

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.06.001

# 考虑天然气-电力耦合的多能源系统风电消纳分析

孟冰冰<sup>1</sup>, 郭丰慧<sup>2</sup>, 胡林献<sup>1</sup>, 白雪峰<sup>1</sup>, 刘超<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 国网黑龙江省电力有限公司哈尔滨供电公司, 黑龙江 哈尔滨 150010)

**摘要:** 燃气-蒸汽联合循环机组将电热冷气等多种能源系统耦合成多能源系统, 电转气(P2G)技术应用于消纳弃风, 进一步加强了电力与天然气2个系统间的耦合。文中探讨了P2G的消纳弃风原理, 研究了P2G设备的启停控制策略, 并建立了基于P2G的气电耦合模型和天然气管网储气模型, 构建了考虑天然气-电力耦合运行的多能源系统协同优化调度模型。最后通过算例仿真, 分析了计及天然气-电力耦合的多能源系统的消纳弃风效果, 以及天然气管网储气能力与P2G配置容量的关系。研究表明, 充分利用天然气管网的储气能力可进一步消纳弃风, 且管网储气能力越强, 系统配置的P2G容量可越小。

**关键词:** 多能源系统; P2G技术; 管网储气; 弃风消纳; 优化调度

**中图分类号:** TM71

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2019)06-0002-07

## 0 引言

在北方冬季供暖期, 燃煤热电机组排放的污染物导致北京、天津等北方城市的雾霾非常严重<sup>[1]</sup>。因此, 许多北方大城市纷纷推进“煤改气”工程, 燃气-蒸汽联合循环机组的应用越来越广泛, 在提高环保性的同时, 也将电热冷气等多种能源系统耦合成多能源系统, 提高了能源的利用率<sup>[2-3]</sup>。

针对包含燃气机组的多能源系统运行与调度问题, 文献[4]认为燃气-蒸汽联合循环机组采用启停调峰方式的系统最优。文献[5]建立了基于燃气机组的热电联合系统调度模型, 分析了燃气机组比例对系统弃风量的影响。文献[6]研究了燃气-蒸汽联合循环系统的模式转换特性, 表明燃气机组在调节发电功率方面更具灵活性。

另外, 为应对能源危机与环境污染问题, 世界各国正大力发展清洁能源与可再生能源<sup>[7]</sup>。我国“三北”地区风电装机规模不断扩大, 但风电的间歇性与随机性等特点导致了弃风现象。2018年, 全国年弃风量达227亿kW·h, 其中, 新疆、甘肃、内蒙古的弃风率都超过10%, 占全国弃风总量的84%<sup>[8]</sup>。

为了缓解弃风现象, 研究人员提出了一些解决方案, 比如在系统中增设电锅炉, 使热力系统与电力系统间的耦合更加密切。文献[9]提出在热电机组配置电锅炉, 以降低热电机组“以热定电”必发电功率, 增大风电上网空间。文献[10]构建了增设调峰电锅炉的电热联合调度模型以消纳弃风。

收稿日期: 2019-06-01; 修回日期: 2019-07-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51877049)

电转气(P2G)作为一种能将电能转换为天然气或氢气的新兴技术, 出现后立刻成为了研究热点。文献[11]针对德国P2G技术的发展进行了介绍, 并分析了在我国发展P2G技术的必要性及可行性。文献[12]综述了P2G技术的基本原理及其在能源互联网中的应用方案。文献[13]综述了基于P2G耦合的天然气-电力耦合系统建模方法以及不同场景下的运行优化模型及求解方法。文献[14]提出了一种计及P2G设备运行成本和分段弃风成本的多能源优化模型, 通过仿真分析了P2G的弃风消纳效果, 但没有考虑管网储气的影响。

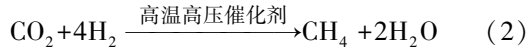
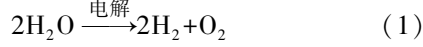
天然气储存方便, 且管网储气容量极大, 文中重点研究应用P2G技术后, 天然气管网储气对弃风消纳和P2G配置容量的影响。为此, 首先探讨P2G技术的弃风消纳原理, 研究P2G设备的启停控制策略, 然后建立天然气管网的储气模型和基于P2G的气电耦合模型, 构建考虑天然气-电力耦合运行的多能源系统协同优化调度模型。最后通过算例仿真, 分析考虑天然气-电力耦合的多能源系统的弃风消纳效果, 以及天然气管网储气容量对P2G配置容量的影响。

## 1 P2G技术及其数学模型

### 1.1 P2G技术及其消纳弃风原理

P2G技术是将电能转换为天然气或氢气的一种新兴技术, 按照产品类别, 划分为电转氢气与电转天然气技术2种<sup>[12]</sup>。由于氢气在远距离传输及储存难易程度等方面逊色于天然气, 因此, 目前使用较多的是电转天然气技术。电转天然气技术首

