

风氢耦合储能系统技术发展现状

何青, 沈轶

(华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

[摘要] 我国风电资源丰富但同时弃风量巨大, 风氢耦合储能技术对于我国的弃风消纳、提高风电上网质量, 降低能源环境污染, 缓解能源危机, 构建绿色、环保、可持续的电力系统、促进经济增长方式转变等方面有着重大意义。介绍了国内外对于风氢耦合储能技术的研究现状, 并总结出了目前风氢耦合储能研究中的关键技术和尚待解决的难点, 最后结合风氢耦合储能技术在国内的发展现状对风氢耦合储能技术在我国的应用与发展提出了展望。

[关键词] 风力发电; 风电消纳; 风氢耦合; 氢能; 储能

[中图分类号] TK91 **[文献标识码]** A **[DOI编号]** 10.19666/j.rlfid.202102013

[引用本文格式] 何青, 沈轶. 风氢耦合储能系统技术发展现状[J]. 热力发电, 2021, 50(8): 9-17. HE Qing, SHEN Yi. Development status of hydrogen energy storage system coupled wind power generation[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 9-17.

Development status of hydrogen energy storage system coupled wind power generation

HE Qing, SHEN Yi

(School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: China is rich in wind power resources, but has a huge amount of wind abandonment. Wind-hydrogen coupling energy storage technology is of great significance to reducing China's wind abandonment, improving wind power online quality, reducing energy and environmental pollution, alleviating energy crisis, building a green, environmental, friendly and sustainable power system, and promoting the transformation of economic growth mode. This paper introduces the research status of wind-hydrogen coupling energy storage technology at home and abroad, and summarizes the key technologies and difficulties to be solved in the research of wind-hydrogen coupling energy storage technology at present. Finally, combined with the development status of wind-hydrogen coupling energy storage technology in China, the application and development prospect of wind-hydrogen coupling energy storage technology in China is put forward.

Key words: wind power generation, wind power consumption, wind hydrogen coupling, hydrogen energy, energy storage

化石能源的过度开采已经导致了一系列的能源和环境问题, 为了改变传统的能源利用模式, 以风电为首的可再生能源在全世界快速发展。我国风能储备丰富, 2019年底我国累计风电并网装机容量达到了209 GW^[1], 位于世界前列。风电具有良好的经济性和环保性, 且技术成熟、商业化程度很高。但目前风电仍存在两大难题: 1) 风电电能上网品质差, 接入电网会带来电压波动、频率波动等问题, 会对电网造成较大冲击, 造成弃风^[2]; 2) 目前风电电能难以存储, 且存储成本高, 使得大多数时候只能弃风^[3]。

对于如何让风电更安全、稳定且高效的上网, 世界各国学者进行了长期的研究, 目前最为可靠的是储能技术^[4]。储能技术与可再生能源的耦合有效解决了再生能源并网难的问题^[5]。风氢耦合储能是目前国际上研究的热点。风氢耦合储能技术可以平滑风电并网导致的功率波动, 且整个系统无污染、能量密度高、寿命长, 是解决风电随机性、间歇性及无规律性的方案之一^[6]。

本文针对风氢耦合储能技术指出了目前研究中的关键技术和尚未解决的难点, 并结合风氢耦合

收稿日期: 2021-02-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0903601)

Supported by: National Key Research and Development Program (2017YFB0903601)

第一作者简介: 何青(1962), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为大规模储能技术, heq@ncepu.edu.cn。

储能技术在国内的研究和发展现状对风氢耦合储能技术在我国的发展和应用的提出了展望。

1 风氢耦合储能系统原理与特点

1.1 风氢耦合储能过程

间歇性和波动性是清洁能源并网发电存在的主要问题^[7]，引入风氢耦合储能技术能很好地解决这一问题。系统将过剩的风电电能输送到电解槽中进行电解水制氢，波动的风电电能被转化为氢气存储起来。存储的氢气可通过燃料电池或者和氧气通过氧氢联合循环进行发电，可解决不稳定风电上网难的问题^[8]。风氢耦合储能过程如图 1 所示。

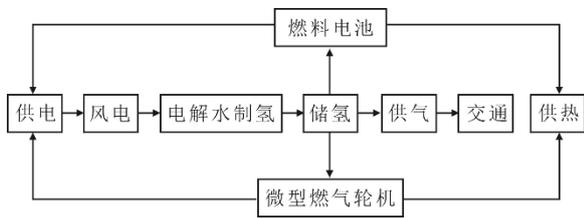


图 1 风氢耦合储能系统过程

Fig.1 Process of the wind hydrogen coupling energy storage system

风电的波动性和随机性等问题，会对电网的效率和安全性造成影响，需要平滑风电的输出功率使其安全且稳定的上网^[9]。储能系统可以进行能量的转换及储存，将具有波动性的风能转化为稳定且清洁的氢能从而达到平滑风电。

1.2 风氢耦合储能系统原理

典型风氢耦合储能系统如图 2 所示。由图 2 可知，系统主要由风电场、燃料电池（fuel cell, FC）、储氢设备以及电解槽等其他配套设备构成。

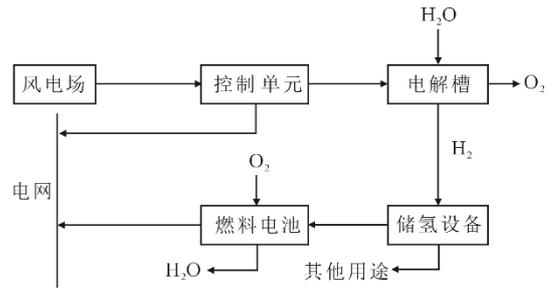


图 2 典型风氢耦合储能系统

Fig.2 Typical wind hydrogen coupling energy storage system

风电场产生的电能由电解水制氢和上网两部分组成。当用电需求小于风电场发电量时，系统过剩功率将会被输送至电解槽进行电解水制氢，风能转化为氢能进行存储。当用电需求大于风电场发电量时，燃料电池将存储的氢气用于发电，以满足用电需求。

