

引用格式:程远林,张舒,张毅,等.计及价格敏感区间下惩罚型碳价的CCS-P2G虚拟电厂鲁棒优化[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):251-259.

Citation: CHENG Yuanli, ZHANG Shu, ZHANG Yi, et al. Robust optimization of CCS-P2G virtual power plants considering penalized carbon prices in price-sensitive intervals[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 251-259.

# 计及价格敏感区间下惩罚型碳价的 CCS-P2G 虚拟电厂鲁棒优化

程远林, 张舒, 张毅, 余虎, 谢锦林

(中国能源建设集团湖南省电力设计院有限公司, 湖南长沙 410007)

**摘要:** 由于中国碳交易市场运行尚不成熟, 碳价在市场波动和政府管控的共同作用下, 影响虚拟电厂 (virtual power plant, VPP) 系统碳捕集率和碳交易成本。在此背景下, 提出一种计及价格敏感区间下惩罚型碳价的 CCS-P2G 虚拟电厂鲁棒优化模型。首先, 考虑市场化价格下能有效刺激系统碳捕集的碳价敏感区间, 基于此构建的惩罚型碳价会随着系统实际碳排放量的增加而提高。然后, 将碳价敏感区间的惩罚型碳价引入至考虑风光出力不确定性的可调鲁棒优化模型中。最后, 对比分析 4 种场景验证所提模型的优越性。仿真表明, 相较于传统型碳价, 考虑碳价敏感区间的惩罚型碳价提高了系统的碳捕集水平, 降碳效果更优; 鲁棒性指标越大, 系统越偏向保守, VPP 收益越小, 反之亦然。提出的模型能有效参与碳市场的竞争, 制定合理的惩罚型碳价区间和鲁棒性指标可以实现 VPP 系统经济性和低碳性协同。

**关键词:** 风光不确定性; 电转气; 虚拟电厂; 鲁棒优化; 碳捕集; 碳交易

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.026 中图分类号: TM73 文章编号: 1673-9140(2024)06-0251-09

## Robust optimization of CCS-P2G virtual power plants considering penalized carbon prices in price-sensitive intervals

CHENG Yuanlin, ZHANG Shu, ZHANG Yi, YU Hu, XIE Jinlin

(Hunan Electric Power Design Institute Co., Ltd., China Energy Engineering Group, Changsha 410007, China)

**Abstract:** Since the operation of China's carbon trading market is still immature, the carbon price affects the carbon capture rate and carbon trading cost of the virtual power plant (VPP) system under the combined effect of market fluctuation and government control. Therefore, this paper proposes a robust optimization model of CCS-P2G VPPs considering the penalized carbon price in the price-sensitive interval. The penalized carbon price constructed based on the price-sensitive interval that can effectively stimulate the system's carbon capture under the marketized price will increase as the system's actual carbon emissions increase. Therefore, it is introduced into the adjustable robust optimization model, which takes the wind power output uncertainty into account. Finally, the superiority of the proposed model is verified by comparison and analysis in four scenarios. The simulation shows that compared with the traditional carbon price, the penalized carbon price considering the carbon price-sensitive interval improves the carbon capture level of the system, and the carbon reduction effect is better; a larger robustness index indicates a more conservative system and smaller VPP gain, and vice versa. The model proposed in this paper can effectively participate in the competition of carbon markets, and the formulation of reasonable penalized carbon price interval and robustness index can realize the synergy of economy and low carbon of the VPP system.

**Key words:** wind power output uncertainty; electricity-to-gas conversion; virtual power plant; robust optimization; carbon capture; carbon trading

收稿日期: 2024-03-17; 修回日期: 2024-10-01

基金项目: 中国能源建设股份有限公司重大科技项目 (CEEC2022-KJZX-02)

通信作者: 张毅 (1996—), 女, 博士, 工程师, 主要从事热能工程方面的研究; E-mail: zwj8882022@126.com

虚拟电厂(virtual power plant, VPP)利用先进的控制、通信技术,摆脱了地理位置和电网拓扑的约束,成为了分布式能源(distributed energy resources, DREs)整合和协调的新型组织形式<sup>[1]</sup>。VPP需要面对高渗透新能源并网与其出力的不确定性,如何在实现VPP经济、低碳运行的同时,兼顾新能源波动和消纳,是一个亟待解决的挑战<sup>[2]</sup>。碳捕集系统(carbon capture system, CCS)是目前应用较广的CO<sub>2</sub>减排手段之一,利用碳捕集技术对传统火电厂进行降碳改造,有利于实现电力系统低碳化。文献[3]深入探讨了CCS的运行特点及其内部能量流,并说明了引入风电后的调峰效益将如何影响电力系统的调度和运行。文献[4]构建了电转气-碳捕集(P2G-carbon capture system, P2G-CCS)虚拟电厂,将CCS捕集的CO<sub>2</sub>提供至电转气(power to gas, P2G)设备作为碳原料。

为进一步强化碳减排管控与能源结构调整,碳交易(carbon emission trading, CET)市场应运而生。文献[5]建立了风电-碳捕集虚拟电厂,并引入了碳交易机制,相较传统的虚拟电厂运行模式,碳减排效应和经济收益更佳。碳价机制中,主要有市场出清价格和政府制定价格,前者由市场的供需竞争形成,而后者靠政府引导。在碳价的刺激下,CCS的碳捕集水平可灵活调节,以此进一步降低系统碳排放<sup>[6]</sup>。当前中国碳交易市场运行尚不成熟,碳价在市场化形成过程中,易出现参与积极性低、约束高碳排行为效果有限等问题,需要政府对碳价和碳交易方式进行管控。应用较为广泛的阶梯式碳交易机制<sup>[7]</sup>作为一种惩罚型碳价,由政府规定碳交易价格,根据碳排放量区间将碳交易价格划分为阶梯型的函数,VPP为了有效降低系统碳排放量和碳交易成本,会约束自身碳排行为,避免面临下一梯度的高碳价<sup>[8-9]</sup>。文献[10]建立了P2G-CCS耦合的虚拟电厂,并将阶梯式碳交易机制引入其中,旨在促进系统低碳化。上述文献虽然在系统中考虑了阶梯式碳交易机制,但阶梯函数不连续、分段特性,增加了模型求解的难度,也使得系统排放量略微超过阶梯边界,碳价也会有较大幅度的价格跳跃。且函数中的最优价格增长幅度、阶梯区间长度有待商榷。

大部分已有文献研究仅从碳交易机制本身来降低碳排放,而考虑碳价波动特点的碳捕集水平优化问题较少涉及,系统的低碳潜力有待充分挖掘。并且将惩罚型碳价引入含CCS-P2G的虚拟电厂

