

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.003

压缩空气储能示范进展及商业应用场景综述

郭祚刚, 马溪原, 雷金勇, 袁智勇

(南方电网科学研究院, 广州 510663)

摘要: [目的]近年来, 储能技术及储能产业发展受到的关注度持续升温。[方法]在此背景下, 对压缩空气储能技术及其商业应用场景进行了分析与综述。通过梳理国内致力于压缩空气储能技术示范的研究团队及其技术特点, 较为全面地反映了国内压缩空气储能技术的发展方向; 在此基础上, 介绍了已投运数十年的德国汉特福及美国阿拉巴马州两座商业化压缩空气储能电站的配置参数及运行经验, 综述了近年来国内外针对多种新型压缩空气储能技术的示范进展状况。结合压缩空气储能技术梳理、商业化储能电站回顾及新型压缩空气储能技术示范进展综述三方面的工作, 可为国内压缩空气储能技术发展及国家多部委大力推动的储能行业发展提供借鉴。最后, 从电源侧储能、电网侧储能及用户侧储能三类应用场景分析了压缩空气储能技术的适应性及应用潜力。[结果]德国及美国两座商业化压缩空气储能电站数十年的可靠运行经验, 检验了压缩空气储能电站长期运行的可靠性。与此同时, 国内自500 kW至10 MW等多容量规模压缩空气储能示范工程的先后投建, 表明此项储能技术在国内已实现由理论研究阶段向示范验证阶段的突破。[结论]在当下政策环境, 用户侧峰谷电价政策是较为典型的储能应用场景边界条件, 在压缩空气储能技术推广中可以重点考虑。

关键词: 压缩空气储能; 汉特福储能站; 示范进展; 商业应用场景

中图分类号: TK02

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)03-0017-10

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Review on Demonstration Progress and Commercial Application Scenarios of Compressed Air Energy Storage System

GUO Zuogang, MA Xiyuan, LEI Jinyong, YUAN Zhiyong

(Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] In recent years, the attention paid to the development of energy storage technology and energy storage industry has continued to heat up. [Method] Review of compressed air energy storage technology (CAES) progress and its commercial application scenarios have been summarized in this paper. CAES research teams and their technical characteristics were summarized, which reflected the development direction of CAES technology. Meanwhile, the configuration parameters and operation experience of two commercial CAES power stations (Huntorf station and Alabama station) were introduced. The demonstration progress of various new CAES technologies was also reviewed. These review on CAES technologies, commercial power stations and demonstration stations can provide reference for the development of domestic CAES technology and the development of energy storage industry promoted by national ministries in China. At the end of this paper, the adaptability and application potential of CAES technology were analyzed from three aspects: electricity generation side energy storage, grid side energy storage and user side energy storage. [Result] The two CAES power stations in Germany and the United States have tested the long-term reliability of CAES power plants. The CAES demonstration projects with capacity from 500 kW to 10 MW have been built in China. It indicates that this energy storage technology has achieved breakthroughs from the theoretical research stage to the demonstration verification stage in China. [Conclusion] In the current policy environment, the user-side peak-to-valley electricity price policy is a typical boundary condition for energy storage application scenarios, which can be considered in the application of CAES technology.

Key words: compressed air energy storage technology (CAES); Huntorf CAES station; demonstration stations progress; commercial application scenarios.

收稿日期: 2019-07-20 修回日期: 2019-08-18

基金项目: 南方电网公司科技项目“面向多能互补的区域综合能源系统的计算分析与规划关键技术研究”(ZBKJXM20180080)

能源是国民经济赖以发展的物质基础, 依据《可再生能源发展“十三五”规划》设定的发展目标, 非化石能源占一次能源消费比重在2020年与2030

年将分别达到 15% 与 20%，至 2020 年全国可再生能源发电装机容量将达到 680 GW，可再生能源发电电量将占据发电总量的 27%^[1]。

具备波动性及间歇性特点的可再生能源电能大规模并网，对电力系统安全稳定运行水平提出了更高要求。作为智能电网的重要组成部分，储能技术能够为电网运行提供调峰、调频及黑启动等多种服务，能够显著提高电力系统的灵活性及安全性。压缩空气储能技术是一种可以大容量推广的物理储能技术，为促进压缩空气储能技术发展，北京市科学技术委员会、广东省自然科学基金、“十二五”国家科技计划先进能源技术领域 2013 年度项目指南及国家重点研发计划高新领域 2017 年度项目指南等科技渠道均对先进压缩空气储能技术进行了资助。国家发改委及国家能源局等多部委联合于 2017 年 9 月发布的《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》(发改能源〔2017〕1701 号)》明确提出开展 10 MW/100 MWh 级超临界压缩空气储能系统研发及示范^[2]，于 2019 年 6 月进一步发布的《贯彻落实〈关于促进储能技术与产业发展的指导意见〉2019 - 2020 年行动计划》提出重点推进大容量压缩空气储能等重大先进技术项目建设，推动百兆瓦压缩空气储能项目实现验证示范^[3]。

本文针对《关于促进储能技术与产业发展的指导意见》中涉及的压缩空气储能技术进行综述，梳理了国内致力于压缩空气储能技术工程示范的研发团队及其技术，在此基础上介绍全球两座大容量商业化压缩空气储能电站的运行情况，跟踪国内外新型压缩空气储能技术的工程示范最新进展，以较全面的视角对已投运多年的商业化储能站运行经验及近年来压缩空气储能技术的发展状况进行综述，同时以电源侧储能站场景、电网侧储能站场景及用户

