

面向高比例新能源接入的电氢耦合系统设想及分析

姜一鸣¹, 安 之², 刘斯伟², 戚庆茹², 夏明超¹, 陈奇芳¹

(1. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044; 2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209)

摘要:高比例新能源接入电力系统,其高随机性与波动性将造成系统“源-荷”结构失衡,且高比例电力电子化将导致传统电力系统以同步发电机和机电动态特性为基础的技术特性发生深刻变化。为此,提出了一种采用“送端绿电离网外送-受端离网制氢-氢燃气并网发电”模式的电氢耦合系统,即在送端将新能源电力汇集接入至与交流电网无电气联系的直流输电网络中,在受端满足电解水制氢直流负荷并通过氢燃气发电方式支撑交流电网,从而将大量新能源消纳和新增“西电东送”需求与送端/受端交流电网解耦。所提电氢耦合系统不仅能改善系统电力电量平衡,促进高比例新能源消纳,还能够保障电力系统的安全可靠运行,可为我国高比例新能源电力系统的演进方向提供参考。

关键词:高比例新能源;电氢耦合系统;直流电网;电解水制氢;储氢

中图分类号:TM73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202310014

0 引言

在“双碳”目标下,我国将加速一次能源清洁化与二次能源电气化,预计2050年我国以新能源为主体的非化石能源供应占比将超过60%,终端能源消费电气化程度将达到50%以上^[1-2]。在此路径下,高比例新能源并网将成为未来电力系统的基本特征。

在新能源接入规模不断扩大的过程中,风光出力的间歇性、波动性以及发电设备的弱支撑性、低抗扰性给电力系统带来极大挑战。传统电力系统以同步发电机和机电动态特性为技术基础,以发电、用电实时平衡为运行特性,而不断增加的新能源接入规模正在打破这一格局^[3-4]。一方面,新能源“有电量、无电力”的特点使得系统电力平衡和电量平衡逐渐解耦,灵活性资源需求大幅增加^[5];另一方面,大量逆变器、直流换流器等电力电子设备接入电网,传统同步发电机占比下降,系统的功角、电压、频率稳定特性均发生显著变化,暂态过电压、宽频振荡等新型稳定问题严重制约了系统安全稳定运行^[6]。由于我国新能源资源与负荷中心呈逆向分布,未来西部大量新能源资源仍须以远距离、大容量方式送电至中东部负荷中心^[7]。随着高比例新能源接入电网,新增“西电东送”需求将使直流馈入电网规模越来越大,交直流相互影响导致故障冲击愈发严重,表现出功角失稳与电压失稳交织的复杂失稳故障模式^[8-9]。在未来实现“双碳”目标的背景下,同步发电机占比将进一步降低,交直流混合网络的动态特性更加复杂,亟需研究安全、可靠、经济、灵活的电力系统形态,以

应对超大规模新能源接入给电力系统带来的挑战。

氢能作为一种特殊的清洁二次能源,具有热值高、来源广、可长期存储的特点,有望成为沟通新能源与电力系统的桥梁。近年来,全球高度重视氢能的发展,不断加大对氢能研发和产业化的扶持力度。我国在2020年12月也将氢能写入《新时代的中国能源发展》白皮书,提出要加速发展制氢、储氢、用氢等全产业链技术及装备^[10]。2022年3月,国家发展改革委员会、国家能源局正式发布《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》,明确了我国氢能产业发展定位、总体要求、发展目标与总体任务^[11]。

氢能在大规模储能、灵活功率调节等方面具有巨大优势,可以作为提升电力系统电力电量平衡能力的重要手段,解决新能源间歇性、波动性带来的充裕度与消纳难题。同时,氢能以燃气发电方式并网,既可就近接入负荷中心保障供电,又能为电网提供频率和电压支撑,具有提升电力系统运行稳定性的潜力,电氢深度耦合将成为电力系统的发展趋势之一。目前,我国电氢耦合系统建设以示范工程的方式逐步展开,在新能源制氢方面,大量新能源制氢项目建成投产,如我国首个万吨级新能源制氢项目——准格尔旗纳日松光伏制氢产业示范项目,为我国绿电制氢规模化、商业化发展积累了宝贵经验。在氢发电方面,我国大亚湾石化区综合能源站建设首座掺氢燃烧的HA级燃机电厂,并计划于2030年实现100%燃氢。此外,“西氢东送”管道亦已立项,首条管道将起于内蒙古自治区乌兰察布市,止于北京市。

综上,针对未来我国高比例新能源接入下电网面临的安全高效运行难题,提出了一种新型电氢耦合系统,并对其形态特征与关键技术进行分析。首先分析高比例新能源接入背景下电网面临的严峻挑战,然后从电源侧、负荷侧、电网侧与消费侧等角度

收稿日期:2023-06-30;修回日期:2023-10-15

在线出版日期:2023-10-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52007004)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52007004)

阐述所提电氢耦合系统的形态特征,分析高比例新能源接入下电氢耦合系统的技术优势,最后对氢能“制-储-运-用”、直流电网、系统规划运行等电氢耦合系统的关键技术需求与未来实施路径进行展望。

1 中国高比例新能源发展情景与挑战

1.1 中国高比例新能源发展情景

大力发展新能源,建设安全高效的高比例新能源电力系统是中国推动能源革命的关键途径。截至2021年底,我国新能源装机容量已突破 10^9 kW,占总发电装机容量的44.8%,风电、光伏发电装机均突破 3×10^8 kW,分别占全国总发电装机容量的13.8%和12.9%。新能源发电量稳步增长,2022年,全国新能源发电量达 2.7×10^{12} kW·h,占全社会用电量的31.6%,较2021年提高1.7个百分点,新能源发电量增速远远高于全国发电量增速^[12]。根据国家发展改革委能源研究所发布的《中国2050高比例可再生能源发展情景暨路径研究》报告,到2050年,全国风电装机容量将达到 2.4×10^9 kW,发电量达 5.35×10^{12} kW·h,太阳能发电装机容量达 2.7×10^9 kW,发电量达 4.31×10^{12} kW·h,风光电源总装机容量、发电量占比将分别达到71.8%、63.6%,预测结果如图1所示^[1]。

