

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.03.009

火电厂灵活性改造背景下储能技术应用现状与发展

Application status and development of energy storage technology in the context of flexibility transformation of thermal power plants

李琦¹,王放放²,杨鹏威¹,赵光金²,刘晓娜¹,马双忱^{1*}

LI Qi¹, WANG Fangfang², YANG Pengwei¹, ZHAO Guangjin², LIU Xiaona¹, MA Shuangchen^{1*}

(1.华北电力大学 环境科学与工程系,河北 保定 071003; 2.国网河南省电力公司电力科学研究院,郑州 450052)
(1.Department of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2.Electric Power Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

摘要: 新能源的发展冲击着以火电为主体的传统能源结构,然而新能源的波动性和随机性也限制了电网供电的稳定运行。因此储能技术和火电厂灵活性改造成为了维护电网稳定运行和平抑电网峰谷差的重要手段。就目前较为流行的几项储能技术进行了对比评估,创新性地提出了一种基于储氨的火电厂灵活性改造提升技术。该技术将储能和火电厂灵活性改造相结合,为电力企业未来发展提供了新思路。

关键词: 火电企业;新能源;储能技术;灵活性改造;双碳;削峰填谷

中图分类号:TK 02;TK 01.9

文献标志码:A

文章编号:2097-0706(2023)03-0066-08

Abstract: The development of renewable energy is impacting the traditional energy mix with thermal power as its main body, but the fluctuation and randomness of renewable energy damage the stable operation of power grid. Therefore, energy storage technology and thermal power plant flexibility transformation have become the important means to maintain the stable operation of power grid and smooth the load curve. Four popular energy storage technologies are compared and evaluated, and a new thermal power plant flexibility transformation technology based on ammonia storage is proposed. This technology will be energy storage and thermal power plant flexibility transformation, is expected to become a new way for the future development of power enterprises.

Keywords: thermal power enterprise; new energy; energy storage technology; flexibility transformation; dual carbon; peak shaving and valley filling

0 引言

随着社会发展水平不断提高,我国对能源的需求量不断扩大。我国提出的“双碳”目标,即“力争2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和”,对新时代能源供给体系的转型升级提出了绿色、低碳、环保的发展要求^[1]。然而,在能源体系发展过程中,一些突出问题的出现限制了可再生能源规模的发展:一是绿色能源的产量和质量具有波动性和随机性,这些特点限制了其大规模接入电网;二是由于不同时段、不同季节的能源需求量存在较大差异,

电网供电呈现峰谷差异大的特点。储能技术既能实现对可再生能源的大规模储存,从而有效减少弃风弃光现象的产生,又可通过调峰调频的方式增加可再生能源的稳定性^[2]。在“双碳”背景下,风电、光伏等可再生能源的发展力度要继续加大,传统火电行业也要在能源体制改革中进行相应的性能提升和灵活性改造。储能技术的应用也为火电企业“削峰填谷”带来切实可行的解决办法。本文结合火电企业自身发展情况,分析不同的储能方式,提供一个用于火电企业灵活性改造和性能提升的储能方案。

1 储能技术概述

储能的目的是将多余的能量通过特定的方式储存起来,并且在需要的时候将能量重新释放。储能技术按照储能形式大致可分为以下几种^[3-4]:

基金项目: 国网河南省电力公司电力科学研究院科技项目(52170222000Q)
Science & Technology Project of Electric Power Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company(52170222000Q)

(1)物理储能,包括抽水蓄能、重力储能、压缩空气储能、飞轮储能等;(2)化学储能,包括电化学储能,和以氢能和氨能等为代表的热化学储能;(3)电磁储能,超导磁储能等;(4)热储能,包括蓄热储能、液态空气储能、热机械储能等。

储能方式的不同不仅体现在其运行方式上,还体现在其独特的适用范围和工程特性等方面。因此,各种储能方式的选取要综合考虑用户需求、当地的自然及社会条件等因素,以选出最适用的储能方式。本文对目前主流的储能方式进行介绍、分析。

1.1 抽水蓄能

抽水蓄能是目前应用最为广泛、技术成熟度最高的储能技术(如图1所示)。它具有储能规模大、使用寿命长、可大功率运行、能量转化率高显著优点。在用电低谷期利用多余的电能将下水库中的水抽送至水库,将电能转化为重力势能,并且在用电高峰期打开上水库闸门,水流推动发电机转子发电从而将势能转化为电能^[5]。

