

风火储氢碳多能耦合打捆送出模式研究

钟依庐[✉], 刘为雄, 郑赞, 王路, 印佳敏, 李震, 郑可昕, 肖楷

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的]为在通道建设空间受限的情况下坚实城市负荷中心能源供给保障并实现海上风电大规模送出与消纳, 提出一种风火打捆、多元耦合的系统建设运行模式, 并结合项目对该模式进行理论分析与仿真验证。[方法]在研究过程中, 设置风火分别送出、风火打捆送出但运行不耦合、风火打捆送出且运行耦合、风火氢碳耦合送出4种仿真试验方案, 并依托 HOMER 软件环境及粒子群算法对试验方案进行系统运行仿真与指标测算。[结果]测试结果表明: 通道总规模在未采用风火打捆送出模式时比采用风火打捆送出模式时高 2.2 GW, 通道平均利用率 59%, 比采用风火打捆送出模式时低 21%~23%; 风电与火电共用送出通道但运行不协同产生弃风量合计 164 GWh; 风火建设打捆且运营协同时可实现零弃风, 并减少单位供电碳排放下降 30~33 g/MWh。[结论]风火打捆、多元耦合的绿电送出及系统运行方式可行且有效, 对海上风电项目的规划建设具有指导意义。

关键词: 清洁能源; 绿电; 风电; 多能耦合; 氢能; 碳捕集、封存及再利用技术 (CCUS)

中图分类号: TK89; TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)04-0122-09

开放科学(资源服务)二维码:



Electricity Transmission Strategy Research Based on Wind-Coal-Battery-Hydrogen-CCUS Multi Energy Coupling and Bundling System

ZHONG Yilu[✉], LIU Weixiong, ZHENG Yun, WANG Lu, YIN Jiamin, LI Zhen, ZHENG Kexin, XIAO Kai

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Introduction] In order to guarantee urban power supply and offshore wind power utilization without building new power lines, the paper aims to establish a electricity transmission strategy based on wind-coal-battery-hydrogen-CCUS multi energy coupling and bundling system, which is analyzed theoretically and verified by simulation. [Method] To verify the effectiveness of the strategy, four experimental schemes (separate transmission of wind and coal power, bundled transmission of wind and coal power without operation coupling, bundled transmission of wind and coal power with operation coupling, and wind-coal-battery-hydrogen-CCUS coupled transmission) were set up, and based on the HOMER software environment and particle swarm optimization algorithm, the system operation simulation and index calculation of the test scheme are carried out. [Result] According to the simulation results, compared with normal separate transmission strategy, power transmission line capacity of system applying wind-coal bundled transmission strategy can be decreased by 2.2 GW, with an average utilization rate of 59%, i.e. 21%~23% higher. In the case that the wind power and coal power share the same transmission line without coordinated operation, the wind power curtailment is 164 GWh in total. System applying wind-coal-battery-hydrogen-CCUS bundled transmission strategy could avoid wind power curtailment and reduce carbon emission from unit power supply by about 30~33g/MWh. [Conclusion] In conclusion, the electricity transmission strategy established by this paper is supposed to be feasible and effective and contributing to planning and construction of offshore wind power project.

Key words: clean energy; green electricity; wind power; multi-energy-combined; hydrogen; carbon capture utilization and storage (CCUS)

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2023-05-07 修回日期: 2023-05-31

基金项目: 广东省重点领域研发计划重大专项项目“面向大规模异构系统的综合管理平台及其应用示范”(2020B010166004)

0 引言

“2030 碳达峰、2060 碳中和”目标加速推动国内能源结构优化调整与经济社会系统性变革, 打造自主可控、安全可靠、低碳可持续的能源供给体系, 是保障产业安全和国家安全的战略选择^[1-3]。在双碳目标的指导下, 清洁化、低碳化是新时期能源结构调整的主要方向, 未来光伏发电、风力发电等非化石能源发展迅猛, 新能源占比逐渐提高, 而风、光等新能源出力存在的间歇性、波动性、不可控性等特点给新能源大规模消纳及系统安全稳定运行带来了挑战^[4-6]。源网荷储一体化和多能互补发展是电力行业坚持系统观念的内在要求, 是实现电力系统高质量发展的客观需要, 是提升可再生能源开发消纳水平、非化石能源消费比重及能源供给保障的必然选择^[7-9]。结合大规模海上风电建设打造多能互补基地, 耦合非可控新能源与支撑性电源, 协同能源供给设施与可控的能源存储及转化设施, 在优化地区电源布局、提高地区电力供应能力、提升电网运行安全性的同时, 还能大力促进可再生能源电力的开发和消纳, 助力能源转型和绿色发展, 推动新能源及相关下游产业集聚发展^[10-12]。

殷仁豪^[10]梳理能源基地相关政策、发展定位及实施路径, 总结能源基地发展趋势, 并对能源基地相关产业规划提出思考。李湃等^[11]提出了一种基于时序生产模拟的大规模新能源基地经特高压直流送出系统中长期运行优化方法, 并以包含风电、光伏、光热、火电、储能的大型能源基地为例对优化方法进行仿真验证。杨庆舟等^[12]运用 DDF-DEA 三阶段评价模型对多能并存的 20 个大型能源基地进行经济、环境指标分析, 划分出 4 种能源基地类型并提出开发建议。李凯等^[13]以赤峰大规模新能源外送示范基地为例, 综合考虑风电、光伏、存量火电及抽水蓄能电站运行特性, 在不增加电网调峰压力的前提下研究风光火储等电源配比方案。沈广进等^[14]分析新能源基地送出系统调相机功角特性、失稳机理与关键影响因素, 为提高大型能源基地调相机同步稳定裕度的协调控制策略提供理论基础并以仿真算例加以验证。胡贵良^[15]依托金沙江上游川藏段水电梯级, 对可再生能源基地的能源利用模式进行探索, 提出