先采用电解水技术,利用多余电能将水分解制造氢气,然后再通过萨巴蒂反应,在高温催化剂的作用下利用氢气与二氧化碳制造甲烷<sup>[15-16]</sup>。这个过程中二氧化碳的来源可以是自然空气或火电厂烟气。目前,P2G技术的效率可达到60%~70%<sup>[17]</sup>。这2个阶段所对应的化学反应如下:



P2G设备输出天然气与输入电功率关系如下:

$$V_{\text{P2G}} = \frac{P_{\text{P2G}} \eta_{\text{P2G}}}{H_{\text{G}}} \quad (3)$$

式中:  $V_{\text{P2G}}$  为P2G设备的产气量;  $P_{\text{P2G}}$  为设备的运行功率;  $H_{\text{G}}$  为天然气热值;  $\eta_{\text{P2G}}$  为设备的转换效率。

风电的反调峰特性使得在系统电负荷低谷时风电大发,大量风电无法消纳。若在此时开启电转气设备,多余风电被转化为天然气并储存在天然气管网,对于电网而言起到了“填谷”作用,有利于消纳弃风。

## 1.2 P2G设备数学模型

包含P2G设备的多能源系统结构如图1所示,P2G设备产生的天然气分为两部分,一是用于直接供给负荷,二是用于储存。电力网络仅能传输电能,无法储存电能,而天然气网络管道既可以传输气能,也可以将其储存起来,对天然气的供应起到一定的调节作用。因此,P2G设备所消耗的电一部分用于直供气,直接将多余电能转换为天然气供给气负荷,另一部分则将电能转换为天然气后储存在管网中,在需要时放出。

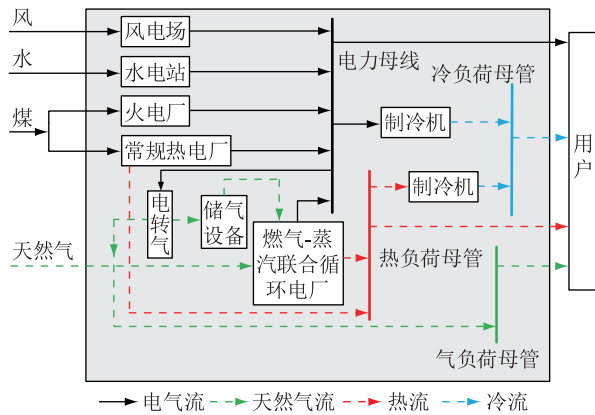


图1 多能源系统结构示意图

Fig.1 Structure of multi-energy system

P2G设备启动将会消耗弃风电量,消耗的电功率如式(4)所示:

$$P_{\text{P2G}} = (P_z + P_c) f \quad (4)$$

式中:  $P_{\text{P2G}}$  为P2G设备所消耗的电功率;  $P_z$  为直供气部分所消耗的电功率;  $P_c$  为储气部分所消耗的电功率;  $f$  为弃风标志。

P2G设备的供气量可表示为:

$$V_{\text{P2G}} = V_z + V_c \quad (5)$$

式中:  $V_z$  为P2G设备直供气流量;  $V_c$  为用于管网储气的流量。

其中:

$$V_z = \frac{P_z \eta_{\text{P2G}}}{H_{\text{G}}} \quad (6)$$

$$V_c = \frac{P_c \eta_{\text{P2G}}}{H_{\text{G}}} \quad (7)$$

管网的储气容量可表示为:

$$E^t = E^{t-1} + V_c^t f - V_c^{t-1} (1-f) \quad (8)$$

式中:  $E^t$  为  $t$  时间段管道的储气容量。

## 1.3 P2G设备启停策略

为了提高多能源系统的经济性与供能效率,文中P2G设备采用弃风启停控制策略<sup>[9]</sup>,当系统存在弃风时,P2G设备启动运行;反之,P2G设备停止运行。有无弃风现象可以由式(9)来进行判断:

$$f^t = \begin{cases} 1 & P_{\text{HEATF}}^t + P_{\text{GASF}}^t + P_{\text{CONF}} > P_{\text{load}}^t - P_{\text{WF}}^t \\ 0 & P_{\text{HEATF}}^t + P_{\text{GASF}}^t + P_{\text{CONF}} \leq P_{\text{load}}^t - P_{\text{WF}}^t \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $t$  为第  $t$  个时段;  $f^t$  为弃风标志,1表示系统存在弃风,0表示系统没有弃风;  $P_{\text{HEATF}}^t$  为所有热电机组强迫出力之和;  $P_{\text{GASF}}^t$  为所有燃气-蒸汽联合循环机组强迫出力之和;  $P_{\text{CONF}}$  为系统所有火电机组强迫出力之和;  $P_{\text{load}}^t$  为系统总电负荷;  $P_{\text{WF}}^t$  为风电场预测出力。