1.3 风氢耦合储能系统特点

1.3.1 燃料电池分类及特点

燃料电池主要由电极、电解质隔膜与电解液等组成，主要分为高温燃料电池和低温燃料电池 2 类^[10]，具体分类如图 3 所示。这 5 种燃料电池的特性参数见表 1^[3]。表 1 中 H₂、O₂ 消耗均为标准状况下，下同。

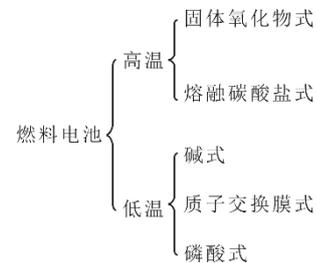


图 3 FC 分类

Fig.3 The FC classification

表 1 FC 特性参数

Tab.1 Characteristic parameters of FC

FC 类型	电流密度/ (A·cm ⁻²)	端电压/V	功率密度/ (W·cm ⁻²)	H ₂ 消耗/ (cm ³ ·(min·A) ⁻¹)	O ₂ 消耗/ (cm ³ ·(min·A) ⁻¹)	压力/MPa	温度/°C	效率/%	
								电池	系统
质子交换膜式	0.1~0.9	0.6~0.8	0.35~0.70	7.0	3.5	0.1~0.2	30~100	50~70	30~50
碱式	0.1~0.9	0.6~0.8	0.10~0.30	7.0	3.5	0.1	<80	60~70	62
磷酸式	0.1~0.9	0.6~0.8	0.12~0.14	7.0	3.5	0.1	150~200	55	40
熔融碳酸盐式	0.1~0.9	0.6~0.8	0.10~0.12	7.0	3.5	0.1~1.0	600~700	55	47
固体氧化物	0.1~0.9	0.6~0.8	0.15~0.70	7.0	3.5	0.1	850~1100	60~65	55~60

目前，碱式燃料电池技术发展进度最快，主要用于航天航空领域。磷酸式燃料电池已经投入了商业化运行，主要用于民用。熔融碳酸盐式燃料电池还处于试验阶段，还未商业化和规模化使用。固体

氧化物燃料电池在这几种燃料电池中最具发展潜力，其优点包括燃料适用性广、能量转换效率高，且不需要贵金属作为催化剂。质子交换膜式（proton exchange membrane, PEM）燃料电池目前

技术也比较成熟，但催化剂为贵金属，使用起来成本较高。

因燃料电池中低温燃料电池相比起高温燃料电池，其更具灵活启停特性和适应间歇性运行特性^[11]，所以在目前的风氢耦合储能系统中被广泛应用，同时还具备燃料电池发电效率高、环境污染小以及易于建设等优点^[12]。但是，目前的燃料电池响应时间仍不能很好地满足风电功率的瞬时波动，当负荷和风电功率发生瞬时变化时，燃料电池来不及响应。目前的解决办法是和电池储能或超级电容器等配合应用，以达到较高的电能质量^[3]。

1.3.2 电解槽分类及特点

目前制氢的方式主要为煤制氢、电解水制氢、甲醇裂解制氢以及天然气制氢^[13]。其中，天然气制氢占全球制氢量的 75%，是全球应用最多的制氢方

式。国内应用最多的制氢方式是煤制氢，制氢量占全国总制氢量的 40%^[14]。如今化石能源被过度消耗，继续使用天然气或煤制氢无疑会加大化石能源的消耗，而水是地球上分布最广泛且易得的资源，使用电解水制氢既环保又能缓解能源危机。电解水制氢工艺的电解槽分类如图 4 所示。根据电解质的不同，主要可分为碱性（ALK）电解槽、质子交换膜（PEM）电解槽、固体氧化物（SOEC）电解槽 3 大类^[15]。各种电解槽特性参数见表 2^[16]。

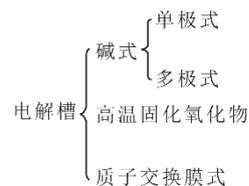


图 4 电解槽分类
Fig.4 Classification of electrolyzers

表 2 各种电解槽特性参数
Tab.2 Characteristic parameters of electrolyzers

电解槽类型	电流密度/(A·cm ⁻²)	电压范围/V	制氢量/(m ³ ·h ⁻¹)	电耗/((kW·h)·m ⁻³)	操作温度/°C	操作压力/MPa	效率/%	
碱性	单极式	0.1~0.2	2.0~2.4	≤8×10 ⁴	5.0	60~80	<3	75~90
	多级式	0.2~0.4	1.8~2.0	≤2×10 ⁵	4.3~4.6	60~80	<3	75~90
PME 式	0.6~2.0	1.8~2.2	≤2.5×10 ⁴	4.5	50~80	<20	80~90	
高温固态氧化物式	0.3~2.0	0.7~1.5	≤2.5×10 ⁴	3.9~4.0	650~1 000	<2.5	80~90	

碱性电解槽技术最为成熟且成本低廉，是目前应用最广泛的电解槽，适用于大规模风电制氢系统。固体氧化物电解槽技术目前并不发达，尚未广泛商业化。PEM 电解槽因其电流密度、电池效率、氢气纯度和工作压力高、操作灵活，成为目前最受欢迎的水电解制氢技术。但 PEM 电解槽成本过高，同时风电波动会导致电解槽寿命降低，且目前针对膜的使用寿命问题还未找到明确的解决途径，牵制了 PEM 电解槽的商业应用^[16]。