水风光互补协同开发思路。孟沛或等^[16]提出一种适用于多个大规模可再生能源基地远距离输电的混合四端直流输电系统, 并在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真模型验证系统运行特性。张适宜等^[17]以提升新能源基地的消纳水平和并网友好性, 构建一种基于模块化多电平换流器的多端柔性直流汇集系统, 并提出可同时实现风、光、储等多资源优化调度的协调控制策略。朱春萍等^[18]针对内蒙古大型风光清洁能源基地研究特高压输电通道实现风、光、火打捆外送方案, 探索清洁能源集约化、跨区域、大规模输送路径。习工伟等^[19]依托千万级新能源基地, 使用 PSASP 单机机电暂态仿真模型分析基地特高压交流送出特性。综合上述文献研究成果可知, “火电+可再生能源+储能”耦合建设、打捆外送模式从安全稳定运行角度具有一定可行性, 且在规模配比适宜时可优化外送电特性、减少弃风弃光现象。但目前存在以下几点尚待研究: (1) 现有研究多数聚焦陆上风电与其他设施打捆送出场景, 而对于近年规模增长更快、开发潜力更大但波动性更强、调节难度更大的海上风电打捆送出场景研究较少; (2) 现有研究多数仅通过储能设施实现电力错峰送出, 在季节性调峰需求大的情况下难以进一步提升送出特性优化效果; (3) 现有研究未考虑除提升可再生能源消纳水平以外的减碳手段, 减碳水平尚有提升空间。

文章以在通道建设空间受限的情况下保障能源供给、大规模送出或本地消纳间歇性绿电并进一步挖掘减碳潜力为目标, 研究分析基于海上风电登陆、送出场景的“风火储氢碳”复合型能源基地耦合建设与打捆送出方案, 在“风+火+储”耦合建设的基础上, 引入电解水制氢与 CCUS (Carbon Capture, Utilization and Storage, 碳捕集、封存及再利用) 增加余电本地消纳能力、缓解通道压力、减少火电运行碳排放并实现系统与下游产业发展衔接, 最终提出 1 种风火打捆、多元耦合的绿电送出及系统运行模式, 并依托 HOMER 软件环境及粒子群算法对试验方案进行系统仿真与指标测算分析。

1 系统组成与特点

1.1 海上风电

海上风电相较于陆上风电, 具有风资源密度高、

输出相对稳定、单机发电量大等优势,是当前新能源发电领域的研究热点与重要发展方向之一^[20]。我国海上风电资源丰富,在“双碳”背景下海上风电将成为新能源大规模开发的核心模式之一,也是绿电制氢、海洋牧场等产业链的重要组成部分^[20-21]。

1.2 火电

我国能源资源禀赋具有“多煤”特点,在“双碳”目标的指导下,火电定位开始由高速发展转向高质量发展^[20]。火电技术成熟且经济,在新型电力系统体系中,火电功能逐渐向保障供能、系统灵活性调节和战略性备用等方向偏重,同时,依托火电推动多能融合应用、扩展综合服务业务等也是新型电力系统低碳化转型的重要举措之一^[22]。

1.3 电储能

电储能是新型电力系统的重要组成部分,能通过充放电改变电源或负荷的变化特性,对新能源出力不可控、不稳定、与负荷不匹配等问题具有一定缓解效果,是大电网调峰的重要手段之一,也是新能源电厂规划建设中的一大关键点^[23]。

1.4 电制氢

电制氢是电解水制氢的简称,是近年来备受关注的无碳化产氢技术。将电制氢技术与新能源发电系统结合建设,不仅可以平滑新能源的不可控出力、消纳富余绿电,还可生产工业、交通等产业领域所需氢气,带动氢能产业发展^[5]。

1.5 CCUS

CCUS 技术被认为是未来减少二氧化碳及其他温室气体排放、解决全球气候变暖等问题的重要手段,包含碳捕集、碳利用、碳封存 3 大阶段,指将二氧化碳从烟气中分离,经过压缩及运输后转化为产品或输送至指定地点封存的技术流程^[24]。

2 电力送出与系统运行模式

2.1 常规送出模式

当前国内支撑性火电厂通常以独立厂区形式建设,并通过建设独立通道接入系统将电力送出。海上风电以独立大型项目形式建设,且由于海风大发时对通道输送能力要求高,在选择登陆点后通常需要新建风电送出通道。该模式下火电与海上风电的系统运行模式相互独立,示意图如图 1 所示。

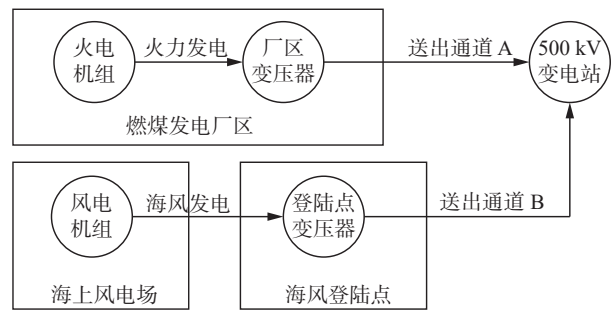


图 1 常规送出方式示意图

Fig. 1 Diagram of normal transmission system

2.2 多能耦合打捆送出模式

多能耦合打捆送出模式下火电与海上风电使用同一送出通道,通过合理安排火电检修时间、充分发挥火电机组调峰能力,利用电储能对可再生能源发电的调节作用,并结合电解水制氢、碳捕集等设施对富余电量的消纳作用,在避免新建通道的情况下实现登陆海风全额送出。该模式下火电、海上风电、电储能、制氢、碳捕集等设施在运行过程中耦合型较强,示意图如图 2 所示。