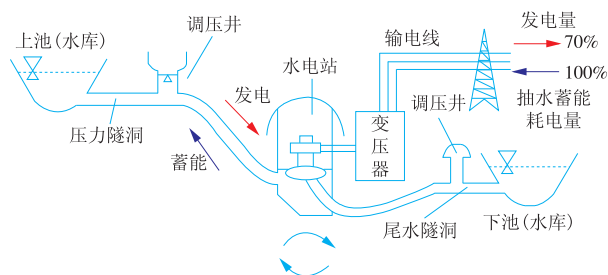


图1 抽水蓄能电站运行示意

Fig. 1 Schematic of a pumped storage power station

华东地区最大的抽水蓄能电站三峡建工浙江长龙山抽水蓄能电站,于2022年6月30日正式全面投产。该抽水蓄能电站总装机容量2 100 MW,主要任务是为华东地区电网调峰填谷、维稳调频、储能备用,平均每年可为华东地区用电高峰期增加2 435 GW·h的电量^[6]。该电站能够有效缓解华东地区高峰期用电紧张的问题,在维持电网稳定运行、增强电网调节能力等方面具有十分重要的作用。

虽然抽水蓄能电站在技术成熟度、建筑及运行成本、能量转化率、储能规模等方面有着较大的优势,但抽水蓄能的应用仍然存在一定的局限性。抽水蓄能电站建设需要较为适宜的环境,不仅需要地理环境中存在适合的水平高度差和较大的空地面积,还需要大量的水资源^[7],而在风电、光伏丰富的中西部地区,水资源较为匮乏;在华北等平原地带,没有合适的高度差。因此抽水蓄能电站的投用需要更加全面的评估。

1.2 压缩空气储能

压缩空气储能是将用电低谷期的多余发电量

用于驱动压缩机将空气压缩至气室,而在需要供电时将压缩空气释放从而吹动发电机进行发电^[8]。压缩空气储能具有使用寿命长、运行成本低、系统可靠性高等优点,因为压缩的气体为空气,因此并不会产生爆炸、有害气体泄漏等安全问题。压缩空气储能包括绝热压缩技术和非绝热压缩技术。在气室中进行绝热处理能够更高效地将电能进行转化、储存,其综合储能效率可达70%^[9]。而非绝热空气压缩技术则会损失掉一部分的热量,但其设备结构和装置流程更为简单。图2为带储热装置的绝热压缩空气储能系统。

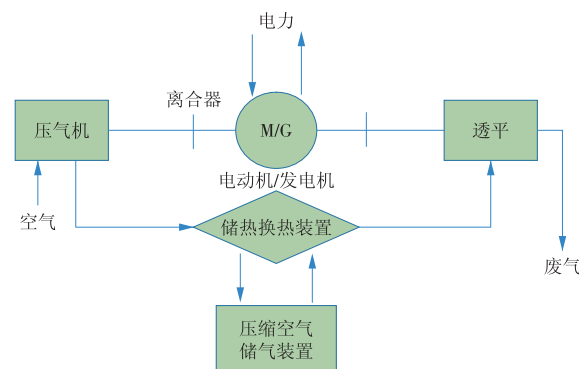


图2 绝热压缩空气储能系统

Fig. 2 Adiabatic compressed-air energy storage system

金坛盐穴压缩空气储能电站是世界首个“非补燃”压缩空气储能电站,也是国内首个盐穴压缩空气储能电站。该电站于2022年6月24日首次并网发电。它所采用的储气场所为当地地下盐层被开采后留下的矿洞,密封性良好,抗压能力强,是理想的储气场所,且与钢罐相比,矿洞能够减少制造成本及占地面积。金坛压缩空气储能电站采用储气和储热共同运行的模式,储能和释能过程不再依靠外部能量的投入,符合低碳环保的设计理念。该电站规划开设三期工程,总规模计划超过1 500 MW,电能转化效率预计可提升至60%以上。

虽然压缩空气储能在容量、安全性、环保性上有诸多优点,但和抽水蓄能类似,同样会受到地理环境的影响。在矿洞资源丰富的地区,压缩空气储能有着较大的优势,然而在矿洞或洞穴缺乏的地区,人工搭设储气罐体却会为电站带来较多的人力/财力支出和运维投入。因此,抽水蓄能和压缩空气储能往往会受到地理、气候等环境的影响无法大规模应用。

1.3 飞轮储能

飞轮储能是通过电能和动能相互转化,达成充放电过程的储能形式(如图3所示)^[10]。用电低谷期的多余电能或可再生能源的产电通过电动机带动

飞轮进行高速旋转,在需要放电时,飞轮上接入发电机进行放电。飞轮储能的优点在于寿命长、可充放电次数高、响应速度快、功率密度高、绿色无污染等。飞轮储能的储能规模和储能效率取决于飞轮装置的情况:转子的尺寸越大、转动速度越快,其能储存的能量也就越大;转子转动过程中摩擦力越小,其效率越高。这对转子的机械强度和装置的精密密度提出了较高要求。

