类型为主。

2)透平膨胀机:透平膨胀机是利用压缩气体膨胀降压时向外输出机械功,将压力势能转化为动能的设备,具有大流量、多次再热、小焓降等特点^[18]。针对大容量压缩空气储能电站,储气压力较大,较高的储气压力决定膨胀机组需要较大的膨胀比,一般多采用多级膨胀、级间再热方式。

3)换热器:换热器的种类繁多,按其传热面的形状和结构可分为管式、板式和特殊形式换热器^[6]。板式换热器具有传热系数高、单位体积内的传热面积大等优势,换热性能优于管式换热器,但其承压和耐温能力差、适用于流量小的场景。针对大规模压缩空气储能电站而言,从技术可行性和经济性角度考虑,多选用管式换热器。

1.3 关键技术

压缩空气储能技术主要包含地上工艺技术以及储气设施,二者对压缩空气储能系统高效、安全和稳定运行具有重要影响。

1.3.1 工艺技术

压缩空气储能技术种类较多,根据是否需要热源分为补燃式和非补燃式压缩空气储能^[19],根据流动介质状态分为液态和气态压缩空气储能等。目前已经投入商业运营的大型压缩空气储能电站仅有德国的 Huntorf 电站和美国的 McIntosh 电站,两者均采用天然气进行补燃,以增大透平膨胀机做功能力。为解决传统压缩空气储能技术存在的问题,在传统补燃式压缩空气储能技术基础上,相继开发了绝热压缩空气储能、等温压缩空气储能、液态压缩空气储能等技术。通过技术不断迭代升级,旨在充分利用系统产生的热量,提升系统的效率。

1)传统补燃式压缩空气储能技术

传统补燃压缩空气储能系统是将进入膨胀机前的高压空气与补充燃料进行充分混合并燃烧,提高膨胀机进口处温度形成高温高压气体,使其做功能力得到提升(图 2)。传统压缩空气储能技术通过外加燃料,提升空气的温度进而增强透平膨胀机的做功能力,但是该技术严重依赖于天然气等化石燃料,一方面造成环境的污染,不符合国家能源结构转型发展的目标;另一方面是压缩过程中产生的压缩热直接排掉,造成系统整体效率下降。为了解决对天然气等化石燃料的依赖,可采用太阳能热能等加热释放的空气,提升系统效率。

2)绝热压缩空气储能技术

绝热压缩空气储能技术采用换热器来回收压缩过程所产生的热量,并将这部分热量用于加热进入膨胀机进口处空气,实现了储能和释能过程中热量的交换(图 3)。且各过程在近似绝热的条件下进行,使得系统效率提升。但实际工程中无法实现真正绝热,所以该技术处于论证阶段。

