

Technical Progress and Future Prospect of Compressed Air Energy Storage System

Danxi Liang¹, Jie Song¹, Liqiang Duan^{2*}, Jingkai Ma², Kun Xie², Hao Lu², Zhipeng Lv², Mingye Yuan²

¹Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing

²School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing
Email: *dlq-1973@163.com

Received: Aug. 1st, 2016; accepted: Aug. 22nd, 2016; published: Aug. 25th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Compressed air energy storage system through the air compression and expansion to achieve energy storage and release is a kind of energy storage system which has a broad prospect. This paper reviews the operating principle, function, and current development status of compressed air energy storage system. Various typical compressed air energy storage systems are summarized in detail in order to overcome the shortcomings of the traditional compressed air energy storage system. The technical characteristics of new different types of compressed air energy storage systems are analyzed, and the development trend of compressed air energy storage technology is pointed out.

Keywords

Compressed Air, Energy Storage, Development Trend

压缩空气储能系统技术发展和前景展望

梁丹曦¹, 宋洁¹, 段立强^{2*}, 马敬凯², 谢坤², 陆浩², 吕志鹏², 袁明野²

¹全球能源互联网研究院, 北京

²华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京

Email: *dlq-1973@163.com

*通讯作者。

文章引用: 梁丹曦, 宋洁, 段立强, 马敬凯, 谢坤, 陆浩, 吕志鹏, 袁明野. 压缩空气储能系统技术发展和前景展望[J]. 电力与能源进展, 2016, 4(4): 124-135. <http://dx.doi.org/10.12677/aepe.2016.44017>

收稿日期：2016年8月1日；录用日期：2016年8月22日；发布日期：2016年8月25日

摘要

本压缩空气储能系统通过对空气的压缩和膨胀做功实现电能的存储和释放，是一种具有广阔发展前景的储能系统。本文综述了压缩空气储能技术的原理、功能以及应用情况，针对传统压缩空气储能系统的缺点，详细总结了研究人员所提出来的各种新型压缩空气储能系统，分析了不同类型的新型压缩空气储能系统的技术特点，并指出了压缩空气储能技术发展趋势。

关键词

压缩空气，储能，发展趋势

1. 引言

目前，依靠新能源缓解甚至解决传统化石能源危机并处理大量使用化石能源所伴随的环境污染，是一个重要的国家能源发展战略，但是新能源不可避免的问题是发电具有波动性和间歇性，对其进行大规模开发和利用同时保证电力系统运行的安全稳定面临诸多挑战。据最新统计表明：到2016年6月底，风电累计并网容量达到1.37亿千瓦，但是全国的弃风率达21% [1]，造成了能量的严重浪费。采用储能系统将极大地改善风能的利用率，在用电低谷或者发电量充裕且超过需求的时候把电能储存起来，在用电高峰的时候再输出，使得负荷低谷时产生的低品位电能能够用到负荷高峰，转换为高品位电能，避免了负荷低谷电的廉价化和弃用现象，让电厂机组保持高参数运行，维持高能效的同时不浪费电能，实现削峰填谷[1]-[4]。压缩空气储能作为一种具有重要发展前景的技术将会在可再生能源规模化利用中发挥重要的作用。

2. 压缩空气储能的原理

压缩空气储能(Compressed Air Energy Storage, 简称 CAES)，在用电负荷低谷消耗电能(来自风电、太阳能发电、水电、常规火电等)带动压缩机生产出高压空气，存放在储气容器中(地下洞穴或者储气罐)，随后释放高压空气与燃料混合燃烧或者经换热器升温后，在膨胀机里做功发电以满足负荷高峰的需求。CAES 技术用在大规模储能中，容量在 100~300 MW 之间，效率达到 40%~50%，可以直接用在电网调峰，并可减小电厂装机容量[5]，在对地理条件要求不高的基础上，实现对能量的长时储存，不仅具有良好的经济性，还可以在很大的负荷范围内变动。

压缩空气储能是基于燃气轮机技术提出的一种能量存储系统，在燃气轮机中，高压空气混合燃料一起燃烧后形成高温高压燃气，随后进入涡轮膨胀机做功，因为压缩空气的过程需要耗电，大约会占到输出功的 2/3，所以净功是比较低的。而压缩空气储能系统产生高压空气消耗的是供大于求的低谷电，并把电能以高压空气(5~10 MPa)的形式储存在储气装置中，发电时，高压空气混合燃料一起燃烧后形成高温高压燃气，再进入膨胀机做功，整个系统虽然是以燃气轮机为基础，但压缩获得高压空气的过程与高压工质做功的过程是分时进行的，所以在消耗同样燃料情况下，能多获得一倍以上电力。

整个压缩空气储能系统的构成分为六个部分[6]：压缩机，通常是带中间冷却的多级压缩机，用于消耗电能产生高压空气；膨胀机，通常是带中间再热的多级膨胀机；燃烧室或者换热器，用于做功气体升温或者回收余热；储气设备，有地下洞穴或储气罐；电动机或者发电机，在储能和释能时其功能进行切

