

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.03.009

## 计及碳捕集的含新能源电网低碳调度策略

舒征宇<sup>1</sup>, 贾可凡<sup>1</sup>, 李黄强<sup>2</sup>, 杨世勇<sup>2</sup>, 姚钦<sup>2</sup>, 王灿<sup>1</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 国网湖北省电力有限公司宜昌供电公司, 湖北 宜昌 443000)

**摘要:**在碳达峰、碳中和背景下,碳捕集机组可有效降低电力系统碳排放。但是在含新能源的电网中,碳捕集机组频繁参与系统调峰会降低系统的经济性。为此,文中首先在分析灵活运行碳捕集机组运行原理和碳交易工作机制的基础上,提出引入抽水蓄能机组辅助碳捕集机组参与系统调峰,以促进风电消纳,使碳捕集机组更专注捕碳工作并降低系统碳排放量;然后针对风电并网后的不确定性,引入模糊理论,将系统功率约束中风电和负荷用模糊参数表示,使约束转变为基于可信性的模糊机会约束,运用清晰等价类将模糊机会约束清晰化;接着以系统净收益最高为目标函数,综合考虑机组上网收益、抽蓄收益、碳交易收益、运行成本以及系统安全性约束等因素,构建碳捕集-抽蓄联合运行模型;最后通过 CPLEX 求解模型。仿真结果表明,引入抽蓄机组后系统净收益提高 7.62%,碳排放降低 7.01%。引入抽水蓄能机组能够兼顾系统的经济性和环保性。

**关键词:**抽水蓄能;碳捕集机组;碳交易收益;模糊机会约束;清晰等价类;低碳经济调度

**中图分类号:** TM73

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2024)03-0078-10

### 0 引言

为应对全球变暖,采用碳捕集与封存(carbon capture and storage, CCS)技术,将火电机组改装成碳捕集机组,是当前实现电力低碳化的有效手段<sup>[1-2]</sup>。国际能源署研究报告指出,CCS 是唯一能够在发电和工业过程中大幅减少化石燃料排放的解决方案,预计 2060 年全球累计 14% 的碳减排量将归功于 CCS<sup>[3-4]</sup>。现阶段我国能源生产结构仍以火电机组为主体,为了从源头处解决碳排放问题,还需加快开发清洁能源建设进程。

我国有着非常丰富的风能资源,然而,由于风力发电具有不稳定性及反调峰特性,其大规模接入电网后会增加系统的不确定性,增大净负荷的峰谷差<sup>[5-7]</sup>,导致碳捕集机组频繁参与系统调峰,增加系统的燃煤成本和启停成本,碳捕集机组运行经济性和环保性都将下降,不利于“双碳”目标的实现<sup>[8-10]</sup>。而抽水蓄能电站具有容量大、技术成熟、启停迅速等优点,可有效参与系统调峰。在电源侧引入抽水蓄能机组辅助碳捕集机组参与调峰,可在提高风电消纳水平的基础上控制碳捕集机组的煤耗成本,从源头上减少 CO<sub>2</sub> 排放。

目前,已有学者分别针对火电-抽蓄联合运行以及碳捕集机组进行研究。文献[11]考虑抽蓄-火电联合调峰分层调用,但并未考虑火电机组的碳排放

问题。文献[12]采用双层模型优先保证风蓄联合运行收益最大,但只是采用机会约束平衡系统的安全性和经济性,并没有对风电模糊处理。文献[13-15]利用碳捕集机组对风电调峰,并引入金融理论条件风险价值(conditional value at risk, CvaR)对系统经济性进行优化。文献[16]在虚拟电厂中引入碳捕集和电转气设备,深入研究了碳流循环和碳捕集与电转气设备的协同运行机理,促使更低碳排。文献[17]建立了考虑不确定性的新能源电厂与碳捕集电厂联合运行模型,但仅利用碳捕集电厂调峰,经济性较差且灵活性不足。文献[18-19]在不同时间尺度下研究了分流式碳捕集机组对风电不确定性的抑制作用,但是分流式碳捕集电厂并不能时移碳捕集能耗,在负荷高峰时段机组仍面临较大的调峰压力。文献[20]采用综合灵活运行的碳捕集机组进行调峰,实现了能耗时移,但在负荷高峰时段,碳捕集须增加净出力以满足负荷需求,此时捕碳运行功率受限,无法捕集更多的 CO<sub>2</sub>,对系统环境不友好。上述文献着重研究火电-抽蓄机组以及综合灵活运行的碳捕集机组参与新能源调峰的模式,碳捕集电厂单独运行时在负荷高峰时段存在旋转备用不足、频繁爬坡降低机组运行效率、系统无法专注于捕碳工作等问题<sup>[21]</sup>,并且引入碳捕集设备后,在保持较高碳捕集能耗的工况下如何兼顾电力系统经济性与环保性的研究较少。利用抽蓄机组快速灵活调峰可有效解决碳捕集机组备用不足,期望解决碳捕集机组工作状态的限制。目前尚未有

收稿日期:2023-12-14;修回日期:2024-02-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52107108)

学者针对抽蓄机组和碳捕集机组之间的联合运行机理展开研究。

综上,为平衡电力系统的经济性与环保性,充分挖掘碳捕集机组的捕碳能力,在降低机组碳排放的同时利用抽蓄机组的快速调峰能力,减少因碳捕集机组频繁调峰造成的经济损失,并提高清洁能源的消纳比例,文中建立了计及碳交易机制的含风电机组、碳捕集机组和抽水蓄能联合运行的低碳调度模型。首先引入综合灵活运行的碳捕集机组运行原理和碳交易工作机制,并在其基础上提出利用抽水蓄能机组辅助碳捕集机组参与系统调峰的方案;其次针对风电出力和负荷的不确定性,引入模糊机会约束,将风电出力和负荷用模糊参数表示,并将其约束条件转化为清晰等价类。最后,通过IEEE 30节点系统进行仿真分析,验证所提模型的经济性和环保性。

## 1 计及碳交易的抽蓄-碳捕集联合调度策略

### 1.1 灵活运行的碳捕集原理

碳捕集技术是用来吸收常规火电机组产生的二氧化碳并以特定方式储存起来以避免其排放到外界的技术。目前碳捕集技术可分为三大类:富氧燃烧捕集技术、燃烧前碳捕集技术和燃烧后碳捕集技术。文献[22-23]指出燃烧后碳捕集技术更为成熟且成本优势明显。

燃烧后碳捕集机组是由常规火电机组与碳捕集设备组合而成,典型碳捕集设备的主要工作流程包括吸收、再生和压缩3个环节,碳捕集系统的主要能耗用于再生和压缩环节。

灵活运行的碳捕集系统流程为:含CO<sub>2</sub>的烟气由塔底进入吸收塔,贫液吸收CO<sub>2</sub>并转化为富液并放入富液储液罐中储存,此时储液罐相当于一个储能设备。系统根据负荷情况调节富液储液罐的流入流出量,来控制再生塔和压缩机正在处理的CO<sub>2</sub>量,进而可改变碳捕集机组的净输出功率。含大量CO<sub>2</sub>的富液通过换热器进入再生塔并加热,加热后溶液与CO<sub>2</sub>分离,最后将分离后的CO<sub>2</sub>经压缩机压缩以便运输和封存,而分离CO<sub>2</sub>后的贫液则重新返回吸收塔进行下一阶段的捕集。碳捕集系统结构如图1所示。

碳捕集机组功率关系表达式如下:

$$P_{GN,i,t} = P_{G,i,t} - P_{CC,i,t} \quad (1)$$

$$P_{CC,i,t} = P_{B,i} + P_{op,i,t} \quad (2)$$

式中: $P_{G,i,t}$ 、 $P_{GN,i,t}$ 分别为 $t$ 时段碳捕集机组 $i$ 的总发电出力和净输出功率; $P_{CC,i,t}$ 为 $t$ 时段碳捕集机组