中,碳捕集水平对于碳价响应的敏感性和新能源出力的不确定性也将影响其优化调度。

为避免上述情况,本文构建了一种计及价格敏感区间的惩罚型碳价下含CCS-P2G的电-气-热虚拟电厂鲁棒优化调度模型。为约束参与碳交易对象的高碳排放行为和提高系统的碳捕集水平,引入了考虑碳交易价格敏感区间的惩罚型碳价,计算出市场化价格下能有效刺激发电厂积极参与碳捕集的碳交易价格敏感区间,并基于此构建的惩罚型碳价为连续的价格函数,碳价会随着系统实际碳排放量的增加而提高,有效提高系统的碳捕集水平和降低系统的碳排放量;采用鲁棒线性优化方法解决模型中的风电和光伏出力不确定性的问题,对于含不确定性变量调度规划问题,通过对偶变量将其转变为确定性的线性规划问题。最后,通过算例验证模型的可行性和有效性。

## 1 计及CCS-P2G的虚拟电厂

### 1.1 VPP基本结构

图1为本文所构建的含CCS-P2G的虚拟电厂系统结构,除了可再生能源电站和CCS-P2G装置外,还包括抽凝式CHP和燃气锅炉等设备。为提高VPP系统的低碳性,CHP机组向CCS设备供给能量,而过剩的可再生能源发电量由P2G转化为天然气,且CHP机组的碳排放由CCS装置捕集后,可作为P2G过程的优质碳原料。

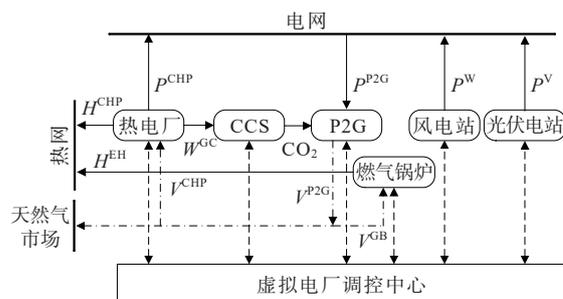


图1 VPP系统结构

Figure 1 VPP system architecture

### 1.2 热电联产机组运行特性

CHP机组电出力 $P^{\text{CHP}}$ 与热出力 $H^{\text{CHP}}$ 存在一定的耦合关系。不同于背压式CHP机组只能工作于“以热定电”的运行状态,当热出力一定时,抽凝式CHP机组的发电功率存在可调空间,如在热出力 $H_c^{\text{CHP}}$ 下,电出力可以在 $[P_c^{\text{CHP}}, P_A^{\text{CHP}}]$ 的区间范围内调节。但随着 $H_c^{\text{CHP}}$ 的提高,其可调范围降低,如图2所示。

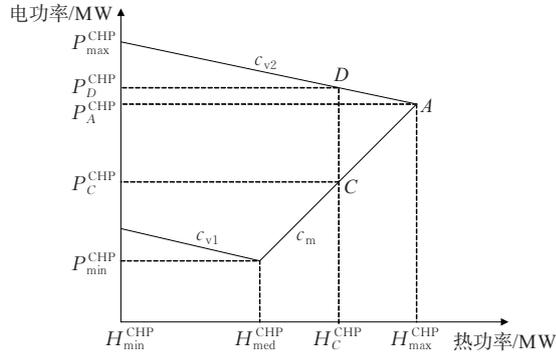


图 2 抽凝式 CHP 机组热电运行特性

Figure 2 Thermolectric operating characteristics of condensate CHP units

CHP 机组的热电运行区域可表示为

$$\begin{cases} H_{\min}^{\text{CHP}} \leq H_t^{\text{CHP}} \leq H_{\text{med}}^{\text{CHP}} \\ P_{\min}^{\text{CHP}} - c_{v1} H_t^{\text{CHP}} \leq P_t^{\text{CHP}} \leq P_{\max}^{\text{CHP}} - c_{v2} H_t^{\text{CHP}} \\ H_{\text{med}}^{\text{CHP}} \leq H_t^{\text{CHP}} \leq H_{\max}^{\text{CHP}} \\ c_m (H_t^{\text{CHP}} - H_{\text{med}}^{\text{CHP}}) + P_{\min}^{\text{CHP}} \leq P_t^{\text{CHP}} \leq P_{\max}^{\text{CHP}} - c_{v2} H_t^{\text{CHP}} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $P_t^{\text{CHP}}$ 、 $H_t^{\text{CHP}}$  分别为  $t$  时刻 CHP 机组电、热出力;  $P_{\max}^{\text{CHP}}$ 、 $P_{\min}^{\text{CHP}}$  分别为电出力的上、下限;  $H_{\max}^{\text{CHP}}$ 、 $H_{\min}^{\text{CHP}}$  分别为热出力的上、下限;  $H_{\text{med}}^{\text{CHP}}$  为发电功率最小时的汽轮机供热功率;  $c_v$  为当汽轮机进气量不变时多抽取单位供热量下发电功率的减少量;  $c_{v1}$ 、 $c_{v2}$  分别为最小、最大进气量对应的  $c_v$  值;  $c_m$  为 CHP 机组电热转换系数。

### 1.3 CCS-P2G 系统碳捕集能耗与碳利用

CCS 的能耗由 CHP 机组供给, 其能耗表达式<sup>[11-12]</sup>为

$$W_t^{\text{GC}} = W_t^{\text{B}} + W_t^{\text{OP}} \quad (2)$$

式中,  $W_t^{\text{GC}}$ 、 $W_t^{\text{B}}$ 、 $W_t^{\text{OP}}$  分别为  $t$  时刻 CCS 的总能耗、固定能耗(即维持运行所需的能耗, 可视作常数)与运行能耗。

CCS 的运行能耗与碳捕集系统的运行水平有关, 碳捕集系统捕集的  $\text{CO}_2$  量  $Q_t^{\text{CC}}$  与运行能耗的关系表达式<sup>[3]</sup>为

$$\begin{cases} W_t^{\text{OP}} = W^{\text{C}} Q_t^{\text{CC}} \\ Q_t^{\text{CC}} = e^{\text{g}} \beta_t^{\text{C}} P_t^{\text{CHP}} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $W^{\text{C}}$  为碳捕集电厂处理单位  $\text{CO}_2$  的运行能耗;  $e^{\text{g}}$  为单位发电量的碳排放强度;  $\beta_t^{\text{C}}$  为碳捕集系统  $t$  时刻的碳捕集水平,  $\beta_t^{\text{C}} \in [0, \beta_{\max}^{\text{C}}]$ ,  $\beta_{\max}^{\text{C}}$  为 CCS 设备的最优碳捕集水平。

P2G 设备消耗的  $\text{CO}_2$  量  $Q^{\text{P2G}}$  表达式<sup>[13-14]</sup>为

$$Q^{\text{P2G}} = \rho_{\text{CO}_2} V_t^{\text{P2G}} \quad (4)$$

$$V_t^{\text{P2G}} = \frac{3.6 \eta^{\text{P2G}} P_t^{\text{P2G}}}{H^{\text{g}}} \quad (5)$$

