

# 大容量压缩空气储能关键技术

万明忠<sup>1</sup>, 杨易凡<sup>2</sup>, 袁照威<sup>1,✉</sup>, 侯佑松<sup>3</sup>, 邢泰高<sup>4</sup>, 陶刚<sup>1</sup>

(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;  
3. 西安陕鼓动力股份有限公司, 陕西 西安 710075; 4. 湖北楚韵储能科技有限责任公司, 湖北 应城 432400)

**摘要:** [目的] 压缩空气储能作为一种长时储能方式, 在削峰填谷、电网调峰、新能源消纳、辅助服务等方面具有广阔的应用空间, 对于推动“碳中和、碳达峰”背景下加快推进构建以新能源为主体的新型电力系统具有重要意义。[方法] 文章首先从压缩空气储能技术原理、技术分类对压缩空气储能的技术现状进行分析总结; 根据已有技术, 创造性地提出了中能建压缩空气储能系统解决方案, 即高压热水储热的“中温绝热压缩”技术路线以及低熔点熔盐+高压热水联合储热的“高温绝热压缩”技术路线, 并介绍了系统集成及优化、主设备选型、储热介质、储气库、数字化网储协调等技术关键点。最后, 围绕2条技术路线, 分别介绍了相应的工程案例。[结果] 研究表明, 需要综合考虑压缩机系统、膨胀机系统、储热系统、储气系统等各系统的物质流、能量流耦合特点, 开发适用于压缩空气储能用的压缩机、膨胀机、换热器等关键设备及地下储气库、网储协调等关键技术, 进而提升电站转换效率。[结论] 通过研究以期为后续开展压缩空气储能电站工程化提供科学参考。

**关键词:** 大规模长时储能; 压缩空气储能; 低熔点熔盐; 压缩机; 膨胀机

中图分类号: TK01; X382

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)06-0026-08

开放科学(资源服务)二维码:



## Key Technologies of Large-Scale Compressed Air Energy Storage

WAN Mingzhong<sup>1</sup>, YANG Yifan<sup>2</sup>, YUAN Zhaowei<sup>1,✉</sup>, HOU Yousong<sup>3</sup>, XING Taigao<sup>4</sup>, TAO Gang<sup>1</sup>

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

2. China Energy Engineering Corporation Limited, Beijing 100022, China;

3. Xi'an Shaangu Power Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China;

4. Hubei Chuyun Energy Storage Technology Co., Ltd., Yingcheng 432400, Hubei, China)

**Abstract:** [Introduction] As a long-term energy storage form, compressed air energy storage (CAES) has broad application space in peak shaving and valley filling, grid peak regulation, new energy consumption, auxiliary services, and other aspects, which is of great significance for accelerating the construction of a new power system with new energy as the main body in the context of "carbon peak & carbon neutrality". [Method] Firstly, current status of CAES were analyzed and summarized from the principles and technical classifications. Then, based on the current technological development, a creative solution of CAES was proposed by China Energy Engineering Corporation Limited, which includes the "medium temperature adiabatic compression" technology route for high-pressure hot water heat storage and the "high temperature adiabatic compression" technology route for low melting point molten salt and hot water combined heat storage. The key technical points, such as system integration and optimization, equipment selection, heat storage medium, gas storage equipment, and digital network storage coordination, have been introduced. Finally, engineering cases were introduced around the two technical routes. [Result] The results indicate that, in order to improve the conversion efficiency of power plants, it is necessary to comprehensively consider the material flow and energy flow coupling characteristics of various systems, such as compressor system, turbo-expander system, heat storage system, and gas storage system, and then develop the key equipment such as compressors, turbo-expanders, heat exchangers suitable for compressed air energy storage, as well as key technologies such as underground gas storage and grid storage coordination. [Conclusions] The research can provide scientific reference for the subsequent development of CAES.