侧储能站场景为切入点开展了压缩空气储能技术的商业场景适用性分析，为压缩空气储能技术发展提供借鉴。

1 储能市场及储能技术

根据《储能产业研究白皮书 2019》公布的储能预测数据^[4]，至 2025 年我国的抽水蓄能累计装机容量将达到 90 GW，至 2023 年我国的电化学储能累计装机容量将达到 20 GW。

截至 2018 年底，我国的储能装机累计容量已经达到 31.3 GW，其中抽水蓄能电站累计容量为 29.99 GW，电化学储能电站的累计装机容量为 1.072 7 GW，电化学储能电站中的锂离子电池储能累计装机容量最高，锂离子电池储能累计装机容量为 758.8 MW。相对于装机容量快速增长的电化学储能站，可大容量推广的压缩空气储能技术近年来处于快速发展中，国内已建成 500 kW 容量等级^[5]，1.5 MW 容量等级^[6]及 10 MW 容量等级^[7]等多种容量规模的压缩空气储能示范电站，完成了多容量等级的技术验证工作。

储能技术包括机械储能及电化学储能两大类，其中大容量的机械储能技术主要包括抽水蓄能及压缩空气储能；大容量的电化学储能技术主要包括锂离子电池及铅炭电池等；典型的能量型储能技术及其优缺点如表 1 所示。

2 国内压缩空气储能研发团队及其技术

2.1 中科院工程热物理研究所储能团队

中科院工程热物理研究所设立了储能研发中心，由陈海生研究员担任储能研发中心主任，承担了包括国家重点研发计划项目“10 MW 级先进压缩空气储能技术研发与示范”及北京市科技计划项目

表 1 典型的能量型储能技术

Tab. 1 Typical energy storage technologies

储能技术类型		效率/%	寿命/年	容量等级	优点	缺点
机械 储能	抽水蓄能	70 ~ 75	40 ~ 60	数百兆瓦时	寿命长、性能稳定	选址困难，建设周期长
	压缩空气储能	50 ~ 70	30 ~ 40	数百兆瓦时	寿命长、性能稳定	大型储气洞穴选址困难
电化学 储能	锂离子电池	85 ~ 98	5 ~ 10	数十兆瓦时	能量密度大	成本高、安全风险
	全钒液流电池	75 ~ 85	5 ~ 15	数十兆瓦时	安全性好	能量密度低
	钠硫电池	75 ~ 90	10 ~ 15	数十兆瓦时	响应快	需较高温下运行，安全风险
	铅炭电池	70 ~ 90	3 ~ 8	百兆瓦时	性价比高、技术成熟	寿命短、污染问题

“大规模先进压缩空气储能系统研发与示范”等在内的多项压缩空气储能研究项目, 已建成 1.5 MW 级压缩空气储能示范项目 1 座(系统效率 52%^[6])及 10 MW 级压缩空气储能系统示范项目 1 座(系统效率 60.2%^[7]), 储能团队代表性专利之一为“超临界压缩空气储能系统”^[8]。

2.2 南网科研院新能源与综合能源团队

南方电网科学研究院新能源与综合能源团队在海上风电、储能、微电网及综合能源等领域具有技术积累。新能源与综合能源团队成员郭祚刚博士在压缩空气储能领域具有多年研发经历, 现为南方电网公司大容量储能重大科研团队成员。

郭祚刚博士自 2012 年开始研发新型压缩空气储能技术, 完成了新型压缩空气储能博士后课题, 同时承担了包括广东省自然科学基金在内的多项压缩空气储能课题, 从市场需求及商业推广角度研发新型压缩空气储能技术^[9-11]。在新型压缩空气储能技术研发过程中, 通过引入喷射调压系统克服了降压阀调压存在较大压力能损失的技术缺陷, 较大幅度提升储能系统性能, 代表性专利之一为“压缩空气储能系统”^[12]。

2.3 清华大学电机系储能团队

清华大学电机系压缩空气储能团队由梅生伟教授担任负责人, 参与了安徽芜湖高新区的“500 kW 压缩空气储能系统示范项目”课题, 项目所需的 3 000 万资金由国家电网投资, 项目于 2014 年 11 月首次发电成功^[5,13]。据文献报道^[14], “500 kW 压缩空气储能系统示范项目”的最大发电功率达到了 420 kW, 单次循环发电量为 360 kWh, 储能效率为 33%。清华大学电机系储能团队的代表性专利之一为“一种 50 MW 绝热压缩空气储能方法”^[15]。

2.4 中科院过程工程研究所储能团队

丁玉龙教授曾担任利兹大学-中科院过程工程研究所联合储能技术研究中心首任主任, 现为英国伯明翰大学-国家电网全球能源互联网欧洲研究院联合实验室共同(创建)主任。丁玉龙教授储能团队利用液态空气具有密度大且易于储存的特点, 研发液态空气储能技术, 储能团队代表性专利之一为“液态空气储能系统能效提升装置及方法”^[16]。

2.5 国网全球能源互联网研究院储能团队

国家电网的全球能源互联网研究院储能团队致

力于液态压缩空气储能技术的研发, 储能团队在压缩空气储能领域已取得多项发明专利授权, 代表性专利之一为“一种储罐增压型的深冷液态空气储能系统”^[17]。另据报道^[18], 全球能源互联网研究院压缩空气储能团队在江苏吴江区同里镇开展 500 kWh 的液态压缩空气储能示范工程建设。

3 商业化压缩空气储能电站

3.1 德国汉特福商业化压缩空气储能电站

德国汉特福(Huntorf)压缩空气储能电站是全球首座投入商业运行的压缩空气储能电站, 该项目在 1978 年服役。Fritz Crotofino 等人^[19]在 2001 年美国 Florida 州举办的春季会议上分享了德国汉特福电站自 1978 年至 2001 年的 20 余年间运行经验, 同时提供了汉特福储能电站的配置参数。

