# Journal of Electric Power Science and Technology

Volume 35 | Issue 2

Article 10

9-3-2020

# Lowcarbon economic operation for integrated electricity and naturalgas energy system with powertogas

Xiaoqin GONG

School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

Jin WANG

School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

Long WANG

School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

Han ZHANG Yiyang Power Supply Branch, State Grid Hunnan Electric Power Co , Ltd , Yiyang 413000 ,China

Jiahui QIAN School of Electrical & Information Engineering,Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114 ,China

Follow this and additional works at: https://jepst.researchcommons.org/journal

# **Recommended Citation**

GONG, Xiaoqin; WANG, Jin; WANG, Long; ZHANG, Han; QIAN, Jiahui; and DENG, Minghui (2020) "Lowcarbon economic operation for integrated electricity and naturalgas energy system with powertogas," *Journal of Electric Power Science and Technology*: Vol. 35: Iss. 2, Article 10. DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.02.010 Available at: https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss2/10

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

# Lowcarbon economic operation for integrated electricity and naturalgas energy system with powertogas

# Authors

Xiaoqin GONG, Jin WANG, Long WANG, Han ZHANG, Jiahui QIAN, and Minghui DENG

# 含电转气的电一气互联综合能源系统 低碳经济运行

龚晓琴1,王 进1,王 珑1,张 晗2,钱佳慧1,邓明辉3

(1.长沙理工大学电气与信息工程学院,湖南长沙410114;2.国网湖南省电力公司益阳供电分公司,湖南益阳413000;3.国网湖南省电力公司永州供电分公司,湖南永州425000)

**摘 要:**针对当前电力系统中弃风现象严重以及二氧化碳排放量高的问题,提出一种含电转气的电一气互联综合能 源系统低碳经济调度模型,引入经济折算系数将二氧化碳排放量折算到经济维度和系统的运行成本共同组成综合 成本最低的目标函数,并考虑含电转气的电力系统及天然气系统的能流模型与安全约束,用内点法予以求解。采用 修改的 IEEE 30 节点电力系统和比利时 20 节点天然气网络进行算例分析,通过比较 4 种不同模型下的综合成本与 二氧化碳排放量,验证所提模型能有效兼顾系统运行的低碳性和经济性,同时大大提高消纳风电能力。取不同经济 折算系数会得到低碳性与经济性不同侧重的最优调度结果。

关键 词:消纳风电;综合能源系统;经济折算系数;电转气;低碳

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.02.010 中图分类号:TM732 文章编号:1673-9140(2020)02-0076-08

# Low-carbon economic operation for integrated electricity and natural-gas energy system with power-to-gas

GONG Xiaoqin<sup>1</sup>, WANG Jin<sup>1</sup>, WANG Long<sup>1</sup>, ZHANG Han<sup>2</sup>, QIAN Jiahui<sup>1</sup>, DENG Minghui<sup>3</sup>

(1. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. Yiyang Power Supply Branch, State Grid Hunnan Electric Power Co., Ltd., Yiyang 413000, China;

3. Yongzhou Power Supply Branch, State GridHunnan Electric Power Co., Ltd., Yongzhou 425000, China)

Abstract: Aiming at the problem of serious abandonment of wind and high carbon dioxide emission in the current power system, a low-carbon economic dispatching model for a combined electricity-gas integrated energy system with power to gas(P2G) is proposed. The paper introduces the economic conversion coefficient to convert carbon dioxide emission into economic dimension and counts them in the objective function. The objective function is to minimize the sum of carbon dioxide emission cost and system operating cost while the energy flow model and safety constraints of electric power system containing power-to-gas and natural gas system are considered. The following optimization is realized by using the interior point method(IPOPT). The modified IEEE 30 node power system and Belgium 20 node natural gas network are used for example analysis. By comparing the comprehensive cost and carbon dioxide emissions under four different models, it is verified that the proposed model can effectively balance the low carbon and economy of the system operation, and greatly improves the ability to absorb wind power. When different economic

基金项目:国家自然科学基金(51677007)

通信作者:王 进(1972-),女,副教授,主要从事分布式发电及微网系统的研究;E-mail:wangjinciy@126.com

conversion coefficients are taken, the optimal scheduling results with different emphasis on low carbon and economy are obtained.

