

# 含 P2G 弃风启停的电—气互联综合 能源系统优化运行

栗世玮<sup>1,2</sup>, 赵一鸣<sup>1</sup>, 邹宇<sup>3</sup>, 韩紫烨<sup>1</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443000; 2. 三峡大学 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443000;  
3. 广西电网有限责任公司钦州供电局, 广西 钦州 535000)

**摘 要:**电—气互联综合能源系统得益于天然气的高比例应用与电转气(P2G)的吸碳能力、能量转移特性,成为新兴的消纳弃风、低碳排放平台。在此背景下,提出一种含 P2G 弃风启停的电—气互联综合能源系统消纳弃风、低碳运行模型,以机组运行成本最小、弃风量最小、碳排放量最小为目标,同时引入电转气弃风启停与碳交易市场,使系统兼顾碳排放目标与消纳弃风目标的同时更具实际效益。利用 MATLAB 中的 YALMIP 工具箱调用 CPLEX 求解器进行求解,分别在 3 个不同场景下进行仿真计算,仿真结果验证该模型具有良好的消纳弃风能力,可以大量减少碳排放。最后,比较 P2G 有启停与无启停下的碳排放量与经济效益,得出 P2G 在碳交易价格较高时应设置弃风启停,以避免 P2G 在日间无弃风时运行使碳排放增加。

**关 键 词:**电转气;综合能源系统;消纳弃风;低碳运行;弃风启停;燃气轮机

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.02.011 中图分类号:TM732 文章编号:1673-9140(2022)02-0086-08

## Optimal operation for the integrated electrical and natural-gas energy system with the P2G wind curtailment start-stop

SU Shiwei<sup>1,2</sup>, ZHAO Yiming<sup>1</sup>, ZOU Yu<sup>3</sup>, HAN Ziye<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;  
3. Qinzhou Power Supply Bureau, Guangxi Power Grid Co., Ltd., Qinzhou 535000, China)

**Abstract:**Benefit from the high proportion of natural gas application and the carbon absorption capacity a of P2G (power to gas, P2G), the integrated energy system has become an emerging platform for wind accommodation and low-carbon emissions. This paper presents a low-carbon operation dispatch model for integrated electrical-gas energy systems considering wind power curtailment. The minimum operation cost of power unit, wind power curtailment and carbon emissions are chosen as the objective. Meanwhile, the concept of P2G start-stop of wind curtailment and carbon trading market is introduced to enable the system accommodate more wind power and reduce carbon emissions. This model is solved by the multi-objective particle CPLEX solver from the YALMIP toolbox and simulated under 3 different scenarios to verify that the proposed model has the ability to absorb the redundant wind power and signifi-

收稿日期:2020-07-28;修回日期:2020-10-25

基金项目:清华大学重点实验室开放课题(SKLD17KM07)

通信作者:栗世玮(1979-),女,硕士,副教授,主要从事电力系统运行与控制方面的研究;E-mail:ssw@ctgu.edu.cn

cantly reduce carbon emissions. Finally, carbon emissions and economic benefits of P2G with/without wind curtailment start-stop device are compared. It is shown that system operator should set wind curtailment start-stop device if the carbon trading price is high so as to avoid carbon emission increasing from P2G during daytime when there is no wind curtailment.

**Key words:** power-to-gas; integrated energy system; wind curtailment accommodation; low-carbon operation; wind curtailment start-stop device; gas turbine

近些年来,环境、能源问题越来越被中国重视,加快能源转型、加大新能源发电比例成为电力发展的重要任务。包含电转气(power-to-gas, P2G)的电—气互联综合能源系统因 P2G 本身具有的能量转换功能逐渐成为了经济和环保的风电消纳途径,同时,由于天然气占比较高, P2G 具有吸碳性,它也成为了良好的清洁功能平台,有良好的低碳潜力和效益。

目前,电—气互联综合能源系统的优化调度正受到国内外学者的关注。文献[1]对 P2G 消纳风电的经济性方面展开了研究;文献[2]通过算例分析验证了 P2G 设备与电锅炉都具有消纳弃风效果,但仅考虑机组运行成本最小无法发挥 P2G 消纳弃风潜力;文献[3]在兼顾经济性的同时加入分段弃风惩罚因子;文献[4]引入经济折算系数,将削峰填谷目标投影到经济维度,验证了电转气具有削峰填谷功能;文献[5]提出了一种消纳弃风双层优化模型,使系统在运行时成本更低;文献[6-7]提出了低碳经济调度模型,通过算例仿真验证了电—气联合系统可以减少碳排放,但没有考虑系统运行时 P2G 设备吸收的二氧化碳量;文献[8-12]引入碳交易市场,通过对发电机组分配碳排放额,若机组碳排放量低于此额度给予奖励,高于此额度给予惩罚。研究证明,在此政策刺激下,燃气电厂与 P2G 设备出力会大幅提高,火电厂出力会下降,以减少系统的总碳排放量。

