

# 考虑 CCUS-HECU 的低碳园区 综合能源系统优化调度

胡 伟, 李秀航, 杜璞良, 李 妍

(上海电力大学 经济与管理学院, 上海 200090)

**摘要:** 随着国家“双碳”政策的推行, 低碳园区综合能源系统的零碳排放需求愈发迫切。为提高低碳园区的可再生能源利用率、多能耦合利用效率及低碳化程度, 提出考虑碳捕集、利用及封存 (carbon capture, utilization and storage, CCUS)-氢能综合利用 (hydrogen energy comprehensive utilization, HECU) 的低碳园区综合能源系统优化调度模型。首先, 在传统的电转气中加入氢储能, 同时对氢燃料电池 (hydrogen fuel cell, HFC) 及甲烷反应器工作产生的余热进行再利用, 实现电-热-气联产, 促进 HECU 模块化和能量的梯级利用。其次, 引入 CCUS 技术并与 HECU 结合, 将捕获的  $\text{CO}_2$  封存和合成甲烷, 建立 CCUS-HECU 综合运行框架。最后, 考虑电/热柔性负荷参与综合能源系统需求响应, 并将低碳改造后设备减少的搁浅及额外成本加入成本计算中, 建立以总成本最小为目标的低碳园区综合能源系统优化调度模型, 并利用 CPLEX 求解器求解。算例结果表明, 该模型可有效降低系统综合运行成本和碳排放量, 提高可再生能源利用率, 实现系统经济低碳化运行。

**关键词:** 能量梯级利用; 低碳园区; CCUS-HECU; 柔性负荷; 经济低碳化运行

中图分类号: TM 73

文献标志码: A

## Optimization scheduling of low-carbon park comprehensive energy system considering CCUS-HECU

HU Wei, LI Xiuhang, DU Puliang, LI Yan

(School of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** With the implementation of the national "dual-carbon" policy, the demand for zero-carbon emission of integrated energy systems in low-carbon parks has become increasingly urgent. In order to improve the utilization rate of renewable energy, the efficiency of multi-energy coupling utilization and

收稿日期: 2025-02-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72401182)

第一作者: 胡 伟 (1979—), 男, 教授。研究方向: 能源电力优化与决策、能源区块链等。E-mail: hwsheip@shiep.edu.cn

引文格式: 胡伟, 李秀航, 杜璞良, 等. 考虑 CCUS-HECU 的低碳园区综合能源系统优化调度[J]. 上海理工大学学报, 2026, 48(2): 194-208.

Citation: HU Wei, LI Xiuhang, DU Puliang, et al. Optimization scheduling of low-carbon park comprehensive energy system considering CCUS-HECU[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2026, 48(2): 194-208.

the degree of decarbonization in low-carbon parks, a comprehensive energy system optimization scheduling model for low-carbon parks is proposed by considering the carbon capture, utilization and storage (CCUS)-hydrogen energy comprehensive utilization (HECU) system optimization and dispatching model. Firstly, hydrogen storage was added to the traditional electricity-to-gas conversion, while the waste heat generated by the operation of hydrogen fuel cells (HFC) and methane reactors was reused to realize electricity-heat-gas co-generation, thus promoting the modularization of HECU and the gradient utilization of energy. Secondly, CCUS technology was introduced and combined with HECU to sequester the captured  $\text{CO}_2$  and synthesize methane to establish a comprehensive CCUS-HECU operation framework. Finally, considering the participation of electric/thermal flexible loads in the demand response of the integrated energy system, and adding the stranded and additional costs reduced by equipment after low-carbon retrofit into the cost calculation, the optimal scheduling model of the integrated energy system of the low-carbon park with the goal of minimizing the total cost was established and solved by using the CPLEX solver. The example results show that the proposed model can effectively reduce the comprehensive operating costs and carbon emissions of the system, improve the utilization rate of renewable energy, and realize the economic and low-carbon operation of the system.

**Keywords:** *energy cascading utilization; low carbon park; CCUS-HECU; flexible load; economic low-carbon operation*

工业园区作为我国能源消费与碳排放的核心载体,其碳排放量约占全国总量的三分之一<sup>[1]</sup>,在实现“双碳”目标的进程中占据关键战略地位。随着综合能源系统(integrated energy system, IES)理论与技术的快速发展,构建低碳园区综合能源系统已成为推动工业领域节能降碳的重要路径<sup>[2]</sup>。该系统通过能源产消协同、多能互补互济的集成优化模式,有效提升了能源利用效率,降低了对化石能源的依赖。然而在实际运行中,该系统仍面临多重技术瓶颈与优化挑战:可再生能源间歇性特征导致消纳能力不足、多能流协同调度机制不完善引发能源利用效率低下,以及低碳发电技术应用滞后造成减碳潜力释放不充分等问题,同时负荷侧资源未得到充分利用。这些系统性矛盾亟需通过多维度协同优化策略予以破解,以实现低碳园区综合能源系统的高效稳定运行与深度脱碳目标。

氢能作为一种灵活高效、环境友好的二次能源,在储能、分布式能源和工业等减碳领域扮演着重要角色<sup>[3]</sup>。通过氢储及能量转换设备的结合,氢能可在低碳园区综合能源系统中展现巨大的灵活调度潜力和可再生能源消纳能力。文献[4-5]考虑在 IES 中应用电转气(power to gas, P2G)设备实

现可再生能源的梯级利用,但未通过氢储设备进行能量转换过程的解耦,制约了可再生能源的消纳潜力,同时未考虑加入氢燃料电池(hydrogen fuel cell, HFC)来提高系统对电、热双重负荷的供给能力。文献[6]在零碳园区中实现了电解槽优化利用,但未利用氢储能来提高多能协同能力。文献[7-8]在 IES 运行中均完整考虑了 P2G 设备、HFC 及氢转甲烷过程,验证了氢能全链条应用的经济与环境效益,但忽视了对甲烷制备过程热能的回收。因此,需在传统的电转气基础上,综合运用多种氢能利用设备并重视热能的回收利用,且以上研究多从提高可再生能源消纳和调度能力为目标,对于氢能参与系统整体运行的低碳化潜力及平抑可再生能源出力波动性的能力也关注较少。

碳捕集、利用及封存(carbon capture、utilization and storage, CCUS)技术的出现,也为低碳发电提供了新思路<sup>[9]</sup>。CCUS 技术不仅可以提高机组的低碳运行效能,更能联合相应碳排放交易机制实现系统深度降碳。文献[10]未建立碳捕集技术与发电单元的深度耦合,系统无法实现内源性  $\text{CO}_2$  的定向捕获与利用。文献[11]考虑了碳捕集与封存、储能和需求响应的热电联产系统双目标低碳经济调度模型,但未考虑将捕获后的碳进

行资源化利用。文献 [12] 将热电联产、P2G、碳捕集与封存作为整体系统，解决了 P2G 所需碳源和热电联产碳排放问题，但未考虑引入碳交易机制来提高低碳能力。文献 [13] 通过碳捕集技术结合阶梯式碳交易机制深度挖掘了低碳潜力，但并未考虑与氢能利用体系结合来实现系统低碳运行。文献 [14] 在 IES 运行中同时考虑了氢能多元利用及阶梯式碳交易机制，但未涉及氢能应用协同 CCUS 技术对处理系统碳排放的有效性。因此，以上关于 CCUS 的研究未能完整考虑 CCUS 过程，同时对于氢能综合利用 (hydrogen energy comprehensive utilization, HECU) 体系与 CCUS 结合后的深度降碳效果及适用低碳园区综合能源系统的碳交易机制也需进一步分析。

柔性负荷作为低碳园区 IES 中重要的可调度资源，极大地增强了负荷侧的灵活性，可进一步挖掘低碳园区综合能源系统的降碳潜力和经济性<sup>[15]</sup>。文献 [16] 设计了一个考虑综合需求响应的园区 IES 低碳经济调度模型，但其仅从价格型和激励型角度对柔性负荷总体建模，未按电、热柔性负荷特性分类细致建模。文献 [17] 对冷热电联供系统中各类可平移负荷进行了建模，降低了运行成本。文献 [18] 仅对柔性热负荷进行了建模。文献 [19-20] 仅考虑了柔性电负荷，以上研究都仅考虑部分类型的柔性负荷，对柔性负荷类型的建模不够完善。文献 [21] 虽对电、热柔性负荷进行了精细建模，但却未考虑其与氢能多元利用体系及 CCUS 协同工作来深度优化系统运行。因此，以上研究对电、热柔性负荷类型考虑不够充分，同时也需要对柔性负荷、氢能多元利用体系、CCUS 协同工作为低碳园区 IES 带来的低碳调节能力进行深入研究。

综上所述，本文综合考虑氢能多元利用体系、CCUS 及电/热柔性负荷协同运行，提出考虑 CCUS-HECU 的低碳园区综合能源系统优化调度模型，系统运行框架图如图 1 所示。首先，引入 HECU 模块参与 IES 优化运行，并考虑余热回收，提高可再生能源消纳能力和多能耦合效率，实现能量的梯级利用。其次，考虑 CCUS 对 IES 产生 CO<sub>2</sub> 的 CCUS 全过程，结合适用于低碳园区 IES 的奖惩阶梯碳排放交易机制，进一步提高低碳园区碳减排能力。最后，结合可平移、可削减、可转移柔性负荷参与需求响应，来研究低碳园区综合能源系统优化调度运行，并通过不同场景对比验证了所提模型的低碳经济有效性。

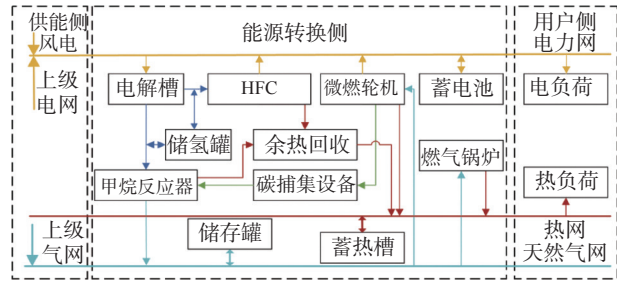


图 1 低碳园区综合能源系统运行框架图

Fig.1 Operational framework diagram of comprehensive energy system in low-carbon park