收稿日期: 2023-08-15 修回日期: 2023-09-01

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科技项目(HBCY-CN-FW2022-15); 中国能源建设集团有限公司工程研究院科技项目(CEECEI-KJ-2022-W01)

**Key words:** large-scale long-term energy storage; compressed air energy storage; low melting point molten salt; compressor; turbo-expander

2095-8676 © 2023 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

在“碳达峰、碳中和”目标下,加快能源结构转型,推动新能源产业迈向高质量发展,构建以新能源为主体的新型电力系统成为当前的目标<sup>[1]</sup>。储能是构建新型电力系统的关键技术,能够提供调峰、调频、备用、黑启动、紧急功率支撑等多种服务,是实现“双碳”目标的重要支撑<sup>[2-3]</sup>。2021年以来,国家及地方政府密集出台300多项与储能相关的政策,为储能产业快速发展提供了指引。

储能分为机械储能(抽水蓄能、压缩空气储能、飞轮储能等)、电磁储能(超导储能、超级电容等)、电化学储能(锂离子电池、铅酸电池、液流电池、钠离子电池等),此外还有储热、储冷、储氢等<sup>[4-5]</sup>。不同储能技术,在寿命、成本、效率、规模、安全等方面优劣不同。同时,由于具体条件不同,储能目的各有差异,储能方式的选择还取决于对发电装机、储能时长、充电频率、占地面积、环境影响等诸多方面的要求<sup>[5-6]</sup>。

随着新型电力系统中风电、光伏等新能源装机及电量占比不断提高,电力系统对可靠电力支撑的时长需求增加,长时储能成为未来储能技术发展的主要方向之一<sup>[2-3]</sup>。在此背景下,压缩空气储能技术(Compressed Air Energy Storage, CAES)作为一种长时储能,具有储能容量大、建设周期短、运行寿命长、安全环保等优点,成为唯一和抽水蓄能媲美的大规模储能技术<sup>[7-9]</sup>。因此,开展CAES相关技术研究对于实现“双碳”目标具有重要意义。

围绕着压缩空气储能技术,国内外众多学者开展了一系列研究。梅生伟等<sup>[10-11]</sup>分析了先进绝热压缩空气储能技术的关键技术问题,在其动态特性基础上,梳理了电站建模、能效提升、运行规划及市场运营等方面的研究现状;陈海生等<sup>[12]</sup>对压缩空气储能的原理、工作过程、关键技术、发展现状及应用领域进行了详细分析;孙晓霞等<sup>[13]</sup>分析了压缩空气储能释能过程中的压力变化,开展了系统不同运行

模式的特性研究。

文章阐述了CAES技术原理及技术现状,提出CAES系统的解决方案,分析电站关键技术,列出相关的工程案例,以期为CAES技术未来应用提供思路和借鉴。

## 1 技术原理及现状

### 1.1 技术原理

CAES技术是一种在燃气轮机基础上发展起来的物理储能技术,利用低谷电或弃风、弃光电将空气压缩,将电能转化为压缩热能和压力势能,压缩热能存储在储热单元中,压力势能存储在储气库单元中;在用电高峰时,释放储热单元中的热能并加热储气装置中释放的压缩空气,压缩空气驱动透平做功,带动发电机发电,将储热单元中的热能和储气单元中的压力势能转化为电能<sup>[14-15]</sup>。该过程实现了电能跨时间、跨空间的转移和利用,其主要包含以下系统(图1):