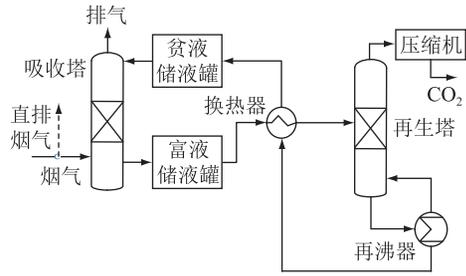


图1 碳捕集系统结构

Fig.1 Structure of the carbon capture system

$i$ 的捕集功率,其由机组的运行功率 $P_{op,i,t}$ 和固定功率 $P_{B,i}$ 构成, $P_{B,i}$ 的数值固定且在碳捕集能耗中占比很小, $P_{op,i,t}$ 则正比于碳捕集机组 $i$ 正在处理的CO<sub>2</sub>量 $E_{deal,i,t}$ 。

$$P_{op,i,t} = m_c E_{deal,i,t} \quad (3)$$

$$E_{deal,i,t} = E_{CC,i,t} + \beta \delta E_{G,i,t} \quad (4)$$

$$E_{G,i,t} = e_i P_{G,i,t} \quad (5)$$

式中: $m_c$ 为处理单位质量CO<sub>2</sub>的运行能耗; $\beta$ 为机组的烟气分流比,表示火电机组产生的烟气流入碳捕集设备的比例; $\delta$ 为CO<sub>2</sub>捕集率; $E_{G,i,t}$ 为 $t$ 时段碳捕集机组 $i$ 的CO<sub>2</sub>产生量; $E_{CC,i,t}$ 为 $t$ 时段碳捕集机组 $i$ 的储液罐向再生塔提供的CO<sub>2</sub>量; $e_i$ 为碳捕集机组 $i$ 的单位电量碳排放强度。

由式(1)一式(5)可推出碳捕集机组的净输出功率为:

$$P_{GN,i,t} = (1 - m_c \beta \delta e_i) P_{G,i,t} - P_{B,i} - m_c E_{CC,i,t} \quad (6)$$

由式(6)可知,加入储液罐后,碳捕集机组的净输出功率与储液罐向再生塔提供的CO<sub>2</sub>量相关。改变储液罐提供的CO<sub>2</sub>量,即可优化碳捕集机组的运行能耗和净出力。因碳捕集系统的再生塔存在最大运行状态约束,故在塔内处理的CO<sub>2</sub>量存在上限,进一步可推算出富液储液罐可提供的CO<sub>2</sub>量约束如下:

$$- \beta \delta e_i P_{G,i,t} \leq E_{CC,i,t} \leq \eta \delta e_i P_{G,i,\max} - \beta \delta e_i P_{G,i,t} \quad (7)$$

式中: $\eta$ 为再生塔最大工作状态系数; $P_{G,i,\max}$ 为碳捕集机组 $i$ 的最大功率。

用 $E_{dis}$ 表示 $t$ 时段碳捕集机组 $i$ 的CO<sub>2</sub>净排放量:

$$E_{dis} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} [(1 - \beta \delta) e_i P_{G,i,t} - E_{CC,i,t}] \quad (8)$$

式中: $N_G$ 为碳捕集机组数; $T$ 为一天内时段总数。

### 1.2 碳交易机制

火电厂引入碳捕集设备形成碳捕集电厂后会减少CO<sub>2</sub>排放,在低碳电力调节中考虑碳交易机制

后,电厂可将其剩余碳排放配额售卖以提高自身收益,文中 CO<sub>2</sub>排放量全部来自碳捕集机组。传统火电机组的碳排放配额分配原则以无偿分配为主,有偿分配为辅<sup>[24]</sup>。针对火电机组无偿分配的碳排放配额计算方法有历史法和基准线法,文中采用基准线法。系统的碳排放额度及碳交易收益为:

$$E_D = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} \lambda P_{G,i,t} \quad (9)$$

$$F_{\text{trade}} = \sigma(E_D - E_{\text{dis}}) \quad (10)$$

式中:  $E_D$  为碳捕集机组分配得到的碳排放额度;  $\lambda$  为碳捕集机组单位功率的碳排放配额;  $F_{\text{trade}}$  为碳交易收益;  $\sigma$  为碳交易价格。

式(10)表示在规定时期内,若碳捕集电厂的碳排放量小于碳配额,可将剩余的碳配额交易以获得收益;若碳捕集电厂的碳排放量大于碳配额,则必须额外购买超出的碳排放额度。

### 1.3 碳捕集和抽蓄机组联合运行策略

因风电的反调峰特性,在负荷低谷时期为保证系统安全运行,会产生一定量的弃风,而负荷高峰时段风电出力不足,为弥补功率缺额,需要碳捕集机组提高净出力以满足功率平衡,碳捕集机组面临较大的上旋转备用压力,此时机组捕碳能耗受限,无法完全捕集自身产生的大量 CO<sub>2</sub>,系统的环保性较差。因抽蓄机组具有容量大、启停迅速等特点,在系统中引入抽蓄机组后可削弱风电的反调峰特性,在负荷低谷时段抽蓄机组处于抽水工况消纳弃风,在负荷高峰时段抽蓄机组发电以分担碳捕集机组的调峰压力,碳捕集机组能有更多的能耗裕度进行捕碳工作,减少自身的 CO<sub>2</sub> 排放。抽蓄机组的引入还可时移风电机组出力,提高清洁能源上网占比,兼顾了环境效益与经济效益。

## 2 碳捕集与抽蓄联合运行的低碳调度模型

文中建立了考虑碳交易机制的风电-碳捕集-抽蓄联合运行的低碳调度模型,以系统净收益最大为目标函数,综合考虑碳捕集机组的燃料成本、启停成本、风电运行成本、各机组上网收益、调用抽蓄收益以及碳交易收益。约束条件包括系统约束(备用约束及功率平衡约束)、机组约束(运行特性、出力上下限、烟气分流比约束及储液罐容量约束)、抽蓄库容约束和网络传输约束。联合低碳调度流程图如图2所示。

### 2.1 目标函数

以系统净收益最大为目标,目标函数为:

$$\max F = \sum_{t=1}^T (F_{S,t} + F_{H,t} - F_{C,t}) + F_{\text{trade}} \quad (11)$$

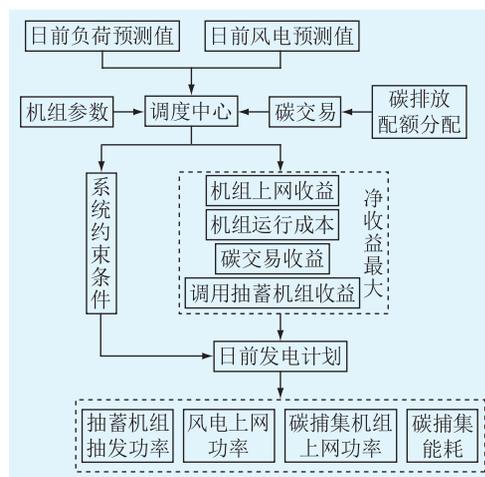


图2 低碳调度流程

Fig.2 Flow chart of low-carbon dispatching

式中:  $F$  为系统净收益;  $F_{S,t}$  为  $t$  时段碳捕集机组和风电机组上网收益;  $F_{H,t}$  为  $t$  时段调用抽蓄机组收益;  $F_{C,t}$  为  $t$  时段机组运行成本(包括碳捕集机组燃料成本、启停成本和风电运维成本)。