但以上文献并没有考虑到,在国家发电机组单位电量的碳排放配额为  $0.759\ 8\ \text{t}/(\text{MW} \cdot \text{h})$  条件下,当考虑 P2G 设备的吸碳性且当下碳交易价格较高时,极大可能存在 P2G 设备与燃气轮机的碳排放收益超过成本,并且随着 P2G 的发展,成本会进一步降低。在系统无弃风时,将导致 P2G 也会作为负荷运行,以降低系统的总成本,但因为弃风已被完全消纳,此时 P2G 并无实际作用。当 P2G 作为负荷运行时,输入功率会全部来源于燃气轮机的出力,这

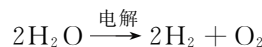
部分的额外出力并没有实际效益,虽然此时系统的总成本得到减少,但碳排放总量却增加,故应约束 P2G 设备,使 P2G 设备仅在系统存在弃风时运行,即设置 P2G 弃风启停约束。

本文对含 P2G 弃风启停的电—气互联综合能源系统消纳弃风能力与低碳排放能力进行研究,建立含 P2G 弃风启停的电—气互联综合能源系统多目标优化模型,并且通过设置约束条件使 P2G 在有弃风时开启、无弃风时关闭,减少额外的碳排放,使系统兼顾弃风量、碳排放量的同时达到经济成本最小目标,此模型相较于其他模型更具有实际效益。分别设置 3 种场景利用 YALMIP 调用 CPLEX 求解器进行求解,最后,进行 P2G 有、无启停的对比,比较 2 种情况下碳排放量及经济效益,验证 P2G 弃风启停的必要性。

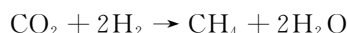
## 1 含 P2G 的电气互联综合能源系统

### 1.1 电转气技术原理

在电—气联合系统中, P2G 可以将夜间难以消纳的风电转换为天然气,同时燃气轮机可以在电负荷高时使用 P2G 产生的天然气进行发电<sup>[13]</sup>,通过电解水反应产生氧气和氢气,化学方程式为



因为氢气易爆炸、不易储存且远距离传输困难,而天然气较氢气有更高的单位能量密度,更易储存运输且更加环保,故将电解水产生的氢气进一步与二氧化碳合成为天然气:



P2G 转换公式为

$$V_{\text{gas}(t)} = \frac{\lambda P_{1,t}}{H_g} \quad (1)$$

式中  $H_g$  为天然气高热值,取为  $39\ \text{MJ}/\text{m}^3$ ;  $\lambda$  为转换效率,取为  $0.6$ <sup>[14]</sup>。

## 1.2 P2G 弃风启停策略

在系统运行过程中,应保证 P2G 的输入功率全部来源于弃风功率,当系统无弃风时,必须保证 P2G 设备处于关闭状态。故加入函数:

$$Z_{\text{onoff}} = \begin{cases} 0, & P_{1,t} < P_{\text{P2G},\min} \\ 1, & P_{1,t} > P_{\text{P2G},\min} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $P_{1,t}$  为弃风功率;  $P_{\text{P2G},\min}$ 、 $P_{\text{P2G},\max}$  分别为电转气最小、最大功率,同时满足  $Z_{\text{onoff}} P_{\text{P2G},\min} \leq P_{\text{P2G},t} \leq Z_{\text{onoff}} P_{\text{P2G},\max}$ 。  $Z_{\text{onoff}}$  为 0 时电转气功率必然为 0,使电转气设备输入功率全部来源于为弃风。

## 1.3 电气互联综合能源系统

含 P2G 的电—气互联综合能源系统如图 1 所示,P2G 与燃气轮机将电力与天然气网络双向连接起来<sup>[15]</sup>,两者协同可以在消纳弃风的同时减少系统净负荷。此外,电—气互联综合能源系统也会使碳排放量降低,天然气作为一种清洁能源,减少二氧化碳排放量 60%和氮氧化物排放量 50%,改善环境质量。燃气轮机可以替代部分火电机组出力,从而在电源侧减少二氧化碳排放,同时,因为 P2G 在第 2 个反应阶段吸收二氧化碳,故 P2G 本身也具有减少碳排的功能,实现低碳排放。在环境保护越加重要的今天,电—气互联综合能源系统具有可观的前景。