式(4)、(5)中,  $\rho_{\text{CO}_2}$  为生成单位天然气时需要  $\text{CO}_2$  的量;  $V_t^{\text{P2G}}$  为  $t$  时刻 P2G 的天然气产量;  $\eta^{\text{P2G}}$  为 P2G 设备电转气的转换效率;  $P_t^{\text{P2G}}$  为  $t$  时段 P2G 设备能耗;  $H^{\text{g}}$  为天然气热值。

## 2 虚拟电厂优化调度模型

### 2.1 目标函数

VPP 以 24 h 为调度周期, 以经济收益最大为优化目标, 综合考虑各项收益与成本, 其收益目标函数表达式为

$$f =$$

$$\max \sum_{t=1}^T (I_t^{\text{SE}} - I_t^{\text{C}} - F_t^{\text{CS}} - F_t^{\text{H}} - F_t^{\text{STO}} - F_t^{\text{WV}}) \quad (6)$$

式中,  $f$  为 VPP 的总收益;  $I_t^{\text{SE}}$  为 VPP 售电、供热收益;  $F_t^{\text{C}}$  为碳交易成本;  $F_t^{\text{CS}}$  为 VPP 中热电厂工作时产生的调节成本;  $F_t^{\text{H}}$  为 CHP 机组和燃气锅炉的天然气燃料购买成本;  $F_t^{\text{STO}}$  为碳封存成本;  $F_t^{\text{WV}}$  为风光发电维护成本。

1) 虚拟电厂售电、供热收益。

$$I_t^{\text{SE}} = M^{\text{s}} \left( P_t^{\text{W}} + P_t^{\text{V}} + \sum_{i \in \theta} P_{i,t}^{\text{CHP}} - W_t^{\text{GC}} \right) + M^{\text{h}} (H_t^{\text{CHP}} + H_t^{\text{GB}}) - M^{\text{b}} P_t^{\text{EM}} \quad (7)$$

式中,  $i$  为热电联产机组的序号;  $\theta$  为虚拟电厂中 CHP 机组数量;  $M^{\text{s}}$ 、 $M^{\text{h}}$ 、 $M^{\text{b}}$  分别为虚拟电厂售电价格、售热价格以及从电网购电价格;  $P_t^{\text{W}}$ 、 $P_t^{\text{V}}$ 、 $W_t^{\text{GC}}$ 、 $P_t^{\text{EM}}$  分别为  $t$  时刻风电、光伏出力、碳捕集总能耗以及购电量;  $H_t^{\text{GB}}$  为  $t$  时刻燃气锅炉输出热能。

2) VPP 中热电厂工作时产生的调节成本。

$$F_t^{\text{CS}} = a_0 + a_1 P_t^{\text{CHP}} + a_2 (P_t^{\text{CHP}})^2 + a_3 H_t^{\text{CHP}} + a_4 (H_{i,t}^{\text{CHP}})^2 + a_5 P_{i,t}^{\text{CHP}} H_{i,t}^{\text{CHP}} \quad (8)$$

式中,  $a_i$  ( $i=0, 1, \dots, 5$ ) 为成本函数系数。

3) CHP 机组和燃气锅炉的天然气燃料购买成本。

$$F_t^{\text{H}} = k^{\text{CH}_4} V_t^{\text{BUY}} \quad (9)$$

$$V_t^{\text{BUY}} = V_t^{\text{CHP}} + V_t^{\text{GB}} - V_t^{\text{P2G}} \quad (10)$$

$$V_t^{\text{CHP}} = \frac{P_t^{\text{CHP}}}{H^{\text{g}} \eta^{\text{CHP,e}}} + \frac{H_t^{\text{CHP}}}{H^{\text{g}} \eta^{\text{CHP,h}}} \quad (11)$$

式(9)~(11)中,  $k^{\text{CH}_4}$  为参与天然气市场的单位交易价格;  $V_t^{\text{CHP}}$ 、 $V_t^{\text{GB}}$  分别为 CHP 机组与燃气锅炉的天然气消耗量;  $\eta^{\text{CHP,e}}$ 、 $\eta^{\text{CHP,h}}$  分别为 CHP 机组发电、发热效率。

4) 碳封存成本。

利用碳封存设备封存 CO<sub>2</sub>, 其表达式如下:

$$F_i^{\text{STO}} = k^{\text{STO}}(Q_i^{\text{CC}} - Q_i^{\text{P2G}}) \quad (12)$$

式中,  $k^{\text{STO}}$  为碳封存成本系数。

5) 风光发电维护成本。

$$F_i^{\text{WV}} = k^{\text{W}} P_i^{\text{W}} + k^{\text{V}} P_i^{\text{V}} \quad (13)$$

式中,  $k^{\text{W}}$ 、 $k^{\text{V}}$  分别为风电、光伏的发电维护成本系数。

## 2.2 约束条件

1) CCS 设备碳捕集量约束。

CHP 机组排出的 CO<sub>2</sub>, 由 CCS 进行捕集, 碳捕集量约束为

$$0 \leq Q_i^{\text{CC}} \leq Q_{\text{max}}^{\text{CC}} \quad (14)$$

$$Q_i^{\text{CC} \cdot \text{max}} = e^g \beta_{\text{max}}^{\text{C}} P_i^{\text{CHP}} \quad (15)$$

$$0 \leq W_i^{\text{OP}} \leq W_{\text{max}}^{\text{OP}} \quad (16)$$

式(14)~(16)中,  $Q_{\text{max}}^{\text{CC}}$  为碳捕集设备最大碳捕集量;  $W_{\text{max}}^{\text{OP}}$  为碳捕集运行能耗出力上限。

2) 燃气锅炉约束。

$$H_{\text{min}}^{\text{GB}} \leq H_i^{\text{GB}} \leq H_{\text{max}}^{\text{GB}} \quad (17)$$

$$H_i^{\text{GB}} = V_i^{\text{GB}} H^g \eta^{\text{GB}} \quad (18)$$

$$|H_{i+1}^{\text{GB}} - H_i^{\text{GB}}| \leq \Delta H^{\text{GB}} \quad (19)$$

式(17)~(19)中,  $H_{\text{max}}^{\text{GB}}$ 、 $H_{\text{min}}^{\text{GB}}$  分别为燃气锅炉出力上、下限;  $\eta^{\text{GB}}$  燃气锅炉效率;  $\Delta H^{\text{GB}}$  为燃气锅炉爬坡速率。

3) 抽凝式热电联产机组运行约束。

$$P_{\text{min}}^{\text{CHP}} \leq P_i^{\text{CHP}} \leq P_{\text{max}}^{\text{CHP}} \quad (20)$$

$$H_{\text{min}}^{\text{CHP}} \leq H_i^{\text{CHP}} \leq H_{\text{max}}^{\text{CHP}} \quad (21)$$

$$|P_{i+1}^{\text{CHP}} - P_i^{\text{CHP}}| \leq \Delta P^{\text{CHP}} \quad (22)$$

