



# 碳交易背景下基于综合协调储能系统的 碳捕集电厂优化调度

冯帅<sup>1</sup>, 袁至<sup>1</sup>, 李骥<sup>2</sup>, 王维庆<sup>1</sup>, 何山<sup>1</sup>

(1. 新疆大学 可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 国网新疆电力有限公司 电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘 要:** 煤电低碳化改造过程中存在着峰荷时段碳捕集水平降低和碳配额计算与实际应用存在偏差的问题。针对该问题, 首先引入氢燃料电池和储氢装置构成综合协调储能系统, 改善碳捕集电厂峰荷时段碳捕集水平不足的问题; 然后建立碳配额计算模型, 使碳配额的计算方法更符合实际应用; 最后以系统综合运行成本最低为目标, 构建基于综合协调储能系统的碳捕集电厂优化调度模型, 并使用 Cplex 对所提模型进行求解。算例结果表明: 碳捕集电厂在优先消纳风电的基础上提高了碳捕集水平和经济性, 兼顾了系统低碳性。

**关键词:** 碳交易; 碳配额; 碳捕集电厂; 电转气; 氢燃料电池; 综合协调储能系统

**DOI:** 10.11930/j.issn.1004-9649.202209068

## 0 引言

在“双碳”目标下, 2020 年 12 月生态环境部发布的《全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案》为碳配额的计算提供了标准。二氧化碳捕集和封存 (carbon capture and storage, CCS) 是实现煤电低碳化发展的关键技术<sup>[1]</sup>。CCS 在负荷高峰时会进一步加大煤电机组的调节难度, 若频繁调节机组会造成额外的损耗; 若降低 CCS 的运行能力, 则会提高煤电机组的碳交易成本, 降低煤电机组经济性<sup>[2-3]</sup>。因此, 通过碳捕集电厂的优化调度, 在保证其调峰能力的同时提高其碳捕集水平是主要的研究方向。

文献 [4] 构建了计及需求响应的碳捕集电厂低碳经济调度模型, 采用灵活捕获运行模式调节碳捕集设备的捕获水平, 算例结果表明所建模型可有效降低系统碳排放, 提高系统碳捕集水平。文

献 [5-6] 建立了风-光-水-碳捕集多目标协调优化调度模型, 将碳捕集机组与风电-光伏进行了联合调度, 算例结果表明所提调度模型在充分消纳风电的基础上提升了碳捕集水平, 降低了碳捕集能耗。文献 [7] 构建了考虑碳捕集系统和综合需求响应的电-气综合能源系统 (integrated energy system, IES) 低碳经济调度模型, 结果表明所提系统可有效降低碳排放, 提高碳捕集水平。上述文献提高了碳捕集电厂的碳捕集水平, 但存在碳捕集水平在峰荷时段有所降低的问题。文献 [8] 提出了考虑需求响应的源-荷协调 IES 低碳经济调度模型, 在保障风电消纳能力的基础上, 改善了碳捕集电厂中存在的峰荷时段碳捕集水平不足的问题。但上述文献普遍存在碳配额模型与实际应用偏差较大的问题。

为解决上述问题, 本文首先通过电转气 (power to gas, P2G) 和氢燃料电池 (hydrogen fuel cell, HFC) 构成综合协调储能系统。通过综合协调储能系统的电气联动, 在优先消纳风电的基础上, 解决峰荷时段碳捕集水平不足的问题, 使碳捕集水平始终保持最高。其次, 根据《全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案》对碳捕集电厂中碳配额进行了建模, 使其更贴近实际应用。随后, 基于上述碳配额模型和综合协调

**收稿日期:** 2022-09-12; **修回日期:** 2023-03-20。

**基金项目:** 新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题 (考虑可再生能源消纳的碳捕集电厂多目标智能优化方法研究, 2022D04081); 国家自然科学基金资助项目 (含大规模新能源的风光储联合发电系统灵活性运行策略研究, 52067020)。



储能系统构建了碳捕集电厂的优化调度模型，以调度模型的综合成本最低为目标函数，采用 Cplex 进行求解。最后，采用 6 节点电网和 7 节点天然气系统对本文所提模型进行仿真验证。

## 1 系统结构及聚合单元模型

### 1.1 碳捕集电厂模型

碳捕集方式主要有 3 种：燃烧后捕集、燃烧前捕集和富氧燃烧。结合中国的能源消费结构现状、技术成熟度和成本等因素，短期内中国煤电机组仍以燃烧后捕集系统为主<sup>[9]</sup>。碳捕集电厂的能量流如图 1 所示。碳捕集电厂中的再生塔和压缩机在工作中要消耗电能，将二者消耗的电能称为碳捕集运行能耗。煤电机组应用 CCS 技术会造成煤电机组发电效率降低，将这部分效率损耗和碳捕集电厂维持运行状态的能耗称为碳捕集维持能耗。将碳捕集运行能耗和维持能耗统称为碳捕集能耗。碳捕集电厂数学模型为

$$\begin{cases} P_{t,G} = P_{t,J} + P_{t,cap} \\ P_{t,cap} = P_{t,k} + P_{t,o} \\ P_{t,o} = \gamma_o Q_{t,c-d} \\ P_{t,k} = 0.1 \gamma_o Q_{t,c-d} \end{cases} \quad (1)$$

式中： $P_{t,G}$ 为 $t$ 时刻碳捕集电厂等效输出功率，MW； $P_{t,J}$ 为 $t$ 时刻碳捕集电厂净输出功率，MW； $P_{t,cap}$ 为 $t$ 时刻碳捕集系统功率，MW； $P_{t,k}$ 为 $t$ 时刻碳捕集系统维持功率，MW； $P_{t,o}$ 为 $t$ 时刻碳捕集系统运行功率，MW； $\gamma_o$ 为碳捕集系统捕集单位 $CO_2$ 时的能耗，(kW·h)/kg； $Q_{t,c-d}$ 为 $t$ 时刻碳捕集系统的 $CO_2$ 处理量，kg。