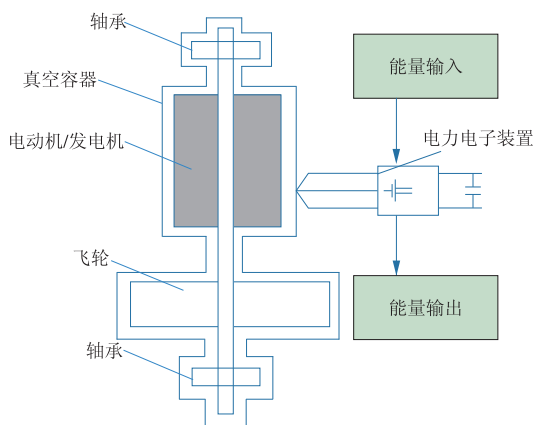


图3 飞轮储能装置结构

Fig. 3 Structure of a flywheel energy storage device

2011年美国的Beacon Power公司在纽约建成一座20 MW/5.0 MW·h飞轮储能电站,这是飞轮储能在电网侧应用的重大突破。目前,国内的飞轮储能系统主要还处于实验室和小型试验阶段,在飞轮材料、轴承支撑、系统运行方面的科研水平和发达国家仍有差距。国内关于飞轮储能的应用主要集中于电网调频方面,储能方面的研究仍然不成熟^[11]。

飞轮储能虽然有响应速度快、寿命长、环保无污染等特点,但飞轮储能受限于飞轮材料和轴承支撑能力等约束,导致其储能容量较小,而且大规模的飞轮储能造价极高,因此在储能系统中一般作为调频的辅助功能出现。

1.4 电化学储能

电化学储能的种类很多,如锂离子电池、铅酸电池、液流电池、超级电容器等^[12-15],不同的电化学储能方式具有不同的特点。(1)超级电容是一种介于传统电容器和充电电池之间的新型储能方式^[16],它既有传统电容充放电快速的特点,又具有电池储能的功能。与传统的电池储能相比,它具有功率密度大、循环寿命长、工作温度范围广、运维成本低等优点,应用前景较为广阔。(2)锂离子电池在新能源汽车和电子元件领域已经有着较为成熟的应用,在电网方面的应用主要是火电机组辅助调频服务,该服务近些年来需求旺盛、发展势头明显,未来也将会在此服务的基础上进行辅助调峰的应用。(3)铅

酸电池的发展历史悠久、制作工艺成熟、成本低廉,但是使用寿命短、废弃物污染严重等缺点十分明显。在注重节能环保的今天,铅酸电池已经逐渐被其他电化学技术所替代。(4)液流电池是一种将活性物质和电池主体分开的新型电池,电池结构仅作为反应物质发生反应的场所。液流电池是一种适用于中大型储能方案的电化学储能技术,但是目前电解液、隔膜、极板等部件的制作成本较高,应用规模较小^[17]。不同电池类型适用于不同的场景,在电力系统、航空航天、汽车等需要高响应速率、高能量密度的场景中,锂离子电池、钠离子电池等具有较大优势;在新能源储能等需要长时间、大规模能量储存的场景中,液流电池等则具有较大优势^[18]。

电化学储能根据具体项目的要求对储能的形式和规模能够进行调整,体现了其灵活性。作为我国除抽水蓄能以外装机容量占比最多的储能项目,电化学储能在全国各地都有不同规模的应用案例(见表1)。从表1中可以看出,近些年电化学储能项目的规模越来越大,电池类型也在迭代更新,在未来,更多的电化学储能项目会会在全国各地落地生根。

表1 我国部分已投运电化学储能项目

Table 1 Existing electrochemical energy storage projects in China

项目	储能容量	电池类型	投运时间
北京石景山电厂	2 MW/0.5 MW·h	磷酸铁锂	2014年
山西阳光电厂	9 MW/4.5 MW·h	三元锂	2017年
内蒙古上都电厂	18 MW/9.0 MW·h	磷酸铁锂	2018年
广东海丰电厂	30 MW/15.0 MW·h	磷酸铁锂	2019年
湖南桥口电厂	18 MW/9.0 MW·h	磷酸铁锂	2020年
华电滕州公司	101 MW/202.0 MW·h	磷酸铁锂、液流电池	2021年

电池储能系统的效率、可靠性和安全性等主要性能指标对储能系统的选用至关重要。2022年6月29日,国家能源局综合司发布了《防止电力生产事故的二十五项重点要求(2022年版)(征求意见稿)》,其中明确提到:中大型电化学储能电站不得选用三元锂电池、钠硫电池,不宜选用梯次利用动力电池;具有安全性的液流电池技术将受益于本次《征求意见稿》得到业内关注。

1.5 蓄热储能

储能不仅指储存电能,在生产生活中,热能也是十分重要的能量。储热一般包含显热储热、相变储热、化学反应储热等3种方式。显热储热可采用液态或固态材料,其优点有原理简单、价格低廉等,但其适用范围小、储能稳定性差,限制了应用范围。化学反应储热主要通过可逆化学反应进行热量储存,其优点在于储存能量密度较高且储热材料较易

