

# 计及新能源消纳与碳捕集电厂的多能源系统优化调度研究

姜河<sup>1,2</sup>, 周航<sup>1,2</sup>, 赵琰<sup>1,2</sup>, 孙笑雨<sup>1,2</sup>, 解相朋<sup>3</sup>

(1.沈阳工程学院 新能源学院, 辽宁 沈阳 110136; 2.辽宁省区域多能源系统集成与控制重点实验室, 辽宁 沈阳 110136; 3.南京邮电大学 先进技术研究院, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 针对新能源发电占比提升、电热耦合程度加深以及燃煤机组高碳排放量等问题,文章建立了一种基于新能源最优消纳与电热需求响应的含碳捕集电厂多能源系统、多时间尺度调度模型。首先,建立综合灵活运行模式的碳捕集燃煤电厂以降低系统的碳排放量,提高燃煤机组配合新能源并网的灵活性;其次,将不同类型需求响应资源对应不同时间尺度的系统需求,平滑负荷峰谷差,并配合新能源最优消纳策略深挖碳捕集燃煤电厂的低碳特性;再次,计及多类电源与热源设备,以系统运行成本最小为目标函数,建立源荷协调的日前-日内-实时多时间尺度调度模型,优化不同时间尺度下负荷分配与机组出力计划,提高新能源消纳能力;最后,通过算例仿真验证了该模型的有效性与可行性。

**关键词:** 碳捕集; 最优消纳; 碳排放; 多时间尺度; 需求响应

**中图分类号:** TK51; TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)11-1536-10

## 0 引言

随着“碳达峰、碳中和”目标的提出,风电、光伏在电网系统中的渗透率逐渐提高,但传统燃煤机组的调峰灵活性较低,易造成风、光消纳受阻的现象。

通过碳捕集与封存技术(Carbon Capture and Sequestration, CCS)将传统燃煤电厂改造为碳捕集燃煤电厂,可以直接捕获燃煤机组所排放的CO<sub>2</sub>,进而降低系统的整体碳排放。文献[1]通过对碳捕集电厂的系统特性分析,证明了其可以提高新能源的消纳能力。文献[2]针对CCS的电碳特性进行了细致分析,结果表明,将分流式与储液式运行方式相结合可有效扩大CO<sub>2</sub>吸收范围。文献[3]建立了一种考虑碳捕集装置与电转气装置协同运行的多能互补系统,提升经济性的同时减少了系统的碳排放量。文献[4]将碳捕集机组引入虚拟电厂,通过各类机组的协调运行满足系统低碳经济运行的目标。然而,上述研究均未考虑碳捕集电厂内部能耗、新能源消纳以及碳捕量三者之间的耦合关系。因此,本文首先将研究重点聚焦在碳捕集能耗与碳捕量的关系、碳捕集能耗调整对新

能源消纳的影响以及新能源消纳量与碳捕量的关系,以此为基础开展对含碳捕集电厂的多能源系统优化调度的研究。另外,因为发电机组在不同时间尺度下的调度出力行为存在差异,并且考虑到调度中心对于源荷功率预测精度会随时间尺度的缩减而提高,现有学者逐步开始针对不同时间尺度下的机组优化组合进行研究。文献[5]研究了多能机组灵活运行下的综合能源系统多时间尺度调度模型,在不同时间尺度下考虑不同的目标函数进行滚动优化调度。文献[6]综合考虑分流式碳捕集电厂与多时间尺度调度,在日前、日内、实时阶段深挖系统低碳特性。此外,有学者将需求响应(Demand Response, DR)考虑到多时间尺度调度中,文献[7]提出了一种考虑多类型需求响应参与电热联合系统的多时间尺度调度模型,通过源荷协调配合满足系统运行目标。

目前,在多时间尺度下,针对荷侧需求响应与源侧碳捕集电厂相互配合进而保障系统低碳运行的研究成果较少。本文计及综合灵活运行模式碳捕集技术的调峰特性、碳捕集燃煤电厂的低碳特性、DR资源对负荷的整合特性,并综合考虑多种

收稿日期: 2023-10-20。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(62203311);国家自然科学基金优秀青年基金项目(62022044);辽宁省教育厅基本科研项目(LJKQZ2021079);辽宁省博士科研启动基金项目(2020-BS-181);“兴辽英才计划”项目(XLYC1907138)。

作者简介: 姜河(1991-),男,博士研究生,副教授,研究方向为新能源电力系统建模与优化调控技术。E-mail:jianghescholar@163.com

能量设备,提出一种基于新能源最优消纳与电热需求响应的含碳捕集电厂的多能源系统多时间尺度调度模型,通过算例仿真验证了该模型在系统低碳经济运行与新能源消纳方面的优势。

## 1 计及新能源最优消纳与碳捕集电厂的多能源系统运行框架

### 1.1 碳捕集燃煤电厂运行特性

对传统的燃煤机组加装 CO<sub>2</sub> 吸收装置、贫富储液罐、烟气流分装置、解析装置与压缩机等碳捕集设备,改造为一种综合灵活运行模式的碳捕集燃煤机组<sup>[8]</sup>,其既可以通过调整贫富储液罐内 CO<sub>2</sub> 溶剂存量实现碳捕集设备能耗的转移(如富储液罐内储液量增多时,即该时段捕获的 CO<sub>2</sub> 只吸收未解析,此时碳捕集设备能耗降低,火电机组净出力提升),也可以根据系统实际需求通过烟气流分装置主动排放 CO<sub>2</sub>,提高系统调度的灵活性。系统原理图如图 1 所示。

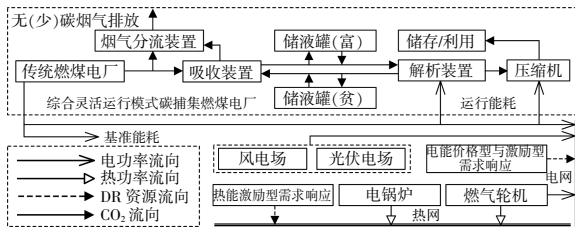


图 1 系统原理图

Fig.1 Schematic diagram of the system

碳捕集燃煤电厂的总出力可划分为碳捕集能耗与电厂净出力两部分,碳捕集能耗又可划分为基准能耗与运行能耗,而运行能耗可以划分为解析能耗与压缩能耗<sup>[9]</sup>,因此建立综合灵活运行模式的碳捕集电厂的数学模型为

$$P_{gi,t} = P_{Ni,t} + P_{di,t} + P_{Ox,t} \quad (1)$$

$$\begin{cases} P_{Ox,t} = k V_{Totali,t} \\ V_{Totali,t} = V_{gi,t}^S + \alpha_i \lambda V_{gi,t} \\ 0 \leq V_{Totali,t} \leq \lambda (\mu_1 + \mu_2) \eta_{gi} P_{gimax} \cap 0 \leq \alpha_i \leq 1 \\ V_{gi,t} = P_{gi,t} \eta_{gi} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{gi,t}$ 为 $t$ 时段碳捕集燃煤机组的总输出功率; $P_{Ni,t}$ 为 $t$ 时段机组的净出力; $P_{di,t}$ 、 $P_{Ox,t}$ 分别为碳捕集设备的基准能耗与运行能耗; $V_{Totali,t}$ 为 $t$ 时段机组所捕获 CO<sub>2</sub> 的总量; $k$ 为捕获单位 CO<sub>2</sub> 所需能耗; $V_{gi,t}^S$ 为 $t$ 时段机组 $i$ 中贫富储液罐向解析装置供给的待捕获 CO<sub>2</sub> 量; $\alpha_i$ 为机组的烟气流分比,