换；其他辅助设备和控制系统。

3. 压缩空气储能的早期应用

世界上最早投入运行的两座大型商业化运行的压缩空气储能电站是德国的 Huntorf 电站(如图 1 所示)和美国的 McIntosh 电站[7] [8]。Huntorf 电站从 1978 年建成一直运行至今，它的压缩和膨胀过程均为二级，为了减少压气机耗功，压缩时对空气进行级间冷却和级后冷却；为了提高膨胀过程功率，膨胀过程具有中间再热结构。储能阶段，电动机带动压缩机做功，对入口的常温常压气体进行二级压缩，同时使用冷却装置对空气进行级间冷却和级后冷却，然后储存在矿洞中。发电时，高压空气从储气装置中放出进入燃烧室，吸收天然气燃烧释放热量升温后，进入一级透平做功，为了增加功率，对一级透平排气再燃，进入二级透平，驱动透平带动发电机对外输电。储气装置位于地下 600 m 的废弃矿洞，可容纳 $3.1 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的压缩空气，最高储存压力为 10 MPa。充气过程持续 8 h，可满足连续发电 2 h，该电站在 1979 年至 1991 年之间一共并网超过 5000 次，平均可靠性 97.6%，平均可用率 86.3%，由于该系统将透平排气直接排入大气并未进行余热回收，其实际运行效率仅为 42%，造成了一定环境污染和能源浪费。

McIntosh 电站在 1991 年启动运行，与 Huntorf 电站不同，该机组利用透平排气余热加热进入燃烧室前的压缩空气，流程如图 2 所示，这种回热技术使得机组效率进一步提高。储气装置位于地下 450 m 的洞穴，可容纳 $5.6 \times 10^5 \text{ m}^3$ 的压缩空气，充气过程持续 41 h，制备的压缩空气能持续发电 26 h。由于具有回热结构，节能效果好、效率高，McIntosh 电站的单位发电燃料消耗相对于 Huntorf 电站节省了约 25%，其效率提升至 54%。

4. 不同特点的新型压缩空气储能系统

两座已经商业化的压缩空气储能电站，存在着效率低、依赖燃烧室和化石燃料、对环境污染较大、依靠大型储气洞穴选址不灵活等问题。继两座电站之外，美国、日本相继建设了新的压缩空气蓄能系统[9]。为了实现压缩空气储能系统更好发展，国内外学者采用优化热力学循环、耦合利用新能源、与其他现有系统耦合、改变工质状态等方法，提出了许多带有不同特点的新型 CAES 系统。

4.1. 带储热的压缩空气储能系统

传统的压缩空气储能系统一般带有燃烧室，不能摆脱对传统化石燃料的依赖，同时会向大气中排放大量的污染物。为了解决这个问题，国外学者提出了带储热的压缩空气储能系统[10]。

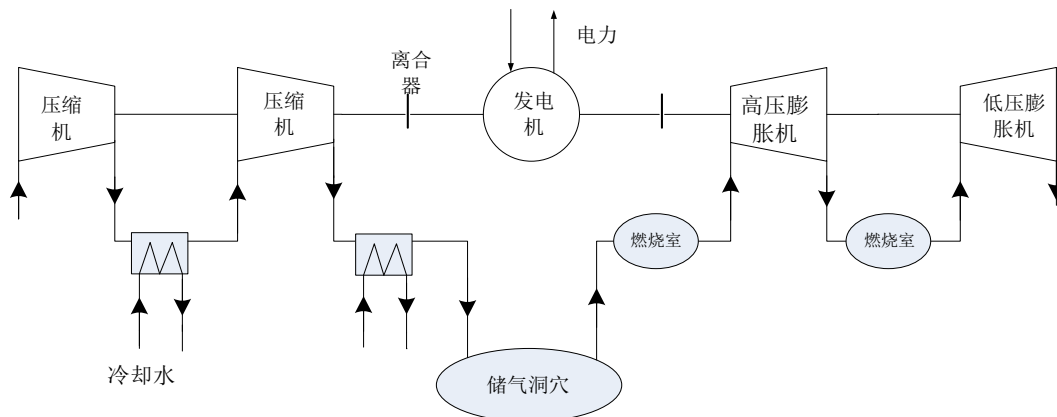


Figure 1. Flowchart of Huntorf power plant of Germany
图 1. 德国的 Huntorf 电站流程图

4.1.1. 先进绝热压缩空气储能系统(AA-CAES)

先进绝热压缩空气储能系统(AA-CAES)是传统的空气压缩储能系统与储热蓄能的结合,去除了燃烧室,将空气压缩过程中的压缩热储存起来,在高压空气膨胀做功时对其进行加热,系统如图3所示。理论上,将空气压缩至10 MPa,温度将达到650℃ [11],因为系统没有燃烧室,为了达到要求的功率,压缩机需要更大压比,同时为了使膨胀机进口温度不致过高,需尽可能增大进气流量。该系统利用了空气压缩时的压缩热,极大地提高了系统效率。目前先进绝热压缩空气储能系统效率已达70% [12] [13]。当然由于增加了储热系统,系统初期投资要相应提高。

4.1.2. 外来热源储热的压缩空气储能系统

空气在绝热压缩过程中,要消耗更多的压缩功,降低了储能系统效率。所以通过存储外来热源代替燃烧室燃料热量,可进一步提高储能系统效率。该系统可利用太阳能热,电力、化工等行业余热以及生活废热作为储能系统外来热源,具有广泛适用性[14]。其中最典型的是与太阳光热结合的带储热压缩空气储能系统,如图4所示,将太阳能热量储存在系统储热装置中,在需要时加热压缩空气,驱动膨胀机做功。本系统既解决了太阳能不稳定和间歇性的问题,又为压缩空气储能系统提供了热量,提高了系统效率。