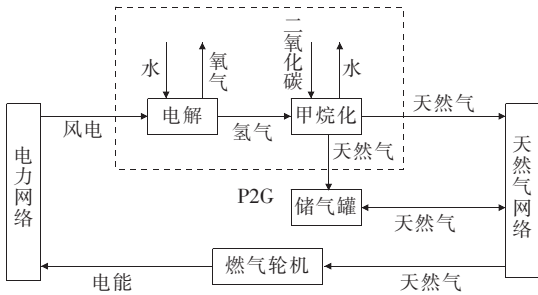


图 1 电气互联综合能源系统

Figure 1 Schematic diagram of the integrated electrical and natural gas energy system

## 2 电—气互联综合能源系统优化模型

### 2.1 目标函数

本文的目标函数由三部分组成:机组运行成本最小、弃风惩罚及碳排放权函数。将弃风量与碳排放量折算到经济维度后与机组运行成本一同构成多

目标函数。若系统中含有  $N$  台火电机组, $M$  台燃气轮机, $Y$  台风电机组, $X$  台 P2G 设备, $J$  个气源点, $Q$  个储气罐,则系统总成本:

$$\min F = f_1 + f_2 + f_3 \quad (3)$$

式中  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  分别为机组运行成本最小、弃风惩罚、碳排放权函数。

$$f_1 = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{n=1}^N C_G f_G(P_{G,n,t}) + \sum_{x=1}^X C_{\text{P2G}} P_{\text{P2G},x,t} + \sum_{j=1}^J C_N Q_{N,j,t} + \sum_{q=1}^Q C_S Q_{s,q,t} \right) \quad (4)$$

式中  $C_G$ 、 $C_{\text{P2G}}$ 、 $C_N$ 、 $C_S$  分别为火电机组燃料价格、P2G 单位出力成本、气源点  $j$  处的天然气价格、第  $q$  个储气罐的存储价格;  $P_{\text{P2G},x,t}$  为  $t$  时刻第  $x$  台 P2G 设备的出力;  $Q_{N,j,t}$  为  $t$  时刻气源点  $j$  的供应流量;  $Q_{s,q,t}$  为  $t$  时刻储气罐  $q$  的流入流量;  $f_G(P_{G,n,t})$  为火电机组的热耗函数,关系式为

$$f_G(P_{G,n,t}) = a_i P_{G,n,t}^2 + b_i P_{G,n,t} + c_i \quad (5)$$

式中  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  为火电机组耗量特性曲线参数。

$$f_2 = \lambda P_{1,t} \quad (6)$$

式中  $\lambda$  为分段弃风惩罚因子,即

$$\begin{cases} 0, & P_{1,t} = 0 \\ \lambda = \begin{cases} 50, & 0 < P_{1,t} < 50 \\ 100, & P_{1,t} > 50 \end{cases} \end{cases}$$

$$\lambda = \begin{cases} 50, & 0 < P_{1,t} < 50 \\ 100, & P_{1,t} > 50 \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0, & P_{1,t} = 0 \\ \lambda = \begin{cases} 50, & 0 < P_{1,t} < 50 \\ 100, & P_{1,t} > 50 \end{cases} \end{cases}$$

在碳交易市场中,  $f_3$  对企业设置碳排放权配额,对超出配额的排放设立惩罚,对低于配额的排放给予奖励,充分调动企业节能减排的积极性。

$$f_3 = C_{\text{CO}_2} \sum_{t=1}^T \left( (\chi_N - \chi_q) \sum_{n=1}^N P_{G,n,t} + (\chi_M - \chi_q) \cdot \sum_{m=1}^M P_{g,m,t} + (\chi_X - \chi_q) \sum_{x=1}^X P_{\text{P2G},x,t} \right) \quad (7)$$

式中  $C_{\text{CO}_2}$  为碳交易价格,取 40 \$/t;  $\chi_N$  为火电机组单位发电量碳排放量,取为 1.2 t/(MW·h);  $\chi_M$  为燃气轮机单位发电量碳排放量,取为 0.48 t/(MW·h);  $\chi_X$  为 P2G 单位发电量碳吸放量,取为 -0.2 t/(MW·h);  $\chi_q$  为单位发电量的碳排放分配额,取为 0.759 8 t/(MW·h)。