## 2 多能源系统协同调度模型

### 2.1 天然气系统模型

管道流量方程是天然气系统的基本模型<sup>[12]</sup>,管道天然气流量与管道两端压力以及管道系数之间满足如下关系:

$$\begin{cases} F_{\text{gas},1}^{ij,t} = K_{ij} S_{ij} \sqrt{S_{ij} [(P_i^t)^2 - (P_j^t)^2]} \\ S_{ij} = \begin{cases} +1 & P_i^t - P_j^t \geq 0 \\ -1 & P_i^t - P_j^t < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $F_{\text{gas},1}^{ij,t}$  为  $t$  时段的管道流量;  $P_i^t$ ,  $P_j^t$  分别为  $t$  时段节点  $i$  和  $j$  的压力;  $K_{ij}$  为与管道容积、温度等有关的系数;  $S_{ij}$  为表示气体流向的系数。

天然气在传输时会与管道产生摩擦,损失一些压力。因此,天然气系统中会增设一些加压站,通过压缩机来补偿压力损失<sup>[18]</sup>。压缩机在工作的过

程中需要消耗功率,对于首末端分别为*i*和*j*的加压站*k*,压缩机的功率消耗为:

$$H_{kij} = B_k F_{\text{gas},l}^{ij,t} \left[ \left( \frac{P_i^t}{P_j^t} \right)^{Z_k} - 1 \right] \quad (11)$$

式中: $H_{kij}$ 为压缩机消耗的电能; $B_k$ 为压缩机的效率系数; $Z_k$ 为压缩机的压缩系数。

## 2.2 目标函数

假设多能源系统中有燃气-蒸汽联合循环电厂*N*座,每座电厂中装配*R*台燃气-蒸汽联合循环机组、*X*个换热站以及*Z*个制冷站;有*M*座常规热电厂,每座热电厂装配*S*台常规热电机组、*Y*个换热站以及*V*个制冷站;有*H*台纯凝火电机组、*K*台风电机组、*J*台水电机组。每个换热站都装设电锅炉。文中以系统总成本最小为目标函数:

$$\min F = c_2 \sum_{t=1}^T V_{\text{buy}}^t + c_1 \left( \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S F_{\text{HEAT}}^{t,m,s} + \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^H F_{\text{CON}}^{t,h} \right) \quad (12)$$

式中: $V_{\text{buy}}^t$ 为天然气购买量; $c_1, c_2$ 分别为天然气、燃煤的价格; $F_{\text{HEAT}}^{t,m,s}$ ,  $F_{\text{CON}}^{t,h}$ 分别为热电机组、火电机组的煤耗量; $T$ 为一个调度周期内的时段数。

## 2.3 约束条件

(1) 电功率平衡约束。电力网络稳定的核心是电网频率的稳定。而电网频率的稳定与电网中有功功率的平衡密切相关。当发电机组的供电功率高于负荷水平时,电网频率升高,反之则会降低。因此,电力系统中电能的供需必须要时刻保证平衡。即在整个系统中,燃气机组、热电机组、火电机组、风电场、P2G设备、电锅炉与用户侧电负荷之间,需要保持电功率的平衡,如式(13)所示:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{r=1}^R P_{\text{GAS}}^{t,n,r} + \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S P_{\text{HEAT}}^{t,m,s} + \sum_{h=1}^H P_{\text{CON}}^{t,h} + P_w^t = P_{\text{Load}}^t + \left( \sum_{n=1}^N \sum_{x=1}^X P_e^{t,n,x} + \sum_{m=1}^M \sum_{y=1}^Y P_e^{t,m,y} + \sum_{y=1}^Y P_{\text{P2G}}^{t,y} \right) f \quad (13)$$

式中: $P_{\text{GAS}}$ 为燃气机组发电功率; $P_{\text{HEAT}}$ 为热电机组发电功率; $P_{\text{CON}}$ 为火电机组发电功率; $P_w$ 为风电场功率; $P_e$ 为电锅炉功率; $P_{\text{Load}}$ 为系统电负荷; $t$ 为时段; $f$ 为弃风标志。

(2) 热功率平衡约束。热网为辐射状结构,且热能不能远距离输送,每个热源(如热电厂)固定地供给某一区域(简称分区)的热负荷,热源之间没有联系,因此各区域热负荷由各区域热电厂分别平衡。燃气-蒸汽联合循环热电厂、普通燃煤热电厂的热功率平衡约束如下:

$$\sum_{r=1}^R Q_{\text{H}}^{t,n,r} + f \sum_{x=1}^X Q_e^{t,n,x} = \sum_{x=1}^X Q_{\text{HLoad}}^{t,n,x} + \sum_{s=1}^S Q_{\text{h}}^{t,n,s} \quad n = 1, \dots, N \quad (14)$$

$$\sum_{s=1}^S Q_{\text{HEAT}}^{t,m,s} + f \sum_{y=1}^Y Q_e^{t,m,y} = \sum_{y=1}^Y Q_{\text{HLoad}}^{t,m,y} \quad m = 1, \dots, M \quad (15)$$