Key words: consumption of wind power; integrated energy system; economic conversion coefficient; P2G; low-carbon

随着能源危机与环境污染问题的日益严重,政府加大了可再生清洁能源的发展力度,力求实现低碳电力。中国电力生产仍主要依赖于 CO<sub>2</sub> 排放量高的燃煤发电,电力行业产生的 CO<sub>2</sub> 占全国排放总量的 40%左右<sup>[1]</sup>。与煤炭相比,天然气具有燃烧完全、燃烧热值高、碳排放低等特点,属于低碳能源。中国风电发展迅速,但平均弃风量高达 15%<sup>[2]</sup>,电转气(power to gas,P2G)技术能将风电等新能源转换成天然气存储起来,在燃气轮机发电时重新利用, 消纳了弃风,保障了电力系统安全稳定运行。

现有的关于电—气互联系统的文献大多侧重于 运行规划方面。文献[3]介绍了电一气互联系统的 经济运行情况;文献[4-5]研究了 P2G 对综合能源 系统建模与评估的影响;文献[6]研究了电一气互联 综合能源系统的优化运行,分析了 P2G 提升消纳风 电能力所产生的经济效益。以上研究均没有研究 P2G 与燃气轮机联合运行在节能减排方面的作用。 为了实现低碳电力,必须充分考虑碳排放因素[7]。 文献[8]在电一气互联系统中利用碳交易机制实现 系统的低碳经济运行,但没有引进 P2G 装置,能量 只能单向流动;文献[9]在综合能源系统中引入碳交 易机制,综合考虑了多能源系统的低碳性与经济 性,但未考虑从电源侧减少 CO<sub>2</sub> 的产生;文献[10] 虽然分析了德国采用电转气实现低碳的原因,但只 是理论上的阐述,并未建立模型进行研究;文献[11] 以能源节约率和二氧化碳减排率综合指标最大作为 多目标函数,未能实现多目标问题单目标化。

针对上述问题,该文利用电转气与燃气轮机联 合运行,在降低气源处供气压力的同时从电源侧减 少 CO<sub>2</sub> 排放,并对所采用模型消纳风电能力进行分 析。首先,介绍电转气的实现原理,建立以电转气和 燃气轮机耦合的电一气互联综合能源系统模型;其 次,引入经济折算系数将 CO<sub>2</sub> 排放量折算到经济维 度并计入目标函数中,建立电一气互联综合能源系 统低碳经济调度模型;最后,通过算例分析验证该文 所提模型在消纳风电、降低 CO<sub>2</sub> 排放与经济方面的 效果,并分析经济折算系数对碳排放量的影响。

# 1 电一气互联综合能源系统

#### 1.1 电转气装置

电转气装置是一种将电能转换为化学能的设备,通过一系列转化,把电能转化为易于运输、储存的氢气或天然气,该文所提的 P2G 是指电转天然 气。电转气包含 2 个阶段,首先是通过电解水产生 氢气和氧气,然后在高温加压环境下将氢气和二氧 化碳合成天然气<sup>[12]</sup>。P2G 的实现流程如图 1 所示, 2 个阶段的化学方程式为

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2 \tag{1}$$

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \tag{2}$$

P2G 技术消纳风电,有利于天然气的大规模储存, 为气负荷直接提供天然气,并在电力负荷需要时通 过燃气轮机将天然气转化为电能,一方面通过减少 火电机组出力促进 CO<sub>2</sub> 的减排,另一方面降低了对 天然气网络气源处的依赖。目前,电转天然气完整 实现过程的能量转换效率为 45% - 60%<sup>[13]</sup>。德国 电转气技术比较发达,利用 P2G 提升了可再生能源 利用率、实现了 CO<sub>2</sub> 减排目标,已经建成了商业化 的 P2G 示范工程<sup>[10]</sup>。







### 1.2 天然气网络建模

天然气网络包含气源、管道、加压站这3个主要 部分。天然气由气源点注入网络,经天然气管道输 送给负荷,为了补偿能量传输过程中的压力损失,需 要在网络中安装加压站。

1)天然气管道模型。

天然气的管道流量和管道两端压力等许多物理 因素相关,在特定情况下的管道流量可以用非线性 方程<sup>[14]</sup>来表示,具体表达式为

$$F_{p,ab} = S_{ab} \sigma \sqrt{S_{ab} (p_a^2 - p_b^2)}$$
(3)

$$S_{ab} = \begin{cases} 1, & p_a \ge p_b \\ -1, & p_a < p_b \end{cases}$$
(4)