式(20)~(22)中,  $\Delta P^{\text{CHP}}$  为 CHP 机组爬坡速率。

5) P2G 运行约束。

$$0 \leq P_i^{\text{P2G}} \leq P_{\text{max}}^{\text{P2G}} \quad (23)$$

式中,  $P_{\text{max}}^{\text{P2G}}$  为 P2G 设备最大运行功率。

6) 电热平衡约束。

$$H_i^{\text{k}} = H_i^{\text{GB}} + H_i^{\text{CHP}} \quad (24)$$

$$P_i^{\text{k}} + W_i^{\text{GC}} + P_i^{\text{P2G}} = P_i^{\text{CHP}} + P_i^{\text{W}} + P_i^{\text{V}} + P_i^{\text{EM}} \quad (25)$$

式(24)、(25)中,  $P_i^{\text{k}}$ 、 $H_i^{\text{k}}$  为  $t$  时刻 VPP 计划内的电、热负荷需求。

## 3 考虑碳交易价格敏感区间和惩罚型碳价的碳交易成本模型

### 3.1 考虑惩罚型碳价的碳交易成本模型

VPP 系统可通过参与碳交易市场进行碳配额交易, 以促进系统的低碳性与经济性。当 VPP 碳配额量多于系统实际碳排放量, 可参与交易市场出售过剩的碳配额获得收益; 反之, 为满足配额要求, 需向市场购买超出的碳配额部分。

实际参与到碳交易市场的碳排放额度  $Q_i^{\text{y}}$  可由政府分配的无偿碳排放配额和 VPP 系统的实际碳排放量所确定:

$$Q_i^{\text{y}} = Q_i^{\text{N}} - Q_i^{\text{A}} \quad (26)$$

$$Q_i^{\text{N}} = e^g (P_i^{\text{CHP}} + W_i^{\text{GC}}) - Q_i^{\text{CC}} \quad (27)$$

$$Q_i^{\text{CC}} = e^g \beta_i^{\text{C}} (P_i^{\text{CHP}} + W_i^{\text{GC}}) \quad (28)$$

$$Q_i^{\text{A}} = \gamma^{\text{C}} (P_i^{\text{CHP}} + W_i^{\text{GC}}) \quad (29)$$

式(26)~(29)中,  $Q_i^{\text{N}}$  为  $t$  时刻的实际 CO<sub>2</sub> 排放量;  $Q_i^{\text{A}}$  为  $t$  时刻政府分配的无偿碳排放额度, 当  $t$  时刻系统的  $Q_i^{\text{N}}$  和  $Q_i^{\text{A}}$  相等时, 实际参与到碳交易市场的碳配额为零, 碳交易成本也为零;  $e^g$  为单位电量碳排放强度;  $\gamma^{\text{C}}$  为单位电量碳排放配额<sup>[15-16]</sup>。

当碳排放与碳配额的差值越大, 则系统参与交易时应承担的碳价也越高, 引入惩罚碳价  $x_i^{\text{p}}$  加大高碳排放行为的惩罚力度。考虑惩罚型碳价的碳交易成本为

$$I_i^{\text{C}} = x_i^{\text{p}} Q_i^{\text{y}} = Q_i^{\text{N}} - Q_i^{\text{A}} = x_i^{\text{p}} [e^g (P_i^{\text{CHP}} + W_i^{\text{GC}}) - e^g \beta_i^{\text{C}} (P_i^{\text{CHP}} + W_i^{\text{GC}}) - \gamma^{\text{C}} (P_i^{\text{CHP}} + W_i^{\text{GC}})] = x_i^{\text{p}} (P_i^{\text{CHP}} + W_i^{\text{GC}}) [e^g (1 - \beta_i^{\text{C}}) - \gamma^{\text{C}}] \quad (30)$$

其约束条件为

$$\begin{cases} W_i^{\text{GC}} \in [W_{\text{min}}^{\text{GC}}, W_{\text{max}}^{\text{GC}}] \\ \beta_i^{\text{C}} \in [0, \beta_{\text{max}}^{\text{C}}] \end{cases} \quad (31)$$

式中,  $W_{\text{min}}^{\text{GC}}$ 、 $W_{\text{max}}^{\text{GC}}$  分别为碳捕集系统的最小和最大能耗; 不等式约束还包括式(20)~(22)。

### 3.2 碳交易价格敏感区间分析

以 2021 年全国碳市场配额成交价格的最低价到最高价为研究区间<sup>[17]</sup>, 即 [38.5, 62.29] 元 · t<sup>-1</sup>。其相关参数<sup>[3]</sup>  $e^g = 0.76 \text{ t} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}$ ,  $W^{\text{C}} = 0.23 \text{ MW} \cdot \text{h} \cdot \text{t}^{-1}$ ,  $\beta_{\text{max}}^{\text{C}} = 0.9$ ; 为便于计算敏感区间, 取  $T=1$ 。以碳交易成本最小为目标, 采用 MATLAB 非线性优化工具箱对碳交易成本模型求解, 得出可得出系统在不同电输出功率和不同碳交易价格下对应的碳捕集水平, 如图 3 所示。

由图 3 可知, 随着 CHP 机组电出力的改变, 在碳交易成本模型下碳捕集水平会在碳交易价格为 43.5~53.5 元 · t<sup>-1</sup> 这一敏感区间内出现较大变化。CHP 机组电出力的不断增加, 碳交易价格所引起的碳捕集水平变化的起始点也不同。

当碳价低于敏感区间下限时, 此时碳价较低, 系统运行成本高于碳交易成本, 碳价对 CCS 参与碳捕集的刺激程度有限, 碳捕集水平较低; 当碳价高于敏感区间上限时, 碳价较高, 高效的碳捕集行为

可以有效降低碳交易成本,CCS以最高捕集水平运行。当碳价位于敏感区间内,可以灵活调节 CCS。

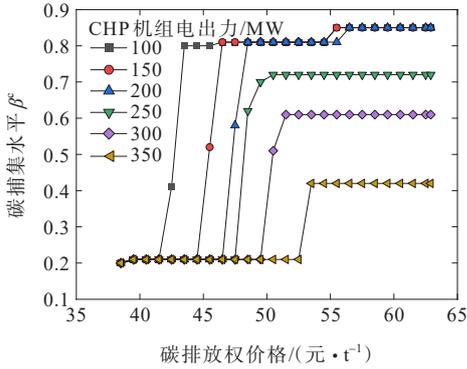


图3 碳交易成本模型下碳捕集水平的变化曲线  
Figure 3 Variation of carbon capture levels under carbon transaction cost model

### 3.3 碳交易价格敏感区间下的惩罚型碳价

为了对高碳排放行为进行更严厉的惩罚,设定的惩罚型碳价随着实际碳排放量的增加而增大,以 CHP 机组电出力为 100 MW 时,碳捕集水平变化的敏感点到最高碳价为惩罚型碳价区间,即  $[x_{\min}^p, x_{\max}^p] = [43.5, 62.29]$  元  $\cdot t^{-1}$ 。构建的惩罚型碳价函数为

$$x_t^p = x_{\min}^p + (Q_t^{jy} - Q_{\min}^{jy})(x_{\max}^p - x_{\min}^p) / (Q_{\max}^{jy} - Q_{\min}^{jy}) \quad (32)$$