4.2. 耦合新能源的压缩空气储能系统

耦合新能源的压缩空气储能系统将压缩空气储能系统与可再生能源利用耦合起来,既可以确保电网

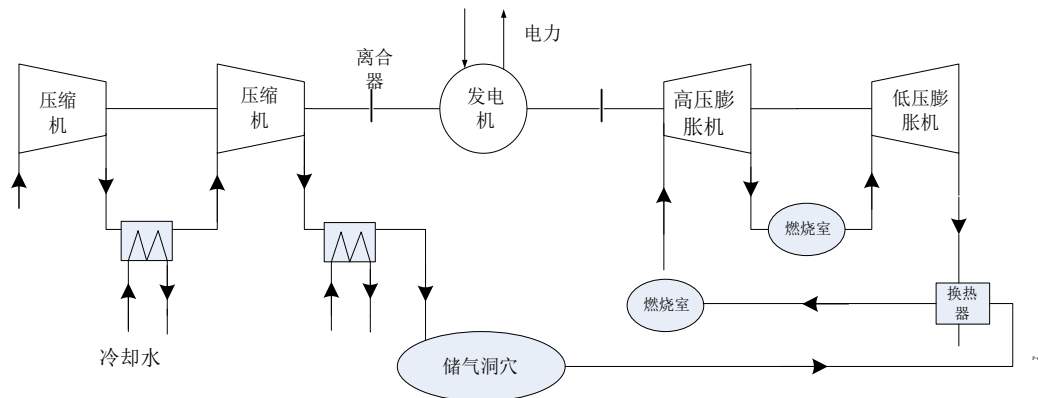


Figure 2. Flowchart of McIntosh power plant of America
图2. 美国的 McIntosh 电站流程图

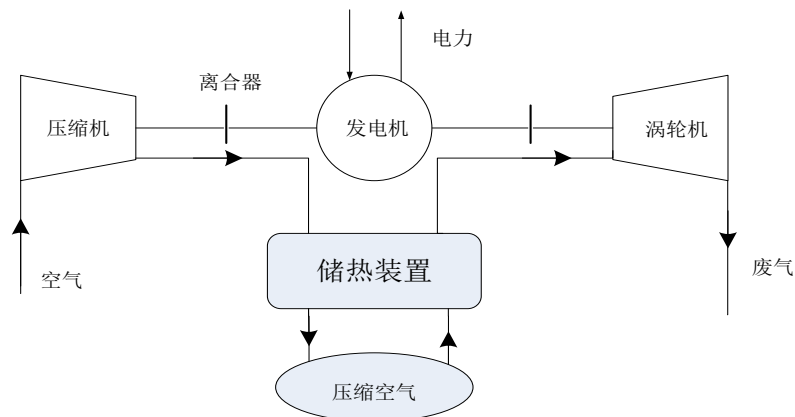


Figure 3. Flowchart of advanced adiabatic compressed air energy storage system
图3. 先进绝热压缩空气储能系统流程图

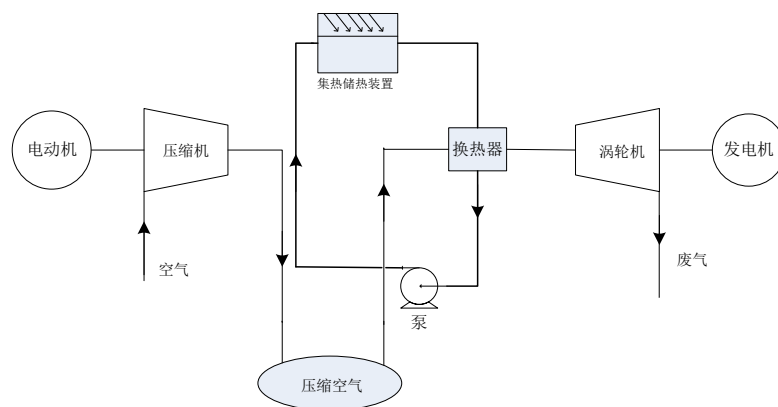


Figure 4. Flowchart of compressed air energy storage system coupled with the external heat source for heat storage

图 4. 外来热源储热的压缩空气储能系统流程图

的安全稳定，又成功降低了“弃风”、“弃光”现象，实现大规模利用新能源目的[15]。

4.2.1. 耦合风电的压缩空气储能系统

耦合风电的压缩空气储能系统即将传统压缩空气储能系统与风力发电系统连接起来，如图 5 所示。当电网不能够容纳产生的全部风电时，将风电场的多余电力驱动储能系统压缩机，压缩并储存空气；当电网可以容纳时，存储的高压空气进入燃烧室吸热并通过膨胀机膨胀做功，弥补电网对电用户的供电不足[16]。杨科等建立了风电与压缩空气储能集成系统的理论模型并对该系统在额定、扰动工况下的能量转化规律进行研究和对比[17]，结果表明：在 1.5 MW 稳定工况下，储能阶段能量转化率为 79%，释能阶段能量转化率为 77%，系统的整体效率约为 59%。谭靖等从经济性方面分析了耦合风电的压缩空气储能系统，结果表明该系统远优于燃煤调峰电站以及其他储能电站[18]。

4.2.2. 风光互补的压缩空气储能系统

风光互补发电系统是将风力发电机组和太阳能发电机组集成为一体的发电系统，虽然有一定的环保效益和稳定性，但是仍然存在不稳定和间歇性缺点，并未彻底解决并网带来的问题[19]。徐玉洁等人提出了一种新型风光互补的储能与发电一体化系统，如图 6 所示[20]。该系统由风力发电机组、太阳能集热/蓄热装置、空气压缩机与存储装置、压缩机级间排热/蓄热装置或透平排气余热回收装置、透平膨胀装置组成。在用电低谷期，风电将空气压缩至高压，并储存在储气装置中，当需要时，将高压空气利用压缩机级间排热、透平回热、和太阳能加热升温，然后在透平中膨胀做功，补充风电的不足。该系统不仅有效解决了大规模利用可再生能源问题，还降低了系统成本，极大地提高了储能系统运行效率。研究表明在给定压缩机效率为 80%，透平效率为 85% 的条件下系统热效率在 46%~61% 之间，储能效率在 52%~78% 之间。