1)空气压缩子系统:其设备主要为压缩机,一般为多级/多段/多缸压缩机带段间冷却装置。

2)储热子系统:其设备主要为储热设备、换热器设备。通过换热器设备,可以将热流体部分热量传递给冷流体或将冷流体换热到热流体,用于余热回收和利用。

3)储气子系统:实现压缩空气的存储,包括地下盐穴、地下人工硐室、钢制储气罐或压力管线等,钢制储气罐或压力管线造价较高,其次为人工硐室,地下盐穴投资成本最低。

4)膨胀发电子系统:其设备主要为膨胀机,一般为多级/多段/多缸透平带段间再热装置。

5)控制及调度子系统:关键设备的控制系统及各设备之间的调度。

### 1.2 技术分类

CAES技术有多种类型,按照工作介质存储状态分为气态和液态;按照是否需要热源分为补燃式和非补燃式;按照是否利用压缩热分为非绝热式、绝热

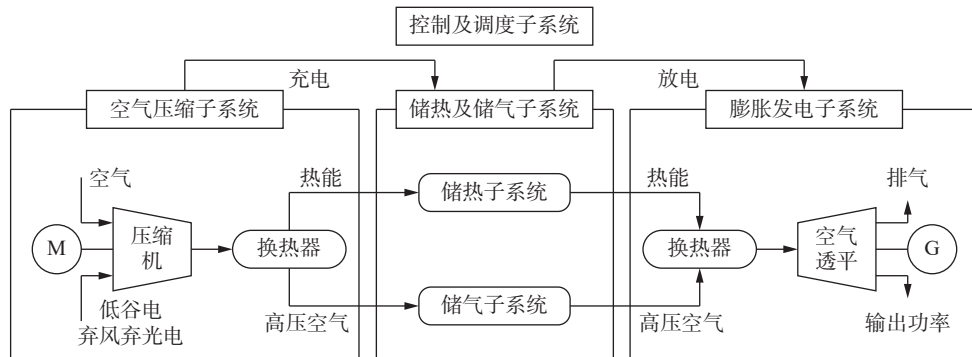


图 1 CAES 技术原理示意图

Fig. 1 Technical schematic diagram of CAES

式和恒温式。不同的标准有不同的分类,主要包括补燃式 CAES、绝热式 CAES、等温 CAES、液态 CAES、超临界 CAES 等<sup>[15-16]</sup>。

### 1) 补燃式 CAES 技术

该技术基于燃气轮机工作原理,在透平入口设置燃烧室,将储气库中的高压空气送到燃烧室,与喷入的燃料混合燃烧生成高温高压空气,高温高压空气进入透平做功,驱动发电机发电。补燃式 CAES 技术采用燃料加热空气,增加透平机做功能力,但是燃烧造成环境污染及二氧化碳排放,不符合“双碳”目标;该技术对天然气等燃料有一定的依赖;压缩过程中产生压缩热未得到有效利用,效率较低,多种因素限制该技术的发展。

补燃式 CAES 最典型的两个案例是德国 Huntorf 电站和美国 McIntosh 电站,二者均通过压缩机级间和级后冷却实现空气冷却,降低压缩机的压缩功,同时在透平装置之前增加燃烧室。McIntosh 电站增加了余热回收装置,降低燃料的消耗量,在同等发电量下,其效率由 Huntorf 电站的 42% 提升至 McIntosh 电站的 54%<sup>[8]</sup>。

### 2) 绝热式 CAES 技术

该技术是将压缩过程产生大量的压缩热进行存储,并利用存储的压缩热加热压缩空气,然后驱动透平做功。整个过程不使用燃料燃烧加热,近似绝热过程。该技术通过对系统压缩热进行回收利用,提高了系统的整体效率,同时压缩膨胀过程中不使用化石燃料,零排放。但由于该过程为近似绝热压缩,对于储热工艺要求较为苛刻,目前实现高温储热较为困难。

绝热式 CAES 技术典型案例为德国 RWE Power

公司提出的 ADELE 项目,设计效率达到 70%,储热温度 600 ℃。由于该项目对设备要求较高,高温高压容器的设计、制造较为困难,项目处于论证阶段。

### 3) 蓄热式 CAES 技术

该技术是在绝热式 CAES 基础上增加了级间热量回收和利用装置,又称为先进绝热 CAES 技术。储能时,压缩机排放的高温空气与来自低温蓄热器中的冷流体交换热量,并将交换后的热流体存储至高温蓄热器中;释能时,来自储气库的高压低温空气与来自高温蓄热器的热流体交换热量,被加热至高温,进入透平做功。相比于绝热式 CAES 技术,蓄热式 CAES 技术储热温度较低,对设备材料要求降低,同时压缩侧功耗降低。但是该系统增加了级间冷却再热装置,增加了系统初始投资。

