

科技评论

以电—氢—碳耦合方式协同推进新能源大规模开发与煤电绿色转型

刘泽洪

摘要 通过风光火打捆开发、电制氢与煤电掺烧、碳捕集与电氢氨醇联产“三步走”实现能源系统从高碳到低碳、最终零碳的转型。实现电—氢—碳耦合发展,需要跨学科融合创新和产学研用协同发力,重点攻克多能源品种协同优化与系统集成、构网型电制氢、柔性化工合成工艺等关键技术,推动电-氢-碳相关技术装备和能源基地的示范应用,培育绿氢化工、氢能交通等上下游产业链,完善相关领域标准体系和法律法规。

关键词 电—氢—碳耦合; 新能源; 煤电; 电制氢; 富氧燃烧; 碳捕集

1 解决气候变化问题的关键是降低碳排放

气候变化问题是 21 世纪人类共同面临的重大挑战,二氧化碳、甲烷等温室气体的排放被认为是造成全球气候变暖的最主要原因^[1]。为了应对这一危机,各国纷纷提出碳中和目标,谋求零碳转型。2020 年 9 月,习近平总书记作出了中国力争 2030 年前二氧化碳排放达到峰值、2060 年前实现碳中和的庄严承诺^[2]。

气候变化问题本质上是化石能源过度开发利用导致的碳循环失衡,释放到大气中的二氧化碳大于地球系统固化的二氧化碳。解决这一问题有“一减一加”2 个途

径:“减”指减排,如以清洁能源代替化石能源,减少能源系统的碳排放^[3];“加”指增汇,如增加森林碳汇、湿地碳汇或通过碳捕集、利用与封存技术增加人工碳汇等^[4]。实现碳中和需要减排和增汇协同发力,“减”是核心,“增”是兜底^[5]。

中国能源领域碳排放占全国碳排放总量的 80% 以上,其中电力碳排在能源行业中的占比超过 50%,且绝大部分来源于煤电,实现能源领域低碳转型对于实现“双碳”目标至关重要^[6-8]。几十年来,中国积极稳妥推进节能降碳行动,2024 年单位国内生产总值能源消耗和二氧化碳排放分别降低 2.5% 和 3.9% 左右^[9]。随着能源低碳转型的深入,结合中国国情,未来降低碳排放的关键之一在于大力开发风电、光伏等新能源,替代

传统化石能源,降低能源碳强度;增加碳汇的关键在于实现传统煤电的绿色低碳转型,对排放的二氧化碳进行捕集、存储和利用。

2 新能源高质量发展要求迫切

中国的可再生能源资源十分丰富,“双碳”目标提出后,风电、光伏等新能源迎来跨越式发展。截至 2025 年第一季度末,全国风电装机达到 5.3 亿 kW、太阳能装机 9.5 亿 kW,总计达 14.8 亿 kW,新能源装机占比达到 43%,历史性超过火电装机规模^[10]。第一批以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点的大型新能源基地项目已建成超过 9000 万 kW^[11],第二批、第三批项目正陆续开工建设,分布式光伏累计装机也已达 3.75 亿 kW^[12]。展

全球能源互联网发展合作组织,北京 100031

收稿日期: 2025-07-01; 修回日期: 2025-10-30

作者简介: 刘泽洪,教授级高级工程师,研究方向为电力系统规划、设计和工程建设,电子信箱: zehong-liu@sgcc.com.cn

引用格式: 刘泽洪. 以电—氢—碳耦合方式协同推进新能源大规模开发与煤电绿色转型[J]. 科技导报, 2025, 43(22): 16-22; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.07.00004

望未来,风电、光伏将逐步成为中国电源装机和发电量的主体^[13]。

然而,风电、光伏等新能源存在随机性和波动性,大规模开发面临如何消纳、外送的难题。新能源大规模开发带来的并网和消纳难题主要体现在以下4个方面。

第一,电网消纳困难。风电、光伏等新能源发电出力具有随机性和波动性。新能源大发时段与用电负荷需求匹配度低,由于系统调节资源不足、消纳机制不完善等原因,无法完全避免“弃风弃光”^[14]。

第二,安全保供能力不足。为保证新能源充分消纳,电力系统中具有调节能力的常规机组需减少开机,高比例新能源电力系统维持短期内平衡和长期季节平衡、满足用电高峰负荷的难度较大,极端天气下电力保供问题更加突出^[15-16]。