4.2.3. 耦合生物质能的压缩空气储能系统

风耦合生物质能的压缩空气储能系统采用生物质气代替天然气等化石能源作为压缩空气储能的燃料，既降低了温室气体的排放，又在一定程度上降低了对化石能源的依赖，一般是将生物质能气化为生物质气之后应用于压缩空气储能中。由于生物质能的收集和气化带来的成本提高可通过政府对生物质能的补贴来弥补，该技术有一定的发展前景。

4.3. 耦合传统热力循环的压缩空气储能系统

传统压缩空气储能系统功能单一，运行方式不灵活，为了提高系统效率和更好地利用好现有设备，

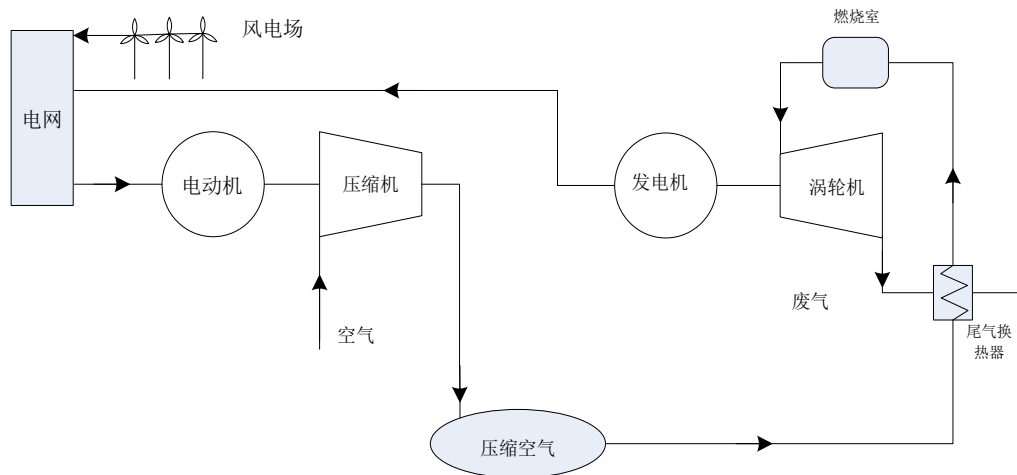


Figure 5. Flowchart of compressed air energy storage system coupled with wind power
图 5. 耦合风电的压缩空气储能系统流程图

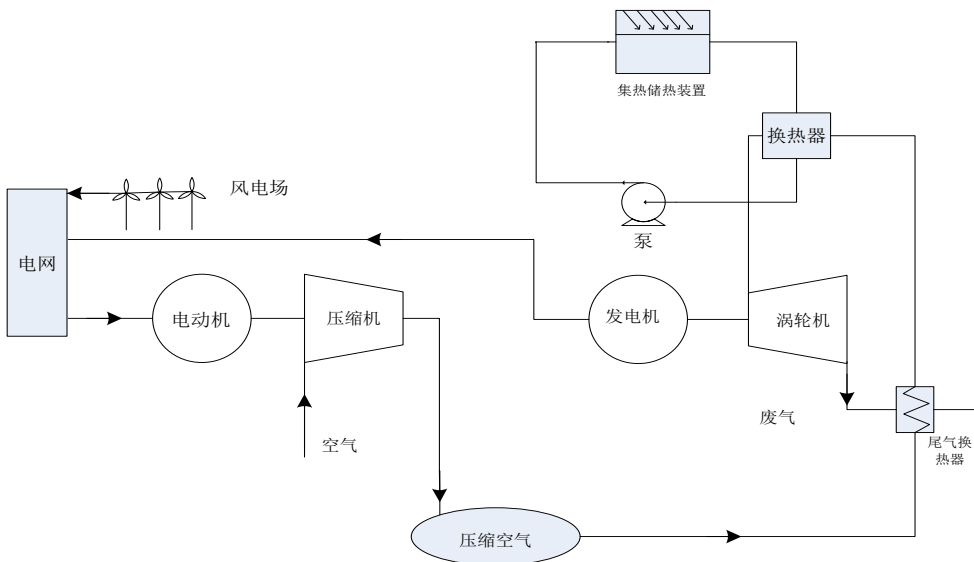


Figure 6. Flowchart of compressed air energy storage system coupled with wind energy and solar energy
图 6. 风光互补的压缩空气储能系统流程图

国内外学者提出了多种压缩空气储能与其他热力循环耦合系统。

4.3.1. 压缩空气储能 - 联合循环的耦合系统

压缩空气储能 - 联合循环的耦合系统是将压缩空气储能系统与燃气蒸汽联合循环耦合起来，如图 7 所示。该系统有三种不同工作模式[21]：1) 用电高峰期联合循环供电不足时，压缩空气进入燃烧室吸热膨胀做功，与联合循环共同发电；2) 压缩空气储能时，将空气压缩过程产生热量供给蒸汽循环，提高联合循环效率；3) 压缩空气释能时，将做功后的废热供给余热锅炉，增加蒸汽轮机做功。该系统有效耦合了压缩空气储能、燃气轮机和蒸汽轮机三种系统，在运行上具有很大灵活性，文献[22]以德国 Huntorf 空气储能压缩电站为基础，提出新型的 CAES-联合循环电站，在参比系统之后安装余热锅炉，将压缩空气储能系统发电阶段的高温排气加热蒸汽轮机给水，产生蒸汽做功。结果表明新循环系统的电耗下降 0.13 kWh/kWh，热耗下降 0.34 kWh/kWh，系统总效率提高了 10 个百分点，远高于参比系统。