式中: $Q_{\text{HLoad}}^{t,n,x}$ ,  $Q_{\text{h}}^{t,n,s}$ 分别为第*n*座燃气-蒸汽联合循环热电厂所带换热站、吸收式制冷机输入的热负荷; $Q_{\text{HLoad}}^{t,m,y}$ 为第*m*座燃煤热电厂所带换热站的热负荷。

(3) 冷功率平衡约束。冷气网络与热网的特性类似,因此,各区域冷负荷由燃气-蒸汽联合循环电厂和普通燃煤电厂分别平衡,约束如下:

$$\sum_{r=1}^R Q_{\text{C}}^{t,n,r} = \sum_{z=1}^Z Q_{\text{CLoad}}^{t,n,z} \quad n = 1, \dots, N \quad (16)$$

$$\sum_{s=1}^S Q_{\text{C}}^{t,m,s} = \sum_{v=1}^V Q_{\text{CLoad}}^{t,m,v} \quad m = 1, \dots, M \quad (17)$$

$$Q_{\text{c}} = Q_{\text{h}} \eta_{\text{a}} C_{\text{coba}} \quad (18)$$

$$Q_{\text{cd}} = P_{\text{c}} \eta_{\text{b}} C_{\text{coph}} \quad (19)$$

式中: $Q_{\text{C}}^{t,n,r}$ ,  $Q_{\text{C}}^{t,m,s}$ 分别为2座热电厂中制冷机的冷功率; $Q_{\text{CLoad}}^{t,n,z}$ ,  $Q_{\text{CLoad}}^{t,m,v}$ 分别为2种热电厂所带的冷负荷; $Q_{\text{h}}$ 为吸收式制冷机中输入的热功率; $P_{\text{c}}$ 为电制冷机输入的电功率; $\eta_{\text{a}}$ ,  $\eta_{\text{b}}$ 为制冷效率; $C_{\text{coba}}$ ,  $C_{\text{coph}}$ 为制冷性能系数。

(4) 气量平衡约束。

$$\sum_{n=1}^N \sum_{r=1}^R V_{\text{GAS}}^{t,n,r} + V_{\text{Load}}^t - f \sum_{y=1}^Y V_{\text{P2G}}^{t,y} + \sum_{g=1}^G [V_{\text{c}}^{t,g} f - V_{\text{f}}^{t,g} (1-f)] = V_{\text{buy}}^t \quad (20)$$

式中: $V_{\text{GAS}}^{t,n,r}$ 为第*r*台燃气-蒸汽联合循环机组的耗气量; $V_{\text{Load}}^t$ 为系统的天然气负荷需求量; $V_{\text{P2G}}^{t,y}$ 为第*y*台P2G设备的直接供气量; $V_{\text{c}}^{t,g}$ ,  $V_{\text{f}}^{t,g}$ 分别为管道*g*的储气量和放气量。

(5) 燃气-蒸汽联合循环机组内部约束。

$$P_2 = bP_1 + c - P_3 - P_4 = bP_1 - dQ_{\text{H}} - eQ_{\text{C}} + c \quad (21)$$

$$P_{\text{GAS}} = P_1 + P_2 \quad (22)$$

式中: $P_1$ ,  $P_2$ 分别为燃气轮机、蒸汽轮机的发电功率; $P_3$ ,  $P_4$ 分别为机组供热、供冷损失的电功率; $Q_{\text{H}}$ ,  $Q_{\text{C}}$ 分别为机组的供热、供冷功率; $b, c, d, e$ 为拟合系数。

(6) 燃气-蒸汽联合循环机组出力约束。

$$P_1^{\min} \leq P_1 \leq P_1^{\max} \quad (23)$$

$$P_2^{\min} \leq P_2 \leq P_2^{\max} \quad (24)$$

$$Q_{\text{H}}^{\min} \leq Q_{\text{H}} \leq Q_{\text{H}}^{\max} \quad (25)$$

$$Q_C^{\min} \leq Q_C \leq Q_C^{\max} \quad (26)$$

(7) 热电机出力约束。

$$D^{\min} \leq D \leq D^{\max} \quad (27)$$

$$P_{\text{HEAT}}^{\min} \leq P_{\text{HEAT}} \leq P_{\text{HEAT}}^{\max} \quad (28)$$

(8) 吸收式制冷机约束。

$$Q_h^{\min} \leq Q_h \leq Q_h^{\max} \quad (29)$$

(9) 电制冷机约束。

$$P_c^{\min} \leq P_c \leq P_c^{\max} \quad (30)$$

(10) 纯凝火电机出力约束。

$$P_{\text{CON}}^{\min} \leq P_{\text{CON}} \leq P_{\text{CON}}^{\max} \quad (31)$$