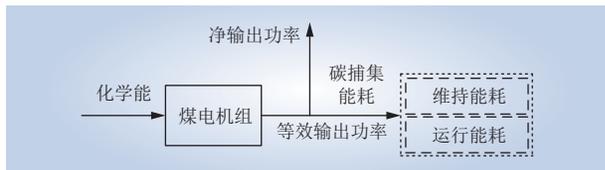


图 1 碳捕集电厂的能量流  
Fig. 1 Energy flow of carbon capture power plant

煤电机组在发电的过程中会产生 $CO_2$ ，产生 $CO_2$ 的量和输出功率之间的关系为

$$\begin{cases} Q_{t,c} = \mu_c P_{t,G} \\ 0 \leq Q_{t,c-d} \leq Q_{t,c} \\ Q_{t,cap}^{CO_2} = \beta Q_{t,c-d} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $Q_{t,c}$ 为煤电机组 $t$ 时刻产生的 $CO_2$ 总量，kg； $\mu_c$ 为煤电机组的 $CO_2$ 排放强度，kg/(kW·h)； $Q_{t,cap}^{CO_2}$ 为 $t$ 时刻碳捕集系统捕集 $CO_2$ 的量，kg； $\beta$ 为碳捕集系统的捕集率。

### 1.2 综合协调储能系统

含碳捕集和综合协调储能系统的电力系统如图 2 所示。电解池将夜间风电转换成 $H_2$ 送入储氢单元进行存储。 $H_2$ 在电价高峰时供给 HFC，在实现“高发低储”套利的同时，降低 P2G 系统中 $H_2$ 甲烷化梯级利用造成的能量损耗，提高系统的综合能源利用效率。甲烷化单元吸收碳捕集电厂产生的 $CO_2$ ，降低碳排放，提升碳交易收益。

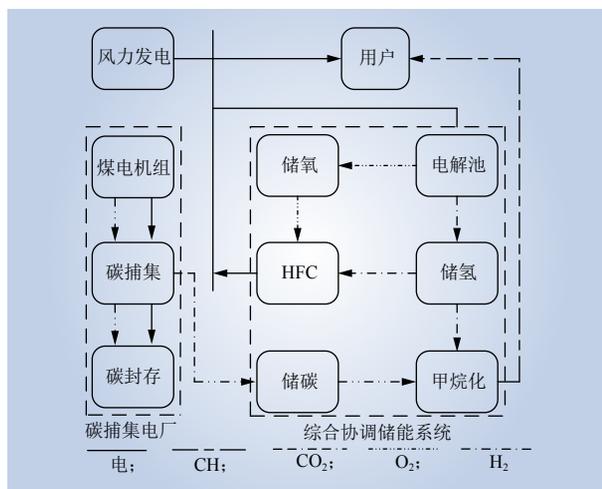


图 2 基于综合协调储能系统的电力系统

Fig. 2 Power system based on integrated coordinated energy storage system

#### 1.2.1 P2G 系统

本文将 P2G 分为两阶段进行分析<sup>[10]</sup>。在电解水阶段，水在高温、通电和催化剂的条件下分解为 $H_2$ 和 $O_2$ 。甲烷化阶段 $H_2$ 和碳捕集系统收集的 $CO_2$ 在高温高压下产生 $CH_4$ 。甲烷化单元所产生的 $CH_4$ 和消耗的 $CO_2$ 均取决于储氢设备中消耗 $H_2$ 的量。P2G 系统的数学模型为

$$\begin{cases} Q_{t,P}^{H_2} = \frac{P_{t,P} \eta^{H_2} \zeta_e}{V_{H_2}} \\ Q_{t,P}^{O_2} = 2 Q_{t,P}^{H_2} \\ Q_{t,P}^{CH_4} = Q_{t,in,P}^{H_2} \psi \\ Q_{t,P}^{CO_2} = Q_{t,in,P}^{H_2} \psi \end{cases} \quad (3)$$

式中： $Q_{t,P}^{H_2}$ 为 $t$ 时刻电解池单元产生 $H_2$ 的量，kg； $P_{t,P}$ 为 $t$ 时刻 P2G 系统所消耗的功率，MW； $\eta^{H_2}$ 为

电解池单元的效率； $\zeta_e$ 为 $H_2$ 的等值热能系数，kJ/MW； $V^{H_2}$ 为 $H_2$ 的高热值，kJ/g； $Q_{t,p}^{O_2}$ 为 $t$ 时刻电解池单元产生 $O_2$ 的量，kg； $Q_{t,p}^{CH_4}$ 为 $t$ 时刻甲烷化单元产生 $CH_4$ 的量，kg； $Q_{t,in,p}^{H_2}$ 为 $t$ 时刻储氢单元输入甲烷化单元的量，kg； $\psi$ 为 $H_2$ 和 $CO_2$ 的反应系数； $Q_{t,p}^{CO_2}$ 为 $t$ 时刻甲烷化单元消耗 $CO_2$ 的量，kg。

### 1.2.2 储气单元

储气单元模型主要包括储氢单元、储氧单元和储碳单元。

#### 1) 储氢单元数学模型为

$$\begin{cases} Q_{t,in}^{H_2} = Q_{t,p}^{H_2} \\ E_t^{H_2} = E_{t-1}^{H_2} + (Q_{t,in}^{H_2} - Q_{t,out}^{H_2})\Delta t \end{cases} \quad (4)$$

式中： $Q_{t,in}^{H_2}$ 为 $t$ 时刻储氢单元输入 $H_2$ 的流量，kg/s； $E_t^{H_2}$ 为 $t$ 时刻储氢设备的 $H_2$ 存储量，kg； $Q_{t,out}^{H_2}$ 为 $t$ 时刻储氢单元输出 $H_2$ 的流量，kg/s。

#### 2) 储氧单元数学模型为

$$\begin{cases} Q_{t,in}^{O_2} = Q_{t,p}^{O_2} \\ E_t^{O_2} = E_{t-1}^{O_2} + (Q_{t,in}^{O_2} - Q_{t,out}^{O_2})\Delta t \end{cases} \quad (5)$$