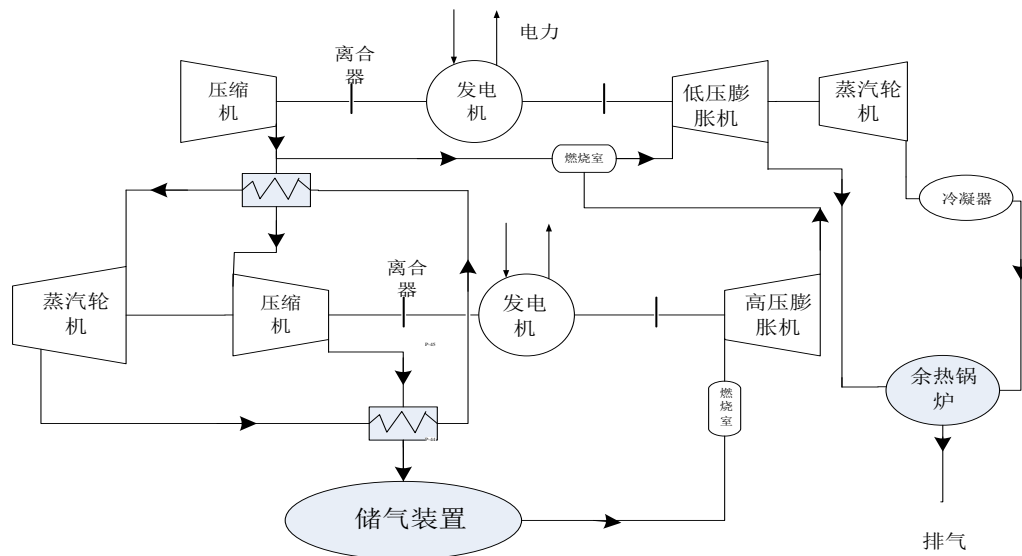


Figure 7. Flowchart of compressed air energy storage system coupled with the gas-steam combined cycle system

图 7. 压缩空气储能 - 联合循环耦合系统流程图

4.3.2. 压缩空气储能 - 内燃机耦合的分布式能源系统

为了能源高效利用，姚尔人等提出一种以压缩空气储能技术为基础与内燃机耦合的热电冷联产系统 [23]，如图 8 所示。在储能过程中，该系统利用电能驱动压机工作，冷却水回收压缩热，冷却后得高压气体存储于储气室中；发电过程中，预热后得高压气体膨胀做功，做功后的气体放热降温后进入内燃机与天然气燃烧发电。系统利用内燃机排气余热对储气室出口高压气体预热，进入吸收式制冷机制冷，最后进入热用户供热。该系统充分利用了各部分热量，有效提高了系统效率。研究表明当内燃机效率达到 40% 左右时，整个系统的能源利用率可以达到 90% 左右。但是，此类系统一般针对 1 MW 以下的小型储能发电系统 [24] [25]，具有造价、运营维护成本低的优势。

除此之外，相关学者提出了压缩空气储能 - 内燃机耦合的汽车动力系统，压缩空气吸收内燃机余热后通过气动发动机提供动力 [26]。研究表明，通过内燃机循环的优化以及废弃能量的再循环利用可以将汽车效率由最初的 15% 提高至 33%，增加 18 个百分点。还有压缩空气储能 - 制冷循环的耦合系统，通过压缩空气膨胀做功驱动制冷机和空气膨胀降温两种方式提供冷量 [27]。

4.4. 用地上高压储罐作为储气装置的储能系统

针对传统大型压缩空气储能系统依赖特定地理条件建设储气空间问题，国内外学者提出了液化空气储能和超临界压缩空气储能等新技术。同时，小型和微型压缩空气储能由于其摆脱了洞穴限制具有很大的灵活性也在不断发展之中。

4.4.1. 液化空气储能系统

液化空气储能系统是将电能转化为液态空气的内能来达到储能目的，它不需要一个体积很大的地下洞穴，只需要一个地上的低温液态空气储槽。一般来说，液化空气储能系统包括 3 个过程：压缩液化过程、存储过程、发电过程，系统效率可达 50%~80% 及以上。它的工作流程如图 9 所示 [28]。

1) 压缩液化过程

富余的电能驱动压缩机将空气压缩，然后压缩空气通入到换热器中与从蓄冷装置和气液分离器中引出的冷空气进行换热冷却，被冷却的压缩空气依次通过膨胀机和节流阀后进入气液分离器，气液分离器

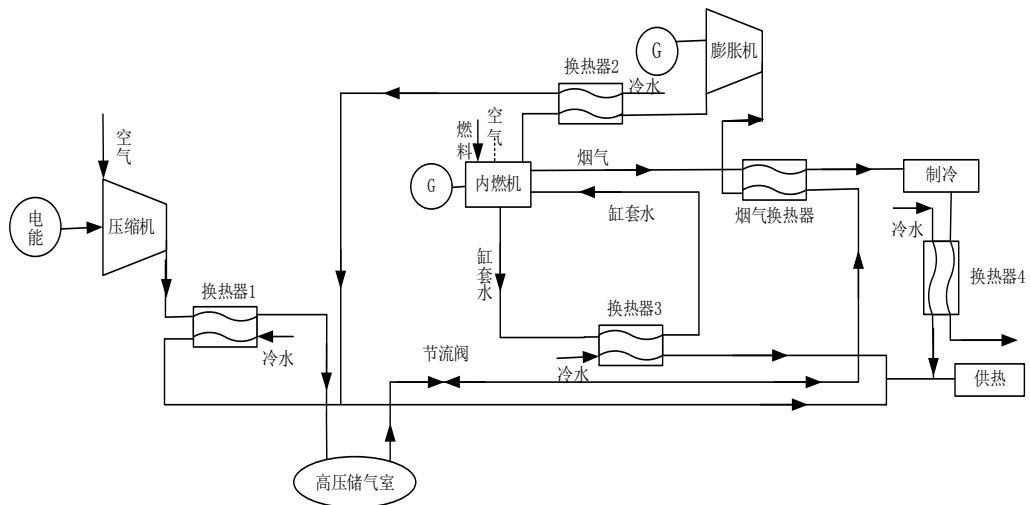


Figure 8. Flowchart of distributed energy system with compressed air energy storage system coupled with internal combustion engine cycle