(11) 风电场出力约束。

$$0 \leq P_w \leq P_w^{\max} \quad (32)$$

(12) 电锅炉约束。

$$P_e^{\min} \leq P_e \leq P_e^{\max} \quad (33)$$

(13) P2G 设备约束。

$$P_{\text{P2G},x}^{\min} \leq P_{\text{P2G},x} \leq P_{\text{P2G},x}^{\max} \quad (34)$$

(14) 管道压力约束。

$$|P_{\text{gas}}^{g,t}| \leq P_{\text{gas}}^{g,\max} \quad (35)$$

式中:  $P_{\text{gas}}^{g,\max}$  为第  $g$  管道的压力上限。

(15) 储放气流量约束。

$$|V_f| \leq V_f^{\max} \quad (36)$$

式中:  $V_f^{\max}$  为天然气管道最大放气流量。

(16) 储放气平衡约束。

$$\sum_{t=1}^T V_c^t = \sum_{t=1}^T V_f^t \quad (37)$$

(17) 容量约束。

$$|E^t| \leq E^{\max} \quad (38)$$

式中:  $E^{\max}$  为天然气管道最大储气容量。

(18) 机组爬坡约束。

$$-r_{\text{CON}}^{\text{down}} \Delta t \leq P_{\text{CON}}^t - P_{\text{CON}}^{t-1} \leq r_{\text{CON}}^{\text{up}} \Delta t \quad (39)$$

$$-r_{\text{GAS}}^{\text{down}} \Delta t \leq P_1^t - P_1^{t-1} \leq r_{\text{GAS}}^{\text{up}} \Delta t \quad (40)$$

$$-r_{\text{GAS}}^{\text{down}} \Delta t \leq P_2^t - P_2^{t-1} \leq r_{\text{GAS}}^{\text{up}} \Delta t \quad (41)$$

$$-r_{\text{HEAT}}^{\text{down}} \Delta t \leq P_{\text{HEAT}}^t - P_{\text{HEAT}}^{t-1} \leq r_{\text{HEAT}}^{\text{up}} \Delta t \quad (42)$$

式中:  $r_{\text{CON}}^{\text{down}}$ ,  $r_{\text{CON}}^{\text{up}}$  分别为火电机组的滑、爬坡速率;  $r_{\text{GAS}}^{\text{down}}$ ,  $r_{\text{GAS}}^{\text{up}}$  分别为燃气-蒸汽联合循环机组的滑、爬坡速率;  $r_{\text{HEAT}}^{\text{down}}$ ,  $r_{\text{HEAT}}^{\text{up}}$  分别为常规热电机组的滑、爬坡速率。

### 3 算例分析

#### 3.1 原始数据

算例系统由 2 座热电厂(热电厂 1 和热电厂 2), 1 座风电场, 1 座火电厂组成。每座热电厂附带 3 个换热站及 2 个制冷站。火电厂配置 4 台纯凝机组(7 号—10 号), 风电场的装机容量为 250 MW。调度时段为 1 h, 调度周期为 1 d。

热电厂 1 配置 4 台热发电机组(1 号—4 号), 热电厂 2 配置 2 台燃气-蒸汽联合循环机组(5 号和 6 号), 且系统安装 P2G 设备来消纳弃风。仿真分析以下两种场景: 场景 I 仅考虑配置电转气设备, 场景 II 在场景 I 基础上进一步考虑天然气管网储气。

各设备的参数和全网气负荷分别见表 1 和表 2, 各时段热、冷负荷、风电预测出力详见文献[19]。电锅炉电热转换效率取 0.95, 蒸汽焓降取 2 327.53 kJ/kg, P2G 的转换效率取 0.7。

表 1 设备主要参数

Table 1 The main parameters of the equipment

设备	参数	
蒸汽轮机	电功率下限/MW	12+0.08D
	电功率上限/MW	25-0.02D
	供热抽气下限/(t·h <sup>-1</sup> )	10
	供热抽气上限/(t·h <sup>-1</sup> )	70
燃气轮机	供冷功率下限/(GJ·h <sup>-1</sup> )	2
	供冷功率上限/(GJ·h <sup>-1</sup> )	11
热电机组	电功率下限/MW	22
	电功率上限/MW	65
P2G	供热抽气下限/(t·h <sup>-1</sup> )	36
	供热抽气上限/(t·h <sup>-1</sup> )	144
	电功率下限/MW	78+0.18D
	电功率上限/MW	120-0.05D
储气管道	电功率下限/MW	0
	电功率上限/MW	300
储气管道	储气容量下限/(t·h <sup>-1</sup> )	0
	储气容量上限/(t·h <sup>-1</sup> )	80