汉特福储能电站流程示意图如图 1 所示, 汉特福储能电站的航拍实景照片如图 2 所示。储能电站包括两处地下储气洞穴, 在电能储存时空气压缩机消耗电能制备高压力的空气并注入两处地下储气洞穴中; 在电能输出时, 地下储气洞穴内高压空气经过阀门稳压实现压力稳定, 在燃烧器内与天然气实现参混燃烧与温度提升后直接进入膨胀机做功。汉特福储能电站的两台膨胀机之前都设置了燃烧器, 末级膨胀机的高温乏气直接通过烟囱排放。

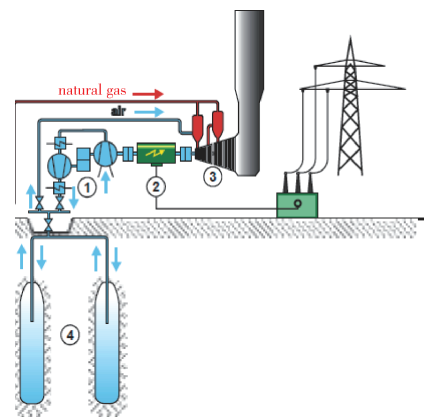


图 1 德国汉特福储能电站流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Huntorf CAES power station in Germany

文献^[19]提供的德国汉特福电站的配置参数如表 2 所示, 储能电站按照电能输出与电能储存阶段空气质量流速比为 4:1 进行设计, 储能电站可连续储能 12 h, 连续输出电能 3 h。

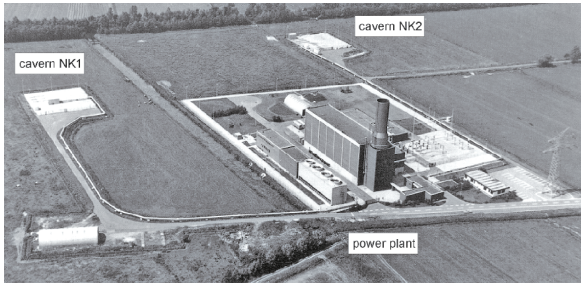


图2 德国汉特福储能电站航拍图

Fig. 2 Aerial photo of the Huntorf CAES power station in Germany

表2 德国汉特福储能电站配置参数

Tab. 2 Configuration parameters of Huntorf CAES station

指标类别	指标数值
电能储存容量/(MW · MWh ⁻¹)	60 / 720
电能输出容量/(MW · MWh ⁻¹)	290 / 870
压缩机组空气流量/(kg · s ⁻¹)	108
膨胀机组空气流量/(kg · s ⁻¹)	417
膨胀机与压缩机空气流量比/	约4 : 1
地下储气洞穴01容积/m ³	140 000
地下储气洞穴02容积/m ³	170 000
洞穴深度(顶部-底部)/m	650 ~ 850
洞穴最大内径/m	60
两个洞穴气流出口间距/m	220
洞穴运行压力区间/bar	43 ~ 70
洞穴允许最大压降速率/(bar · h ⁻¹)	15

德国汉特福储能电站的压缩机组及膨胀机组每年的启动次数如图3所示。在投运之初,该储能电站主要充当紧急备用电源角色,当电网内其他电源出现故障时,向电网提供有功输出支持,机组的平均启动可靠性为97.6%,截止目前该储能电站仍在运营^[19-20]。在1978年首次投用时,储能电站的压缩机组就启动将近400次,膨胀发电机组启动次数也超过250次;到1979年,膨胀发电机组启动次数达到了450次左右。自1985年之后,汉特福压缩空气储能电站所在的电网接入了大容量的抽水蓄能电站,电网减少了对压缩空气储能电站的调用频次。

德国汉特福压缩空气储能电站在电能输出阶段,储气洞穴内空气温度随着压缩空气以417 kg/s的质量流速持续释放而相应下降,温度总下降幅度约20℃,储气洞穴内压力及温度变化趋势如图4