当压缩机具有高的压力比时,会导致空气在压缩机出口处的温度过高,使得压缩机耗功增大。为

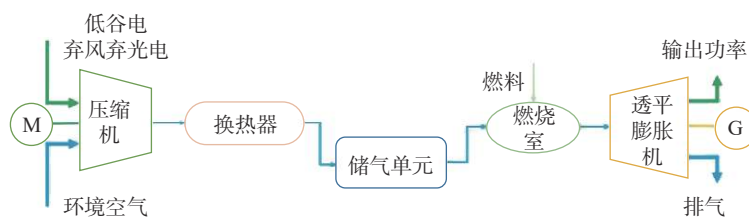


图 2 传统补燃式压缩空气储能技术原理图

Fig. 2 Principle diagram of traditional CAES technology

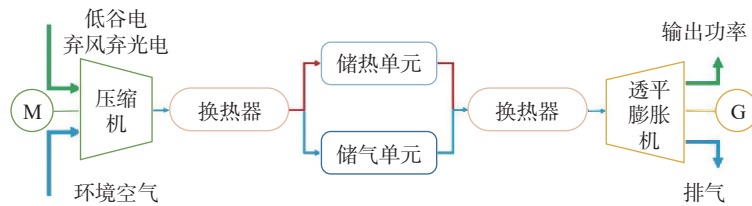


图 3 绝热压缩空气储能原理图

Fig. 3 Principle diagram of adiabatic CAES technology

了降低压缩机排气温度, 众多学者在压缩机间采用了级间冷却的方式, 由此诞生出蓄热式压缩空气储能。该技术与绝热压缩空气储能运行过程基本相同, 但增加了级间冷却和再热的方式(图 4)。该系统对设备材料要求降低且能更高效地利用压缩过程中产生的热量, 提升系统整体效率。但由于增加了级间换热装置, 系统的投资成本提高。蓄热式压缩空气

储能技术储换热介质通常采用水、导热油或熔盐, 导热油储热温度高, 但成本高且需要定期更换。压力水廉价、成本低, 但储热温度低, 储热温度增加时水罐压力增加, 对储罐和换热壁厚要求增加, 增加投资成本。熔盐储热温度高, 成本较导热油低, 较压力水高。因此, 蓄热式压缩空气储能技术的难点是压缩热能的储存、储热材料的选择以及系统成本的降低等。

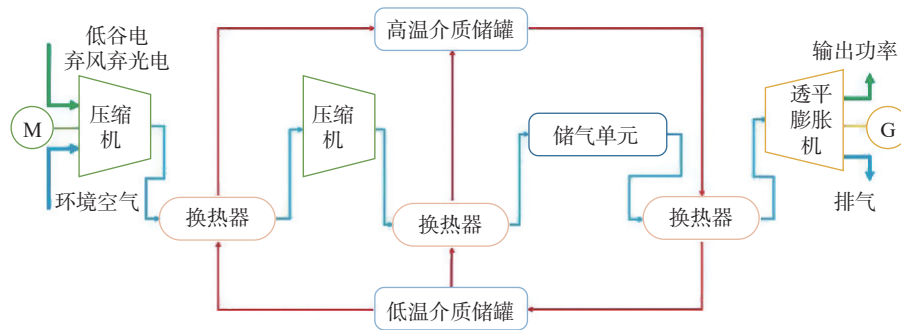


图 4 蓄热式压缩空气储能原理图

Fig. 4 Principle diagram of regenerative CAES technology

目前, 国内蓄热式压缩空气储能技术应用较广, 如江苏金坛 60 MW 压缩空气储能项目于 2022 年 5 月并网; 河北张家口 100 MW 压缩空气储能项目于 2022 年 9 月并网; 湖北应城 300 MW 压缩空气储能项目、甘肃酒泉 300 MW 压缩空气储能项目正在建设中。

3) 等温压缩空气储能技术

该技术采用换热温度控制手段, 使空气在压缩和膨胀过程为准等温过程; 压缩和膨胀过程中实时解耦和耦合压缩热能和压力势能, 使得压缩空气不发生较大的温变(图 5)。等温压缩空气储能技术无燃烧室和储热装置, 结构简单, 运行参数较低。但等温压缩和膨胀过程较难实现, 系统效率较低。因此, 该技术面临最大的问题是实现热量的管理, 即如何保持温度恒定。为实现热量的管理, 需要设计高效

的热交换系统, 可以使用高导热材料和先进的热交换技术提高热传导效率, 同时采用良好的绝热材料减少热量的损失。同时, 等温压缩空气储能技术对压缩机和膨胀机要求较高, 需要克服高温、高压带来的材料强度、密封性和振动等问题, 可采用高温合金、陶瓷材料和精密制造技术等解决。

目前该技术已在美国 New Hampshire 州和 Texas 州分别开展 1.5 MW/1.5 MWh 和 2 MW/500 MWh 的示范项目。

4) 液态压缩空气储能技术

液态压缩空气储能技术主要是利用空气的液化相变特性, 液态空气所需储气库体积较小, 占地面积小。其主要在用电低谷期间, 利用弃风弃光电或低谷电驱动电动机, 并借助压缩机和蓄冷装置将环境空气压缩、冷却、液化存储至低温储罐中; 在用电高