式中  $F_{p,ab}$  为天然气系统管道 a-b 的流量;  $S_{ab}$  为 反映管道天然气流向的变量,由首节点 a 流向末节 点b 时值为 1,当由末节点流向首节点时为-1; $\sigma$  为 管道传输参数,是一个和管道长度、管径、压缩因子 等相关的定值;  $p_a$ 、 $p_b$ 分别为节点a、b 的压力值。

2) 压缩机模型。

加压站的主要部分是压缩机,压缩机的运行需 要消耗大量的能量,为了减少经济投入,使用流经压 缩机的天然气作为驱动压缩机的能量源。因此,压 缩机是天然气网络的负荷之一,压缩机模型如图 2 所示。



图 2 压缩机模型 Figure 2 Compressor model

图 2 中, F<sub>c.ab</sub> 为流过压缩机的天然气流量,压 缩机所消耗能量的等效流量用 τ<sub>c.ab</sub> 来表示,则压缩 机消耗的能量与等效流量的关系式为

$$Q_{c,ab} = \theta F_{c,ab} \left[ \left( \frac{p_b}{p_a} \right)^{\pi} - 1 \right]$$
(5)

$$\tau_{c,ab} = m_1 + m_2 Q_{c,ab} + m_3 Q_{c,ab}^2$$
(6)

式中  $Q_{e,ab}$  为压缩机消耗的能量;  $\theta$  是与天然气热 值、温度、压缩机效率等相关的压缩机单元特征常 数;  $\pi$  是与压缩因子和天然气热值有关的一个常数;  $m_1, m_2, m_3$  为能量转换效率常数。

3)节点流量平衡方程。

天然气系统的节点类似于电力系统节点,各节 点满足流量平衡方程,即任意节点均有流量平衡 方程:

式中  $b \in a$  表示通过管道或压缩机与节点 a 直接 相联的所有节点;  $F_a$  为节点 a 的注入气流量。

# 1.3 电一气互联综合能源系统耦合模型

该文采用燃气轮机和 P2G 将电网与气网耦合 起来,实现了这 2 个网络之间能量的双向流动。在 建立的含燃气轮机机组与 P2G 设备的能流模型上, 把弃风功率  $\Delta P_W$ 、P2G 需要的电功率  $P_{P2G}$  以及注 入的气流  $F_{P2G}$  分别考虑到电力系统功率平衡方程 和天然气网络流量平衡方程中<sup>[15]</sup>,得到含 P2G 的 综合能源系统的能流模型:

$$P_{F,m} + P_{G,m} + P_{w,m} - \Delta P_{w,m} - P_{P2G,m} - P_{D,m} - P_m = 0, \ m = 1, 2, \cdots, N_e$$
(9)  
$$Q_{F,m} + Q_{G,m} + Q_{w,m} + Q_{c,m} - Q_{D,m} - Q_m = 0, \ m = 1, 2, \cdots, N_e$$
(10)  
$$F_{G,a} + F_{P2G,a} - F_{gas,a} - F_{D,a} - F_{D,a}$$

其中,式(9)、(10)为电力系统功率平衡方程,式(11) 为天然气网络流量平衡方程。P<sub>F.m</sub>为电力系统节点 m 的火电机组有功出力;  $P_{G,m}$  为燃气轮机在节点m处的有功出力;  $Q_{\text{F.m.}}$ 、 $Q_{\text{G.m.}}$ 分别为电力系统节点 m 的火电机组和燃气轮机的无功出力;  $\Delta P_{w,w}$  为节点 m 处的风电场弃风功率; Pw.m 为电力系统节点 m 处的风电场有功出力, Qw.m 为其无功功率; P<sub>P2G,m</sub>、Q<sub>c,m</sub>分别为电力系统节点m处电转气消耗 的功率与无功补偿功率; P<sub>D.m</sub>、Q<sub>D.m</sub>分别为电力系 统节点 m 处有功和无功负荷; P<sub>m</sub>、Q<sub>m</sub>分别为电力 系统节点 m 的注入有功、无功功率; F<sub>G</sub> 为天然气 网络气源点注入气流; F<sub>D,a</sub> 为系统节点 a 的天然气 负荷, F。为该节点的注入气流; F<sub>P2G</sub>。为天然气网 络节点 a 处 P2G 装置注入气流; F gas.a 为天然气系 统节点 a 处燃气轮机消耗天然气流量; N, 为电力 系统节点总个数; N。为天然气网络节点的总数。