即排放烟气量与吸收烟气量之比; $\lambda$ 为碳捕集效率; $V_{gi,t}$ 为 $t$ 时段碳捕集燃煤机组 $i$ 产生的 CO<sub>2</sub> 总量; $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 分别为解析装置与压缩机的最大工作状态系数; $\eta_{gi}$ 为燃煤机组 $i$ 的碳排放强度; $P_{gimax}$ 为碳捕集燃煤机组总输出功率的上限。

为保证与火电机组的实际出力特性一致,对碳捕集能耗的调节范围设置约束为

$$P_{di,t} \leq P_{Ox,t} + P_{di,t} \leq k \alpha_i \lambda (\mu_1 + \mu_2) \eta_{gi} P_{gimax} + P_{di,t} \quad (3)$$

由式(1)可得净出力的范围为

$$P_{gimin} - k \alpha_i \lambda (\mu_1 + \mu_2) \eta_{gi} P_{gimax} - P_{di,t} \leq P_{Ni,t} \leq P_{gimax} - P_{di,t} \quad (4)$$

式中: $P_{gimin}$ 为碳捕集燃煤机组 $i$ 总输出功率的下限。

由式(4)可知,因为存在碳捕集设备,碳捕集燃煤电厂的净出力范围得到了极大提升,故其可以在风、光并网时期提供更低的下旋转备用。同时,因为贫富储液罐与烟气流分装置的存在,综合灵活运行模式的碳捕集燃煤电厂既可以在负荷高峰将碳捕集能耗转移至负荷低谷,缓解负荷需求与低碳捕集的矛盾,又可以在负荷低谷提高碳捕集设备能耗进而更大范围地降低碳捕集电厂净出力以消纳风、光电能。

### 1.2 新能源最优消纳模型

由于新能源发电存在低碳排、波动性大等特点,造成其并网时既要考虑平滑净负荷曲线<sup>[10]</sup>,又要兼顾弃风弃光成本。因此,本文定义初始负荷与风、光并网的实际功率为系统的净负荷,并以净负荷波动满足系统运行规定为目标建立新能源最优消纳约束,其模型为

$$\frac{1}{\Delta T} \sum_{t=1}^{\Delta T} \left\{ \left[ \frac{P_{D,t} + (k_{W,t} - 1) P_{W,t} + (k_{P,t} - 1) P_{P,t}}{(k_{P,t} - 1) P_{P,t}} \right] \left( 1 - \frac{1}{\Delta T} \right) \right\}^2 \leq \rho_b \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} \min \left[ \sum_{t=1}^{\Delta T} (k_{W,t} + k_{P,t}) \right] = 0 \\ 0 \leq k_{W,t} \leq k_{Wmax}, 0 \leq k_{P,t} \leq k_{Pmax} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta T$ 为一个调度周期的时段数; $P_{D,t}$ 为初始负荷; $k_{W,t}$ 、 $k_{P,t}$ 分别为 $t$ 时段的弃风与弃光率,即调度过程中弃风弃光功率与风、光预测功率的比值; $P_{W,t}$ 、 $P_{P,t}$ 分别为 $t$ 时段风、光上网功率; $\rho_b$ 为调度中心规定的电网最大功率波动方差; $k_{Wmax}$ 、 $k_{Pmax}$ 分别为最大弃风与弃光率。

该约束模型在式(6)的最小弃风、弃光量的约束下,通过式(5)的净负荷波动满足电网最大功率波动的要求下保证风、光稳定并网与最优消纳。

### 1.3 需求响应与碳捕集燃煤电厂的协调运行特性

DR 资源通常可以划分为电价型需求响应 (Price Demand Response, PDR) 与激励型需求响应 (Incentive Demand Response, IDR)。PDR 通过分时电价引导用户用电行为,从而改变用电计划<sup>[1]</sup>。IDR 是

由电力系统调度中心与负荷用户签订协议将其用电计划分类整合,最终由调度中心进行统一调度<sup>[12]</sup>。本文根据用户响应时间将 IDR 分为负荷响应时长>1 h 且对应日前调度的 A 类 IDR、负荷响应时长为 15 min 且对应日内调度的 B 类 IDR、负荷实时响应且对应实时调度的 C 类 IDR。由于 PDR 响应时间较长,故将其对应于系统的前日调度,DR 资源参与调度运行的原理结构见图 2。

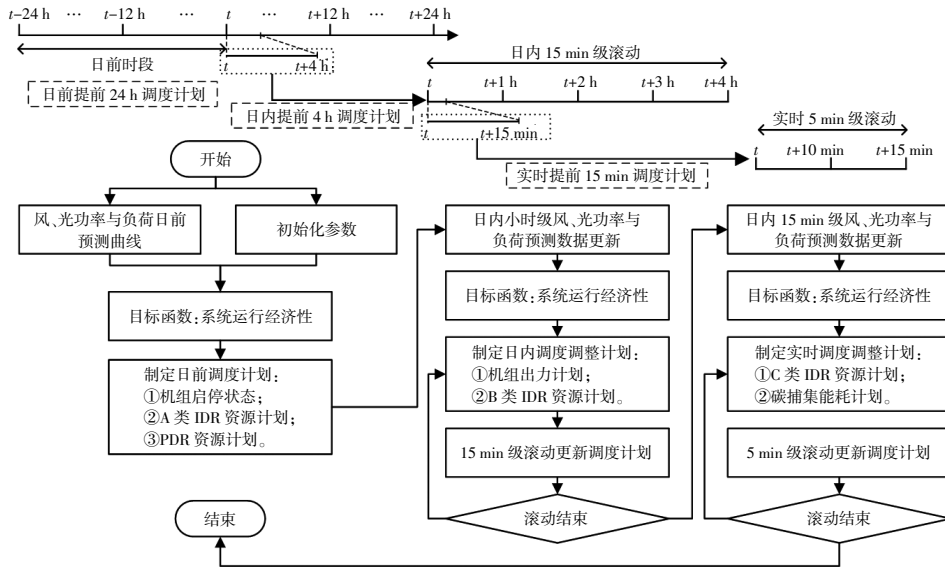


图 2 DR 资源参与多时间尺度调度原理图

Fig.2 Schematic diagram of DR resources participating in multi-time scale scheduling