式中： $Q_{t,in}^{O_2}$ 为 $t$ 时刻储氧单元输入 $O_2$ 的流量，kg/s； $E_t^{O_2}$ 为 $t$ 时刻储氧设备的 $O_2$ 存储量，kg； $Q_{t,out}^{O_2}$ 为 $t$ 时刻储氧单元输出 $O_2$ 的流量，kg/s。

#### 3) 储碳单元数学模型为

$$\begin{cases} Q_{t,in}^{CO_2} = Q_{t,cap}^{CO_2} \\ E_t^{CO_2} = E_{t-1}^{CO_2} + (Q_{t,in}^{CO_2} - Q_{t,out}^{CO_2})\Delta t \end{cases} \quad (6)$$

式中： $Q_{t,in}^{CO_2}$ 为储碳单元输入 $CO_2$ 的流量，kg/s； $E_t^{CO_2}$ 为 $t$ 时刻储碳设备的 $CO_2$ 存储量，kg； $Q_{t,out}^{CO_2}$ 为 $t$ 时刻储碳单元输出 $CO_2$ 的流量，kg/s。

### 1.2.3 HFC单元

本文的重点在于HFC和P2G系统的协调调度，以促进含大规模新能源接入的碳捕集机组的低碳经济运行，HFC的内部运行机理可见文献[11-12]。

当HFC的设备参数给定时，HFC的电功率 $P_{t,HFCe}$ 主要取决于 $H_2$ 的输入速率，即

$$P_{t,HFCe} = \frac{2FQ_{t,in,f}^{H_2}}{M_{H_2}}(E_{nemst} - \theta_{act} - \theta_{ohm} - \theta_{con}) \quad (7)$$

式中： $F$ 为法拉第常数，C/mol； $Q_{t,in,f}^{H_2}$ 为 $H_2$ 输入速率，kg/s； $M_{H_2}$ 为 $H_2$ 的摩尔质量，kg/mol； $E_{nemst}$ 为能斯特电压，V； $\theta_{act}$ 为活化极性过电压，V；

$\theta_{ohm}$ 为欧姆过电压，V； $\theta_{con}$ 为浓度差过电压，V。

## 2 系统优化调度模型

### 2.1 碳配额

根据生态环境部最新发布的《全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案》对碳捕集电厂中碳配额的计算方法进行建模，使其更贴近实际应用。碳捕集电厂碳配额总量<sup>[13]</sup>为

$$A = Q_e B_e F_1 F_r F_f \quad (8)$$

式中： $Q_e$ 为机组的供电量，kW·h； $B_e$ 为机组捕集单位 $CO_2$ 的供电基准值，t/(kW·h)； $F_1$ 为机组冷却方式修正系数； $F_r$ 为机组供热量修正系数； $F_f$ 为机组负荷修正系数。

### 2.2 目标函数

系统成本包括碳交易成本 $f_1$ 、各聚合单元的运行成本 $f_2$ 以及电气交易成本 $f_3$ 。

$$\begin{cases} f_1 = P_r \left( \sum_{t=1}^{24} (Q_{t,c} - Q_{t,cap}^{CO_2} - Q_{t,p}^{CO_2}) - A \right) \\ f_2 = \gamma_m Q_e P_m + \gamma_p \sum_{t=1}^{24} P_{t,p} + \gamma_f \sum_{t=1}^{24} P_{t,HFCe} + \gamma_{cap} Q_{cap}^{CO_2} \\ f_3 = \sum_{t=1}^{24} (\gamma_1 P_{t,b} + \gamma_2 Q_{t,H_2}) \end{cases} \quad (9)$$

式中： $P_r$ 为碳交易价格，元/t； $\gamma_m$ 为供电煤耗t/(kW·h)； $P_m$ 为对应的煤炭价格，元/t； $\gamma_p$ 为P2G单位功率运行成本，元/MW； $\gamma_f$ 为HFC单位功率成本，元/MW； $\gamma_{cap}$ 为封存单位 $CO_2$ 的成本，元/t； $\gamma_1$ 为购电电价，元/(kW·h)； $P_{t,b}$ 为 $t$ 时刻购电量，kW·h； $\gamma_2$ 为氢气购买价格，元/kg； $Q_{t,H_2}$ 为 $t$ 时刻购气量，kg。

目标函数 $f$ 为调度模型的综合成本，即上述各项成本之和，可表示为

$$f = f_1 + f_2 + f_3 \quad (10)$$

### 2.3 约束条件

#### 1) 功率平衡约束为

$$P_{t,j} + P_{t,w} + P_{t,HFCe} + P_{t,b} = P_{t,load,e} + P_{t,p} \quad (11)$$

式中： $P_{t,w}$ 为 $t$ 时刻风电实际上网功率，MW； $P_{t,load,e}$ 为 $t$ 时刻电力系统的电负荷，MW。

#### 2) 碳捕集电厂约束为



$$\begin{cases} P_{G,\min} \leq P_{t,G} \leq P_{G,\max} \\ P_{t,k} \leq P_{t,\text{cap}} \leq P_{G,\max} \\ |P_{t,G} - P_{t-1,G}| \leq \Delta P_G \\ |P_{t,\text{cap}} - P_{t-1,\text{cap}}| \leq \Delta P_{\text{cap}} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $P_{G,\min}$ 、 $P_{G,\max}$ 分别为碳捕集电厂出力的下限和上限，MW； $\Delta P_G$ 为碳捕集机组出力爬坡速率，MW； $\Delta P_{\text{cap}}$ 为碳捕集系统爬坡速率，MW。

3) P2G 运行约束为

$$\tau_p P_{t,p,\min} \leq P_{t,p} \leq \tau_p P_{t,p,\max} \quad (13)$$

式中： $\tau_p$ 为电解池单元的运行状态，取 0 或 1； $P_{t,p,\min}$ 和 $P_{t,p,\max}$ 分别为 $t$ 时刻输入电解池单元的最小功率和最大功率，MW。