1.3.3 储氢设备分类及特点

目前，储氢技术也是限制氢储能发展的因素之一^[17]。储氢方式分类如图 5 所示，技术对比见表 3。



图 5 储氢方式分类
Fig.5 Classification of hydrogen storage methods

高压气态储氢、低温液态储氢、固态储氢以及有机液态储氢是目前主要使用的 4 种储氢技术。其中，高压气态储氢主要形式为储气罐储氢，因具有成本低、技术成熟、运输方便等特点成为目前应用最广泛的储氢方式。

表 3 不同储氢技术对比
Tab.3 Comparison of different hydrogen storage technologies

储氢技术	储氢容量	成本	操作简易性	安全性	运输便利性	技术成熟度	国内应用
高压气态储氢	小	低	简单	较差	方便	成熟	最多
低温液态储氢	大	很高	难	较差	较方便	不成熟	仅航天航空
固态储氢	大	高	简单	安全	方便	比较成熟	少，存在技术难题
有机液态储氢	大	高	难	安全	方便	不成熟	少，存在技术难题

由表 3 可见, 高压气态储氢方式下的成本相对较低、操作简单、运输方便、技术成熟, 目前在国内外应用最多, 但安全性较差。低温液态储氢方式成本相比之下最高, 操作难度较大, 安全性较差, 技术也不成熟, 但运输较方便, 目前主要应用于航天航空领域。固态储氢方式操作简单、安全性高、运输方便、技术较成熟, 但目前成本高, 且仍存在技术难题, 是未来储氢方式的重要发展方向, 正处于商业化探索阶段。有机液态储氢方式成本高、操作难、技术不成熟, 但安全性高, 可利用传统石油设备进行运输和加注, 正处于商业化探索阶段^[18-19]。

2 风氢耦合储能系统研究现状

2.1 国外研究现状

目前, 世界上许多国家都非常重视可再生能源耦合制氢技术的发展。其中, 较为著名的是美国 Wind2H2 计划。2004 年美国能源部 NREL 与 Xcel 能源公司合作提出了 Wind2H2 计划, 此计划的目的在于探究并解决可再生能源与电解槽耦合制氢的关键技术^[20]。英国在 2010 年成功示范了 Hydrogen Office 项目^[21]。德国的 Enertrag 公司在 2011 年利用 3 台 2 MW 风力发电机在用电低谷时进行制氢并存储起来。2011 年加拿大成功示范了风氢柴示范工程。2012 年德国成功投运了 RH2 WKA 风氢热电联产示范工程^[22]。2017 年, 英国乏福郡建成风电容量为 750 kW 的风氢能源办公楼系统。在欧盟委员会第七框架计划中, 间歇性可再生能源研发升级, 意大利普利亚地区启动了 INGRID 氢储能项目, 储氢量为 1 000 kg, 对应储能达 39 MW, 此项目提高了可再生能源的利用率, 使可再生能源能够安全且稳定地上网, 同时也大大降低了弃风率^[23]。2019 年, 荷兰成功开展了世界上第 1 个海上风电制氢试点项目 PosHYdon^[24], 该项目将对海上风电用于制氢进行试验, 研究其可行性。2020 年, Engie EPS 在希腊的 Agkistro 微电网项目 REMOTE 中推出了以氢能为动力的储能系统^[25]。此外, 西门子 (Siemens) 已经制定了到 2030 年使其所有涡轮机与 100% 氢气兼容的目标^[26], 其中一些涡轮机已经能够使用 100% 的氢气运行。国内外主要风电制氢项目见表 4。

Apostolou^[27]建立了一个利用风能生产氢气并存储的系统, 该系统包括 1 个碱性电解器和 1 个储氢罐, 对该系统进行分析模拟结果表明, 1 个

8 MW 额定功率的电解系统能够储存来自 1 个位于希腊岛屿的 10 MW 风电场最高 71% 的弃风量, 制氢装置的平均效率约为 73%。Valverde-Isorna 等人^[28]开发了一个安装在苏格兰“氢气办公楼”的风-水电解制氢发电系统模型, 该模型基于系统运行期间采集的真实数据进行验证。Kopp 等人^[29]分析了德国并网试点项目“Energiepark Mainz”的运行情况, 该系统由 1 个 8 MW 的风电场和 1 个额定功率为 6 MW 的水电解系统组成。该项目前 2 个月的运行情况表明, 在较高的负载下, 电解槽的效率会下降 (4 MW 功率下效率为 64%, 额定功率下效率为 59%)。Mirzaei 等人^[30]研究了 4 个不同案例下风氢系统与需求响应方案的集成, 结果表明在随机运行中氢气系统和需求响应策略集成下, 运行成本最低, 弃风率最低。

表 4 2010—2020 年国内外主要风电制氢项目
Tab.4 Major wind power hydrogen production projects at home and abroad (2010—2020)

项目名称	时间	国家	规模
Hydrogen Office 示范工程	2010 年	英国	风电容量: 750 kW 电解槽容量: 30.5 kW 电解槽产能: 5.3 m ³ /h
Enertrag 示范工程	2011 年	德国	风电容量: 6 MW 电解槽容量: 500 kW 电解槽产能: 120 m ³ /h
风氢柴示范工程	2011 年	加拿大	风电容量: 6×65+ 3×100 kW 变速风机 电解槽产能容量: 90 m ³ /h
RH2 WKA 风氢热电联产示范工程	2012 年	德国	风电容量: 140 MW 电解槽容量: 1 000 kW 电解槽产能: 200 m ³ /h
河北沽源风电制氢项目	2015 年	中国	风电容量: 200 MW 电解槽容量: 10 MW 电解槽产能: 800 m ³ /h
乏福郡风氢能源办公楼系统	2017 年	英国	风电容量: 750 kW 电解槽容量: 30 kW
INGRID 氢储能项目	2017 年	意大利	储氢量为 1 000 kg, 对应储能达 39 MW
榆树风电及制氢综合示范项目	2020 年	中国	风电容量: 400 MW 电解槽容量: 10 MW