3 运行特性评价指标

3.1 送出通道规模

系统中电力送出通道的总容量。送出通道规模越大,所需的建设空间及资金成本越高。

$$C = \sum_{i=1}^N C_i \quad (1)$$

式中:

C ——送出通道规模(MW);

N ——系统中出通道总数(条);

C_i ——第 i 条送出通道容量(MW)。

3.2 通道利用率

系统中全部送出通道利用率的加权平均值,权重按照各通道规模计算。通道利用率越高,该方案在送出通道部分投入的空间、资金、人力等社会资源有效利用水平越高。

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{C_i}{C} \times U_i \quad (2)$$

式中:

U ——通道利用率(%);

U_i ——第 i 条送出通道年利用率(%)。

$$U_i = \frac{\sum_{t=1}^{8760} q_t}{C_i \times 8760} \quad (3)$$

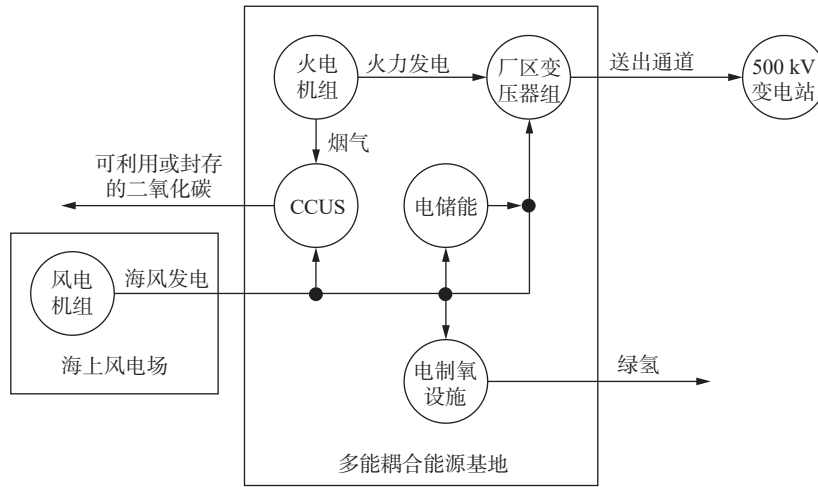


图 2 多能耦合打捆送出模式示意图

Fig. 2 Diagram of multi energy coupling and bundling system

式中:

q_i ——第 t 小时中经通道 i 送出的电量 (MWh)。

3.3 火电年发电小时数

系统中全部火电机组年发电小时数的加权平均值, 权重按照各通道规模计算。火电年发电小时数越高, 火电机组利用率越高, 单位供电煤耗越低。

$$H = \sum_{j=1}^M \frac{G_j}{G} \times H_j \quad (4)$$

式中:

H ——火电年发电小时数 (h);

M ——系统中火电机组台数 (台);

$H_j G$ ——系统中火电机组总额定容量 (MW);

G_j ——第 j 台火电机组年额定容量 (MW);

H_j ——第 j 台火电机组年发电小时数 (h)。

$$H_i = \frac{\sum_{t=1}^{8760} e_t}{G_i} \quad (5)$$

式中:

e_t ——第 t 小时中第 j 台火电机组发电量 (MWh)。

3.4 年弃风量

海上风电年发电量中因无法送出或本地消纳而弃用的电量总额。年弃风量越高, 绿电有效利用水平越低。

$$W_{ab} = W_{gen} - W_{tran} - W_{con} \quad (6)$$

式中:

W_{ab} ——年弃风量 (MWh);

W_{gen} ——年海上风电发电总量 (MWh);

W_{tran} ——年送出的海上风电发电量总量 (MWh);

W_{con} ——年本地消纳的海风发电量总量 (MWh)。

3.5 单位供电碳排放

系统每送出或向本地负荷供应 1 MWh 电所产生的碳排放量。单位供电碳排放越低, 系统低碳化水平越高。

$$P_{pu} = \frac{P_{coal} - P_{cap}}{E_{tran} + E_{con}} \quad (7)$$

式中:

P_{pu} ——单位供电碳排放 (g/MWh);

P_{coal} ——年火电机组发电碳排放总量 (g);

P_{cap} ——年碳捕集总量 (g);

E_{tran} ——年送出电量总量 (MWh);

E_{con} ——年本地消纳电量总量 (MWh)。

4 案例研究

4.1 项目概要与仿真边界

以我国南方沿海某能源基地为例, 该基地主要包含 4 GW 火电、2 GW 海上风电、200 MW/400 MWh 电储能、1 kNm³/h 电解水制氢设施与 100 t/a 碳捕集设施, 已有火电送出通道输电上限 4.508 GW, 基地厂用电负荷 160 MW。