热能需求响应的调用计划与电能类似,本文设置在满足用户满意度的情况下采用协约激励型需求响应进行供能的计划制定,即热能激励型需求响应 (Thermal Incentive Demand Response, TIDR) 通过热负荷转移与削减达到源荷协调调度的目标。TIDR 的划分规则与 IDR 一致,分为 A 类 TIDR, B 类 TIDR, C 类 TIDR 3 种。同时, TIDR 的调用计划也可以与 IDR 一致,统一描述为

$$\begin{cases} 0 \leq |P_{iDR,t}| \leq P_{iDRmax}, i=A/B/C \\ |P_{iDR,t} - P_{iDR,t-1}| \leq V_{iDR}, i=A/B/C \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $P_{iDR,t}, P_{iDR,t-1}$  分别为  $t$  时段、 $t-1$  时段第  $i$  类 DR 的调用量;  $P_{iDRmax}$  为第  $i$  类 DR 的最大调用量;  $V_{iDR}$  为第  $i$  类 DR 的响应速率。

### 1.4 热源机组运行特性

本文所提模型热源输出主要为电锅炉与燃气轮机,其运行特性可以描述为

$$\begin{cases} H_{eb,t} = \eta_{eb} P_{eb,t} \\ P_{ebmin} \leq P_{eb,t} \leq P_{ebmax} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} P_{gj,t} = \eta_{gt} D_{gt} Q_{gj,t} \\ H_{gj,t} = k_{gt} P_{gj,t} \\ P_{gjmin} \leq P_{gj,t} \leq P_{gjmax} \\ R_{gj,down} \leq P_{gj,t} - P_{gj,t-1} \leq R_{gj,up} \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $H_{eb,t}$  为  $t$  时段电锅炉提供的热功率;  $\eta_{eb}$  为电锅炉的电热转换效率;  $P_{eb,t}$  为  $t$  时段电锅炉消耗的电功率;  $P_{ebmax}, P_{ebmin}$  分别为电锅炉消耗电功率上、下限;  $P_{gj,t}, H_{gj,t}$  分别为  $t$  时段燃气轮机组输出的电、热功率;  $\eta_{gt}$  为燃气轮机组的发电效率;  $D_{gt}$  为天然气的低热值系数;  $Q_{gj,t}$  为天然气耗量;  $k_{gt}$  为燃气轮机组的电热输出比例系数;  $P_{gjmin}, P_{gjmax}$  分别为燃气轮机组输出的最小、最大电功率;  $R_{gj,down}, R_{gj,up}$  分别为燃气轮机组电功率输出的爬坡下、上限。

## 2 计及新能源最优消纳与碳捕集电厂的多能源系统多时间尺度调度模型

### 2.1 日前调度模型

#### 2.1.1 目标函数

模型的前日调度以碳捕集燃煤机组的启停计

划、电锅炉出力计划、燃气轮机出力计划、PDR 资源、A 类 IDR 与 A 类 TIDR 资源作为主要决策变量对目标函数进行优化,目标函数表示为

$$F_{\text{day-h}} = \min(C_{\text{gl}} + C_{\text{gt}} + C_{\text{eb}} + C_{\text{cl}} + C_{\text{ct}} + C_{\text{ccs}} + C_{\text{A-DR}}) \quad (10)$$

式中: $F_{\text{day-h}}$  为日前调度计划总成本; $C_{\text{gl}}$  为日前调度碳捕集燃煤机组运行成本,分为煤耗成本与启停成本; $C_{\text{gt}}$  为燃气轮机运行成本; $C_{\text{eb}}$  为电锅炉的运行成本; $C_{\text{cl}}$  为日前调度弃风弃光惩罚成本; $C_{\text{ct}}$  为碳交易成本; $C_{\text{ccs}}$  为碳捕集设备运行的材料损耗成本; $C_{\text{A-DR}}$  为 A 类 IDR 资源与 TIDR 资源的调用总成本。

$$\left\{ \begin{aligned} C_{\text{gl}} &= \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \left\{ u_{\text{gl},t} \left( a_{1i} P_{\text{gl},t}^2 + a_{2i} P_{\text{gl},t} + a_{3i} \right) + f_{\text{gl}} \left[ u_{\text{gl},t} (1 - u_{\text{gl},t-1}) + u_{\text{gl},t-1} (1 - u_{\text{gl},t}) \right] \right\} \\ C_{\text{gt}} &= \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^M f_{\text{gt}} Q_{\text{gt},t} \\ C_{\text{eb}} &= f_{\text{eb}} H_{\text{eb},t} / \eta_{\text{eb}} \\ C_{\text{cl}} &= \sum_{t=1}^T f_{\text{c}} \left( P_{\text{Wp},t}^{\text{day-h}} + P_{\text{Pp},t}^{\text{day-h}} - P_{\text{W},t} - P_{\text{P},t} \right) \\ C_{\text{ct}} &= f_{\text{ct}} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (V_{\text{gt},t} - \lambda_{\text{ct}} P_{\text{gt},t}) \\ C_{\text{ccs}} &= \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N f_{\text{r}} \mu_{\text{r}} V_{\text{Total},t} \\ C_{\text{A-DR}} &= \sum_{t=1}^T (f_{\text{AIDR}} |P_{\text{AIDR},t}| + f_{\text{ATIDR}} |P_{\text{ATIDR},t}|) \end{aligned} \right. \quad (11)$$

式中: $T$  为日前调度周期的时段数; $N$  为碳捕集燃煤机组的数量; $u_{\text{gl},t}$  为  $t$  时段碳捕集燃煤机组  $i$  的启、停状态; $a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}$  分别为碳捕集燃煤机组煤耗成本函数的二次、一次与常数项系数; $f_{\text{gl}}$  为碳捕集燃煤机组的启停成本; $M$  为燃气轮机组的数量; $f_{\text{gt}}$  为天然气费用; $f_{\text{eb}}$  为电锅炉的单位运行成本; $f_{\text{c}}$  为弃风弃光惩罚成本系数; $P_{\text{Wp},t}^{\text{day-h}}, P_{\text{Pp},t}^{\text{day-h}}$  分别为日前风、光预测功率; $f_{\text{ct}}$  为碳交易成本系数; $\lambda_{\text{ct}}$  为机组碳排放配额系数; $f_{\text{r}}$  为碳捕集设备储液罐中  $\text{CO}_2$  溶剂成本系数; $\mu_{\text{r}}$  为  $\text{CO}_2$  溶剂损耗系数; $f_{\text{AIDR}}, f_{\text{ATIDR}}$  分别为 A 类 IDR 与 TIDR 资源的单位调用成本系数; $P_{\text{AIDR},t}, P_{\text{ATIDR},t}$  分别为  $t$  时段 A 类 IDR 与 TIDR 资源的调用量。