### 2.2 电力网络常规约束

电力网络约束包括电功率平衡、发电机组功率、P2G 功率、节点电压、平衡节点相角以及线路功率约束。

1) 电功率平衡约束。

$$\sum_{n=1}^N P_{G,n,t} + \sum_{m=1}^M P_{g,m,t} + \sum_{y=1}^Y P_{w,y,t} = P_{\text{Load},t} + \sum_{x=1}^X P_{\text{P2G},x,t} \quad (8)$$

式中  $P_{G,n,t}$ 、 $P_{g,m,t}$ 、 $P_{w,y,t}$  分别为第  $n$  台火电机、第  $m$  台燃气轮机、第  $y$  台风电机在时段  $t$  内发出的电功率;  $P_{\text{P2G},x,t}$  为第  $x$  台 P2G 在时段  $t$  内吸收的电功率。

2) 发电机组功率约束。

$$\begin{aligned} 0 &\leq P_{w,t} \leq P_{w,\max} \\ \{P_{G,\min} &\leq P_{G,t} \leq P_{G,\max} \\ \{P_{g,\min} &\leq P_{g,t} \leq P_{g,\max} \end{aligned} \quad (9)$$

式中  $P_{w,t}$ 、 $P_{G,t}$ 、 $P_{g,t}$  分别为  $t$  时刻风电机组、火电机、燃气轮机出力。

3) P2G 功率约束。

$$P_{\text{P2G},\min} < P_{\text{P2G},t} < P_{\text{P2G},\max} \quad (10)$$

式中  $P_{\text{P2G},t}$  为  $t$  时刻 P2G 消耗功率。

4) 节点电压约束。

$$U_{i,\min} \leq U_{i,t} \leq U_{i,\max} \quad (11)$$

式中  $U_{i,\min}$ 、 $U_{i,\max}$  分别为节点  $i$  电压幅值的下限、上限。

5) 平衡节点相角约束。

$$\tan \theta_{\text{bal},t} - f_{\text{bal},t} / e_{\text{bal},t} = 0 \quad (12)$$

式中  $\theta_{\text{bal},t}$  为平衡节点在  $t$  时刻的电压相角;  $f_{\text{bal},t}$ 、 $e_{\text{bal},t}$  分别为平衡节点在  $t$  时刻的电压虚部、实部。

6) 线路功率约束。

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

式中  $P_{l,\min}$ 、 $P_{l,\max}$  分别为  $t$  时刻线路功率的下限、上限。

## 2.3 天然气网络约束

1) 气源点约束。

$$Q_{j,\min} \leq Q_{j,t} \leq Q_{j,\max} \quad (14)$$

式中  $Q_{j,\min}$ 、 $Q_{j,\max}$  分别为气源点  $j$  供应流量的下限、上限。

2) 管道流量约束。管道内气体流量通常用非线性方程描述:

$$F_n = x_n \lambda_{ab} \sqrt{\lambda_{ab} (x_b^2 - x_a^2)} \quad (15)$$

$$\lambda_{ab} = \begin{cases} +1, & x_b > x_a \\ -1, & x_b \leq x_a \end{cases} \quad (16)$$

式(15)、(16)中  $x_n$  为天然气管道传输系数;  $x_b$ 、 $x_a$  分别为两端节点  $b$ 、 $a$  的气压;  $\lambda_{ab}$  为管道内天然气传输方向。

$$F_{n,\min} \leq F_{n,ab} \leq F_{n,\max} \quad (17)$$

式中  $F_{n,\min}$ 、 $F_{n,\max}$  分别为管道内流量下限、上限。

3) 管存。管存与管道两端的平均压力和管道参数成正比,表达式为

$$L_{ab,t} = \frac{1}{2} M_{ab} (x_{b,t} - x_{a,t}) \quad (18)$$

式中  $M_{ab}$  为与管道长度、半径等有关的常数。

4) 储气罐约束。

$$\begin{aligned} 0 &\leq Q_{a,t}^{\text{in}} \leq Q_{a,\max}^{\text{in}} \\ 0 &\leq Q_{a,t}^{\text{out}} \leq Q_{a,\max}^{\text{out}} \\ \{S_{a,\min} &\leq S_{a,t-1} + Q_{a,t}^{\text{in}} - Q_{a,t}^{\text{out}} \leq S_{a,\max} \end{aligned} \quad (19)$$

式中  $Q_{a,t}^{\text{in}}$ 、 $Q_{a,t}^{\text{out}}$  分别为  $t$  时刻储气罐  $a$  的输入、输出流量;  $Q_{a,\max}^{\text{in}}$ 、 $Q_{a,\max}^{\text{out}}$  分别为储气罐  $a$  的输入、输出流量的上限;  $S_{a,\min}$ 、 $S_{a,\max}$  分别为储气罐储存容量的最小、最大值;  $S_{a,t-1}$  为储气罐  $t-1$  时刻的存储容量。