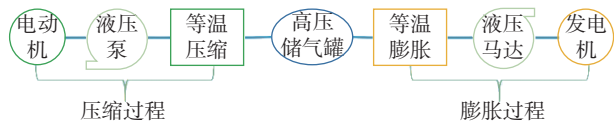


图 5 等温压缩空气储能原理图

Fig. 5 Principle diagram of isothermal CAES technology

峰时, 储罐中的液化压缩空气进行加压、升温, 液态空气气化后进入膨胀机做功, 进而驱动发电机发电 (图 6)。该技术能够大大降低储气库的体积, 占地面积小, 但压缩空气在液化冷却和气化加热过程中, 需消耗部分能量, 造成效率有所下降, 同时增加了蓄冷装置, 导致系统结构复杂。因此, 提高液化压缩空气储能的效率是面临的问题, 可采用高效的压缩机、膨胀机, 并对热交换器进行优化, 减少能量损失。也可以通过智能控制和优化调度算法, 改进压缩和膨胀过程, 提高能量转换效率。

目前, 英国 Highview 公司于 2010 年建成 350 kW/2.5 MWh 液态压缩空气储能示范项目并投入运行, 并开展 5 MW/15 MWh 示范电站; 中科院工程热物理研究所于 2013 年在廊坊建成 1.5 MW 示范系统。

目前, 国内主要以绝热压缩空气储能技术为主, 中科院工程热物理研究所完成了蓄热式压缩空气储能系统研发^[20], 并在此基础上提出超临界压缩空气储能技术; 清华大学提出基于压缩热回馈的非补燃式压缩空气储能技术研究^[21]; 中国能建以 300 MW 级压缩空气储能作为项目研究和开发起点, 提出了“绝热压缩+宽温蓄热+地下储气库”的中国能建系统解决方案, 并针对储换热系统创新性地提出了“高压热水为储热的中温绝热压缩”和“低熔点混合熔盐储热+高压水储热的高温绝热压缩”2 条技术路线^[22]。因此, 未来压缩空气储能技术将朝着大规模、高温绝

热方向发展。

1.3.2 储气设施

储气设施是大规模压缩空气储能电站规划设计首要考虑因素, 对电站建设成本和选址有着重要影响, 也是未来电站运行成败的关键因素^[11-12, 23]。储气设施至少要保证 3 点要求: (1) 容量大, 一般需要至少数十万立方米; (2) 密封性高, 能保证气体不会发生泄漏; (3) 稳定性好, 力学性能稳定能保证长期存储。目前, 储气设施有地上储气设施、天然盐穴、人工硐室等。对于大型压缩空气储能电站而言, 所需要的储气空间较大, 地上储气设施成本较高, 一般适用于中小型电站。从目前压缩空气储能向着规模化发展的趋势, 多数压缩空气储能电站储气设施以盐穴、人工硐室为主。

1) 天然盐穴

盐穴是盐矿开采后留下的矿洞, 具有体积大、密闭性好、储气压力高、成本低、力学性稳定、占地面积小等特点, 我国盐穴资源丰富, 已利用的盐穴约 0.2%, 大部分盐穴都处于闲置状态, 未来可利用的空间较大。

目前, 压缩空气储能电站多数利用盐穴作为储气设施, 盐岩的蠕变和损伤恢复性可以满足频繁的注采需求, 开阔的内部空间使气体更易采出, 德国 Huntorf 电站和美国 McIntosh 电站均采用天然盐穴作为储气设施, 储气规模分别为 $3.1 \times 10^5 \text{ m}^3$ 和 $5.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ 。盐穴虽为一种良好的储气设施, 但其选址受盐穴资源分布限制, 需满足储能电站充放气引起的压力变化, 以及岩层蠕变等要求。