## 1 低碳园区综合能源系统运行框架

本文的供电单元包括上级电网及风电，供气单元为上级气网；能量耦合设备由电解槽 (electrolyser, EL)、HFC、甲烷反应器 (methane reactor, MR)、微型燃气轮机 (micro gas turbine, MT)、以及燃气锅炉 (gas boiler, GB) 构成；储能设备为储氢罐 (hydrogen-storage tank, HST)、蓄电池 (battery-storage tank, BST)、蓄热槽 (thermal-storage tank, TST) 以及储气罐 (gas-storage tank, GST)；负荷分为固定负荷和柔性负荷。

### 1.1 HECU 模块

HECU 过程包括：EL 电解制氢、HFC 热电联产、氢能经 MR 催化产生甲烷这 3 个重要的能量耦合环节<sup>[22]</sup>。为体现氢能转换过程的能量耦合及不同装置工况特点，现对各环节进行建模。

#### 1.1.1 EL 电解制氢工作过程

EL 电解制氢是低碳园区 IES 中唯一的产氢单元，电解制氢一般可分为 3 种类型：碱性电解水制氢、质子交换膜电解水制氢 (proton exchange membrane, PEM)、固体氧化物制氢<sup>[23]</sup>。由于 PEM 反应可以实现零污染，其结构较为紧凑的同时还具有高转化效率，因此，本文采用 PEM 进行电解制氢：

$$\begin{cases} P_{EL,H_2}^t = \eta_{EL} P_{EL,e}^t \\ 0 \leq P_{EL,e}^t \leq P_{EL,e}^{\max} \\ \Delta P_{EL,e}^{\min} \leq P_{EL,e}^{t+1} - P_{EL,e}^t \leq \Delta P_{EL,e}^{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\eta_{EL}$  为 EL 的能量转化效率； $P_{EL,e}^t$  和  $P_{EL,H_2}^t$  分别为  $t$  时段 EL 的输入电功率和输出氢功率； $P_{EL,e}^{\max}$  为 EL 输出电功率的功率上限； $\Delta P_{EL,e}^{\min}$  和  $\Delta P_{EL,e}^{\max}$  分别为 EL 电解时的爬坡功率上、下限。

#### 1.1.2 甲烷反应器工作过程

MR 利用 EL 电解产出的氢气通过催化反应生

成甲烷, 经过压缩和杂质处理等操作后注入气网中。MR 反应过程模型为

$$\begin{cases} P_{MR,g}^t = \eta_{MR} P_{MR,H_2}^t \\ 0 \leq P_{MR,H_2}^t \leq P_{MR,H_2}^{\max} \\ \Delta P_{MR,H_2}^{\min} \leq P_{MR,H_2}^{t+1} - P_{MR,H_2}^t \leq \Delta P_{MR,H_2}^{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $P_{MR,H_2}^t$  和  $P_{MR,g}^t$  分别为  $t$  时段 MR 的输入氢功率和输出气功率;  $\eta_{MR}$  为氢转甲烷的能量转化效率;  $P_{MR,H_2}^{\max}$  为 MR 的输入氢功率上限;  $\Delta P_{MR,H_2}^{\min}$  和  $\Delta P_{MR,H_2}^{\max}$  分别为 MR 工作时爬坡功率值上限和下限。

$t$  时段甲烷化过程消耗的  $CO_2$  体积为

$$N_{MR,CO_2}^t = \frac{\rho_{CH_4}}{\lambda \omega H_{CH_4}^{HHV}} P_{MR,g}^t \quad (3)$$

式中:  $N_{MR,CO_2}^t$  为  $t$  时段甲烷化过程消耗  $CO_2$  的质量;  $\rho_{CH_4}$  为甲烷的密度;  $\lambda$  为  $CO_2$  转化为甲烷的效率;  $\omega$  为  $CO_2$  与甲烷的折算系数;  $H_{CH_4}^{HHV}$  为天然气的高位发热值, 取  $11 \text{ (kW} \cdot \text{h)/m}^3$ 。

由于氢气甲烷化过程也会产生热能, 为实现能量的多级利用, 本文考虑对其热量进行回收来提高用能效率。MR 工作过程中单位电能放热量计算公式参考文献 [24]。通过计算可知, 传统 P2G 过程每消耗  $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$  电能可以回收  $0.12 \text{ kW} \cdot \text{h}$  的热量。最终  $t$  时段氢气甲烷化过程回收热量为

$$H_{MR,r}^t = \frac{H_{MR}}{V_{EL} H_{CH_4}^{HHV}} P_{MR,H_2}^t \quad (4)$$

式中:  $H_{MR}$  为传统 P2G 中消耗单位电能放热量;  $V_{EL}$  为单位电能制得的氢气体积;  $H_{MR,r}^t$  为  $t$  时段氢气甲烷化过程回收总热量。

### 1.1.3 HFC 工作过程

本文在传统的 P2G 基础上, 考虑引入 HFC 和储氢罐来实现氢能和电能的双向转换。相较传统的园区, IES 有更强的调度灵活性, 能够更加高效地实现系统的多能耦合。根据文献 [25] 可知, HFC 的电热转换效率之和可视为一个常数, 对其建模为

$$\begin{cases} P_{HFC}^t = \eta_{HFC,e} P_{HFC,H_2}^t \\ H_{HFC}^t = \eta_{HFC,h} P_{HFC,H_2}^t \\ 0 \leq P_{HFC,H_2}^t \leq P_{HFC,H_2}^{\max} \\ \Delta P_{HFC,H_2}^{\min} \leq P_{HFC,H_2}^{t+1} - P_{HFC,H_2}^t \leq \Delta P_{HFC,H_2}^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $P_{HFC,H_2}^t$ 、 $P_{HFC}^t$ 、 $H_{HFC}^t$  分别为  $t$  时段输入 HFC 的氢功率、HFC 输出的电功率和热功率;  $\eta_{HFC,e}$  和  $\eta_{HFC,h}$  分别为 HFC 氢能转换为电能和热能的效率;

$P_{HFC,H_2}^{\max}$  为向 HFC 中输入的氢功率上限;  $\Delta P_{HFC,H_2}^{\min}$  和  $\Delta P_{HFC,H_2}^{\max}$  分别为 HFC 的爬坡功率上限和下限。

## 1.2 含 CCUS-HECU 的热电联供子系统

本文提出的含 CCUS-HECU 的热电联供子系统结构如图 2 所示。MT 与 GB 通过消耗天然气来实现热电联产, 满足用能需求。通过引入 CCUS 模块, 对 MT 进行碳捕集改造, 可将 MT 运行过程中产生的  $CO_2$  进行收集。一部分注入 MR 中作为天然气生产原料, 实现碳的再利用; 剩余部分进行封装后埋入地下, 完成碳封存过程。

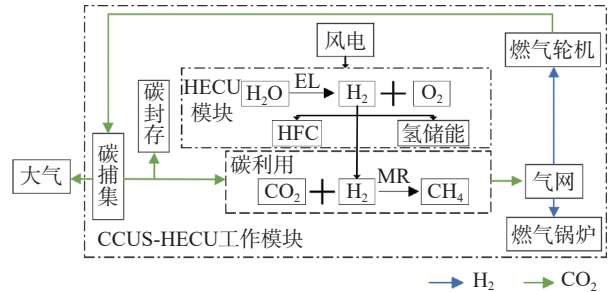


图 2 CCUS-HECU 热电联供子系统结构框架图

Fig.2 Structural framework of CCUS-HECU cogeneration subsystem

### 1.2.1 MT 及 GB 机组供能

常见的热电联供机组配置包括微型燃气轮机和燃气锅炉, 具体建模参考文献 [26]。

### 1.2.2 CCUS 及碳排放

本文将传统的 MT 机组集成碳捕集技术进行热电联供, 利用化学溶剂、压缩分离等燃烧后捕获技术将 MT 机组中产生的  $CO_2$  收集, 随后注入 MR 中进行甲烷的生产 [27]。由于增加了碳捕集技术, 整个 MT 机组的工况及基本运行环境发生了改变, 因而会由于增加机器结构组件而额外增加能耗, 这部分视为固定值, 而本身碳捕集也需要一定能耗来支持其运行, 这与捕获的  $CO_2$  值有关。

$$\begin{cases} P_{CC}^t = P_{CC,S}^t + P_{CC,CO_2}^t \\ P_{CC,CO_2}^t = \lambda_e N_{CC,CO_2}^t \\ N_{CC,CO_2}^t = \alpha_{MT} \eta_t P_{MT}^t \\ N_{CC,total} = \sum_{t=1}^{24} N_{CC,CO_2}^t \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $P_{CC}^t$ 、 $P_{CC,S}^t$  以及  $P_{CC,CO_2}^t$  分别为 MT 机组的额外总能耗、额外固定能耗以及碳捕集能耗;  $P_{MT}^t$  为 MT 机组输出的电功率;  $\lambda_e$  是碳捕集单位  $CO_2$  消耗电能;  $N_{CC,CO_2}^t$ 、 $N_{CC,total}$  是  $t$  时段及 1 d 总的  $CO_2$  捕集量;  $\alpha_{MT}$  是碳排放强度;  $\eta_t$  是  $t$  时段碳捕集的效率。

则碳捕集过程的成本为

$$C_{CC}^t = \sum_{i=1}^{24} c_e^t P_{CC}^t \quad (7)$$

式中:  $C_{CC}^t$  为一个周期内碳捕集总成本;  $c_e^t$  为  $t$  时段的上网电价。

捕集后的  $\text{CO}_2$  可以被用于不同的利用途径, 本文考虑将碳捕集的  $\text{CO}_2$  注入甲烷反应器中进行天然气的生产, 从而实现碳的循环利用。碳利用过程使用  $\text{CO}_2$  总量为

$$N_{\text{CU},\text{CO}_2}^t = N_{\text{MR},\text{CO}_2}^t \quad (8)$$

式中:  $N_{\text{CU},\text{CO}_2}^t$  为  $t$  时段碳利用过程消耗  $\text{CO}_2$  的体积;  $N_{\text{MR},\text{CO}_2}^t$  为  $t$  时刻甲烷化过程消耗  $\text{CO}_2$  的质量。