4) 储气单元约束为

$$\begin{cases} 0 \leq E_t^{\text{H}_2} \leq E_{\max}^{\text{H}_2} \\ 0 \leq Q_{t,\text{in}}^{\text{H}_2} \leq Q_{\text{in},\max}^{\text{H}_2} \\ 0 \leq Q_{t,\text{out}}^{\text{H}_2} \leq Q_{\text{out},\max}^{\text{H}_2} \\ 0 \leq E_t^{\text{O}_2} \leq E_{\max}^{\text{O}_2} \\ 0 \leq Q_{t,\text{in}}^{\text{O}_2} \leq Q_{\text{in},\max}^{\text{O}_2} \\ 0 \leq Q_{t,\text{out}}^{\text{O}_2} \leq Q_{\text{out},\max}^{\text{O}_2} \\ 0 \leq E_t^{\text{CO}_2} \leq E_{\max}^{\text{CO}_2} \\ 0 \leq Q_{t,\text{in}}^{\text{CO}_2} \leq Q_{\text{in},\max}^{\text{CO}_2} \\ 0 \leq Q_{t,\text{out}}^{\text{CO}_2} \leq Q_{\text{out},\max}^{\text{CO}_2} \end{cases} \quad (14)$$

式中： $E_{\max}^{\text{H}_2}$ 为储氢单元的 $\text{H}_2$ 最大存储量，kg； $Q_{\text{in},\max}^{\text{H}_2}$ 和 $Q_{\text{out},\max}^{\text{H}_2}$ 分别为储氢单元输入、输出 $\text{H}_2$ 最大流量，kg/s； $E_{\max}^{\text{O}_2}$ 为储氧单元的 $\text{O}_2$ 最大存储量，kg； $Q_{\text{in},\max}^{\text{O}_2}$ 和 $Q_{\text{out},\max}^{\text{O}_2}$ 分别为储氧单元输入、输出 $\text{O}_2$ 的最大流量，kg/s； $E_{\max}^{\text{CO}_2}$ 为储碳单元的 $\text{CO}_2$ 最大存储量，kg； $Q_{\text{in},\max}^{\text{CO}_2}$ 和 $Q_{\text{out},\max}^{\text{CO}_2}$ 分别为储碳单元输入、输出 $\text{CO}_2$ 的最大流量，kg/s。

5) 上级主网交互约束为

$$\begin{cases} 0 \leq p_{t,b} \leq p_{b,\max} \\ 0 \leq Q_{t,\text{H}_2} \leq Q_{\text{H}_2,\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中： $p_{b,\max}$ 为碳捕集电厂与上级电网的交互上限，kW·h； $Q_{\text{H}_2,\max}$ 为碳捕集电厂与上级气网的交互上限，kg。

HFC 的放电状况主要取决于 $\text{H}_2$ 的输入速率，因此当 $\text{H}_2$ 的输出符合相应约束时，HFC的放电也在相应的范围内。本文设定的场景中风电优先进行全额消纳，因此风电出力始终为预测值，综上，本文不再设定HFC和风电的出力约束。

3 算例分析

3.1 算例参数

本文采用 6 节点电网和 7 节点天然气系统<sup>[14]</sup>对所提模型进行仿真验证。其中 G1、G2、G4 和 G5 为煤电机组，由于机组 G4 和 G5 碳排放量较高，在 G4 和 G5 中加装了 CCS 装置，G3 为 HFC。EL1、EL2 和 EL3 为电力负荷，GL1、GL2 和 GL3 为 3 个天然气负荷，GW1、GW2 为 2 个天然气气井。风电场位置如图 3 所示，风电场由 25 台容量为 2 MW 的双馈风机构成，总容量为 50 MW。风电场功率曲线如图 4 所示。电力系统相关数据与 Matpower6 节点相同，相关参数见表 1 和表 2<sup>[7,14-21]</sup>。

考虑风电在全额消纳的情况下，所提综合协

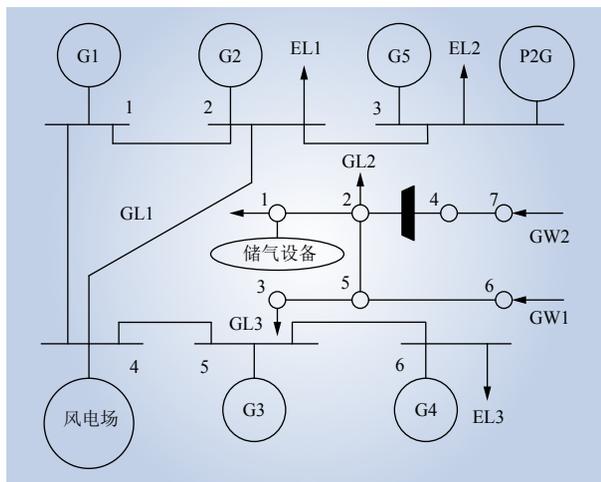


图 3 6 节点电网和 7 节点天然气网络

Fig. 3 6-node power grid and 7-node natural gas network

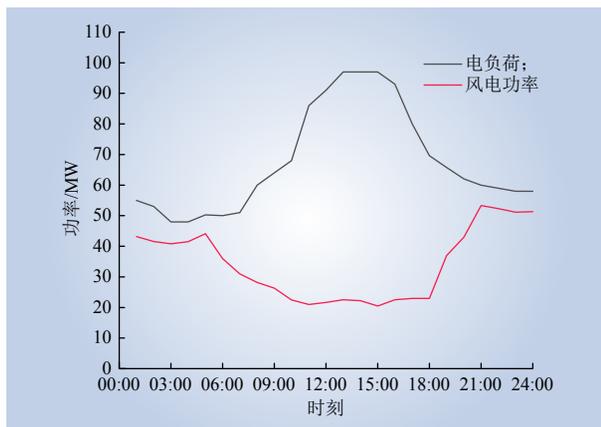


图 4 电负荷及风电场功率曲线

Fig. 4 Electric load and power curve of wind farm



表 1 峰谷电价  
Table 1 Peak-valley price

负荷类型	时段	电价/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )
峰	11:00—16:00、19:00—21:00	0.90
平	06:00—11:00、16:00—19:00、21:00—24:00	0.55
谷	00:00—06:00	0.18