蓄热式 CAES 技术典型案例主要有中国能建某 300 MW 压缩空气储能项目;河北某 100 MW 压缩空气储能项目;中盐华能某 60 MW 压缩空气储能项目等。

### 4) 等温 CAES 技术

该技术是采用液体活塞、液体喷雾、水泡沫等特殊温度控制手段,增大气液接触面积和接触时间,提升气液换热效果,使空气在压缩和膨胀过程中能量损失降到最低,接近等温过程,进而提高系统的整体效率,理论效率在 70% 以上。该技术无燃烧室和储热装置,但压缩过程中,部分空气易溶解于水中导致部分能量损失<sup>[17]</sup>。

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。

### 5) 液态 CAES 技术

该技术主要是利用空气的液化相变特性, 对压缩空气进行液化处理, 存储液化的空气实现能量存储。由于液态空气的密度要远大于压缩空气, 液化空气所需要的储存容积将大幅度减小, 降低占地面积和系统成本。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<sup>[18]</sup>。

英国建成 350 kW/2.5 MWh 液态 CAES 示范项目并投入运行, 并开展 5 MW/15 MWh 示范电站; 国网江苏建成 500 kW 液态空气储能示范项目。

### 6) 超临界 CAES 技术

该技术于 2009 年中国科学院工程热物理所提出, 主要是利用压缩空气在高压下处于超临界状态 ( $T > 132 \text{ K}$ ,  $P > 3.79 \text{ MPa}$ ) 的特性, 充分结合蓄热和液态 CAES 技术的优势, 具备高能量转化效率和高储能密度的优点。储能时, 压缩机将空气压缩成高温、高压空气, 通过蓄热换热器, 将压缩热储存至蓄热介质中, 空气冷却进入蓄冷换热器, 将空气降温、液化, 存储至低温储罐中; 释能时, 将低温储罐中释放的液态空气加压后, 输送至蓄冷换热器, 换热后空气升温至常温并气化, 输送至蓄热换热器, 对空气进一步加热升温, 进入膨胀机做功<sup>[7]</sup>。

2011 年, 中国科学院工程热物理研究所在北京

建成 15 kW 样机, 并在廊坊建成 1.5 MW 示范项目, 系统效率达 52.1%。

## 2 系统解决方案

### 2.1 技术路线

通过对 CAES 技术的分析, 国内研究更侧重于非补燃式的技术路线。中国能建结合自身优势, 创造性地提出“中国能建压缩空气储能电站系统解决方案”, 即高压热水储热的“中温绝热压缩”技术路线以及低熔点熔盐+高压热水联合储热的“高温绝热压缩”技术路线。

#### 1) “中温绝热压缩”技术路线

“中温绝热压缩”技术路线示意图如图 2 所示。储能过程中, 空气经过过滤器进入压缩机, 压缩机出口高温空气经过气-水换热器换热, 冷水被加热至高温热水存储至高温热水罐中, 换热后的空气经气液分离器分离后进入下一段压缩机。经过多段压缩、多段冷却后的空气存储至储气库中。随着压缩过程的不断进行, 储气库内的压力逐步升高, 压缩机末段排气压力也在不断升高。