1)节点注入功率方程。

电力系统节点 m 的注入有功、无功功率计算公 式为

$$P_{m} = V_{m} \sum_{n=1}^{N_{e}} V_{m} \left( G_{mn} \cos \theta_{mn} + B_{mn} \sin \theta_{mn} \right),$$
$$m = 1, 2, \cdots, N_{e}$$
(12)

$$Q_{m} = V_{m} \sum_{n=1}^{N_{e}} V_{m} \left( G_{mn} \sin \theta_{mn} - B_{mn} \cos \theta_{mn} \right),$$
$$m = 1, 2, \cdots, N_{e}$$
(13)

式(12)、(13)中  $V_m$  为电力系统节点m 的电压幅 值; $\theta_{mn}$  为节点m 与n 的电压相角差; $G_{mn}$  为节点导 纳矩阵第m 行元素的实部; $B_{mn}$  为第n 列元素的 虚部。

2)电转气模型。

在系统出现剩余风电时, P2G 装置可以将其转 换为可利用的天然气,降低对气源处的依赖。其消 耗电功率与注入气流之间的关系式为

 $F_{P2G,r} = \eta_{P2G,r} P_{P2G,r} / GHV, r = 1, 2, \cdots, N_P$ (14)

式中  $P_{P2G,r}$ 、 $F_{P2G,r}$ 分别为 P2G 装置 r 需要的电 功率和转换的气流; $\eta_{P2G,r}$ 为该装置的转换效率; GHV 是天然气高热值,为定值;  $N_P$  为 P2G 装置的 总数。

3) 燃气轮机模型。

相比燃煤发电机,燃气轮机具有热效率高、可靠 性高和对环境影响小等优点。燃气轮机消耗气流与 输出电功率之间满足方程:

$$F_{\text{gas},k} = \frac{\alpha_k + \beta_k P_{\text{G},k} + \gamma_k P^2_{\text{G},k}}{\text{GHV}}, k = 1, 2, \cdots, N_k$$
(15)

式中  $F_{gas,k}$  为燃气发电机组 k 用掉的气体流量;  $P_{G,k}$  为有功出力;  $\alpha_k \ , \beta_k \ , \gamma_k$  为燃气发电机组 k 的 耗量系数;  $N_k$  为燃气轮机机组台数。

# 2 电一气互联综合能源系统低碳经济 模型及优化

# 2.1 目标函数

该文建立的低碳经济调度模型的目标函数由两 部分组成,即低碳和运行成本最低。由于系统碳排 放量和运行成本量纲不同,故利用经济折算系数ω 把 CO<sub>2</sub> 排放量折算至经济维度<sup>[16]</sup>,再与系统的运 行成本一起考虑构成总成本最少的目标函数,多目 标问题也可看作单目标问题进行处理。

假设天然气主要来自于气源,则系统运行成本 由燃煤成本、外购天然气成本以及弃风成本组成,具 体表达式为

$$F_{1} = \sum_{t=1}^{T} \left[ \sum_{i=1}^{N_{\rm F}} \left( a_{i} + b_{i} P_{{\rm F},i,t} + c_{i} P_{{\rm F},i,t}^{2} \right) + \right]$$

$$\sum_{i=1}^{N_{\rm G}} g_{j} P_{{\rm G},j,t} + \sum_{m=1}^{N_{\rm w}} C_{{\rm w},m} \Delta P_{{\rm w},m} \bigg]$$
(16)

式中  $F_1$  为系统运行成本;  $N_F$  为火电机组台数;  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  为火电机组 i 的耗量特性曲线参数;  $P_{F,i,t}$  为火电机组 i 在 t 时刻的有功出力;  $g_j$  为第 j个天然气气源的成本系数;  $P_{G,j,t}$  为第 j 个天然气 气源在 t 时刻的有功出力;  $N_G$  为天然气网络中气源 点集合,  $C_{w,m}$  为弃风成本系数,  $\Delta P_{w,m}$  的含义同式 (9)。