(1) 风电-碳捕集机组上网收益。

$$F_{S,t} = \sum_{i=1}^{N_G} K_i (P_{GN,i,t} + P_{w,t}) \Delta T \quad (12)$$

式中:  $K_i$  为  $t$  时段机组的上网电价;  $P_{w,t}$  为  $t$  时段风电功率;  $\Delta T$  为调度时间间隔。

(2) 调用抽蓄机组收益。调用抽蓄机组的收益为抽蓄机组的电量效益与启停损耗成本之差:

$$F_{H,t} = G_{h,t} - S_{h,t} \quad (13)$$

$$G_{h,t} = K_{hg} P_{hg,t} \Delta T - K_{hp} P_{hp} \Delta T \quad (14)$$

$$S_{h,t} = [y_{g,t}(1 - y_{g,t-1}) + y_{p,t}(1 - y_{p,t-1})] C_h + [y_{g,t-1}(1 - y_{g,t}) + y_{p,t-1}(1 - y_{p,t})] C_h \quad (15)$$

式中:  $G_{h,t}$  为  $t$  时段抽蓄机组电量效益;  $S_{h,t}$  为  $t$  时段抽蓄机组的启停损耗成本;  $P_{hg,t}$  为  $t$  时段抽蓄机组的发电功率;  $P_{hp}$  为抽蓄机组的抽水功率;  $K_{hg}$  为抽蓄机组的上网电价;  $K_{hp}$  为抽蓄机组的抽水电价;  $y_{g,t}$ 、 $y_{p,t}$  分别为表征  $t$  时段机组是否处于发电工况、抽水工况的布尔变量;  $C_h$  为抽蓄机组单次启停费用。

(3) 机组运行成本。机组运行成本由碳捕集机组运行成本  $S_{G,t}$  和风电运行成本  $S_{w,t}$  组成:

$$F_{C,t} = S_{G,t} + S_{w,t} \quad (16)$$

$$S_{G,t} = \sum_{i=1}^{N_G} [f_i(P_{G,i,t}) + S_i I_{i,t} (1 - I_{i,t-1})] \quad (17)$$

$$f_i(P_{G,i,t}) = (a_i P_{G,i,t}^2 + b_i P_{G,i,t} + c_i) \Delta T \quad (18)$$

$$S_{w,t} = C_w P_{w,t} \Delta T \quad (19)$$

式中:  $f_i(P_{G,i,t})$  为  $t$  时段碳捕集机组  $i$  的发电成本函数;  $S_i$  为机组  $i$  的启停费用;  $I_{i,t}$  为表征  $t$  时段碳捕集

机组  $i$  运行状态的布尔变量;  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  为碳捕集机组  $i$  煤耗成本系数;  $C_w$  为风电成本系数。

## 2.2 约束条件

(1) 碳捕集机组约束。

机组出力上下限约束:

$$P_{G,i,\min} I_{i,t} \leq P_{G,i,t} \leq P_{G,i,\max} I_{i,t} \quad (20)$$

式中:  $P_{G,i,\min}$ 、 $P_{G,i,\max}$  分别为碳捕集机组  $i$  的功率最小值和最大值。

机组爬坡约束:

$$|P_{G,i,t} - P_{G,i,t-1}| \leq \Delta P_{G,i} \quad (21)$$

式中:  $\Delta P_{G,i}$  为碳捕集机组  $i$  的爬坡约束值。

碳捕集烟气分流比约束:

$$\begin{cases} 0 \leq \beta \leq 1 \\ 0 \leq E_{\text{deal},i,t} \leq \delta \eta_e P_{G,i,\max} \end{cases} \quad (22)$$

储液罐的溶液体积可由  $\text{CO}_2$  质量表示:

$$V_{\text{CA},i,t} = \frac{E_{\text{GC},i,t} M_{\text{MEA}}}{M_{\text{CO}_2} \theta \mu_R \sigma_R} \quad (23)$$

式中:  $V_{\text{CA},i,t}$  为  $t$  时段碳捕集机组  $i$  的储液罐释放  $\text{CO}_2$  所需体积;  $M_{\text{MEA}}$  为乙醇胺 (monoethanolamine, MEA) 摩尔质量;  $M_{\text{CO}_2}$  为  $\text{CO}_2$  摩尔质量;  $\theta$  为解析解析量;  $\mu_R$  为溶液浓度;  $\sigma_R$  为溶液密度。

储液罐约束:

$$\begin{cases} V_{\text{CF},i,t} = V_{\text{CF},i,t-1} - V_{\text{CA},i,t} \\ V_{\text{CP},i,t} = V_{\text{CP},i,t-1} + V_{\text{CA},i,t} \\ 0 \leq V_{\text{CF},i,t} \leq V_{\text{CR}} \\ 0 \leq V_{\text{CP},i,t} \leq V_{\text{CR}} \\ V_{\text{CF},i,0} = V_{\text{CF},i,24} \\ V_{\text{CP},i,0} = V_{\text{CP},i,24} \end{cases} \quad (24)$$

式中:  $V_{\text{CF},i,t}$  为  $t$  时段碳捕集机组  $i$  的富液储液罐的溶液含量;  $V_{\text{CP},i,t}$  为  $t$  时段碳捕集机组  $i$  的贫液储液罐的溶液含量;  $V_{\text{CR}}$  为储液罐配置容量;  $V_{\text{CF},i,0}$  为碳捕集机组  $i$  的富液储液罐初始时刻溶液含量;  $V_{\text{CF},i,24}$  为碳捕集机组  $i$  的富液储液罐末时刻溶液含量;  $V_{\text{CP},i,0}$  为碳捕集机组  $i$  的贫液储液罐初始时刻溶液含量;  $V_{\text{CP},i,24}$  为碳捕集机组  $i$  的贫液储液罐末时刻溶液含量。

(2) 风电出力约束。

$$0 \leq P_{w,t} \leq P_{\text{wpre},t} \quad (25)$$

式中:  $P_{\text{wpre},t}$  为  $t$  时段风电功率预测值。

(3) 抽蓄机组约束。

机组功率约束:

$$\begin{cases} y_{g,t} P_{\text{hg},\min} \leq P_{\text{hg},t} \leq y_{g,t} P_{\text{hg},\max} \\ y_{p,t} P_{\text{hp},\min} \leq P_{\text{hp},t} \leq y_{p,t} P_{\text{hp},\max} \\ y_{g,t} + y_{p,t} \leq 1 \end{cases} \quad (26)$$

式中:  $P_{\text{hg},t}$ 、 $P_{\text{hp},t}$  分别为  $t$  时段抽蓄机组的发电、抽水功率;  $P_{\text{hg},\max}$ 、 $P_{\text{hg},\min}$  分别为抽蓄机组发电出力的上、下限值;  $P_{\text{hp},\max}$ 、 $P_{\text{hp},\min}$  分别为抽蓄机组抽水功率的上、下限值。

抽蓄水库水量约束:

$$\begin{cases} V_{\text{h},\min} \leq V_{\text{h},t} \leq V_{\text{h},\max} \\ V_{\text{h},t+1} = V_{\text{h},t} + (\eta_p P_{\text{hp},t} - \eta_g P_{\text{hg},t}) \Delta T \\ V_{\text{h},t_0} = V_{\text{h},t_{\text{end}}} \end{cases} \quad (27)$$

式中:  $V_{\text{h},t}$  为  $t$  时段电站水库库容;  $V_{\text{h},\max}$ 、 $V_{\text{h},\min}$  分别为水库库容上、下限;  $\eta_p$  为机组抽水时段的水量电量转换系数;  $\eta_g$  为机组发电时段的水量电量转换系数;  $V_{\text{h},t_0}$ 、 $V_{\text{h},t_{\text{end}}}$  分别为调度周期初始时段  $t_0$  和末时段  $t_{\text{end}}$  电站水库库容, 在一个周期内抽蓄机组抽发电量保持平衡。