2.2 国内研究现状

张虹等^[31]将超级电容器引入了风氢耦合系统以减少并网点电压变化, 在电解槽启动优先级高于超级电容的前提下, 采用 3 种运行状态下的系统协同控制策略, 验证了风氢耦合系统协同控制策略的有效性, 提高了风电的消纳能力。陈冲^[32]构造一种电解槽和燃料电池集结于直流母线的结构, 建立了风氢耦合数学模型, 基于能量协调控制策略, 对系

统正常运行及故障工况进行仿真分析,证明了该系统能够很好地提升分散式风电消纳及低电压过渡能力。蔡国伟等^[33]提出了一种加入了超级电容器的风氢耦合储能系统控制策略,验证了在该控制策略下燃料电池及电解槽可以补偿风机出力与负荷需求的功率差额,超级电容器则可以平滑因燃料电池及电解槽响应延迟引起的不平衡功率。

我国目前非常重视氢能,出台了一系列政策推动氢能的发展,也有多个氢能项目正式启动。2014年风氢耦合集成系统关键技术已经成为国家高技术研究发展计划(863计划)中的一个重要课题^[34]。该课题主要研究风氢耦合系统的容量配置、经济性分析以及功率协调控制等关键性技术。2015年国内第1个风电制氢项目——沽源风电制氢项目正式启动^[35]。该项目建成后将拥有容量为200 MW的风电场和10 MW电解水制氢系统。该项目主要用于2个方面:1)减少煤气化和天然气制氢量,缓解化石能源的消耗;2)当氢能网络和加氢站条件满足时,氢气用于供应新能源汽车。2019年“大规模风/光互补制氢关键技术研究及示范”项目通过了国家科学技术部高技术研究发展中心的审核并正式立项批复,目前已经进入启动阶段。该项目将填补我国兆瓦级风光氢耦合储能示范工程的空白,成为达到世界领先水平的示范工程^[36]。

2020年8月,第二十二届中国科协年会闭幕式上,中国科协发布了10个对科学发展具有导向作用的前沿科学问题以及10个对技术和产业具有关键作用的工程难题^[37]。这其中提到了利用可再生能源进行规模化的电解水制氢,其中“大规模”“低能耗”“高稳定性”三者的统一,是目前国内可再生能源制氢的研究难点和重点,也突出了目前国内对于氢能研究的重视。

3 风氢耦合储能系统关键技术

3.1 适应波动性的低成本高效制氢技术

因为风电具有随机性、不稳定性、波动性较大的特点,输入功率需要实时跟随新能源发电出力而大幅度频繁变化,这会导致设备的运行寿命减短及氢气的纯度降低。需要将风电功率与电解槽功率进行匹配,以提高制氢设备的利用率。

碱式电解槽和PEM电解槽技术比较成熟,目前应用最广泛。碱式电解槽易获得、耐用,并且由于避免使用贵金属、技术相对成熟,使得成本低廉,

适合大规模风电制氢系统。但是,碱式电解槽电流密度和工作压力低,会导致系统效率和气体纯度下降。碱式电解槽研究重点在于:增加电流密度和工作压力;满足动态运行的系统设计;与间歇式可再生能源进行耦合。PEM电解槽主要优点是电流密度、电池效率、氢气纯度和工作压力高,且操作灵活。缺点是铂催化剂和氟化膜材料价格昂贵,且由于高压操作和对水纯度的要求,导致系统复杂度高,制氢量少,目前使用寿命比碱式电解槽短,适合小规模风电制氢系统。PEM电解槽当前的研究重点在于:降低系统复杂性,以实现系统规模扩大;采用较便宜的材料和更复杂的制造工艺,降低成本。因此,如何解决因风电功率波动导致的氢气纯度下降、电解槽寿命下降以及制氢效率下降等问题变得十分重要,同时为降低成本也得加强对于电解槽材料的研究。

3.2 大容量高密度储氢技术

目前,常用的几种储氢方式仍存在着大容量存储问题。现有的几种储氢技术尚不能很好地满足氢能发展的要求,需要开发出容量更大、密度更高以及更加安全的储氢技术。其中,固态储氢是未来研究的重点。如基于镁基储氢材料的氢浆运氢技术,其具有安全性高、储氢密度高、常温运输以及成本低的特点,有效弥补了目前气液2种存储方式的不足。储氢材料的研究大多是以电动汽车为主要应用方向开展的,追求质量和体积储氢密度高、放氢速度快。若将氢气用于燃料电池发电,则对储氢技术有着不同的要求,如储氢密度、分解温度等。因此,推动氢储能发展的关键技术之一就是适用于电网的高效、长寿命、低成本、高性能储氢技术。

3.3 风氢耦合控制与智能运行技术

对风氢耦合储能系统的运行控制策略进行优化,可以提高整个系统的利用效率,降低运行成本。风电与燃料电池、电解槽及储氢设备之间功率的不匹配,会导致整个系统的制氢、储氢及发电能力与效率下降,甚至会造成设备损坏导致安全问题。氢能可作为中间负荷,既高效又清洁,还可以平滑风电功率波动,解决弃风消纳的问题。典型风氢耦合储能系统控制拓扑图^[38]如图6所示。图6中:Con.1部分为超级电容器(super capacitor, SC)变流器,用于平抑风电造成的直流母线电压波动;Con.3部分为网侧变流器,将风电电流进行直流/交流(DC/AC)变换后并入电网。

