

氢储能技术及其电力行业应用研究综述及展望

刘金朋, 侯 焘

(华北电力大学, 北京 102206)

摘 要: 氢储能是可再生能源消纳问题的有效解决方法之一, 其开发利用对可再生能源的规模化利用具有重要意义。通过对目前氢储能的技术发展研究现状、利用模式研究现状以及在电力行业的相关研究进行梳理及阐述, 并对氢储能在未来的应用趋势进行了展望。该研究能够为今后的研究提供新的思路, 以及为促进氢储能产业的发展, 实现能源利用的清洁高效提供路径借鉴。

关键词: 氢储能; 研究现状; 电力应用

作者简介: 刘金朋(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力供需系统分析理论研究、电力技经造价和投资优化的教学和科研工作。

中图分类号: TM734 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1256(2020)02-0230-05

Review and Prospect of Hydrogen Energy Storage Technology and its Application in Power Industry

LIU Jinpeng, HOU Tao

(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Hydrogen storage is one of the effective solutions to the problem of renewable energy consumption. Its development and utilization is of great significance to the large-scale utilization of renewable energy. Through the review and elaboration of the current research status of hydrogen storage technology development, utilization mode research status and related research in the power industry, the future development trend of hydrogen storage is prospected. This paper can provide new ideas for future research, as well as a reference for promoting the development of hydrogen storage industry and realizing clean and efficient energy utilization.

Key words: hydrogen energy storage; research status; electric power application

在我国致力于建设清洁低碳、安全高效的现代能源体系的大背景下, 能源发展进入新阶段, 但仍面临诸多挑战, 如可再生能源发展面临多重瓶颈、能源系统整体效率较低、清洁能源在全国范围内优化配置受阻、能源清洁替代任务艰巨等。在可再生能源的利用方面, 由于风力、光能等能源发电特性与负荷特性同步性较差, 新能源消纳问题亟待解决, 同时存在发电、用电中心脱节的问题, 氢储能作为将电力转为氢气的技术, 对促进可再生能源发电规模化、低碳化发展具有重要意义。

国家发展改革委、国家能源局印发的《能源发展“十三五”规划》中提出“鼓励‘三北’地区风电和光伏发电参与电力市场交易和大用户直供, 支持采用供热、制氢、储能等多种方式, 扩大就地消纳能力”。与传统能源相比, 氢能具有零污染、高效率、来源丰富、用途广泛等优势, 氢储能具有开发潜力大、生产灵活、清洁高效、污染少等显著发展

特点^[1]。随着我国对电力消纳问题的重视及可再生能源发电上网电价的调整, 氢储能成为消纳弃风弃光的关键技术, 利用弃风弃光电量电解水制氢, 能够有效降低污染物排放, 可以提高可再生能源利用的综合效益。

基于此, 对氢储能技术在电力行业应用进行研究, 发掘未来发展潜力, 有助于推动可再生能源大规模投资建设与科学发展, 对提高我国风电消纳率、光电消纳率, 降低能源环境污染, 缓解能源危机, 促进经济增长方式转变等方面意义重大。同时有利于建设节约型社会, 加快能源结构的转型。

1 氢储能技术发展研究梳理

氢储能技术是利用了电力和氢能的互变性而发展起来的。在可再生能源发电系统中, 电力间歇产生和传输被限的现象常有发生, 利用富余的、非高峰的或低质量的电力大规模制氢, 将电能转

化为氢能储存起来;在电力输出不足时利用氢气通过燃料电池或其它反应补充发电。能够有效解决当前模式下的可再生能源发电并网问题,同时也可以将此过程中生产的氢气分配到交通、冶金等其他工业领域中直接利用,提高经济性。氢储能技术及应用结构如图1所示。