火电部分由 4 台 1 GW 燃煤机组构成, 其中 1 号、2 号机组最小技术出力 35%, 3 号、4 号机组最小技术出力 30%。4 台机组额定出力时单位供电煤耗为 265 g/kWh, 热效率为 46.35%, 不同负载率下煤耗及热效率曲线如图 3 所示。

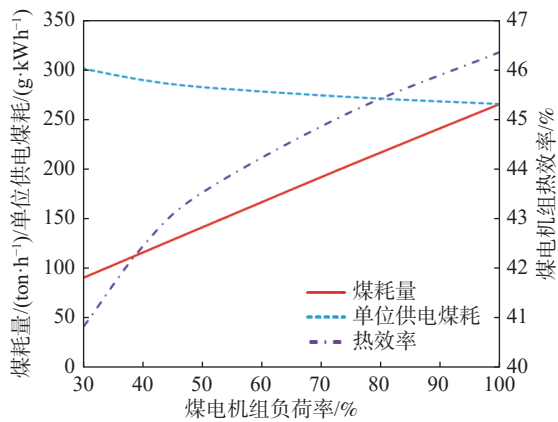


图 3 火电煤耗及热效率曲线

Fig. 3 Coal consumption and thermal efficiency of thermal power unit

海上风电仿真风速数据取自 NASA MEEEA 数据库 2021 年逐时 125 m 风速数据, 风力发电仿真过程考虑空气密度 1.169 kg/m^3 , 考虑尾流影响、控制与偏航、叶片污染、风机利用率、功率曲线保证率、气候影响停机、损耗及其他人为影响因素进行折减修正后按照综合折减系数 15.43% 计算。海上风电功率曲线与推力系数曲线如图 4 所示。

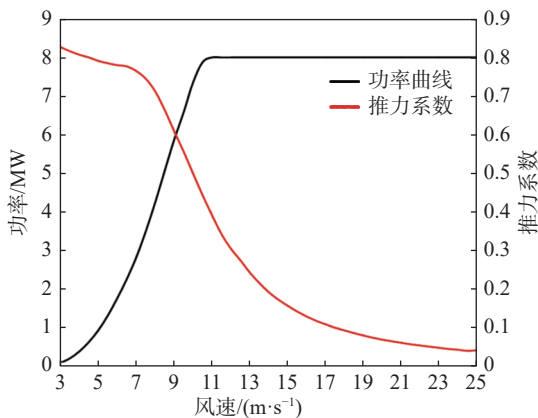


图 4 海上风电功率曲线与推力系数曲线

Fig. 4 Power and thrust coefficient of off-shore wind power unit

电储能类型为磷酸铁锂电池, 系统效率按照 90% 考虑。制氢设施额定工况下产生 5 MW 电负荷, CCUS 额定工况下产生 82.45 MW 电负荷, 二者在仿真过程中被视为可调节负荷。

4.2 试验方案设计

试验方案 1: 利用现有通道送出火电, 新增 2.2 GW 通道送出海上风电, 不考虑电储能、制氢设施、碳捕集设施作用。按照风火分别送出的常规方式进行仿

真运算, 作为对照组。

试验方案 2: 利用现有通道同时送出火电与海上风电, 但火电运行策略及检修安排不耦合海上风电出力特性。不考虑电储能、制氢设施、碳捕集设施作用。在不新建通道的情况下, 作为不采用风火打捆运行策略的对照组。

试验方案 3: 结合海上风电出力特性考虑火电调峰能力及停机检修安排, 利用现有通道打捆送出火电与海上风电, 不考虑电储能、制氢设施、碳捕集设施作用。检验风火打捆模式的可行性与运行特性。

试验方案 4: 发挥电储能、制氢设施、碳捕集设施的调节作用后, 利用现有通道打捆送出火电与海上风电。在风火打捆模式的基础之上, 检验引入可调节负荷是否能进一步优化系统运行特性。

4.3 仿真结果与指标分析

依托 HOMER 软件环境与粒子群寻优算法理论, 根据研究需求进行二次开发后, 对各试验方案进行系统搭建与典型年运行仿真计算, 指标测算结果数值如表 1~表 5 所示。

表 1 各试验方案送出通道规模

Tab. 1 Capacity of transmission line

试验方案编号	送出通道容量/GW
试验方案1	6.708
试验方案2	4.508
试验方案3	4.508
试验方案4	4.508

表 2 各试验方案通道利用率

Tab. 2 Utilization rate of transmission line

试验方案编号	通道利用率/%
试验方案1	59
试验方案2	82
试验方案3	82
试验方案4	80

表 3 各试验方案火电年发电小时数

Tab. 3 Annual utilization hours of thermal power units

试验方案编号	火电年发电小时数/h
试验方案1	7 302
试验方案2	7 302
试验方案3	7 255
试验方案4	7 256

表 4 各试验方案年弃风量

Tab. 4 Annual wind power curtailment

试验方案编号	年弃风量/GWh
试验方案1	0
试验方案2	163.781
试验方案3	0
试验方案4	0

表 5 各试验方案单位供电碳排放

Tab. 5 Carbon emission from unit power supply

试验方案编号	单位供电碳排放/[g·(MWh) ⁻¹]
试验方案1	457
试验方案2	460
试验方案3	457
试验方案4	427

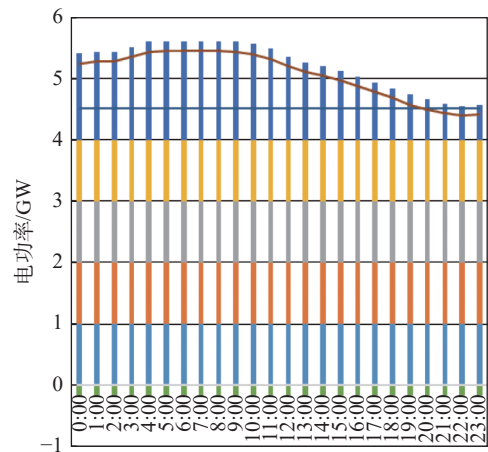
由指标测算结果可知:

1) 试验方案 1 相较于其他试验方案, 未采用风火打捆送出模式, 所需送出通道总建设容量达到 6.708 GW、比采用风火打捆送出模式时高 2.2 GW, 通道平均利用率 59%、比采用风火打捆送出模式时低 21%~23%。由于通道规模越大则所需投资及建设空间越大, 利用率越低则投资经济性越低, 可推断风火打捆送出模式相较于常规送出模式可节省通道投资与建设空间, 且具有更高经济性。

2) 试验方案 2 风电与火电共用送出通道, 但未根据风电出力情况调节火电出力, 且未配置余电消纳设施, 因此在运行仿真中产生年弃风量 164 GWh。由此可认为, 为充分发挥风火打捆送出模式的优势, 需同步考虑耦合运行与配套设施建设。试验方案 2 最大弃风日系统出力曲线如图 5 所示。

3) 将试验方案 3 与前两组方案对比可知, 利用火电调峰能力并合理安排检修时间, 可在不新建风电通道的同时实现零弃风, 即从系统安全稳定运行角度风火打捆耦合送出可行。试验方案 3 在试验方案 2 最大弃风日的系统出力曲线如图 6 所示。

4) 将试验方案 4 与试验方案 3 对比可知, 通过引入电储能、制氢设施、碳捕集设施等电力移峰或消纳设施, 可在不弃风的前提下提升火电利用小时数、进而提高发电效率与经济性, 但由于试验方案 4 中电力移峰或消纳设施的配置规模相对火电、风电



注: 火电 #1 出力; 火电 #4 出力; 火电 #3 出力; 火电 #4 出力; 风电出力; 厂用电负荷; 通道容量; 送出需求。

图 5 方案 2 运行曲线-最大弃风日

Fig. 5 System operating graph of scheme 2-max. wind power curtailment day

规模较小, 因此利用小时数的提升总数不算显著。同时, 由于保障了海风送出且对火电烟气进行碳捕集, 试验方案 4 相较于其他方案可使单位供电碳排放下降 30~33 g/MWh, 如碳利用、碳封存产业规模提升, 可扩大碳捕集设施容量进一步降低单位供电碳排放。试验方案 4 在试验方案 2 最大弃风日的系统出力曲线如图 7 所示。

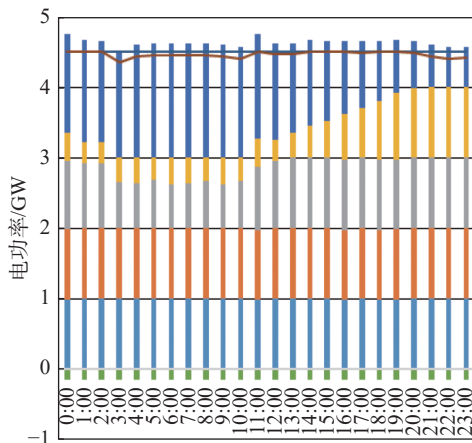
将试验方案 3、方案 4 对比结果结合电储能、电制氢、CCUS 设施的投资及效益对比表(见表 6)分析可知:

表 6 设备投资及效益对比表

Tab. 6 Comparison of equipment investment and benefits

设备类型	单位投资/ (万元·MW ⁻¹)	单位投资调 峰贡献/ (kW·万元 ⁻¹)	单位投资减 碳贡献/ [t·(a·万元) ⁻¹]	下游产业 衔接
新建通道	5.3	—	—	—
电储能	440	2.3(移峰)	—	—
电制氢	3 032	0.3	—	氢能交通等 用氢产业
CCUS	703	1.3	17.2	生物养殖、驱 油等用碳产业

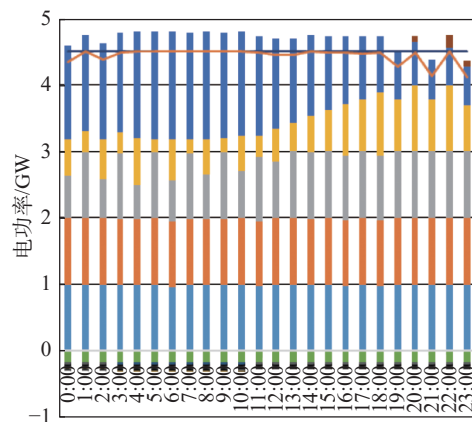
1) 由于单位容量投资高于新建通道的单位容量投资, 通过部署电储能、电制氢及 CCUS 减少送出通道容量需求无法降低项目投资额。



注: 火电 #1 出力; 火电 #4 出力; 火电 #3 出力;
火电 #4 出力; 风电出力; 厂用电负荷;
通道容量; 送出需求。

图 6 方案 3 运行曲线-方案 2 最大弃风日

Fig. 6 System operating graph of scheme 3-max. wind power curtailment of scheme 2



注: 火电 #1 出力; 火电 #4 出力; 火电 #3 出力;
火电 #4 出力; 风电出力; 厂用电负荷;
储能充电; 储能放电; 制氢耗电;
制氢耗电; 通道容量; 送出需求。