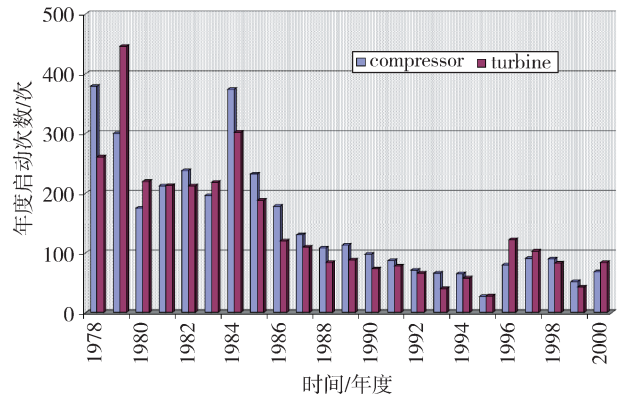


图3 德国汉特福储能电站年度启动次数

Fig. 3 Annual starting number of Huntorf CAES station

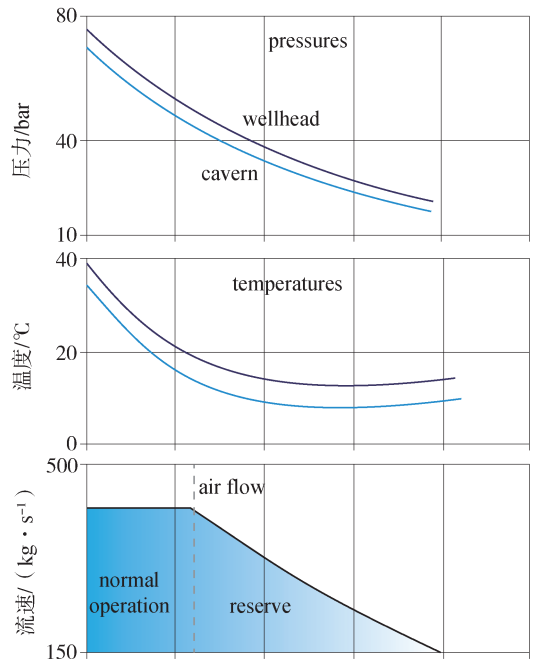


图4 空气释放过程储气洞穴内压力及温度变化趋势

Fig. 4 Trend of pressure and temperature in cavern during air releasing process

所示。在储气洞穴注入气流及流出气流过程中,储气洞穴内压缩空气与洞穴壁面1 m厚度左右的岩石层存在热交换行为^[19]。

3.2 美国阿拉巴马商业化压缩空气储能电站

全球投入商业运营的第二座压缩空气储能电站位于美国阿拉巴马州(Alabama),该储能电站在德国汉特福储能电站的基础上增加了膨胀机排气余热再利用系统,通过在膨胀机排气管道上布置换热器将膨胀机排气携带热量传递给储气洞穴释放的压缩空气气流,节省天然气耗量。



图5 美国阿拉巴马储能电站航拍照片

Fig. 5 Aerial photo of the Alabama CAES station in USA

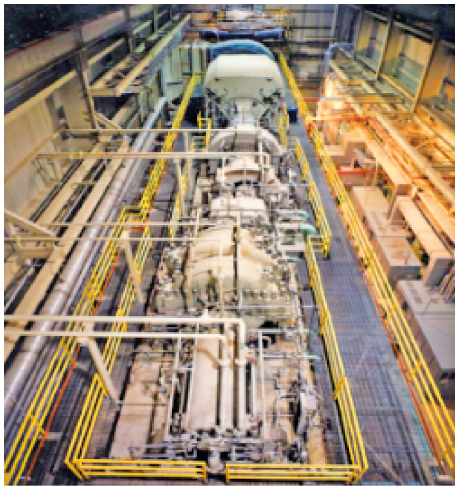


图6 美国阿拉巴马储能电站内景照片

Fig. 6 Inner photo of the Alabama CAES station in USA

美国阿拉巴马州压缩空气储能电站航拍照片如图5所示, 储能电站内景照片如图6所示。阿拉巴马州储能电站于1991年投入商业运行, 压缩机组功率为50 MW, 膨胀发电机组输出功率为110 MW, 地下储气洞穴总容积为 $5.6 \times 10^5 \text{ m}^3$, 储气洞穴在地表以下450 m, 能够连续储能41 h, 连续对外输出电能26 h^[21-22]。

4 国内外压缩空气储能示范工程及进展

4.1 日本北海道压缩空气储能示范项目

日本北海道空知郡在2001年建成了膨胀机输出功率为2 MW的压缩空气储能示范工程, 8 MPa的压缩空气被储存在储气设备当中, 储气设备的内腔安放了Air-tight薄膜以防止空气泄露^[23]。另据报道^[20], 北海道2 MW压缩空气储能示范项目是日本正在开发的容量400 MW机组的示范性中间机组, 400 MW容量的大型储能电站将利用地表以下450 m深处的煤矿洞穴作为储气洞穴。

4.2 英国曼彻斯特液态空气储能示范项目

如图7所示位于英国曼彻斯特的5 MW/15

MWh规模的液态空气储能示范项目于2018年6月投入运行, 该项目由英国Highview Power公司与Viridor公司合作开发^[24]。该项目获得了800万英镑的英国政府资金支持, 利用电网过剩电能制备液态空气($-196 \text{ }^\circ\text{C}$), 液态空气在隔热的真空储罐内进行储存备用, 在电能释放阶段液态空气经过加压后气化, 驱动膨胀机组输出电能。



图7 英国曼彻斯特液态空气储能示范项目

Fig. 7 Liquid air storage demonstration project in Manchester

另据报道^[24], 英国液态空气储能开发商Highview Power公司在近期签署了合同额约10亿欧元的项目协议, 预计在英国选取两个地点进一步部署大容量的液态空气储能系统。

4.3 南澳大利亚州压缩空气储能示范项目

2019年2月, 澳大利亚可再生能源署已批准为澳大利亚第一个压缩空气储能示范项目提供约600万澳元的资金支持。加拿大能源商Hydrostor公司将南澳大利亚州的一处废弃锌矿洞穴改造为地下储气洞穴, 依托此洞穴建设容量为5 MW/10 MWh的压缩空气储能示范电站^[25], 如图8所示。该5 MW/10 MWh压缩空气储能示范电站建成后, 将为南澳大利亚州电网提供削峰填谷及辅助调频等电力服务。



图8 5 MW/10 MWh压缩空气储能示范项目效果图

Fig. 8 Rendering of the 5 MW/10 MWh compressed air energy storage demonstration project in South Australia

4.4 河北廊坊 1.5 MW 超临界压缩空气储能示范

国内第一套 1.5 MW 超临界压缩空气储能系统由中科院工程热物理研究所承担的北京市科技计划重大课题“超临界压缩空气储能系统研制”项目经费资助,于 2013 年在河北廊坊建成。据报道,河北廊坊 1.5 MW 超临界压缩空气储能系统完成了 168 h 运行试验,各项指标均达到或超过课题考核指标要求,储能系统效率约 52%^[26-27]。