在研究低碳目标时,只考虑各发电机组的 CO<sub>2</sub> 排放。将 CO<sub>2</sub> 排放量映射经济维度后的表达式为

$$F_2 = \omega \sum_{i=1}^{T} \sum_{i=1}^{N} \delta_i P_i \qquad (17)$$

式中  $F_2$  为投到经济维度的碳排放;  $\omega$  为经济折 算系数;  $\delta_i$  为发电机 i 单位有功出力碳排放强度;  $P_i$  为能产生 CO<sub>2</sub> 的发电机 i 的有功出力; N 为发 电机组总数。

综上,以系统综合成本 F 最低为目标的低碳经 济模型的目标函数为

$$F = \min(F_1 + F_2) \tag{18}$$

# 2.2 电力网络约束

1)发电机组出力上、下限:

$$P_{i,\min} \leqslant P_{i,t} \leqslant P_{i,\max} \tag{19}$$

$$Q_{i,\min} \leqslant Q_{i,t} \leqslant Q_{i,\max} \tag{20}$$

式(19)、(20)中  $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 分别为t时刻发电机组 i的有功和无功出力;  $P_{i,\max}$ 、 $P_{i,\min}$ 分别为第i台发 电机的有功出力上、下限;  $Q_{i,\max}$ 、 $Q_{i,\min}$ 分别为无功 出力上、下限,  $i = 1, 2, \dots, N$ 。

2)节点电压约束:

$$U_{m,\min} \leqslant U_{m,t} \leqslant U_{m,\max} \tag{21}$$

式中 U<sub>m,t</sub>为t 时刻节点m 的电压;U<sub>m,max</sub>、U<sub>m,min</sub> 分别为节点m 电压幅值上、下限,m=1,2,…,N<sub>e</sub>。 3)平衡节点相角约束:

$$\tan\theta_{\mathrm{bal},t} - f_{\mathrm{bal},t} / e_{\mathrm{bal},t} = 0 \tag{22}$$

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

4)线路功率约束:

$$P_{l,\min} \leqslant P_{l} \leqslant P_{l,\max} \tag{23}$$

式中  $P_l$ 为输电线路l流过的线路功率;  $P_{l,max}$ 、  $P_{l,min}$ 分别为线路功率上、下限。 5)发电机爬坡约束:

$$P_{\mathrm{F},i,t} - P_{\mathrm{F},i,t-1} \leqslant R_{\mathrm{U},i} \tag{24}$$

$$P_{\mathrm{F},i,t-1} - P_{\mathrm{F},i,t} \leqslant R_{\mathrm{D},i} \tag{25}$$

式(24)、(25)中 R<sub>U,i</sub>、R<sub>D,i</sub>分别为发电机组*i*上、 下爬坡的上限。

6)电转气出力:

$$P_{P2G,\min} \leqslant P_{P2G,t} \leqslant P_{P2G,\max}$$
(26)

式中  $P_{P2G,t}$  为电转气在 t 时刻的有功出力;  $P_{P2G,max}$ 、 $P_{P2G,min}$ 分别为电转气出力上、下限。

2.3 天然气网络约束

1)气源点天然气供应量约束:

$$Q_{\mathrm{s,min}} \leqslant Q_{\mathrm{s,t}} \leqslant Q_{\mathrm{s,max}}$$
 (27)

式中  $Q_{s,t}$  为t 时刻气源点s 处供应的气流量;  $Q_{s,max}$ 、 $Q_{s,min}$ 分别为气源处供应气流量的上、下限。

2)节点压力约束:

$$p_{a,\min} \leqslant p_{a,t} \leqslant p_{a,\max} \tag{28}$$

式中 *p<sub>a,t</sub>* 为*t* 时刻节点*a* 的压力; *p<sub>a,max</sub>、<i>p<sub>a,min</sub>* 分别为节点 *a* 处的压力上、下限。

