

# 计及电转气的区域综合能源系统日前优化调度

熊军华, 焦亚纯, 王梦迪

(华北水利水电大学电力学院, 河南省郑州市 450000)

## A Day-Ahead Optimal Scheduling of Regional Integrated Energy System Considering Power to Gas

XIONG Junhua, JIAO Yachun, WANG Mengdi

(College of Electric Power, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450000, Henan Province, China)

**摘要:** 为了提高区域综合能源系统的经济性以及可再生能源的消纳能力, 提出含电转气 (power-to-gas, P2G) 的调度优化模型。首先将电转气分为 2 个阶段运行, 在电解水产生氢气环节加入储氢罐作为氢燃料电池的燃料来源, 通过氢燃料电池实现氢能向电能、热能的转化, 之后将剩余氢气输入到甲烷反应器中, 减少将氢气全部直接甲烷化所产生的能量损耗。其次燃气轮机采用变效率运行模式, 通过灵活调节燃气轮机的供电、供热效率, 使热电出力更为经济合理。基于此, 以由系统购电成本、购气成本、弃风成本以及环境成本构成的日运行成本最小为经济目标, 构建含电转气的区域综合能源系统日前优化调度模型。最后利用基于空间距离的混沌粒子群算法求解, 并通过算例仿真表明所提调度模型可有效促进多级能源合理高效利用, 提高可再生能源消纳能力与系统运行经济性。

**关键词:** P2G; 区域综合能源系统; 储氢罐; 氢燃料电池; 热电联供

**Abstract:** To enhance the economy of regional integrated energy system and improve the accommodation ability of renewable energy sources, a scheduling optimization model containing power-to-gas (abbr. P2G) was proposed. Firstly, the P2G was divided into two operating stages: in the link of water electrolysis the produced hydrogen was added into hydrogen storage tank as the fuel source of hydrogen fuel cell, and the energy conversion of hydrogen energy into electric energy and thermal energy was implemented by hydrogen fuel cell, in the next link the residual hydrogen was input into methanator to reduce the energy loss due to directly methanating all hydrogen.

**基金项目:** 国家自然科学基金联合基金资助项目 (U1804149); 河南省高等学校重点科研项目 (19A470002)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(U1804149); Key Scientific Research Project of Henan Colleges and Universities (19A470002)

Secondly, the gas turbine units adopted the variable efficiency operation mode, by means of flexibly regulating the efficiency of power supply and thermal supply of gas turbine units the output of heat and electricity became more economic and reasonable. On this basis, taking the minimum daily operating cost composed of system electricity purchasing cost, gas purchasing cost, wind curtailment cost and environmental cost as economic objective, a day-ahead optimization scheduling model for of regional integrated energy system containing P2G was constructed. Finally, this problem was solved by chaotic particle swarm optimization algorithm based on spatial distance. Simulation results show that the proposed scheduling model can effectively promote the reasonable and high-efficient utilization of multi-class energy sources and improve the accommodation ability of renewable energy sources and the economy of system operation.

**Keywords:** power to gas (P2G); regional integrated energy system; hydrogen storage tank; hydrogen fuel cell; cogeneration

**DOI:** 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0132

## 0 引言

综合能源系统<sup>[1]</sup>、能源互联网<sup>[2]</sup>等概念的提出带来了能源改革的新契机。其中, 综合能源系统是多元互济、能源梯级利用等理念实现应用的关键<sup>[3]</sup>, 具有重要的研究意义。综合能源系统在满足系统内多元负荷的基础上, 通过加强多种能源之间的耦合, 有效地促进可再生能源的消纳<sup>[4]</sup>。

与传统综合能源系统不同, 电转气 (power-to-gas, P2G) 装置的出现与加入为提高可再生能源消纳能力提供了一个新机会。同时, P2G 的能源转换和时空转移特性还为削峰填谷提供了新的

有效途径<sup>[5]</sup>，文献 [6] 中考虑净负荷波动的削峰填谷模型的提出就是根据此特性。除此之外，还有很多关于 P2G 技术的研究。文献 [7] 在需求侧管理中引入最小化电转气场站；文献 [8] 将 P2G 的运行成本加入优化调度模型的目标函数中；文献 [9] 主要考虑含 P2G 的综合能源系统的协同规划问题，并对其可靠性进行评估；文献 [10] 则利用模糊理论挑选含有 P2G 的多目标优化模型的最优折衷解。此外，也有文献 [11] 考虑在不同可再生能源渗透率下，P2G 装置对天然气网络的冲击。

基于此，本文提出含 P2G 的日前优化调度模型，并利用基于空间距离的混沌粒子群算法进行求解，从提高可再生能源消纳能力、优化系统经济运行这两个方面，分析所提调度模型的有效性。