表 2 参数表  
Table 2 Parameter table

名称	数值	名称	数值
P2G运行成本/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )	0.1	碳封存成本/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> )	0.03
捕集单位CO <sub>2</sub> 的能耗/(kW·h·t <sup>-1</sup> )	269	机组的供电基准值/(kgCO <sub>2</sub> ·(kW·h) <sup>-1</sup> )	0.979
煤炭价格/(元·t <sup>-1</sup> )	600	供电煤耗/(kg·(kW·h) <sup>-1</sup> )	0.3
天然气单位价格/(元·m <sup>3</sup> )	3.50	碳交易价格/(元·t <sup>-1</sup> )	100
反应系数	0.25		

调储能系统对提高峰荷时段碳捕集水平的效果，为此设置 2 种运行场景进行对比分析。场景 1 主要由碳捕集电厂、风电场和 P2G 系统组成<sup>[7]</sup>。场景 2 在场景 1 的基础上增加了由 HFC、P2G 和相应储气设备构成的综合协调储能系统。

### 3.2 仿真结果分析

Cplex 是 IBM 公司开发的一款商业版线性求解器，通过 Matlab 中集成了 Cplex 的 Yalmip 工具箱进行求解时，不仅语言简洁、清晰，还具有较快的速度，本文将使用 Cplex 进行求解。假设碳捕集电厂的最大捕集效率为 90%，即碳捕集电厂捕集到 CO<sub>2</sub> 的量与产生 CO<sub>2</sub> 的量之比最大为 0.9。图 5 为场景 1 碳捕集电厂的电出力。由图 5 可知，碳捕集电厂在 00:00—07:00 和 20:00—24:00 时段均处于最高碳捕集水平，但因为风电存在反调峰特性，为保持系统功率平衡，碳捕集能耗在 07:00—16:00 时段随着等效输出功率的增加却保持不变，即碳捕集水平在下降。在 16:00—20:00 时段随着碳捕集电厂等效输出功率的降低，虽然碳捕集水平有所上升，但是碳捕集水平仍然未达到 0.9。场景 1 中 07:00—20:00 时段因为风电的反调峰特性，为维持系统供电平衡，碳捕集电厂减少碳捕集能耗以增加净输出功率，所以导致碳捕集水平在峰荷时段有所降低。

图 6 为引入综合协调储能系统后的碳捕集电厂的电出力。由图 6 可知，在 11:00—16:00 负荷

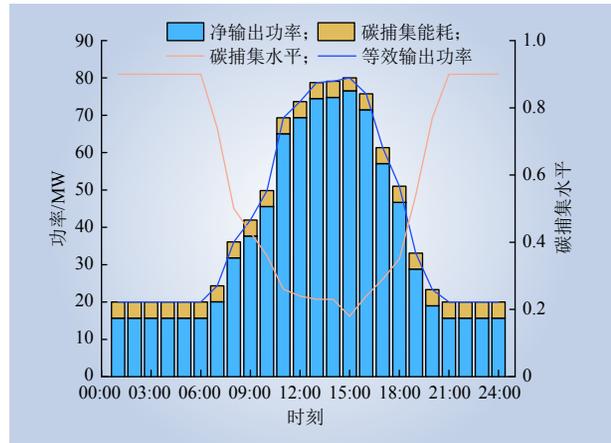


图 5 场景 1 碳捕集电厂电出力  
Fig. 5 Power output of carbon capture power plant for scenario 1

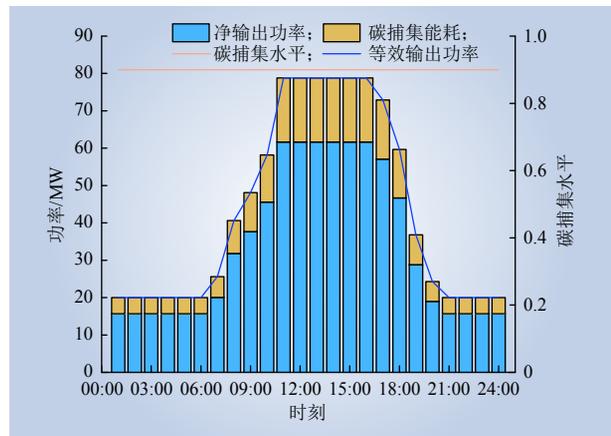


图 6 场景 2 碳捕集电厂电出力  
Fig. 6 Power output of carbon capture power plant for scenario 2

高峰时段，碳捕集能耗随着等效输出功率的增长而增加，碳捕集水平可以一直保持在 0.9，有效减少了系统的碳排放。场景 2 在负荷高峰时由综合协调储能系统承担调峰任务，无须从供给碳捕集设备的能耗中提取部分能耗供给系统电负荷，使得场景 2 可最大限度地减少碳排放，保障碳捕集电厂在负荷高峰时段的碳捕集能力。

图 7 为场景 1 碳捕集电厂电功率平衡图。由图 5 和图 7 可得，场景 1 在 15:00 碳捕集电厂的等效出力达到最大，此时系统一方面通过降低碳捕集能耗，另一方面通过购电满足系统的调峰需求，因此场景 1 的调度方式在负荷高峰时增加了系统的碳排放和发电成本。图 8 为场景 2 碳捕集电厂电功率平衡图。由图 6 和图 8 可得，场景 2

