

# 枯竭油气藏储能技术发展现状与展望

陈雷军 (山东莱克工程设计有限公司, 山东 东营 257000)

**摘要:** 储能技术可以实现电能转移, 是促进风能、太阳能等可再生能源发电适应生产用电负荷的有效途径, 在能源工业领域中发挥着重要的作用。我国油气田分布广泛, 并与我国风光资源分布地理特征较为吻合, 因而枯竭油气藏具有开展集中风光场站大规模储能的广阔应用前景。压缩空气储能由于其清洁、高效、低成本、使用寿命长, 是一种很有前途的储能技术。本文介绍了压缩空气储能 (CAES) 的最新技术并论证了 CAES 的基本原理、分类和操作模式, 详细阐述了 CAES 的关键子系统, 通过以上分析对 CAES 在能源工业中的应用前景进行了探讨。

**关键词:** 枯竭油气藏; 新型储能技术; 空气储能; 新能源

## 1 前言

可再生能源的开发利用是解决全球化石能源危机和环境污染问题的重要手段。由于风能和太阳能等可再生能源的波动性和随机性, 将这些能源发电整合到电网中, 对现代电力系统的安全运行和电力质量带来了巨大的挑战。因此, 如何安全、高效、经济地利用可再生能源得到了广泛的关注。

储能技术是解决上述问题的重要手段。储能系统 (ESS) 能够重塑负荷轮廓, 从而增加了系统运行的灵活性, 并有助于利用大规模的可再生能源。同时, 大规模储能技术可以减小峰谷负荷的差距, 提高发电资产的效率。ESS 在智能电网和能源互联网中发挥着重要的作用, 成为能源研究领域的热点。目前有几种成熟的储能技术, 包括化学电池储能、抽水蓄能和压缩空气储能。其中, 化学电池储能技术是最受欢迎的一种, 但其投资和回收成本以及潜在的环境问题限制了其大规模的应用。抽水蓄能被广泛应用于水资源丰富的地区, 然而特殊的地理条件限制了可用的场地, 潜在的生态破坏阻碍了进一步的推广抽水蓄能技术。CAES 具有施工约束少、高效、环保的特点, 有望成为最有前途的能源存储技术之一, 以解决可再生能源在智能电网和能源互联网发展中所面临的诸多问题。当前已实现商业运营的压缩空气储能电站采用地下盐穴作为储气库, 然国内可用于建造盐穴的岩盐资源主要分布于东南部分海相沉积地区, 与我国风光资源三北多、东南少的赋藏特征相左, 即不利于风光资源的大容量配储, 又限制了压缩空气储能的推广应用。枯竭油气藏与岩盐资源相比, 与国内风光资源分布的重合性更高, 因而更易于和风光产业形成协同效应。此外, 作为油气开采的遗存, 油气藏储气库的容量大、

成本低, 有助于进一步实现压缩空气储能在国内更广域的覆盖, 因而推广应用前景巨大。可用深地空间资源分布示意图如图 1 所示。

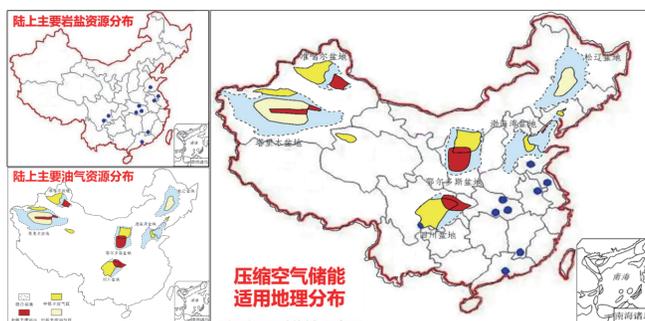


图 1 压缩空气储能可用深地空间资源分布示意图

中国科学院工程热物理研究所从 2009 年将常规 CAES 技术和液化空气储能技术相结合, 开始研究超临界 CAES 技术。到目前为止, IET-CAS 已经完成了 15kW 的实验装置和 1.5MW 的示范工程。CAES 技术仍处于早期发展阶段, 为了深入了解 CAES 技术, 探讨未来的应用方向, 本文介绍 CAES 技术的基本原理和技术现状, 并分析了相关的关键技术和研究进展。