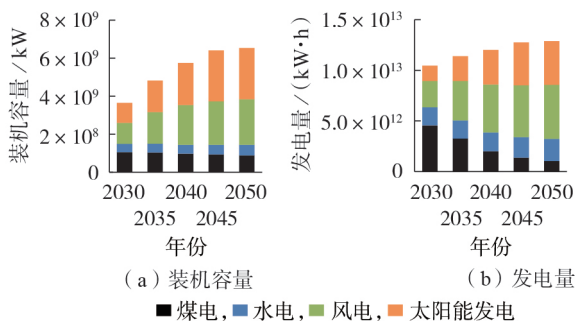


图1 2030—2050年中国能源发展情景
Fig.1 Energy development scenario in China
from 2030 to 2050

1.2 高比例新能源对电力系统的挑战

1) 对系统电力电量平衡的挑战。

新能源快速发展将导致电力系统“源-荷”结构严重失衡,加剧电力电量平衡难题。一方面新能源出力具有日内随机性、日间间歇性、季节波动性等多重不确定性,出力曲线与负荷曲线无法完全匹配,呈现出明显的“反调峰”特性,使电力系统实时平衡调度面临巨大压力,通过配置储能装置逐步实现发用电解耦,可使“发-用”实时平衡调度策略转变为“发-储-用”非实时平衡调度策略,从而保障电力电量平衡^[13-14]。另一方面,我国新能源消纳需要远距离、大容量的电力外送通道,目前我国电网跨区外送能力难以满足西部新能源消纳需求,亟需增大输电通道

容量,并在新能源出力不确定性下提高外送通道利用率^[15]。近年来,随着《清洁能源消纳行动计划(2018—2020年)》的实施,我国新能源消纳情况显著好转,但在未来更高新能源占比的电源结构下,电力系统充裕性与新能源消纳仍将面临严峻挑战^[16]。

2) 对系统安全稳定运行的挑战。

随着高比例新能源接入电力系统,同步发电机将被大量的并网逆变器替代,传统电力系统将逐渐呈现出高比例电力电子化的新特征,动态机理发生深刻改变^[17-18]。一方面,这使得系统惯性降低、电压支撑能力下降,同等扰动下系统频率、电压波动加剧;另一方面,电力电子设备抗扰动能力较弱,在系统出现频率、电压波动时,易出现新能源机组大规模脱网,使扰动发展成连锁故障^[19]。此外,随着交、直流混合电网规模越来越大,交、直流间的相互影响愈加强烈,大容量直流故障产生巨大的有功、无功冲击,易引发送、受端电网频率大幅振荡,以及全网范围的电压大幅波动,交直流混联系统故障呈现多时间尺度、多区域耦合、多故障类型等特点。随着直流输电规模的增加,发生级联故障的风险突出,使交直流输电系统稳定运行面临严峻挑战^[20]。

3) 对系统整体供电成本的挑战。

随着新能源相关技术的不断发展,以风电和光伏为代表的新能源发电平准化度电成本大幅降低,发电上网竞争力不断增强,极大推动了新能源发电规模的增长。然而,新能源发电的随机性与波动性使得新能源并网后为维持电力电量平衡、保障电力系统稳定运行付出更多系统成本。新能源系统成本主要包括灵活性电源投资与改造成本、系统调节运行与备用成本、系统转动惯量下降带来的系统稳定性成本、大电网扩展及补强投资等^[21]。系统成本与新能源电量渗透率密切相关,在新能源发电量占比较低时,系统通过常规机组调整运行方式等手段一般可以满足新能源消纳的需求,随着新能源电量在电力系统中所占比例超过20%,新能源消纳的系统成本将会明显上升,成为影响系统整体供电成本新的因素^[22]。根据经济合作与发展组织的核能署测算,当新能源发电量占比从10%提升至75%时,其系统成本将从10 \$ / (MW·h) 增长至50 \$ / (MW·h) 以上,使系统整体供电成本面临严峻挑战^[23]。

2 电氢耦合系统设想

针对高比例新能源发电给系统电力电量平衡与安全稳定运行带来的挑战,本文提出一种新型电氢耦合系统,系统结构见附录A图A1。以高比例新能源消纳和电力系统高可靠性运行为目标,将新增新能源汇集接入与交流电网无电气联系的直流输电网络中,采用“送端绿电离网外送-受端离网制氢-氢燃气并网发电”的模式,形成以绿氢制备为核心负荷的

独立电力系统和以氢为介质的区域性燃料市场,基于电-氢-电转换将大量新能源消纳和新增“西电东送”需求与送端/受端电力系统解耦,充分发挥氢能季节性储能和供电保障功能,在满足超大规模新能源消纳需要的同时,提升电力系统安全稳定水平,降低新能源系统成本,保障万亿级电网资产持续发挥作用。

2.1 电源侧形态:新能源独立组网、与送端弱交流电网解耦

新能源发电需要通过电力电子设备接入电网,具有弱支撑性和低抗扰性的特征,与同步机发电有着本质的区别。随着高比例新能源接入交流电网,维持交流电网安全运行的根本支撑被削弱,导致交流电网动态特性发生深刻的变化,降低了交流电网的稳定性,在极端场景下可能发生多系统跨区域连锁故障、设备故障穿越支撑能力不足、非线性宽频振荡等现象^[24]。我国西部电网网架薄弱、短路容量不足且同步支撑能力较差,支撑大规模新能源接入需对交流电网进行大量改造与补强,经济成本较高^[25]。

因此在电源侧,本文所提电氢耦合系统仅接入风电、光伏、水电等新能源集群,无其他同步机组。该组网方式下,新能源通过直流汇集、升压,不再接入交流同步电网,无需并网逆变设备,减少因汇集距离远与变换环节多而造成的功率损耗,提升了输电效率与灵活性。而通过构建独立于西部交流同步电网的新能源直流输电网络,大规模新能源将采用直流组网方式直接汇集而不再接入交流电网,实现大规模新能源与西部弱交流电网的有效隔离,避免新能源接入弱交流电网的过电压、宽频振荡及新能源大规模脱网造成连锁故障等问题,缓解了新能源发电设备给电网安全稳定运行带来的隐患,大幅降低了大规模新能源并网造成的交流电网补强需求,便于实现西部地区大规模新能源的灵活接入与送出。