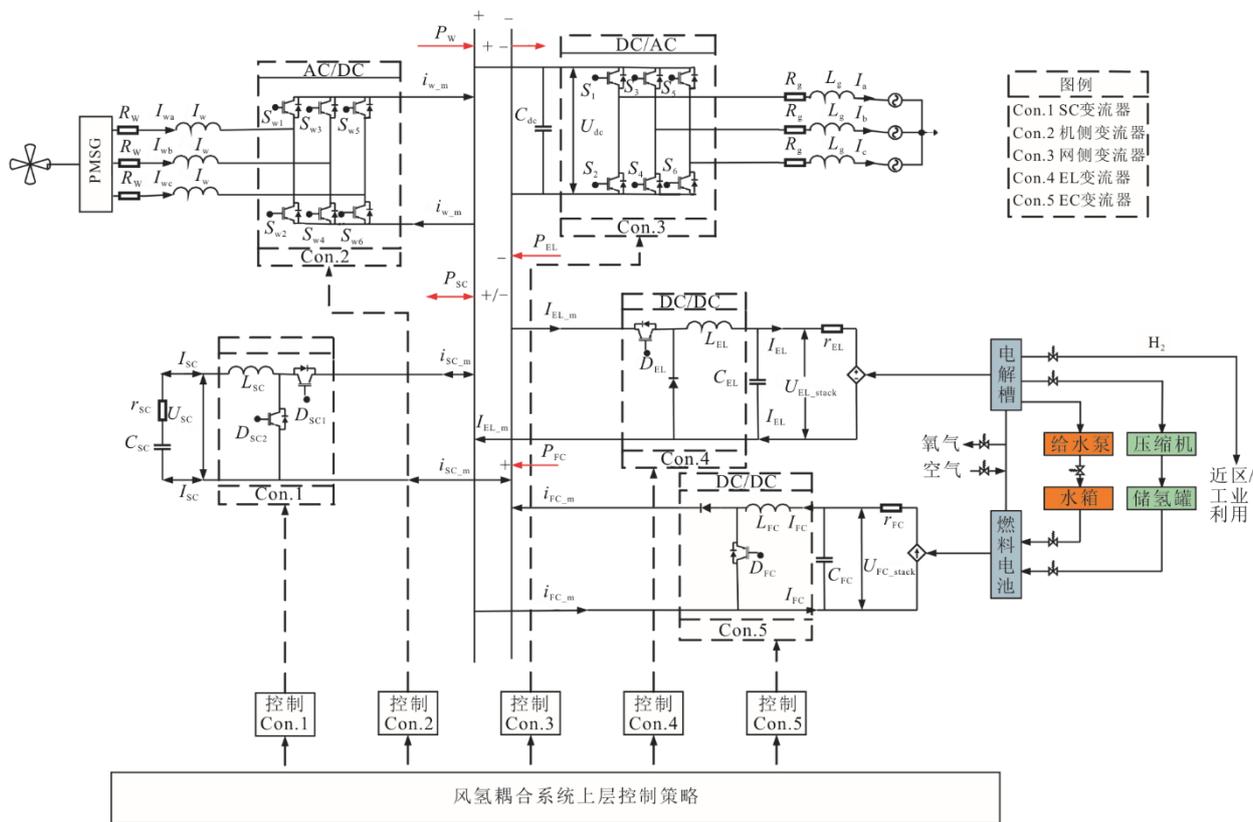


图 6 典型风氢耦合储能系统控制拓扑图

Fig.6 Control topology of typical wind hydrogen coupled energy storage system

另外，风氢耦合储能系统合理的技术经济评价对于技术的改进和发展有着重要意义。选取关于氢能技术经济评价的敏感性指标，综合各方面的效益（包括社会效益、环境效益及经济效益等）和条件对其进行研究和评价。行之有效的技术经济评价体系对风氢耦合储能系统的发展会大有帮助，可有力推动风氢耦合储能系统大规模商业化运行。

4 风氢耦合储能技术发展前景

氢能因其效率高、环保且可储存等特点，已经是全球关注的热门话题。其中，可再生能源和氢能耦合也成为各国研究的重点和全球许多国家的发展战略。我国将其列入《能源技术革命创新行动计划》等重大规划，并写入了国务院《政府工作报告》^[39]。仅 2020 年上半年，我国就出台了 15 份与氢能相关的政策措施和文件，对氢能在我国的发展和利用进行了布局。目前，在我国有 40 个以上的地方政府出台了发展氢能相关产业的政策和规划。近年来，我国风电装机持续位列全球第 1，风电资源丰富，风氢耦合储能在我国有着广阔的发展前景。

4.1 风电发展

我国可利用陆地和海洋上的风能资源十分富足，分别为 253 GW 和 750 GW^[39-40]。2019 年末全国并网风电装机容量为 209 GW，增长了 14.0%^[41]。2017—2019 年我国累计风电并网装机容量以及“弃风”电量情况见表 5。电网并网负荷容量有限，且风电存在频率波动，一旦大规模的风电集中并网，过多的风电将无法并入电网，导致大量弃风的出现。

表 5 2017—2019 年我国累计风电并网装机容量
Tab.5 Cumulative wind power grid connected installed capacity in China from 2017 to 2019

年度	并网装机容量/GW	同比增长率/%	弃风电量/(GW·h)	弃风率/%
2017	163	10.7	419	12
2018	184	12.4	277	7
2019	209	14.0	169	4

由表 5 可见，2019 年全国弃风电量 169 GW·h，全国平均弃风率为 4%。目前，国内大部分地区弃风情况有所好转，其中最严重的内蒙古、甘肃以及新

疆的弃风率已经分别下降至 7.1%、7.6%、14%^[40]。我国弃风现象主要存在于华北、西北以及东北这“三北”地区。2020 年虽然全国风电红色预警全面解除，但其他个别地区也存在比较严重的弃风现象，全国弃风总量仍然巨大，如能将其合理利用，可有效缓解我国能源问题。