第三,电力大范围配置压力大。中国超过80%的陆上风能和太阳能资源分布在西部、北部和东北地区,而全国约2/3的用电量分布在东部地区和中部地区。新能源资源与负荷需求的逆向分布要求建设更多跨区输电通道,提高电网配置能力^[17]。

第四,系统安全稳定运行难度大。新能源大量替代同步发电机后,系统惯量水平下降,频率响应特性恶化,削弱系统抵御功率偏差的能力。且新能源无功支撑能力弱,故障后送端暂态过电压问题突出,同步稳定与新形态稳定问题叠加,新的电磁振荡问题也日益凸显^[18-19]。

3 煤电面临绿色低碳转型难题

长期以来,煤电是中国的主力电源,发挥了保障电力供应的“顶梁柱”和系统安全的“压舱石”作用,未来一段时期内也仍将是重要的支撑性和调节性电源。近年来,虽然中国煤电装机仍在增长,但随着新能源的大规模开发,煤电装机、发电量占比不断下降。截至2025年第一季度末,煤电装机达到12亿kW,占比下降为35%,相比2020年下降约15个百分点^[20]。

与此同时,煤电节能改造、灵活性改造也在稳步推进。当前,中国煤电平均供电煤耗已降至302 g标准煤/kW·h^[21]，“十三五”和“十四五”前3年全国平均供电煤耗分别下降了9.9 g/kW·h和1.6 g/kW·h,碳排放水平逐步降低^[22]。随着新能源发电装机占比的大幅提升,电力系统的稳定运行受到了挑战,需要具备调节能力的煤电机组承担更多的调峰、调频等任务。中国深入实施煤电机组灵活性改造,截至2024年三季度末,全国灵活调节煤电规模已超过6亿kW^[23]。

中国是世界煤电装机和发电量最大的国家,降低煤电碳排放强度,向低碳甚至零碳电源转变是实现能源转型的关键。实现煤电绿色低碳转型,面临着以下3个方面的挑战。

首先,因为资源禀赋的原因,中国存量火电规模大,且以煤电为主。煤电碳排放强度高,最高可达1000 g/kW·h,是二氧化碳排放的最大单一来源,实现绿色低碳转型任务艰巨^[24]。

其次,当前煤电减碳手段有

限,减排成本高。部分机组经历多次节能改造后减排空间和潜力较小;随着煤电逐步向调峰角色转型,特别是进行深度调峰时负荷率的下降导致机组效率下降,度电碳排放升高,难以进一步降低碳排放^[25-26]。碳捕集、利用与封存技术(carbon capture, utilization and storage, CCUS)是降低煤电碳排放的重要技术手段,但目前成本仍较高,且缺乏有效的商业模式^[27-28]。

最后,煤电安全保供责任大,运营效益难保障。目前,煤电仍需承担保供主体责任,在煤价高企时期煤电“发得多亏得多”,且仍要在关键时刻发挥“顶梁柱”作用。由于煤价波动大,煤电经营效益存在很大不确定性,且容量电价补偿标准偏低,分年到位,效益难保障^[29-30]。

4 电—氢—碳耦合开辟新路径

为解决新能源消纳和煤电绿色低碳转型难题,国内外均开展了大量研究和实践。在促进新能源消纳方面,主要手段包括建设新型电力系统以及通过电氢氨醇协同开发等方式拓展新能源消纳新渠道等^[31-32]。在煤电绿色低碳转型方面,主要手段包括采用生物质掺烧、氨掺烧、碳捕集等方式促进现有煤电的减排和发展氢、氨发电等新的零碳可控电源进行替代等^[33-36]。国内外在风光氢协同开发、煤电灵活性改造、煤电掺氨发电、氢发电等领域已开展了一系列试验示范,取得了宝贵的实践经验^[37-38]。近年来部分代表性试验、示范工程如表1所示。