表 2 各时段全网气负荷

Table 2 All network gas load for each stage

时段	全网气负荷×10 <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	时段	全网气负荷×10 <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
1	0.251	13	1.575
2	0.265	14	0.971
3	0.273	15	0.889
4	0.403	16	0.798
5	0.599	17	1.967
6	0.896	18	1.759
7	1.426	19	1.319
8	0.854	20	0.953
9	0.944	21	0.398
10	1.011	22	0.400
11	1.680	23	0.344
12	1.982	24	0.231

#### 3.2 调度结果

文中采用改进的粒子群算法求解。2 种仿真场景的电功率调度、天然气调度结果见图 2、图 3。



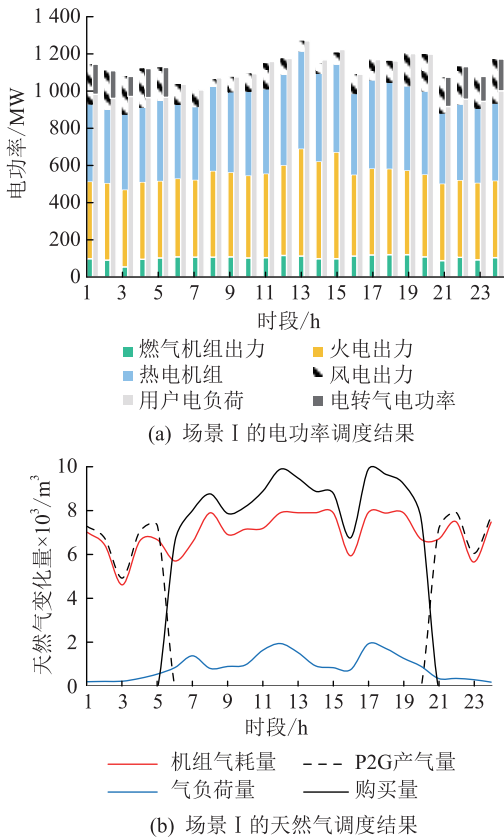


图2 场景 I 的调度结果

Fig.2 Scheduling results in scene I

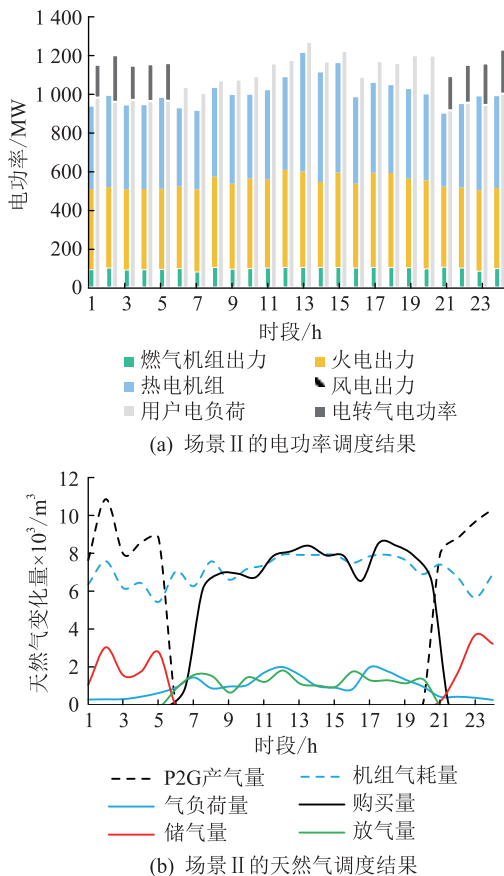


图3 场景 II 的调度结果

Fig.3 Scheduling results in scene II

从图 2(b)中可以看出,在弃风时段(凌晨 1:00~5:00、夜间 21:00~24:00),P2G 设备的产气量可以满足燃气机组的气耗量与系统中天然气用户负荷量,无需从系统外部购买天然气;在非弃风时段(凌晨 6:00~夜间 20:00),P2G 设备停止运行,P2G 产气量降为零,燃气机组的气耗量与系统中的天然气用户负荷量需要从系统外部购气来满足。

从图 3(b)中可以看出,考虑天然气管道的储气作用后,在弃风时段(凌晨 1:00~5:00、夜间 21:00~24:00),P2G 设备的产气量有所增加,除了满足燃气机组的气耗量与系统中气负荷量外,剩余产气将储存在天然气管道中,无需从外部购买天然气;在非弃风时段(凌晨 6:00~夜间 20:00),P2G 设备停止运行,P2G 产气量降为零,此时管道中储存的天然气放出,与系统的外部购气量共同来满足燃气机组的气耗量与气负荷。此外,在一个调度周期内的储气总量与放气总量相平衡。

通过对比场景 I 和场景 II 的仿真结果可以看出,与仅考虑 P2G 设备的系统相比较,在考虑天然气管网储气后,在弃风时段,当系统的外购气为 0 时,P2G 的产气量在供给燃气机组与气负荷之后,若有多余则将其进行储存;在非弃风时段,储存的天然气放出,供给气负荷与燃气机组,减小了系统的天然气购买量,使得系统总体的天然气成本降低,从而降低了系统的总燃料成本。同时,由于此时电转气所消耗的电功率分为两部分,一是用于直接供给负荷的部分,二是用于电转换为天然气后储存在管道中的部分。因此,在考虑管网储气后,电转气设备消耗了更多的电量,说明管网储气可以进一步提升风电消纳率。