(4) 网络传输约束。

$$-P_{ij,\max} \leq B_{ij}(\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \leq P_{ij,\max} \quad (28)$$

式中:  $P_{ij,\max}$  为节点  $i$  与  $j$  之间传输线路的最大容量;  $B_{ij}$  为节点  $i$  与  $j$  之间的电纳;  $\theta_{i,t}$ 、 $\theta_{j,t}$  分别为  $t$  时段节点  $i$ 、 $j$  的电压相角。

## 3 计及不确定性的低碳优化调度求解

受到气候和地理环境等因素影响, 风电出力具有较强的不确定性, 日前机组出力预测与实际出力相比仍有较大误差, 会造成一定的弃风量。因此, 文中引用风电模糊参数  $\tilde{P}_{w,t}$  和负荷模糊参数  $\tilde{P}_{1,t}$  表征日前风电出力和负荷预测的误差对系统的影响<sup>[25]</sup>。首先将系统功率约束以及备用约束中的风电和负荷用模糊参数替代, 并将其松弛为特定置信水平下的机会约束, 通过置信水平来平衡经济与安全。为求解方便, 将模糊机会约束转化为清晰等价类处理。

### 3.1 含新能源电网的模糊机会约束

约束条件中含有模糊参数的单目标优化问题可表述为:

$$\begin{cases} \max f(\mathbf{x}) \\ \text{s.t. } P\{g(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) \leq 0\} \geq \alpha \end{cases} \quad (29)$$

式中:  $f(\mathbf{x})$  为目标函数;  $P\{\cdot\}$  表示事件的可能性;  $g(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi})$  为约束条件函数;  $\mathbf{x}$ 、 $\boldsymbol{\xi}$  分别为  $n$  维决策向量和模糊参数向量;  $\alpha$  为置信水平。

系统功率平衡可信性机会约束可表示为:

$$P\left\{\tilde{P}_{1,t} - \sum_{i=1}^{N_G} P_{\text{GN},i,t} - \tilde{P}_{w,t} - P_{\text{hg},t} + P_{\text{hp},t} = 0\right\} \geq \alpha \quad (30)$$

系统旋转备用可信性机会约束可表示为:

$$P \left\{ \tilde{P}_{1,t} - \sum_{i=1}^{N_G} \max(P_{GN,i,t}) - \tilde{P}_{w,t} - P_{hg,t} + P_{hp,t} \leq 0 \right\} \geq \alpha \quad (31)$$

式中:  $\max(P_{GN,i,t})$  为  $t$  时段碳捕集机组  $i$  的净出力最大值。

梯形模糊参数可由四元组表示:

$$\begin{cases} \tilde{P}_F = (P_{F1}, P_{F2}, P_{F3}, P_{F4}) = P_{pre}(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4) \\ P_{Fi} = \omega_p P_{pre} \end{cases} \quad (32)$$

式中:  $P_{Fi}$  为隶属度参数 ( $F \in \{w, l\}$ ), 其值由预测值  $P_{pre}$  确定;  $\omega_p$  ( $p=1, 2, 3, 4$ ) 为比例系数, 根据风电和负荷的历史数据确定其取值范围。

由于风电和负荷用模糊参数表示后, 模糊机会约束条件已经考虑了对日前预测值不确定性的处理, 因此不必单独假设备用功率。

### 3.2 模糊参数的清晰等价类转换

当约束函数具有式 (33) 形式时, 可定义式 (34)、式 (35) 两个函数<sup>[26]</sup>。

$$g(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) = h_1(\mathbf{x})\boldsymbol{\xi}_1 + h_2(\mathbf{x})\boldsymbol{\xi}_2 + \dots + h_m(\mathbf{x})\boldsymbol{\xi}_m + h_0(\mathbf{x}) \quad (33)$$

式中:  $\boldsymbol{\xi}_k$  为模糊参数向量 ( $r_{k1}, r_{k2}, r_{k3}, r_{k4}$ ),  $r_{k1}, r_{k2}, r_{k3}, r_{k4}$  为隶属度参数,  $k=1, 2, \dots, m, m$  为正整数;  $h_0(\mathbf{x}), h_m(\mathbf{x})$  均为约束条件中含决策量的多项式。

$$h_k^+(\mathbf{x}) = \begin{cases} h_k(\mathbf{x}) & h_k(\mathbf{x}) \geq 0 \\ 0 & h_k(\mathbf{x}) < 0 \end{cases} \quad (34)$$

$$h_k^-(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0 & h_k(\mathbf{x}) \geq 0 \\ -h_k(\mathbf{x}) & h_k(\mathbf{x}) < 0 \end{cases} \quad (35)$$

特殊情况, 若  $h_k(\mathbf{x}) = 1$ , 则  $h_k^+(\mathbf{x}) = 1, h_k^-(\mathbf{x}) = 0$ ; 若  $h_k(\mathbf{x}) = -1$ , 则  $h_k^+(\mathbf{x}) = 0, h_k^-(\mathbf{x}) = 1$ 。

为保证系统安全可靠运行, 须保证置信水平  $\alpha \geq 0.5$ , 此时机会约束的清晰等价类定义为:

$$(2 - 2\alpha) \sum_{k=1}^l (r_{k3} h_k^+(\mathbf{x}) - r_{k2} h_k^-(\mathbf{x})) + (2\alpha - 1) \times \sum_{k=1}^l (r_{k4} h_k^+(\mathbf{x}) - r_{k1} h_k^-(\mathbf{x})) + h_0(\mathbf{x}) \leq 0 \quad (36)$$

可将式 (30)、式 (31) 的不确定约束条件按上述清晰等价类方法转化为确定性约束条件, 便于计算机求解。

系统功率平衡约束的清晰等价类为:

$$(2 - 2\alpha)(P_{1,t3} - P_{w,t2}) + (2\alpha - 1)(P_{1,t4} - P_{w,t1}) - \sum_{i=1}^{N_G} P_{GN,i,t} - P_{hg,t} + P_{hp,t} = 0 \quad (37)$$

系统旋转备用约束的清晰等价类为:

$$(2 - 2\alpha)(P_{1,t3} - P_{w,t2}) + (2\alpha - 1)(P_{1,t4} - P_{w,t1}) - \sum_{i=1}^{N_G} \max(P_{GN,i,t}) - P_{hg,t} + P_{hp,t} \leq 0 \quad (38)$$

式中:  $P_{w,t1}, P_{w,t2}$  为风电隶属度参数;  $P_{1,t3}, P_{1,t4}$  为负荷隶属度参数。

## 4 算例分析

### 4.1 算例参数与数据

为验证低碳经济调度模型的可行性, 文中选取 IEEE 30 节点系统进行算例分析, 调用商业求解器 CPLEX 进行求解。系统节点示意如图 3 所示, 该算例系统包括 4 台火电机组, 总装机容量为 380 MW<sup>[27]</sup>, 并在常规火电机组的基础上加装含储液罐的碳捕集设备构成综合灵活运行的碳捕集机组 G1—G4, 各机组详细参数如表 1、表 2 所示。风电场 W 的额定功率为 120 MW, 风电成本系数  $C_w$  为 100 元/(MW·h); 碳捕集-风电机组采用分时上网电价  $K_i$ , 具体值见表 3<sup>[28]</sup>; 抽蓄机组抽水电价  $K_{hp}$  为分时上网电价  $K_i$  的 0.25 倍, 抽蓄机组上网电价  $K_{hg}$  为峰时电价; 抽蓄机组 PH 的额定抽发功率为 80 MW, 单次启停费用  $C_h$  为 2 000 元, 典型日风电出力及负荷预测曲线如图 4 所示。设每个调度日为 24 个时段, 每个时段为 1 h, 置信水平设定为 0.95。