当低碳园区 IES 捕集的  $\text{CO}_2$  过剩时, 对余下的部分进行封存处理, 碳封存成本可表示为

$$C_{CS} = c_{cs} \sum_{i=1}^{24} (N_{\text{CC},\text{CO}_2}^t - N_{\text{CU},\text{CO}_2}^t) \quad (9)$$

式中:  $C_{CS}$  和  $c_{cs}$  分别为一个周期内碳封存的总成本和单位  $\text{CO}_2$  封存成本。

低碳园区 IES 中的碳排放源主要为: 上级电网购电、微型燃气轮机、燃气锅炉。本文采用基准分配法来制定低碳园区 IES 中的无偿碳排放权配额<sup>[13]</sup>。MT、GB 机组根据等效热量进行碳配额的计算:

$$\begin{cases} Q_{CA}^t = Q_G^t + Q_{GB}^t + Q_{MT}^t \\ Q_G^t = \theta_e P_{e,\text{buy}}^t \\ Q_{GB}^t = \theta_h H_{GB}^t \\ Q_{MT}^t = \theta_h (\varphi P_{MT}^t + H_{MT}^t) \\ Q_{CA,\text{total}} = \sum_{i=1}^{24} Q_{CA}^t \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $Q_{CA}^t$ 、 $Q_G^t$ 、 $Q_{GB}^t$  和  $Q_{MT}^t$  分别为  $t$  时段总的碳配额量、上级电网购电碳配额、燃气锅炉工作碳配额、微型燃气轮机工作碳配额;  $P_{MT}^t$  为 MT 机组输出电功率;  $H_{MT}^t$  和  $H_{GB}^t$  分别为 MT 和 GB 机组的输出热功率;  $\theta_e$  和  $\theta_h$  分别为单位电量和热量的碳排放权配额;  $\varphi$  为电量转化为热量的折算系数;  $Q_{CA,\text{total}}$  为 1 d 内总的碳配额量。

本文系统碳排量同样包括购电、MT 及 GB 机组产生的  $\text{CO}_2$ , 表示为

$$\begin{cases} N_{CE}^t = \mu_h (\varphi P_{MT}^t + H_{MT}^t + H_{GB}^t) + \mu_e P_{e,\text{buy}}^t \\ N_{CE,\text{total}} = \sum_{i=1}^{24} N_{CE}^t \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\mu_e$ 、 $\mu_h$  分别为单位电量和热量的碳排放系数;  $N_{CE}^t$ 、 $N_{CE,\text{total}}$  分别为系统  $t$  时段以及总的碳排放量。

考虑到碳捕集过程减少的碳排放, 低碳园区 IES 的实际碳排放量为

$$N_{ACE} = N_{CE,\text{total}} - N_{CC,\text{total}} \quad (12)$$

式中:  $N_{ACE}$  为低碳园区 IES 1 d 实际碳排放量;  $N_{CE,\text{total}}$  为 1 d 总的碳排放量。

则参与碳交易的净碳排放量为

$$N = N_{ACE} - Q_{CA,\text{total}} \quad (13)$$

式中:  $N$  为参与碳交易的净碳排放量值。

为促进企业采用更清洁、低碳的技术和生产方式, 本文采用奖惩式阶梯型碳交易机制, 对低碳园区 IES 的碳排放约束更强。系统碳交易成本建模为

$$C_{\text{CO}_2} = \begin{cases} B(1+3\mu)(N+3l) - B(3+3\mu)l & (N \leq -3l) \\ B(1+2\mu)(N+2l) - B(2+\mu)l & (-3l \leq N \leq -2l) \\ B(1+\mu)(N+l) - Bl & (-2l \leq N \leq -l) \\ BN & (-l \leq N \leq l) \\ B(1+\mu)(N-l) + Bl & (l \leq N \leq 2l) \\ B(1+2\mu)(N-2l) + B(2+\mu)l & (2l \leq N \leq 3l) \\ B(1+3\mu)(N-3l) + B(3+3\mu)l & (N \geq 3l) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $C_{\text{CO}_2}$  为阶梯碳交易成本;  $B$  为碳交易基价;  $l$  为碳排放区间值;  $\mu$  为价格增长率。

## 2 用户侧电/热柔性负荷建模

电/热柔性负荷作为一种灵活性调度资源, 可以积极地参与需求侧响应, 优化 IES 的负荷曲线。在进行需求响应时, 电/热可平移负荷可以根据计划改变供能时间, 在多个时段之间进行平移; 可转移电负荷, 可以灵活地调节各用电时段的用电量, 但需要满足转移功率约束并保证转移前后的电负荷需求总量保持一致, 也需要对转移电负荷的最小持续运行时间进行约束; 可根据调度计划在调度周期内进行负荷功率削减, 但需对负荷削减时长和次数进行约束。

### 2.1 电/热可平移负荷

$$\begin{cases} C_{\text{SF}} = c_{\text{sf}} L_{\text{sf}}^{\text{sum}} \\ L_{\text{sf}}^{\text{sum}} = L_{\text{sf}}^t \sum_{i=t_{\text{sf}0}}^{t_{\text{sf}1}-t_{\text{d}}+1} \theta_{\text{sf}}^i \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $C_{SF}$  和  $c_{sf}$  分别为负荷平移后的总成本和单位可平移负荷的补偿成本系数;  $L_{sf}^t$  和  $L_{sf}^{sum}$  分别为  $t$  时段可平移负荷量和调度期内平移负荷总量;  $\theta_{sf}^t$  为  $t$  时段进行平移调度的 0~1 布尔变量。

## 2.2 可转移电负荷

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{ts}^t L_{ts}^{e,min} \leq L_{ts}^{e,t} \leq \theta_{ts}^t L_{ts}^{e,max} \\ \sum_{t=1}^T L_{ts}^{e,t} = 0 \\ \sum_{t=T_{ts}^{min}-1}^{t+T_{ts}^{min}-1} \theta_{ts}^t \geq T_{ts}^{min} (\theta_{ts}^t - \theta_{ts}^{t-1}) \\ C_{TS} = c_{ts} \sum_{t=t_{ts0}}^{t=t_{ts0}} (\theta_{ts}^t L_{ts}^{e,t}) \end{array} \right. \quad (16)$$

式中:  $L_{ts}^{e,t}$ 、 $L_{ts}^{e,min}$ 、 $L_{ts}^{e,max}$  分别为  $t$  时段负荷进行转移调度的功率以及电负荷功率上、下限;  $\theta_{ts}^t$  为  $t$  时段可转移负荷进行调度的 0~1 布尔变量;  $T_{ts}^{min}$  为可转移负荷的最小持续时间;  $C_{TS}$  和  $c_{ts}$  分别为柔性电负荷转移后总转移补偿成本和转移成本系数。

## 2.3 电/热可削减负荷

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{cut}^t = (1 - \theta_{cut}^t \lambda_{cut}) L_{cut}'^t \\ T_{cut}^{max} (\theta_{cut}^t - \theta_{cut}^{t-1}) \geq \sum_{t=1}^T \theta_{cut}^t \geq T_{cut}^{min} (\theta_{cut}^t - \theta_{cut}^{t-1}) \\ \sum_{t=1}^T \theta_{cut}^t \leq N_{max} \\ C_{cut} = c_{cut} \sum_{t=1}^T \theta_{cut}^t (L_{cut}'^t - L_{cut}^t) \end{array} \right. \quad (17)$$

式中:  $L_{cut}^t$  和  $L_{cut}'^t$  为  $t$  时段参与负荷削减之后和之前的电/热负荷;  $\theta_{cut}^t$  为  $t$  时段是否进行负荷削减的 0~1 变量;  $\lambda_{cut}$  为削减系数;  $T_{cut}^{max}$  和  $T_{cut}^{min}$  为最大和最小负荷削减次数;  $N_{max}$  为电/热负荷最大削减次数;  $C_{cut}$  和  $c_{cut}$  分别为总的削减补偿成本和削减成本系数。

## 3 考虑 CCUS-HECU 的 IES 优化模型

在 CCUS-HECU 协同作用下的低碳园区 IES 考虑了 HFC 及氢能甲烷化过程的余热回收以及 CCUS 带来的成本和经济效益, 同时计及用户侧电/热柔性负荷参与调度, 整个调度周期为 24 h。目标函数以外购能成本 ( $C_{buy}$ )、碳交易成本 ( $C_{CO_2}$ )、碳捕集成本 ( $C_{CC}$ )、碳封存成本 ( $C_{CS}$ )、弃风成本 ( $C_W$ )、电/热柔性负荷调整成本 ( $C_T$ ) 和碳捕集设备运行维护成本 ( $C_{OW}$ ) 的总和最小为目

标, 其目标函数如下:

$$C_{total} = \min (C_{buy} + C_{CO_2} + C_{CC} + C_{CS} + C_W + C_T + C_{OW}) \quad (18)$$

### 3.1 目标函数

#### 3.1.1 外部购能成本

$$C_{buy} = \sum_{t=1}^{24} c_e^t P_{buy,e}^t + \sum_{t=1}^{24} c_g P_{buy,g}^t c_g \quad (19)$$

式中:  $c_e^t$  和  $c_g$  分别为购买电量和气能的单位价格;  $P_{buy,e}^t$  和  $P_{buy,g}^t$  分别为  $t$  时段购买的电量和天然气量。