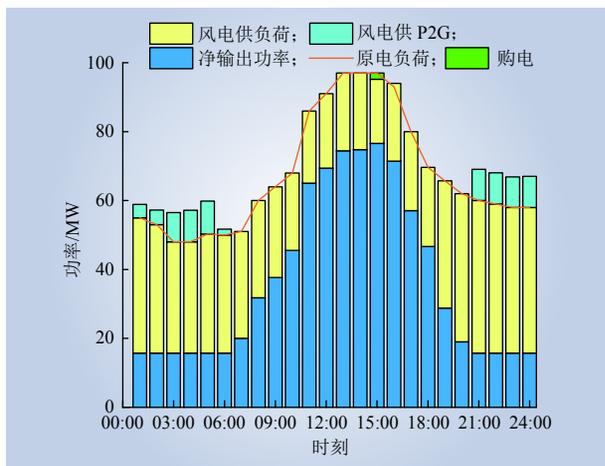


图 7 场景 1 碳捕集电厂电功率平衡

Fig. 7 Electric power balance of carbon capture power plant for scenario 1

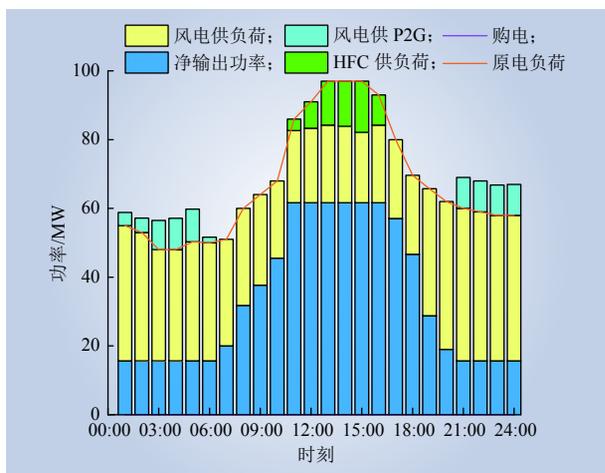


图 8 场景 2 碳捕集电厂电功率平衡

Fig. 8 Electric power balance of carbon capture power plant for scenario 2

在 11:00—16:00 时段由综合协调储能系统中的 HFC 利用负荷低谷时产生的  $H_2$  进行调峰, 无须降低碳捕集设备的能耗, 保障了场景 2 的碳捕集水平。

图 9 为场景 1 的碳氢流动图。由图 7 和图 9 可得, 在 01:00—06:00 和 21:00—24:00 时段电解水单元产生的  $H_2$  被全部用于甲烷化, 以消耗  $CO_2$ , 减少碳排放。图 10 为场景 2 碳氢流动图。由图 8 和图 10 可得, 在 11:00—16:00 负荷高峰时段, HFC 首先消耗 00:00—06:00 时段风电供 P2G 产生的  $H_2$ , 当  $H_2$  不足时通过外购  $H_2$  以保障碳捕集系统的运行。在 21:00—24:00 时段  $H_2$  有余量时, 多余的  $H_2$  被用于进行甲烷化, 以减少碳排放, 增加碳交易收益。综合协调储能系统中的

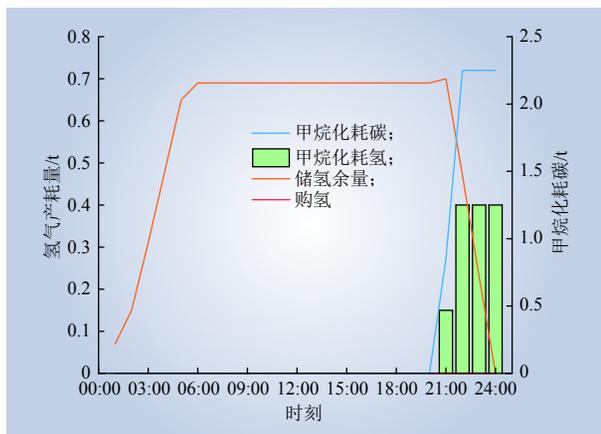


图 9 场景 1 碳氢流动图

Fig. 9 Hydrocarbon flow diagram for scenario 1

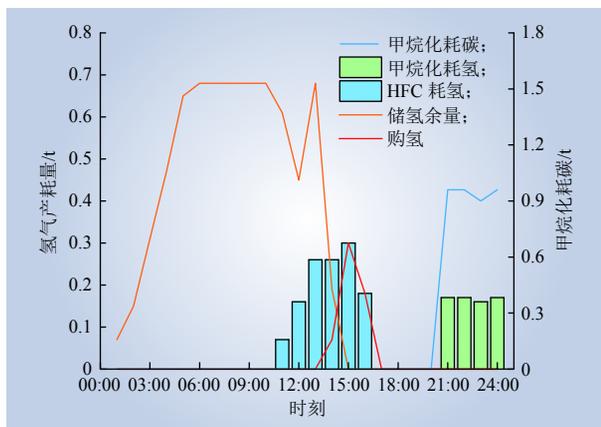


图 10 场景 2 碳氢流动图

Fig. 10 Hydrocarbon flow diagram for scenario 2

HFC 直接利用 P2G 中电解水单元产生的  $H_2$ , 促进了氢能高品位使用, 降低了直接甲烷化造成的能量梯级利用损耗。

### 3.3 各场景碳排放量及总成本分析

表 3 为不同场景下系统成本和碳排放量, 由表 3 可知, 场景 2 在引入所提综合协调储能系统后, 系统总成本降低了 26.48%。如上文所述, 场景 2 中综合协调储能系统提高了系统在负荷高峰时的碳捕集水平, 使得场景 2 的净碳排放量降低了 75.75%, 也使得场景 2 在碳交易中获得了更多的碳交易收益。综合协调储能系统的引入虽然使得场景 2 的运维成本增加了 2538.43 元, 电气交易成本增加了 3262.73 元, 但是所增加的量远小于降低的碳交易成本。场景 2 通过 HFC 高效利用风电供 P2G 产生的  $H_2$ , 提高了碳捕集水平, 增加了碳交易收益。



表 3 不同场景下系统的成本和碳排量统计  
Table 3 Statistics of system cost and carbon emission under different scenarios