2.2 负荷侧形态:满足电解水制氢直流负荷、与受端交流电网解耦

我国华北、华东、华中、南方等主要受端电网已形成了多直流馈入的网架格局,随着受端电网中直流输电馈入落点越来越密集,一旦直流线路发生双极闭锁、换相失败闭锁、再启动失败闭锁等故障,将在短时间内产生数倍于传统机组故障的功率缺额,进而引起受端交流电网功率转移、电压跌落与频率失稳的问题^[26]。通过合理选择直流落点与通道走廊、补强网架结构、建设调峰调频电源和接入无功补偿装备等措施,可以在一定程度上提升受端交流同步网络承载直流馈入的能力,但是随着新能源“西电东送”规模的持续快速增大,交直流混联系统安全风险将持续增加,受端交流电网难以承载全部直流馈入^[27]。此外,新能源出力的波动与负荷需求的波动叠加后的净负荷峰谷差明显增大,使得灵活性问题成为了高比例新能源并网面临的主要挑战之一。

因此在负荷侧,通过电解水制氢将新能源电能转换为绿色氢能,再通过氢燃料燃气轮机发电的方式接入现有交流电网,从而实现了现有交流电网与新系统在电气上完全解耦。电解水制氢响应速度较快,可追踪匹配新能源出力,实现“荷随源动”,使新能源发电的随机性与波动性不再约束用电负荷。而通过电-氢-电转换,一方面,将氢能系统引入电力系统,新能源电力的生产和消纳从原有的电力系统发用电实时平衡关系,解耦为燃料生产和消费的非实时平衡关系,形成发电、用电间巨大的跨季节缓冲空间,可以调节“源-荷”季节性、空间性、协调性矛盾,在实现超高比例新能源消纳的同时提升电力系统的充裕性;另一方面,电氢耦合系统实现了新能源直流电网与传统受端交流大电网的解耦运行,既降低了系统的灵活性需求,又避免了更大规模直流馈入带来的交直流混联系统稳定与故障传播的问题,而氢能通过氢燃料燃气轮机并入电网,可就近向负荷中心供电,并同时为电力系统提供频率和电压支撑,减少了为提升直流承载能力而投入的电网改造补偿成本,极大增强了受端电力系统的安全稳定运行水平。

2.3 电网侧形态:直流电网输送新能源电力、广域新能源互补运行

能量的远距离、大规模输送可通过输氢、输电2种方式开展。据测算,特高压直流输电与管道输氢的投资成本接近,但特高压直流输电运维成本低于管道输氢,故在远距离、大规模等特定能源输送场景中,相较“源端制氢-管道输氢”模式,采用“直流电网输电-受端制氢”模式经济性更好、安全风险更低^[28-29]。

在直流电网中,系统稳定性问题由交流系统中的功角、电压、频率稳定简化为电压稳定性,运行方式多样,控制手段灵活,可实现新能源高效稳定输送^[30]。同时,由于电制氢负荷具有“荷随源动”特性,切负荷过程不涉及生产生活用电,因此系统无须满足 $N-1$ 准则,故障后可随时通过切除负荷方式实现系统稳定控制,显著降低系统冗余建设带来的成本。而由于电源和负荷结构单一,新系统电压等级相比传统电网可大幅简化,亦降低了电网的投资和运维成本。此外,我国幅员辽阔,不同地域的新能源出力呈现明显的时空互补特性,通过广域新能源互补运行,可以获得比较稳定的电力输出并有效减少输电线路的尖峰潮流,从而提高输电线路的利用率,并减少负荷侧制氢设备启停次数,降低配置容量。

2.4 消费侧形态:绿氢生产满足各领域用氢需求,实现高碳行业低碳化转型

在电氢耦合系统中,受端电制氢除用于电力系统能源转型升级外,在化工、钢铁、交通等领域也有广泛应用。在化工领域,氢气是煤化工行业的重要原料,其可分别与氮气、二氧化碳结合合成氨、甲醇、甲烷,以此为基础又可进一步制取氮肥、复合肥料、

纯碱、乙炔、甲醛等^[31]。此外,氢气还广泛参与在加氢精制、加氢裂化等环节,用于石油的精炼、催化裂化、重油的脱硫等,是生产清洁油品、提高产品品质的主要手段^[32]。通过以可再生能源制氢方式替代合成气中间品中的氢气需求,将有助于降低化工行业对化石能源的依赖和碳排放强度。在钢铁领域,全球近75%的钢铁生产采用烧结—高炉炼铁—转炉炼钢—铸轧工艺,其中采用焦炭作为铁矿的还原剂,会产生大量的碳排放及多种有害气体,氢气作为还原剂的形式替代高炉炼铁环节的焦炭,可大幅降低碳排放量,促进清洁型冶金转型^[33]。氢气还可与副产物一氧化碳和二氧化碳化合生产清洁能源或高附加值化工产品,延长钢铁生产产业链,进一步减少气体污染物排放。在交通领域,以燃料电池为主导的氢能转换技术趋于成熟,可提供零排放、长续航的绿色动力,已在大型重载车辆与船舶等方面迅速推广^[34]。

3 电氢耦合系统关键技术与实施路径

3.1 氢能“制-储-运-用”关键技术

1) 电制氢技术。

在新能源出力存在波动性与间歇性的情况下,未来电氢能源系统中的电解水制氢设备需满足工作效率高、动态响应速度快、工作区间广和输出功率高的技术要求,然而目前尚未有能同时达到上述要求的电制氢设备^[35]。电解水制氢技术主要包括碱性电解水技术与质子交换膜电解水技术2种,其中碱性电解水技术成熟、成本低廉,是目前应用最广泛的电解水技术,但碱性液体电解质的电解槽启动准备时间长,负荷响应慢,且阴阳两极必须保持压力均衡,难以适应具有快速波动性的新能源电力。质子交换膜制氢技术具有较宽的工作范围与较快的响应速度,能够较好应对新能源出力的波动性与间歇性,同时还具有电流密度大、安全可靠、体积小等技术特点,有望支撑未来电氢耦合系统。质子交换膜制氢设备投资成本较高,可以与大容量低成本的碱性设备结合使用,即质子交换膜电解水设备应对新能源电力中的高频分量,碱性电解水设备应对新能源电力中的低频分量,从而达到降低系统投资成本的目的^[36]。基于质子交换膜电解水技术的制氢设备虽然有着更好的响应速率和更宽的功率调节范围,也需要在以下方面进一步发展:①提高电解水制氢设备的容量等级与系统规模,与超大规模可再生能源消纳的需求相匹配;②降低电解制氢系统的投资成本,提高电解制氢设备效率,进而提高电氢转换的经济性;③提高电制氢设备与配套电力电子器件应对宽功率波动的能力,提升制氢系统寿命。