保存,但也存在循环效率低和运维要求高的缺陷。相变储热是目前发展前景较广的方式,相变储热中最常用的就是熔融盐蓄热储能(如图4所示)^[19]。该技术利用熔融盐使用温区大、比热容高、换热性能好等特点,将火电厂发电过程中多余的热量通过换热器加热熔融盐的方式存储起来,需要热量时再通过换热器等设备将储存的热量取出。

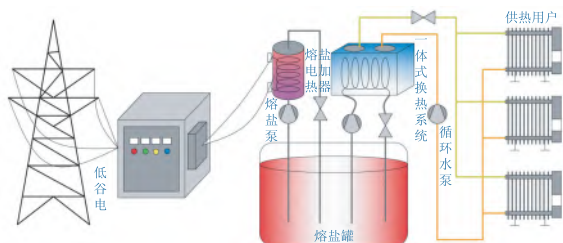


图4 熔融盐蓄热储能系统

Fig. 4 Molten salt heat storage system

中广核德令哈项目是我国第1个大型商业化槽式光热电站,占地2.46 km²,采用槽式导热油集热技术路线,并配套9 h熔融盐储热,实现了24 h连续稳定供电,其中直径长24 m的熔融盐储热罐是亚洲最大的^[20]。目前,熔融盐储热技术已经相对成熟,一般应用于光伏能源充足的光热电站或需要释放大量热量的燃煤电厂。

熔融盐蓄热储能作为一种优秀的相变储能技术,经常用于产热量较多或需热量较高的场景中,例如在绝热压缩空气储能中吸收压缩空气产生的热量进行储存,并在释放空气时对其进行预热,从而减少热量的损失。储热技术一般不会独立应用于储能项目中,大多是利用其优异的储热效果应用于供热系统中,辅助新能源或大型储能设施的热量交换过程。

1.6 储氢、储氨

因为化石燃料的燃烧会释放大量CO₂等温室气体,在能源结构转型的形势下,更加低碳环保的新型燃料氢气和氨气成为能源市场新宠。氢气和氨气完全燃烧的产物无害、无碳,关于氢气制备、运输、储存和应用的全产业链也在一步步搭建中,因此,将可再生能源发电和电厂低谷期的电能用于电解制氢、制氨是目前储能领域中极具发展前景的技术之一。

国家电网浙江台州大陈岛氢能综合利用示范工程于2022年7月正式投入运营,位于东海的大陈岛,发电总装机容量约27 MW,其上搭建的制氢装置综合能效可达72%,预计每年可消耗弃风电量365 MW·h,产出氢气73 000 m³。作为全国氢能综合利用和商业模式探索的先行示范区,该工程为我

国新时代能源发展打下了坚实的基础^[21]。

虽然风光氢储在现阶段已经取得了一些成就,但是氢能利用的全链条产业目前仍未完善,制氢效率、储氢方式、安全生产问题仍然是摆在面前的巨大挑战^[22]。随着技术的不断进步,储氢、储氨技术日趋完善,将成为储能技术领域的中流砥柱。

2 储能技术比较

每种储能技术都有独特的优缺点和适用环境。储能技术的多元化发展使得人们在设计储能方案时有着更多选择的余地,接下来本文从各方面综合比较各储能技术的特点,以期储能技术评估时能够更加准确^[3-4]。

2.1 性能比较

评估储能技术性能的技术参数包括能量密度、额定功率、能量转化效率、响应时间、储能周期等。能量密度即单位质量或体积下储存的能量大小,能量密度越大其储能规模的潜力也就越大,相应的占地面积也会越小;额定功率是储能系统维持稳定工作状态下的功率,额定功率越大,其能量的转化速率也就越快;能量转化效率是指储存后可供利用的能量和储存过程输入的能量之间的比值,它是评价储能技术可行与否的最关键指标之一,转化效率过低代表着对资源的浪费,是技术仍然不成熟的重要标志;响应时间是指从储能到放电大致所需的时间,它代表了储能系统的灵活运行能力,响应时间越短,代表其充放电频率越高;储能周期表示储能系统充电完成后,能量可以储存的时间,不同储能系统应用方向不同,其要求的储能周期也各有不同。

根据性能对比(见表2),我们可以了解到目前技术成熟的储能技术,其能量转化效率均能达到70%及以上,蓄热储能大部分是以热能形式进行利用的,因此一般不进行转化效率的计算。各储能技术采用的储能材料各异,能量密度的大小差异明显,但能量密度低的技术并不代表实用性差。大规模的储能方案一般额定功率会远大于中小型储能方案,从而保证大规模电网输送的需求。而响应时间和储能周期的差异决定了各储能技术在系统中的应用范围。例如抽水蓄能、压缩空气储能这类的大规模储能技术,其主要用途为电厂调峰、能量管理、系统储备等。例如飞轮储能、超导磁储能等小规模储能技术,其主要用途则是优化电能质量、调节发电频率、控制间断电源等。蓄热、储氢、储氨等产生副产品的储能技术,不仅具有常规储能技术的作用,还具有拓宽电力企业产业链、增加额外盈利等方面的作用。