3)压缩机压缩比约束:

$$R_{\rm c,min} \leqslant \frac{p_b}{p_a} \leqslant R_{\rm c,max} \tag{29}$$

式中  $R_{c,max}$ 、 $R_{c,min}$ 分别为压缩机 c 压缩比的上、下限。

4)天然气管道流量约束:

$$F_{\rm p,min} \leqslant F_{\rm p,ab} \leqslant F_{\rm p,max} \tag{30}$$

式中 F<sub>p,max</sub>、F<sub>p,min</sub>分别为管道输送流量的上、下限。

5)储气罐约束。

储气罐对气负荷的可靠供应和气网的安全稳定 运行有着重要作用。结合 P2G 技术有利于天然气 的大容量存储。

$$S_{s,i,\min} \leqslant S_{s,i,t} \leqslant S_{s,i,\max}$$
(31)

$$S_{s,i,t} = S_{s,i,t-1} + Q_{s,i,t}^{in} - Q_{s,i,t}^{out}$$
 (32)

$$0 \leqslant Q_{\mathrm{s},i,t}^{\mathrm{in}} \leqslant Q_{\mathrm{s},i,\max}^{\mathrm{in}}$$
(33)

$$0 \leqslant Q_{\mathrm{s},i,t}^{\mathrm{out}} \leqslant Q_{\mathrm{s},i,\max}^{\mathrm{out}}$$
(34)

式(31)~(34)中  $S_{s,i,t}$ 为t时刻储气罐i的存储容量; $S_{s,i,\max}$ 、 $S_{s,i,\min}$ 分别为储气罐i的存储容量上、下限; $Q_{s,i,t}^{in}$ 为储气罐i天然气的注入流量; $Q_{s,i,t}^{out}$ 为 其输出流量; $Q_{s,i,\max}^{in}$ 、 $Q_{s,i,\max}^{out}$ 分别为天然气注入、 输出流量的上限。

电力系统功率平衡约束与天然气网络流量平衡

约束见式(9)~(11)。

# 2.4 求解方法

GAMS 是一种通过调用高性能求解器(如 CPLEX,IPOPT等)对大规模优化问题进行求解的数 学规划高级建模系统。式(9)~(11)、(16)~(34)所 建立的模型为非线性规划问题,适合调用 GAMS 中 收敛性好和鲁棒性强的内点法(IPOPT)进行求解<sup>[16]</sup>。

# 3 算例分析

#### 3.1 算例系统

该文采用修改的 IEEE 30 节点 6 机组电力系 统和比利时 20 节点天然气系统<sup>[8]</sup>,利用燃气轮机与 P2G 耦合,构成了一个电一气互联综合能源系统来 验证该文所提模型的优越性。其中,第1台与第2 台火电机组改为燃气轮机,风电场功率预测和系统 负荷预测数据如图 3 所示。比利时 20 节点天然气 网络有 20 个节点、21 条管道、2 个加压站和 6 个气 源点(包括 4 个储气设备,S1~S4),详细参数见文 献[8]。经济折算系数  $\omega$  的取值范围参考文献 [16],为 0~1,该文取  $\omega$ =0.1。天然气的气源点与 储气罐参数如表 1 所示。



图3 电负荷、风电场出力数据

Figure 3 Electric load and wind farm output data

表1 天然气网络气源点与储气罐参数

Table 1 Gas source parameters and gas tank

parameters for natural gas network

气源点	天然气网节点	供应下限/ (Mm <sup>3</sup> /h)	供应上限/ (Mm <sup>3</sup> /h)
W1	1	0.85	1.30
W2	9	0.37	0.82
S1	2	0.00	0.53
S2	5	0.00	0.30
S3	14	0.00	0.15
S4	18	0.00	0.06

# 3.2 不同模型的结果分析

为了证明该文所提模型的低碳性、经济性和消 纳风电能力,用4种模型对比分析,即①不考虑 P2G,目标函数中仅考虑经济性;②不考虑 P2G,目 标函数综合考虑低碳性与经济性;③考虑 P2G,目 标函数仅考虑经济性;④考虑 P2G,目标函数综合 考虑低碳性与经济性,其为该文所采用模型。

1)消纳风电效果分析。

为证明所采用模型消纳风电能力,将模型2、4 的弃风情况作对比分析,如图4所示,可以看出,仅 靠常规负荷消纳风电仍会存在较大的弃风,在考虑 电转气后,模型4比模型2的弃风量减少了 76.56%,所消纳的风电均用于转化天然气,提供了 充足的气源。



图4 2种模型下的弃风情况

Figure 4 Discharge power curve before and after adding P2G

2)低碳经济分析。

为证明燃气轮机与 P2G 的联合运行在低碳经 济调度方面的效果,对各机组的日出力做对比分析, 如图 5 所示,其中编号 1、2 为燃气轮机,其余为火电 机组。4 种模型下的碳排放量与综合成本如表 2 所示。