图 8. 压缩空气储能 - 内燃机循环耦合的分布式能量系统流程图

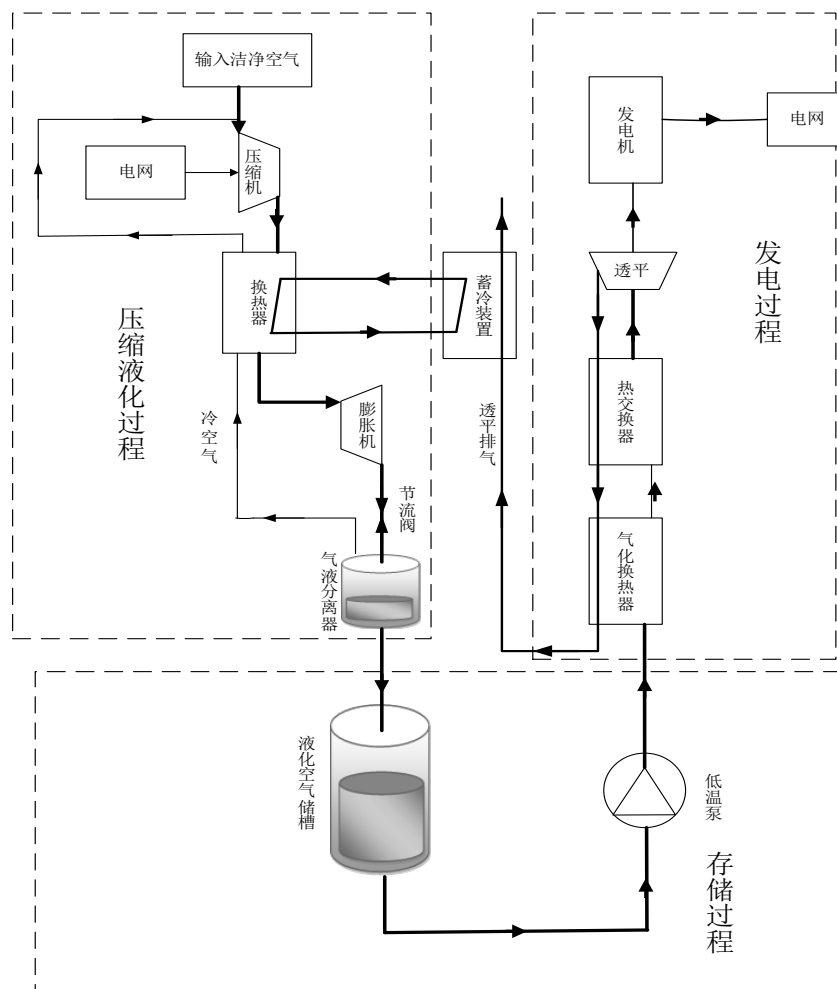


Figure 9. Flowchart of liquid air energy storage system

图 9. 液化空气储能系统工作流程图

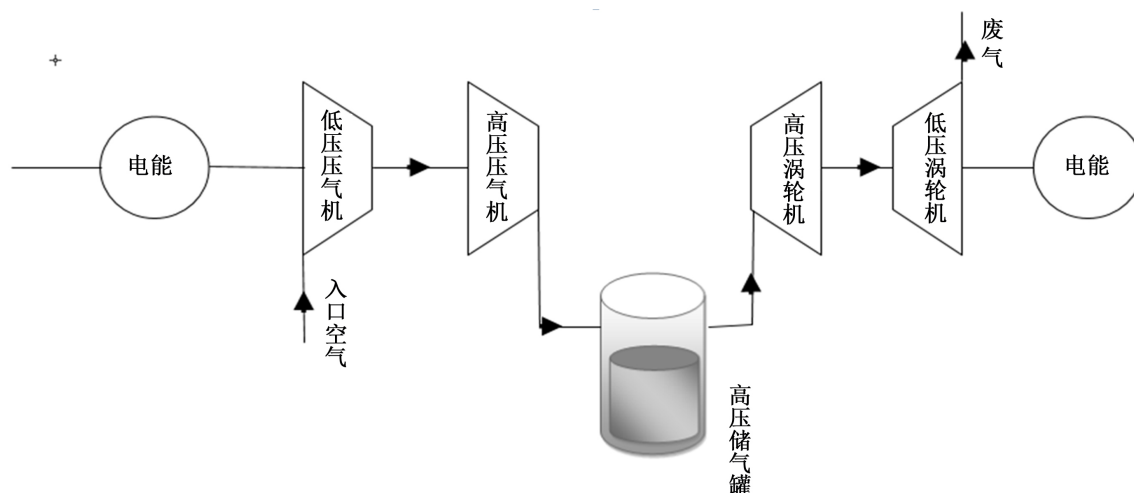


Figure 10. Flowchart of small-scale compressed air energy storage system

图 10. 小型压缩空气储能系统流程图

分离出来的冷气体返回到换热器中冷却压缩空气。

2) 存储过程

气液分离器分离出来的液体则流到液化空气储槽中储存，液化过程中大部分电能就转化为液化空气的内能储存起来。

3) 发电过程

将液态空气从储槽中引入深冷泵中加压至一定压力，然后送入气化换热器和热交换器中吸热变成高温高压气体，最后气体注入膨胀机中做功，带动发电机发电。透平排气返回到热交换器和气化换热器中为液态空气升温提供热量，被冷却后进入蓄冷装置，为压缩液态空气中的换热器提供冷量。