### 2.1.2 约束条件

基于上述目标函数,模型还须考虑各类机组的运行约束。

### ①功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{\text{AIDR},t} + P_{\text{el},t} + P_{\text{eb},t} = P_{\text{Ni},t} + P_{\text{W},t} + P_{\text{P},t} + P_{\text{gl},t} + P_{\text{PDR},t} \\ P_{\text{ATIDR},t} + P_{\text{dl},t} = H_{\text{gl},t} + H_{\text{eb},t} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $P_{\text{el},t}$  为日前调度  $t$  时段预测电负荷; $P_{\text{dl},t}$  为日前调度  $t$  时段预测热负荷; $P_{\text{PDR},t}$  为  $t$  时段响应的 PDR 资源,即经电价激励进而转移或削减的电负荷功率。

### ②碳捕集燃煤机组约束

碳捕集燃煤机组的运行约束与传统燃煤机组一致<sup>[13]</sup>,故出力约束与启停时间约束在此不做赘述,爬坡约束与旋转备用约束为

$$\begin{cases} P_{\text{gl},t} - P_{\text{gl},t-1} \leq u_{\text{gl},t} R_{\text{gl},\text{up}} \\ P_{\text{gl},t-1} - P_{\text{gl},t} \leq u_{\text{gl},t-1} R_{\text{gl},\text{down}} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \min [R_{\text{gl},\text{up}}, (u_{\text{gl},t} P_{\text{Nimax}} - P_{\text{Ni},t})] \geq r_{t,\text{up}} \\ \min [R_{\text{gl},\text{down}}, (P_{\text{Ni},t} - u_{\text{gl},t} P_{\text{Nimin}})] \geq r_{t,\text{down}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $R_{\text{gl},\text{up}}, R_{\text{gl},\text{down}}$  分别为碳捕集燃煤机组的爬坡速率上、下限; $P_{\text{Nimax}}, P_{\text{Nimin}}$  分别为机组的净输出功率上、下限; $r_{t,\text{up}}, r_{t,\text{down}}$  分别为时段系统所需的上、下旋转备用。

### ③碳捕集设备约束

为应对风、光预测误差,碳捕集燃煤机组的净出力应留有一定裕度<sup>[14]</sup>,即碳捕集能耗需要调整区间,因此烟气排放量可以通过碳捕集能耗调整区间进行相应调整,其满足以下约束:

$$\begin{cases} 0 \leq \alpha_u \leq \left[ (\mu_1 + \mu_2) P_{\text{gimax}} - V_{\text{gl},t}^S / \lambda \eta_{\text{gl}} \right] / P_{\text{gl},t} \leq 1 \\ (1 - \alpha_u) \leq \alpha_i \leq \alpha_u \end{cases} \quad (15)$$

式中: $\alpha_u$  为保证碳捕集能耗调整的烟气分流比限定值。

贫、富储液罐中  $\text{CO}_2$  溶剂体积的改变可以反映处理的  $\text{CO}_2$  量,因此贫、富储液罐内溶剂体积约束为

$$\begin{cases} V_{\text{Pgl},t} = V_{\text{Pgl},t-1} + V_{\text{Cgl},t}, 0 \leq V_{\text{Pgl},t} \leq V_{\text{gl},t} \\ V_{\text{Fgl},t} = V_{\text{Fgl},t-1} - V_{\text{Cgl},t}, 0 \leq V_{\text{Fgl},t} \leq V_{\text{gl},t} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $V_{\text{Pgl},t}, V_{\text{Fgl},t}$  分别为  $t$  时段碳捕集燃煤机组贫、富储液罐内溶剂量; $V_{\text{Cgl},t}$  为  $t$  时段消耗机组  $i$  排放的  $\text{CO}_2$  所需要的溶剂量; $V_{\text{gl},t}$  为  $t$  时段碳捕集燃煤机组储液罐内溶剂总量。

## 2.2 日内调度模型

### 2.2.1 目标函数

日内调度以运行成本最小为目标,主要以碳捕集燃煤机组的出力计划、B 类 IDR 与 B 类 TIDR 资源作为主要决策变量对目标函数进行优

化,即:

$$F_{\text{day-in}} = \min(C_{g2} + C_{g1} + C_{cb} + C_{c2} + C_{ct} + C_{ces} + C_{B\_DR}) \quad (17)$$

式中:  $F_{\text{day-in}}$  为日内调度计划总成本;  $C_{g2}$  为日内调度碳捕集燃煤机组煤耗成本, 其数学表达为式(11)中  $C_{g1}$  的前半部分;  $C_{c2}$  为日内调度弃风弃光惩罚成本;  $C_{B\_DR}$  为 B 类 IDR 资源与 TIDR 资源的调用总成本。

$$\begin{cases} C_{c2} = \sum_{t=1}^{T'} f_c (P_{Wp,t}^{\text{day-in}} + P_{Pp,t}^{\text{day-in}} - P_{W,t} - P_{P,t}) \\ C_{B\_DR} = \sum_{t=1}^{T'} (f_{\text{BIDR}} |P_{\text{BIDR},t}| + f_{\text{BTIDR}} |P_{\text{BTIDR},t}|) \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $T'$  为日内调度周期时段数;  $P_{Wp,t}^{\text{day-in}}, P_{Pp,t}^{\text{day-in}}$  分别为日内风、光预测功率;  $f_{\text{BIDR}}, f_{\text{BTIDR}}$  分别为 B 类 IDR 与 TIDR 资源的单位调用成本系数;  $P_{\text{BIDR},t}, P_{\text{BTIDR},t}$  分别为  $t$  时段 B 类 IDR 与 TIDR 资源的调用量。

### 2.2.2 约束条件

日内调度的运行约束因为决策变量与时间尺度的变化<sup>[15,16]</sup>, 式(13), (14)中碳捕集燃煤机组的爬坡约束与旋转备用约束内的  $R_{gj,up}$  变为  $R_{gj,up}/4$ , 式(8)中燃气轮机组的爬坡约束内的  $R_{gj,down}$  改变为  $R_{gj,up}/4$ , 系统的功率平衡约束为

$$\begin{cases} P_{\text{AIDR},t} + P_{\text{BIDR},t} + P_{\text{el2},t} + P_{\text{cb},t} = P_{\text{Ni},t} + P_{W,t} + P_{P,t} + P_{gj,t} + P_{\text{PDR},t} \\ P_{\text{ATIDR},t} + P_{\text{BTIDR},t} + P_{\text{il2},t} = H_{gj,t} + H_{cb,t} \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $P_{\text{PDR},t}$  为日前调度优化后的 PDR 资源;  $P_{\text{el2},t}$  为日内调度时段预测电负荷;  $P_{\text{il2},t}$  为日内调度时段预测热负荷。