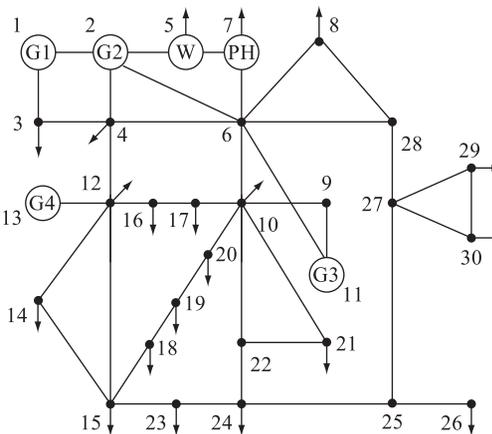


图 3 IEEE 30 节点系统示意

Fig.3 Schematic diagram of IEEE 30-node system

表 1 碳捕集机组参数

Table 1 Parameters of carbon capture plants

机组编号	成本参数 $a_i, b_i, c_i / [元 \cdot (MW \cdot h)^{-1}]$	最大出力 / MW	最小出力 / MW	启停成本 / 元	爬坡速率 / 约束 / (MW·h <sup>-1</sup> )	碳排放强度 / (t·MW <sup>-1</sup> )
G1	0.001 4, 150, 100	200	70	30 000	100	0.95
G2	0.002 5, 115, 1 500	80	40	25 000	30	0.98
G3	0.001 5, 225, 167	50	15	15 000	25	1.05
G4	0.000 9, 150, 1 050	50	10	15 000	15	1.10

表2 抽蓄机组参数

Table 2 Parameters of pumped storage station

参数	数值
$V_{h,t_0}/\text{m}^3$	546 200
$V_{h,\min}/\text{m}^3$	546 200
$V_{h,\max}/\text{m}^3$	7 842 300
$\eta_p/[\text{m}^3 \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}]$	251.62
$\eta_g/[\text{m}^3 \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}]$	318.24

表3 分时上网电价

Table 3 Time-of-use generation price

区间划分	时段	价格/[元·(MW·h) <sup>-1</sup> ]
峰时段	9时—14时、17时—21时	445.4
平时段	7时—9时、14时—17时、 21时—23时	364.4
谷时段	23时—7时	180.9

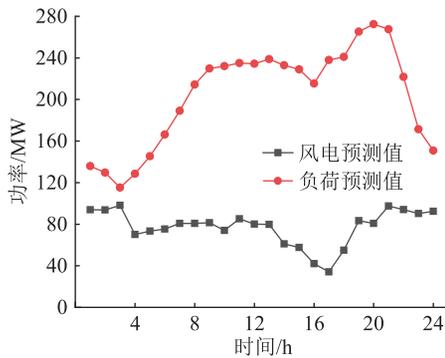


图4 典型日日前风电、负荷功率预测值

Fig.4 Forecasting power values of wind power and load

碳捕集设备和碳交易参数如表4所示<sup>[29]</sup>,模糊隶属度参数如表5所示。

表4 碳捕集设备和碳交易参数

Table 4 Parameters of carbon capture equipments and carbon trading

参数	数值	参数	数值
$\sigma/(\text{元} \cdot \text{t}^{-1})$	80	$\eta/\%$	120
$P_{B,i}/\text{MW}$	3	$m_c/[(\text{MW} \cdot \text{h}) \cdot \text{t}^{-1}]$	0.269
$\delta$	0.9	$V_{CF,i,0}/\text{m}^3$	30 000
$\beta$	0.85	$V_{CP,i,0}/\text{m}^3$	30 000
$\theta$	0.24	$\sigma_R/(\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$	1.01
$V_{CR}/\text{m}^3$	60 000	$M_{MEA}/(\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$	61.08
$\mu_R/\%$	30	$M_{CO_2}/(\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$	44

表5 模糊隶属度参数

Table 5 Parameters of fuzzy membership

模糊参数	$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$
$\bar{P}_{w,t}$	0.6	0.9	1.1	1.4
$\bar{P}_{l,t}$	0.90	0.95	1.05	1.10

表5中,因风力发电所受影响因素较多,实际出

力相比预测值偏差较大,故隶属度参数的选取范围较大。而负荷预测值与实际值接近,参数选取范围较小<sup>[30]</sup>。

## 4.2 仿真场景设定

文中设定3种机组出力场景,分别为场景1—场景3。

(1) 火电-风电运行调度:日前调度基础场景。

(2) 碳捕集-风电运行调度:引入灵活运行的碳捕集机组。

(3) 碳捕集-风电-抽蓄联合运行调度:在场景2基础上引入抽蓄机组配合碳捕集机组参与调峰。

在考虑不同机组出力场景的同时设定不同的碳交易价格来分析碳交易对系统经济效益和环境效益的影响;设置不同的置信水平,权衡电力系统经济性与稳定性;设定不同风电和抽蓄机组的装机容量以分析高比例新能源接入对文中所提低碳调度模型净收益的影响。

## 4.3 算例仿真结果分析

### 4.3.1 不同仿真场景下机组出力对比分析

3种场景下机组日前优化调度结果如表6所示。综合对比3种场景的调度结果可知,场景2加入碳捕集设备后的系统相比于传统含新能源系统的日前调度,碳排放量减少了1 918.9 t,但需要供给碳捕集能耗,导致系统燃料成本增加了18.69万元。因碳排放量减少,碳捕集电厂可售卖多余的碳配额以获得额外收益,因此净收益仅小幅减少。场景3抽水蓄能电站参与系统调峰后,得以消纳弃风,调用抽蓄机组获得一定的电量收益,碳捕集机组出力减少,并且在引入抽蓄调峰后可使碳捕集机组更专注于捕碳工作,燃料成本和碳排放也相应减少,碳排放量相比场景2减少了140.8 t,降幅为7.01%;系统的净收益相比场景2增加了6.39万元,增幅为7.62%。引入抽蓄机组后系统的经济效益和环境效益均有所改善。

表6 不同场景下系统收益及成本对比

Table 6 Comparison of system benefits and costs in different scenarios

场景	上网收益/万元	调用抽蓄收益/万元	运行成本/万元	碳交易收益/万元	净收益/万元	碳排放/t
场景1	161.71		70.67	-5.25	85.79	3 927.4
场景2	161.29		89.36	11.96	83.89	2 008.5
场景3	156.43	5.23	83.92	12.54	90.28	1 867.7

3种场景下机组总出力曲线如图5所示。由图5可知,场景1火电机组在没有加装碳捕集设备的

情况下不存在碳捕集能耗,火电机组总出力最小,场景2碳捕集机组的总出力最高。而场景3在引入了抽蓄机组之后,1时—4时虽然碳捕集机组出力略大于场景2,但是减少了机组的频繁启停,降低了机组的启停成本;在14时—18时因抽蓄机组放电承担了一部分碳捕集机组调峰任务,碳捕集机组出力减少,并且碳捕集机组可有更多的备用裕度进行捕碳工作。在一个调度日内场景3下碳捕集机组总出力较场景2减少了135.28 MW。