场景	碳交易成本/元	各单元运维成本/元	电-气交易成本/元	净碳排放量/t	总碳排放量/t	总成本/元
1	-26513.76	205447.05	1620.00	465.25	1060.62	182079.16
2	-80246.63	207985.48	4882.73	112.81	1128.13	133862.52

## 4 结论

本文通过 HFC 与 P2G 协调运行，构建了基于综合协调储能系统的碳捕集电厂优化调度模型，HFC 与 P2G 的协调配合在优先全额消纳风电的前提下，解决了峰荷时段碳捕集电厂碳捕集水平不足的问题，兼顾了碳捕集电厂的低碳性与经济性，为含碳捕集电厂的低碳经济调度提供了参考。通过算例分析得出以下结论。

1) 引入综合能源协调储能系统的碳捕集电厂在负荷高峰时由综合协调储能系统承担调峰任务，无须从供给碳捕集设备的能耗中提取部分来供给系统电负荷，使得碳捕集电厂可最大限度地减少碳排放，保障碳捕集电厂的碳捕集能力。

2) 综合协调储能系统的引入使得 HFC 对 P2G 中电解水单元产生的  $H_2$  进行了直接利用，促进了氢能的高品位使用，降低了直接甲烷化造成的能量梯级利用损耗。

3) 引入综合能源协调储能系统的碳捕集电厂总成本降低了 48216.6 元，降幅达 26.48%，净碳排放量降低了 352.44 t，降幅达 75.75%，证明了综合协调储能系统的引入对于提高碳捕集电厂的低碳性和经济性具有重要意义。

4) 文中以生态环境部发布的《全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案》为标准建立的碳配额计算模型，使碳配额的计算更加精确，更符合实际应用。

## 参考文献：

- [1] 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): 2537-2544.  
MI Jianfeng, MA Xiaofang. Development trend analysis of carbon capture, utilization and storage technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2537-2544.
- [2] 董洁, 乔建强. “双碳”目标下先进煤炭清洁利用发电技术研究综述 [J]. 中国电力, 2022, 55(8): 202-212.  
DONG Jie, QIAO Jianqiang. A review on advanced clean coal power generation technology under "carbon peaking and carbon neutrality" goal[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 202-212.
- [3] 孙子茹, 艾芊, 居来提·阿不力孜, 等. 考虑季节性氢储及期货式碳交易的综合能源系统年度规划研究 [J]. 中国电力, 2022, 55(8): 2-13.  
SUN Zirui, AI Qian, JULAITI Abulizi, et al. Annual planning study of integrated energy system considering seasonal hydrogen storage and futures carbon trading[J]. Electric Power, 2022, 55(8): 2-13.
- [4] 陈海鹏, 陈晋冬, 张忠, 等. 计及灵活运行碳捕集电厂捕获能耗的电力系统低碳经济调度 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 133-139.  
CHEN Haipeng, CHEN Jindong, ZHANG Zhong, et al. Low-carbon economic dispatching of power system considering capture energy consumption of carbon capture power plants with flexible operation mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 133-139.
- [5] 赵东声, 高忠臣, 刘伟. 碳捕集火电与梯级水电联合优化的低碳节能发电调度 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 148-155.  
ZHAO Dongsheng, GAO Zhongchen, LIU Wei. Low carbon and energy-saving power generation dispatching based on joint optimization of carbon capture thermal power and cascade hydropower[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 148-155.
- [6] 孙惠娟, 蒙锦辉, 彭春华. 风-光-水-碳捕集多区域虚拟电厂协调优化调度 [J]. 电网技术, 2019, 43(11): 4040-4051.  
SUN Huijuan, MENG Jinhui, PENG Chunhua. Coordinated optimization scheduling of multi-region virtual power plant with wind-power/photovoltaic/hydropower/carbon-capture units[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 4040-4051.
- [7] 田丰, 贾燕冰, 任海泉, 等. 考虑碳捕集系统的综合能源系统“源-荷”低碳经济调度 [J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3346-3355.  
TIAN Feng, JIA Yanbing, REN Haiquan, et al. "Source load" low carbon economic dispatch of integrated energy system considering carbon capture system[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3346-3355.
- [8] 崔杨, 谷春池, 付小标, 等. 考虑广义电热需求响应的含碳捕集电厂综合能源系统低碳经济调度 [J]. 中国电机工程学报, 2022: 1-17.  
CUI Yang, GU Chunchi, FU Xiaobiao, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system with carbon capture power plants considering generalized electric heating demand response[J].