### 1 区域综合能源系统结构

本文构建如图 1 所示的含 P2G 区域综合能源系统。

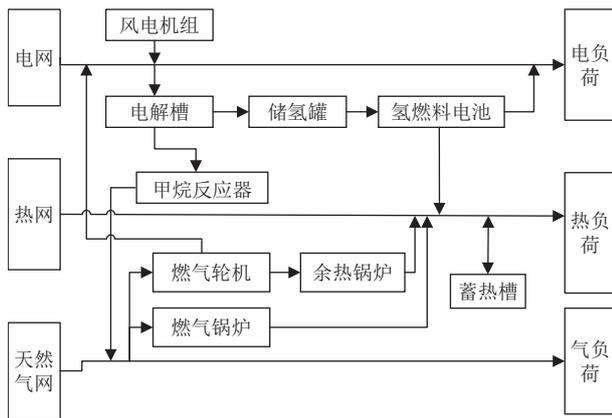


图 1 含 P2G 的区域综合能源系统结构

Fig. 1 Structure of regional integrated energy system containing P2G

为提高能源利用率，将 P2G 分为 2 个阶段进行，其具体工作机理如图 2 所示。电解槽产生的氢气一部分注入储氢罐，另一部分则注入甲烷反应器经化学反应得到甲烷后注入天然气网。

#### 1.1 电解槽模型及约束条件

电解槽是 P2G 系统的核心模块，文中采用常见的质子交换膜电解槽进行电解水。电解槽的转化效率可用其消耗电功率的标幺值的二次函数来近似表示<sup>[12]</sup>。其模型如下所示

$$E_{EC,H_2,t} = \eta_{EC} V_{ECnom} \quad (1)$$

$$\eta_{EC} = a_0 + b_0 \left( \frac{P_{EC.in,t}}{P_{ECnom}} \right) + c_0 \left( \frac{P_{EC.in,t}}{P_{ECnom}} \right)^2 \quad (2)$$

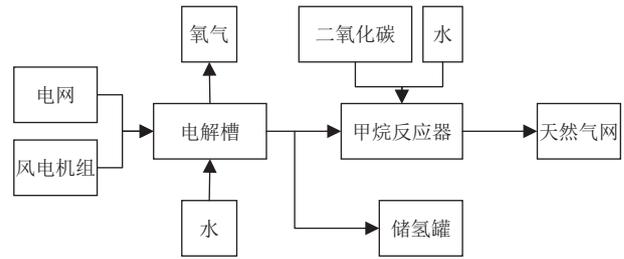


图 2 P2G 工作流程图

Fig. 2 Workflow chart of P2G

$$P_{EC}^{min} \leq P_{EC.in,t} \leq P_{EC}^{max} \quad (3)$$

式中： $E_{EC,H_2,t}$ 为  $t$  时段电解槽产生的氢气的量； $\eta_{EC}$ 为电解槽的工作效率； $V_{ECnom}$ 为电解槽的额定容量； $P_{ECnom}$ 为电解槽的输入额定功率； $P_{EC}^{max}$ 、 $P_{EC}^{min}$ 为电解槽的输入额定上下限； $a_0$ 、 $b_0$ 、 $c_0$ 为效率函数系数。

#### 1.2 甲烷反应器模型

氢气甲烷化反应的效率实际上是与多重因素有关的，为方便计算本文近似取其效率为固定值。模型如下所示

$$P_{M.g,t} = \frac{M_{H_2} \eta_M E_{M,H_2,t} H_L}{\kappa} \quad (4)$$

式中： $E_{M,H_2,t}$ 代表  $t$  时段输入的氢气的量； $\eta_M$ 为甲烷反应器的反应效率； $M_{H_2}$ 为氢气转换为天然气的摩尔质量折算系数； $H_L$ 为天然气的低热值； $\kappa$ 表示天然气管道每  $m^3$  对应的气体质量。

#### 1.3 储氢罐与氢燃料电池模型及约束条件

利用氢能发电不仅对电网削峰填谷有所帮助，还可以大幅降低碳排放，提高能源利用率<sup>[13]</sup>。

储氢罐是实现多余风电能量向负荷高发时段转移的关键设备，也是氢燃料电池的燃料提供者，忽略其压缩过程中的损耗，储氢罐模型如下所示：

$$E_{HT,t+1} = E_{HT,t} + E_{HT.c,t} - E_{HT.d,t} \quad (5)$$

$$E_{HT.min} \leq E_{HT,t} \leq E_{HT.max} \quad (6)$$

式中： $E_{HT,t}$ 为  $t$  时段储氢罐储氢容量； $E_{HT.max}$ 、 $E_{HT.min}$ 分别为储氢罐容量的上下限。

氢燃料电池<sup>[14]</sup>是将高品位氢能与电能、热能联系起来的桥梁，是实现多能耦合的关键。氢燃料电池的模型如下

$$P_{HFC.e,t} = \eta_{HFC.e} P_{HFC.in,t} \quad (7)$$

$$P_{HFC.e}^{min} \leq P_{HFC.e,t} \leq P_{HFC.e}^{max} \quad (8)$$

式中： $\eta_{HFC.e}$ 为氢燃料电池的发电效率； $P_{HFC.in,t}$ 代表  $t$  时段输入到氢燃料电池的功率； $P_{HFC.e}^{max}$ 、 $P_{HFC.e}^{min}$ 为氢燃料电池出力的上下限。