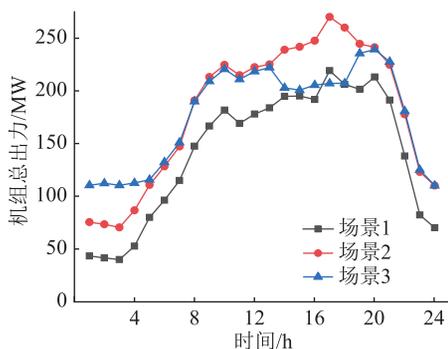


图5 3种场景下机组总出力曲线  
Fig.5 Total output curves of the unit under three scenarios

限于篇幅,文中只给出场景3的各机组出力曲线进行分析,如图6、图7所示,在置信水平为0.95的条件下,碳捕集机组出力变化与负荷预测值较为一致,在满足负荷的情况下,碳排放较小的G1与G2优先上网,且在一个调度日内G1和G2保持在工作状态,降低了机组的启停成本。因风电和负荷的反调峰特性,1时—4时,抽蓄机组处于充电状态,消纳多余风电,G1、G2保持在最小出力状态。而在14时—18时,负荷增加的同时风电出力减少,造成较大的功率缺额,抽蓄机组放电以分担碳捕集机组的调峰任务,缓解了碳捕集机组调峰压力,时移风电出力,提高了清洁能源的利用率;且在此时段,碳捕集机组碳捕集能耗显著增加,这是因为伴随着抽蓄放电分担了碳捕集机组的调峰压力后,机组有更多的备用裕度用在碳捕集能耗上,此时储液罐向再生塔放出更多含CO<sub>2</sub>的富液,机组加大能耗捕集CO<sub>2</sub>。综上,抽蓄机组和碳捕集机组联合运行的出力情况呈互补关系,减少了机组启停次数,降低了碳捕集机组的总出力,使碳捕集机组更专注于捕碳工作,并减少了CO<sub>2</sub>排放。

#### 4.3.2 不同碳交易价格的场景对比分析

改变各场景的碳交易价格,3种场景下的收益以及碳排放量如图8、图9所示。场景1的碳排放量与净收益均随着碳价的升高而降低,这是因为碳价升高会增加火电厂的碳交易成本费用,这将迫使

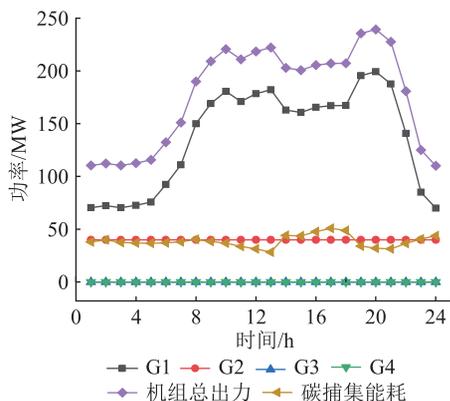


图6 场景3碳捕集机组日前优化出力曲线  
Fig.6 Daily optimized output curves of carbon capture unit in scenario 3

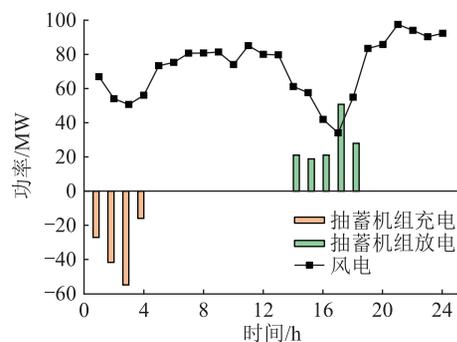


图7 风电及抽蓄充放电功率

Fig.7 Wind power and pumped storage charge-discharge power

各发电机组进一步优化出力,碳排放量较小的机组以及清洁能源优先上网以减少碳交易的支出。且场景1在未引入碳捕集设备的情况下碳排放体量最大,电厂对碳价的变化更敏感。而场景2、3的净收益则呈上升趋势,碳排放呈降低趋势。这是因为碳价的提升会进一步优化机组出力,安排风电和碳排放量更低的机组优先上网,进一步降低碳排放来售卖更多的碳配额,提高碳价后系统所增长的收益主要来自碳交易收益。场景3碳价从40元/t提升到120元/t,碳排放量仅小幅下降了2.69%,这是因为抽蓄电站已对风电进行消纳,弃风量较小,机组出力改变不明显。

#### 4.3.3 不同置信水平和高比例新能源接入系统的模型对比分析

置信水平的大小直接影响系统的备用容量,进而影响系统的安全性与经济性<sup>[31]</sup>。由图10可知,随着置信水平的提高,系统备用容量提高,安全性相应提高,但备用冗余会增加燃料成本,而系统收益相应减少。对比场景2、3可发现,场景3的备用容量曲线增长斜率要大于场景2。这是因为场景3在引入抽蓄机组的情况下,风电消纳能力要强于场

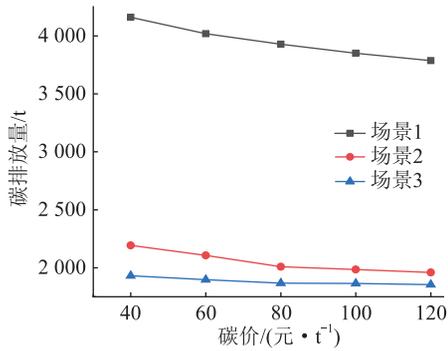


图8 不同碳价下各场景碳排放量

Fig.8 Carbon emissions of various scenarios under different carbon prices

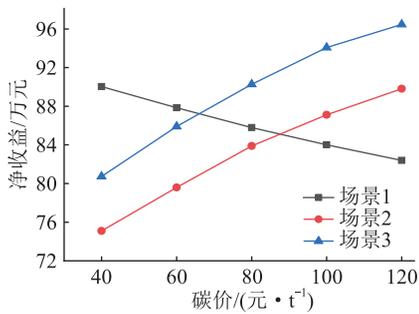


图9 不同碳价下各场景净收益

Fig.9 Net income of various scenarios under different carbon prices

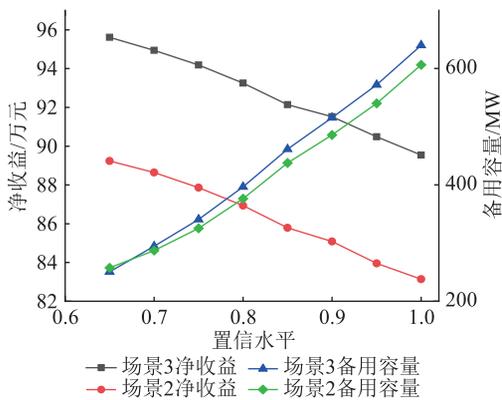


图10 不同置信水平的净收益和备用容量

Fig.10 System revenue and spare capacity under different confidence intervals

景2,所需的备用容量更多,场景3的置信水平从0.65提升到1时,系统净收益减少6.07万元,降幅达6.34%。图10中当置信水平在0.85~0.9时,系统净收益降速放缓,可理解为随着置信水平从0.9降到0.85,即风险降低后系统的净收益增长较少,故可认为0.9为最优置信水平。

在场景3调度系统其他机组参数和负荷水平保持不变的条件下,改变风电机组和抽蓄机组的装机容量,净收益仿真结果如图11所示。系统净收益随着风电装机容量的增加而增加,且抽蓄装机容量越

大,净收益增加越明显;当风电装机容量超过150 MW时,系统净收益增长放缓,这是因为在火电最小功率约束、抽蓄库容约束等保证系统稳定运行的约束下,预留风电上网的比例有限,风电接入比例过高时,为保证系统安全运行且避免火电机组启停造成运行成本增加,会造成更多弃风。风电接入容量小于130 MW时,提高抽蓄机组的装机容量,系统净收益增加不明显,且风电装机容量在120 MW时,提高抽蓄装机容量,系统净收益保持不变。当风电装机为160 MW、抽蓄装机为100 MW时,系统净收益为98.7万元,相比场景3增加了8.42万元,增幅达9.33%。由该仿真结果可知当新能源接入比例增大时,所提模型并未导致系统经济效益下降,模型适用性良好。