式中,  $(x_{\max}^p - x_{\min}^p) / (Q_{\max}^{jy} - Q_{\min}^{jy})$  为单位碳价变化率,表示每单位实际碳排放增量所对应的碳价增量;  $(Q_t^{jy} - Q_{\min}^{jy})(x_{\max}^p - x_{\min}^p) / (Q_{\max}^{jy} - Q_{\min}^{jy})$  为实际碳排放增量对应的碳价增量。

## 4 考虑风光出力不确定性的可调鲁棒优化模型

### 4.1 考虑风光出力不确定性的系统鲁棒性描述

鲁棒优化理论能够处理包含不确定参数集合的优化问题<sup>[18-19]</sup>,经推导后对应于电力系统中考虑风光出力不确定性的可调鲁棒优化模型如下。

考虑可再生能源发电的随机性特点,鲁棒优化旨在找到风光出力不确定时系统最恶劣情况时的最优解。系统最恶劣情况指负荷与新能源出力差额最大,即  $\max(P_t^k - P_t^w - P_t^v)$ 。满足电功率平衡约束式(25)下的最恶劣情况,表达为

$$P_t^{EM} + P_t^{CHP} - W_t^{GC} - P_t^{P2G} = \max(P_t^k - P_t^w - P_t^v) \quad (33)$$

为刻画新能源出力的不确定性及负荷波动情况,引入随机变量参数  $\eta$ ,  $\max(P_t^k - P_t^w - P_t^v)$  转化为

$$\max(P_t^k - P_t^w - P_t^v) = \bar{P}_t^k - \bar{P}_t^w - \bar{P}_t^v + \max \left\{ \begin{aligned} &\eta^{kd} P_t^{kd} + \eta^{ku} P_t^{ku} - \eta^{wd} P_t^{wd} - \\ &\eta^{wu} P_t^{wu} - \eta^{vd} P_t^{vd} - \eta^{vu} P_t^{vu} \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

$$0 \leq \eta^{kd}, \eta^{ku}, \eta^{wd}, \eta^{wu}, \eta^{vd}, \eta^{vu} \leq 1 \quad (35)$$

式(34)、(35)中,  $\bar{P}_t^k, \bar{P}_t^w, \bar{P}_t^v$  分别为负荷、风电、光伏的预测值;  $P_t^k, P_t^{kd}, P_t^{ku}, P_t^{wd}, P_t^{vu}, P_t^{vd}$  分别为负荷、风电、光伏功率波动的上、下限;  $\eta^{ku}, \eta^{kd}, \eta^{wu}, \eta^{wd}, \eta^{vu}, \eta^{vd}$  分别为负荷、风电、光伏波动上、下限的调节比例<sup>[15,20-21]</sup>。

$$\eta^{kd} + \eta^{ku} + \eta^{wd} + \eta^{wu} + \eta^{vd} + \eta^{vu} \leq \Gamma_t \quad (36)$$

可调鲁棒性指标  $\Gamma_t$ , 代表虚拟电厂运行周期内  $t$  时段鲁棒性的强度,当鲁棒性指标提高,对应的不确定集也越大,负荷与新能源出力之差的向上波动越大。

通过引入对偶变量<sup>[22]</sup>  $\lambda_1, \pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6$ , 式(34)中的  $\max\{\cdot\}$  以及式(35)、(36)可等价便于求解的对偶问题:

$$\min(\lambda_1 \Gamma_t + \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 + \pi_6) \quad (37)$$

$$\lambda_1 + \pi_1 \geq P_t^{kd}, \lambda_1 + \pi_2 \geq P_t^{ku} \quad (38)$$

$$\begin{cases} \lambda_1 + \pi_3 \geq -P_t^{wd}, \lambda_1 + \pi_4 \geq -P_t^{wu} \\ \lambda_1 + \pi_5 \geq -P_t^{vd}, \lambda_1 + \pi_6 \geq -P_t^{vu} \end{cases} \quad (39)$$

$$\lambda_1, \pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6 \geq 0 \quad (40)$$

则考虑风光出力不确定性的等式约束式(35)等价转化为

$$\begin{cases} P_t^{EM} + P_t^{CHP} - W_t^{GC} - P_t^{P2G} = \bar{P}_t^k - \bar{P}_t^w - \\ \bar{P}_t^v + \lambda_1 \Gamma_t + \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 + \pi_6 \\ \text{s.t. 式(37)~(40)} \end{cases} \quad (41)$$

### 4.2 考虑风光出力不确定性的可调鲁棒优化模型

1) 目标函数。考虑风光出力不确定性的可调鲁棒优化模型中的目标函数取最大化系统收益  $f$ , 为了与鲁棒优化数学模型目标极小的表述一致,因此对应的优化目标函数为  $\min[-f]$ , 其中  $f$  为函数式(6)。

2) 约束。应满足基本约束式(14)~(24)。

3) 可调鲁棒约束。可调鲁棒约束为式(41), 可调鲁棒性指标见式(36)。

引入可调鲁棒优化后,考虑风光出力不确定性的可调鲁棒优化模型可简写为

$$\begin{cases} \min[-f(x)] \\ \text{s.t.} \begin{cases} \text{式(14)~(24)} \\ \text{式(41)} \end{cases} \end{cases} \quad (42)$$

## 5 算例分析

### 5.1 VPP 系统构成及参数

本文的部分数据参考文献[23-25], VPP 售电计划与热负荷曲线、风光预测出力如图 4、5 所示。VPP 各单元参数见表 1。

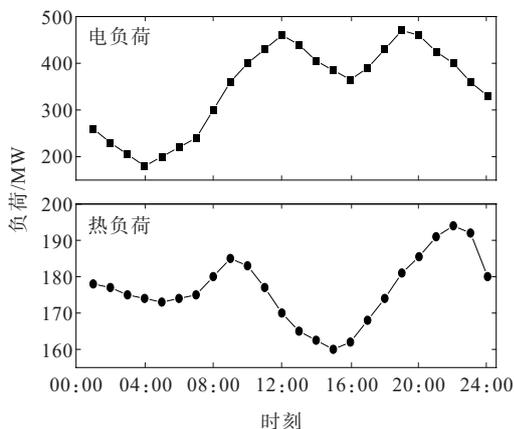


图4 VPP售电计划与热负荷

Figure 4 VPP power sales program and heat load

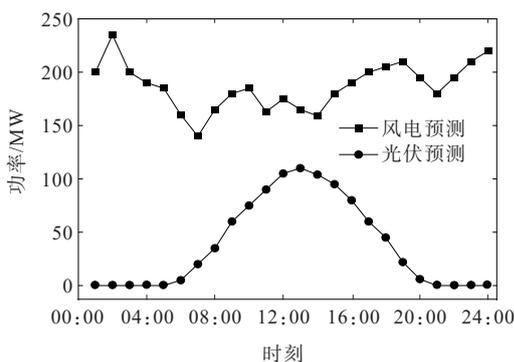


图5 风电光伏预测出力

Figure 5 Wind power PV forecast output

表1 虚拟电厂各设备参数

Table 1 Parameters of equipment of VPP

设备名称	数量/台	(最大出力/最小出力)/MW
热电厂	1	350/100
风电站	1	250/50
光伏电站	1	150/0
碳捕集	1	50/10
P2G	1	60/0