#### 3.1.2 弃风成本

$$C_W = \sum_{t=1}^T c_w (P_{W,a}^t - P_W^t) \quad (20)$$

式中:  $c_w$  为单位弃风成本;  $P_{W,a}^t$  和  $P_W^t$  分别为  $t$  时段风电实际功率和消纳风电功率。

#### 3.1.3 电/热柔性负荷调整成本

$$C_T = C_{SF} + C_{TS} + C_{cut} \quad (21)$$

#### 3.1.4 各设备运行维护成本

以往研究仅考虑设备老化维护成本, 本文采用 CCUS 技术对 MT 机组改造, 响应国家对于“双碳”目标的号召, 符合未来低碳发展对工业设备的要求, 既避免了当前设备退修和报废带来的搁浅成本, 也间接降低了新建其他基础低碳设备花费的额外成本。

$$C_{OM} = \sum_{t=1}^{24} (\alpha - \beta - \gamma) P_{MT}^t \quad (22)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$  分别为碳捕集改造后 MT 的运行维护系数、搁浅成本系数和额外成本系数。

### 3.2 系统约束条件

#### 3.2.1 功率平衡约束

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{buy,e}^t + P_W^t + P_{BST}^{dis} = P_{cc}^t + P_{BST}^{char} + P_{EL,e}^t + P_{HFC}^t + P_{MT}^t + P_{load}^t \\ P_{load}^t = P_{base}^t + L_{sf}^{e,t} + L_{ts}^{e,t} + L_{cut}^{e,t} \\ H_{HFC}^t + H_{MR,r}^t + H_{MI}^t + H_{GB}^t + H_{IST}^{dis} = H_{TST}^{char} + H_{load}^t \\ H_{load}^t = H_{base}^t + L_{sf}^{e,t} + L_{cut}^{ht} \\ P_{buy,g}^t + P_{EST,e}^{sis} = P_{Mr,g}^t + P_{GBg}^t - P_{MR,g}^t + P_{EST}^{char} \\ P_{EL,H_2}^t + P_{HST}^{dis} = P_{MR,H_2}^t + P_{HFC,H_2}^t + P_{HST}^{char} \end{array} \right. \quad (23)$$

式中:  $P_W^t$  为  $t$  时段风电出力功率;  $P_{BST}^{char}$  和  $P_{BST}^{dis}$  分别为蓄电池在  $t$  时段充、放电功率;  $P_{load}^t$ 、 $P_{base}^t$ 、 $L_{sf}^{e,t}$ 、 $L_{ts}^{e,t}$ 、 $L_{cut}^{e,t}$  为  $t$  时段用户电功率、基础电负

荷、可平移电功率、可转移电功率及可削减电功率； $H_{\text{TST}}^{t,\text{char}}$ 、 $H_{\text{TST}}^{t,\text{dis}}$ 为 $t$ 时段蓄热槽充热、放热功率； $H_{\text{load}}^t$ 、 $H_{\text{base}}^t$ 、 $L_{\text{sf}}^{h,t}$ 、 $L_{\text{cut}}^{h,t}$ 分别为 $t$ 时段用户热功率、基础热功率、可平移热功率及可削减热功率； $P_{\text{buy,g}}^t$ 为 $t$ 时段从上级气网购买的气功率； $P_{\text{EST}}^{t,\text{char}}$ 和 $P_{\text{EST}}^{t,\text{dis}}$ 为储气罐充气、放气功率； $P_{\text{HST}}^{t,\text{char}}$ 、 $P_{\text{HST}}^{t,\text{dis}}$ 分别为储氢罐充氢、放氢功率。

3.2.2 机组及储能装置约束

CHP、GB及风电出力约束建模同文献[26]，同时，本文考虑对多类型储能进行统一建模，具体建模也同文献[26]，此处不再赘述。

3.3 模型求解

本文建立的考虑CCUS-HECU的低碳园区综合能源系统优化调度模型，其本质为混合整数非线性模型，在MATLAB中结合YALMIP与CPLEX商业求解器进行求解。

4 算例分析

为验证文中提出的考虑CCUS-HECU的低碳园区IES优化运行策略的有效性，以24 h为1个调度周期，设置以下算例进行分析。低碳园区IES内的风电出力、各类型负荷数据预测值与各时刻电价如图3和图4所示。系统运行及设备参数如表1和表2所示，天然气价格不变，取0.35元/(kW·h)。单位碳排放区间长度 $l$ 设置为500 kg，价格增长率 $\mu$ 为0.15，碳交易基准价格 $B$ 为0.25元/kg。两段可平移负荷的持续时间分别为2 h和3 h，可平移时段分别为05:00—21:00和07:00—23:00，补偿成本系数均为0.2元/(kW·h)，两段可平移热负荷的持续时间均为3 h，可平移时段分别为07:00—23:00和05:00—18:00，补偿成本系数均为0.1元/(kW·h)；可转移电负荷的范围为0~56.7 kW，最小连续运行时间为2 h，可转移时段为05:00—21:00，补偿成本系数为0.3元/(kW·h)；可削减电/热负荷的最小和最大连续削减时长分别为2 h和5 h，最大削减次数为8次，削减成本系数分别为0.4元/(kW·h)和0.2元/(kW·h)。

现设置以下6种场景来进行对比分析，以验证所提模型的有效性。

场景1：不含任何电气耦合设备，不考虑HECU、CCUS及柔性负荷的参与。

场景2：在场景1的基础上，考虑HECU模块

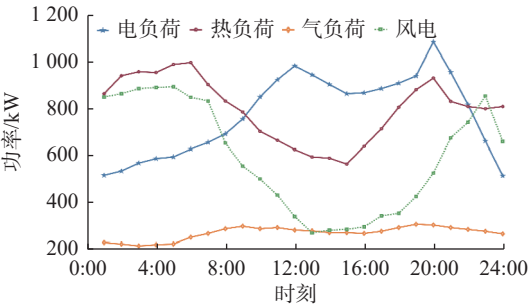


图3 各负荷及风电出力

Fig.3 Various loads and wind power output

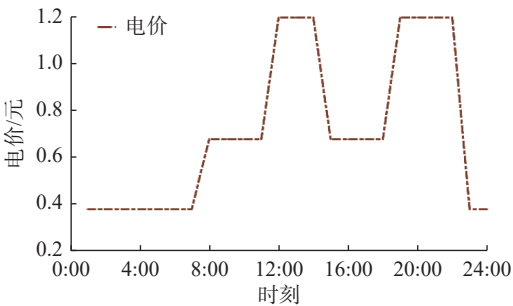


图4 分时段电价

Fig.4 Time period electricity price

表1 系统运行参数

Tab.1 System operating parameters

| 参数                                                                        | 取值    | 参数                                                                   | 取值            |
|---------------------------------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------------------------------|---------------|
| $\eta_{\text{EL}}$                                                        | 0.87  | $\theta_{\text{e}}/(\text{kg}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$ | 1.08          |
| $\eta_{\text{MR}}$                                                        | 0.6   | $\theta_{\text{h}}/(\text{kg}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$ | 0.382         |
| $H_{\text{CH}_4}^{\text{HHV}}/(\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})$ | 11    | $\varphi$                                                            | 6             |
| $\rho_{\text{CH}_4}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$                        | 0.72  | $\mu_{\text{e}}/(\text{kg}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$    | 0.728         |
| $H_{\text{MR}}/(\text{kW}\cdot\text{h})$                                  | 0.12  | $\mu_{\text{h}}/(\text{kg}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$    | 0.367         |
| $\lambda$                                                                 | 0.818 | $c_{\text{w}}$                                                       | 0.8           |
| $\omega$                                                                  | 2     | $c_{\text{sf}}$                                                      | 0.2(电)、0.1(热) |
| $V_{\text{EL}}/(\text{m}^3\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$         | 0.25  | $c_{\text{is}}$                                                      | 0.1           |
| $P_{\text{CC,S}}^t/\text{kW}$                                             | 15    | $c_{\text{cut}}$                                                     | 0.4(电)、0.2(热) |
| $\lambda_{\text{e}}/(\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1})$          | 0.278 | $\lambda_{\text{cut}}$                                               | 0~0.9         |
| $\alpha_{\text{MT}}/(\text{kg}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$     | 0.76  | $\alpha$                                                             | 0.5           |
| $\eta_{\text{t}}$                                                         | 0.6   | $\beta$                                                              | 0.2           |
| $c_{\text{cs}}/(\text{元}\cdot\text{kg}^{-1})$                             | 0.085 | $\gamma$                                                             | 0.25          |

参与系统调度。

场景3：在场景2的基础上，考虑CCUS的参与，目标函数增加CCUS带来的成本及经济效益。

场景4：在场景2的基础上，考虑柔性负荷的参与，并在目标函数中考虑需求响应补偿成本。

场景5：同时考虑CCUS-HECU和柔性负荷参与的低碳园区综合能源系统优化调度。

表 2 设备参数  
Tab.2 Parameters of equipment

| 设备  | 额定功率/kW | 能量转化效率/% | 爬坡约束     |
|-----|---------|----------|----------|
| EL  | 500     | 87       | 额定功率的20% |
| MR  | 250     | 60       | 额定功率的20% |
| HFC | 250     | 95       | 额定功率的20% |
| GB  | 800     | 95       | 额定功率的20% |
| MT  | 600     | 92       | 额定功率的20% |

场景 6: 在场景 2 的基础上, 不考虑加入氢储能参与系统调度。

4.1 综合运行结果分析

通过综合考虑 CCUS-HECU 和柔性负荷参与低碳园区 IES 优化调度, 可以得到场景 5 关于低碳园区 IES 的多能负荷优化运行情况, 具体如图 5 所示。

在电能调度中, 风电、MT 与 HFC 协同满足电负荷需求, 缺额由购电和电储能动态补充。谷时段(22:00—次日 07:00)由风电承担主负荷的供给, EL 将富余风电转化为氢能供 HFC 及 MR 使用; 峰时段(11:00—14:00、18:00—22:00)通过 MT、储能、风电协同出力来实现零购电, 碳捕集改造后的 MT 也在提升碳减排能力的同时增加了