从外部特性考虑,氢燃料电池的发电效率、产热效率可用其输出功率标么值的五次函数来近似表示,其效率公式如下:

$$\eta_{\text{HFC,e}} = \begin{cases} 0.2716 \\ a_{\text{H}} \left( \frac{P_{\text{HFC,e},t}}{P_{\text{HFCnom}}} \right)^5 + b_{\text{H}} \left( \frac{P_{\text{HFC,e},t}}{P_{\text{HFCnom}}} \right)^4 + c_{\text{H}} \left( \frac{P_{\text{HFC,e},t}}{P_{\text{HFCnom}}} \right)^3 + \\ d_{\text{H}} \left( \frac{P_{\text{HFC,e},t}}{P_{\text{HFCnom}}} \right)^2 + e_{\text{H}} \left( \frac{P_{\text{HFC,e},t}}{P_{\text{HFCnom}}} \right) + f_{\text{H}} \end{cases} \quad (9)$$

$$r_{\text{HFC}} = \begin{cases} 0.6801 \\ a_{\text{F}} \left( \frac{P_{\text{HFC,e},t}}{P_{\text{HFCnom}}} \right)^5 + b_{\text{F}} \left( \frac{P_{\text{HFC,e},t}}{P_{\text{HFCnom}}} \right)^4 + c_{\text{F}} \left( \frac{P_{\text{HFC,e},t}}{P_{\text{HFCnom}}} \right)^3 + \\ d_{\text{F}} \left( \frac{P_{\text{HFC,e},t}}{P_{\text{HFCnom}}} \right)^2 + e_{\text{F}} \left( \frac{P_{\text{HFC,e},t}}{P_{\text{HFCnom}}} \right) + f_{\text{F}} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $P_{\text{HFCnom}}$ 为氢燃料电池的额定功率,若氢燃料电池负载率小于0.05时,其效率为固定值;  $r_{\text{HFC}}$ 为氢燃料电池的热电比;  $a_{\text{H}}$ 、 $b_{\text{H}}$ 、 $c_{\text{H}}$ 、 $d_{\text{H}}$ 、 $e_{\text{H}}$ 、 $f_{\text{H}}$ 为氢燃料电池发电效率函数系数;  $a_{\text{F}}$ 、 $b_{\text{F}}$ 、 $c_{\text{F}}$ 、 $d_{\text{F}}$ 、 $e_{\text{F}}$ 、 $f_{\text{F}}$ 为氢燃料电池热电比函数系数<sup>[15]</sup>。

## 2 计及电转气的区域综合能源系统优化调度模型

### 2.1 目标函数

本文采用日前优化调度模型,以日运行成本最小为目标函数,如式(11)所示。其中包括购电成本 $C_e$ 、购气成本 $C_g$ 、弃风成本 $C_{\text{wind}}$ 以及环境成本 $C_f$ ,构建优化模型如下

$$\min C = C_e + C_g + C_{\text{wind}} + C_f \quad (11)$$

购电成本

$$C_e = \sum_{t=1}^T c_{e,t} P_{e,t} \quad (12)$$

式中:  $T$ 代表一个调度周期;  $c_{e,t}$ 为 $t$ 时段的购电电价或售电电价;  $P_{e,t}$ 为 $t$ 时段系统的购电或售电功率,  $P_{e,t}$ 为正则是代表从电网购电,反之则代表向电网售电。

购气成本

$$C_g = \sum_{t=1}^T c_g V_{g,t} \quad (13)$$

式中:  $c_g$ 为天然气单位立方米的的价格;  $V_{g,t}$ 为 $t$ 时段从系统中购买的天然气体积。

弃风成本

$$C_{\text{wind}} = \sum_{t=1}^T c_w (P_{\text{wind},t} - P_{\text{winde},t}) \quad (14)$$

式中:  $c_w$ 为弃风成本系数<sup>[16]</sup>;  $P_{\text{wind},t}$ 为 $t$ 时段风电预测功率;  $P_{\text{winde},t}$ 为 $t$ 时段实际消耗的风电功率。