图9 廊坊 1.5 MW 超临界压缩空气储能示范

Fig. 9 1.5 MW super-critical CAES demonstration project in Langfang

4.5 安徽芜湖 500 kW 压缩空气储能示范项目

安徽芜湖 500 kW 压缩空气储能示范项目由国家电网投资 3 000 万元兴建,如图 10 所示。项目技术参与单位包括中国科学院理化技术研究所、清华大学电机系储能团队及中国电力科学研究院等单位,项目于 2014 年 11 月首次发电成功^[5,13,28]。据文献报道^[14]，“500 kW 压缩空气储能系统示范项目”的储能效率为 33%。

4.6 贵州毕节 10 MW 压缩空气储能验证平台

贵州毕节 10 MW 压缩空气储能示范平台由中科院工程热物理研究所研制,如图 11 所示。示范平台得到了国家重点研发计划项目“10 MW 级先进压缩空气储能技术研发与示范”及北京市科技计划项目“大规模先进压缩空气储能系统研发与示范”等课题经费支持。据报道,贵州毕节 10 MW 压缩空气储能示范平台在 2017 年 5 月开始系统联合调试^[29],压缩空气储能示范平台在额定工况下的效率为 60.2%^[7]。

4.7 国网江苏同里 500 kW 液态空气储能示范项目

国家电网在江苏省苏州市吴江区同里镇建设 500 kW 液态空气储能示范项目,可为园区提供 500



(a) 压缩机系统



(b) 压缩空气储罐



(c) 膨胀机组发电系统

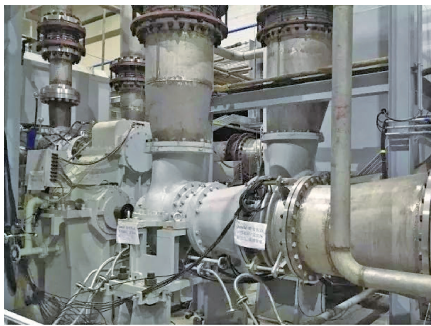
图 10 安徽芜湖 500 kW 压缩空气储能示范项目

Fig. 10 500 kW CAES demonstration project in Wuhu District

kWh 电力,夏季供冷量约 2.9 GJ/天,冬季供暖量约 4.4 GJ/天^[18]。液态空气储能示范项目包括压缩液化单元、蓄冷及蓄热单元、膨胀机组发电单元,项目效果如图 12 所示。

4.8 中盐金坛 60 MW 盐穴压缩空气储能示范项目

中盐金坛 60 MW 盐穴压缩空气储能示范项目位于江苏省常州市金坛区薛埠镇,储能系统设计效率为 58.2%^[30]。项目采用中盐集团地下盐矿采盐形成的废弃空穴作为储气空间,首期投资 5.34 亿元建设一套 60 MW 盐穴非补燃压缩空气储能系统,后期将分期建设成装机容量达百万千瓦的压缩空气



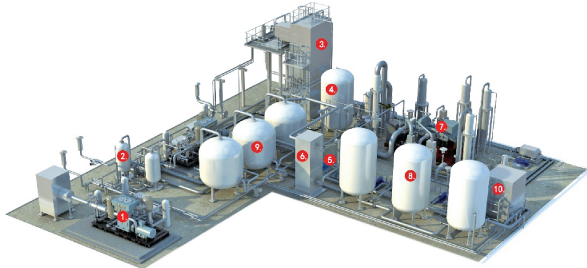
(a) 膨胀机测试子系统



(b) 蓄热/换热测试子系统

图 11 贵州毕节 10 MW 压缩空气储能示范平台

Fig. 11 10 MW CAES demonstration project in Bijie



注: 1、压缩机组; 2、空气净化装置; 3、液化装置及制冷膨胀机; 4、储液装置; 5、低温泵; 6、蒸发器; 7、膨胀机电机组; 8、储热装置; 9、蓄冷装置; 10、溴化锂冷热双供机组。

图 12 同里 500 kW 液态空气储能项目效果图

Fig. 12 3D rendering of 500 kW liquid energy storage demonstration project in Tongli town

储能基地, 项目总投资为 15 亿元^[31]。“盐穴压缩空气储能国家试验示范项目”由中盐集团、清华大学及中国华能三方共同投资建设, 该项目于 2017 年 5 月 27 日获国家能源局批复, 于 2018 年 12 月 25 日开工建设, 预计于 2020 年 5 月投产运行^[31-32]。

5 压缩空气储能电站应用场景分析

压缩空气储能技术属于能量型储能技术, 压缩空气储能电站的商业应用场景根据储能电站的接入

位置可分为电源侧储能、电网侧储能及用户侧储能三种类型。电源侧储能是指储能站接入位置位于电源(或发电厂)与电网结算的关口表计之后, 储能站属于电源侧资产; 电网侧储能是指储能站直接接入输电网或配电网, 储能站接受电力调度机构的统一调度, 服务于电网的安全稳定运行; 用户侧储能是指储能站接入位置位于用户侧关口表计之后, 储能站属于用户侧资产, 等效为用户侧负荷, 通过用户侧关口表计与电网结算。三类商业应用场景的储能站资产归属及边界条件存在差异, 储能站的功能及收益模式也存在显著差异。