## 2.3 实时调度模型

### 2.3.1 目标函数

实时调度以运行成本最小为目标, 主要以 C 类 IDR 与 C 类 TIDR 资源作为主要决策变量, 同时兼顾碳捕集设备的能耗转移约束对目标函数进行优化, 即:

$$F_{\text{r-time}} = \min(C_g + C_{cb} + C_{c3} + C_{ct} + C_{ces} + C_{C\_DR}) \quad (20)$$

式中:  $F_{\text{r-time}}$  为实时调度计划总成本;  $C_{c3}$  为实时调度弃风弃光惩罚成本;  $C_{C\_DR}$  为 C 类 IDR 资源与 TIDR 资源的调用总成本。

$$\begin{cases} C_{c3} = \sum_{t=1}^{T'} f_c (P_{Wp,t}^{\text{r-time}} + P_{Pp,t}^{\text{r-time}} - P_{W,t} - P_{P,t}) \\ C_{C\_DR} = \sum_{t=1}^{T'} (f_{\text{CIDR}} |P_{\text{CIDR},t}| + f_{\text{CTIDR}} |P_{\text{CTIDR},t}|) \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $T'$  为实时调度周期时段数;  $P_{Wp,t}^{\text{r-time}}, P_{Pp,t}^{\text{r-time}}$  分别为实时风、光预测功率;  $f_{\text{CIDR}}, f_{\text{CTIDR}}$  分别为 C 类 IDR 与 TIDR 资源的单位调用成本系数;  $P_{\text{CIDR},t}, P_{\text{CTIDR},t}$  分别为  $t$  时段 C 类 IDR 与 TIDR 资源的调用量。

### 2.3.2 约束条件

实时调度阶段的运行约束因为决策变量改变, 系统的功率平衡约束发生改变, 表示为

$$\begin{cases} P_{\text{AIDR},t} + P_{\text{BIDR},t} + P_{\text{CIDR},t} + P_{\text{el3},t} + P_{\text{cb},t} = P_{\text{Ni},t} + \\ P_{W,t} + P_{P,t} + P_{gj,t} + P_{\text{PDR},t} \\ P_{\text{ATIDR},t} + P_{\text{BTIDR},t} + P_{\text{CTIDR},t} + P_{\text{il3},t} = H_{gj,t} + H_{cb,t} \end{cases} \quad (22)$$

式中:  $P_{\text{el3},t}$  为实时调度  $t$  时段预测电负荷;  $P_{\text{il3},t}$  为实时调度  $t$  时段预测热负荷。

虽然时间尺度发生改变, 但是实时调度阶段不再考虑燃煤机组的出力变化, 因此爬坡约束及旋转备用约束与日内调度相同, 式(8)中燃气轮机组的爬坡约束内的  $R_{gj,down}$  改变为  $R_{gj,up}/12$ 。同时, 为了配合实时调度阶段风、光功率与负荷的预测误差, 碳捕集设备需要通过贫、富液储存器进行能耗调节, 调节能耗的运行约束可以表示为

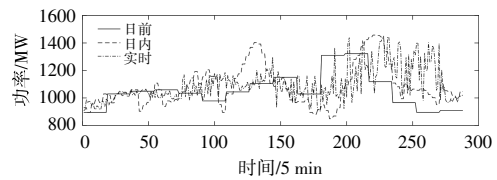
$$-k\lambda(\mu_1 + \mu_2)\eta_{gi}P_{g\text{max}} - P_{\text{O}i,t} \leq \Delta P_{\text{Ni},t} \leq P_{\text{O}i,t} \quad (23)$$

式中:  $\Delta P_{\text{Ni},t}$  为  $t$  时段碳捕集燃煤机组  $i$  的净出力实时调整量。

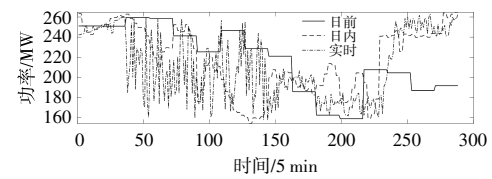
## 3 算例仿真

### 3.1 算例模型概述

本文所选取的仿真系统内含上述各类设备, 系统主要包含风电机组、光伏、燃气轮机、电锅炉各 1 台, 400, 455 MW 以及 200 MW 的火电机组各一台并进行了低碳化改造。以典型日负荷曲线与风、光出力曲线为基础进行实验仿真, 电、热负荷与新能源功率曲线如图 3 所示。



(a)电负荷



(b)热负荷

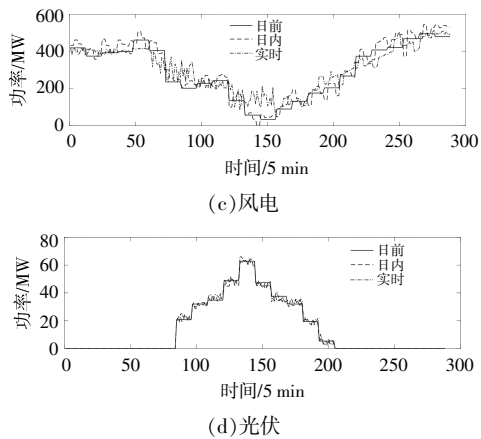


图3 负荷与新能源功率曲线

Fig.3 Load and new energy power curve

本文在相同运行场景下设置3个调度模型进

行对比分析,分别采用 Gurobi 进行求解,3个模型分别如下:

①计及需求响应的含综合灵活运行模式碳捕集燃煤电厂的多能源系统多时间尺度调度, $\alpha_i$ 为0.25;

②计及新能源最优消纳与需求响应的含综合灵活运行模式碳捕集燃煤电厂的多能源系统多时间尺度调度, $\alpha_i$ 为0.25;

③计及新能源最优消纳与需求响应的含综合灵活运行模式碳捕集燃煤电厂的多能源系统多时间尺度调度,设置 $\alpha_i$ 为浮动值, $\alpha_i$ 的取值由碳捕集设备的能耗调整量决定。

### 3.2 算例仿真分析

各模型在各阶段的运行结果见表1。

表1 各模型调度结果

Table 1 Scheduling results of each model

成本/元	日前调度			日内调度			实时调度		
	模型1	模型2	模型3	模型1	模型2	模型3	模型1	模型2	模型3
煤耗成本	311 389.4	281 187.6	239 770.7	1 723 289.5	1 495 134.5	1 581 238.1			
启停成本	230 716.3	208 935.1	164 076.3						
燃气轮机	189 078.8	193 788.5	174 712.0	891 377.4	675 589.2	629 308.4	1 956 482.1	1 901 343.5	1 822 532.4
电锅炉	79 267.3	0	0	109 731.1	0	0	107 431.1	0	0
惩罚成本	10 787.1	3 719.3	0	18 823.1	8 912.1	0	28 745.5	10 312.1	0
碳交易	-106 233.4	-126 921.1	-146 391.0	-55 371.9	-59 339.6	-613 806.4	1 857 834.1	-1 866 492.1	-2 014 684.2
碳捕集成本	20 908.2	26 048.5	29 901.5	95 809.4	99 807.1	122 804.7	337 730.5	351 734.1	398 202.9
需求响应成本	4 514.5	4 407.8	4 643.6	8 760.3	9 526.7	8 270.6	11 562.5	12 719.0	12 091.1
综合成本	740 428.2	591 165.7	466 713.1	2 792 418.9	2 229 630	1 727 815.4	584 117.6	409 616.6	218 142.2