### 5.2 对比场景构建及调度结果分析

为对比分析VPP中引入的碳捕集、电转气设备对VPP总收益的影响以及验证鲁棒线性优化方法的正确性,设置4种对比场景,如表2所示。

表2 4种不同的VPP构建场景

Table 2 Four different VPP construction scenarios

场景	抽凝式CHP	CCS-P2G	鲁棒线性优化方法	惩罚型碳价
1	✓	✗	✗	✗
2	✓	✓	✗	✗
3	✓	✓	✓	✗
4	✓	✓	✓	✓

根据构建的4种场景,优化得到的总收益和P2G天然气产值、弃风功率及CO<sub>2</sub>排放量对比情况

分别如表3、图6~8所示。

表3 各场景下的总收益

Table 3 Total benefits in each scenario

场景	鲁棒性指标	总收益/元
1		2 337 100
2		2 487 240
3	$\Gamma_t = 0$	2 487 240
4	$\Gamma_t = 0$	2 507 810

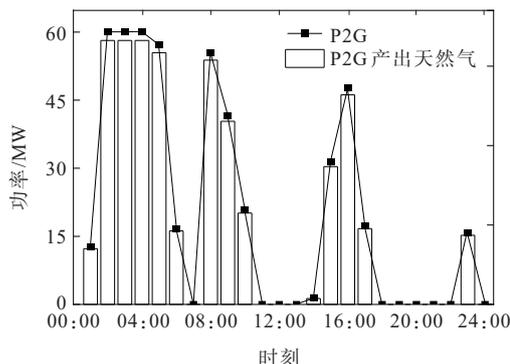


图6 P2G天然气产值

Figure 6 P2G natural gas production value

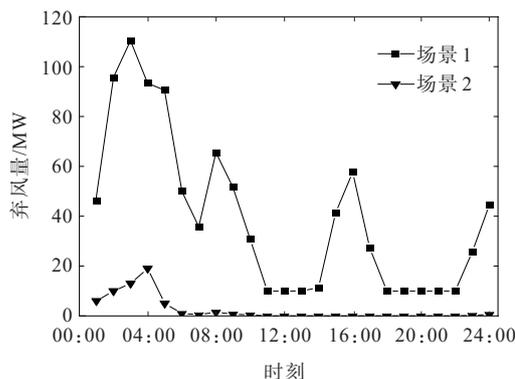


图7 场景1与场景2的弃风功率

Figure 7 Wind abandonment power for scenario 1 and scenario 2

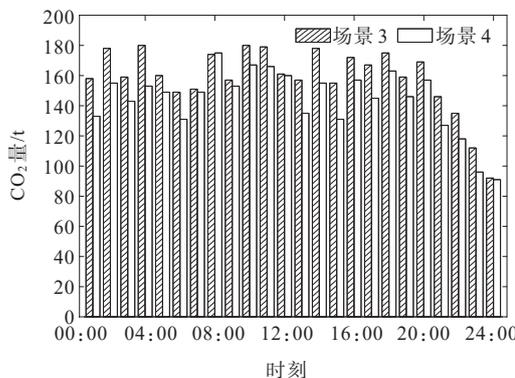


图8 场景3与场景4的CO<sub>2</sub>排放量

Figure 8 CO<sub>2</sub> emissions for scenario 3 and scenario 4

根据优化调度结果,相较于场景1,场景2中CCS-P2G与虚拟电厂的协同运行能够有效降低系

统运行成本,CCS 所捕集的 19.78 t CO<sub>2</sub> 作为碳原料提供给 P2G 设备,由此有效降低了碳封存和碳交易成本。而且加入 CCS-P2G 设备后,电转气过程中产生的天然气可作为 CHP 机组、燃气锅炉的能耗来源,也可参与至天然气市场交易,故场景 2 中购买天然气的费用减少。在负荷低谷时刻(23:00—07:00)与负荷一般时刻(08:00—10:00、15:00—17:00),消纳的风电可基本满足 CCS-P2G 设备的运行。但在负荷峰时刻,CCS-P2G 设备所提供的效益远低于系统的售电收益,故此时燃气轮机以及新能源发出的电能上网,P2G 设备功率为 0。根据图 6 可知,CCS-P2G 设备的引入,使场景 2 的购气量小于场景 1 的购气量,且总收益高于场景 1,但大部分时刻仍需在天然气市场购买天然气满足 CHP 机组和燃气锅炉的消耗。

在场景 3 中,取鲁棒性指标  $\Gamma_i = 0$ ,与场景 2 进行比较,两者运行结果相同,体现了鲁棒优化算法的正确性;场景 4 引入了惩罚型碳价,由于碳交易成本与实际碳排放额的大小成正比,高碳价会限制 VPP 的碳排放,导致碳交易成本降低,总收益提高。

### 5.3 碳价机制对降碳效果的影响

为研究不同碳价机制对 VPP 系统降碳效果的影响,在场景 3 的基础上,分别引入碳交易单价、阶梯式碳价、惩罚型碳价以及考虑敏感区间的惩罚型碳价。仿真结果如图 9 所示。

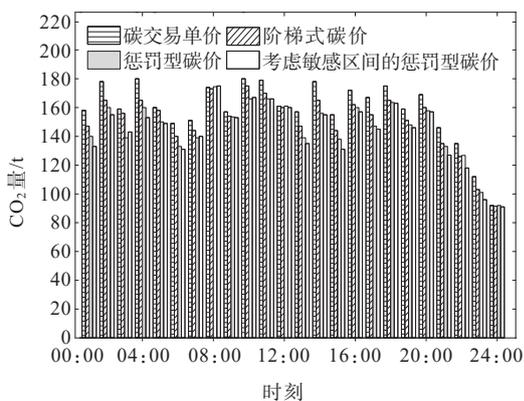


图 9 不同碳价机制对降碳效果的影响

Figure 9 Impact of different carbon price mechanisms on effectiveness of carbon reduction

由图 9 可知,当系统采用传统的碳交易单价时,碳排放量为 3 803 t;当系统采用阶梯式碳价时,碳排放量为 3 611 t;当系统采用惩罚型碳价时,碳排放量为 3 504 t;当系统采用考虑敏感区间的惩罚型碳价时,碳排放量为 3 446 t,较前 3 种价格机制,系统的碳排放量分别减少了 357、165、58 t。由此可见,随