表 1 风光氢(氨)协同和促进煤电低碳转型的部分试验、示范工程

项目类型	项目所在地	项目名称	建成/投产时间
风光氢(氨)协同	中国	新疆库车绿氢示范项目	2023-06
	中国	吉林大安风光制绿氢合成氨一体化示范项目	2025-07
	丹麦	丹麦Ramme镇绿色合成氨工厂	2024-08
碳捕集	中国	湖北应城35 MW富氧燃烧碳捕集示范项目	2015-01
	中国	国家能源集团江苏泰州电厂碳捕集、利用与封存示范工程	2023-06
	挪威	Northern Lights二氧化碳运输和封存项目	2024-09
	澳大利亚	Moomba CCS项目	2024-10
煤电掺氨	中国	皖能铜陵发电公司300 MW燃煤机组掺氨试验	2023-04
	中国	中国神华广东台山电厂600 MW燃煤发电机组掺氨试验	2023-12
	日本	Hekinan电站热电站4号机组燃料氨替代示范测试	2024-04
氢发电	中国	清能股份2 MW级氢燃料电池热电联供示范项目	2024-06
	中国	长庆油田“氢代油”绿色钻井示范工程	2024-12
	韩国	New Sejong Bitdream氢-液化天然气共燃电厂	2024-11
	英国	松下制造英国有限公司氢发电系统	2024-12

不同部门为推动新能源的开发消纳和煤电绿色低碳转型都提出了各自的思路 and 措施,但缺少协同解决 2 大问题的探索,电—氢—碳耦合则为经济高效解决这 2 大问题提供了全新路径。电—氢—碳耦合是指将新能源发电、煤电、制氢、碳利用等环节有机整合,以新能源为能量来源,以水、空气和煤电排放的二氧化碳为原料实现电力和氢氨醇等物质联产的新模式。电—氢—碳耦合系统以新能源电力为主要能量来源,驱动碳、氢等作为能量载体的元素在不同形态间的转化,以减少碳排放或碳完全循环利用为目标,实现能源系统由高碳向低碳、零碳转型。电—氢—碳耦合系统示意如图 1 所示。当前,电—氢—碳耦合涉及的电制氢、储氢、新型储能、碳捕集与封存等技术已较为成熟,但经济性还有待提升;煤电掺氨、氢燃气轮机等技术处于试验示范阶段;合成氨、合成甲醇等技术已

经较为成熟,广泛应用于化工行业。随着大量风光制氢、制氨等示范项目的规划和建设,电—氢—碳协同发展态势已初步呈现。电氢协同形态、多能耦合基础理论等研究也正稳步开展^[39-40]。从能量流的角度来看,电—氢—碳耦合系统存在电能、氢能、氨甲醇等其他氢基能源 3 类能量形式。风、光伏发电是主要的电力来源,煤电、氢发电、氨发电等电源发挥调节作用,实现电力稳定供应、外送。通过富余新能源电力电解水制氢,部分电能转化为氢能,氢作为能量载体可供工业、交通、制热、发电等领域的终端应用。制得的氢经过绿氢化工工艺,还可进一步制成氨、甲醇、甲烷等多种形式的能量载体,满足更广泛的终端应用^[41]。对于每一步的能量转化,均存在能量损耗,如当前碱性电解槽电解水制氢效率约 70%,氢合成氨能效约 75% 等^[42]。随着技术的进步,各类能量转化环

节的效率有望得到提升。通过合理的工业流程设计,有效利用各环节的反应余热(如将合成氨反应余热用于高温固体氧化物电解槽加热等),也将进一步降低损耗,提升全系统能量转化效率^[43]。从物质流的角度来看,电—氢—碳耦合系统尽可能利用所有参加反应的原子,做到“物尽其用”。碳元素最初来源于煤炭,经煤电厂发电后转化为二氧化碳,二氧化碳捕集后与氢反应生成甲烷、甲醇等。氢元素来源于自然界或后续反应回收的水,电解水后产生的氢气可直接应用或与氮气、二氧化碳反应生成氨、甲烷、甲醇等。氧元素来源于水和空气,电解水和合成氨的空分环节生产的氧气可供给煤电用于富氧燃烧,降低碳捕集难度和成本,解决富氧燃烧技术空分制氧环节投资高、能耗大的难题。氮元素来源于空气,空分制氮后与氢气反应合成氨。电—氢—碳耦合系统可以充