由表1可知,在3个调度阶段,模型3的综合成本均小于模型1与模型2,在日前、日内、实时阶段分别下降了36.97%、38.12%、62.65%与21.05%、22.51%、46.74%,证明了本文所提出的模型在经济调度层面的优势。因为新能源最优消纳与净负荷波动的限制约束,新能源的接入降低了碳捕集燃煤机组的净出力,为保证峰时净负荷波动满足约束,模型2与模型3减小了电锅炉的耗电量,同时经3类TIDR资源所调节的热负荷曲线也趋于平滑,使得燃气轮机可以平稳进行热能的供给,弥补了电锅炉的热功率缺额。燃气轮机的电能稳定供应也减轻了燃煤机组的供能压力,降低了启、停成本与煤耗成本,进一步验证了本文模型在低碳运行方面的优势。

与模型1相比,模型2的碳捕集成本分别提高了5 140.3、3 997.7、14 003.6元,同时模型2的

碳交易收益分别增加了20 687.7、3 967.7、8 658元,弃风弃光惩罚成本分别下降了7 067.8、9 911、18 433.4元。虽然模型2的碳捕集成本有所提高,但因为模型2引入的新能源最优消纳策略,弃风弃光惩罚成本降低,并通过与碳捕集设备的配合使得碳排放量降低,碳交易收益得到了提升;相较于模型2,模型3将烟气分流比设置为浮动值,碳交易收益提高了19 469.9、554 466.8、148 192.1元,并且3个调度阶段的弃风、弃光量明显降低,验证了烟气分流比配合碳捕集能耗进行改变的策略对降低碳排放量及系统成本具有积极意义。

针对各模型在各阶段的机组运行情况与能耗情况进行细致分析。因为各调度阶段的机组出力原理相似,因此,对机组运行情况(以模型3为例)进行分析,其日前、日内、实时调度阶段的电源与热源机组的出力情况如图4所示。

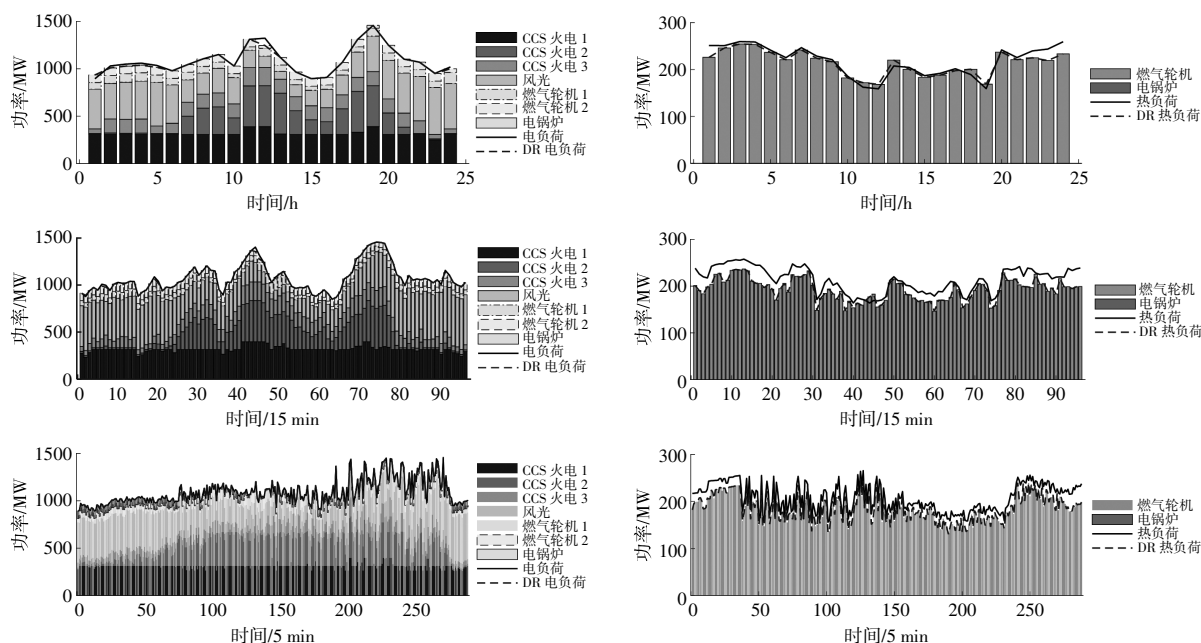


图4 各机组出力结果

Fig.4 The output results of each unit

针对电能需求情况,在日前调度阶段,模型3通过PDR对负荷削峰填谷,A类IDR对负荷高峰时期进行峰值削减,负荷需求由负荷高峰转移至负荷低谷时期,促进了风、光功率的消纳,即负荷低谷时期高碳排放的燃煤机组被该时段应被弃掉的风、光功率所替代。同时,A类IDR所削减的峰时负荷量使得负荷需求量下降,碳捕集燃煤机组可以提高碳捕集设备的运行能耗,降低燃煤机组净出力进而提供部分上旋转备用,分担燃煤机组的备用容量,减少了燃煤机组的启、停次数,减小了系统的运行成本与碳排放量,验证了本文所提模型在低碳经济运行方面的优势。

由上述分析可知,在日前调度阶段,模型碳排差异主要取决于风、光功率的消纳水平,其直接影响着被替代的燃煤机组出力,弃风、弃光量越少,被替代的燃煤机组出力越多,碳排放量越少。各模型负荷需求大部分由碳捕集燃煤机组净出力、风光并网功率满足,小部分由燃气轮机输出功率供给,又因为燃气轮机碳排较低,故仅需对比其碳捕集燃煤机组净出力即可分析系统的弃风、弃光情况。由表1可知,模型3的弃风、弃光惩罚成本为0,故系统消纳了全部的风、光功率。

图5为日前阶段各模型碳捕集燃煤机组的净出力对比。

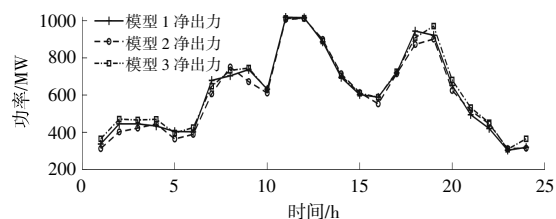


图5 净出力对比

Fig.5 Comparison chart of net output

由图5可知,与模型3的风、光完全消纳相比,模型1与模型2在24:00-10:00与18:00-24:00时段存在未完全消纳的风、光功率,两者与模型3净出力的差值即为模型1与模型2的弃风、弃光量。