5.1 电源侧储能站场景

压缩空气储能电站在电源侧的用途可用于提供调峰调频等辅助服务。以南方电网区域为例, 广东省现已建立调频辅助服务市场, 参与调频的发电机组的调频辅助服务收益与机组的调节速率、响应时间、调节量偏差和调节里程均有关系^[34]。储能站可以同常规火力发电机组组成联合体的形式, 实现调峰调频功能, 提升火电厂 AGC 调频性能, 一方面减少常规火力发电机组频繁变化, 降低煤耗, 减少机组设备磨损, 延长设备寿命, 另一方面发挥压缩空气储能电站响应时间短, 调节速率快、调节精度高、寿命长等技术特点。压缩空气储能电站在电源侧的收益来源参与调峰调频等辅助服务获得的收益。此外, 由于风电、光伏等新能源出力具有季节性和间歇性, 利用压缩空气储能电站促进新能源消纳在技术上具备可行性, 但从经济可行性上分析, 需要配置的机组容量极大且年利用小时数十分有限, 因此暂不具备经济性^[35]。

5.2 电网侧储能站场景

压缩空气储能电站在电网侧的用途主要包括调峰调频、黑启动、缓解输电阻塞及延缓输电设备投资、提高供电可靠性等。黑启动是指当电力系统因发生故障而停止运行后, 通过拥有自启动能力的机组率先启动, 带动无自启动能力的机组恢复运行, 进而达到恢复整个电力系统的目的。缓解输电阻塞指在输配电线路上配置储能站, 在输配电线路输送负荷超过线路容量时, 启用储能站进行调节。因电网输配电设备容量需满足用户侧最大负荷需求, 对于仅在高峰时段短暂负荷超出输配电设备容量的电网侧场景, 进行电网全面升级及扩建的成本高昂, 此时通过配置储能站能够显著延缓输配电

设备扩容进度。提高供电可靠性是指,压缩空气储能电站可以作为配电网负荷转供电的一种备用电源,当上级电网停电或邻近配电线路故障时,通过转供电为重要负荷持续供电,从而提高供电可靠性。

电网侧储能由于发挥保底电网功能,商业模式主要是通过将储能站投资及运行费用纳入电网输配电价进行核定。但是,目前国家出台的输配电系列核定政策暂未松动,短期内电网侧储能难以大量纳入电网输配电价核定范围。因此可以预见,未来一段时间电网侧压缩空气储能仍然主要以带有“首台首套”性质的科研示范为主,距离规模化应用尚需时间。

5.3 用户侧储能站场景

用户侧作为电能发-输-配-变-用的最后一个环节,直接消费电能以服务社会经济发展。储能站在用户侧的场景由降低用电成本及提高用户侧电能可靠性等需求基础上演化而来。

压缩空气储能电站具备安全、无污染、机组寿命长及机组性能稳定等特点,特别是采用罐式结构的压缩空气储能具有空间上的灵活性,结合用户侧峰谷电价和两部制电价,可在用户侧降低用电成本并提高用电可靠性,压缩空气储能站的用途及场景主要包括:基于峰谷电价的用电成本管理场景,基于两部制电价的容量费用管理场景,基于提升电能质量及用电可靠性的场景、参与电力辅助服务市场场景。

5.3.1 基于峰谷电价的用电成本管理场景

工业用户的电能需求特点与其生产工艺特点相关联,工业用户的电能消费具有用电量及负荷需求相对刚性等特点,在满足工艺生产的前提下,如何降低用电成本是工业用户成本控制的核心环节。

我国包括广东省在内的部分省份对工业用户实施两部制分时电价,且区分大工业用电及一般工商业用电。以广州市分时电价为例^[33],全天24 h被划分为8 h的低谷时段,6 h的高峰时段及10 h的平时段。一般工商业电度电价(1 kV~10 kV)的低谷电价为0.360 3元/kWh,平时段电价为0.720 6元/kWh,高峰电价为1.189元/kWh,高峰电价与低谷电价的峰谷电差价达到0.828 7元/kWh。在此边界条件下,用户侧储能采用能量型的压缩空气储能电站在低谷时段进行电能储存,在高峰时段进行

电能释放,便能够获得基于峰谷电价用电成本管理的稳定收益。若配置电能输出规模为10 MW的压缩空气储能电站,每日在高峰时段释放电能持续4 h,则总释放电能为1.2 GWh/月,节约电度电价费用约99.45万元/月。

5.3.2 基于两部制电价的容量费用管理场景

用户侧储能站除在电度电价方面产生稳定的收益外,还能基于现行的两部制电价政策产生基于容量费用管理的收益。再次以广州市的分时电价为例,大工业用户实行两部制电价政策,即基本电价及电度电价。基本电价可选择按变压器容量(元/kVA·月)或者按最大需量(元/kW·月)两种方式进行结算,其中广州市大工业用户现行的按变压器容量(元/kVA·月)结算标准为0.230元/kVA·月,按最大需量(元/kW·月)结算标准为0.320元/kW·月。通过配置压缩空气储能电站在大工业用户的负荷需求高峰时段,以储能站输出功率降低最大需量(元/kW·月)值,达到减少大工业用户的基本电价费用(即容量费用)的支出。若配置电能输出规模为10 MW的压缩空气储能电站,可为单个大工业用户节省的容量费用为3 200元/月。

5.3.3 基于提升电能质量及用电可靠性的场景

由于电力系统发电侧接入包括风力发电及光伏发电等间歇性可再生能源电能,电力系统用户侧负荷的类型及负荷性质也存在多样性,因而用户侧在电力系统失衡时会面临电压波动及频率偏差等电能质量问题;此外,在发生停电故障等状况时,用户侧用电也将面临供电中断等问题。通过在用户侧配置压缩空气储能电站,可参与用户侧电能质量调节,同时在电网发生短时间停电故障时,持续为用户侧供电,提升电能质量及用电可靠性。