2) 人工硐室

人工硐室主要以混凝土作为衬砌, 配合密封层

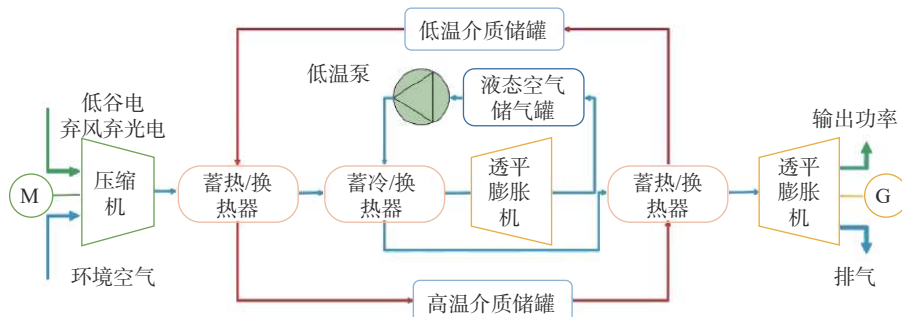


图 6 液态压缩空气储能原理图

Fig. 6 Principle diagram of liquid CAES technology

和围岩组成。储存的高压气体所产生的压力由围岩承担,混凝土衬砌配合密封层实现良好的密封性。目前,河北张家口100 MW压缩空气储能项目采用储气罐+人工硐室的储气方式;中国能建甘肃酒泉300 MW压缩空气储能采用人工硐室作为储气设施,是世界上首套300 MW级压缩空气储能人工硐室储气项目。

人工硐室储气库的最大优点是适合建库的硬岩石类型多,且地层分布广泛,有效摆脱了对盐岩地层的依赖性,适用于拥有丰富风光资源但没有盐穴的三北地区,可实现压缩空气储能与风光资源的联动,但成本较高。未来随着压缩空气储能大规模发展,人工硐室开挖技术逐渐成熟,可使其成本下降规模增大。目前,围绕储能硐库密闭性和稳定性这两大问题,已经开展了初步的试验和理论研究,但仍需针对长期高频注采下的硐库围岩疲劳损伤和密闭性开展系统评价。

2 发展趋势

压缩空气储能是一种具有较广应用前景的储能技术,装机规模已从kW向MW级、百MW级发展,300 MW级压缩空气储能电站已开始建设,压缩空气储能呈现规模化发展,是一种具有较广应用前景的储能技术,势必对未来的电网起到一定的支撑作用^[24]。但尚有一定的发展空间,具体表现为:

1)设备发展展望:压缩空气储能电站存在频繁启停、工况多变等场景,需要对压缩机进一步优化,能够实现宽工况范围内高负荷运行,并且实现在变工况下对压力、排气参数的调整;透平膨胀机需要在变工况下的宽负荷运行,以够适应大范围压力、流量的波动,实现透平膨胀机的安全、高效运行;换热器需要进一步从材料、流道结构、工艺参数上进行优化,提升换热器的传热效率。

2)技术发展展望:寻找更环保的外来热源代替传统补燃式压缩空气储能的化石燃料;开发换热性能高且成本低的换热介质,如低熔点混合熔盐,提高压缩机压缩热的储存温度,提升系统换热效率;压缩空气储能朝着大规模方向发展,随着单级规模提升,可有效降低投资成本,提高系统效率;储气设施需要加大对现有盐穴资源的充分利用,同时,加强对人工硐室储气设施的研究,以适应盐穴资源较为贫乏的

地区。

3)应用场景展望:压缩空气储能作为一种长时储能,具有快速启停、循环寿命长、负荷适应性强等特点,在削峰填谷、新能源消纳、调频调峰、无功调节、旋转备用、应急电源、黑启动等方面具有广泛的应用。同时,压缩空气储能作为一种具有储热、储电、储气的系统,具有冷热电联供的特点,可充分与综合能源系统结合,发挥自身优势,实现综合能源系统的冷-热-电三联供。