着系统碳排放量的增加,惩罚型碳价随之提高,系统为降低碳排放量和碳交易成本,将会约束自身高碳排行为;处于价格敏感区间内的惩罚型碳价能够有效刺激 CCS 参与碳捕集,提高其碳捕集水平,进一步降低系统碳排放量。

### 5.4 不确定性对优化运行的影响

为观察不同鲁棒性指标对机组运行出力的影响,分别设置鲁棒性指标为 0.5、1.0、1.5 下 CHP 机组、购电功率调整情况,如图 10 所示。

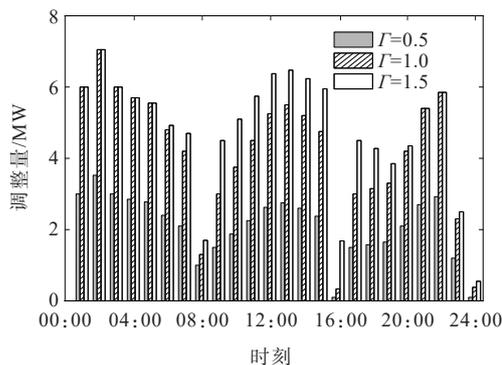


图 10 不同鲁棒性指标对机组调整量影响

Figure 10 Impact of different robustness metrics on amount of unit adjustment

当系统运行处于最恶劣情况时,可再生能源出力向下波动,为保障实时电功率平衡,CHP 机组出力需提高,并且购电功率也应适当增加。由图 10 可知,当鲁棒性指标分别为 0.5、1.0、1.5 时,三者的调整增量分别为 50.5、100.5、115 MW。随着鲁棒性指标  $\Gamma_i$  的增大,风光出力不确定集的范围随之变大,可以看出,系统的收益也随之逐步下降。即指标越高,系统的保守性越高,风光向下波动也越大。为确保电功率平衡,CHP 机组和购电功率所需即时调整的功率量也越多。不同鲁棒性指标下,VPP 的总收益如表 4 所示,CCS-P2G 的功率增量如图 11 所示。

表 4 不同鲁棒性指标对 VPP 总收益的影响

Table 4 Impact of different robustness metrics on total benefits of VPP

鲁棒性指标	VPP 总收益/元
0.5	2 507 300
1.0	2 397 900
1.5	2 273 200

由表 4、图 11 可知,增大鲁棒性指标  $\Gamma_i$  使得系统变得保守,同时使得 VPP 收益下降,CCS-P2G 的功率增加。由于风电光伏出力向下波动,CHP 机组出力和购电功率增加,所增加的功率应优先满足负

荷需求,故 CCS-P2G 功率增量降低。鲁棒性指标为 0.5、1.0、1.5 下,相较于确定性优化,其功率分别降低 156、136、134 MW。即系统保守性越大,电负荷与风电出力之差波动越大,为满足电能平衡,CCS-P2G 需实时调整输出的功率也越多。需注意的是,合适的鲁棒性指标取值可根据实际调度中的调度情况和工作人员的风险偏好合理调整。

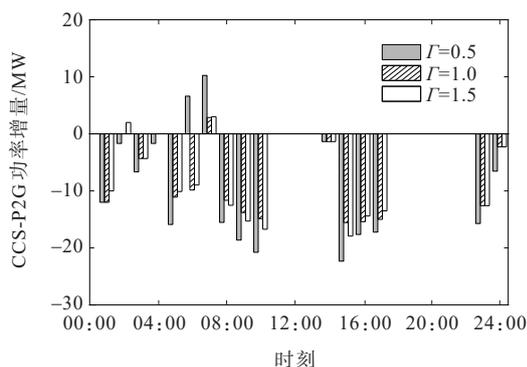


图 11 不同鲁棒性指标下 CCS-P2G 的功率增量

Figure 11 Power increment of CCS-P2G with different robustness metrics

## 6 结 语

1) 相较于传统型碳价,本文所构建的计及价格敏感区间的惩罚型碳价相对于其他碳价机制降碳效果更优,约束 VPP 高碳排行为的同时,考虑市场化价格下能有效刺激系统碳捕集的碳价敏感区间,提高了 CCS 的碳捕集水平,进一步降低系统碳排放和碳交易成本,充分参与碳交易市场的竞争,充分挖掘了 CCS-P2G 虚拟电厂的低碳潜力。

2) 对于含不确定性变量调度规划问题,通过引入对偶变量将其转化为确定性的线性规划问题,通过调整鲁棒性指标来描述系统的保守性,随着系统保守性的提高,经济效益会下降。合理选取不同的鲁棒性指标,一定程度上可实现电力低碳化、鲁棒性与系统经济收益的均衡。

综上所述,在含 CCS-P2G 的虚拟电厂中引入计及价格敏感区间的惩罚型碳价,同时考虑碳捕集水平对于碳价响应的敏感性和新能源出力的不确定性对于 VPP 的优化调度的影响,可促进系统的低碳化和提高经济性,为含 CCS-P2G 的虚拟电厂的低碳化转型提供一定的参考与借鉴。

## 参 考 文 献:

- [1] 刘源,檀勤良,张兴平.基于交互算法的多代理虚拟电厂调度优化及风险分析[J].电力工程技术,2022,41(6):2-12.
- [2] LIU Yuan,TAN Qinliang,ZHANG Xingping.Multi-agent VPP coordinated control optimization and risk analysis based on the interactive algorithm[J].Electric Power Engineering Technology,2022,41(6):2-12.
- [2] 郑云平,焦春雷,亚夏尔·吐尔洪,等.基于新能源发电的构网型协调储能控制策略研究[J].高压电器,2023,59(7):65-74.
- [2] ZHENG Yunping,JIAO Chunlei,YAXAR·Turgun, et al. Research on grid-forming coordinated energy storage control strategy based on converter-interfaced generation [J].High Voltage Apparatus,2023,59(7):65-74.
- [3] 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.
- [3] CHEN Qixin,KANG Chongqing,XIA Qing. Operation mechanism and peak-load shaving effects of carbon-capture power plant[J].Proceedings of the CSEE,2010,30(7):22-28.
- [4] 鲁肖龙,潘淼,鞠立伟,等.考虑碳捕集和电转气的热电联合虚拟电厂调度优化模型[J].电力建设,2023,44(8):107-117.
- [4] LU Xiaolong,PAN Miao,JU Liwei, et al. Dispatching optimization model of combined heat and power virtual power plant considering carbon capture and power-to-gas [J].Electric Power Construction,2023,44(8):107-117.
- [5] 李翼成,赵钰婷,崔杨,等.考虑充放电策略的换电站与风电-碳捕集虚拟电厂的低碳经济调度[J].电力自动化设备,2023,43(6):27-36.
- [5] LI Yicheng,ZHAO Yuting,CUI Yang, et al. Low-carbon economic dispatching of battery swapping station and wind power-carbon capture virtual power plant considering charging and discharging strategy[J].Electric Power Automation Equipment,2023,43(6):27-36.
- [6] 周任军,刘阳升,成天乐,等.考虑碳排放权价格敏感区间的碳捕集水平优化建模[J].电力系统自动化,2013,37(11):46-50.
- [6] ZHOU Renjun,LIU Yangsheng,CHENG Tianle, et al. Carbon capture level optimization modeling considering sensitive internals of carbon emission allowance[J].Automation of Electric Power Systems,2013,37(11):46-50.
- [7] 崔杨,曾鹏,仲悟之,等.考虑阶梯式碳交易的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J].电力自动化设备,2021,41(3):10-17.
- [7] CUI Yang,ZENG Peng,ZHONG Wuzhi, et al. Low-carbon economic dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system based on ladder-type carbon trading[J].Electric Power Automation Equipment,2021,41(3):10-17.
- [8] 徐韵,徐耀杰,杨嘉禹,等.基于阶梯碳交易的电转气虚拟电厂低碳经济调度[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(7):118-128.
- [8] XU Yun,XU Yaojie,YANG Jiayu, et al. Low carbon economic dispatching for power-to-gas virtual power plant based on stepped carbon trading[J].Proceedings of the CSU-EPSA,2023,35(7):118-128.
- [9] 刘晓军,聂凡杰,杨冬锋,等.碳捕集电厂-电转气联合运