释能过程中, 储气库中的高压空气经过空气-水换热器进行换热, 通过热水储罐中的热水与高压空气进行热交换, 换热后的冷水储存在冷水罐中, 加热

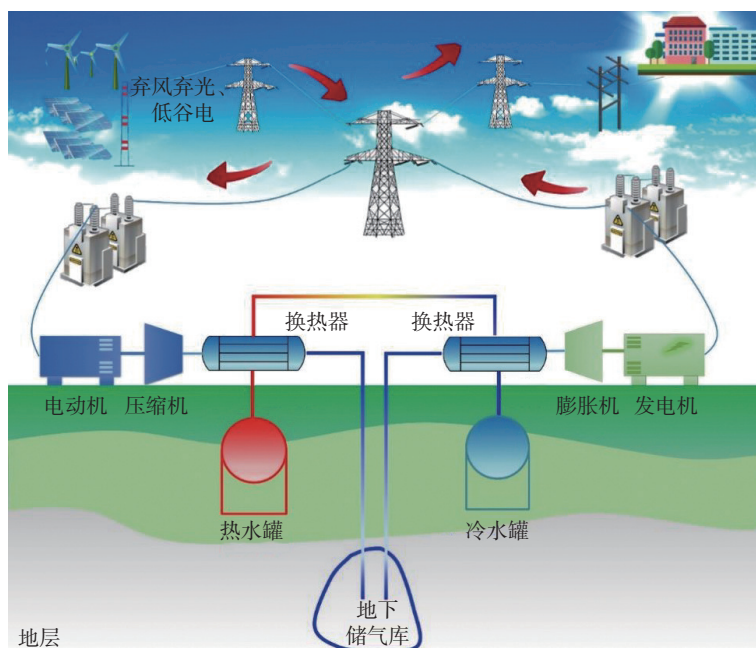


图 2 中温绝热压缩技术路线示意图

Fig. 2 Schematic diagram of medium temperature adiabatic compression

后的空气进入透平做功。通过将压缩过程中的压缩热存储用于膨胀过程中高压空气的加热,冷水、热水在压缩和膨胀过程中循环使用。

## 2) “高温绝热压缩”技术路线

“高温绝热压缩”技术路线示意图如图 3 所示。储能过程中,空气经过过滤器进入压缩机,压缩机出口高温空气经过空气-熔盐换热器换热,低温熔盐被加热至高温熔盐存储至高温熔盐罐中,高温空气经过高温段换热后温度降低,降温后的压缩空气进入气-水换热器换热,冷水被加热至高温热水存储至高温热水罐中,换热后压缩空气的温度进一步降低,输送至气液分离器后进入下一段压缩机。经过多段压缩、多段冷却后的高压常温空气,储存至储气库。随着压缩过程的不断进行,储气库内的压力逐步升高,压缩机末段排气压力也在不断升高。

释能过程中,储气库中的高压空气推动空气透平做功带动发电机发电。储气库中的高压空气首先经主调阀节流至额定压力或经补气阀补气,以维持透平稳定运行,提高透平做功能力。经过调整后的高压空气进入空气-水换热器,经过热水储罐中的热水对低温高压空气加热,换热后的水储存在冷罐中,在下一个压缩储能过程中循环使用。换热后高压空气加热至一定温度后,进入空气-熔盐换热器,经过高温熔盐储罐中的熔盐对高压空气进一步加热,经

过换热后的高压空气转换为高温高压空气进入空气透平做功,换热后的熔盐进入冷熔盐罐进行存储,等待下一次储能压缩过程的进行。待空气膨胀到一定程度后,温度和压力皆有所降低,经过多次换热,高压空气完成多次升温和膨胀做功。

## 2.2 关键技术

CAES 关键技术主要包括系统集成及优化技术<sup>[19]</sup>、主设备的选型及优化技术<sup>[20]</sup>、多介质宽温域储热技术<sup>[21]</sup>、地下储气库技术<sup>[22-23]</sup>、数字化网储协调技术等<sup>[24-25]</sup>。

1) 系统集成化及优化技术:通过对两条工艺技术路线分析,对空气压缩子系统、膨胀发电子系统、储热子系统、储气子系统等全流程建模分析,研究各系统变量对电站技术、经济性的影响规律,分析各系统的能耗及焓损失特点,提出优化方案,提高电站电-电转换效率。

2) 主设备选型及优化技术:在压缩机方面,开展轴流压缩机、离心压缩机及其他形式的压缩机的研究,开发适用于大流量、高压、高温、变工况应用场景下的压缩机选型、配置方案、串并联形式等;在空气透平方面,开展多级膨胀中间再热、大比例补气等相关技术,开发适用于大容量、频繁启停等应用场景下的空气透平。