5.3.4 参与电力辅助服务市场场景

用户侧压缩空气储能电站在满足工业用户的用电成本管理需求的同时,还具备参与电网调峰及调频等辅助服务市场的潜力。依据南方能监局发布的《广东调频辅助服务市场交易规则(试行)》^[34],配置自动发电控制装置(简称AGC)的储能站可作为第三方辅助服务提供者参与广东调频辅助服务市场,可获得调频里程补偿及调频容量补偿。由于用户侧压缩空气储能电站已享受了峰谷电价套利,从体制机制上目前暂不认可用户侧储能身份参与调频市场。但是,从物理概念层面,压缩空气储能并非

全天均运行在削峰填谷模式下,部分时段具备参与调频辅助服务的空余时间和容量,因此亟待出台相关实施细则,以界定用户侧压缩空气储能电站参与调频辅助服务的运行规则和结算方式。

6 结论

本文在储能技术及储能产业蓬勃发展的新形势下,梳理了国内致力于压缩空气储能技术示范验证的研究团队及其技术特点,同时跟踪了国内外压缩空气储能示范项目的进展情况,分析了压缩空气储能技术潜在的商业应用场景,得出如下结论:

1)国内压缩空气储能技术近年来处于蓬勃发展阶段,超临界压缩空气储能技术、绝热压缩空气储能技术及液态压缩空气储能技术均有研究覆盖,与此同时,500 kW 容量等级、1.5 MW 容量等级及10 MW 容量等级的压缩空气储能示范工程均已建成,实现了压缩空气储能技术由理论研究阶段向示范验证阶段的突破。

2)1978年投运的德国汉特福压缩空气储能电站及1991年投运的美国阿拉巴马储能电站,经历了数十年的商业化运行验证,两座商业化储能电站的可靠运行经验对国内压缩空气储能技术商业化应用具有借鉴意义。

3)作为能量型储能技术的压缩空气储能技术,具有机组寿命周期内性能不衰减的优势,在电源侧储能、电网侧储能及用户侧储能三类场景中均有广泛应用前景。

4)电源侧储能应用场景下,压缩空气储能站以参与调峰调频等辅助服务为主要应用场景。电网侧储能应用场景下,压缩空气储能电站用途主要包括调峰调频、黑启动、缓解输配电阻塞及延缓输配电设备投资、提高供电可靠性等,发挥保底电网作用。用户侧储能应用场景下,压缩空气储能站立足于满足用户降低用电成本及提高用电可靠性的需求,具体可包括基于峰谷电价的用电成本管理场景,基于两部制电价的容量费用管理场景,基于提升电能质量及用电可靠性的场景、参与电力辅助服务市场场景。

参考文献:

[1] 国家发展改革委. 可再生能源发展“十三五”规划: 发改能源[2016]2619号[EB]. (2016-12-01)[2019-07-20].
[2] 国家发展改革委, 财政部, 科学技术部, 工业和信息化部,

国家能源局. 关于促进储能技术与产业发展的指导意见(发改能源[2017]1701号[EB]. (2017-09-01)[2019-07-20].

- [3] 国家发展改革委, 科学技术部, 工业和信息化部, 国家能源局. 关于印发《贯彻落实〈关于促进储能技术与产业发展的指导意见〉2019—2020年行动计划》的通知: 发改办能源[2019]725号[EB]. (2019-06-01)[2019-07-20].
[4] 中国能源研究会储能专委会, 中关村储能产业技术联盟. 储能产业研究白皮书2019(摘要版)[R]. 北京: 中国能源研究会储能专委会, 2019.
[5] 中国储能网新闻中心. 芜湖高新区打造压缩空气储能技术人才队伍建设[EB/OL]. (2013-11-14)[2019-07-20]. http://www.escn.com.cn/news/show_-86114.html.
[6] 中国科学院工程热物理研究所. 超临界压缩空气储能系统研制通过验收[EB/OL]. (2013-07-25)[2019-07-20]. http://www.cas.cn/ky/kjyz/201307/t20130724_3904638.shtml.
[7] 中国科学院工程热物理研究所. 北京市科技计划项目“大规模先进压缩空气储能系统研发与示范”顺利通过验收[EB/OL]. (2019-01-28)[2019-07-20]. http://www.iet.cas.cn/xwdt/zhxw/201902/t20190211_5240114.html?from=singlemessage&isappinstalled=0.
[8] 陈海生, 谭青春, 刘佳, 等. 超临界压缩空气储能系统. 200910225252.3[P]. 2009-11-18.
[9] 郭祚刚. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院院级科技项目: 100 MW 压缩空气储能电站设计与热力学分析研究[R]. 广州: 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 2014.
[10] 郭祚刚. 广东省自然科学基金项目: 基于先进绝热与流体引射理论的压缩空气储能技术研究[R]. 广州: 广东省自然科学基金委员会, 2015.
[11] 郭祚刚. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院院级科技项目: 压缩空气储能关键技术及储能市场跟踪研究[R]. 广州: 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 2017.
[12] 邓广义, 郭祚刚, 范永春, 等. 压缩空气储能系统. 201510009813.1[P]. 2015-01-07.
[13] CSPPLAZA 光热发电网. 芜湖热储能+压缩空气储能发电示范工程首次发电成功[EB/OL]. (2014-11-17)[2019-07-20]. <http://www.csplaza.com/article-4284-1.html>.
[14] 薛小代, 梅生伟, 林其友, 等. 面向能源互联网的非补燃压缩空气储能及应用前景初探[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 164-171.
XUE X D, MEI S W, LIN Q Y, et al. Energy internet oriented non-supplementary fired compressed air energy storage and prospective of application[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 164-171.
[15] 梅生伟, 薛小代, 陈来军, 等. 一种50 MW 绝热压缩空气储能方法: 201711157263.3[P]. 2017-11-20.
[16] 折晓会, 丁玉龙, 彭笑东, 等. 液态空气储能系统能效提升装置及方法. 201710491411.9[P]. 2017-06-20.
[17] 徐桂芝, 赵波, 杨岑玉, 等. 一种储罐增压型的深冷液态空