由前文可知,在日内与实时阶段,通过B类IDR,C类IDR资源对负荷需求进行调整,日内至实时阶段的负荷曲线逐渐趋于平滑,即负荷峰谷差减小,碳捕集燃煤机组的净出力波动也相应减小。因为碳捕集燃煤机组净出力与其内部碳捕集能耗密切相关,所以对应阶段的碳捕集燃煤机组内部功率平衡与能耗情况也将发生相应改变,碳捕集燃煤电厂内部功率平衡与模型3的碳捕集能耗如图6所示。

由图6可知,模型1~3通过综合灵活运行模式碳捕集燃煤电厂内贫、富储液罐对碳捕集设备

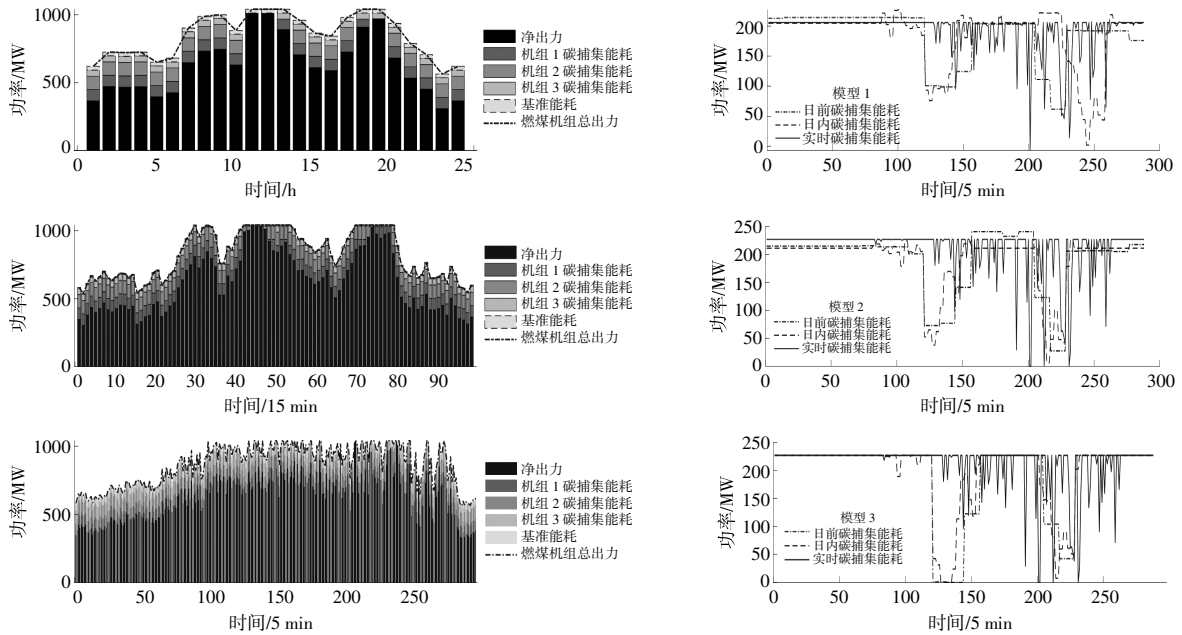


图 6 碳捕集能耗与功率平衡图

Fig.6 Diagram of carbon capture energy consumption and power balance

能耗的高时移性降低了碳捕集能耗峰谷差。同时, 3 类 IDR 资源与 PDR 资源对负荷进一步削峰填谷, 负荷需求峰谷差进一步减小, 增加了碳捕集设备碳捕量的裕度, 直接改善了系统的低碳性。相对于模型 1 与模型 2, 模型 3 未限制烟气分流比, 其低谷时期能耗提升, 峰值时期能耗降低, 碳捕集能耗的峰谷差进一步减小, 进一步验证了本文所提出的模型在系统低碳与经济运行方面上更具优势。综合上述分析, 并结合表 1 所示的碳交易收益

情况, 模型 3 碳排量较低的原因主要是通过浮动变化的烟气分流比数值弥补了综合灵活运行模式的碳捕集电厂在负荷峰时上旋转备用能力差的局限, 提升了碳捕能力与净出力调节能力, 减小了弃风、弃光现象, 直接降低了碳排机组运行造成的碳排量。综上, 系统内源荷间相互协调获得了经济效益与碳排量均优的效果。

针对烟气分流比进行分析(模型 3), 烟气分流比与各类能耗、净出力的关系如图 7 所示。

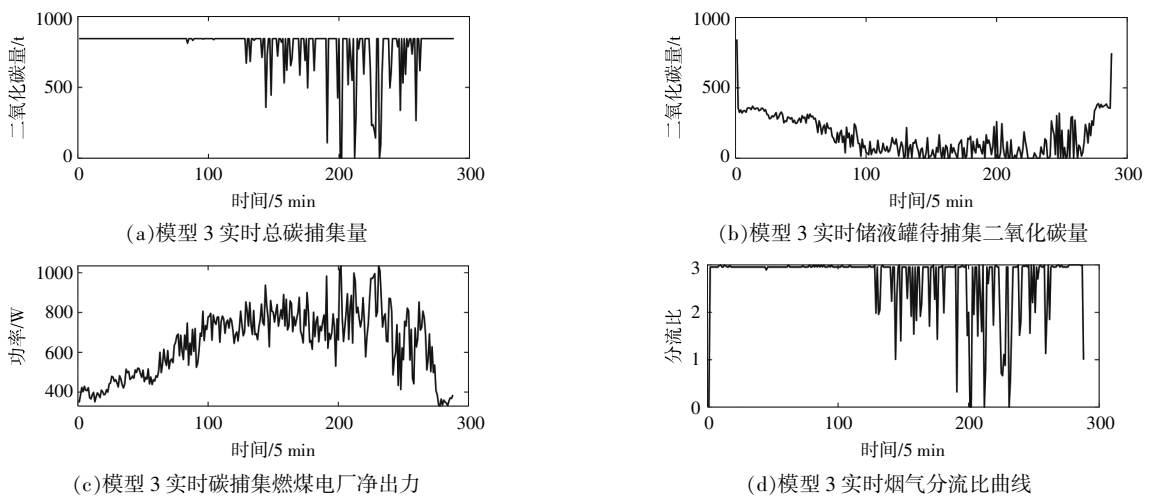


图 7 烟气分流比、碳捕量与净出力关系

Fig.7 The relationship between flue gas split ratio, carbon capture and net output