额外能耗。热能调度中, MT、GB 全时段供能, HFC 和 MR 在风电高发期辅助产热以补足热能。气能调度在谷时段(22:00—次日 08:00)由 MR 利用富余氢能产气补充需求, 其余时段通过外购满足 MT、GB 运行。氢能调度全过程与风电出力呈现强时空耦合性, 储氢罐在谷时段通过消纳前序储能来转化为富余风电, 而在峰时段(19:00—22:00)释放储氢供 HFC 热电联产, 低谷期则停运。系统也通过氢储协同 EL、HFC、MR 构建电—热—气多能联供架构, 实现了风电跨时段消纳与能量时移, 兼顾了低碳性与经济性。

4.2 有效性分析

通过多场景对比分析各模块有效性, 表 3 为场景 1~5 的各项成本及碳排对比。

4.2.1 HECU 模块有效性分析

通过场景 1 和场景 2 的对比分析来验证本文所考虑的 HECU 模块对低碳园区 IES 优化运行的低碳经济有效性。图 6 和图 7 分别为场景 1 和场景 2 的多能功率平衡图, 表 4 为场景 2 和场景 6 风电出力波动、成本及碳排对比图。

场景 2 增加了 HECU 模块, 依靠夜间高发风电配合 EL、HFC 及 GB 完成系统电、热负荷的供给。

场景 2 在 22:00—次日 08:00 时 MT 停止工

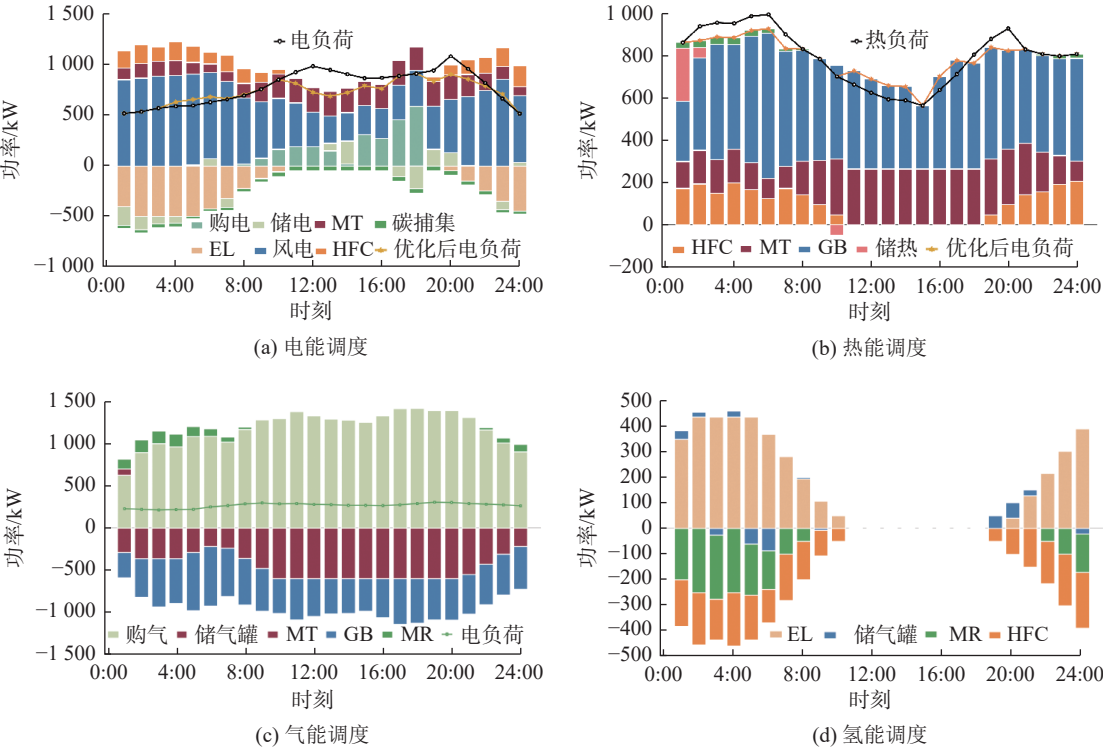


图 5 场景 5 多能功率平衡图  
Fig.5 Multi-energy power balance for scenario 5

表 3 场景 1~5 的成本及碳排

Tab.3 Costs and carbon emissions for scenarios 1~5

|            | 场景1      | 场景2      | 场景3      | 场景4      | 场景5      |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 买电/(kW·h)  | 4 183.5  | 4 139.1  | 3 539.3  | 2 624.0  | 1 835.7  |
| 买气/(kW·h)  | 10 627.6 | 9 116.3  | 10 072.7 | 8 958.5  | 9 921.7  |
| 碳交易费用/元    | 162.4    | 209.3    | 480.8    | 95.7     | 674.4    |
| 碳捕集费用/元    | 0        | 0        | 483.0    | 0        | 479.2    |
| 碳封存费用/元    | 0        | 0        | 128.8    | 0        | 132.3    |
| 弃风费用/元     | 2 279.5  | 831.5    | 92.6     | 554.6    | 0        |
| 设备维护成本/元   | 1 459.9  | 1 505.3  | 730.7    | 1 512.3  | 797.4    |
| 需求响应补偿成本/元 | 0        | 0        | 0        | 579.7    | 533.4    |
| 总成本/元      | 18 712.9 | 15 801.4 | 14 566.3 | 14 324.8 | 13 025.4 |
| 实际碳排/kg    | 12 919.1 | 11 526.3 | 9 954.6  | 9 926.4  | 8 050.2  |

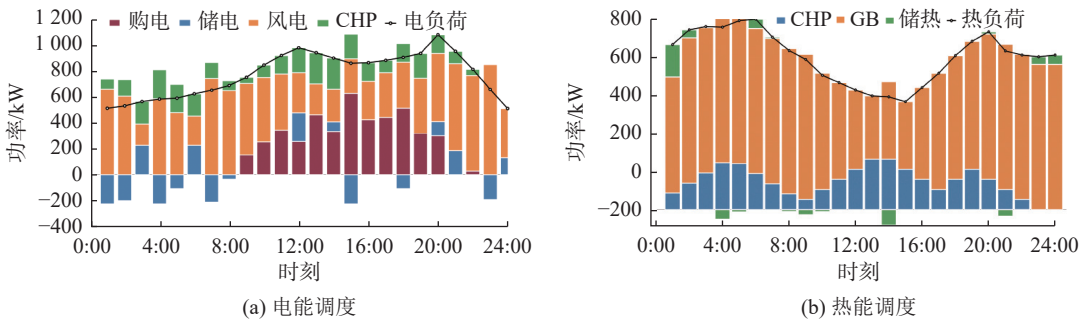


图 6 场景 1 多能功率平衡图

Fig.6 Multi energy power balance for scenario 1

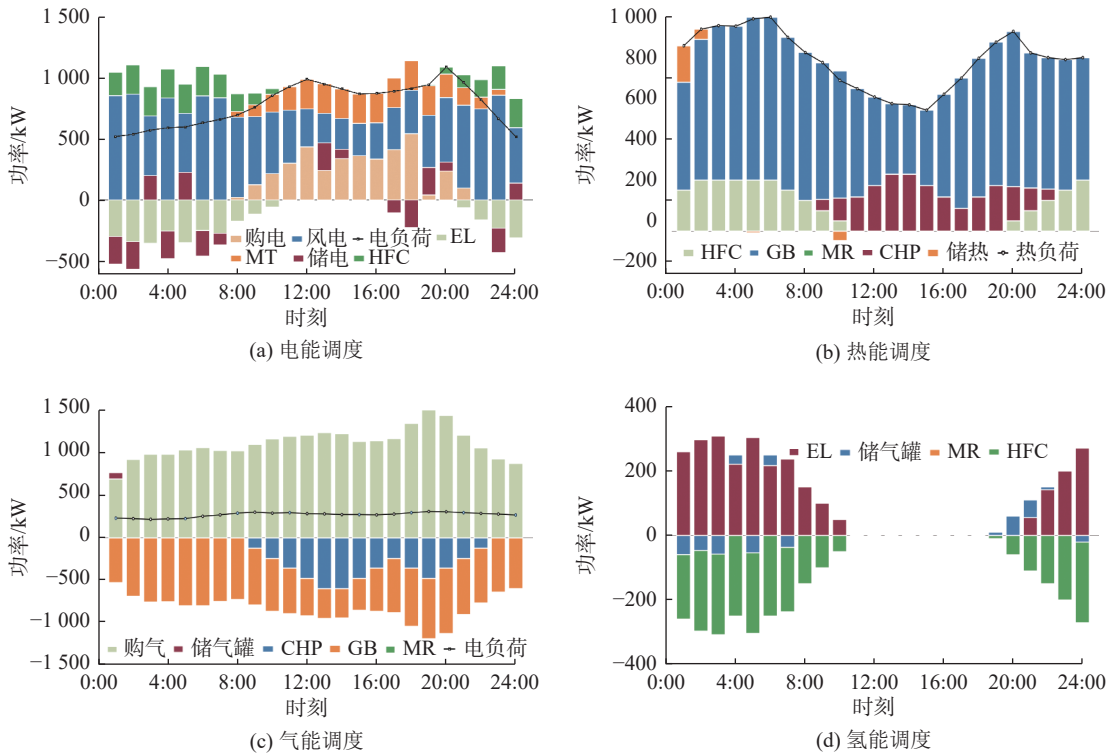


图 7 场景 2 多能功率平衡图

Fig.7 Multi energy power balance for scenario 2

表 4 场景 2 和场景 6 风电出力波动、成本及碳排放对比

Tab.4 Comparison of wind power output fluctuations, costs and carbon emissions for scenario 2 and scenario 6

| 项目             | 场景2      | 场景6      |
|----------------|----------|----------|
| 风电高发时段出力标准差/kW | 156.7    | 178.3    |
| 总成本/元          | 15819.2  | 16215.3  |
| 实际碳排/kg        | 11 340.5 | 11 505.6 |

作，系统在高度依靠 GB 完成供热的同时降低了这一时段内购气量，故场景 2 购气成本较场景 1 的下降 14.2%。EL、HFC 在夜间 15 个时段参与风电向电、热、氢能的转化，盈余氢能存储在储氢罐中，HECU 系统各设备充分发挥了消纳风电的能力，场景 2 的弃风成本相较场景 1 的减少了 63.5%。由表 3 中场景 1、2 成本及碳排对比可知，HECU 模块的加入使得系统碳排放量和总成本分别下降了 10.8% 和 15.5%。