同时,管网所储存的天然气可以在用电高峰时,供给燃气-蒸汽联合循环机组转化为电能,以降低天然气的购买量,使系统总体的天然气成本降低,从而降低系统的燃料总成本。因此,考虑天然气管网储气作用的系统弃风率降低,系统的总燃料成本降低。

### 3.3 储气容量与 P2G 容量比值对 P2G 容量的影响分析

2 种场景的系统弃风率和总成本如表 3 所示。

表 3 2 种场景的系统弃风率和总成本  
Table 3 System wind abandon rate and total cost in two scenes

参数	场景 I	场景 II
弃风率/%	3.56	1.93
总成本/元	7 857 829	7 797 985

以3.1节中的基本数据为基准,设管网储气容量与P2G配置容量的比值为 $k$ ,则在消纳全部弃风前提下, $k$ 值与P2G配置容量的关系如图4所示。

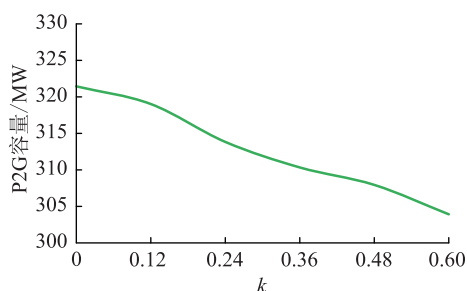


图4 比值 $k$ 与P2G容量的关系

Fig.4 Relationship between capacity of P2G and ratio  $k$

由图4可见,若需消纳全部弃风,则 $k$ 值增加,P2G配置容量下降;反之,P2G配置容量上升。这是由于在弃风时段,当管网储气容量增大时,系统消耗了更多电量,风电上网空间有所提升,弃风量减少,因此,管网储气容量与P2G容量比值增加时,系统的P2G配置容量可降低。

## 4 结论

燃气-蒸汽联合循环机组将电热冷气等多种能源系统耦合成多能源系统,P2G技术的应用则进一步加强了电力与天然气2个系统间的耦合。文中主要研究了计及天然气-电力耦合的多能源系统的经济调度及天然气管网储气对消纳弃风效果的影响。主要结论如下:

(1) 提出了P2G设备的启停策略,建立了基于P2G耦合的天然气管道储气和气电耦合系统模型,构建了考虑天然气-电力耦合运行的多能源系统协同优化调度模型。

(2) 天然气储存方便,且管网储气容量极大。研究表明,利用天然气管网的储气能力可进一步消纳弃风,且增大管网储气容量,可降低系统的P2G配置容量。

### 参考文献:

[1] IQBAL F, SIDDIQUI A S. Optimal configuration analysis for a campus microgrid-a case study[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 245-256.

[2] 杨济如,高赐威,苏卫华. 能源互联网及优化运行调度简述[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1): 49-55.

YANG Jiru, GAO Ciwei, SU Weihua. A brief review to the energy internet and its optimal scheduling[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1): 49-55.

[3] 代贤忠,韩新阳,董益华,等. 能源互联网多源多层次协调优化方法研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(2): 1-9.

DAI Xianzhong, HAN Xinyang, DONG Yihua, et al. Multisource and multilevel coordination optimization method of energy internet[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2): 1-9.

- [4] 贾斌,白永军. 150 MW级燃气-蒸汽联合循环机组调峰方式探讨[J]. 内蒙古电力技术, 2010, 28(S2): 59-61.
- JIA Bin, BAI Yongjun. Discussion to peak regulation pattern of 150 MW class gas-steam combined cycle units[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2010, 28(S2): 59-61.
- [5] 杨凯淇,许丹,谢华宝,等. 计及燃气-蒸汽联合循环机组的热电联合调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 137-144.
- YANG Kaiqi, XU Dan, XIE Huabao, et al. Combined heat and power dispatching model based on gas-steam combined cycle unit[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 137-144.
- [6] 徐元孚,翟晓磊,魏炜,等. 计及燃气-蒸汽联合循环机组的热-电联合调度模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(5): 54-59.
- XU Yuanfu, ZHAI Xiaolei, WEI Wei, et al. Combined heat and power dispatching model based on gas-steam combined cycle unit[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2017, 29(5): 54-59.
- [7] 夏新华,高宗和,李恒强,等. 考虑时空互补特性的风光水火多能源基地联合优化调度[J]. 电力工程技术, 2017, 36(5): 59-65.
- XIA Xinhua, GAO Zonghe, LI Hengqiang, et al. Cooperative game-based energy consumption technology considering household distributed generators[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(5): 59-65.
- [8] 国家能源局. 2018年风电并网运行情况[R]. 北京: 国家能源局, 2019.
- National Energy Administration. Wind power grid connected operation in 2018 [R]. Beijing: National Energy Administration, 2019.
- [9] 邓佳乐,胡林献,李佳佳. 采用二级热网电锅炉调峰的消纳弃风机理及经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 41-47.
- DENG Jiale, HU Linxian, LI Jijia. Analysis on mechanism of curtailed wind power accommodation and its economic operation based on electric boiler for peak-load regulation at secondary heat supply network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 41-47.
- [10] 李佳佳,胡林献. 基于二级热网电锅炉调峰的消纳弃风方案研究[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3286-3291.
- LI Jijia, HU Linxian. Research on accommodation scheme of curtailed wind power based on peak-shaving electric boiler in secondary heat supply network[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3286-3291.
- [11] 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): 20-26.
- LUO Chengxian. Application of power-to-gas technology for low carbonation[J]. Sino-Global Energy, 2017, 22(4): 20-26.