由图 7 可知, 烟气分流比与  $\text{CO}_2$  捕获量、净出力存在耦合关系, 究其原因是烟气分流比的大小

决定了进入贫、富储液罐的烟气量,也决定了碳捕集能耗的调节区间。若设置烟气分流比为定值约束,则在实时调度阶段碳捕集能耗调节区间存在限制,时移性降低;若将烟气分流比设为浮动值,则在实时调度阶段的碳捕集能耗只存在其自身上、下限的约束,时移性提高。因此,为得到最优的烟气分流比,烟气分流比要根据碳捕集能耗的时移性进行改变,保证运行成本最低、风光高比例消纳、碳交易收益最高。如在实时调度阶段的负荷峰值时段,风、光输出功率相对较低,此时烟气分流比降低,流入碳捕集设备烟气量提高,系统碳排降低,碳交易收益提高。而因为碳捕集燃煤电厂的净出力需要提高,此时贫富储液罐内待捕获的 $\text{CO}_2$ 量提高,系统储存而未解析 $\text{CO}_2$ ,满足了净出力增加的需求。

#### 4 结论

本文提出了一种基于新能源最优消纳与电热需求响应的含碳捕集电厂的多能源系统多时间尺度调度模型,并通过仿真实验证明了该模型的有效性,具体结论如下。

①综合灵活运行模式的碳捕集燃煤电厂可以实现碳捕集能耗的灵活时移,通过更广泛的净出力调节范围可在降低机组启、停次数的情况下保留较高的备用容量,进而提高新能源消纳能力,降低系统整体碳排放量。

②分别在日前、日内、实时调度阶段考虑PDR资源、三类IDR与TIDR资源可以有效平滑电、热负荷峰谷差。热负荷峰谷差的降低保证了单类热源机组稳定平缓供能,提高了机组的有效供能率;电负荷峰谷差的降低使碳捕集电厂在负荷高峰时段减轻了供电压力,为碳捕集设备预留更多能耗备用,提高风光等新能源利用率,从而实现了降低系统碳排放的目的。

③通过碳捕集能耗调整区间对烟气分流比进行限定,解除了碳捕集能耗存在的调整约束,配合新能源最优消纳策略深化了碳捕集燃煤电厂的调峰区间,进一步保障了系统的低碳经济运行。

#### 参考文献:

[1] Martens P, Delarue E, Dhaeseleer W. A mixed integer linear programming model for a pulverized coal plant with post-combustion carbon capture [J]. IEEE

Transactions on Power Systems, 2012, 27: 741-751.

- [2] 陈启鑫,季震,康重庆,等.碳捕集电厂不同运行方式的电碳特性分析[J].电力系统自动化,2012,36(18):109-115.
- [3] 张又中,张兴平,檀勤良.考虑碳捕集和电转气技术耦合的多能互补系统协同规划[J].可再生能源,2021,39(8):1107-1116.
- [4] 周任军,孙洪,唐夏菲,等.双碳量约束下风电-碳捕集虚拟电厂低碳经济调度[J].中国电机工程学报,2018,38(6):1675-1683,1904.
- [5] 汤翔鹰,胡炎,耿琪,等.考虑多能灵活性的综合能源系统多时间尺度优化调度[J].电力系统自动化,2021,45(4):81-90.
- [6] 崔杨,曾鹏,王铮,等.考虑碳捕集电厂能量转移特性的弃风消纳多时间尺度调度策略[J].中国电机工程学报,2021,41(3):946-961.
- [7] 杨冬锋,徐扬,姜超.考虑多类型需求响应的电-热联合系统多时间尺度协调调度[J].太阳能学报,2021,42(10):282-289.
- [8] 周任军,肖钧文,唐夏菲,等.电转气消纳新能源与碳捕集电厂碳利用的协调优化 [J]. 电力自动化设备,2018,38(7):61-67.
- [9] 陈启鑫,康重庆,夏清.碳捕集电厂的运行机制研究与调峰效益分析 [J]. 中国电机工程学报,2010,30(7):22-28.
- [10] 王睿,孙秋野,张化光.信息能源系统的信-物融合稳定性分析[J].自动化学报,2023,49(2):307-316.
- [11] 卢志刚,郭凯,闫桂红,等.考虑需求响应虚拟机组和碳交易的含风电电力系统优化调度[J].电力系统自动化,2017,41(15):58-65.
- [12] 魏震波,魏平桢,郭毅,等.考虑需求侧管理和碳交易的电-气互联网络分散式低碳经济调度[J].高电压技术,2021,47(1):33-47.
- [13] 原睿萌,范绚然,姬广龙,等.计及价格型需求响应负荷响应量与风电出力相关性的含风电电力系统优化调度研究[J].可再生能源,2018,36(3):429-437.
- [14] 李琰,周明,李庚银.考虑相关性的含风电电力系统日前灵活性调度方法[J].可再生能源,2019,37(4):564-572.
- [15] 辛晓刚,王彪,李昕,等.考虑风电消纳能力的含风电场电力系统多目标优化调度研究[J].可再生能源,2016,34(1):49-55.
- [16] 江友华,屈靖洁,曹以龙,等.考虑风电-负荷及综合需求响应不确定性的能量枢纽双层优化运行及配置方法[J].电测与仪表,2022,59(3):117-124,162.

## Research on multi-time scale optimal scheduling considering optimal consumption of new energy and carbon capture power plants

Jiang He<sup>1,2</sup>, Zhou Hang<sup>1,2</sup>, Zhao Yan<sup>1,2</sup>, Sun Xiaoyu<sup>1,2</sup>, Xie Xiangpeng<sup>3</sup>

(1.School of Renewable Energy, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China; 2.Key Laboratory of Regional Multi-energy System Integration and Control of Liaoning Province, Shenyang 110136, China; 3.Institute of Advanced Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Given the increasing proportion of new energy power generation, the deepening of electric-thermal coupling, and the high carbon emissions of coal-fired units, a multi-time-scale scheduling model of multi-energy system including carbon capture power plants is established based on new energy optimal consumption and electric-thermal demand response. First, the carbon capture coal-fired power plant model with integrated flexible operation mode is established. It can reduce the carbon emissions of the system and improve the flexibility of coal-fired units to cooperate with new energy sources. Second, the different demand response resources are applied to the load demand of different time scales, which can reduce the load peak-to-valley difference and cooperate with the optimal consumption strategy of new energy to explore the low-carbon characteristics of carbon capture based coal-fired power plants. Third, considering multiple types of power and heat source equipment and taking the minimization of system operating costs as the objective function, a day-ahead-intraday-real-time multi-time-scale scheduling model is established for source-load coordination. It can optimize the load distribution and unit output plan under different time scales, and improve the new energy consumption capacity. Finally, the effectiveness and feasibility of the model are verified by experimental simulation results.

**Keywords:** carbon capture; optimal consumption; carbon emissions; multi-time scale; demand response