表 2 各储能技术性能对比

Table 2 Technical Performance of different energy storage technology

储能技术	能量密度/(W·h·kg ⁻¹)	额定功率/MW	能量转化效率/%	响应时间(级别)	储能周期(级别)
抽水蓄能	0.5~15.0	100.0~5 000.0	71~80	小时	数小时至数月
压缩空气储能	30.0~60.0	5.0~300.0	45~60	小时	数小时至数月
飞轮储能	10.0~30.0	0~1.5	86~94	毫秒至分钟	数秒至数分钟
电化学储能	2.0~15.0	0~8.0	70~90	秒至小时	数分钟至数天
蓄热储能	80.0~200.0	0~60.0	—	小时	数分钟至数月
氢/氨储能	350.0/45.0	0~6.0	<50	小时	数小时至数月

2.2 经济、环境效益对比

在储能电站搭建和运维过程中,各种储能技术的经济性和环境效益也是工程建设中重要的参考依据。不同储能技术的使用寿命、经济成本、安全与环境问题等考虑因素见表3。经济成本是储能电站的建设成本,是工程项目规划中最重要的影响因素;使用寿命则体现了储能系统在运行过程中的维护成本;安全与环境因素则是对储能系统全方面评价的重要信息。

抽水蓄能和压缩空气储能这2种大规模储能技术虽然造价较高,但使用寿命较长,盈利周期也较长。电化学储能、蓄热储能、飞轮储能的使用寿命相对较短,且需要较频繁地对电池或熔融盐进行更换、对设备进行维修。氢/氨储能目前仍处于示范性

应用阶段,其在催化剂方面的研究仍不成熟,催化剂的高价格和频繁更换使制氢、制氨工艺费用较为昂贵。物理类型的储能技术大多数对环境和安全问题的影响较小,电化学储能的电池材料如若处理不好,则会对环境造成污染。氢和氨作为清洁能源,不存在电池类似的污染问题,但储氢和储氨的方式还需要进一步进行规划,如果储存方式不合理就会出现较大的安全隐患。在大容量储能方面,抽水蓄能的成本较压缩空气储能更低,且寿命也更长,在规划建设时可优先考虑抽水蓄能电站。蓄热储能虽然储能成本较低,但能量利用范围较窄,属于在特定情况下的最佳解决方案。碍于技术发展不成熟,氢、氨储能目前仍然费用高昂,仅处于示范性应用范畴。

表 3 储能技术经济、安全、环境性对比

Table 3 Economy, safety and environmental benefits of different energy storage technology

储能技术	使用寿命/a	经济成本/(元·kW ⁻¹)	安全与环境问题
抽水蓄能	30~60	5 000~6 000	受地形和气候影响较大,主要问题是在水资源较少的西部地区补给水不好解决和平原地区难以实现
压缩空气储能	20~40	9 000	受到地形的影响,需要地下的储气空间;若使用罐装又会增加成本,空气成分复杂,在绝热压缩过程中存在安全隐患
飞轮储能	≤15	2 000~3 000	稳定性高,对环境无污染
电化学储能	5~15	2 000~4 000	电池的化学成分对环境污染严重,安全与环境问题是首先要解决的关键
蓄热储能	5~15	400~800	熔融盐等在替换后需要集中处理;放热过程不会对环境造成污染,稳定性较高,安全性可以保障
氢/氨储能	催化剂易中毒,设备寿命不高	20 000	无污染,安全性仍较难保证

3 基于储氨的火电厂灵活性改造方案

3.1 火电厂灵活性改造

风电、光伏等新能源的间歇性和波动性为电网带来了不确定性,当前的储能技术尚不足以实现大规模的电力储备,造成了“弃光、弃风”现象的产生。火力发电作为最可靠的电力供应保障,是维持电网稳定性的压舱石。传统燃煤电厂并没有灵活调节负荷的能力,也不能像风电、光伏机组等进行频繁启停。限制燃煤电厂负荷调节能力和启停灵活性的因素主要有以下几点;(1)火电机组发电流程涉

及煤粉磨制、炉膛燃烧、热量传递等多个流程,降低负荷的过程较为缓慢;(2)炉膛低负荷燃烧会使煤粉燃烧不充分,降低供热系统稳定性;(3)设备的启停程序过于复杂、耗时过长且会浪费大量能量,对系统寿命造成较大影响。因此,燃煤电厂的灵活性提升改造能够使火电企业在能源体系改革中找到新的出路^[23]。