5) 压缩机。压缩机的天然气流入量与流出量关系式为

$$F_{k,\text{out}} = F_{k,\text{in}} \sigma (x_b - x_a) \quad (20)$$

式中  $\sigma$  为压缩机常数。

$$R_{k,\min} \leq \frac{P_b}{P_a} \leq R_{k,\max} \quad (21)$$

式中  $R_{k,\min}$ 、 $R_{k,\max}$  分别为压缩机的下限、上限。

6) 节点能量平衡约束。天然气网络与电力网络类似,同样存在节点流量平衡。

$$\begin{aligned} \sum_{k \in a} G_{k,t} + \sum_{\text{P2G} \in a} G_{\text{P2G},t} + \sum_{s \in a} (Q_{s,t}^{\text{out}} - Q_{s,t}^{\text{in}}) + \\ \sum_{f \in a} (F_{f,t}^{\text{in}} - F_{f,t}^{\text{out}}) = \sum_{P \in a} G_{P,t} + \sum_{L \in a} G_{L,t} \end{aligned} \quad (22)$$

式中  $G_{k,t}$  为与节点  $a$  相连的气源  $k$  在  $t$  时刻的出气量;  $G_{\text{P2G},t}$  为与节点  $a$  相连的 P2G 设备在  $t$  时刻的产气量;  $Q_{s,t}^{\text{out}}$ 、 $Q_{s,t}^{\text{in}}$  分别为与节点  $a$  相连的储气罐在  $t$  时刻的出气、进气量;  $F_{f,t}^{\text{in}}$ 、 $F_{f,t}^{\text{out}}$  分别为与节点  $a$  相连的压缩机在  $t$  时刻的进气、出气量;  $G_{P,t}$  为与节点  $a$  相连的燃气电厂在  $t$  时刻的耗气量;  $G_{L,t}$  为与节点  $a$  相连的天然气的负荷在  $t$  时刻的耗气量。

## 2.4 求解方法

YALMIP 是一种通过调用 CPLEX、GLPX 等高性能求解器求解非线性规划问题的数学高级建模

系统,它提供了一种统一、简单的建模语言,实现了建模和算法二者的分离。本文建立的模型为非线性规划模型,适合调用 CPLEX 求解器求解。

3 算例分析

3.1 算例结构

本文采用算例为 IEEE 6 节点电力系统与 7 节点天然气系统,如图 2 所示,其中,第 1、3、5 台发电机为燃煤火电机组,第 2、4 台发电机为燃气轮机,分别接入到天然气系统的 1、3 节点。气源 W1、W2 的成本系数为 0.036 M\$/Mm<sup>3</sup>,P2G 的成本系数为 20 \$/(MW·h),储气设备的使用成本为 0.02 M\$/Mm<sup>3</sup>。一日内电负荷、风电可用出力、气负荷曲线如图 3 所示,主要设备参数如表 1 所示。

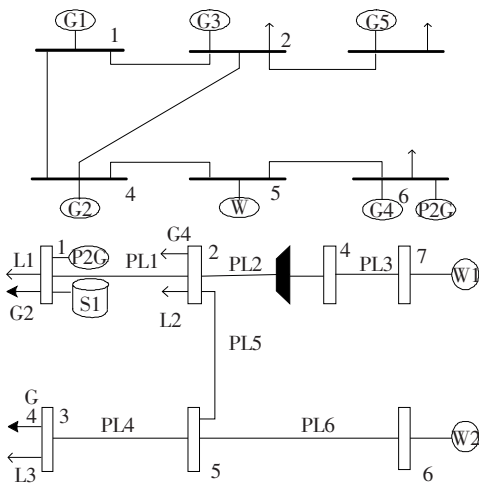


图 2 修改的电—气互联综合能源系统结构  
Figure 2 Structure of a modified integrated electrical and natural-gas energy systems