- [12] 李谦,尹成竹. 电转气技术及其在能源互联网的应用[J]. 电工技术,2016(10):109-111.  
LI Qian, YIN Chengzhu. Power-to-gas and its application in energy internet[J]. Electric Engineering,2016(10):109-111.
- [13] 窦迅,赵文浩,郎伊紫禾,等. 计及电转气技术的天然气-电力耦合系统运行研究综述[J]. 电网技术,2019,43(1):165-173.  
DOU Xun, ZHAO Wenhao, LANG Yizihe, et al. A review of operation of natural gas-electricity coupling system considering power-to-gas technology[J]. Power System Technology,2019,43(1):165-173.
- [14] 唐春童,李晓露,单福州,等. 考虑 P2G 的多能源系统优化运行研究[J]. 电测与仪表,2018,55(22):48-53.  
TANG Chuntong, LI Xiaolu, SHAN Fuzhou, et al. Research on optimal operation of multi-energy system considering P2G[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(22):48-53.
- [15] BAUMANN C, SCHUSTER R, MOSER A. Economic potential of power-to-gas energy storages[C]//Proceedings of 10th International Conference on the European Energy Market (EEM), Stockholm, 2013.
- [16] GAHLEITNER G. Hydrogen from renewable electricity: an international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(5):2039-2061.
- [17] 李杨,刘伟佳,赵俊华,等. 含电转气的电-气-热系统协同调度与消纳风电效益分析[J]. 电网技术,2016,40(12):3680-3689.  
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):3680-3689.
- [18] 张义斌. 天然气-电力混合系统分析方法研究[D]. 北京:中国电力科学研究院,2005.  
ZHANG Yibin. Study on the methods for analyzing combined gas and electricity networks[D]. Beijing:China Electric Power Research Institute, 2005.
- [19] 杨凯淇. 计及燃气-蒸汽联合循环机组的电-热-冷联合调度方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.  
YANG Kaiqi. Study on power-heat-cool combined scheduling method for gas-steam combined cycle system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.

作者简介:



孟冰冰

孟冰冰(1995),女,硕士在读,研究方向为电力系统优化调度(E-mail:cc19840310@126.com);

郭丰慧(1993),女,硕士,从事电力系统变电相关工作;

胡林献(1966),男,博士,教授,研究方向为高压直流输电系统运行与控制、电力系统稳定性分析与控制、发电厂过程自动化。

## Wind abandonment analysis of multi-energy systems considering gas-electricity coupling

MENG Bingbing<sup>1</sup>, GUO Fenghui<sup>2</sup>, HU Linxian<sup>1</sup>, BAI Xuefeng<sup>1</sup>, LIU Chao<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. State Grid Heilongjiang Power Company Limited Harbin Electric Power Supply Company, Harbin 150010, China)

**Abstract:** Gas-steam combined cycle units couple various energy systems into multi-energy systems, such as electricity, heat and air-conditioning. The application of electricity-to-gas (P2G) technology helps to eliminate wind abandonment and further strengthens the coupling between power system and natural gas system. In this paper, the principle of abandoning wind in P2G and the start-stop control strategy of P2G equipment are discussed, and the gas storage and gas-electricity coupling system model of natural gas pipeline is established, and the multi-energy system cooperative optimal dispatching model considering natural gas-electricity coupling operation is constructed. Finally, through numerical simulation, the wind abandonment effect of multi-energy system considering natural gas-electricity coupling and the relationship between gas storage capacity of natural gas pipeline network and P2G allocation capacity are analyzed. The research shows that the abandoned wind can be further eliminated by making full use of the gas storage capacity of natural gas pipeline network, and the larger the gas storage capacity of pipeline network, the smaller the P2G capacity of system configuration.

**Keywords:** multi-energy system; P2G technology; gas storage in pipeline network; wind abandon; optimal dispatching

(编辑 陈静)