英国 Highview Power Storage 公司成功试运行了一个 350 kW/2.5 MWh 的试验液化空气储能系统，取得了良好的效果。2014 年 2 月，在英国能源与气候变化部(DECC)资助下，Highview 公司设计并建立了一个 5 MW/15 MWh 商用示范的液化空气储能示范工厂，该液化空气储能工厂建造在 Viridor 公司的垃圾填埋燃气发电厂里，目前已组装完毕[29] [30]。

4.4.2. 小型压缩空气储能系统

小型压缩空气储能系统的工作原理与传统压缩空气储能电站类似，但是其存储容量较小，功率等级一般在 10 MW 左右，用一个地面高压储气罐存储压缩气体就能够满足储气条件，这使它可以摆脱地理条件的限制，具有更好的灵活性，它可以用于小型供电网、不间断电源；同时它也可以建在太阳能电厂、风电厂附近，调节稳定太阳能电厂、风电厂电能质量的作业。图 10 为小型压缩空气储能系统示意图，这类系统没有燃烧室，不会造成环境污染，同时投资成本也大大降低。文献[31]提出了单套风电机组配备小型压缩空气储能系统，研究表明膨胀机设计制造和膨胀比控制技术是微小型压缩空气储能系统发展的关键。

4.4.3. 微型压缩空气储能系统

与小型压缩系统原理类似，微型压缩空气储能系统也是利用地上高压容器储存压缩空气，不同之处在于其功率等级更小，容量一般在几千瓦到几十千瓦级，体积更小，能量密度大，同时操作更加灵活，可以应用在主要用于特殊领域(如控制、通讯、军事领域)的备用电源、偏远孤立地区的微小型电网以及压缩空气汽车动力等，目前该系统仅处于理论层面，距离实际应用还有一定距离。

Table 1. Performance comparisons of different air energy storage technologies [32]**表 1.** 不同空气储能技术的性能比较[32]

储能方式	储能密度 Wh/l	比能 Wh/kg	效率%	额定功率 MW	寿命年	成本\$/kW	放电时间 h
大型压缩空气储能	2~6	30~60	40~75	110 & 290	20~40	400~1000	1~24+
小型压缩空气储能	2~6	300 bar 时 140	-	0.003~3	23+	500~1500	~1
液化空气储能	8~24	214	55~80+	0.3~2.5	20~40	900~2000	1~12+

4.5. 不同空气储能技术的比较

表 1 列出了大型、小型压缩空气储能系统及液化空气储能技术的储能密度、效率、成本的性能比较 [32], 由此看出不同功率等级, 不同工质类型的蓄能系统各有优缺点, 应当结合当地的实际条件因地制宜地发展空气储能系统。

5. 压缩空气储能系统的展望

压缩空气储能技术经过几十年的发展, 总体上已经达到比较成熟的水平。得益于其系统本身储能规模大、平均成本低、限制性条件少等优点, 压缩空气储能技术将会得到越来越广泛的发展和應用。未来压缩空气储能技术的研发和应用有以下发展趋势:

1) 带储热的压缩空气储能系统将逐渐替代有燃烧室的压缩空气储能系统, 具有高效率、无污染的优点, 同时摆脱了对化石燃料的依赖, 可与太阳能热发电系统相结合, 其中储热材料和储热方式是未来研究的重要方向。

2) 压缩空气储能系统小型化是未来发展的一大趋势, 它可以利用储气罐代替传统储气洞穴, 降低成本的同时摆脱了系统对地形的依赖。该技术可广泛应用于分布式能源系统、车载动力以及特殊领域的备用电源。

3) 目前可再生能源的大规模利用成为了热点问题。压缩空气储能与风能、太阳能、生物质能等可再生能源的耦合是一个重要的研究方向, 该系统既解决了新能源的不稳定和间歇性的问题, 又有效的达到了大规模利用新能源的目的。

4) 液化空气储能系统具有能规模大、能量密度高、不需要大型的储气洞穴等优点, 目前已进入商业示范阶段去, 是未来需要深入研究和大力发展的新技术。

6. 结论

本文综述了压缩空气储能技术的优势、原理以及应用情况, 详细介绍了不同特点的新型压缩空气储能系统, 分析了它们的技术特点和发展前景, 得出如下结论:

1) 压缩空气储能技术是与抽水蓄能相近的大规模储能技术, 具有广阔的发展前景。

2) 压缩空气储能系统应用广泛, 除了在电网调频调峰、耦合新能源领域发挥重要的作用之外, 随着小型、微型压缩空气储能系统的不断发展, 它将广泛用于分布式能源、可再生能源、汽车、备用电源等领域。

3) 先进绝热压缩空气储能系统、外来热源储热的压缩空气储能系统、耦合新能源的压缩空气储能、耦合传统热力循环的压缩空气储能系统以及液化空气压缩储能系统等能有效解决传统压缩空气蓄能系统存在的问题, 代表着未来发展的新方向。

4) 随着压缩空气储能技术的不断提高以及现在的能源结构对于该系统的迫切需求, 该技术将在未来的能源结构和构建全球能源互联网中占有越来越重要的地位, 并将在更广泛的领域发挥重要的作用。

基金项目

国家自然科学基金项目(No. 51576062)。

参考文献 (References)