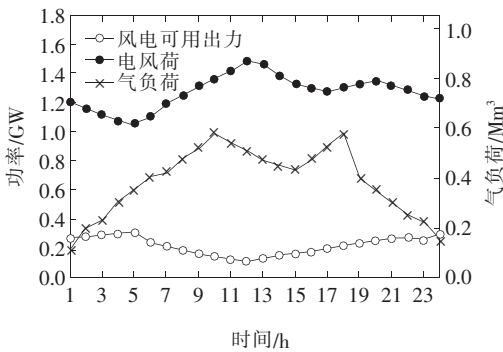


图 3 电负荷、气负荷、风电场可用出力曲线  
Figure 3 Electricity, gas and wind power output curve

表 1 设备主要参数

Table 1 The main parameters of the equipment

燃煤火电机组		燃气轮机		P2G 设备	
电功率/MW		电功率/MW		电功率/MW	
上限	下限	上限	下限	上限	下限
500	200	150	0	100	0
风电场装机		储气罐容量		气源点容量	
容量/MW		上限/Mm <sup>3</sup>		上限/Mm <sup>3</sup>	
310		0.35		1	

3.2 场景说明

设置 3 种场景进行对比分析,即①系统不考虑 P2G,目标函数仅考虑  $f_1$ 、 $f_2$ ;②系统考虑 P2G,目标函数仅考虑  $f_1$ 、 $f_2$ ;③系统考虑 P2G,目标函数综合考虑  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 。计算 3 种场景下风电、P2G、燃气轮机出力,分别如图 4~6 所示;3 种场景下碳排放量及成本如表 2 所示。

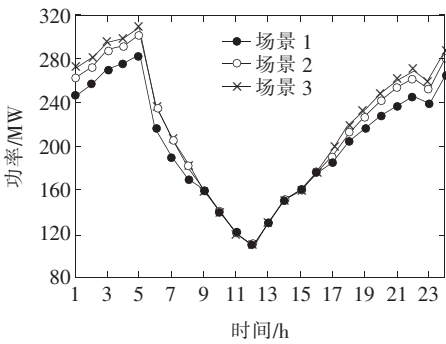


图 4 各场景风电场功率曲线  
Figure 4 Wind power output under each scenario

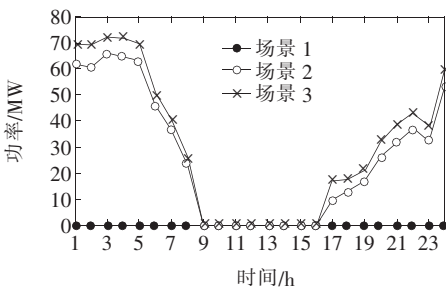


图 5 各场景 P2G 功率曲线  
Figure 5 P2G power profiles under each scenario

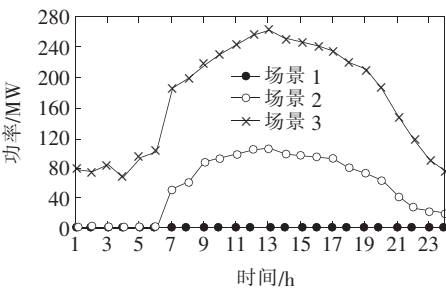


图 6 各场景燃气轮机功率曲线  
Figure 6 Gas turbine output power under each scenario



表 2 各场景下优化结果

Table 2 The main parameters of the equipment

场景	机组运行 成本/ \$	弃风 成本/ \$	碳排放 成本/ \$	碳排放 量/ t	风电消 纳率/ %	综合 成本/ \$
1	311 000	35 000	408 000	30 650	93.4	754 000
2	327 000	12 000	336 000	29 100	97.7	675 000
3	339 000	0	241 000	26 830	100.0	580 000

3.3 消纳弃风效果分析

由图 4~6 各场景对比可以看出,场景 1 在消纳弃风函数的刺激下,弃风率达到了 6.6%,且 01:00—06:00、20:00—24:00 时弃风现象较为严重,09:00—16:00 时风电全部消纳。在此场景下,燃气轮机运行成本高于燃煤火电机组,不会参与到系统运行,机组运行成本最低,但综合成本最高。在此条件下加入 P2G 后,弃风率明显降低,达到 2.3%,期间,夜晚难以消纳的风电被 P2G 利用,转换为天然气进行储存,且在白天被燃气轮机利用,由此看出,当加入电转气后消纳弃风效果显著,但机组运行成本较场景 1、2 有所增加,这是因为电转气设备目前依然存在运行成本较高、转换效率较低等缺点,使机组运行成本上升。当目标函数考虑碳排放目标时,由于 P2G 的吸碳性与燃气轮机的低碳排放,进一步刺激 P2G、燃气轮机出力,电转气一天内消纳风电量自 645.17 MW 增加到 764.2 MW,燃气轮机出力自 1 327 MW 增加到 4 114 MW,风电被完全消纳,同时机组运行成本进一步增加,经济性降低。