表2 不同模型下结果分析

 Table 2
 Analysis of results under different models

模型	碳排放量/p.u.	综合成本/M\$
1	6.285	3.996
2	4.174	4.671
3	5.768	2.192
4	1.774	2.981

分析图 5 表明,在模型 4 中,发电机 1、2 的出力 均比模型 3 大,而发电机 3~6 的出力均比模型 3 小, 这是因为火电机组的碳排放强度为 1.2 t/(MW・h), 会产生较多的 CO<sub>2</sub>,仅以经济成本为目标函数时,系 统优先调用发电成本低但碳排量大的燃煤机组,模型 4 考虑了低碳目标,发电机组出力向碳排放低的发电 机 1、2 转移,其碳排放强度为 0.4 t/(MW・h)。

由表 2 可知,模型 1 的综合成本比模型 3 高 82.3%,模型 2 的综合成本比模型 4 高 56.69%,这 是因为未考虑 P2G 时,弃风成本较大,导致系统综 合成本增加;模型 2 的 CO<sub>2</sub> 排放量比模型 1 降低了 50.57%,模型 4 的 CO<sub>2</sub> 排放量比模型 3 减少了 69. 24%,说明低碳目标的引入极大提高了系统的减排 能力。模型 2 的综合成本比模型 1 高 16.89%,模 型 4 的综合成本比模型 3 高 35.6%,这是因为考虑 低碳目标以后,系统会优先调用碳排量小但发电成 本高的燃气机组,从而导致成本较高。

综上可知, P2G 可以消纳弃风降低弃风成本, 在考虑低碳目标后, 机组出力向碳排量小的燃气轮 机转移, 增加了经济成本, 降低了 CO<sub>2</sub> 的排放。

#### 3.3 经济折算系数ω对系统运行影响分析

CO<sub>2</sub>的排放量和经济性是 2 个不同的量纲,不 在同一维度,通过经济折算系数将 2 个目标函数联 系起来,实现多目标问题单目标化。ω 的取值不同 2 个目标的相对权重不同。在不同经济折算系数 下,系统碳排放量和综合成本的变化情况如图 6 所示。

分析图 6 可知, 当 ω 从 0 增大到 1 时, CO<sub>2</sub> 排 放量从 4.95 减少到 0.53,说明经济折算系数越大, 该模型的低碳效果越明显。当 ω 由 0 到 1 时,综合 成本由 1.77 增加到 4.53 M \$,增大了约 3 倍。ω 越大说明低碳的权重越大,所以碳排放量低,系统会 优先调用碳排量低但运行成本高的燃气轮机发电, 所以导致综合成本增高。结果表明,调度部门可依 据系统运行需要,调节经济折算系数来权衡综合成 本与 CO<sub>2</sub> 减排目标,达到兼顾电能生产经济性和系 统排放低碳性的目的,实现对系统更灵活的控制和 管理。



图6 经济折算系数变化的影响



4 结语

该文针对电一气互联系统提出了一种含电转气 设备的低碳经济调度模型,利用电转气将富余风电 转化为可直接利用与存储的天然气,分析了4种模 型下的低碳性与经济性,并研究了经济折算系数的 变化对系统运行的影响,得出结论:

1)电转气可以通过消纳弃风,为燃气轮机发电 提供充足气源,降低了对天然气网络气源处的依赖;

2)该文所提的含电转气设备的综合能源系统低碳经济调度模型可以有效降低 CO<sub>2</sub> 的排放,但是综合成本有所增加;

3)经济折算系数越大,低碳目标的权重越大,低碳效果便越好。相关调度部门可以根据实际运行需要,通过调节经济折算系数实现对2个目标的灵活控制和管理;

4)电转气过程需要 CO<sub>2</sub> 的参与,接下来的研究 可以考虑将系统产生的 CO<sub>2</sub> 利用碳捕集装置回收 利用于电转气过程,进一步实现低碳电力。

#### 参考文献:

[1] 刘灿伟.我国低碳能源发展战略研究[D].济南:山东大学,2010.