同时，结合图 8 和表 4 可以看出，场景 2 相较于场景 6 在 22:00—次日 07:00 时提高了风电在 IES 中的出力占比，储氢罐的加入使场景 2 相较场景 6 的风电高发时段出力波动性下降了 12.1%，碳排放量和成本也降低了。

综上，HECU 模块通过提升低碳园区 IES 多能耦合效率与风电消纳能力，降低了外购成本与碳排放。氢储的灵活调度也保障了系统的多能供需平衡，对于实现 IES 低碳经济稳定运行具有实践

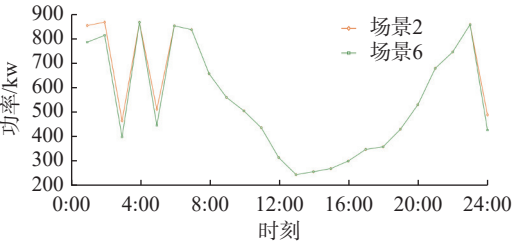


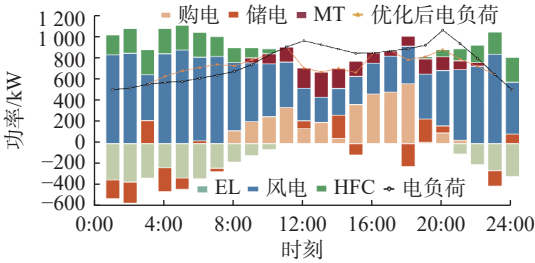
图 8 场景 2 和场景 6 风电出力图  
Fig.8 Wind power output for scenarios 2 and 6

意义。

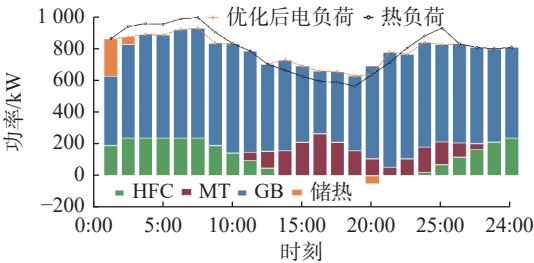
4.2.2 CCUS 应用有效性分析

通过场景 4 和场景 5 的对比分析来验证本文所考虑的 CCUS 过程对低碳园区 IES 优化运行的低碳经济有效性。图 9 为场景 4 多能功率平衡图。

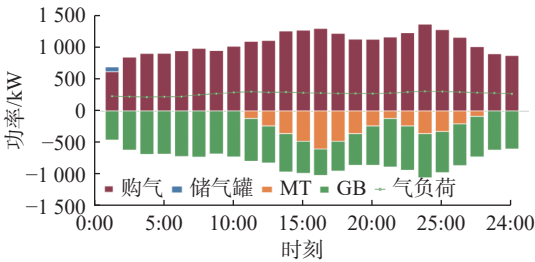
结合场景 4、5 氢能调度图分析，由于场景 5 中 MR 利用氢能生产天然气，增大了氢能的消耗，故相较场景 4 在 19:00—次日 08:00 共计 15 个时段 EL 出力均有所增加，实现了风电的全消纳。结合场景 4、5 的气能和热能调度图分析，由于场景 5 在场景 4 的基础上增加了碳捕集过程，故对电能需求增大。考虑到各时段气价均比电价便宜，因此，CCUS 过程额外消耗的能量由气能承担，故场景 5 全时段购气量均增加，购气成本提高 10.8%。根据场景 4、5 电能调度图所示，与场景 4 中 MT 在 22:00—次日 08:00 停止工作不同，场景 5 通过全时段 MT 出力带来了购电量的大幅下降，购电成本下降 30%。由于场景 5 对 MT 加



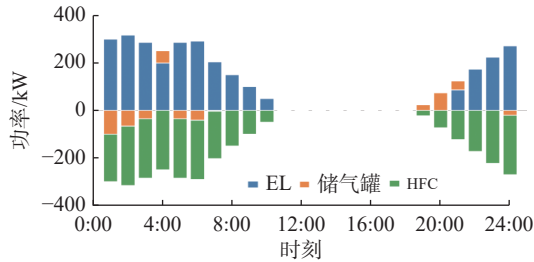
(a) 电能调度



(b) 热能调度



(c) 气能调度



(d) 氢能调度

图 9 场景 4 多能功率平衡图

Fig.9 Multi-energy power balance for scenario 4

装了碳捕集系统，故相较场景 4 系统碳交易成本下降了 770.1 元，实际碳排放量下降 18.9%，总成本下降 9.1%，体现了 CCUS 过程为低碳园区 IES 带来的低碳经济效益。

综上，系统通过 CCUS 过程实现了节能降碳与成本优化，但也导致购气量显著增加。未来需强化 CCUS 与 HECU 模块耦合，重点提升氢能合

成天然气能效。同时也可结合气价波动优化储气策略，提高储能利用率以进一步降低购气成本。

4.2.3 电/热柔性负荷有效性分析

通过场景 3 和场景 5 的对比分析来验证本文所考虑的电/热柔性负荷需求响应过程对低碳园区 IES 优化运行的低碳经济有效性。图 10 为场景 3 多能功率平衡图。

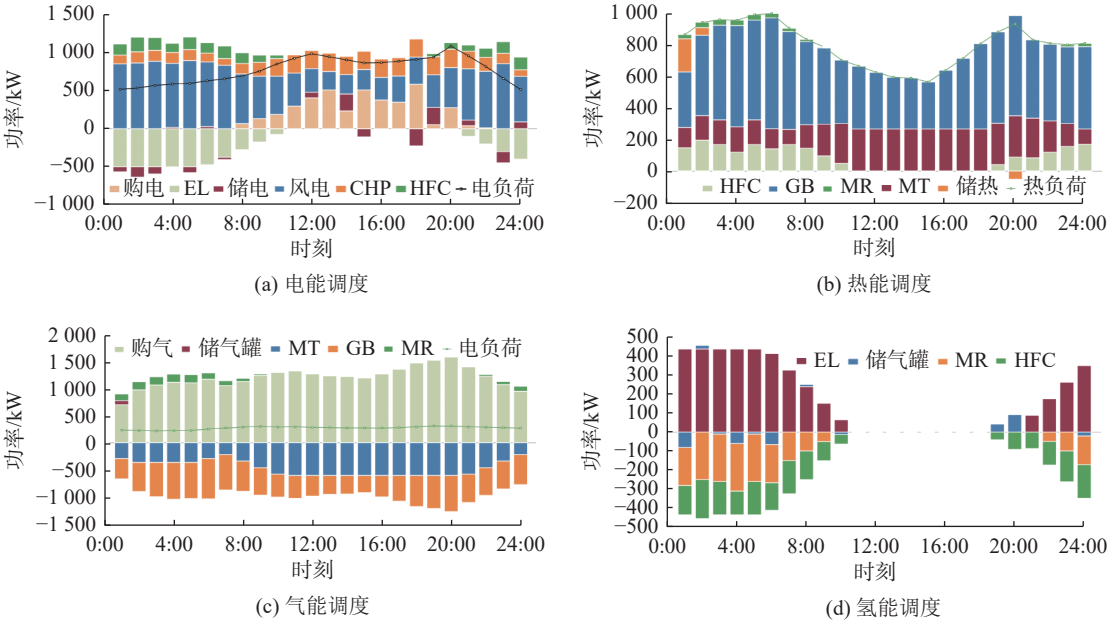


图 10 场景 3 多能功率平衡图

Fig.10 Multi-energy power balance for scenario 3

相较于场景 3，场景 5 通过柔性电负荷参与需求响应，使得多个峰时段的电负荷下降。其中，系统在夜间峰时段进行平移和削减电负荷，在午间峰时段则同时进行了平移、转移和削减电负荷。故在 11:00—14:00，电负荷下降幅度更大，使得此时购电量也显著下降，平谷时段则通过平移、转移电负荷实现负荷上升，使得部分平谷时段相应地提高了购电量。系统通过削峰填谷，使得购电成本下降了 48.1%。同时根据场景 3、5 的热、气负荷平衡图所示，相较于场景 3，场景 5 通过柔性热负荷参与需求响应，在 18:00—次日 07:00(热负荷较高时段)期间实现了购气量的大幅下降，转而在 07:00—18:00(热负荷谷时段)增加购气以提高 GB 出力，实现了热负荷的转移。由于电/热柔性负荷具有灵活的调度能力，减少了用能消耗，故场景 5 实际碳排放量较场景 3 下降 19.1%，总成本下降 10.6%。

综上，电/热柔性负荷的参与进一步提升了低碳园区 IES 的经济运行能力，实现了用户侧负荷

波动性的降低。因此，园区综合能源系统的低碳经济运行，既要关注供能与能源转换侧，也需深度挖掘用户侧多类型柔性负荷的需求响应潜力。

4.3 风电消纳能力分析

各个场景在 1 d 全时段的风电消纳能力如图 11 所示。场景 1 缺乏各种能量耦合设备，风电的反调峰特性使得夜间时段风电高发，由于电负荷需求较低以及电储能容量的限制，大量的风电无法及时地消纳，从而出现大面积的弃风现象。场景 2 增加了 HECU 模块，在风电高发时段可以利用 EL 消纳多余的风电制氢，同时氢储能的低储高发，实现了风电的能量时移，进一步加大了系统对于风电的消纳能力。场景 3 和场景 4 分别在场景 2 的基础上增加了 CCUS 过程和柔性负荷的参与，都进一步提高了整体的风电消纳水平。其中，场景 4 通过柔性负荷参与削峰填谷的特性，提升了部分夜间时段对于风电的消纳能力。场景 3 则通过 MR 设备额外消纳 EL 电解产生的氢能，从而进一步减少弃风。场景 5 同时引入了 CCUS-HECU