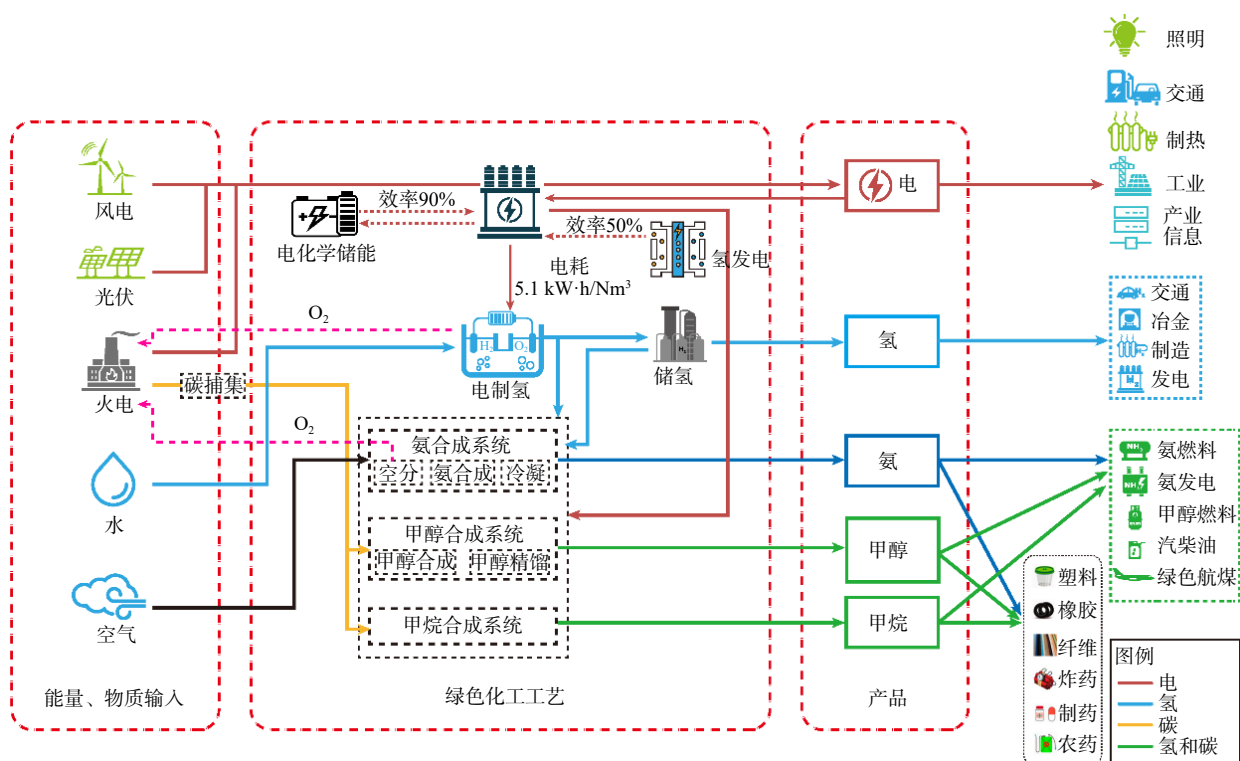


图1 电—氢—碳耦合系统示意

分利用绿电规模化制氢(氨、醇)的负荷灵活性,配套储电/储氢(醇)、氢发电及存量火电,为新能源基地提供短期至长期全时间尺度零碳灵活调节资源,解决基地近区零碳调节资源匮乏、配套调节性煤电需要降碳等问题,提高基地发电出力稳定性和可控性,保障电力安全可靠供应。同时也可推动绿电、绿氢在传统化工领域的应用,有助于推动石化、煤化工等高碳排放产业的低碳转型。以电、氢、甲醇联产的耦合系统为例,基于电制氢、电制甲醇、富氧燃烧发电等技术构建电氢甲醇联产模式,到2030年前碳达峰阶段,所生产的甲醇成本有望降至2835元/t,与碳价达130~170元/t时的煤制甲醇市场价格相当。相比常规电制甲醇,该模式充分利用电制氢的副产氧实现富氧燃烧,降低了碳捕集

成本,产品有望提前3~5a具备市场竞争力^[44]。

以电—氢—碳耦合方式解决新能源消纳和煤电绿色低碳转型难题可分为“三步走”。

第一阶段,主要采用风光火打捆开发的方式,煤电为新能源开发提供调节和支撑,新能源降低基地总体碳排放强度。如当前阶段,对于大型沙戈荒新能源基地,通常建设±800 kV/800万kW的送出工程,开发1000万kW风、光新能源,配套400万kW的煤电以及400万kW左右的储能设施,确保基地发电出力稳定可靠。新能源与煤电的电量比例大约为6:4,整体碳排放强度控制在300~400 g/kW时,基本达到燃气发电机组的排放水平。