- [2] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等.综合能源系统与能源互联 网简述[J].电工技术学报,2016,31(1):1-5.
  YU Xiaodan,XU Xiandong,CHEN Shuoyi,et al. A brief review to integrated energy system and energy internet
  [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016,31(1):1-5.
- [3] Unsihuay C, Lima J W M, de Souza A C Z. Modeling the integrated natural gas and electricity optimal power flow [C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, USA, 2007.
- [4] CleggS, Mancarella P. Integrated modeling and assessment of the operational impact of power-to-gas (P2G) on electrical and gas transmission networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1234-1244.
- [5] Qiu J, Dong Z Y, Zhao J H, et al. Multi-stage flexible expansion co-planning under uncertainties in a combined electricity and gas market [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4):2119-2129.
- [6] 李杨,刘佳伟,赵俊华,等.含电转气的电一气一热系统协同调度与消纳风电效益分析[J].电网技术,2016,40
   (12):3680-3688.

LI Yang, LIU Weijia, ZHAO Junhua, et al. Optimal dispatch of combined electricity-gas-heat energy systems with power-to-gas devices and benefit analysis of wind power accommodation [J]. Power System Technology, 2016,40(12):3680-3688.

- [7] 杨青润,丁涛,文亚,等. 计及碳排约束的跨国电力互联网新能源消纳分析[J]. 智慧电力,2019,47(10):1-6.
  YANG Qingrun, DING Tao, WEN Ya, et al. Analysis on renewable energy integration in transnational power interconnection considering carbon emission constraints
  [J]. Smart Power,2019,47(10):1-6.
- [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):9-14.

WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, et al. Carbon trading based low-carbon economic operation for integrated electricity and natural gas energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 9-14.

[9] 白宏坤,尹硕,李虎军,等. 计及碳交易成本的多能源站

综合能源系统规划[J]. 电力科学与技术学报,2019,34 (1):11-19.

BAI Hongkun, YIN Shuo, LI Hujun, et al. Optimal planning of multi-energy stations considering carbontrading cost[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2019,34(1):11-19.

[10] 罗承先. 德国采用电转气技术实现低碳化[J]. 中外能 源,2017,22(4):20-25.

LUO Chengxian. Application of power to gas technology for low carbonation[J]. Sino-Global Energy, 2017, 22(4):20-25.

- [11] 王亚男,徐潇源,严正,等.含电转气过程的电一气网络联合优化运行[J].现代电力,2017,34(4):1-7.
  WANG Yanan,XU Xiaoyuan,YAN Zheng,et al. Optimizing operation of integrated electrical and gas network with power to gas process[J]. Modern Electric Power,2017,34(4):1-7.
- [12] 徐晨博,薛友,林紫菡,等. 计及可转移负荷的电-气综合能源系统多目标优化[J]. 电力科学与技术学报, 2019,34(3):13-23.

XU Chenbo, XUE You, LIN Zihan, et al. Multi-objective optimization of an integrated electricity-gas energy system considering transferable loads[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3):13-23.

[13] 杜琳,孙亮,陈厚合. 计及电转气规划的综合能源系统 运行多指标评价[J]. 电力自动化设备,2017,37(6): 110-115. DU Lin, SUN Liang, CHEN Houhe. Multi-index evaluation of integrated energy system with P2G planning [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37 (6):110-115.

[14] 沈海平,陈铭,钱磊,等. 计及电转气耦合的电-气互联 系统机组组合线性模型研究[J]. 电力系统保护与控 制,2019,47(8):34-41.

SHEN Haiping, CHEN Ming, QIAN Lei, et al. Linear model research of unit commitment for integrated electricity and natural-gas systems considering power-togas coupling [J]. Power System Protection and Control, 2019,47(8):34-41.

[15] 孙国强,陈胜,郑玉平,等. 计及电-气互联能源系统安 全约束的可用输电能力计算[J]. 电力系统自动化, 2015,39(23):26-31.

SUN Guoqiang, CHEN Sheng, ZHENG Yuping, et al. Available transfer capability calculation considering electricity and natural gas coupled energy system security constrains[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 26-31.

[16] 卫志农,张思德,孙国强,等.计及电转气的电一气互联综合能源系统削峰填谷研究[J].中国电机工程学报,2017,37(16):4601-4607.
 WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guogiang, et al.

Power-to-gas considered peak load shifting research for integrated electricity and natural-gas energy systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37 (16): 4601-4607.