2) 氢发电技术。

氢发电技术主要包括燃料电池发电与氢燃料(掺氢)燃气轮机发电技术。氢燃料电池可将氢能直

接转化为电能且不受卡诺循环的限制,热电联产的工作效率可达85%。然而,与新能源发电及电化学储能类似,氢燃料电池也存在需要通过大量电力电子设备并网的固有缺陷。氢发电的另一种重要技术是氢燃料燃气轮机发电,即以纯氢为燃料实现传统天然气燃气轮机的氢能替代,是传统燃气轮机电厂实现零碳排放的重要技术路径。相比于氢燃料电池,氢燃料燃气轮机的装机容量更大,具备与传统同步发电机组同样的频率、电压支撑能力,且具备启停调峰能力,接入电力系统可提高系统运行的稳定性和灵活性^[37]。由于氢气的低位热值较小,氢气的燃料体积流量与火焰速度均高于天然气,这使得氢燃料燃气轮机的燃烧系统面临着回火与火焰震荡、高温高压下自动点火困难与氮氧化物排放高等问题,为此须研究出能够使用100%氢燃料的兼顾低氮氧化物排放与稳定燃烧范围宽广的氢燃料燃气轮机燃烧技术^[38]。除燃烧系统需要改进外,常规燃气轮机改燃氢气时还可能发生压气机喘振现象,需要在设计时考虑燃气透平与压气机工质流量的匹配问题。

3) 氢储能技术。

构建电氢耦合系统的一个大前提条件就是在较高体积能量密度下储运氢气。氢储能技术主要有高压气态储氢、低温液态储氢和固态储氢等。目前,最常用、最直接的技术是高压气态储氢,成本低、充放氢速度快、转换效率较高,但是由于氢气单位体积功率密度较低,高压气态储氢容器所占体积十分庞大,无法满足大规模氢气存储的需求。相比于高压气态储氢,低温液态储氢的密度较高,约为高压气态储氢的2.8倍,但是氢气液化过程需要多级压缩冷却,消耗的能量约占氢能的30%,且为了避免液态氢蒸发损失,对液态氢储存容器绝热性能要求苛刻,需要具有良好绝热性能的绝热材料^[39]。低温液态储氢罐的技术复杂,成本高昂,如何降低液化与贮存成本是低温液态储氢产业化的发展方向。此外,还可以通过向枯竭储气库或地下含水层注入氢气的方法进行储氢,其中盐穴储氢库建设在盐层之上,具备良好的物理特性,是目前最佳的地下储氢方式,这也是未来实现季节性大规模储氢最为经济的方式,但这种存储方式受地理位置和地质条件限制较大。

4) 氢运输技术。

氢气的运输方式主要包括容器运输与管道运输2类。氢气可以通过容器以压缩气体或液态氢的形式进行运输。氢气长管拖车的传输容量较小,但灵活性高,适合将氢传输到近距离的区域如加氢站配送氢等。未来,轻量化、高压化、大容积化将是氢气长管拖车的发展趋势^[40]。低温液态运氢可以承担大容量远距离的氢能传输,利用船舶集装箱液态运输,可实现单次上万吨的出氢量,尤其适合跨国跨洲输送。氢气运输的另一个主要方式就是管道运输。管

道运输在传输容量、传输效率、传输距离等方面具有优势,并可利用其管存特性进行氢存储,而其缺点在于投资成本高。由于氢气与天然气特性较为接近,可以在天然气管道中掺入一定比例的氢气进行输氢,但是天然气掺氢比例的提高还需要解决一些问题,如氢气的扩散损失及材料吸附氢气后产生“氢脆”现象,引起氢致开裂、氢鼓泡、金属机械性能下降等,需要增加大量气体监测仪器、安装室外紧急放空设备等,这些都会使运输过程中的成本增加^[41]。

3.2 适应新能源波动的直流输电关键技术

1) 特高压直流输电技术。

为满足高比例新能源电氢耦合系统超大容量和超远距离输电需求,特高压直流输电技术在输电距离、容量、拓扑及关键设备等方面需进一步提升和改进^[42]。在输电距离方面,特高压直流输电将进一步向更高电压等级($\pm 1\,500\text{ kV}$)迈进,并通过接力输电等方式,提升经济输电距离;在容量提升方面,目前的技术路线主要有采用高、低柔性直流换流器串联技术,或采用常规直流换流器、柔性直流换流器混合级联技术,但未来还需要解决直流线路暂时性故障自清除问题;在关键设备方面,大容量直流断路器与大容量变压器是研究的重点,直流断路器需要进一步缩短开断时间,降低运行损耗,直流变压器则需要提高自身容量以保证大规模新能源输送。

2) 直流电网技术。

多端柔性直流输电系统与大容量直流断路器组合形成的直流电网,能够实现多电源供电、多落点受电,并可快速切除故障,具有更高的可靠性、经济性和灵活性^[43]。基于电压源换流器的新型多端直流技术的快速发展,为构建大规模远距离新能源接入的电氢耦合系统提供了有力支撑。然而,目前直流电网的发展还存在核心设备研发、直流网络稳定控制、直流网络潮流控制等技术难题。在核心设备研发方面,与特高压直流输电技术需求接近,大容量高电压高速直流断路器、大容量直流变压器、直流线路潮流控制器是研究的重点;在直流网络稳定控制方面,直流电网虽然与交流电网存在一定共同之处,但在电能形态、拓扑结构等方面存在较大区别,已有交流电网技术不适宜直接应用在直流电网中,应开发适用于100%新能源接入直流电网的安全稳定控制措施;在仿真方面,含大规模新能源接入与大规模电制氢设备的直流电网是一个极为复杂的动态系统,需要融合电气工程、流体力学、制氢技术等多种学科的理论与技术手段,建立直流仿真模型以及电制氢设备接入后的机电暂态与电磁暂态模型,揭示电氢耦合系统中直流电网的运行机理与动态特性。