3 结论

压缩空气储能通过电能、势能、热能等能量的相互转换,实现电能的储存和释放,是未来大规模长时储能的最佳选择。通过以上研究,得到以下结论和认识:

1)传统补燃式压缩空气储能不符合国家双碳目标且效率低,发展受限。非补燃式压缩空气储能通过回收压缩热,提高系统转换效率。高温储热是压缩空气储能发展的方向,随着储热参数的提高,可以达到更高的转换效率。

2)压缩机、膨胀机和换热器作为压缩空气储能三大关键设备,其技术迭代升级优化是未来的必然趋势,如开发高温压缩机、宽负荷膨胀机、高效换热器、宽温域储热介质等,都会推动压缩空气储能效率的提升。

3)压缩空气储能将朝着大规模方向发展,通过实施大规模化,降低系统单位投资成本,便于规模化推广,符合新型电力系统要求。

参考文献:

- [1] 王新宝,葛景,韩连山,等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(5): 172-179. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221158.
WANG X B, GE J, HAN L S, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system [J]. *Power system protection and control*, 2023, 51(5): 172-179. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221158.
- [2] 李建林,梁策,张则栋,等. 新型电力系统下储能政策及商业模式分析[J]. *高压电器*, 2023, 59(7): 104-116. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2023.07.012.
LI J L, LIANG C, ZHANG Z D, et al. Analysis of energy storage policies and business models in new power system [J]. *High voltage apparatus*, 2023, 59(7): 104-116. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2023.07.012.