第二阶段引入电制氢、煤电掺氢等技术,灵活的电制氢为新能

源提供新的消纳方式,同时氢再制成氨用于煤电掺烧以进一步降低煤电的碳排放强度。此阶段大型沙戈荒新能源基地的新能源开发规模可扩大至1500万kW左右,碳排放强度下降至100~150 g/kWh。

第三阶段充分利用火电排放的二氧化碳,在稳定可靠的电力基础上联产氢、氨和醇,实现电—氢—碳的深度耦合和沙戈荒基地的整体零碳排放。新能源开发规模可进一步扩大到2000万kW以上,煤电将主要作为二氧化碳原料来源或转变为应急备用电源,实现能源系统的绿色低碳转型。

5 实现电—氢—碳耦合需要协同发力

电—氢—碳耦合是一个系统性问题、交叉学科问题,需要用系

统优化思维进行能源、物质多系统优化研究和跨专业协同、跨行业整合。电—氢—碳耦合也是产业发展问题,一方面,能够推动煤电、化工等传统行业转型升级,另一方面,能够促进新能源、绿氢(氨、醇)能源、储能、新材料等行业绿色高质量发展,培育新质生产力。当前,电—氢—碳耦合仍处于摸索阶段,新疆、内蒙古等自治区已开展大量风光制氢、制氨等示范项目的规划和建设,对电—氢—碳协同发展进行了积极的探索。电制氢、合成氨、合成甲醇、碳捕集等技术已相对成熟,但电—氢—碳耦合发展仍面临着一系列问题和挑战。未来电氢碳协同面临的关键科学问题包括:电—氢—碳耦合的多能协同系统基础理论,如以电为中心的电—氢—碳协同的绿色零碳排放能源体系的优化构建和发展演进;基于电—氢—碳协同的能量-物质转化体系中的能量流、物质流、碳流的协同优化方法。氢能产业链关键材料技术,如高效率、低成本电制氢催化剂,电解槽隔膜等。新型绿色化工与新能源相匹配的技术,如适应可再生能源的柔性合成氨、合成甲醇关键技术。煤电低碳化改造关键技术,包括锅炉纯氧燃烧火焰组织、传热调控与污染抑制问题,超临界、超超临界煤电机组富氧燃烧系统集成优化和控制问题,高效、稳定、低氮氧化物排放的适应多种混合燃料的锅炉系统,燃气轮机系统适应性改造技术,100%纯氢(氨)燃气轮机发电技术等。实现电—氢—碳耦合发展,还需要在顶层设计、技术研发、产业链构建、

标准体系建设等方面协同发力。

一是布局重点专项支持前沿科技攻坚突破。“十五五”期间重点支持多能源品种能量流、物质流、信息流协同优化理论,系统集成设计与运行控制方法;适应新能源的构网型电解水制氢技术,宽负荷波动的柔性合成氨、甲醇工艺,新型储氢材料的理论研究与设计;重型纯氢(氨)燃气轮机的设计制造技术,煤掺氨清洁高效燃烧关键技术,无焰和加压富氧燃烧技术、化学链燃烧技术等。建立电—氢—碳耦合综合能源系统的大型装备及研发试验实证平台,研究综合能源系统仿真技术,服务各环节控制系统开发及优化。

二是推动开展技术装备和能源基地示范。“十五五”期间在西部、北部有条件的地区开展“绿电制氢氨+掺氨发电”全流程示范,率先在西部、北部地区推广电—氢—碳耦合模式。中远期可于东部沿海地区依托海上风电资源建设海上风电制氢氨醇一体化项目,并进一步探索电—氢—碳耦合模式与石化、煤化工的深度融合,促进能源、化工行业深度减排。

三是培育电—氢—碳耦合产业链推动产业发展。电—氢—碳耦合产业链包含新能源发电、电网、制氢、氢储运、碳捕集、化工等诸多产业,产业链条尚不健全,尤其是绿氢下游产业仍处于发展初期,力量相对薄弱。应鼓励技术创新和产学研合作,推动绿氢化工、氢能交通以及绿氨、绿甲醇等绿色氢能能源的商业化和产业化,营造制储输用全流程产业链,推动产业发展。