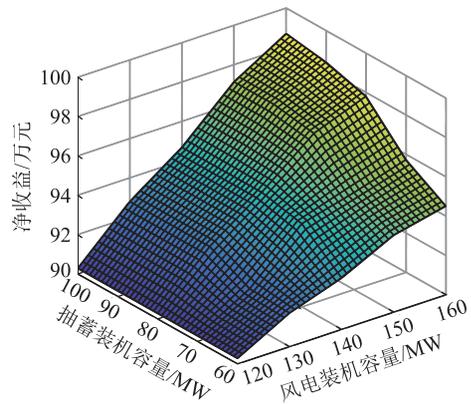


图11 不同风电和抽蓄装机容量下的系统净收益

Fig.11 Net revenue with different wind power and pumped storage capacities

## 5 结论

文中构建了计及碳交易的风电-碳捕集-抽蓄机组的低碳电力调度模型,探究了碳捕集机组和抽蓄机组的联合运行机理,并将风电出力及负荷模糊处理,采用CPLEX求解器求解,分析仿真结果得出:

(1) 风电-碳捕集-抽蓄联合运行的发电系统在碳交易机制的支持下获得相较其他两种场景更优的经济与环保效益。相较于场景2,场景3碳捕集机组能够更专注于捕碳工作,在一个调度周期内,净收益提高了7.62%,碳排放量减少了7.01%。

(2) 引入碳捕集设备后提高碳价,系统的经济性和环保性均有所改善。但同时引入碳捕集和抽蓄机组后,碳价的提高对系统机组出力改变较小。

(3) 改变风电和抽蓄接入比例,系统均维持较高的净收益。该模型可为日后含储能及碳捕集设备的高比例新能源接入电网的低碳调度理论研究提供参考。

## 参考文献:

- [1] 康海鹏,李长城,刘经纬,等. 计及碳捕集-电转气耦合特性的电-气互联系统连锁故障评估[J]. 电网技术, 2022, 46(9):3394-3405.  
KANG Haipeng, LI Changcheng, LIU Jingwei, et al. Assessment of cascading failures in integrated electricity and gas system considering coupling characteristics of carbon capture-power to gas[J]. Power System Technology, 2022, 46(9):3394-3405.
- [2] ABDILAH A M, MUSTAFA M W, ABUJARAD S Y, et al. Harnessing flexibility potential of flexible carbon capture power plants for future low carbon power systems; review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81:3101-3110.
- [3] 田明,张海峰,刘坤. 计及电转气和碳捕集的数据中心微电网“源-荷”低碳优化调度方法[J]. 电气工程学报, 2022, 17(3):85-94.  
TIAN Ming, ZHANG Haifeng, LIU Kun. "source-load" low-carbon optimal scheduling method for data center microgrids considering power to gas and carbon capture[J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(3):85-94.
- [4] LI X, ZHANG R F, BAI L Q, et al. Stochastic low-carbon scheduling with carbon capture power plants and coupon-based demand response[J]. Applied Energy, 2018, 210:1219-1228.
- [5] 魏文,姜飞,戴双凤,等. 计及需求侧储能事故备用风险与火电机组深度调峰的经济优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(10):154-163.  
WEI Wen, JIANG Fei, DAI Shuangfeng, et al. Economic optimization of deep peak regulation of thermal power units taking into account the risk of emergency storage on the demand side[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(10):154-163.
- [6] 杜宇龙,徐天奇,李琰,等. 基于自适应扩散高斯核密度风电预测误差估计的风火联合优化调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21):11-21.  
DU Yulong, XU Tianqi, LI Yan, et al. Wind-fire joint optimal dispatching based on adaptive diffusion Gaussian kernel density wind farm output power forecast error estimation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21):11-21.
- [7] 江叶峰,周海强,罗建裕,等. 计及源荷区间不确定性的电力系统日前优化调度[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4):58-66.  
JIANG Yefeng, ZHOU Haiqiang, LUO Jianyu, et al. Day-ahead optimal dispatch of power system considering source and load interval uncertainties[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(4):58-66.
- [8] 周任军,邓子昂,徐健,等. 碳捕集燃气热机组碳循环及其虚拟电厂优化运行[J]. 中国电力, 2020, 53(9):166-171.  
ZHOU Renjun, DENG Ziang, XU Jian, et al. Optimized operation using carbon recycling for benefit of virtual power plant with carbon capture and gas thermal power[J]. Electric Power, 2020, 53(9):166-171.
- [9] CHEN X H, WU X, LEE K Y. The mutual benefits of renewables and carbon capture: achieved by an artificial intelligent scheduling strategy[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 233:113856.
- [10] 赵毅,王添颖,王涵,等. 供氢体应用于碳捕集与资源化领域的前景分析[J]. 中国电力, 2018, 51(6):155-159.  
ZHAO Yi, WANG Tianhao, WANG Han, et al. Prospects for the application of hydrogen donors in carbon capture and resource utilization[J]. Electric Power, 2018, 51(6):155-159.
- [11] 林俐,岳晓宇,许冰倩,等. 计及抽水蓄能和火电深度调峰效益的抽蓄-火电联合调峰调用顺序及策略[J]. 电网技术, 2021, 45(1):20-32.  
LIN Li, YUE Xiaoyu, XU Bingqian, et al. Sequence and strategy of pumped storage-thermal combined peak shaving considering benefits of pumped storage and deep regulation of thermal power[J]. Power System Technology, 2021, 45(1):20-32.
- [12] 王博,詹红霞,张勇,等. 考虑风电不确定性的风蓄火联合优化经济调度研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1):93-100.  
WANG Bo, ZHAN Hongxia, ZHANG Yong, et al. Combined optimal economic dispatch of wind-storage-fire considering wind power uncertainty[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1):93-100.
- [13] 寇洋,武家辉,张华,等. 考虑碳捕集与CVaR的电力系统低碳经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11):131-140.  
KOU Yang, WU Jiahui, ZHANG Hua, et al. Low carbon economic dispatch for a power system considering carbon capture and CVaR[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11):131-140.
- [14] 赵振宇,李忻薪. 基于阶梯碳交易的碳捕集电厂-电转气虚拟电厂低碳经济调度[J]. 发电技术, 2023, 43(6):769-780.  
ZHAO Zhenyu, LI Xinxin. Low-carbon economic dispatch based on ladder carbon trading virtual power plant considering carbon capture power plant and power-to-gas[J]. Power Generation Technology, 2023, 43(6):769-780.
- [15] 冯俊杰,翟融融,郭一村,等. 耦合碳捕集系统的燃气蒸汽联合循环综合性能研究[J]. 发电技术, 2022, 43(4):584-592.  
FENG Lingjie, ZHAI Rongrong, GUO Yicun, et al. Study on the comprehensive performance of natural gas combined cycle plant integrated with carbon capture system[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(4):584-592.
- [16] 朱庆,林慧婕,张宇峰. 考虑风电消纳的含P2G-CCS虚拟电厂优化调度[J]. 智慧电力, 2023, 51(4):77-83.  
ZHU Qing, LIN Huijie, ZHANG Yufeng. Optimal scheduling of virtual power plants with P2G-CCS considering wind power consumption[J]. Smart Power, 2023, 51(4):77-83.
- [17] 仲悟之,黄思宇,崔杨,等. 考虑源荷不确定性的风电-光热-碳捕集虚拟电厂协调优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(9):3424-3432.  
ZHONG Wuzhi, HUANG Siyu, CUI Yang, et al. W-S-C capture coordination in virtual power plant considering source-load uncertainty[J]. Power System Technology, 2020, 44(9):3424-3432.
- [18] 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.
- CUI Yang, ZENG Peng, WANG Zheng, et al. Multiple time scales scheduling strategy of wind power accommodation considering energy transfer characteristics of carbon capture power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3):946-961.
- [19] 胡道成, 王睿, 赵瑞, 等. 二氧化碳捕集技术及适用场景分析[J]. 发电技术, 2023, 43(4):502-513.
- HU Daocheng, WANG Rui, ZHAO Rui, et al. Research on carbon dioxide capture technology and suitable scenarios [J]. Power Generation Technology, 2023, 43(4):502-513.
- [20] 崔杨, 曾鹏, 惠鑫欣, 等. 考虑碳捕集电厂综合灵活运行方式的低碳经济调度[J]. 电网技术, 2021, 45(5):1877-1886.
- CUI Yang, ZENG Peng, HUI Xinxin, et al. Low-carbon economic dispatch considering the integrated flexible operation mode of carbon capture power plant[J]. Power System Technology, 2021, 45(5):1877-1886.
- [21] LI X, ZHANG R F, BAI L Q, et al. Stochastic low-carbon scheduling with carbon capture power plants and coupon-based demand response[J]. Applied Energy, 2018, 210:1219-1228.
- [22] 徐慧. 基于风光水储互补发电系统的火电及碳捕集优化调度研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2020.
- XU Hui. Research on optimal dispatching of thermal power and carbon capture based on the complementary power generation system of wind, and water storage[D]. Kunming; Kunming University of Technology, 2020.
- [23] 翟融融, 魏清, 冯凌杰, 等. 耦合膜冷凝器的碳捕集系统能耗特性分析[J]. 发电技术, 2023, 43(5):667-673.
- ZHAI Rongrong, WEI Qing, FENG Lingjie, et al. Analysis of energy consumption characteristics of carbon capture system in coupled membrane condenser[J]. Power Generation Technology, 2023, 43(5):667-673.
- [24] 刘明涛, 谢俊, 张秋艳, 等. 碳交易环境下含风电电力系统短期生产模拟[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(12):1598-1607.
- LIU Mingtao, XIE Jun, ZHANG Qiuyan, et al. Short-term production simulation of power system containing wind power under carbon trading environment[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 55(12):1598-1607.
- [25] 程文, 孙树敏, 李宝, 等. 考虑需求响应的多目标模糊机会约束动态经济调度[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(31):12849-12856.
- CHENG Wen, SUN Shumin, LI Bao, et al. Dynamic economic scheduling of multi-objective fuzzy chance constraint considering demand response[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(31):12849-12856.
- [26] 金亦舟, 张莉萍, 牛启帆. 计及随机模糊不确定性的含风电配电网重构[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(7):67-72.
- JIN Yizhou, ZHANG Liping, NIU Qifan. Reconfiguration of distribution network with wind power generators considering randomness and fuzziness [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2020, 32(7):67-72.
- [27] 崔杨, 周海涛, 严干贵, 等. 考虑环境成本及网络约束的风火联合发电调度[J]. 电网技术, 2017, 41(11):3457-3462.
- CUI Yang, ZHOU Haitao, YAN Gangui, et al. Combined dispatching of wind and thermal power generation considering environmental cost and network constraints [J]. Power System Technology, 2017, 41(11):3457-3462.
- [28] 李艳梅, 任恒君, 张致远, 等. 考虑储能系统调度与风电消纳的峰谷分时电价优化模型研究[J]. 电网技术, 2022, 46(11):4141-4149.
- LI Yanmei, REN Hengjun, ZHANG Zhiyuan, et al. Research on the optimization model of peak valley time of use electricity price considering energy storage system scheduling and wind power consumption [J]. Power System Technology, 2022, 46(11):4141-4149.
- [29] 袁桂丽, 刘培德, 唐福斌, 等. 计及绿色电力证书与碳交易制度的“源-荷”协调优化调度[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6):190-195.
- YUAN Guili, LIU Peide, TANG Fubin, et al. Source-load coordination optimal scheduling considering green power certificate and carbon trading mechanisms [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(6):190-195.
- [30] 熊虎, 向铁元, 陈红坤, 等. 含大规模间歇式电源的模糊机会约束机组组合研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13):36-44.
- XIONG Hu, XIANG Tiejuan, CHEN Hongkun, et al. Research of fuzzy chance constrained unit commitment containing large-scale intermittent power [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13):36-44.
- [31] 李政洁, 于强, 龚文杰, 等. 计及模糊机会约束的电-气-热能源枢纽多目标优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(9):49-56.
- LI Zhengjie, YU Qiang, GONG Wenjie, et al. Multi-objective optimal scheduling of electricity-gas-heat energy hub considering fuzzy chance constraint [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2021, 33(9):49-56.