4.2 政策支持

我国对发展氢能产业十分重视，相继出台了一些政策支持。2019 年 1 月国家出台了《柴油货车污染治理攻坚战行动计划》^[42]，目的在于解决环境污染和化石能源消耗问题，鼓励和推广新能源货车的应用。其中，燃料电池货车和加氢站建设是发展的重点，该计划还提出了方便新能源货车发展的相关政策。2 月《鼓励外商产业投资目录（征求意见稿）》^[43]提出了氢能与燃料电池全产业链均纳入了鼓励外商投资的范围。3 月中国政府工作报告中首次提到了关于氢能基础建设的相关报告和建议。在 3 月的《绿色产业指导目录（2019 版）》^[44]中对燃料电池制造和氢能相关设施的建设进行了说明，加大了对燃料电池和氢能设施建设和投资。4 月《国务院关于落实〈政府工作报告〉重点工作部门分工的意见》提出，重点扶持新能源汽车，加大对充电和加氢站的建设。5 月《2019 年新能源汽车标准化工作要点》、6 月《鼓励外商投资产业目录（2019 年版）》均提出了将燃料电池和加氢站作为投资和发展的重点，大力支持新能源汽车的发展，针对新能源汽车的购置提出了优惠政策^[42]。我国氢能产业发展规划如图 7 所示。

近期：2020	中期：2025	2035—2050
<ul style="list-style-type: none"> 启动氢能产业示范项目 氢燃料电池、制储关键技术取得阶段性成果 	<ul style="list-style-type: none"> 氢能源供应形成一定规模，形成较完整的产业链合作体系 掌握部分关键技术，形成氢动力系统制造能力 	<ul style="list-style-type: none"> 制储技术全球领先，能源供应形成较大规模 持续研发新一代氢动力，性能指标全球领先

图 7 我国氢能产业发展规划

Fig.7 The development plan of hydrogen energy industry in China

4.3 环境与经济效益

目前，我国生产氢气的方式主要是煤气化制氢，煤气化制氢量占全国总制氢量的 40%，这既加大了化石能源的消耗同时也排放了大量的 CO₂，对自然环境造成了污染。氢能发电具有高效和清洁的特点，发展氢能发电可有效减少 CO₂ 排放。

风力发电上网不稳定，且每年我国弃风量巨大。2019 年，全国弃风电量高达 169 GW·h，相当于约

3×10⁶ t 电解水制氢电耗。若将制得的氢气用于工业生产如电力、冶金、化工、国防、氢燃料电池汽车等领域可挽回数亿元的经济损失，给国家带来极大的经济效益；同时，还可减少煤的使用约 5×10⁷ t，减少 CO₂ 排放约 1.5×10⁸ t。由此可见，氢能具有良好的环境和经济效益。

5 结 语

本文介绍了风氢耦合储能的基本原理、结构、特点、国内外研究现状、风氢耦合储能关键技术以及风氢耦合储能在中国的发展前景，对风氢储能进行了全面的综述。目前，风氢储能技术难题主要集中在制氢、储氢、优化控制策略以及经济性分析 4 个方面；氢储能的研究重难点则主要集中在燃料电池技术、电解槽技术、储氢材料的研究以及技术经济评价这 4 个方面。在风氢耦合储能方面，世界各国都进行了深入研究并进行了许多示范性工程。我国近几年也陆续启动了如沽源风电制氢综合利用等示范项目，风氢耦合储能发展前景良好。

[参 考 文 献]

- [1] 北极星输配电网. 2019 年全国电力装机量、发电量、用电量电力数据盘点[EB/OL]. (2020-02-10) [2021-02-02]. <http://shupeidian.bjx.com.cn/html/20200210/1041120.shtml>. Polaris Power Transmission and Distribution Network. Inventory of national power installed capacity, power generation and electricity consumption in 2019[EB/OL]. (2020-02-10) [2021-02-02]. <http://shupeidian.bjx.com.cn/html/20200210/1041120.shtml>.
- [2] 冯为为. 从陆地到海上，风能发电蓄势待发[J]. 节能与环保, 2017(11): 46-48.
FENG Weiwei. From land to sea, wind power is ready to go[J]. Energy Conservation and Environmental Protection, 2017(11): 46-48.
- [3] 蔡国伟, 孔令国, 薛宇, 等. 风氢耦合发电技术研究综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 127-135.
CAI Guowei, KONG Lingguo, XUE Yu, et al. Overview of research on wind power coupled with hydrogen production technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 127-135.
- [4] 赵倩, 陈芳芳. 提高风电消纳能力和储能技术研究综述[J]. 时代农机, 2020, 47(4): 53-54.
ZHAO Qian, CHEN Fangfang. Research review on improving wind power absorption capacity and energy storage technology[J]. Hunan Agricultural Machinery, 2020, 47(4): 53-54.
- [5] 孙晓, 李妍. 新能源并网及储能技术研究综述[J]. 通信电源技术, 2020, 37(2): 12-14.
SUN Xiao, LI Yan. Review of new energy grid connection and energy storage technology[J]. Telecom Power Technologies, 2020, 37(2): 12-14.
- [6] 段青熙, 袁铁江, 梅生伟, 等. 风电-氢储能与煤化工多能耦合系统能量协调控制策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 176-186.