图 7 方案 4 运行曲线-方案 2 最大弃风日

Fig. 7 System operating graph of scheme 4-max. wind power curtailment day of scheme 2

2) 电储能相较于电制氢、CCUS 设施在单位投资上具有优势, 但由于电储能仅能转移出力峰期而不能持续消纳富余电力, 在出力曲线季节性峰谷特征明显、峰期时间长、余电总量大的海上风电调峰场景中, 电储能增加绿电送出能力不具备优势, 在储能设施还存在能量损耗的情况下对系统减碳的贡献有限。

3) 从调峰及消纳富余电力的角度, 电制氢设施成本高, 在通过火电调节能力已能实现海上风电全额送出的情况下, 采用电制氢手段调峰不具备经济

性且难以进一步减碳。但由于通过绿电制氢可实现能源与交通领域的衔接, 进而降低交通领域化石燃料使用、减少二氧化碳排放, 从全社会的角度来看具有较好的发展前景。

4) CCUS 可作为系统内可控负荷稳定消纳富余电力, 可有效降低火电运行过程中产生碳排放, 并将捕集的二氧化碳作为产品销售、为系统运营增加收益来源。但由于 CCUS 在系统中仅能作为负荷而不能作为电源, 因而灵活性相较于电储能、电制氢设施偏弱。

5) 综合上述分析, 在系统中部署电储能、电制氢及 CCUS 设施的主要作用不在于节省系统投资, 而在于在建设条件受限时降低新建通道必要性、降低支撑性电源运行碳排放、以及推进全社会降碳及下游低碳产业发展。

5 结论

为在通道建设空间受限的情况下坚实负荷中心城市能源供给保障, 并实现海上风电等间歇性绿电大规模送出与消纳, 耦合海上风电、火电、电储能、制氢设施及碳捕集设施的建设与运行, 通过合理安排火电检修时间、充分发挥火电机组调峰能力, 并结合电解水制氢、CCUS 等设施对富余电量的消纳作用与利用电化学储能站对可再生能源发电的调节作用, 可在避免新建通道的情况下实现登陆海风全额送出, 提升现有通道利用率, 降低新建通道容量需求, 减少系统至社会碳排放, 并推动新能源产业集群形成。虽然在目前阶段, 单位容量投资额较高且下游市场尚未成熟, 电解水制氢及 CCUS 设施暂不具备经济优势, 但对于全社会跨领域降碳以及推动低碳产业链形成闭环具有重要示范意义, 随产业规模效应形成, 电制氢及 CCUS 设施相较于火电、海上风电的容量配比提升后可更有效地实现供需平衡灵活调节以及单位供电碳排放削减; 同时由于多元系统在调度控制方面的复杂性, 基于人工智能、大数据等新一代技术应用的智慧管控平台建设或将成为多能耦合打捆送出模式的重点研究方向之一。

参考文献:

- [1] 王枫, 周斌, 张辉. “双碳”背景下源网荷储协调互动助力新型电力系统建设 [J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(5): 188-191, 201. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9500.2022.05.054.