---

作者简介:



舒征宇

舒征宇(1983),男,博士,副教授,研究方向为含新能源的电力系统运行与控制(E-mail:james\_brons@yeah.net);

贾可凡(1997),男,硕士在读,研究方向为电力系统运行与控制;

李黄强(1982),男,博士,高级工程师,从事电网运行与调度相关工作。

## Prediction of spatio-temporal distribution of electric vehicle load based on residential travel simulation

SHEN Xiaoqi<sup>1</sup>, FANG Xin<sup>1</sup>, TAN Linlin<sup>1</sup>, LI Xinguo<sup>1</sup>, SUN Jiaqi<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Software, Southeast University, Suzhou 210018, China)

**Abstract:** Aiming at the randomness and uncertainty in the spatio-temporal distribution prediction of electric vehicle charging load, a method for electric vehicle load prediction that integrates travel chain theory and actual geographic information is proposed. On the basis of road network integration and travel chain theory, a model for the spatio-temporal characteristics of electric vehicle charging demand is established to simulate the user's travel behavior characteristics. At the same time, by modeling the road network in the target area, dividing it by functional area, combining the user behavior characteristics of travel chain theory with target geographic information, and planning and designing the travel path of electric vehicle users through Floyd algorithm, the electric vehicle charging demand load can be predicted. The results of the case study show that the proposed model can predict the variation of electric vehicle charging load based on actual geographic information, and analyze the charging demand and load characteristics of electric vehicles in different functional areas and different administrative regions. The simulation results validate the effectiveness of the proposed model and method.

**Keywords:** travel chain; load forecasting; geographic information; charging demand; Floyd algorithm; Markov chain

(编辑 陆海霞)

(上接第 87 页)

## Low-carbon dispatching strategy for new energy grid considering carbon capture plant

SHU Zhengyu<sup>1</sup>, JIA Kefan<sup>1</sup>, LI Huangqiang<sup>2</sup>, YANG Shiyong<sup>2</sup>, YAO Qin<sup>2</sup>, WANG Can<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. State Grid Yichang Power Supply Company of Hubei Electric Power Co., Ltd., Yichang 443000, China)

**Abstract:** Within the context of carbon peaking and neutrality, carbon capture plants can effectively reduce carbon emissions in power systems. Yet, the regular integration of these units for peak shaving in grids harnessing renewable energy tends to hamper system efficiency. Thus, acknowledging the operation and carbon trading mechanism of adaptable carbon capture plants, firstly, the incorporation of pumped storage plants is suggested to aid peak shaving, thereby facilitating wind power utilization, optimizing carbon capture plants for carbon sequestration, and reducing overall system carbon emissions. Then, given the uncertainty following grid-integrated wind power, fuzzy theory is employed to model system power constraints as fuzzy parameters, representing wind power and load. The constraint is transformed into a credibility-based fuzzy chance constraint. This fuzzy chance constraint is clarified by the clear equivalence classes. Prioritizing maximum system net income as the objective function, elements such as unit online revenue, extraction income, carbon trading profits, operational costs, and system security constraints are considered. The carbon capture-pumped storage joint operation model is developed. Finally, the model is solved using CPLEX. Simulation results validate that the integration of pumped storage plant enhances the system's net income by 7.62% and reduces carbon emissions by 7.01%, reflecting a balanced consideration of both economic and environmental aspects.

**Keywords:** pumped storage; carbon capture units; carbon trading proceeds; fuzzy chance constraints; clear equivalence classes; low-carbon economic dispatching

(编辑 钱悦)