四是推动标准体系建设和完善相应法律法规。“十五五”期间推动绿氢及绿氨、绿甲醇等氢基衍生品的标准体系建设,引领新兴产业发展。出台富氧燃烧、碳捕集、煤电掺氨等技术相应的设备设计制造标准,提高生产效率。加快出台氢能相关法律法规,明确氢的能源属性,为氢能发展提供法律保障。

五是加强跨学科融合创新和产学研联合攻关。支持已有电气工程、能源、化工、控制等相关学科基础的高校和科研院所,围绕电—氢—碳耦合零碳能源系统优化学科布局,整合相关资源,设立跨学科研究机构。协同发电、电网、化工、装备制造等上下游产业,推动多学科、跨行业产学研联合攻关,为产业发展提供人才和智力支持。

参考文献(References)

- [1] IPCC. Special report on global warming of 1.5°C[EB/OL]. [2025-10-27]. <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- [2] 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL]. [2025-10-27]. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527647.htm.
- [3] 康重庆, 杜尔顺, 李姚旺, 等. 新型电力系统的“碳视角”: 科学问题与研究框架[J]. 电网技术, 2022, 46(3): 821-833.
- [4] Wang J, Feng L, Palmer P I, et al. Publisher Correction: Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data[J]. Nature, 2020, 588(7837): E19.
- [5] 邹才能, 熊波, 薛华庆, 等. 新能源在碳中和中的地位与作用[J]. 石油勘

- 探与开发, 2021, 48(2): 411-420.
- [6] 邹才能, 陈艳鹏, 熊波, 等. 碳中和目标下中国新能源使命[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 48-58.
- [7] 舒印彪, 赵勇, 赵良, 等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(5): 1663-1672.
- [8] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [9] 国务院关于印发《2024—2025年节能降碳行动方案》的通知[EB/OL]. [2025-10-27]. http://www.scio.gov.cn/zd gz/jj/202405/t20240530_850086.html.
- [10] 国家能源局. 我国风光装机历史性超过火电 风电光伏装机超过火电将成为常态[EB/OL]. [2025-04-25]. <https://www.nea.gov.cn/20250425/148efd0ca61148148d285edd438912df/c.html>.
- [11] 国家能源局. 国家第一批“沙戈荒”风光大基地建成9199万千瓦、约占95%[EB/OL]. [2025-01-26]. https://xbj.nea.gov.cn/dtyw/hyxx/202501/t20250126_275980.html.
- [12] 国家能源局. 2024年可再生能源并网运行情况[EB/OL]. [2025-01-27]. <https://www.nea.gov.cn/20250221/e10f363cabe3458aaf78ba4558970054/c.html>.
- [13] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1-14.
- [14] 刘泽洪, 周原冰, 李隽, 等. 超高比例新能源弱电网系统供电关键问题研究[J]. 新型电力系统, 2024(3): 282-296.
- [15] 刘泽洪, 马志远, 陈星, 等. 考虑长期气候变化和极端天气影响的新型电力系统充裕性评估研究[J]. 新型电力系统, 2024(4): 434-444.
- [16] 郭红霞, 陈凌轩, 张启, 等. 电力电量平衡视角下新型电力系统极端场景研究及应对综述[J]. 电网技术, 2024, 48(10): 3975-3994.
- [17] 刘振亚, 张启平, 董存, 等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2513-2522.
- [18] 谢小荣, 贺静波, 毛航银, 等. “双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 461-475.
- [19] 姜齐荣, 王玉芝. 电力电子设备高占比电力系统电磁振荡分析与抑制综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7185-7201.
- [20] 中国电力企业联合会. 我国风光装机历史性超过火电 电力行业绿色低碳转型成效显著: 中电联发布《2025年一季度全国电力供需形势分析预测报告》[J]. 电器工业, 2025(6): 10-13.
- [21] 刘吉臻, 杜忠明, 王庆华, 等. 新型电力系统下新一代煤电发展路径[J]. 新型电力系统, 2024(4): 357-370.
- [22] 人民日报海外版. 到2025年, 首批煤电低碳化改造建设项目全部开工: 推动煤电机组向“绿”而行[EB/OL]. [2024-07-25]. https://www.gov.cn/zhengce/202407/content_6964327.htm.
- [23] 人民日报海外版. 电力系统调节能力将进一步提升[EB/OL]. [2025-01-17]. <https://www.nea.gov.cn/20250117/fad2008ed4c44471baca4b3488f046e7/c.html>.
- [24] 王丽娟, 张剑, 王雪松, 等. 中国电力行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 329-338.
- [25] 刘云. 我国能源电力发展及火电机组灵活性改造综述[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(增刊2): 319-327.
- [26] 贾志强, 钱莉. 660MW燃煤火电机组深度调峰对碳排放量的影响分析[C]//中国电力技术市场协会. 2023年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集(下册). 白银: 华能景泰热电有限公司, 2023: 722-727.
- [27] Xu C B, Yang J J, He L, et al. Carbon capture and storage as a strategic reserve against China's CO₂ emissions[J]. Environmental Development, 2021, 37: 100608.
- [28] 张九天, 张璐. 面向碳中和目标的碳捕集、利用与封存发展初步探讨[J]. 热力发电, 2021, 50(1): 1-6.
- [29] 马晨晨. 巨亏、减亏、扭亏为盈但煤电企业仍面临这些困境[N]. 第一财经日报, 2024-03-27(A06).
- [30] 苑曙光, 赵小溪, 王华卿, 等. 容量电价机制作用下煤电项目亏损风险区域识别研究[J/OL]. 中国电力, 1-11[2025-10-10]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3265.tm.20250928.1629.002>.
- [31] 杨国山, 朱杰, 杨昌海, 等. 适应波动性风电的电制氢合成甲醇系统柔性优化调度[J]. 电力建设, 2023, 44(11): 149-162.
- [32] 马翱凯, 宁超. 面向绿电-氢-氨耦合系统的自适应分布鲁棒调度优化[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(3): 120-127.
- [33] 程耀华, 杜尔顺, 田旭, 等. 电力系统中的碳捕集电厂: 研究综述及发展新动向[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(4): 339-350.
- [34] 李郁. 燃煤电厂碳捕集技术经济分析及政策研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- [35] 毛健雄, 郭慧娜, 吴玉新. 中国煤电低碳转型之路: 国外生物质发电政策/技术综述及启示[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(3): 1-11.
- [36] 汪鑫, 陈钧, 范卫东. 燃煤电站锅炉掺氨燃烧与排放特性综述[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(8): 25-34.
- [37] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 61-69.
- [38] 黄雨涵, 丁涛, 李雨婷, 等. 碳中和背景下能源低碳化技术综述及对