3) 多介质宽温域储热技术:通过数值模拟和物

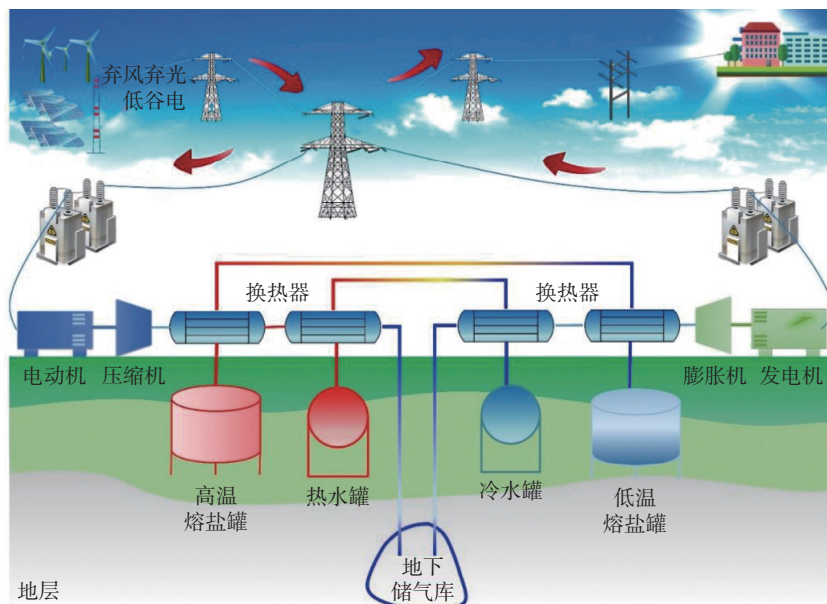


图 3 高温绝热压缩技术路线示意图

Fig. 3 Schematic diagram of high temperature adiabatic compression

模试验,分析高压气、水和气、熔盐瞬态传热特性,开展适用于工程化推广的高压热水储热系统、熔盐储热系统研究,开发大容量球形高压储热罐、新型翅片管式换热器,有效提升储换热效率,降低工程造价。

4) 地下储气库技术:开展地下盐穴、地下人工硐室等储气技术研究,提供适用于不同项目的地下储气方案。在盐穴方面,实现了大型水平压裂井的利用,并提出超大口径注采井的方案;在人工硐室方面,开展了人工硐室选址、结构、密封、监测等方面的研究<sup>[26]</sup>。

5) 数字化网储协调技术:针对压缩空气储能电站频繁启停的特点,开展设备关键部件寿命分析,并根据压缩机组、空气透平发电机组运行特性,完成电站控制技术研究、仿真系统开发、智能电厂设计,实现了机组一键启停。

### 3 应用案例

目前,围绕着“中温绝热压缩”和“高温绝热压缩”两条技术路线,中国能源建设集团已开展相关示范工程。

1) 湖北某 300 MW 压缩空气储能电站示范工程  
该工程采用中温绝热压缩技术路线,盐穴储气,储能时长 8 h,释能时长 5 h,年运行 330 d。

2) 甘肃某 300 MW 压缩空气储能电站示范工程  
该工程采用高温绝热压缩技术路线,人工硐室储气,储能时长 8 h,释能时长 6 h,年运行 330 d。

### 4 结论

压缩空气储能具有储能容量大、建设周期短、运行寿命长、安全环保等诸多优点,有望成为未来大规模长时储能的解决方案之一,对于加快推进构建以新能源为主体的新型电力系统具有重要意义。通过以上研究,得到以下结论和认识:

1) 压缩空气储能技术路线多样化且较为成熟,装机规模由 kW 级向 MW 级,直至当前 300 MW 级规模发展,已进入商业化应用阶段,大批项目处于实施或设计阶段。针对压缩空气储能技术,详细分析了不同压缩空气储能技术的原理、优缺点及应用情况,以期作为压缩空气储能技术的应用和实践提供技术思路。