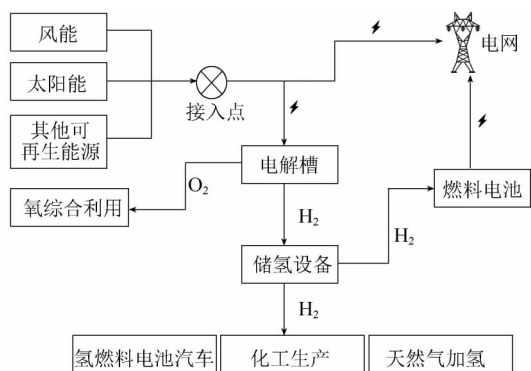


图1 氢储能技术及应用结构图

为了实现完整的可再生能源-电能-氢能-电能转化过程,氢储能技术中制氢技术、储氢技术、氢氧燃料电池技术的发展尤为重要,目前制氢技术、储氢技术、氢氧燃料电池技术已经由快速发展阶段转向深入研究阶段^[2]。

1.1 制氢系统发展研究梳理

电解水制氢是清洁的制氢方式。电解水制氢技术的发展,需要高活性的阳极催化剂,氟的适度调节可以从本质上改善电催化剂的反应效率,从而提高制氢效率^[3];找到电催化活性和稳定性与贵金属电催化剂相似或优于贵金属电催化剂,是降低电解水制氢成本的关键。文献[4]试验确定了(Cu_{0.83}Co_{0.17})₃P; x at. % S是具有优秀析氢反应电催化活性的材料,降低电解水制氢成本^[4];文献[5]中设计并构建了一种RuO₂@IrO_x核壳异质结构纳米复合材料降低了电解槽能耗、提高了电解槽的使用寿命^[5];文献[6]中以PSU和PVP为基体,探索了一种均匀的共混膜体系,提高了电解槽的效率与动态响应,并能在一周能表现出优异的性能和稳定性^[6]。

1.2 储氢系统发展研究梳理

二次能源中氢是推动燃料电池技术进步的关键能源载体。氢具有体积能量密度低的特点,因此,如何提高储存密度,是储氢系统发展的重点;文献[7]研究了被认为是最有前途的液态有机氢载体之一FA为氢载体的储氢方法,并研究了均相和非均相催化剂来优化FA储氢性能^[7];文献

[8]研究了镁基Mg₂Ni贮氢合金的目前存在的缺陷和未来的发展方向^[8];文献[9]研究了储氢合金、无机化学氢化物、碳材料和液态氢化物等多种储氢材料,找到NH₃作为氢载体,具有易液化压缩、体积密度大等优点^[9]。

1.3 氢氧燃料电池发展研究梳理

作为未来颠覆性技术的重要技术方向,发展氢燃料电池技术对稳定能源供给、改善能源结构、推动低碳发展、提升国际竞争力和科技创新实力、促进生态文明建设等方面,都具有非常重要的意义;文献[10]提出了一种Mn₂+ /MnO₂氧化还原阴极与H⁺/H₂气体阳极相结合的锰氢电池的概念,具有低成本、长寿命、高能量密度的潜在性能,将带来大规模应用的变革^[10];制备廉价、高活性氧还原催化剂对于发展氢氧燃料电池清洁能源极为重要,利用黑木耳作为生物质材料碳化形成BF-N-950催化剂,提升氢氧燃料电池峰值功率^[11];开发非贵金属、高效的氧还原反应(ORR)催化剂替代铂基材料对氢燃料电池具有重要意义,文献[12]研究了过渡金属二羟基化合物(TMD)综合ORR活性,通过试验验证了TMD替代可能性,为后续研究打下了基础^[12]。

2 氢储能在电力行业的应用研究综述

随着可再生能源发电技术的成熟,氢储能在电力行业中的重要性愈加突出,与能源供应端融合、与分布式能源发电结合以及与电网结合为发展趋势,减少了能源的出力不确定性因素对电网的不利影响,提高了分布式能源发电的利用效益,在下游产业的应用也为其规模化发展提供有利空间。

2.1 在分布式能源系统方面的应用

氢储能与分布式发电相结合,能够解决分布式能源接入配电网后的消纳问题。以含分布式光伏发电与气电混合的区域多能互补配电系统为例,在众多的多能互补系统形态中,其作为多能互补分布式能源发电的一种典型形式,位于能源消费末端,能够解决分布式光伏高渗透率地接入配电网后的消纳问题,主要由分布式光伏发电系统、气电混合装置、氢储能装置、配电网、燃气网和控制系统等部分组成^[13]。