## 2 压缩空气储能 (CAES) 技术发展情况

CAES 是一种基于燃气轮机技术的储能技术, 在储能期间利用电力压缩空气, 通过地下盐穴、地下矿井、废弃油气藏等将高压空气储存在储层中, 在供电阶段释放压缩空气驱动涡轮机发电。简单地说, CAES 的充电寿命取决于其机械水平, 这意味着它可以类比为储能电池但不容易产生储能容量的损耗。CAES 项目的寿命为 30 至 40 年。在充电过程中, 压缩机利用非高峰电力, 减少风和太阳能来压缩环境空气。到目前, 已开发各种 CAES 体系结构。根据是否需要燃料燃烧的标准, CAES 可分为补燃压缩空气储能 (SF-

CAES) 和非补燃压缩空气储能 (NSF-CAES)。

### 2.1 补燃压缩空气储能 (SF-CAES)

除了的基本结构外, SF-CAES 架构在能量过程中需要燃料燃烧做工的过程, 以实现循环运行。燃气轮机的压缩机和涡轮机通常同时运行, 而 SF-CAES 的压缩机则单独工作。同时, 燃气轮机压缩机消耗燃气轮机产生的一部分功率来压缩环境空气。但 SF-CAES 在空气压缩阶段不需要消耗涡轮机产生的功率。在这方面, SF-CAES 系统对化石燃料有很强的依赖性, 气体燃烧也会造成环境的污染。

### 2.2 非补燃压缩空气储能 (NSF-CAES)

与 SF-CAES 不同, NSF-CAES 基于热再生技术回收、储存和重用压缩热来加热进入涡轮机的压缩空气。NSF-CAES 系统的典型设计方案包括不加辅助燃烧的非绝热压缩、加单级热能回收的绝热压缩和加多级热能回收的绝热压缩。

NSF-CAES 独立于燃料, 用压缩热代替补充燃料燃烧, 因此不会产生有害气体。该系统可用于用储存的压缩热加热和用从涡轮机排出的低温空气冷却。新能源可同时提供冷、热、电, 实现能源综合利用, 提高系统效率。

## 3 压缩空气储能 (CAES) 项目实施情况

### 3.1 大型 CAES 系统

规模容量超过 50MW 可归类为大规模的 CAES 系统。目前世界上有两个商业的 CAES 厂: 德国的亨托夫 CAES 厂和美国的麦金托什 CAES 厂。

亨托夫厂于 1978 年完工, 至今仍在运营中。亨托夫的压缩机功率和输出功率分别为 60MW 和 321MW。亨托夫厂可以连续充电 8 小时, 满足 2 小时的发电。亨托夫厂采用 SF-CAES 架构, 压缩空气储存在一个 600 米深的盐穴中 (储存容量 310000m<sup>3</sup>)。储存压力在 5~7MPa 之间。补充天然气燃烧后的发电效率可达到 42%, 年发电量达到 294465MW·h (2007 年)。

麦金托什厂建于 1991 年, 位于阿拉巴马州, 是全球第二家商业化的 CAES 工厂。它由一个 50MW 的压缩机和一个 110MW 的发电机组组成, 可连续 41 小时并提供 26 小时的供电。压缩空气储存于地下 450m 的盐穴中, 运行压力为 4.5~7.4MPa。与亨托夫厂不同的是, 麦金托什厂通过热交换器对燃气轮机入口进行预热。因此, 系统的热效率提高了 25%, 而整个系统的发电效率提高到了 54%。

需要补充说明的是, 大规模 CAES 的研究过程没

有顺利发展。由于各种原因, 许多 CAES 项目已经被中止。爱荷华州 270MW 的 CAES 项目开始于 2003 年, 2011 年由于地质条件和经济原因中止该项目。俄州的 270MW 的 CAES 项目于 2009 年启动, 在 2013 年由于经济原因暂停。因此, 系统建设成本是制约 CAES 发展的主要因素之一。