3.3 电氢耦合系统建模、规划与运行关键技术

1) 系统耦合建模。

电解水制氢过程中涉及到多种化学与物理动态

变化过程,具有外部电场、单体槽内部温度场和压力场、内部磁场等特征,且各物理场间存在复杂影响,受限于多维模型计算复杂度及耗时,多物理场模型研究难以考虑整体系统,因而构建兼具计算效率和准确度并能准确描述多物理场耦合的电解水制氢动态运行模型,是电氢耦合系统建模亟待解决的问题^[44]。此外,可再生能源发电时间尺度与电解水制氢设备的运行时间尺度不同,电解槽的工作状态无法与可再生能源随机性、波动性特征相匹配,需要进行源-网-氢协同建模,从而尽可能降低电解水制氢设备的响应延迟时间,提高系统整体运行效率。

2) 系统优化规划。

区别于传统输电网络的规划设计,电氢耦合系统的规划包括源端新能源场站直流电网与荷端电制氢设备选址定容两大类,既需要满足源端地区资源禀赋,也需要满足荷端用氢需求^[45]。在西部新能源送端,特大型新能源基地规划应充分考虑源网协调与互补配置,将直流电网安全运行与多源互补前置到新能源基地规划阶段考虑,避免送端电网无法送出的问题。在东部制氢受端,应充分考虑不同地区用电与用氢情况,并考虑氢燃气轮机发电为电网提供调频、黑启动、备用发电等辅助服务,开展输电系统与制氢系统的协调规划,因地制宜地制定电解水制氢及储氢规划方案,深化电氢系统的耦合程度。

3) 系统运行控制。

在电氢耦合系统中,推动多类型可再生能源跨区域互补是实现电氢耦合系统经济可靠运行的关键。电解水制氢技术虽然可以较好适应可再生能源的间歇性与波动性,但不稳定的电力供应将导致制氢设备可利用小时数低,进而推高系统成本。因此,可以将风力发电、太阳能发电、水力发电协同作用,获得比较稳定的电力输出,使电氢耦合系统具有较高的稳定性和可靠性,并可减少制氢设备启停次数,提高寿命。此外,电系统与氢系统在运行控制、时间尺度、用能特性等多方面区别很大,可再生能源瞬时性功率波动产生的影响难以通过拓宽运行功率范围缓解,需要通过改变电解制氢设备的运行方式改善,如增加模块化的控制策略^[46]。

3.4 电氢耦合系统实施路径

1) 第一阶段:在西部可再生能源基地建设电解水制氢设施,并通过天然气管道掺氢及修建输氢管道的方式实现“西氢东送”,逐步替代东部化石能源制氢,在东部负荷中心培育氢供应链与产业链,提高氢能在终端能源中的占比。目前我国首个“西氢东送”工程已经启动。此外,还可采用示范工程,建设掺氢燃气轮机调峰机组,强化氢在电力系统中的应用。

2) 第二阶段:在“西氢东送”的基础上,通过“点对点输电+负荷侧制氢”的方式初步实现“西电东氢”模式。前期可将已建成特高压直流输电线路进行改

造,以节省开支、节约输电走廊,后期建设专用特高压直流输电线路向负荷中心电制氢设备输送绿电。在东部负荷侧,建设基于100%氢燃气轮机的调峰或常规电厂,为高比例新能源接入电网提供支撑。

3)第三阶段:全面建设电氢耦合系统。通过在西部地区构建与本地电网隔离的多类型跨区域可再生能源互补直流电网,将西部海量可再生能源输送至东部负荷中心,在东部建设大量100%氢燃气轮机常规电厂,替代现有常规火电机组,并建立以氢为介质的区域性互济燃料市场,从而实现全国范围内的超高比例可再生能源接入。

4 结论与展望

氢能是一种清洁无污染、高效灵活的二次能源,推动新能源电制氢的应用发展,是电力行业实现“双碳”目标的重要手段之一。在此背景下,本文提出了一种面向高比例新能源的电氢耦合系统。首先分析了中国高比例新能源发展情景与现有电力系统在电力电量平衡、安全稳定运行与整体供电成本等方面面临的挑战;进而从电源侧、负荷侧、电网侧与消费侧4个层面描述了面向超高比例新能源接入的电氢耦合系统形态特征;最后分析了所构建的电氢耦合系统在氢能“制-储-运-用”、直流电网与系统规划运行等方面面临的关键技术挑战并探讨了构建电氢耦合系统的实施路径。所提电氢耦合系统既保障了现有电力系统的电力电量平衡与安全稳定运行,又实现了绿色氢能的稳定供应,可助力化工、钢铁、交通等多领域实现深度脱碳,有望成为超高比例新能源接入电力系统的解决方案。