模块和柔性负荷, 既通过柔性负荷参与需求响应提升了谷时段的用电水平, 又通过 CCUS-HECU 模块内部的能量耦合设备实现了从风电-氢、气、电、热等不同形式能量的转变, 其协同作用最终实现了风电的全消纳, 提升了系统整体的低碳经济水平。

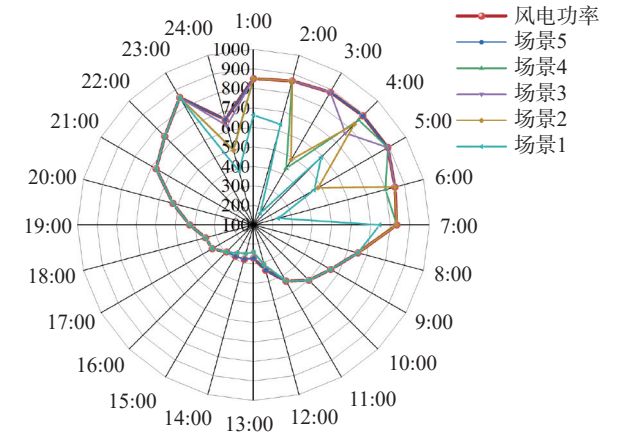


图 11 各场景风电消纳图

Fig.11 Wind power consumption for various scenarios

4.4 奖惩阶梯碳交易机制参数灵敏度分析

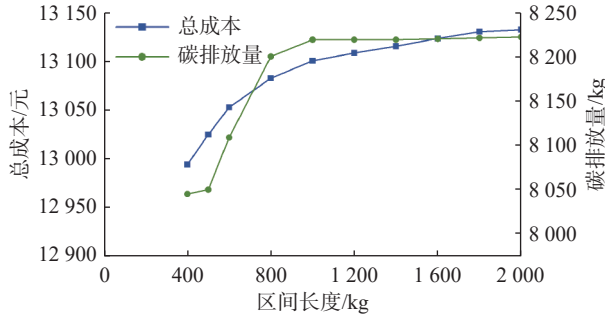
为深入研究低碳园区 IES 低碳经济运行情况受奖惩式阶梯碳交易机制各参数波动的影响, 本节考虑阶梯式碳交易区间长度、价格增长率的变化对低碳园区 IES 运行总成本和碳排放量的影响作用。

如图 12(a) 所示, 当区间长度介于 [400, 800) 时, 由于此区间较短, 低碳园区 IES 多余碳配额可以以高梯度价位进行出售, 因而获得更多碳收益, 碳减排力度大, 因此实际碳排放量较少。当区间长度介于 [800, 1200) 时, 系统多余碳配额处于低梯度价位的量增多, 故碳交易带来的收益降低, 因而对系统碳减排激励作用降低, 碳排放随之升高。当区间长度介于 [1200, 2000) 时, 多余碳配额均以低梯度价位出售, 区间长度变化对碳排放影响逐渐变小, 加上系统需要维持固有负荷的运行, 整体碳排放量和总成本趋于稳定。

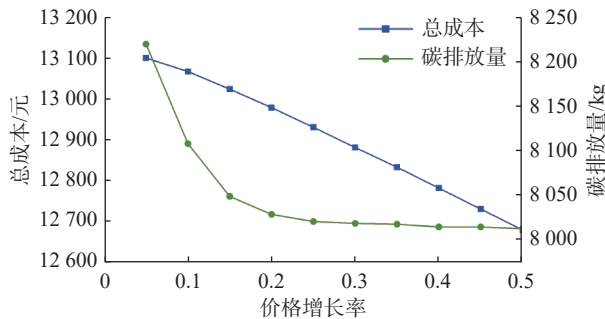
如图 12(b) 所示, 当阶梯碳交易价格增长率介于 [0, 0.25) 时, 随着价格增长率的逐渐增加, 系统碳减排动力逐渐增强, 处于高梯度区间碳配额的收益增加, 整体成本也随之下降。当价格增长率介于 [0.25, 0.5) 时, 系统整体机组出力逐渐稳定, 但由于价格增长率的上升, 出售多余碳配额带来的收益持续增加, 故系统整体成本依然呈现下降趋势。

4.5 储热槽必要性验证

综合前文分析结果表明, 在外部气源供应稳



(a) 奖惩阶梯式碳交易区间长度



(b) 奖惩阶梯式碳交易价格增长率

图 12 奖惩阶梯式碳交易机制各参数影响图

Fig.12 Impact of various parameters on the tiered carbon trading mechanism

定与多元储能协同调度的双重作用下, 系统内部储热单元利用率较低。因此, 需分析当外部气源购买受限时储热槽的经济低碳备用价值。现通过额外设置以下两种场景, 并结合前文场景 5 来作对比分析。

场景 7: 限制系统各时段购买天然气功率的上限(根据 MT、GB、气储能充放功率限制, 同时为预留安全裕度, 现将购气功率削减 20%, 购气上限设置为 1200 kW, 其他设置与场景 5 的一致)。

场景 8: 在场景 7 的基础上, 储热槽停止工作。

场景 7 和场景 8 的电能见热调度如图 13 和 14 所示, 场景 5、7、8 的各项成本及碳排对比如表 5 所示。由于系统高度依赖外部气源, 当外部购气受限时, 场景 7 通过增大 04:00—06:00 的 GB 出力来提前蓄热, 使得储热槽在多个时段参与热负荷的调度。因此, 场景 7 中储热槽在 02:00—07:00 和 10:00—14:00 两个时段都参与了热负荷削峰填谷, 相较于场景 5 热储能利用率获得了提升。但由于购气的限制, 系统 MT 出力降低, 同时在风电出力较低时, 被迫购买额外电能来通过 HECU 系统输出热能。故系统购电成本上涨 22.0%, 系统实际碳排也增加了 4.4%, 整体成本上升了 2.3%。场景 8 由于缺乏储热槽, 故午间 GB 出力较

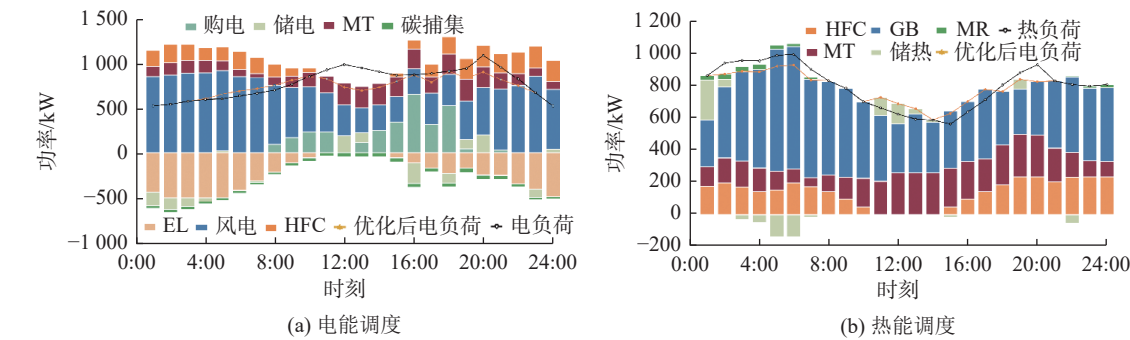


图 13 场景 7 电、热功率平衡图

Fig.13 Electrical and thermal power balance for scenario 7

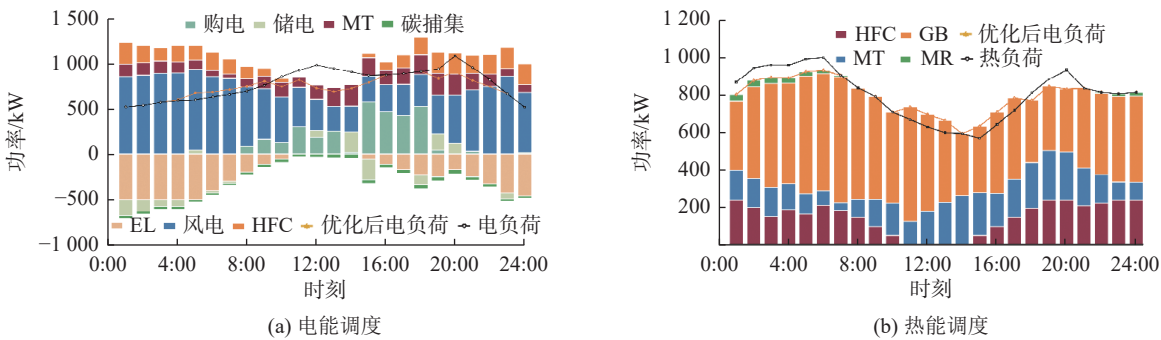


图 14 场景 8 电、热功率平衡图

Fig.14 Electrical and thermal power balance for scenario 8

表 5 场景 5、7、8 成本及碳排

Tab.5 Costs and carbon emissions for scenario 5, 7, 8

|            | 场景5     | 场景7     | 场景8     |
|------------|---------|---------|---------|
| 买电/(kW·h)  | 1835.7  | 2239.4  | 2448.6  |
| 买气/(kW·h)  | 9921.7  | 9319.1  | 9247.3  |
| 碳交易费用/元    | -674.4  | -486.6  | -410.4  |
| 碳捕集费用/元    | 479.2   | 434.3   | 401.9   |
| 碳封存费用/元    | 132.3   | 114.1   | 103.3   |
| 弃风费用/元     | 0       | 0       | 0       |
| 设备维护成本/元   | 797.5   | 1041.8  | 1042.5  |
| 需求响应补偿成本/元 | 533.4   | 521.2   | 528.0   |
| 总成本/元      | 13025.4 | 13183.4 | 13361.4 |
| 实际碳排/kg    | 8050.2  | 8292.1  | 8595.0  |

高，在购气量不足的情况下 MT 相应的出力减少，因而导致 11:00—14:00 峰时段购电增加。结合图 15 碳捕集量的对比可以看出，由于场景 5、7、8 的 MT 出力逐渐减少，故其碳捕集量也依次减少。其中场景 8 由于缺乏足够的气能供应及储热槽，在 18 个时段均出现碳捕集量的下降。场景 8 相较于场景 7 总成本上升了 1.3%，碳排量上升了 3.6%。可以看出，在外部购气受限情况下，蓄