氢储能因其高能量密度、长期储存能力和模块性而成为有效的电能储存方案,以解决区域可

用的可再生能源和负荷的匹配问题。在孤立的微电网和离网的偏远地区,间歇性可再生能源与氢储能系统集成,可以减少甚至消除柴油发动机的使用,同时能够避免建设外来电网的高成本^[14]。

2.2 在下游产业方面的应用

2.2.1 氢燃料电池汽车应用

氢能由于其质量能量密度高,具有较高的化学能,续航里程长,被认为是一种理想的汽车燃料,受到了国内外的普遍关注。氢和燃料电池汽车通常被认为是运输系统脱碳的关键因素^[15],燃料电池车用氢需要高纯度标准^[16]。对于车载储能,燃料电池电动汽车需要紧凑、轻便、价格合理的储氢系统来替代加压储氢罐,并对储氢技术要求极高^[17]。

目前氢燃料电池汽车技术的最大瓶颈在于后期的配套设施建设,随着氢作为汽车燃料应用的日益普及,氢燃料站的开发建设也在显著增加,但其易燃性引起了极大的安全问题,对充能基础设施的需求较高^[18]。根据《中国氢能源及燃料电池产业白皮书》,目前我国已实现了小规模全产业链示范运营,为氢燃料电池汽车大规模商业化运营奠定了良好基础。但消费者的行为以及技术、能源价格和公共政策共同影响氢燃料电池汽车的发展,这些因素在商业化运营初期影响较为深刻^[19]。

2.2.2 电转气系统应用

间歇性可再生电力生产所占的份额不断增加,对储能产生更高要求,以确保电力系统高效可靠地运行。电转气(P2G)概念提供了储存多余可再生电力的可能性,能够提高可再生能源发电的利用率^[20]。

电转气系统是将电能转换为天然气或氢气,将得到的气体存储在天然气管网或天然气存储设备,在可再生能源出力高峰时期进行转化存储,在电力短缺时供能,从而提高系统可再生能源的消纳能力的系统^[21]。电转气设备的出现可以很大程度上促进风电消纳,其工作原理如图2所示:

氢储能是解决可再生能源发电不稳定的有效方式之一,通过电转气技术可以实现有效、长期、广域的储能。新兴的电转气技术实现了从可再生能源发电厂远距离传输能源,推进燃气与电力系统的深度协调^[22],同时较高的电转气转换率能够降低天然气系统的运行成本^[23]。

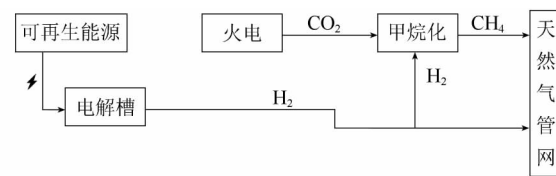


图2 电转气系统工作原理图

2.3 在能源互联网方面的应用

随着中国“一带一路”战略的实施,能源互联网将有效利用各地区的可再生资源,在发展电力的同时发展相关产业^[24]。氢储能系统可以以氢能作为互联媒介,将风能、光能、热能、天然气、生物质能和电能互联和相互转换,来实现多能互补协调发展,提高能源的整体利用效率;文献^[25]构建了含制氢储能的电-气综合能源日前经济调度模型,验证了制氢储能对平抑可再生能源波动性及间歇性的功能以及提高系统经济性和能源利用率的作用^[25];文献^[26]建立了以氢储能为转换中心,建立了天然气电气互联最优管理模型,促进了多能互补,使得能源互联的优势得以发挥,稳定了能源互联网络的运行^[26]。

3 未来发展应用展望

(1)加强技术突破,实现成本最优。虽然氢储能系统在可再生能源利用上有明显优势,但目前技术成本偏高制约了其发展,在各情景下如何实现成本最优有待进一步研究。未来氢储能系统的发展需结合化学、生物学、材料学等学科进行研究,进一步突破高效制氢、低成本储氢、高效放电等关键技术;研究制氢成本下降路径,开展天然气与氢气混合研究,降低天然气的成本;合理分配氢储能系统及相关配套设施的成本,同时提高系统利用效率,以降低单位成本,提高经济效益。