应当指出,构建电氢耦合系统除从系统、设备的技术方面突破瓶颈以外,下一步还需针对电氢耦合系统成本分析、市场机制、政策激励等方面开展研究。例如对电-氢-电转换产生的损耗与超高比例新能源接入产生的系统成本进行经济性对比分析,研究构建氢能区域能量互济的市场模式,探索可再生氢定价机制,研究契合电氢耦合系统的可再生能源消纳促进激励政策等,以进一步验证本文所提电氢耦合系统的适用性并完善电氢耦合系统顶层设计。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 国家发展改革委能源研究所. 中国2050高比例可再生能源发展情景暨路径研究[R]. 北京:国家发展改革委能源研究所,2015.
- [2] 魏泓屹,卓振宇,张宁,等. 中国电力系统碳达峰、碳中和转型路径优化与影响因素分析[J]. 电力系统自动化,2022,46(19):1-12. WEI Hongyi, ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, et al. Transition path optimization and influencing factor analysis of carbon emission peak and carbon neutrality for power system of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 1-12.
- [3] 肖先勇,郑子萱. “双碳”目标下新能源为主体的新型电力系统:贡献、关键技术与挑战[J]. 工程科学与技术,2022,54(1):47-59. XIAO Xianyong, ZHENG Zixuan. New power systems dominated by renewable energy towards the goal of emission peak & carbon neutrality: contribution, key techniques, and challenges [J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 47-59.
- [4] 邱革非,何超,骆钊,等. 考虑新能源消纳及需求响应不确定性的配电网主从博弈经济调度[J]. 电力自动化设备,2021,41(6):66-72. QIU Gefei, HE Chao, LUO Zhao, et al. Economic dispatch of Stackelberg game in distribution network considering new energy consumption and uncertainty of demand response [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 66-72.
- [5] 张小奇,孙晓强,张振宇,等. 基于统计学特征的新能源消纳平衡模型及灵敏度分析[J]. 电力自动化设备,2023,43(4):121-126,142. ZHANG Xiaoqi, SUN Xiaoqiang, ZHANG Zhenyu, et al. Renewable energy consumption balance model and sensitivity analysis based on statistical characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(4): 121-126, 142.
- [6] 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. ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [7] 陈国平,李明节,许涛,等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):20-26. CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 20-26.
- [8] 吕鹏飞. 交直流混联电网下直流输电系统运行面临的挑战及对策[J]. 电网技术,2022,46(2):503-510. LÜ Pengfei. Research on HVDC operation characteristics under influence of hybrid AC/DC power grids [J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 503-510.
- [9] 吴健颖,彭茂兰,武霁阳,等. 兴安直流工程交直流系统谐振影响因素分析及其抑制措施[J]. 电力自动化设备,2023,43(2):197-202. WU Jianying, PENG Maolan, WU Jiyang, et al. Analysis on influencing factors and its countermeasure of resonance of AC/DC system in Xing'an DC project [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(2): 197-202.
- [10] 国务院新闻办公室. 新时代的中国能源发展[R/OL]. [2023-05-29]. <http://www.scio.gov.cn/ztk/dtzt/42313/44537/index.htm>.
- [11] 国家发展改革委. 氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)[R/OL]. [2023-05-29]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/P020220323314396580505.pdf>.
- [12] 国家能源局. 国家能源局2023年一季度新闻发布会文字实录[EB/OL]. (2023-02-13)[2023-05-29]. http://www.nea.gov.cn/2023-02/13/c_1310697149.htm.
- [13] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化,2021,45(9):171-191. ZHUO Zhenning, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [14] 张敏,王建学,王秀丽,等. 面向新能源消纳的调峰辅助服务市场双边交易机制与模型[J]. 电力自动化设备,2021,41(1):84-91. ZHANG Min, WANG Jianxue, WANG Xiuli, et al. Bilateral trading mechanism and model of peak regulation auxiliary