- 气储能系统: 201610423444. 5 [P]. 2017-11-07.
- [18] 同里综合能源服务中心, 江苏同里综合能源服务简介 [EB/OL]. (2019-07-03) [2019-07-20]. http://web.recn.cn/wap_nei-rong.html.
- [19] CROTOGINO F, MOHMEYER K U, SCHARF R. Huntorf CAES: More than 20 years of successful operation [C]//A-nnon. Spring 2001 Meeting, Florida, 2001. Orlando: Spring 2001 Meeting, 2001: 1-6.
- [20] KRAIN H. Review of centrifugal compressor's application and development [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2005, 127(1): 25-34.
- [21] CONNOLLY D. A review of energy storage technologies [R]. Castletroy: University of Limerick, 2009.
- [22] SWANEKAMP R. McIntosh serves as model for compressed-air energy storage [J]. Power, 2000, 12(2): 35-41.
- [23] TERASHITA F, TAKAGI S, KOHIYA S, et al. Butyl rubber under high pressures in the storage tank of CAES-G/T system power plant [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 95(1): 173-177.
- [24] 中国储能网新闻中心, 世界首例5兆瓦液体空气储能技术项目在英国投运 [EB/OL]. (2018-9-10) [2019-07-20]. <http://www.escn.com.cn/news/show-632115.html>.
- [25] 刘伯洵, 澳大利亚首个压缩空气储能项目获600万澳元资金支持 [EB/OL]. (2019-02-17) [2019-07-20]. <http://www.escn.com.cn/news/show-711952.html>.
- [26] 中国科学院工程热物理研究所. 储能研发中心召开“1.5 MW超临界空气储能系统”工作总结会 [EB/OL]. (2013-08-22) [2019-07-20]. http://www.etp.ac.cn/xwdt/zhxw/201308/t20130822_3916695.html.
- [27] 云南省科学技术厅, 第三届中国云南“桥头堡”建设科技入滇对接活动科研平台需求表 [EB/OL]. (2016-11-15) [2019-07-20]. <http://www.ynstc.gov.cn:8080/kjrd/jsjg/2548.jhtml>.
- [28] 中科院理化技术研究所, 理化所等压缩空气储能研究获进展 [EB/OL]. (2014-11-20) [2019-07-20]. http://www.cas.cn/ky/kyjz/201411/t20141120_4256022.shtml.
- [29] 北极星电力网, 国际首台10 MW级压缩空气储能集成实验与验证平台开始系统联合调试 [EB/OL]. (2017-05-05) [2019-07-20]. http://www.sohu.com/a/138338703_131990.
- [30] 中国储能网新闻中心. 金坛盐穴压缩空气储能智能电网储能系统国家示范项目通过专家组论证 [EB/OL]. (2017-03-22) [2019-07-20]. <http://www.escn.com.cn/news/show-406361.html>.
- [31] 新华网. 中盐金坛盐穴压缩空气储能国家示范项目奠基! 总投资15亿元 [EB/OL]. (2018-12-28) [2019-07-20]. http://www.xianjichina.com/special/detail_378134.html.
- [32] 沈鼓集团. 再签约, 又一国家示范项目花落沈鼓 [EB/OL]. (2019-03-26) [2019-07-20]. http://www.shengu.com.cn/article_read_882.html.
- [33] 广东省发展和改革委员会, 关于再次降低我省一般工商业电价有关事项的通知; 粤发改价格〔2018〕390号 [EB/OL]. (2018-8-28) [2019-07-20]. <http://www.shigoog.com/news/201809/zjzhe1202.html>.
- [34] 国家能源局南方监管局. 关于印发《广东调频辅助服务市场交易规则(试行)》的通知: 南方监管市场〔2018〕272号 [EB]. (2018-08-02) [2019-07-20].
- [35] 胡洋, 马溪原, 雷博, 等. 储能促进南方电网地区新能源消纳的可行性研究 [J]. 南方电网技术, 2018, 12(9): 53-61. HU Y, MA X Y, LEI B, et al. Feasibility study on energy storage promoting new energy consumption in China southern power grid area [J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(9): 53-61.
- [36] 南方能源监管局, 广东调频辅助服务市场交易实施细则(征求意见稿) [EB/OL]. (2018-08-31) [2019-07-20]. <http://news.bjx.com.cn/html/20180831/924875.shtml>.

作者简介:



GUO Z G

郭祚刚(通信作者)

1985-, 男, 湖南永州人, 高级工程师, 博士, 研究方向为综合能源技术, 新型压缩空气储能技术 (e-mail) guozg@csg.cn; gzg182@zju.edu.cn。

马溪原

1986-, 男, 黑龙江伊春人, 高级工程师, 博士, 研究方向为新能源及综合能源技术 (e-mail) maxy@csg.cn。

雷金勇

1982-, 男, 广东惠州人, 教授级高级工程师, 博士, 研究方向为分布式能源、配电网及综合能源系统 (e-mail) lejy@csg.cn。

袁智勇

1978-, 男, 湖北黄冈人, 教授级高级工程师, 博士, 主要研究方向为智能电网和综合能源系统 (e-mail) yuanzy1@csg.cn。

(责任编辑 郑文棠)