3.2 基于储氨的火电厂灵活性能提升改造

氨储能就是利用燃煤电厂输电低谷期的多余电量电解N₂制备NH₃后将其储存起来的技术。氨的应用多种多样,氨既能当作燃烧的能源,又是重要

的化学品。在燃煤机组的生产活动中,氨可与煤粉进行掺混燃烧,混合燃烧能够减少煤的使用量,从而减少CO₂的排放^[24];氨可用于燃煤电厂的烟气处理过程,降低燃煤电厂烟气处理成本;氨还可作为化肥生产企业等用氨企业的原料,为电厂带来额外的经济收益。

3.2.1 氮气电催化还原研究

储氮技术的核心是氮气的电催化还原过程。目前,世界各国正在加速推进氮的催化还原研究。中科院青岛能源所杨勇教授团队采用在碳骨架上进行纳米杂化的TiO₂为催化剂,通过Ti³⁺和氧空位的协同促进作用,在温和条件下进行电催化还原合成氨的试验,结果显示NH₃的产生速率为19.97 μg/(h·mg),法拉第效率达到25.49%^[25]。中科院大连化物所齐海峰团队采用单原子钌基催化剂进行电催化还原合成氨的试验,结果显示其反应速率为7.11 mmol/(g·h),法拉第效率为29.6%^[26]。丹麦技术大学的Jens K. Nørskov团队制备的一种稳定的PtAu阳极催化剂,在最佳的试验条件下表现出高达(61±1)%的法拉第效率^[27]。随着人们不断对催化剂的种类和形状进行调整,对催化反应的作用机理进行深入探究,对催化反应进行的环境进行不断改善。电催化还原合成氨的速率和效率也就可以继续增大。

3.2.2 氨气的储能性质探究

在研究对比储氮/储氢技术时,需研究氨气、氢气的燃烧性质,以选择合适的储能方式^[28-29]。通过对氨气、氢气的燃烧性质进行对比(见表4),可以对氨储能的性能进行可行性判断。

表4 氢气、氨气储能性能对比

Table 4 Comparison of hydrogen and ammonia energy storage

项目	氢气	氨气
密度/(g·cm ⁻³)	0.071	0.60
沸点/°C	-253	-33
储存方式	金属氢化物	加压罐
能量密度/(GJ·m ⁻³)	3.6	13.6
单位能量成本/(美元·GJ ⁻¹)	35.2	13.3
最大火焰速度/(m·s ⁻¹)	2.90	0.07
最小点火能/mJ	0.02	8.00
辛烷值(ROD)	≥120	>111

氨储能的优势:沸点高,液化成本远低于氢气;储存方式简单,加压钢罐即可储存,因此氨气的储存成本和难易程度远低于氢气;氨气的能量密度高于氢气,单位体积下氨气的储能效率高于氢气;单位能量成本氨气也远小于氢气,因此氨气与氢气储存相同的能量,氨气的成本要更低,从经济角度看,

氨气比氢气更适合作为储能的材料。

氨储能的劣势:氨气燃烧的火焰速度很低,会造成燃烧效率低和燃料不能充分燃烧,从而影响氨储能的能量转化效率;氨气燃烧的最小点火能远高于氢气,因此氨气的燃烧需要较高的火花能量,这也是目前限制氨气燃料发展的重要因素之一;由于氨气燃烧过程存在不能完全燃烧的风险,为避免资源的浪费和减少NO_x的大量产生,一般采用氨气与天然气或煤粉混合燃烧的方式。

储氮技术在经济性上是优于储氢技术的,无论是储存成本还是能量密度都表现出优异的储能性能,但氨气的燃烧特性也暴露了它作为燃料的弊端。目前正在抓紧研究氨燃料的应用技术,使氨燃料真正成为符合“双碳”目标的新型绿色能源。

3.2.3 氨在火电厂的灵活应用

氨气在火电企业中具有多种应用途径;氨气可以与煤粉或天然气混合进行燃烧,从而降低化石燃料的使用量,达到减排降碳的目的。氨气可用于火电企业的烟气处理过程,氨法脱硫、氨法脱硝、氨法碳捕集均为实际应用中效果良好的烟气治理技术。氨气还可直接作为化学品或者制备为铵盐出售给化工企业或化肥工厂。氨的综合利用能够为电力企业节约资源,降低运行成本,创造出额外收益。

3.2.4 电厂制氮的经济性评估

目前我国液氨市场价格一直处于4 500~4 800元/t,电网电费为0.5元/(kW·h),国际上电化学催化还原制氮的法拉第效率在30%左右,制造1 t氨气大约需要14 MW·h的电,成本价格约为7 000元/t。虽然产品价格高于目前的主流市场价格,但随着电化学制氮技术研究的不断深入,电化学催化制氮的效率会不断增加,采用贵金属制备的催化剂更是能将法拉第效率提高到50%以上,但是贵金属催化剂制备较为昂贵,不适用于工业生产。通过对氮还原反应机理的深入研究,当电化学反应的法拉第效率达到60%时,其成本价格就能够降至4 500元/t,基本与市场价格持平。因此,采用电化学制氮工艺代替传统哈伯法制氮工艺从经济成本方面考虑是完全可行的。