(2)完善配套设施,优化综合效益。针对在氢储能系统在利用层面还存在配套设施与产业链建设不完善、综合利用效率有待进一步提升等问题,未来可通过与政府部门的配合进行改善。在政府政策支持下,加快氢燃料站的试点建设,进一步优化燃料电池电动汽车的储氢系统,研究氢动力汽车未来市场的发展方向;考虑开展气-热联产等多途径能源综合利用,提升氢储能系统的综合利用效率;构建氢储能系统项目效益评价体系,为示范项目进行定量评价,以提高综合效益。

(3)提升应用水平,扩大利用规模。在氢储能

与分布式能源相结合的应用模式不够成熟的现状下,未来可考虑开展氢储能系统的容量配置研究,最优化完成新能源的消纳目标,解决可再生能源就地消纳问题;做好各能源之间的耦合,开发风光互补发电制氢储能系统;进一步开展微网和离网情况下与氢储能系统结合的研究,解决偏远地区用能问题;可开展海上风电联合氢储能系统的大规模应用研究,促使应用规模的扩大。

(4)优化控制策略,提高经济效益。氢储能能在能源互联网中,不仅能像传统储能技术一样解耦电能的生产和消费之间的关系,还能将电能转化为氢能后在多个不同的能源网络和终端用户间流动。开展含氢储能的能源互联网协调控制模型及优化控制策略的研究,有利于发挥能源互联网中多能互补的优势,提升综合能源利用率,提高能源互联网的经济效益。

4 结语

本文对氢储能系统的技术开发利用以及在电力行业应用的发展动态进行了较为全面的综述。对目前国内外氢储能系统在制氢、储氢、氢氧燃料电池技术的发展现状以及其与分布式能源和新能源相结合的应用现状进行阐述,根据目前发展中存在的阻碍,对其未来发展方向进行了展望,为今后氢储能的开发利用提供新的思路。

参考文献:

- [1] 孟翔宇,顾阿伦,邬新国,等. 2019 年中国氢能政策、产业与科技发展热点回眸[J]. 科技导报, 2020, 38(03): 172-183.
- [2] LI Y, WU F, MIAO H. Analysis of research status and development trend of hydrogen storage technology[R]. Houston, ACM International Conference Proceeding Series, 2019: 228-233.
- [3] CHEN G F, LUO Y, DING L X, WANG H. Low-voltage electrolytic hydrogen production derived from efficient water and ethanol oxidation on fluorine-modified FeOOH anode[J]. ACS Catalysis, 2017, 8(1): 526-530.
- [4] PRASAD P P, OLEG I V, SHRINATH D G, et al. Electrochemically active and robust cobalt doped copper phosphosulfide electro-catalysts for hydrogen evolution reaction in electrolytic and photoelectrochemical water splitting[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(16): 7855-7871.
- [5] LYU HONG, WANG SEN, LI JIAKUN, et al. Self-assembled RuO₂@IrO_x core-shell nanocomposite as high efficient anode catalyst for PEM water electrolyzer[J]. Applied Surface Science, 2020, 514.
- [6] DAVID AILI, MIKKEL R K, JOE T, et al. Polysulfone-polyvinylpyrrolidone blend membranes as electrolytes in alkaline water electrolysis[J]. Journal of Membrane Science, 2020, 598.
- [7] NAOYA ONISHI, MASAYUKI IGUCHI, XINCHUN YANG, et al. Development of Effective Catalysts for Hydrogen Storage Technology Using Formic Acid[J]. Advanced Energy Materials, 2019, 9(23).
- [8] 段如霞,田晓,赵凤岐,等. 镁基 Mg₂Ni 储氢合金的制备及其性能改善研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(11): 20-27.
- [9] YOSHITSUGU Kojima. Hydrogen storage materials for hydrogen and energy carriers[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(33): 18179-18192.
- [10] CHEN WEI, JIN YANG, ZHAO JIE, et al. Nickel-hydrogen batteries for large-scale energy storage[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(46): 11694-11699.
- [11] 王兴栋,方锦杰,刘雪瑞,等. 利用生物质材料合成高性能氢氧燃料电池氧还原催化剂(英文)[J]. Science China Materials, 2020, 63(04): 524-532.
- [12] HAO Yu, XU Lichun, PU Jibin, et al. Stable zigzag edges of transition-metal dichalcogenides with high catalytic activity for oxygen reduction[J]. Electrochimica Acta, 2020, 338.
- [13] 马溪原,郭晓斌,雷金勇. 面向多能互补的分布式光伏与气电混合容量规划方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(04): 55-63.
- [14] MAROCCO P, FERRERO D, GANDIGLIO M, et al. A study of the techno-economic feasibility of H₂-based energy storage systems in remote areas[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 211.
- [15] AJANOVIC A, HAAS R. Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020.
- [16] YORICHK LIGEN, HERON VRUBEL, HUBERT GIRAULT. Energy efficient hydrogen drying and purification for fuel cell vehicles[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(18): 10639-10647.
- [17] SADHASIVAM T, KIM HEE-TAK, JUNG SEUNG-HUN, et al. Dimensional effects of nanostructured Mg/MgH₂ for hydrogen storage applications: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 72: 523-534.
- [18] MAKOTO HIRAYAMA, YUSUKE ITO, HONAMI KAMADA, et al. Simplified approach to evaluating safety distances for hydrogen vehicle fuel dispensers[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(33): 18639-18647.