- Proceedings of the CSEE, 2022: 1–17.
- [9] 张沈习, 王丹阳, 程浩忠, 等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 189–207.  
ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, *et al.* Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189–207.
- [10] 鲁鹏, 冯春贤, 武伟鸣, 等. 园区能源供需价值双层 Stackelberg 博弈模型 [J]. 中国电力, 2022, 55(6): 74–79.  
LU Peng, FENG Chunxian, WU Weiming, *et al.* Two-Layer Stackelberg Game Model for Energy Supply and Demand in the Park[J]. Electric Power, 2022, 55(6): 74–79.
- [11] 随权, 马啸, 魏繁荣, 等. 计及燃料电池热-电综合利用的能源网日前调度优化策略 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1603–1613, 1857.  
SUI Quan, MA Xiao, WEI Fanrong, *et al.* Day-ahead dispatching optimization strategy for energy network considering fuel cell thermal-electric comprehensive utilization[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1603–1613, 1857.
- [12] 荆涛, 陈庚, 王子豪, 等. 风光互补发电耦合氢储能系统研究综述 [J]. 中国电力, 2022, 55(1): 75–83.  
JING Tao, CHEN Geng, WANG Zihao, *et al.* Research overview on the integrated system of wind-solar hybrid power generation coupled with hydrogen-based energy storage[J]. Electric Power, 2022, 55(1): 75–83.
- [13] 生态环境部. 2019—2020 年全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案 (发电行业)(国环规气候〔2020〕3号)[A]. 2020.
- [14] 余莎, 何光层, 刘志坚, 等. 含碳捕集的电-气综合能源系统低碳经济调度 [J]. 广东电力, 2022, 35(2): 74–82.  
YU Sha, HE Guangceng, LIU Zhijian, *et al.* Low-carbon economic dispatch of integrated electricity-gas energy system with carbon capture[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(2): 74–82.
- [15] 廖跃洪, 陈洁, 杨彦飞, 等. 考虑碳捕集电厂综合灵活运行下的含 P2G 和光热电站虚拟电厂优化调度 [J]. 电力建设, 2022, 43(4): 20–27.  
LIAO Yuehong, CHEN Jie, YANG Yanfei, *et al.* Optimal scheduling of virtual power plant with P2G and photo-thermal power plant considering the flexible operation of carbon capture power plants[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(4): 20–27.
- [16] 卢志刚, 隋玉珊, 冯涛, 等. 考虑储热装置与碳捕集设备的风电消纳低碳经济调度 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 41–51.  
LU Zhigang, SUI Yushan, FENG Tao, *et al.* Wind power accommodation low-carbon economic dispatch considering heat accumulator and carbon capture devices[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 41–51.
- [17] 付亦殊, 陈红坤, 姜欣, 等. 促进大规模风电消纳的双层调峰补偿机制研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 51–57.  
FU Yishu, CHEN Hongkun, JIANG Xin, *et al.* A bi-layer peak-regulation compensation mechanism for large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 51–57.
- [18] MAHIDIN E, HUSIN G H, *et al.* A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 37–54.
- [19] LIU S, ZHOU C, GUO H M, *et al.* Operational optimization of a building-level integrated energy system considering additional potential benefits of energy storage[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 55–64.
- [20] 王彦哲, 周胜, 姚子麟, 等. 中国煤电生命周期二氧化碳和大气污染物排放相互影响建模分析 [J]. 中国电力, 2021, 54(8): 128–135.  
WANG Yanzhe, ZHOU Sheng, YAO Zilin, *et al.* Life cycle modeling analysis of the interaction between carbon dioxide and air pollutant emissions of coal power in China[J]. Electric Power, 2021, 54(8): 128–135.
- [21] 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): 4254–4264.  
CUI Yang, YAN Shi, ZHONG Wuzhi, *et al.* Optimal thermoelectric dispatching of regional integrated energy system with power-to-gas[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4254–4264.

#### 作者简介:

冯帅 (1997—), 男, 硕士研究生, 从事碳捕集电厂优化调度研究, E-mail: 563968964@qq.com;

袁至 (1984—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 从事可再生能源发电与并网控制研究, E-mail: yzisthecure@163.com。

(责任编辑 蒋东方)



## Optimal Scheduling of Carbon Capture Power Plants Based on Integrated Coordinated Energy Storage System under the Background of Carbon Trading

FENG Shuai<sup>1</sup>, YUAN Zhi<sup>1</sup>, LI Ji<sup>2</sup>, WANG Weiqing<sup>1</sup>, HE Shan<sup>1</sup>

(1. Engineering Research Center of Renewable Energy Power Generation and Grid-connected Control, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

**Abstract:** In the process of coal-fired power low-carbon transformation, new challenges emerge such as the weakening performance of carbon capture level during peak load period, the deviation between carbon quota calculation and actual application, etc. In view of these issues, the paper first introduces hydrogen fuel cells and hydrogen storage devices to formulate a comprehensive coordinated energy storage system, which can improve the insufficient carbon capture level during peak load period of carbon capture power plants; Then, the carbon quota calculation model is established, such that the calculation method of carbon quotas is more in line with practical applications; Finally, by setting the minimization of comprehensive operating cost of the system as the objective function, the optimal scheduling model of carbon capture power plants based on the comprehensive coordinated energy storage system is constructed, and the proposed model is solved using Cplex software package. The calculation results show that the carbon capture power plant can improve the carbon capture level and economy while prioritizing wind power consumption, by taking into account the low-carbon nature of the system.

This work is supported by Open Project of Key Laboratory of Xinjiang Uygur Autonomous Region (Research on Multi-objective Intelligent Optimization Method of Carbon Capture Power Plant Considering Renewable Energy Consumption, No.2022D04081) and National Natural Science Foundation of China (Study on Flexible Operation Strategy of Wind-Solar Storage Combined Power Generation System with Large-Scale New Energy, No.52067020).

**Keywords:** carbon trading; carbon quota; carbon capture power plant; power to gas; hydrogen fuel cell; integrated coordinated energy storage system

(上接第 138 页)

## Capacity Planning and Operation Strategy of New PV-Storage Power Station Based on Frequency Modulation Service

QIAN Guoming, MENG Jie, ZHU Haidong, DING Quan, CHEN Xiaoyu

(Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210032, China)

**Abstract:** In order to take full advantages of the new PV-Storage power station participating in power grid multi-time scale frequency modulation while considering the operation economy. First of all, according to the characteristics of photovoltaic modules, flywheel energy storage and lithium iron phosphate energy storage, their life cycle models are established respectively, and a coordinated operation strategy is proposed to reduce energy storage battery attenuation and improve frequency modulation performance. Second, on the basis of the primary and secondary frequency modulation mechanism, the model of PV-Storage power station participating in power grid frequency modulation capacity planning is established with the maximization of the frequency modulation revenue as the optimization objective function. Finally, a simulation model of PV-Storage system is built by virtue of Matlab software. The simulation results show that, as it is guaranteed that the requirements are fully met for second-level primary frequency modulation and minute-level secondary frequency modulation, the hybrid energy storage combined with photovoltaic reserve capacity can make resource planning more reasonable and improve both the economy and reliability of frequency modulation. Moreover, the reduction of flywheel cost will allow more capacity allocation so as to increase the frequency modulation income, hence the investment return period can be shortened.

This work is supported by Inner Mongolia Autonomous Region Major Science and Technology Project (Cascade Utilization Power Battery Scale Engineering Application Key Technology Research, No.2020ZD0018).

**Keywords:** PV-storage power station; hybrid energy storage; photovoltaic reserve capacity; multiple time scales; frequency modulation