基于储氮的火电厂灵活性改造方案总成本由3部分组成,即

$$C = C_{gz} + C_{za} + C_{chu},$$

式中: C_{gz} 为灵活性改造所需的建筑成本; C_{za} 为制备氨气所用的电费; C_{chu} 为储氮所配置的储罐成本。假设为每台100 MW的火电机组配备1个调峰容量为额定容量30%的储氮系统, C_{gz} 约为3 000万元, C_{chu} 约为12.8万元,日均 C_{za} 约为22.5万元。

4 结论

本文首先对各类储能技术进行介绍,综合目前应用实例对各种储能技术的优劣势进行系统性分析,然后通过对储能技术从性能、经济、安全、环境等角度的综合对比来评价各储能技术的适用条件和技术成熟度。通过对各储能技术的对比,可以在火电企业未来的发展规划中为其带来更加适合的储能技术。

基于储氢的火电厂灵活性能提升改造技术是一项低碳环保、经济效益高、资源利用率高、前景广阔的储能技术,该技术不仅能为火电企业解决“削峰填谷”的技术难题,还通过生产高价值的副产品而为火电厂带来更高收益。

基于储氢的火电厂灵活性能提升改造能够为火电企业避免因为机组降低负荷和频繁启停而造成的经济损失和资源浪费,能够使火电行业在新能源不断扩大规模的新形势下继续正常运行,能够带动火电行业减排降碳的步伐,能够助推火电行业的绿色低碳转型。未来的火电企业将成为集供电、供热、供燃料、供给化工产品的能源产业综合体。

参考文献:

- [1]赵国涛,钱国明,王盛,等.“双碳”目标下火电企业绿色低碳转型的对策分析[J].华电技术,2021,43(10):11-21.
ZHAO Guotao, QIAN Guoming, WANG Sheng, et al. Analysis on solution for green and low-carbon transformation of thermal power enterprises to achieve carbon peak and carbon neutrality [J]. Huadian Technology, 2021, 43 (10) : 11-21.
- [2]王成山,于波,肖峻,等.平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J].中国电机工程学报,2012,32(16):1-8.
WANG Chengshan, YU Bo, XIAO Jun, et al. Sizing of energy storage systems for output smoothing of renewable energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16):1-8.
- [3]AKINYELE D O, RAYUDU R K. Review of energy storage technologies for sustainable power networks[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2014, 8: 74-91.
- [4]CHEN H S, CONG T N, YANG W, et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review [J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(3):291-312.
- [5]吴燕.新型电力系统场景下抽水蓄能的应用探讨[J].电器工业,2022,(6):61-64.
WU Yan. Application of pumped storage in new electric power system [J]. China Electrical Equipment Industry, 2022, (6):61-64.
- [6]李世超,胡国稳,卓灵书.绿水青山间崛起大国重器[N].浙江日报,2021-07-05(008).
- [7]DENHOLM P, KULCINSKI G L. Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems [J]. Energy Conversion and Management, 2004, 45(13/14):2153-2172.
- [8]FERTIG E, APT J. Economics of Compressed air energy storage to integrate wind power: A case study in ERCOT[J]. Energy Policy, 2011, 39(5):2330-2342.
- [9]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):2893-2907,3140
MEI Shengwei, LI Rui, CHEN Laijun, et al. Research Progress and prospect of advanced compressed air energy storage technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38 (10):2893-2907,3140
- [10]童家麟,洪庆,吕洪坤,等.电源侧储能技术发展现状及应用前景综述[J].华电技术,2021,43(7):17-23.
TONG Jialin, HONG Qing, LYU Hongkun, et al. Development status and application prospect of power side energy storage technology [J]. Huadian Technology, 2021, 43(7):17-23.
- [11]刘文军,贾东强,曾昊旻,等.飞轮储能系统的发展与工程应用现状[J].微特电机,2021,49(12):52-58.
LIU Wenjun, JIA Dongqiang, ZENG Haomin, et al. Development and engineering application of flywheel energy storage system [J]. Small & Special Electrical Machines, 2021, 49(12):52-58.
- [12]王松岑,来小康,程时杰.大规模储能技术在电力系统中的应用前景分析[J].电力系统自动化,2013,37(1):3-8,30.
WANG Songcen, LAI Xiaokang, CHENG Shijie. An analysis of prospects for application of large-scale energy storage technology in power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1):3-8,30.
- [13]饶宇飞,司学振,谷青发,等.储能技术发展趋势及技术现状分析[J].电器与能效管理技术,2020(10):7-15.
RAO Yufei, SI Xuezheng, GU Qingfa, et al. Energy storage technology development trend and technology status analysis [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(10):7-15.
- [14]缪平,姚祯,LEMMON John,等.电池储能技术研究进展及展望[J].储能科学与技术,2020,9(3):670-678.
MIAO Ping, YAO Zhen, LEMMON John, et al. Current situations and prospects of energy storage batteries [J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9 (3) : 670-678.
- [15]张纯江,董杰,刘君,等.蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J].电工技术学报,2014,29(4):334-340.
ZHANG Chunjiang, DONG Jie, LIU Jun, et al. A control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage

- system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 334-340.
- [16] 彭占磊, 杨之乐, 杨文强, 等. 电化学储能参与电力系统规划运行方法综述[J]. 综合智慧能源, 2022, 44(6): 37-44. PENG Zhanlei, YANG Zhile, YANG Wenqiang, et al. Review on planning and operation methods for power system with participation of electrochemical energy storage systems [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44 (6) : 37-44.
- [17] 丁明, 陈忠, 苏建徽, 等. 可再生能源发电中的电池储能系统综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 19-25, 102. DING Ming, CHEN Zhong, SU Jianhui, et al. An overview of battery energy storage system for renewable energy generation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 19-25, 102.
- [18] 袁治章, 刘宗浩, 李先锋. 液流电池储能技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(9): 2944-2958. YUAN Zhizhang, LIU Zonghao, LI Xianfeng. Research progress of flow battery technologies [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(9): 2944-2958.
- [19] 吴玉庭, 任楠, 马重芳. 熔融盐显热蓄热技术的研究与应用进展[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(6): 586-592. WU Yuting, REN Nan, MA Chongfang. Research and application of molten salts for sensible heat storage [J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2 (6) : 586-592.
- [20] 新华社. 我国首个大型太阳能光热示范电站投运[EB/OL]. (2018-10-10) [2022-12-01]. http://www.gov.cn/xinwen/2018-10/10/content_5329291.htm.
- [21] 浙江在线. 全国首个海岛“绿氢”示范工程正式投运[EB/OL]. (2022-07-09) [2022-12-01]. http://photo.zjol.com.cn/202207/t20220709_24494542.shtml.
- [22] 曹军文, 覃祥富, 耿嘎, 等. 氢气储运技术的发展现状与展望[J]. 石油学报(石油加工), 2021, 37(6): 1461-1478. CAO Junwen, QIN Xiangfu, GENG Ga, et al. Current status and prospects of hydrogen storage and transportation technology [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2021, 37(6): 1461-1478.
- [23] 侯玉婷, 李晓博, 刘畅, 等. 火电机组灵活性改造形势及技术应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 8-13. HOU Yuting, LI Xiaobo, LIU Chang, et al. Flexibility reform situation and technical application of thermal power units [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 8-13.
- [24] 许焕焕, 葛一, 李强, 等. 氨燃料及应用技术研究进展[J]. 东北电力大学学报, 2022, 42(2): 1-13. XU Huanhuan, GE Yi, LI Qiang, et al. Research progress of ammonia fuel and application technology [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2022, 42(2): 1-13.
- [25] LI Q L, FANG C, YANG Z H, et al. Modulating the oxidation state of titanium via dual anions substitution for efficient N_2 electroreduction [J]. Small, 2022, 18 (25) : 2201343.
- [26] QI H, YANG J, LIU F, et al. Highly selective and robust single-atom catalyst Ru1/NC for reductive amination of aldehydes/ketones [J]. Nature Communications, 2021, 12 (1): 3295-3295.
- [27] FU X, PEDERSEN J B, ZHOU Y, et al. Continuous-flow electrosynthesis of ammonia by nitrogen reduction and hydrogen oxidation [J]. Science, 2023, 6633 (379) : 707-712.
- [28] LESMANA L, ZHANG Z, LI X, et al. NH_3 as a transport fuel in internal combustion engines: A technical review [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2019, 141 (7) : 070703.
- [29] 杨于驰, 张媛. 储能电池技术发展研究浅析[J]. 东方电气评论, 2022, 36(3): 1-4. YANG Yuchi, ZHANG Yuan. Latest technological developments of energy storage batteries [J]. Dongfang Electric Review, 2022, 36(3): 1-4.

(本文责编: 陆华)

收稿日期: 2022-12-21; 修回日期: 2023-02-17
上网日期: 2023-03-25; 附录网址: www.ienergy.cn

作者简介:

李琦(1999), 男, 在读硕士研究生, 从事电化学制氨和氨储能方面的研究, 3181592726@qq.com;

马双忱*(1968), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 从事燃煤电厂污染控制和电厂化学等方面的研究, msc1225@163.com。

*为通信作者。