(下转第 247 页)

表 5 烟气粉尘排放指标调整前后对比

机组负荷/MW	900	800	700	600	500	400
调整前	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4
调整后	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8

表 6 电除尘高频电源参数调整前后能耗对比

机组负荷/MW	900	800	700	600	500	400
调整前	0.031	0.034	0.043	0.049	0.063	0.064
调整后	0.021	0.025	0.028	0.033	0.041	0.046
下降(相对值)/%	33	26	35	31	34	28

根据采集的实际工况,在改善高频电源的运行参数后,不仅电除尘能耗得到大幅下降,而且由于功率的分布与低低温电除尘特性更为契合,除尘效率也得到了一定提高。

综上所述,无论从理论上还是实际运行中,高频电源的运行方式调整是相当必要的,尤其是针对低低温电除尘的运行工况尤为如此。掌握运行

中电除尘的粉尘捕捉量与机组实际的出灰能力,并以此为基础调整好高频电源脉冲方式的运行参数,对控制烟气排放的粉尘含量、降低机组厂用电率以提高锅炉的经济运行都有着显著的作用。

参考文献:

- [1] 朱培峰. 高频电源在 1 000 MW 机组电除尘上的应用及优化分析[J], 2014, 33(6): 68-69.
ZHU Peifeng. The application and optimization analysis on high frequency power supply technique in dust collection for 1 000 MW power generating unit[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(6): 68-69.
- [2] 徐晖. 高频电源在 1 000 MW 机组电除尘上的应用及优化分析[J], 2016(6): 41-43.

收稿日期: 2019-12-15

(本文编辑: 赵艳粉)

(上接第 233 页)

- [19] DAVID L G, LIN Zhenhong, DONG Jing. Analyzing the sensitivity of hydrogen vehicle sales to consumers' preferences[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(36): 15857-15867.
- [20] VANDEWALLE J K, BRUNINX W D. Effects of large-scale power to gas conversion on the power, gas and carbon sectors and their interactions[J]. Energy Conversion and Management, 2015(94): 28-39.
- [21] 邹玮琦, 杨国华, 郑豪丰, 等. 含 P2G 的综合能源系统经济调度研究[J]. 电工电气, 2020(3): 12-15, 35.
- [22] 王一家, 董朝阳, 徐岩, 等. 利用电转气技术实现可再生能源的大规模存储与传输(英文)[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3586-3595.
- [23] WANG Shouxiang, YUAN Shuangchen. Interval optimi-

zation for integrated electrical and natural-gas systems with power to gas considering uncertainties[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2020, 119.

- [24] 陈永翀, 李爱晶, 刘丹丹, 等. 储能技术在能源互联网系统中应用与发展展望[J]. 电器与能效管理技术, 2015(24): 39-44.
- [25] 刘志坚, 余莎, 梁宁. 考虑制氢储能参与的互联电力系统优化调度研究[J/OL]. 电力科学与工程, 2020(3): 1-7.
- [26] 汪洋子. 一种计及多能源应用的天然气电气互联网络最优能源管理方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.

收稿日期: 2020-03-15

(本文编辑: 杨林青)