热槽可以在调节热负荷需求的同时，增加系统碳捕集量并通过系统 HECU-CCUS 及柔性负荷协同作用实现总成本的下降。

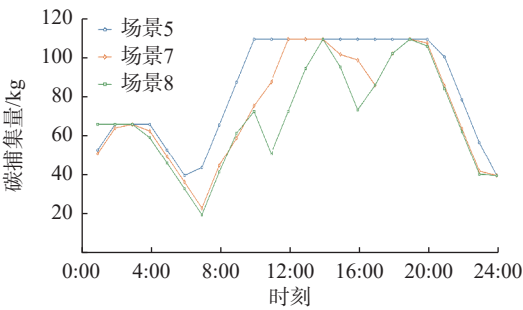


图 15 场景 5、7、8 碳捕集量

Fig.15 Carbon capture capacities for scenario 5, 7, 8

因此，当外部气源供应受限时，虽然蓄热槽运行负荷显著提升，但 IES 此时被迫采购额外电能来进行多级能量转换以补充热能。在此过程中，产生的额外能量损耗会导致运行成本增加，系统整体经济性下降。同时，蓄热槽可凭借其热缓冲特性，在外部条件波动时依托多能耦合系统有效降低热力失衡导致的能效损耗和经济损失，进而提升低碳园区综合能源系统的碳调节能力，充分体现了蓄热槽在应对外部条件波动时的经济低碳备用价值。

## 5 结论

为提高 IES 可再生能源消纳水平、多能耦合效率及低碳运行能力,本文从能源转换、碳捕集技术应用及负荷侧调控 3 个层面开展研究。通过建立 CCUS-HECU 与多能系统的深度耦合并充分考虑负荷侧电/热柔性负荷参与需求响应,构建了低碳园区综合能源系统优化调度模型。对比分析多场景的运行情况,得到以下结论:

a. HECU 模块通过 EL 将富裕风电转化为氢能存放在储氢罐中用于灵活调度,配合回收氢转甲烷过程的余热及 HFC 热电联产满足了系统的多能需求,有效平抑了风电出力的波动性,实现了低碳园区 IES 中能量的梯级利用。

b. 通过 CCUS 全过程参与低碳园区综合能源系统运行,使系统在满足气负荷需求的同时,有效降低了外购能源成本与碳排放成本,并通过奖惩阶梯式碳交易机制强化了降碳效能,最终实现系统经济和环境效益的协同提升。

c. 将电、热柔性负荷需求响应参与到 IES 优化调度的考虑中,有效降低了负荷峰谷差。实现削峰填谷的同时,缓解了供能和能量耦合设备的压力,还减少了购能成本,从调节负荷曲线、提升经济低碳性方面实现了最优化。

因此,HECU、CCUS 及柔性负荷三者协同运行,有效地提升了低碳园区综合能源系统的降碳能力和经济性。后续研究可以探寻多能耦合元件能效的深度提升方法,也可以考虑加入供能侧和负荷侧的不确定性来研究低碳园区 IES 的优化运行。

### 参考文献:

- [1] 陈艳波,张宁,李嘉祺,等. 零碳园区研究综述及展望 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5496–5516.
- [2] 汪龙,邱巍,许欣宇,等. 低碳园区综合能源系统捕碳-储能优化配置 [J]. 电力工程技术, 2024, 43(6): 235–246.
- [3] 邵志刚,衣宝廉. 氢能与燃料电池发展现状 & 展望 [J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 469–477.
- [4] 张庆,王涛,李川. 计及柔性负荷和碳流的园区综合能源系统优化运行模型研究 [J]. 智慧电力, 2024, 52(6): 54–61.
- [5] 柳思贤,丁坤,董海鹰. 考虑碳捕集和电转气的零碳园区综合能源系统经济调度 [J]. 太阳能学报, 2024, 45(9): 188–196.
- [6] HUANG W T, ZHANG B H, GE L J, et al. Day-ahead

optimal scheduling strategy for electrolytic water to hydrogen production in zero-carbon parks type microgrid for optimal utilization of electrolyzer[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 68: 107653.

- [7] 刘妍,胡志坚,陈锦鹏,等. 含碳捕集电厂与氢能多元利用的综合能源系统低碳经济调度 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48(1): 31–40.
- [8] 李志伟,赵雨泽,吴培,等. 基于制氢设备精细建模的综合能源系统绿氢蓝氢协调低碳优化策略 [J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2317–2326.
- [9] 米剑锋,马晓芳. 中国 CCUS 技术发展趋势分析 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2537–2543.
- [10] 崔杨,闫石,仲悟之,等. 含电转气的区域综合能源系统热电优化调度 [J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4254–4263.
- [11] PANG X F, WANG Y B, YANG S X, et al. A bi-objective low-carbon economic scheduling method for cogeneration system considering carbon capture and demand response[J]. *Expert Systems with Applications*, 2024, 243: 122875.
- [12] WANG S X, WANG S M, ZHAO Q Y, et al. Optimal dispatch of integrated energy station considering carbon capture and hydrogen demand[J]. *Energy*, 2023, 269: 126981.
- [13] WANG R T, WEN X Y, WANG X Y, et al. Low carbon optimal operation of integrated energy system based on carbon capture technology, LCA carbon emissions and ladder-type carbon trading[J]. *Applied Energy*, 2022, 311: 118664.
- [14] 李东森,高赐威,赵明. 计及电转气热回收的综合能源系统蓄热罐容量规划与运行策略 [J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 161–168.
- [15] 许周,孙永辉,谢东亮,等. 计及电/热柔性负荷的区域综合能源系统储能优化配置 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 53–59.
- [16] ZHANG J L, LIU Z Y. Low carbon economic scheduling model for a park integrated energy system considering integrated demand response, ladder-type carbon trading and fine utilization of hydrogen[J]. *Energy*, 2024, 290: 130311.
- [17] 胡荣,张必璐,李振坤,等. 计及可平移负荷的分布式冷热电联供系统优化运行 [J]. 电网技术, 2018, 42(3): 715–721.
- [18] 袁铁江,曾婧,张明扬. 计及热负荷柔性的户用氢能系统运行优化研究 [J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 29–40.
- [19] 李若琼,司宇杰,杨承辰,等. 考虑柔性负荷的新型电力系统源荷日前-日内低碳优化调度 [J]. 南方电网技术, 2025, 19(3): 116–129.
- [20] 李文琦,孙伟卿,杨文威. 考虑碳交易及需求响应的虚拟电厂运行优化策略 [J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(5): 484–493.

[21] 王莹, 高岩. 计及需求响应的随机综合能源系统优化配置[J]. *上海理工大学学报*, 2022, 44(2): 157–165.

[22] 王文烨, 姜飞, 张新鹤, 等. 含规模氢能综合利用的高比例风光多能源系统低碳灵活调度[J]. *电网技术*, 2024, 48(1): 197–206.

[23] ANWAR S, KHAN F, ZHANG Y H, et al. Recent development in electrocatalysts for hydrogen production through water electrolysis[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(63): 32284–32317.

[24] GÖTZ M, LEFEBVRE J, MÖRS F, et al. Renewable power-to-gas: a technological and economic review[J]. *Renewable Energy*, 2016, 85: 1371–1390.

[25] 邓杰, 姜飞, 王文烨, 等. 考虑电热柔性负荷与氢能精细化建模的综合能源系统低碳运行[J]. *电网技术*, 2022, 46(5): 1692–1702.

[26] 张兴平, 张又中. 计及 P2G 和 CCS 的园区级电–热–气综合能源系统多目标优化[J]. *电力建设*, 2020, 41(12): 92–101.

[27] KARIMI M, SHIRZAD M, SILVA J A C, et al. Carbon dioxide separation and capture by adsorption: a review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2023, 21(4): 2041–2084.

(编辑: 何代华)



(上接第 158 页)

[24] XIE H Z, YAO H X, ZHOU S C, et al. Efficient regional memory network for video object segmentation[C]//Proceedings of 2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Nashville: IEEE, 2021: 1286–1295.

[25] WANG G Q, LI L, ZHU M, et al. Kernel based local matching network for video object segmentation[J]. *Machine Vision and Applications*, 2024, 35(3): 01524.

[26] GAO X Y, LI Z L, SHI H L, et al. Scribble-supervised video object segmentation via scribble enhancement[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2025, 35(4): 2999–3012.

[27] ELAYAPERUMAL D, SAKTHI K S S, JEONG J H, et al. Semi-supervised one-shot learning for video object segmentation in dynamic environments[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2025, 84(6): 3095–3115.

[28] YANG R L, LI D, HU C H, et al. SKVOS: sketch-based video object segmentation with a large-scale benchmark[J]. *Applied Sciences*, 2025, 15(4): 1751.

[29] SKARTADOS E, GEORGIADIS K, YUCEL M K, et al. TRICKVOS: a bag of tricks for video object segmentation[C]//Proceedings of 2023 IEEE International Conference on Image Processing. Kuala Lumpur: IEEE, 2023: 2430–2434.

[30] YANG Z X, MIAO J X, WEI Y C, et al. Scalable video object segmentation with identification mechanism[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2024, 46(9): 6247–6262.

[31] WANG Z, ZHANG W B, LI J H, et al. PRM: a pixel-region-matching approach for fast video object segmentation[C]//Proceedings of the 7th Chinese Conference on Pattern Recognition and Computer Vision. Urumqi: Springer, 2024: 76–91.

[32] LI X M, WANG Q H, LI D Z, et al. MoBox: enhancing video object segmentation with motion-augmented box supervision[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2025, 35(1): 405–417.

[33] MIAO B, BENNAMOUN M, GAO Y S, et al. Self-supervised video object segmentation by motion-aware mask propagation[C]//Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Taipei, Taiwan: IEEE, 2022: 1–6.

(编辑: 董 伟)