- 新型电力系统发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(增刊1): 28–51.
- [39] 梁涛, 孙博峰, 谭建鑫, 等. 基于深度强化学习算法的风光互补可再生能源制氢系统调度方案[J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2264–2275.
- [40] Poluzzi A, Guandalini G, Guffanti S, et al. Flexible power and biomass-to-methanol plants with different gasification technologies[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2022, 9: 795673.
- [41] 刘泽洪, 孟婧, 张瑾轩, 等. 电-氢-碳耦合促进新能源基地开发模式研究[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(5): 473–491.
- [42] 田娜. 不同电解水制氢合成氨系统能效与经济性分析[D]. 福州: 福州大学, 2022.
- [43] 陈振伟. 可再生能源电解水制氢耦合合成氨系统集成与技术经济评价[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2024.
- [44] Liu Z H, Zhang J X, Zhang Z D, et al. Power-to-hydrogen-and-methanol model based on collaborative optimization of energy flow and material flow[J]. *Global Energy Interconnection*, 2025, 8(3): 349–362.

Collaborative promotion of large-scale development of renewable energy and green transformation of coal-fired power through electricity-hydrogen-carbon coupling

LIU Zehong

Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization, Beijing 100031, China

Abstract In the process of building a new electricity system and constructing a new energy system, China is facing the challenges of large-scale development and consumption of renewable energy and the green and low-carbon transformation of coal-fired power. Electricity-hydrogen-carbon coupling organically integrates renewable energy, coal-fired power, hydrogen production and carbon utilization, realizing the co-production of electricity and products such as hydrogen, ammonia and alcohol, providing a new path for economically and efficiently solving the two problems, and achieving the transformation of the energy system from high carbon to low-carbon and ultimately zero carbon through the "three-step approach". To achieve the development of electricity-hydrogen-carbon coupling, collaborative efforts are needed in top-level design, technical research and industrial chain construction.

Keywords electricity-hydrogen-carbon coupling; renewable energy; coal-fired power; power to hydrogen; oxygen-enriched combustion; carbon capture ●



(责任编辑 赵庆圆)