3.4 碳排放效果分析

由表 2 可以看出,场景 1 碳排放量全部来自于燃煤火电机组,碳排放量最高,场景 2 中加入 P2G,燃气轮机日间出力增加的同时火电机组出力下降,使得碳排放量降低,较场景 1 减少 6.7%,场景 3 中加入碳排放权函数,进一步刺激 P2G 与燃气轮机出力,此时碳排放量较场景 1 约减少 13%,碳排放成本约减少 41%。这是由于加入碳排放权函数后,P2G 与燃气轮机的碳排放量小于分配额,产生碳排放收益,系统会优先调用碳排放量更小的燃气轮机出力,同时刺激 P2G 出力,使得系统碳排放量减少。

3.5 P2G 有无启停分析

当碳交易价格为 40 \$/t、单位发电量的碳排放分配额为 0.759 8 t/(MW·h)时,P2G 设备与燃气轮机的碳排放收益高于成本。此时不考虑 P2G 设备弃风启停函数  $Z_{onoff}$ ,仅使 P2G 满足最大最小功率约束,即 P2G 在无弃风条件下可以开启。在场景 3 下进行仿真,P2G 无弃风启停时功率如图 7 所示,其余仿真结果如表 3 所示。

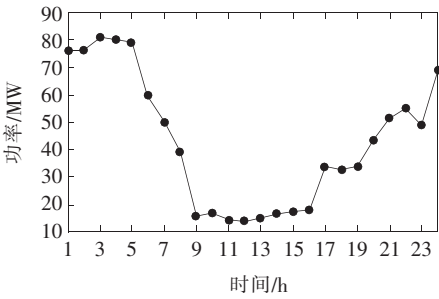


图 7 场景 3 下 P2G 无弃风启停日间出力曲线  
Figure 7 P2G output power without wind curtailment start-stop device under scenario 3

表 3 场景 3 有无弃风启停优化结果对比  
Table 3 Results comparison of scenario 3 with or without wind curtailment start-stop device

有、无 启停	机组运行 成本/ \$	碳排放 成本/ \$	碳排放 量/ t	综合 成本/ \$
有	339 000	241 000	26 830	580 000
无	344 300	234 200	26 880	578 500

通过图 7 可以得出,在场景 3 下,P2G 无弃风启停时出力较有启停时增加,且在无弃风时段 09:00—12:00 时运行,此时 P2G 充当负荷,仅在碳交易市场中获取利益,并无实际效益。电转气日消耗功率由 764.2 MW 增加为 1 037 MW,增加的功率全部来自燃气轮机。如表 3 所示,机组运行成本由于 P2G 与燃气轮机出力增加而升高,相应的由于 P2G 与燃气轮机碳排放收益大于成本,出力越多则净收益越大,使系统总的碳排放成本减少,但碳排放量增加 130.9 t,对低碳排放形成反作用。综上,当 P2G 设备与燃气轮机的碳排放收益高于成本时,应使得 P2G 输入电能全部来源弃风,否则会扰乱碳交易市场秩序,破坏公平。

## 4 结语

本文基于 P2G 的吸碳能力与时空平移、能量转换特性,在消纳弃风、低碳运行模型的基础上,引入碳交易市场,使 P2G 参与到碳交易市场中,同时计及 P2G 弃风启停策略,构建电—气互联系统多目标优化模型,得出结论如下:

1) P2G 具有优秀的消纳弃风能力,同时产生的天然气可以在日间供燃气轮机使用,两者协同运行使经济性更为合理;

2) 当 P2G 参与到碳交易市场时,会更加刺激 P2G 出力,燃气轮机成本进一步减少,出力增加,可以从电源侧减少二氧化碳排放,同时, P2G 出力增加会进一步提高风电消纳率,由于电转气设备与燃气轮机运行成本较高,系统牺牲了经济性以达到减少碳排放的效果;

3) 当引入碳交易市场时,由于碳交易价格较高,当 P2G 与燃气轮机产生的碳排放收益可以抵消运行成本产生盈余时,此时 P2G 的输入电能应全部来源于弃风,保证碳交易市场的公平性,使模型更具有实际效益。

## 参考文献:

- [1] 董文杰,田廓,陈云斐,等. 能源互联网下基于博弈与证据理论的综合能源系统评价方法研究[J]. 智慧电力, 2020,48(7):73-80.  
DONG Wenjie, TIAN Kuo, CHEN Yunfei, et al. Evaluation method of comprehensive energy system based on game theory & evidence theory under energy internet [J]. Smart Power, 2020,48(7):73-80.
- [2] 刘广,白晓清,刁天一. 考虑气电网络架构的沼—风—光综合能源微网优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2020,36(12):49-58.  
LIU Guang, BAI Xiaqing, DIAO Tianyi. Optimal scheduling of biogas-wind-solar integrated energy microgrid system considering gas-power network architecture[J]. Power System and Clean Energy, 2020,36(12):49-58.
- [3] 吴静,德格吉日夫,谭忠富,等. 计及 P2G 与 CCHP 技术

的综合能源系统多目标协同优化模型[J]. 电测与仪表, 2021,58(5):20-30.