- service market for renewable energy accommodation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 84-91.
- [15] 姚伟, 丁剑, 南佳俊, 等. 未来西部电网及可再生能源外送输电技术发展方向研究[J]. 中国能源, 2019, 41(3): 33-39.
YAO Wei, DING Jian, NAN Jiajun, et al. Research on the future development direction of western power grid and renewable energy transmission technology[J]. Energy of China, 2019, 41(3): 33-39.
- [16] 国家能源局. 清洁能源消纳行动计划(2018—2020年)[R/OL]. (2018-10-30)[2023-05-29]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghxwj/201812/W020190905495739358481.pdf>.
- [17] 张雯欣, 吴琛, 黄伟, 等. 基于设备模型辨识的新能源电力系统共模频率特征量化[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 96-102.
ZHANG Wenxin, WU Chen, HUANG Wei, et al. Quantization of common mode frequency characteristic in power system with renewable resource based on equipment model identification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(8): 96-102.
- [18] 杨鹏, 刘锋, 姜齐荣, 等. “双高”电力系统大扰动稳定性: 问题、挑战与展望[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(5): 403-414.
YANG Peng, LIU Feng, JIANG Qirong, et al. Large-disturbance stability of power systems with high penetration of renewables and inverters: phenomena, challenges, and perspectives[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2021, 61(5): 403-414.
- [19] 沈政委, 孙华东, 汤涌, 等. 传统交流电网与高比例新能源电网连锁故障差异性分析[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4641-4649.
SHEN Zhengwei, SUN Huadong, TANG Yong, et al. Analysis of cascading failure differences between traditional AC power grid and high-proportion new energy power grid[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4641-4649.
- [20] 张晶晶, 陈博进, 吴佳瑜, 等. 交直流电力信息物理系统连锁故障演化模型及风险评估[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(5): 160-166.
ZHANG Jingjing, CHEN Bojin, WU Jiayu, et al. Cascading failure evolution model and risk assessment of AC/DC CPPS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(5): 160-166.
- [21] 张运洲, 陈宁, 黄碧斌, 等. 基于系统成本的新能源等效上网电价计算方法及应用[J]. 中国电力, 2022, 55(2): 1-8.
ZHANG Yunzhou, CHEN Ning, HUANG Bibin, et al. Methodology for calculating VRE equivalent feed-in tariff based on system cost and its application[J]. Electric Power, 2022, 55(2): 1-8.
- [22] 辛保安, 单葆国, 李琼慧, 等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3117-3126.
XIN Baoan, SHAN Baoguo, LI Huiqiong, et al. Rethinking of the “three elements of energy” toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117-3126.
- [23] AGENCY N E. The costs of decarbonisation: system costs with high shares of nuclear and renewables[M]. Paris, France: OECD, 2019: 133-138.
- [24] 马进, 赵大伟, 钱敏慧, 等. 大规模新能源接入弱同步支撑直流送端电网的运行控制技术综述[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3112-3120.
MA Jin, ZHAO Dawei, QIAN Huimin, et al. Reviews of control technologies of large-scale renewable energy connected to weakly-synchronized sending-end DC power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3112-3120.
- [25] 潘垣, 尹项根, 胡家兵, 等. 论基于柔直电网的西部风光能源集中开发与外送[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3621-3629.
PAN Yuan, YIN Xianggen, HU Jiabing, et al. Centralized exploitation and large-scale delivery of wind and solar energies in West China based on flexible DC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3621-3629.
- [26] 郭莉, 吴晨, 陈立, 等. 可再生能源跨区消纳的受端电网阻塞机理分析[J]. 电力建设, 2020, 41(2): 21-29.
GUO Li, WU Chen, CHEN Li, et al. Analysis on transmission congestion mechanism of cross-region renewable energy integration in receiving-end power grid[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(2): 21-29.
- [27] 覃琴, 苏丽宁, 陈典, 等. 受调峰和安全稳定约束的华东电网新能源承载规模研究[J]. 现代电力, 2022, 39(3): 270-277.
QIN Qin, SU Lining, CHEN Dian, et al. Research on new energy power-carrying capacity of East China power grid under the constraints of peak-shaving and stability[J]. Modern Electric Power, 2022, 39(3): 270-277.
- [28] MIAO B, GIORDANO L, CHAN S H. Long-distance renewable hydrogen transmission via cables and pipelines[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(36): 18699-18718.
- [29] 鲁宇, 张大弛, 韩思雨, 等. 高渗透率可再生能源情景下氢能发展分析[J]. 湖北电力, 2021, 45(1): 53-59.
LU Yu, ZHANG Dachi, HAN Siyu, et al. Analysis on hydrogen energy development under the scenario of high-permeability renewable energy[J]. Hubei Electric Power, 2021, 45(1): 53-59.
- [30] 拓超群, 贺之渊, 徐千鸣, 等. 直流电网潮流控制器研究与应用综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6): 173-183.
TUO Chaoqun, HE Zhiyuan, XU Qianming, et al. Review on research and application of power flow controller of DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 173-183.
- [31] 周君, 安娟, 杨宽辉, 等. 现代能源体系耦合绿氢化工应用的研究进展[J]. 低碳化学与化工, 2023(4): 46-54.
ZHOU Jun, AN Juan, YANG Kuanhui, et al. Research progresses in application of modern energy system coupled with green hydrogen chemical industry[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2023(4): 46-54.
- [32] 邓中活, 任亮, 邵志才, 等. 渣油选择性加氢脱硫技术研究[J]. 石油炼制与化工, 2022, 53(11): 24-29.
DENG Zhonghuo, REN Liang, SHAO Zhicai, et al. Research on selective hydrosulfurization technology of residue[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2022, 53(11): 24-29.
- [33] 车彦民, 曹莉霞, 刘金哲. 氢的大规模制备及在钢铁行业的应用和展望[J]. 中国冶金, 2022, 32(9): 1-7.
CHE Yanmin, CAO Lixia, LIU Jinzhe. Large scale hydrogen production and its application and prospect in iron and steel industry[J]. China Metallurgy, 2022, 32(9): 1-7.
- [34] XIAN Yiming, XIA Mingchao, CHEN Qifang, et al. Research on the market diffusion of fuel cell vehicles in China based on the generalized bass model[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1): 2314-2323.
- [35] 潘光胜, 顾钟凡, 罗恩博, 等. 新型电力系统背景下的电制氢技术分析与发展[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(10): 1-13.
PAN Guangsheng, GU Zhongfan, LUO Enbo, et al. Analysis and prospect of electrolytic hydrogen technology under background of new power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 1-13.
- [36] 潘光胜, 顾伟, 张会岩, 等. 面向高比例可再生能源消纳的电氢能源系统[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 1-10.
PAN Guangsheng, GU Wei, ZHANG Huiyan, et al. Electricity and hydrogen energy system towards accommodation of high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 1-10.
- [37] ALHUYI NAZARI M, FAHIM ALAVI M, SALEM M, et al. Utilization of hydrogen in gas turbines: a comprehensive review

- [J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2022, 17:513-519.
- [38] 吕光普,刘潇,张志浩,等. 氢燃气轮机燃烧技术研究进展[J]. 燃气轮机技术, 2022, 35(1):1-15.
LÜ Guangpu, LIU Xiao, ZHANG Zhihao, et al. Research progress of combustion technology in hydrogen gas turbine[J]. Gas Turbine Technology, 2022, 35(1):1-15.
- [39] 丁缪,唐涛,王耀萱,等. 氢储运技术研究进展与发展趋势[J]. 天然气化工—C1化学与化工, 2022, 47(2):35-40.
DING Miu, TANG Tao, WANG Yaoxuan, et al. Research progress and development trend of hydrogen storage and transportation technology[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2022, 47(2):35-40.
- [40] 李建林,李光辉,马速良,等. 氢能储运技术现状及其在电力系统中的典型应用[J]. 现代电力, 2021, 38(5):535-545.
LI Jianlin, LI Guanghui, MA Suliang, et al. An overview on hydrogen energy storage and transportation technology and its typical application in power system[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(5):535-545.
- [41] 殷卓成,杨高,刘怀,等. 氢能储运关键技术研究现状及前景分析[J]. 现代化工, 2021, 41(11):53-57.
YIN Zhuocheng, YANG Gao, LIU Huai, et al. Research status and prospect analysis of key technologies for hydrogen energy storage and transportation[J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(11):53-57.
- [42] 申洪,周勤勇,刘耀,等. 碳中和背景下全球能源互联网构建的关键技术及展望[J]. 发电技术, 2021, 42(1):8-19.
SHEN Hong, ZHOU Qinyong, LIU Yao, et al. Key technologies and prospects for the construction of global energy internet under the background of carbon neutral[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1):8-19.
- [43] 辛保安,郭铭群,王绍武,等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22):1-8.
XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22):1-8.
- [44] 周行,李少华,王慧,等. 光伏耦合电解水制氢系统的建模与仿真[J]. 南方能源建设, 2023, 10(3):104-111.
ZHOU Xing, LI Shaohua, WANG Hui, et al. Modelling and simulation of photovoltaic coupling water electrolysis hydrogen production system[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(3):104-111.
- [45] 郜捷,宋洁,王剑晓,等. 支撑中国能源安全的电氢耦合系统形态与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(19):1-15.
GAO Jie, SONG Jie, WANG Jianxiao, et al. Form and key technologies of integrated electricity-hydrogen system supporting energy security in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19):1-15.
- [46] 邓卫,裴玮,孔力,等. 基于多端直流的可再生能源制氢系统运行控制[J]. 太阳能学报, 2022, 43(3):27-35.
DENG Wei, PEI Wei, KONG Li, et al. Operation control of renewable energy/hydrogen production system based on multi-terminal DC[J]. Acta Energetica Sinica, 2022, 43(3):27-35.