- [3] 徐三敏, 张云飞, 赵添辰, 等. "双碳"目标下新型电力系统发展综述 [J]. *水电与抽水蓄能*, 2022, 8(6): 21-25. DOI: [10.3969/j.issn.2096-093X.2022.06.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-093X.2022.06.005).
XU S M, ZHANG Y F, ZHAO T C, et al. Overview of new-type power system development under the background of carbon peaking and carbon neutrality [J]. *Hydropower and pumped storage*, 2022, 8(6): 21-25. DOI: [10.3969/j.issn.2096-093X.2022.06.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.2096-093X.2022.06.005).
- [4] 陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2022 年中国储能技术研究进展 [J]. *储能科学与技术*, 2022, 12(5): 1516-1552. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0330](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0330).
CHEN H S, LI H, XU Y J, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2022 [J]. *Energy storage science and technology*, 2022, 12(5): 1516-1552. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0330](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0330).
- [5] 王朔, 周格, 禹习谦, 等. 储能技术领域发表文章和专利概况综述 [J]. *储能科学与技术*, 2017, 6(4): 810-838. DOI: [10.12028/j.issn.2095-4239.2017.0023](https://doi.org/10.12028/j.issn.2095-4239.2017.0023).
WANG S, ZHOU G, YU X Q, et al. Overview of research papers and patents on energy storage technologies [J]. *Energy storage science and technology*, 2017, 6(4): 810-838. DOI: [10.12028/j.issn.2095-4239.2017.0023](https://doi.org/10.12028/j.issn.2095-4239.2017.0023).
- [6] 梅生伟, 薛小代, 陈来军. 压缩空气储能技术及其应用探讨 [J]. *南方电网技术*, 2016, 10(3): 11-15,31. DOI: [10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2016.03.002](https://doi.org/10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2016.03.002).
MEI S W, XUE X D, CHEN L J. Discussion on compressed air energy storage technology and its application [J]. *Southern power system technology*, 2016, 10(3): 11-15,31. DOI: [10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2016.03.002](https://doi.org/10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2016.03.002).
- [7] 张玮灵, 古含, 章超, 等. 压缩空气储能技术经济特点及发展趋势 [J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(4): 1295-1301. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0645](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0645).
ZHANG W L, GU H, ZHANG C, et al. Technical economic characteristics and development trends of compressed air energy storage [J]. *Energy storage science and technology*, 2023, 12(4): 1295-1301. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0645](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0645).
- [8] BUDET 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. DOI: [10.1016/j.apenergy.2016.02.108](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.108).
- [9] 梅生伟, 公茂琼, 秦国良, 等. 基于盐穴储气的先进绝热压缩空气储能技术及应用前景 [J]. *电网技术*, 2017, 41(10): 3392-3399. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2017.1992](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2017.1992).
MEI S W, GONG M Q, QIN G L, et al. Advanced adiabatic compressed air energy storage system with salt cavern air storage and its application prospects [J]. *Power system technology*, 2017, 41(10): 3392-3399. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2017.1992](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2017.1992).
- [10] 张建军, 周盛妮, 李帅旗, 等. 压缩空气储能技术现状与发展趋势 [J]. *新能源进展*, 2018, 6(2): 140-150. DOI: [10.3969/j.issn.2095-560x.2018.02.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-560x.2018.02.008).
ZHANG J J, ZHOU S N, LI S Q, et al. Overview and development tendency of compressed air energy storage [J]. *Advances in new and renewable energy*, 2018, 6(2): 140-150. DOI: [10.3969/j.issn.2095-560x.2018.02.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-560x.2018.02.008).
- [11] 万明忠, 纪文栋, 商浩亮, 等. 压缩空气储能地下盐穴物探关键问题及处理技术 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(2): 26-31. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.004](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.004).
WAN M Z, JI W D, SHANG H L, et al. Key problems and techniques of geophysical exploration in underground salt cavern for compressed air energy storage [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(2): 26-31. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.004](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.004).
- [12] 万明忠, 王辉, 纪文栋, 等. 压缩空气储能电站盐穴选址关键流程及控制因素 [J]. *电力勘测设计*, 2022(12): 1-4,41. DOI: [10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2022.12.001](https://doi.org/10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2022.12.001).
WAN M Z, WANG H, JI W D, et al. Critical process and controlling factor of salt cavern site selection in compressed air energy storage power station [J]. *Electric power survey & design*, 2022(12): 1-4,41. DOI: [10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2022.12.001](https://doi.org/10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2022.12.001).
- [13] 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. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.172138](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.172138).
MEI S W, LI R, CHEN L J, et al. An overview and outlook on advanced adiabatic compressed air energy storage technique [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(10): 2893-2907. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.172138](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.172138).
- [14] 陈海生, 刘金超, 郭欢, 等. 压缩空气储能技术原理 [J]. *储能科学与技术*, 2013, 2(2): 146-151. DOI: [10.3969/j.issn.2095-4239.2013.02.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4239.2013.02.008).
CHEN H S, LIU J C, GUO H, et al. Technical principle of compressed air energy storage system [J]. *Energy storage science and technology*, 2013, 2(2): 146-151. DOI: [10.3969/j.issn.2095-4239.2013.02.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4239.2013.02.008).
- [15] 姜小峰, 李季, 陆云, 等. 大规模压缩空气储能电站主厂房设计优化分析 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(2): 32-38. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.005](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.005).
JIANG X F, LI J, LU Y, et al. Optimization analysis of main power house design of a large-scale compressed air energy storage power station [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(2): 32-38. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.005](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.02.005).
- [16] 王富强, 王汉斌, 武明鑫, 等. 压缩空气储能技术与发展 [J]. *水力发电*, 2022, 48(11): 10-15. DOI: [10.3969/j.issn.0559-9342.2022.11.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.0559-9342.2022.11.003).
WANG F Q, WANG H B, WU M X, et al. Compressed air energy storage technology and development [J]. *Water power*, 2022, 48(11): 10-15. DOI: [10.3969/j.issn.0559-9342.2022.11.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.0559-9342.2022.11.003).
- [17] 李季, 黄恩和, 范仁东, 等. 压缩空气储能技术研究现状与展望 [J]. *汽轮机技术*, 2021, 63(2): 86-89,126. DOI: [10.3969/j.issn](https://doi.org/10.3969/j.issn).