- 行模式下考虑绿证-碳交易机制的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电网技术,2023,47(6):2207-2222.
- LIU Xiaojun, NIE Fanjie, YANG Dongfeng, et al. Low carbon economic dispatch of integrated energy systems considering green certificates-carbon trading mechanism under CCPP-P2G joint operation model[J]. Power System Technology,2023,47(6): 2207-2222.
- [10] 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.
- [11] 刘铠诚,何桂雄,郭炳庆. 考虑电价碳价及风功率不确定性的风-火虚拟电厂运行优化策略[J]. 电力科学与技术学报,2018,33(3): 99-105. LIU Kaicheng, HE Guixiong, GUO Bingqing. Optimal strategy for wind-fire virtual power plant considering uncertainties of wind power fluctuations and price randomness of electricity and Carbon[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2018,33(3): 99-105.
- [12] 袁桂丽,刘骅骐,禹建芳,等. 含碳捕集热机组的虚拟电厂热电联合优化调度[J]. 中国电机工程学报,2022,42(12): 4440-4449. YUAN Guili, LIU Huaqi, YU Jianfang, et al. Combined heat and power optimal dispatching in virtual power plant with carbon capture cogeneration unit[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(12): 4440-4449.
- [13] 孟明,马思源,赵慧婷,等. 含光热电站和CCS-P2G耦合的综合能源系统双层优化运行策略[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版),1-10[2024-07-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/1.121.TM.20231016.1007.00.html>. MENG Ming, MA Siyuan, ZHAO Huiting, et al. Bi-level optimal operation strategy of integrated energy system with concentrating solar power plant and CCS-P2G[J/OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 1-10[2024-07-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/1.121.TM.20231016.1007.00.html>.
- [14] PAN G S, GU W, LU Y P, et al. Accurate modeling of a profit-driven power to hydrogen and methane plant toward strategic bidding within multi-type markets[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2021,12(1): 338-349.
- [15] 周任军,李斌,李莹莹,等. 碳捕集中考虑碳价概率分布拟合抽样误差的超分位数-鲁棒优化方法[J]. 中国电机工程学报,2020,40(4): 1130-1136+1405. ZHOU Renjun, LI Bin, LI Yingying, et al. Superquantile-robust optimization method considering fitting and sampling error of random carbon price used in carbon capture[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1130-1136+1405.
- [16] 黄勤坤,邱瑜,王飞,等. 考虑多重不确定性的虚拟电厂随机优化调度[J]. 电网与清洁能源, 20, 38(11): 8-16+26. HUANG Qinkun, QIU Yu, WANG Fei, et al. Stochastic Optimal Scheduling of Virtual Power Plants Considering Multiple Uncertainties[J]. Power System and Clean Energy, 20, 38(11): 8-16+26.
- [17] 王一蓉,陈浩林,林立身,等. 考虑电力行业碳排放的全国碳价预测[J]. 中国电力,2024,57(5):79-87. WANG Yirong, CHEN Haolin, LIN Lishen, et al. National carbon price prediction considering carbon emissions from the power industry[J]. Electric Power,2024,57(5): 79-87
- [18] 韩杏宁,黎嘉明,文劲宇,等. 含多风电场的电力系统储能鲁棒优化配置方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(9): 2120-2127. HAN Xingning, LI Jiaming, WEN Jinyu, et al. Optimization for robust energy storage allocation in power system with multiple wind farms integrated[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(9): 2120-2127.
- [19] PENG C H, XIE P, PAN L, et al. Flexible robust optimization dispatch for hybrid wind/photovoltaic/hydro/thermal power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2016,7(2): 751-762.
- [20] YU S Y, FANG F, LIU Y J, et al. Uncertainties of virtual power plant: problems and countermeasures[J]. Applied Energy,2019,239: 454-470.
- [21] 罗平,闫文乐,王严,等. 考虑CCUS的电-气-热综合能源系统鲁棒优化调度[J]. 高电压技术,2022,48(6): 2077-2087. LUO Ping, YAN Wenle, WANG Yan, et al. Robust optimal dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system considering carbon capture, utilization and storage[J]. High Voltage Engineering,2022,48(6): 2077-2087.
- [22] BARTL D, KUPPER M, NEUFELD A. Duality theory for robust utility maximisation[J]. Finance and Stochastics, 2021,25(3): 469-503.
- [23] 于国强,刘克天,胡尊民,等. 大规模新能源并网下火电机组深度调峰优化调度[J]. 电力工程技术,2023,42(1): 243-250. YU Guoqiang, LIU Ketian, HU Zunmin, et al. Optimal scheduling of deep peak regulation for thermal power units in power grid with large-scale new energy[J]. Electric Power Engineering Technology,2023,42(1):243-250.
- [24] 潘轩,周任军,王昱,等. 考虑供用热特性的虚拟电厂双阶段优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,33(6): 28-34+41. PAN Xuan, ZHOU Renjun, WANG Yu, et al. Two-stage optimal dispatching of virtual power plant considering characteristics of heat supply and use[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2021,33(6): 28-34+41.
- [25] 陈继明,徐乾,李勇,等. 计及源荷不确定性和碳捕集虚拟电厂的电-气互联系统优化调度[J]. 太阳能学报, 2023,44(10): 9-18. CHEN Jiming, XU Qian, LI Yong, et al. Optimal dispatch of electricity-natural gas interconnection system considering source-load uncertainty and virtual power plant with carbon capture[J]. Acta Energetica Sinica,2023,44(10): 9-18.