### 3.2 小规模 CAES 系统

除了 50MW 规模的大型 CAES 系统外, 一些公司和研究机构已经研究了容量小于 50MW 的小规模 CAES 系统。

北海道松立区的 2 兆瓦上 Ksg CAES 于 1998 年开始建设, 自 2001 年开始投入使用。该 CAES 系统采用了一个深度约 400 米的地下岩石结构孔洞 (储存容量 1600m<sup>3</sup>) 来储存压缩空气, 最大压力达到 8MPa。Ksg CAES 架构也是采用的 SF-CAES 架构。

英国的 Highview Power 公司是 LAES 技术的领导者, 已经在伦敦的 Slough 地区建立了一个 350kW/2.5MW·h 容量的 LAES 试点工厂。自 2011 年 7 月以来, 该工厂已运行并网到英国国家电网。该公司的低温能量系统利用剩余的能量将空气转化为液体, 并将空气储存在低温绝热容器中。通过将 LAES 系统与一个液化空气产生废热液的装置相结合, 预计系统效率将从 25% 提高到 70%。该公司正在曼彻斯特的 Pilsworth 地区建设一个 5MW 的 LAES 前期试点工厂, 还提出了一个 200MW/1.2GW·h 的 LAES 概念工厂。此外, 该公司的 LAES 技术应用在中国张北的风能、太阳能储能输电项目二期工程, 助力实现北京冬奥会低碳化。

Lightsail Energy 公司 (LE) 成立于 2009 年, 致力于小型、模块化的 CAES 解决方案, 也经营高压气体储罐的生产业务。LE 公司在 2015 年底使用了第一个 ESS 系统, 主要采用可逆往复式压缩机/膨胀机, 容量为 250kW。LE 公司产品的热效率有望达到 90%。它的第一代产品, LE V.1, 使可再生能源能够提供比柴油发电机更便宜的电力。第二代产品, LEV.2, 预计将成为第一个能与燃气轮机发电厂 (峰值负荷发电) 竞争电价的 ESS 项目。

最近, 中国开始关注 CAES 技术。中科院热物理所自 2009 年以来一直专注于超临界 CAES 技术。该研究所结合了传统的 CAES 和液体储气系统, 建立了一个 1.5MW 的超临界 CAES 示范系统。在实验中运行超过 168 小时。但是, 该系统还没有完成从弃电-电的转换过程, 即它目前缺乏发电能力过程, 目前该研究

所正在启动一个 10MW 的先进 CAES 系统的研究。

2014 年, 清华大学开发了一套 500kW 的 NSF-CAES 示范装置, 即 TICC-500 装置。该装置采用 NSF-CAES 架构, 完成了冷、热、电联产的实验。它具有零碳排放、高效、运行灵活的优点。与此同时, 清华团队在青海大学建立了 100kW 太阳能 NSF-CAES 装置, 称为 CSHC-100 装置。该团队还根据金坛、海西这两个地区的地理条件, 分别设计了一套 50MW 的盐穴储气 NSF-CAES 系统和一套 10MW 的地下钢管储气 NSF-CAES 系统, 预计电力转换效率将分别达到 52.4% 和 50.3%, 可用于商业运行。基于油田油气藏储气技术和非补燃压缩空气储能技术如图 2 所示, 形成的油气藏压缩空气储能系列关键技术, 可以先应用在枯竭油气藏储气的压缩空气储能试验示范项目中, 并分期实现在油田区域能源系统中的推广应用。