- WANG F, ZHOU B, ZHANG H. Generation-grid-load-storage coordination and interaction assists construction of new power system under the background of "double carbon" [J]. *China resources comprehensive utilization*, 2022, 40(5): 188-191,201. DOI: 10.3969/j.issn.1008-9500.2022.05.054.
- [2] 毛晓波, 薛溟枫. 基于泛在电力物联网的多能互补综合能源服务平台建设及应用 [J]. *内蒙古电力技术*, 2020, 38(1): 31-34. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6218.2020.01.013.
- MAO X B, XUE M F. Construction and application of multi-energy complementary integrated energy service platform based on ubiquitous power internet of things [J]. *Inner mongolia electric power*, 2020, 38(1): 31-34. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6218.2020.01.013.
- [3] 张少强, 陈露, 刘子易, 等. 大型燃煤锅炉深度调峰关键问题探讨 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(3): 16-28. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.003.
- ZHANG S Q, CHEN L, LIU Z Y, et al. Discussion on key problems of depth peak adjustment for large coal-fired boilers [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(3): 16-28. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.03.003.
- [4] 陈琛, 樊小伟, 张文浩, 等. 促进分布式光伏消纳的两阶段源网荷储互动优化运行策略 [J]. *电网技术*, 2022, 46(10): 3786-3796. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1354.
- CHEN C, FAN X W, ZHANG W H, et al. Two-staged generation-grid-load-energy storage interactive optimization operation strategy for promotion of distributed photovoltaic consumption [J]. *Power system technology*, 2022, 46(10): 3786-3796. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1354.
- [5] 王枫, 周斌, 郑云飞, 等. 基于碳中和的源网荷储协调调度优化模型研究 [J]. *能源与环保*, 2022, 44(10): 149-158. DOI: 10.19389/j.cnki.1003-0506.2022.10.024.
- WANG F, ZHOU B, ZHENG Y F, et al. Research on load storage coordination scheduling optimization model of source network based on carbon neutralization [J]. *China energy and environmental protection*, 2022, 44(10): 149-158. DOI: 10.19389/j.cnki.1003-0506.2022.10.024.
- [6] 陈鸿琳, 刘新苗, 余浩, 等. 基于近似动态规划的海上风电制氢微网实时能量管理策略 [J]. *电力建设*, 2022, 43(12): 94-102. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2022.12.010.
- CHEN H L, LIU X M, YU H, et al. Real-time energy management strategy based on approximate dynamic programming for offshore wind power-to-hydrogen microgrid [J]. *Electric power construction*, 2022, 43(12): 94-102. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2022.12.010.
- [7] 罗金满, 刘丽媛, 刘飘, 等. 考虑源网荷储协调的主动配电网优化调度方法研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(1): 167-173. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210348.
- LUO J M, LIU L Y, LIU P, et al. An optimal scheduling method for active distribution network considering source network load storage coordination [J]. *Power system protection and control*, 2022, 50(1): 167-173. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210348.
- [8] 罗曦, 黄磊, 金颖, 等. 可再生能源接入下源网荷储策略与模型研究 [J]. *能源与节能*, 2022(5): 15-18. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0802.2022.05.004.
- LUO X, HUANG L, JIN Y, et al. Research on strategy and model of source grid load storage under access of renewable energy [J]. *Energy and energy conservation*, 2022(5): 15-18. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0802.2022.05.004.
- [9] 周国鹏, 赵春阳, 康俊杰, 等. 面向源网荷储一体化的能源服务典型发展模式 [J]. *广东电力*, 2022, 35(7): 23-31. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2022.007.003.
- ZHOU G P, ZHAO C Y, KANG J J, et al. Typical energy service development patterns oriented to source-network-load-storage integration [J]. *Guangdong electric power*, 2022, 35(7): 23-31. DOI: 10.3969/j.issn.1007-290X.2022.007.003.
- [10] 殷仁豪. "双碳"背景下新能源基地规划发展趋势 [J]. *上海节能*, 2022(3): 265-271. DOI: 10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2022.03.004.
- YIN R H. Planning development trend of new energy base under "dual carbon" background [J]. *Shanghai energy conservation*, 2022(3): 265-271. DOI: 10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2022.03.004.
- [11] 李湃, 王伟胜, 黄越辉, 等. 大规模新能源基地经特高压直流送出系统中长期运行方式优化方法 [J]. *电网技术*, 2023, 47(1): 31-40. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1335.
- LI P, WANG W S, HUANG Y H, et al. Method on optimization of medium and long term operation modes of large-scale renewable energy power base through UHVDC system [J]. *Power system technology*, 2023, 47(1): 31-40. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1335.
- [12] 杨庆舟, 马平平, 吕素姣. 基于DDF-DEA三阶段模型国家能源开发效率研究——以国家划分的20个大型综合能源基地为例 [J]. *工业技术经济*, 2020, 39(3): 143-153. DOI: 10.3969/j.issn.1004-910X.2020.03.017.
- YANG Q Z, MA P P, LV S J. Research on development efficiency of national energy base based on DDF-DEA three-stage model: take twenty large comprehensive energy bases divided by the state as an example [J]. *Journal of industrial technological economics*, 2020, 39(3): 143-153. DOI: 10.3969/j.issn.1004-910X.2020.03.017.
- [13] 李凯, 康世崑, 闫方, 等. 基于风光火储的多能互补新能源基地规划分析 [J]. *山东电力技术*, 2020, 47(10): 17-21,35. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9904.2020.10.004.
- LI K, KANG S W, YAN F, et al. Planning analysis of new energy base based on wind-photovoltaic-thermal-energy storage multi-energy complementary [J]. *Shandong electric power*, 2020, 47(10): 17-21,35. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9904.2020.10.004.
- [14] 沈广进, 辛焕海, 刘昕宇, 等. 大型新能源基地中调相机同步失稳机理与影响因素分析 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(20): 100-108. DOI: 10.7500/AEPS20220321004.
- SHEN G J, XIN H H, LIU X Y, et al. Analysis on synchronization instability mechanism and influence factors for condenser in large-scale renewable energy base [J]. *Automation of electric power systems*, 2022, 46(20): 100-108. DOI: 10.7500/AEPS20220321004.
- [15] 胡贵良. 金沙江上游川藏段可再生能源基地能源利用模式探索 [J]. *华电技术*, 2019, 41(11): 62-65,84. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2019.11.015.
- HU G L. Exploration on utilization models for renewable energy of Sichuan-Tibet section in the Jinsha river upper reaches [J]. *Integrated intelligent energy*, 2019, 41(11): 62-65,84. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2019.11.015.
- [16] 孟沛彧, 王志冰, 迟永宁, 等. 适应多能源基地远距离输电能的混合四端直流输电系统控制策略研究 [J]. *电工技术学报*, 2020, 35(增刊2): 523-534. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.