2) 中国能源建设集团提出“中国能建压缩空气储能电站系统解决方案”,即高压热水储热的“中温绝热压缩”技术路线以及低熔点熔盐+高压热水联合储热的“高温绝热压缩”技术路线,分析了不同技术路线的原理及当前的工程实践情况。

3) 压缩空气储能未来朝着高效率 and 低成本方向发展,系统综合效率与各个子系统的效率密切相关,需要从压缩机、膨胀机、储换热装置等关键设备以及各设备集成方向综合研究。同时,随着压缩空气储能技术和设备的迭代优化,系统大规模产业化后的成本可降至 5 000 元/kW 以下或 1 200 元/kWh 以下,同抽水蓄能系统单位成本基本相当。

4) 随着新能源的快速发展,大规模长时压缩空气储能成为关注的热点,但储能的成本回收模式尚未清晰,需综合考虑国家补偿和激励政策、技术创新机制等,促进国家加快完善新型储能价格机制,实现压缩空气储能健康发展。

### 参考文献:

- [1] 高志远,张晶,庄卫金,等.关于新型电力系统部分特点的思考[J].*电力自动化设备*,2023,43(6):137-143,151. DOI: 10.16081/j.epae.202209007.  
GAO Z Y, ZHANG J, ZHUANG W J, et al. Thoughts on some characteristics of new style power system [J]. *Electric power automation equipment*, 2023, 43(6): 137-143,151. DOI: 10.16081/j.epae.202209007.
- [2] 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.
- [3] 邓秋根,曹建华.基于“双碳”战略的新型电力系统储能方案研究[J].*电工技术*,2023(10):49-51. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2023.10.013.  
DENG Q G, CAO J H. Research on new power system energy storage scheme based on double carbon strategy [J]. *Electric engineering*, 2023(10): 49-51. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2023.10.013.
- [4] 林晓珊,李勇.“双碳”背景下的储能技术分析[J].*电工技术*,2023(4):55-57,130. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2023.04.017.  
LIN X S, LI Y. Analysis of energy storage technology under the background of “dual carbon” [J]. *Electric engineering*, 2023(4): 55-57,130. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2023.04.017.
- [5] 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*,2023,12(5):1516-1552. DOI: 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*, 2023, 12(5): 1516-1552. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0330.
- [6] 李杨楠, 张国钧, 程一步. 不同储能技术的经济性及应用前景分析 [J]. *石油石化绿色低碳*, 2023, 8(3): 1-8. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0942.2023.03.001.
- LI Y N, ZHANG G Y, CHENG Y B. Economic analysis and applications prospect of energy storage technologies [J]. *Energy conservation and emission reduction in petroleum and petrochemical industry*, 2023, 8(3): 1-8. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0942.2023.03.001.
- [7] 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.
- 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.
- [8] 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.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.
- [9] MEI S W, WANG J J, TIAN F, et al. Design and engineering implementation of non-supplementary fired compressed air energy storage system: TICC-500 [J]. *Science China technological sciences*, 2015, 58(4): 600-611. DOI: 10.1007/s11431-015-5789-0.
- [10] 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.
- 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.
- [11] 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.
- 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.
- [12] 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.
- 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.
- [13] 孙晓霞, 桂中华, 高梓玉, 等. 压缩空气储能系统动态运行特性 [J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(6): 1840-1853. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0181.
- SUN X X, GUI Z H, GAO Z Y, et al. Dynamic characteristics of compressed air energy storage system [J]. *Energy storage science and technology*, 2023, 12(6): 1840-1853. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0181.
- [14] 李阳海, 徐万兵, 张彪, 等. 压缩空气储能技术与应用 [J]. *湖北电力*, 2022, 46(4): 1-7. DOI: 10.19308/j.hep.2022.04.001.
- LI Y H, XU W B, ZHANG B, et al. Compressed air energy storage technology and its application [J]. *Hubei electric power*, 2022, 46(4): 1-7. DOI: 10.19308/j.hep.2022.04.001.
- [15] 张新敬. 压缩空气储能系统若干问题的研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院 (工程热物理研究所), 2011.
- ZHANG X J. Investigation on compressed air energy storage system [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences), 2011.
- [16] 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.
- 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.
- [17] 何青, 王珂. 等温压缩空气储能技术及其研究进展 [J]. *热力发电*, 2022, 51(8): 11-19. DOI: 10.19666/j.rfd.202203042.
- HE Q, WANG K. Research progress of isothermal compressed air energy storage technology [J]. *Thermal power generation*, 2022, 51(8): 11-19. DOI: 10.19666/j.rfd.202203042.
- [18] 肖力木, 高欣, 张世海, 等. 耦合 LNG 及 ORC 的液态空气储能系统热力学分析 [J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(1): 155-164. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0474.
- XIAO L M, GAO X, ZHANG S H, et al. Thermodynamic analysis on the liquid air energy storage system with liquid natural gas and organic Rankine cycle [J]. *Energy storage science and technology*, 2023, 12(1): 155-164. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2022.0474.
- [19] 凌晨, 吴斌, 朱学成, 等. 350 MW 级先进压缩空气储能系统建模与特性分析 [J]. *能源研究与利用*, 2023, (5): 28-32. DOI: 10.16404/j.cnki.issn1001-5523.2023.05.008.
- LING C, WU B, ZHU X C, et al. System modeling and performance analysis of 350 MW advanced adiabatic compressed air energy storage system [J]. *Energy research & utilization*, 2023, (5): 28-32. DOI: 10.16404/j.cnki.issn1001-5523.2023.05.008.
- [20] 孙劲彪, 姚少勇, 周新军, 等. 先进绝热压缩空气储能系统的优化研究 [J]. *电力勘测设计*, 2023, (7): 89-94. DOI: 10.13500/j.