- 1001-5884.2021.02.002.
- LI J, HUANG E H, FAN R D, et al. Research status and development prospects of compressed air energy storage technology [J]. *Turbine technology*, 2021, 63(2): 86-89,126. DOI: [10.3969/j.issn.1001-5884.2021.02.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-5884.2021.02.002).
- [18] 梁银林, 刘庆, 钱勇, 等. 压缩空气储能系统研究概述 [J]. *东方电气评论*, 2020, 34(3): 82-88. DOI: [10.3969/j.issn.1001-9006.2020.03.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9006.2020.03.018).
- LIANG Y L, LIU Q, QIAN Y, et al. Overview of the research on compressed air energy storage system [J]. *Dongfang electric review*, 2020, 34(3): 82-88. DOI: [10.3969/j.issn.1001-9006.2020.03.018](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9006.2020.03.018).
- [19] 夏晨阳, 杨子健, 周娟, 等. 基于新型电力系统的储能技术研究 [J]. *内蒙古电力技术*, 2022, 40(4): 3-12. DOI: [10.19929/j.cnki.nmgdljs.2022.0058](https://doi.org/10.19929/j.cnki.nmgdljs.2022.0058).
- XIA C Y, YANG Z J, ZHOU J, et al. Research of energy storage technology based on new power system [J]. *Inner Mongolia electric power*, 2022, 40(4): 3-12. DOI: [10.19929/j.cnki.nmgdljs.2022.0058](https://doi.org/10.19929/j.cnki.nmgdljs.2022.0058).
- [20] 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. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0105](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0105).
- CHEN H S, LI H, MA W T, et al. Research progress of energy storage technology in China in 2021 [J]. *Energy storage science and technology*, 2022, 11(3): 1052-1076. DOI: [10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0105](https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0105).
- [21] 梅生伟, 张通, 张学林, 等. 非补燃压缩空气储能研究及工程实践——以金坛国家示范项目为例 [J]. *实验技术与管理*, 2022, 39(5): 1-8, 14. DOI: [10.16791/j.cnki.sjg.2022.05.001](https://doi.org/10.16791/j.cnki.sjg.2022.05.001).
- MEI S W, ZHANG T, ZHANG X L, et al. Research and engineering practice of non-supplementary combustion compressed air energy storage: taking Jintan national demonstration project as an example [J]. *Experimental technology and management*, 2022, 39(5): 1-8, 14. DOI: [10.16791/j.cnki.sjg.2022.05.001](https://doi.org/10.16791/j.cnki.sjg.2022.05.001).
- [22] 万明忠, 杨易凡, 袁照威, 等. 大容量压缩空气储能关键技术 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(6): 26-33. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.003).
- WAN M Z, YANG Y F, YUAN Z W, et al. Key technologies of large-scale compressed air energy storage [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(6): 26-33. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.003).
- [23] 蒋中明, 唐栋, 李鹏, 等. 压气储能地下储气库选型选址研究 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(3): 6-16. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.002).
- JIANG Z M, TANG D, LI P, et al. Research on selection method for the types and sites of underground repository for compressed air storage [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(3): 6-16. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.002).
- [24] 郭祚刚, 马溪原, 雷金勇, 等. 压缩空气储能示范进展及商业应用场景综述 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(3): 17-26. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.003).
- GUO Z G, MA X Y, LEI J Y, et al. Review on demonstration progress and commercial application scenarios of compressed air energy storage system [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(3): 17-26. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.003](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.003).

作者简介:



袁照威

袁照威(第一作者, 通信作者)

1988-, 男, 博士, 高级工程师, 长期从事储能技术研究工作(e-mail) zwyuan6276@ceec.net.cn。

(编辑 叶筠英)