191684.
MENG P Y, WANG Z B, CHI Y N, et al. Control strategy of hybrid four-terminal HVDC transmission system dedicated for long-distance power delivery from multiple energy bases [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2020, 35(Suppl. 2): 523-534. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.191684](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.191684).
- [17] 张适宜, 周明, 黄瀚燕, 等. 新能源基地多端柔性直流汇集系统运行灵活性研究 [J]. *电网技术*, 2020, 44(10): 3846-3856. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1405](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1405).
ZHANG S Y, ZHOU M, HUANG H Y, et al. Operational flexibility optimization of renewables generation multi-terminal flexible DC collector system [J]. *Power system technology*, 2020, 44(10): 3846-3856. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1405](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1405).
- [18] 朱春萍, 王艳, 沙志成. 新能源基地多能互补电力外送和消纳方案的研究 [J]. *电气应用*, 2019, 38(10): 60-65.
ZHU C P, WANG Y, SHA Z C. Study on the scheme of multi-energy complementary power transmission in new energy base [J]. *Electrotechnical application*, 2019, 38(10): 60-65.
- [19] 习工伟, 赵兵, 郑帅飞, 等. 新能源基地经特高压交流送出系统输电能力与提升措施 [J]. *电力建设*, 2022, 43(7): 131-138. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2022.07.015](https://doi.org/10.12204/j.issn.1000-7229.2022.07.015).
XI G W, ZHAO B, ZHENG S F, et al. Transmission capacity and improvement measures of the UHVAC sending system from new energy base [J]. *Electric power construction*, 2022, 43(7): 131-138. DOI: [10.12204/j.issn.1000-7229.2022.07.015](https://doi.org/10.12204/j.issn.1000-7229.2022.07.015).
- [20] 罗魁, 郭剑波, 马士聪, 等. 海上风电并网可靠性分析及提升关键技术综述 [J]. *电网技术*, 2022, 46(10): 3691-3702. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1496](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1496).
LUO K, GUO J B, MA S C, et al. Review of key technologies of reliability analysis and improvement for offshore wind power grid integration [J]. *Power system technology*, 2022, 46(10): 3691-3702. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1496](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1496).
- [21] 张洒洒, 杨伦庆, 刘强, 等. 广东省海上风电制氢产业发展研究 [J]. *中国资源综合利用*, 2022, 40(12): 185-188. DOI: [10.3969/j.issn.1008-9500.2022.12.051](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-9500.2022.12.051).
ZHANG S S, YANG L Q, LIU Q, et al. Research on the development of offshore wind power hydrogen production industry in Guangdong province [J]. *China resources comprehensive utilization*, 2022, 40(12): 185-188. DOI: [10.3969/j.issn.1008-9500.2022.12.051](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-9500.2022.12.051).
- [22] 董军, 彭诗程, 包阿茹汗, 等. 新型电力系统火电综合价值分析与评估 [J]. *重庆理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 36(12): 259-268. DOI: [10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2022.12.033](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.12.033).
DONG J, PENG S C, BAO A R H, et al. Analysis and evaluation of comprehensive value of thermal power in the new power system [J]. *Journal of Chongqing University of Technology (natural science edition)*, 2022, 36(12): 259-268. DOI: [10.3969/j.issn.1674-8425\(z\).2022.12.033](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8425(z).2022.12.033).
- [23] 祝青, 沈晨姝, 李木子, 等. 大型集中式风电储能系统的配置及收益模式研究 [J]. *电工技术*, 2022(17): 4-8. DOI: [10.19768/j.cnki.dgjs.2022.17.002](https://doi.org/10.19768/j.cnki.dgjs.2022.17.002).
ZHU Q, SHEN C S, LI M Z, et al. Research on configuration and revenue model of large centralized wind energy storage system [J]. *Electric engineering*, 2022(17): 4-8. DOI: [10.19768/j.cnki.dgjs.2022.17.002](https://doi.org/10.19768/j.cnki.dgjs.2022.17.002).
- [24] 贾子奕, 刘卓, 张力小, 等. 中国碳捕集、利用与封存技术发展及展望 [J]. *中国环境管理*, 2022, 14(6): 81-87. DOI: [10.16868/j.cnki.1674-6252.2022.06.081](https://doi.org/10.16868/j.cnki.1674-6252.2022.06.081).
JIA Z Y, LIU Z, ZHANG L X, et al. Development and prospect of carbon capture, utilization and storage technology in China [J]. *Chinese journal of environmental management*, 2022, 14(6): 81-87. DOI: [10.16868/j.cnki.1674-6252.2022.06.081](https://doi.org/10.16868/j.cnki.1674-6252.2022.06.081).

作者简介:



钟依庐

钟依庐 (第一作者, 通信作者)

1993-, 女, 工程师, 伯明翰大学电力系统专业硕士, 主要从事综合智慧能源相关领域研究工作(e-mail)zhongyilu@gedi.com.cn。

刘为雄

1969-, 男, 正高级工程师, 华南理工大学电力系统及其自动化专业博士, 主要从事电力系统研究及规划设计工作(e-mail)liuweixiong@gedi.com.cn。

郑贇

1982-, 男, 正高级工程师, 工程热物理专业硕士, 主要从事智慧能源规划、设计建设及投资评估工作(e-mail)zhengyun@gedi.com.cn。

王路

1970-, 男, 教授级高级工程师, 电力系统及其自动化专业博士, 主要从事综合能源规划、电力系统规划研究工作(e-mail)wanglu@gedi.com.cn。

印佳敏

1982-, 女, 高级工程师, 注册公用设备工程师(动力)、咨询工程师(投资), 清华大学动力工程及工程热物理博士, 主要从事综合能源、储能技术研究及咨询设计工作(e-mail)yinjiamin@gedi.com.cn。

李震

1993-, 男, 工程师, 电力系统自动化专业硕士, 主要从事智慧能源、储能及虚拟电厂工作(e-mail)lizhen02@gedi.com.cn。

郑可昕

1993-, 女, 工程师, LEED AP 认证师, 达姆施塔特工业大学能源科学与工程专业硕士, 主要从事智慧能源、氢能利用、建筑节能等方向的规划研究工作(e-mail)zhengkexin@gedi.com.cn。

肖楷

1998-, 男, 一级设计员, 化学工程与技术专业硕士, 主要从事综合能源系统、天然气三联供系统等方面规划研究工作(e-mail)xiaokai@gedi.com.cn。

(编辑 孙舒)