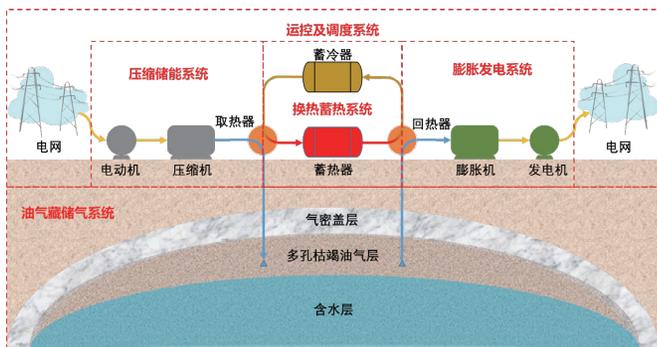


图 2 枯竭油气藏压缩空气储能项目结构原理示意图

虽然部分国家已经探索了大规模和小规模的 CAES 系统, 但在压缩、储气、储热和发电等方面的关键技术突破仍有待实现, 目前多数 CAES 厂的效率都可以继续进行提高。为进一步提高 CAES 的发电效率和市场竞争力, 热力技术和材料技术的发展进步对 CAES 大规模应用具有重要意义。

#### 4 限制 CAES 发展的因素和可能的解决方案

目前, 中国是世界最大的风能和太阳能发电国。然而, 储能建设的进展已经落后。储能发展已成为衡量可再生能源发展水平的重要指标。CAES 作为一种大型储能技术, 具有存储容量大、运行寿命长、无污染等优点, 具有广阔的应用前景。但其储能效率、系统成本等因素阻碍了 CAES 的发展。开发高效、低成本的 CAES 系统是一个迫切需要解决的问题。同时, 建立和完善相应的储能市场机制对储能技术的健康发展具有重要意义。NSF-CAES 系统一般由空气压缩子系统、储气子系统、热再生子系统、汽轮发电子系统组成。该系统的储能效率与子系统密切相关, 因此,

通过提高任何子系统的性能, 都可以提高系统的整体效率。

压缩机作为压缩过程中的核心设施, 决定了储能过程的效率。根据系统的需要, 需要发展大流量、高效、高排气温度的压缩机制造技术。通过提高压缩机的排气温度, 可以提高系统的蓄热温度, 也可以提高系统的储能效率。

传统的 CAES 通常利用空气作为储能介质, 需要容量大、持续高压的储存空间。地下盐穴作为一种大型储气空间, 在地下天然气储气库建设中积累了技术, 满足储气要求。对于没有盐穴储气条件的 CAES 电站, 可依托我国分布广泛的枯竭油气藏进行建设, 大大拓展了 CAES 的应用前景。

换蓄热系统的参数对 NSF-CAES 系统的效率有很大的影响。温度越高, 储能系统的效率就会越高。通过提高换蓄热系统的存储温度和效率, 可以提高系统的整体效率。其主要方法是基于槽式集热器和高温蓄热技术, 利用太阳能提高涡轮机进气温度, 以提高系统的运行能力和储能功率效率。

汽轮机发电系统是放电过程中热电转换的核心部件。其效率决定了储能系统的效率。目前, 还没有专门的大型空气涡轮机。因此, 根据空气的热特性, 开发新型高效的空气涡轮机是提高膨胀发电系统效率的关键。

#### 5 结束语

CAES 作为一种很有前途的储能技术, 具有很大的发展潜力。面对未来的能源领域, 本文重点介绍了应用于枯竭油气藏 CAES 技术各子系统的关键的基本原理、技术特点以及 CAES 技术的应用, 同时为未来的应用前景和发展方向提出了可能的解决方案。

#### 参考文献:

- [1] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(01): 1-9.
- [2] 虞启辉, 高胜昱, 孙国鑫等. 基于风光互补发电系统的压缩空气混合储能系统容量优化 [J]. 新能源进展, 2021(02): 1-8.
- [3] 孔玉明, 王志清. 储能技术的发展现状与展望 [J]. 吉林水利, 2021(10): 3.
- [4] 张华民, 周汉涛, 赵平, 等. 储能技术的研究开发现状及展望 [J]. 能源工程, 2019(3): 7.
- [5] 郭鸿. 新型储能技术的现状与趋势展望 [J]. 集成电路应用, 2023, 40(3): 254-255.