- [1] 骆妮, 李建林. 储能技术在电力系统中的研究进展[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(2): 71-79.
- [2] 陈来军, 梅生伟, 王俊杰, 卢强. 面向智能电网的大规模压缩空气储能技术[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(6): 1-6.
- [3] 杨茂华. 蓄能技术的现状与展望[J]. 能源与节能, 2013(12): 165-167.
- [4] 尚景宏, 蔡旭, 张亮, 张楠, 万文涛. 大型风力发电蓄电池储能电源系统应用[J]. 应用科技, 2009, 36(10): 1-3.
- [5] 付永领, 李万国. 压缩空气储能发电: 清洁能源发展的又一选择[N]. 中国电力报, 2011-05-14006.
- [6] 张新敬, 陈海生, 刘金超, 李文, 谭春青. 压缩空气储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2012, 1(1): 26-40.
- [7] Kushnir, R., Dayan, A., Ullmann, A., *et al.* (2012) Temperature and Pressure Variations within Compressed Air Energy Storage Caverns. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **55**, 5617-5619. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.055>
- [8] Jbbeh, N.M. and Najjar, Y.S.H. (2012) Power Augmentation with CAES by Air Injection or Supercharging Makes Environment Greener. *Energy*, **38**, 229-232.
- [9] 李小仁, 钱则刚, 杨启超, 张成彦, 李连生. 压缩空气储能技术现状分析[J]. 流体机械, 2013, 41(8): 40-44.
- [10] Hobson, M. (1981) Conceptual Design and Engineering Studies of Adiabatic Compressed Air Energy Storage (CAES) with Thermal Energy Storage. NASA STI/Recon Technical Report N.
- [11] Bullough, C., Gatzen, C., Jakiel, C., *et al.* (2004) Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage for the Integration of Wind Energy. *European Wind Energy Conference*, London, 8.
- [12] Pickard, W.F., Hansing, N.J. and Shen, A.Q. (2009) Can Large-Scale Advanced-Adiabatic Compressed Air Energy Storage Be Justified Economically in an Age of Sustainable Energy. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, **1**, Article ID: 033102. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3139449>
- [13] Jubeh, N.M. and Najjar, Y.S.H. (2012) Green Solution for Power Generation by Adoption of Adiabatic CAES System. *Applied Thermal Engineering*, **44**, 85-89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.04.005>
- [14] Ibrahim, H., Younès, R., Ilinca, A., *et al.* (2010) Study and Design of a Hybrid Wind-Diesel-Compressed Air Energy Storage System for Remote Areas. *Applied Energy*, **87**, 1749-1762. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.017>
- [15] Lund, H. and Salgi, G. (2009) The Role of Compressed Air Energy Storage (CAES) in Future Sustainable Energy Systems. *Energy Conversion and Management*, **50**, 1172-1179. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2009.01.032>
- [16] Lerch, E. (2007) Storage of Fluctuating Wind Energy. 2007 *European Conference on Power Electronics and Applications*, Aalborg, 2-5 September 2007, 1-8. <http://dx.doi.org/10.1109/EPE.2007.4417781>
- [17] 杨科, 张远, 李雪梅, 徐建中. 风电与压缩空气蓄能系统的能量转化特性研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(5): 825-829.
- [18] 谭靖, 李国杰, 唐志伟. 基于压缩空气储能的风电场功率调节及效益分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 33-37.
- [19] 汪海瑛, 白晓民, 许婧. 考虑风光储协调运行的可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 13-20.
- [20] 徐玉杰, 陈海生, 刘佳. 风光互补的压缩空气储能与发电一体化系统特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 88-95.
- [21] Katsuhisa, Y. and Toshiya, N. (2005) Optimal Daily Operation of Electric Power Systems with an ACC-CAES Generating System. *Electrical Engineering in Japan*, **152**, 15-23. <http://dx.doi.org/10.1002/ej.20087>
- [22] 黄健. 压缩空气蓄能-联合循环系统性能分析及优化[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [23] 姚尔人, 王焕然, 席光. 一种压缩空气储能与内燃机技术耦合的冷热电联产系统[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(1): 22-27.
- [24] 叶彩花, 白一, 乔丽洁. 燃气冷热电联供分布式能源系统中发电机组选择的分析探讨[J]. 城市燃气, 2014(2): 21-25.
- [25] 左政, 华贲. 燃气内燃机与燃气轮机冷热电联产系统的比较[J]. 煤气与热力, 2005, 25(1): 39-42.
- [26] Huang, K.D. and Tzeng, S.C. (2005) Development of a Hybrid Pneumatic-Power Vehicle. *Applied Energy*, **80**, 47-59.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.02.006>

- [27] Wang, S., Chen, G., Fang, M. and Wang, Q. (2006) A New Compressed Air Energy Storage Refrigeration System. *Energy Conversion and Management*, **47**, 3408-3416. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2006.01.007>
- [28] 曹广亮, 陈曦. 液化空气储能技术的优势分析及发展现状[J]. 真空与低温, 2016, 22(1): 11-15.
- [29] Strahan, D. (2013) Liquid Air in the Energy and Transport Systems. The Centre for Low Carbon Futures, UK, 1-28.
- [30] Highview Power Storage. 通用电气与英国 Highview 公司合作开发液化空气储能系统[J]. 华东电力, 2014(4): 810.
- [31] 李连生, 杨启超, 赵远扬. 微小型压缩空气储能系统研究[J]. 流体机械, 2014, 42(3): 24-27.
- [32] Luo, X., Wang, J., Dooner, M., Clarke, J. and Krupke, C. (2014) Overview of Current Development in Compressed Air Energy Storage Technology. *Energy Procedia*, **62**, 603-611. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.423>

期刊投稿者将享受以下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>