WU Jing, DE Gejirifu, TAN Zhongfu, et al. Multi-objective coordinated optimization model for integrated energy systems with power-to-gas and combined-cooling-heating-power technologies[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021,58(5):20-30.

- [4] 李健强,余光正,汤波,等. 考虑风光利用率和含氢能流的多能流综合能源系统规划[J]. 电力系统保护与控制, 2021,49(14):11-20.

LI Jianqiang, YU Guangzheng, TANG Bo, et al. Multi-energy flow integrated energy system planning considering wind and solar utilization and containing hydrogen energy flow[J]. Power System Protection and Control, 2021,49(14):11-20.

- [5] 张儒峰,姜涛,李国庆,等. 考虑电转气消纳风电的电—气综合能源系统双层优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2018,38(19):5668-5678+5924.

ZHANG Rufeng, JIANG Tao, LI Guoqing, et al. Bi-level optimization dispatch of integrated electricity-natural gas systems considering P2G for wind power accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(19):5668-5678+5924.

- [6] 曾红,刘天琪,何川,等. 含电转气设备的气电互联综合能源系统多目标优化[J]. 电测与仪表, 2019,56(8):99-107.

ZENG Hong, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Optimal operation of electricity-natural gas coupling system with power-to-gas technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019,56(8):99-107.

- [7] 龚晓琴,王进,王珑,等. 含电转气的电—气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力科学与技术学报, 2020,35(2):76-83.

GONG Xiaoqin, WANG Jin, WANG Long, et al. Low carbon economic operation of an integrated energy system with electricity to gas interconnection with electricity to gas[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020,35(2):76-83.

- [8] 卫志农,张思德,孙国强,等. 基于碳交易机制的电—气互联综合能源系统低碳经济运行[J]. 电力系统自动化, 2016,40(15):9-16.

WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Car-

- bon trading based low-carbon economic operation for integrated electricity and natural gas energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 9-16.
- [9] 郭尊,李庚银,周明. 计及碳交易机制的电—气联合系统快速动态鲁棒优化运行[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1220-1228.
- GUO Zun, LI Gengyin, ZHOU Ming. Fast and dynamic robust optimization of intergrated electricity-gas system operation with carbon trading[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1220-1228.
- [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] 陈伯达,林楷东,张勇军,等. 计及碳捕集和电转气协同的电气互联系统优化调度[J]. 南方电网技术, 2019, 13(11): 9-17.
- CHEN Boda, LIN Kaidong, ZHANG Yongjun, et al. Optimal dispatching of integrated electricity and natural gas energy systems considering the coordination of carbon capture system and power-to-gas[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(11): 9-17.
- [12] 盛四清,吴昊,顾清,等. 含碳捕集装置的电气综合能源系统低碳经济运行[J]. 电测与仪表, 2021, 58(6): 82-90.
- SHENG Siqing, WU Hao, GU Qing, et al. Low-carbon economic operation of integrated electricity and natural gas system with carbon capture devices[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(6): 82-90.
- [13] 许志恒,张勇军,陈泽兴. 考虑 P2G 备用服务的电—气联合网络风电消纳及低碳效益分析[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 36-45.
- XU Zhiheng, ZHANG Yongjun, CHEN Zexing. The benefit on wind power accommodation and low carbon effects of integrated electricity and gas network considering reserve service of P2G facilities[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 36-45.
- [14] 林楷东,陈泽兴,张勇军,等. 含 P2G 的电—气互联网络风电消纳与逐次线性低碳经济调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 23-37.
- LIN Kaidong, CHEN Zexing, ZHANG Yongjun, et al. Wind power accommodation and successice linear low-carbon economic dispatch of integrated electricity-gas network with power to gas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 23-37.
- [15] 谈竹奎,瞿凯平,刘斌,等. 含电转气的电—气互联系统多目标优化调度[J]. 电力建设, 2018, 39(11): 51-59.
- TAN ZhuKui, QU Kaiping, LIU Bin, et al. Multi-objective optimal dispatch of integrated electricity and natural gas system with power to gas[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(11): 51-59.