- DUAN Qingxi, YUAN Tiejia, MEI Shengwei, et al. Energy coordination control of wind power-hydrogen energy storage and coal chemical multi-functional coupling system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 176-186.
- [7] 刘金朋, 侯焘. 氢储能技术及其电力行业应用研究综述及展望[J]. 电力与能源, 2020, 41(2): 230-233. LIU Jinpeng, HOU Tao. Review and prospect of hydrogen energy storage technology and its application in power industry[J]. Power & Energy, 2020, 41(2): 230-233.
- [8] 安康, 刘娟, 李前敏, 等. 储氢-氢氧联合循环储能系统及应用案例分析[J]. 陕西电力, 2012, 40(1): 21-24. AN Kang, LIU Juan, LI Qianmin, et al. Hydrogen storage and hydrogen-oxygen combined cycle systems and case analysis[J]. Shaanxi Electric Power, 2012, 40(1): 21-24.
- [9] 张慧娟. 基于风电场组合功率预测的馈线潮流分配算法研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2013: 1. ZHANG Huijuan. Research on feeder power flow distribution algorithm based on wind farm combined power forecasting[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2013: 1.
- [10] 赵佳骏, 王培红. 主流燃料电池技术发展现状与趋势[J]. 上海节能, 2015(4): 199-203. ZHAO Jiajun, WANG Peihong. Development current situation and trends of mainstream fuel cell technologies[J]. Shanghai Energy Conservation, 2015(4): 199-203.
- [11] 叶海钧. 风电制氢——燃料电池耦合微网系统的分层控制技术及其工程实现[D]. 杭州: 浙江大学, 2016: 1. YE Haijun. Hierarchical control technology and engineering implementation of wind power hydrogen production fuel cell coupled microgrid system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 1.
- [12] 李清, 王庆余. 氢能和燃料电池技术结合城市燃气的应用[J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(2): 193-196. LI Qing, WANG Qingyu. Application of hydrogen energy and fuel cell technology in combination with urban gas[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(2): 193-196.
- [13] 舟丹. 制氢技术[J]. 中外能源, 2020, 25(10): 93. ZHOU Dan. Hydrogen production technology[J]. Sino-Global Energy, 2020, 25(10): 93.
- [14] 中国产业信息网. 2019年中国煤制氢行业发展历史、产能结构、下游需求、发展优势及面临问题分析[EB/OL]. (2020-03-10) [2021-02-02]. <https://www.chyxx.com/industry/202003/841510.html>. China Industry Information Network. Analysis on the development history, capacity structure, downstream demand, development advantages and problems of China's coal-to-hydrogen industry in 2019[EB/OL]. (2020/03/10) [2021-02-02]. <https://www.chyxx.com/industry/202003/841510.html>.
- [15] DINCER I, ACAR C. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(34): 11094-11111.
- [16] OSA B, AG A, IS B, et al. Future cost and performance of water electrolysis: an expert elicitation study[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(52): 30470-30492.
- [17] 徐晓红. 复合金属氧化物多孔材料限域催化协同改善LiBH₄储氢性能研究[D]. 天津: 南开大学, 2017: 1. XU Xiaohong. Improvement of hydrogen storage performance of LiBH₄ by confined catalysis of composite metal oxide porous materials[D]. Tianjin: Nankai University, 2017: 1.
- [18] 胡永康. 浅谈不同储氢方式的优缺点及发展趋势[J]. 科教导刊-电子版(上旬), 2018(1): 296. HU Yongkang. Advantages, disadvantages and development trend of different hydrogen storage methods[J]. The Guide of Science & Education, 2018(1): 296.
- [19] 张帆. 几种典型储氢材料的热解、点火及燃烧特性研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2018: 1. ZHANG Fan. Pyrolysis, ignition and combustion characteristics of several typical hydrogen storage materials[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2018: 1.
- [20] 郭亚洁. 直流微电网中功率变换控制策略研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2018: 1. GUO Yajie. Research on power conversion control strategy in DC microgrid[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science & Technology, 2018: 1.
- [21] 孔令国. 风光氢综合能源系统优化配置与协调控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017: 1. KONG Lingguo. Optimal configuration and coordinated control strategy of wind solar hydrogen integrated energy system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017: 1.
- [22] 温源. 风电制氢能量管理系统控制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019: 1. WEN Yuan. Research on control method of wind power hydrogen production energy management system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019: 1.
- [23] 张丽, 陈硕翼. 风电制氢技术国内外发展现状及对策建议[J]. 科技中国, 2020(1): 13-16. ZHANG Li, CHEN Shuoyi. Current situation and countermeasures of wind power hydrogen production technology at home and abroad[J]. Science and Technology in China, 2020(1): 13-16.
- [24] 北极星风力发电网. 全球首个海上风电制氢项目——荷兰 PosHYdon 项目[EB/OL]. (2020-07-13) [2021-02-02]. <http://news.bjx.com.cn/html/20200713/1088575.shtml>. Polaris Wind Power Network. The world's first offshore wind power hydrogen production project: the Poshydon project in Dutch[EB/OL]. (2020-07-13) [2021-02-02]. <http://news.bjx.com.cn/html/20200713/1088575.shtml>.
- [25] 北极星储能网. 希腊微电网项目完成氢能储能系统建设[EB/OL]. (2020-10-28) [2021-02-02]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20201028/1112374.shtml>. Polaris Energy Storage Network. Construction of a hydrogen energy storage system for the microgrid project in Greek[EB/OL]. (2020-10-28) [2021-02-02]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20201028/1112374.shtml>.
- [26] 北极星氢能网. 西门子立下小目标: 2030年实现燃氢100%重型燃气轮机[EB/OL]. (2020-07-08) [2021-02-02]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20200708/1087302.shtml>. Polaris Hydrogen Energy Network. Siemens small goal: achieve 100% hydrogen-fired heavy gas turbine in 2030[2020-07-08] [2021-02-02]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20200708/1087302.shtml>.
- [27] KALDELLIS J K, APOSTOLOU D. Life cycle energy and carbon footprint of offshore wind energy: comparison with onshore counterpart[J]. Renewable Energy, 2017, 108: 72-84.
- [28] VALVERDE-ISORNA L, ALI D, HOGG D, et al. Modelling the performance of wind-hydrogen energy systems: case study the hydrogen office in Scotland/UK[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 53(1): 1313-1332.