作者简介:

姜一鸣(1994—),男,博士研究生,主要研究方向为电力负荷预测、电网规划优化、交通能源融合(E-mail: xianyingming@bjtu.edu.cn);

安之(1989—),男,高级工程师,博士,通信作者,主要研究方向电力系统规划(E-mail: thuaz07@gmail.com)

夏明超(1976—),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向电力系统运行规划、能源互联网、交通能源融合(E-mail: mchxia@bjtu.edu.cn)

(编辑 王欣竹)

Assumption and analysis of electricity-hydrogen coupling system for high proportion of new energy

XIAN Yiming¹, AN Zhi², LIU Siwei², QI Qingru², XIA Mingchao¹, CHEN Qifang¹

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: The high proportion of new energy causes an imbalance in the “supply-demand” structure in power system due to its high randomness and volatility, and the high proportion of power electronic devices makes the technical characteristics of traditional power systems based on synchronous generators and electromechanical dynamic characteristics change profoundly. Therefore, an electricity and hydrogen coupling system using the “green power delivery off grid at sending end-off grid hydrogen production at receiving end-gas turbine grid connected power generation by hydrogen fueled” mode is proposed. This system integrates new energy power into a DC transmission network that is not electrically connected to the traditional AC power grid at the sending end, meets the DC load of electrolytic water hydrogen production at the receiving end, and supports the AC power grid through hydrogen gas power generation mode, which decouples a large amount of new energy consumption and the newly added demand for “West-to-East power transmission” from the AC power grid at the sending/receiving ends. The proposed electricity and hydrogen coupling system not only improves the electric power and energy balance of the power system and promotes the new energy consumption, but also ensures the safe and reliable operation of the power system, provides a reference for the evolution direction of the high proportion of new energy power system in China.

Key words: high proportion of new energy; electricity-hydrogen coupling system; DC grid; electrolytic water hydrogen production; hydrogen storage

附录 A

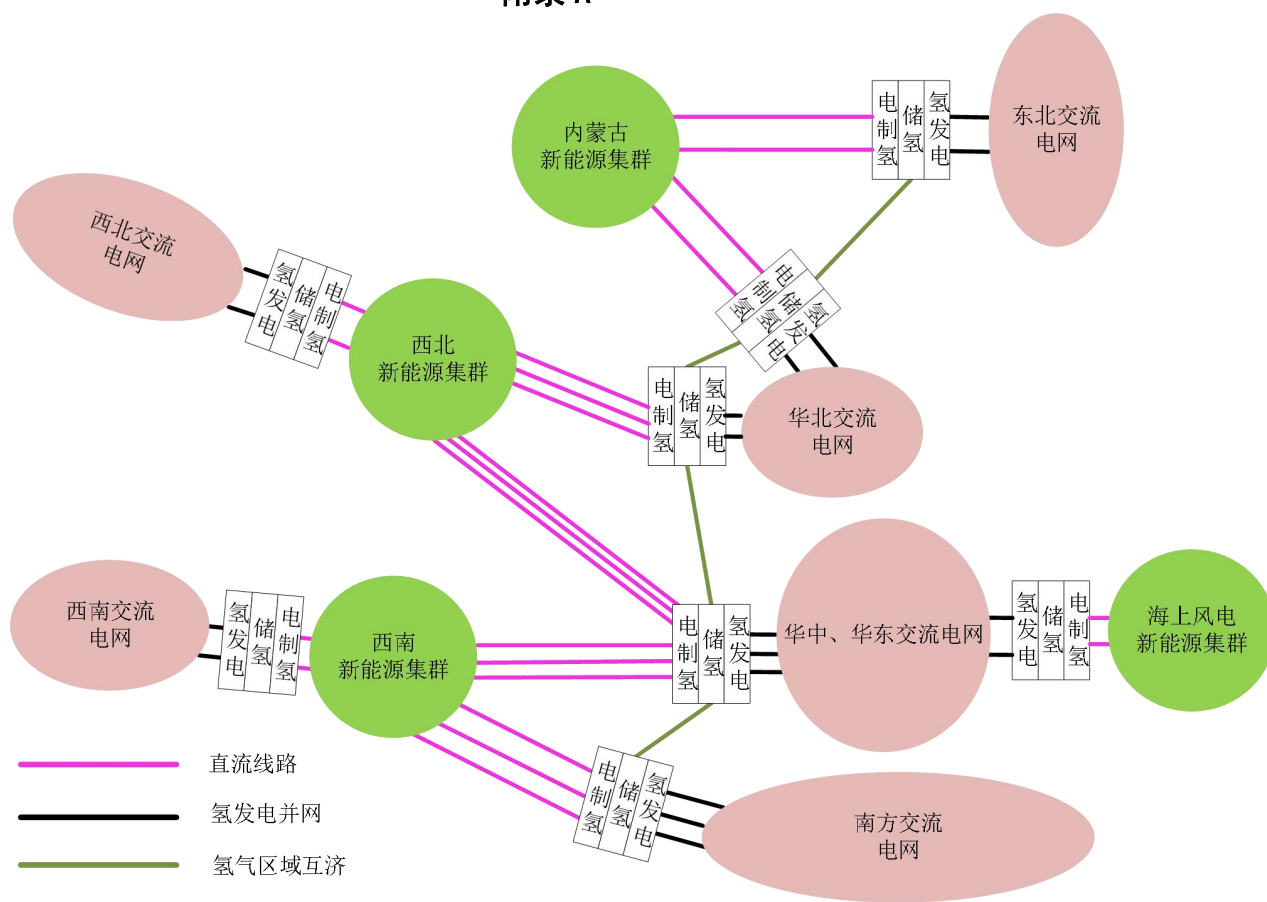


图 A1 电氢耦合系统示意图

Fig.A1 Schematic diagram of electricity and hydrogen coupling system