- dlkcsj.issn1671-9913.2023.07.017.  
SUN J B, YAO S Y, ZHOU X J, et al. Optimization research of advanced adiabatic compressed air energy storage system [J]. *Electric power survey & design*, 2023,(7): 89-94. DOI: 10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2023.07.017.
- [21] 曹福林. 钛酸铋钠基超宽温区 MLCC 介质材料制备与介电性能研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2023. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2023.000417.  
CAO F L. Preparation and dielectric properties of bismuth sodium titanate based MLCC dielectric materials [D]. Xi'an University of Technology, 2023. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2023.000417.
- [22] 蒋志容, 侯彦硕, 丁平, 等. 水电洞室压缩空气储能地下储气库可行性分析 [J]. *四川水力发电*, 2023, 42(增刊 1): 22-28, 35.  
JIANG Z R, HOU Y S, DING P, et al. Feasibility analysis of underground gas storage for compressed air energy storage in hydropower caverns [J]. *Sichuan water power*, 2023, 42(Suppl.1): 22-28, 35.
- [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.  
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.
- [24] 李小仁, 钱则刚, 杨启超, 等. 压缩空气储能技术现状分析 [J]. *流体机械*, 2013, 41(8): 40-44. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0329.2013.08.009.  
LI X S, QIAN Z G, YANG Q C. Technique summarize and efficiency analysis of compressed air energy storage [J]. *Fluid machinery*, 2013, 41(8): 40-44. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0329.2013.08.009.
- [25] 李菲菲, 崔金栋, 汪羽晴, 等. 碳中和视角下新型储能产业与数字化耦合发展路径研究 [J/OL]. *情报科学*:1-17. [2023-11-06]. <https://link.cnki.net/urlid/22.1264.G2.20231102.1727.002>.  
LI F F, CUI J D, WANG Y Q, et al. The coupled development path of new energy storage industry and digitalization from the perspective of carbon neutral [J/OL]. *Information science*:1-17. [2023-11-06]. <https://link.cnki.net/urlid/22.1264.G2.20231102.1727.002>.
- [26] 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.  
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.

## 作者简介:



万明忠

万明忠 (第一作者)

1964-, 男, 学士, 正高级工程师, 长期从事压缩空气储能技术研究。

袁照威 (通信作者)

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

(编辑 赵琪)