- [29] KOPP M, COLEMAN D, STILLER C, et al. Energiepark Mainz: technical and economic analysis of the worldwide largest power-to-gas plant with PEM electrolysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(19): 13311-13320.
- [30] MIRZAEI M A, YAZDANKHAH A S, MOHAMMADI-IVATLOO B. Stochastic security-constrained operation of wind and hydrogen energy storage systems integrated with price-based demand response[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(27): 14217-14227.
- [31] 张虹, 孙权, 李占军, 等. 风氢耦合系统协同控制发电策略研究[J]. *东北电力大学学报*, 2018, 38(3): 15-23. ZHANG Hong, SUN Quan, LI Zhanjun, et al. Research on synergistic control strategy of wind power coupled with hydrogen system[J]. *Journal of Northeast Dianli University (Natural Science Edition)*, 2018, 38(3): 15-23.
- [32] 陈冲. 风电/制氢/燃料电池集成系统建模与并网控制研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2017: 1. CHEN Chong. Modeling and grid connected control of wind power/hydrogen generation/fuel cell integrated system[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2017: 1.
- [33] 蔡国伟, 陈冲, 孔令国, 等. 风电/光伏/制氢/超级电容器并网系统建模与控制[J]. *电网技术*, 2016, 40(10): 2982-2990. CAI Guowei, CHEN Chong, KONG Lingguo, et al. Modeling and control of grid-connected system of wind/PV/electrolyzer and SC[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(10): 2982-2990.
- [34] 方圆. 风-氢互补系统混合储能容量配置的经济性优化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019: 1. FANG Yuan. Economic optimization of hybrid energy storage capacity allocation in wind hydrogen complementary system[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2019: 1.
- [35] 孙鹤旭, 李争, 陈爱兵, 等. 风电制氢技术现状及发展趋势[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(19): 4071-4083. SUN Hexu, LI Zheng, CHEN Aibing, et al. Current status and development trend of hydrogen production technology by wind power[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(19): 4071-4083.
- [36] 熊亚林, 崔青汝. 国家重点研发计划“大规模风/光互补制氢关键技术研究及示范”项目正式立项[EB/OL]. (2019-05-09) [2021-02-02]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20190509/979318.shtml>. XIONG Yalin, CUI Qingru. National Key Research and Development Program Research and Demonstration of Large-scale Wind/Light Complementary Hydrogen Production has become an official project[EB/OL]. (2019-05-09) [2021-02-02]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20190509/979318.shtml>.
- [37] 史诗. 中国科协发布 20 项重大科学问题工程技术难题[J]. *中国科技财富*, 2019(7): 29-32. SHI Shi. The China Association of Science and Technology has issued 20 major scientific problems[J]. *Fortune World*, 2019(7): 29-32.
- [38] 卢一菲, 陈冲, 梁立中. 基于电-氢混合储能的风氢耦合系统建模与控制[J]. *智慧电力*, 2020, 48(3): 7-14. LU Yifei, CHEN Chong, LIANG Lizhong. Modeling and control of wind-hydrogen coupling system based on electricity-hydrogen hybrid energy storage[J]. *Smart Power*, 2020, 48(3): 7-14.
- [39] 北极星风力发电网. 红色预警、弃风率大涨! 制氢能否成为新出路[EB/OL]. (2020-07-17) [2021-02-02]. <http://news.bjx.com.cn/html/20200717/1090096.shtml>. Polaris Wind Power Network. Red warning, the rate of abandonment rose! Can hydrogen production be new way [EB/OL]. (2020-07-17) [2021-02-02]. <http://news.bjx.com.cn/html/20200717/1090096.shtml>.
- [40] 刘军, 汪继勇. 基于风电机组健康状态的风电场功率分配研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(20): 106-113. LIU Jun, WANG Jiyong. Research on power distribution of a wind farm based on the healthy state of wind turbines[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(20): 106-113.
- [41] 北极星风力发电网. 2019 年并网风电装机容量 21005 万千瓦增长 14.0%[EB/OL]. (2020-02-28) [2021-02-02]. <http://news.bjx.com.cn/html/20200228/1048898.shtml>. Polaris Wind Power Network. The grid-connected wind power installed capacity reached 210.05 million kW in 2019, increased by 14.0%[EB/OL]. (2020-02-28) [2021-02-02]. <http://news.bjx.com.cn/html/20200228/1048898.shtml>.
- [42] 搜狐网. 报告: 2019 年上半年氢燃料电池汽车以及氢能产业政策盘点![EB/OL]. (2019-07-15) [2021-02-02]. https://www.sohu.com/a/326891207_120104159. Sohu Net. Report: Hydrogen fuel cell vehicles and hydrogen energy industry policy inventory in the first half of 2019! [EB/OL]. (2019-07-15) [2021-02-02]. https://www.sohu.com/a/326891207_120104159.
- [43] 北极星氢能网. 2019 年版鼓励外商投资产业目录发布: 含氢能和燃料电池[EB/OL]. (2019-07-01) [2021-02-02]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20190701/989737.shtml>. Polaris Hydrogen Energy Network. 2019 industry catalogue release: hydrogen and fuel cell[EB/OL]. (2019-07-01) [2021-02-02]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20190701/989737.shtml>.
- [44] 洪虹, 章斯淇. 氢能源产业链现状研究与前景分析[J]. *氯碱工业*, 2019, 55(9): 1-9. HONG Hong, ZHANG Siqi. Current situation and prospect analysis of hydrogen energy industry chain[J]. *Chlor-Alkali Industry*, 2019, 55(9): 1-9.

(责任编辑 杨嘉蕾)