环境成本

$$C_f = P_e C_{\text{coal}} f_{\text{coal}} c_{\text{dam.co}_2} + P_g C_{\text{coal}} f_{\text{CH}_4} c_{\text{dam.co}_2} \quad (15)$$

式中:  $P_e$ 为一个调度周期内电网供给的电量;  $P_g$ 为一个调度周期内天然气系统供给的功率;  $C_{\text{coal}}$ 为电网供电煤耗量;  $c_{\text{dam.co}_2}$ 为碳排放税;  $f_{\text{coal}}$ 为煤炭碳排放因子<sup>[17]</sup>;  $f_{\text{CH}_4}$ 为天然气碳排放因子<sup>[18]</sup>。

在调度运行成本中,弃风成本是指系统为了维持功率的平衡采用放弃部分风电功率的方法所造成的能源浪费成本,环境成本指的是污染物排放成本,主要考虑 $\text{CO}_2$ 排放的影响。

### 2.2 系统其他元件模型及约束条件

1) 功率平衡约束。

电功率平衡约束:

$$P_{e,t} + P_{\text{winde},t} + P_{\text{GT},t} + P_{\text{HFC},t} = L_{e,t} + P_{\text{EC},t} \quad (16)$$

热功率平衡约束:

$$Q_{\text{GB},t} + Q_{\text{WHB},t} + Q_{\text{HFC},t} = L_{h,t} + Q_{\text{HS},t} - Q_{\text{HS},d,t} \quad (17)$$

天然气功率平衡约束:

$$P_{g,t} + P_{\text{M},t} = L_{g,t} + P_{\text{GB},t} + P_{\text{GT},t} \quad (18)$$

式(15)、(16)、(17)中,  $P_{\text{GT},t}$ 、 $P_{\text{HFC},t}$ 、 $P_{\text{EC},t}$ 分别为 $t$ 时段燃气轮机组的发电功率、氢燃料电池的发电功率和电解槽消耗的电功率;  $Q_{\text{GB},t}$ 、 $Q_{\text{WHB},t}$ 、 $Q_{\text{HFC},t}$ 、 $Q_{\text{HS},t}$ 、 $Q_{\text{HS},d,t}$ 分别为 $t$ 时段燃气锅炉的产热功率、余热锅炉的产热功率、氢燃料电池的产热功率以及蓄热槽的充放热功率;  $P_{\text{GT},t}$ 、 $P_{\text{GB},t}$ 、 $P_{\text{M},t}$ 、 $P_{g,t}$ 分别为 $t$ 时段燃气轮机组的耗气功率、燃气锅炉的耗气功率、甲烷反应器的产气功率和系统购气功率;  $L_{e,t}$ 、 $L_{g,t}$ 、 $L_{h,t}$ 分别为 $t$ 时段的电负荷、气负荷以及热负荷。

2) 外网约束。

电网和天然气网的交互功率约束如下

$$P_e^{\min} \leq P_{e,t} \leq P_e^{\max} \quad (19)$$

$$P_g^{\min} \leq P_{g,t} \leq P_g^{\max} \quad (20)$$

式中:  $P_e^{\max}$ 、 $P_e^{\min}$ 分别代表系统从电网购电的上下限;  $P_g^{\max}$ 、 $P_g^{\min}$ 分别代表系统从天然气网购气的上下限。

3) 风电机组出力约束。

$$0 \leq P_{\text{winde},t} \leq P_{\text{wind},t} \quad (21)$$

4) 燃气轮机模型及其约束。

$$P_{GT.e,t} = \eta_{GT.e} P_{GT.g,t} \quad (22)$$

$$P_{GT.h,t} = \eta_{GT.h} P_{GT.g,t} \quad (23)$$

$$0 \leq P_{GT.e,t} \leq P_{GTnom} \quad (24)$$

式中： $\eta_{GT.e}$ 、 $\eta_{GT.h}$ 分别表示燃气轮机发电效率、产热效率； $P_{GTnom}$ 为燃气轮机的额定功率。

燃气轮机不再采用固定效率运行方式，其供电、供热出力将随着负荷变化而灵活变化，尽可能地提高能源利用率。从燃气轮机外部特性来看，其发电、产热效率可用燃气轮机负荷率的三次函数近似表示，公式如下

$$\eta_{GT.e} = \left( a_1 + b_1 \frac{P_{GT.e,t}}{P_{GTnom}} + c_1 \left( \frac{P_{GT.e,t}}{P_{GTnom}} \right)^2 + d_1 \left( \frac{P_{GT.e,t}}{P_{GTnom}} \right)^3 \right) / 100 \quad (25)$$

$$\eta_{GT.h} = \left( a_2 + b_2 \frac{P_{GT.e,t}}{P_{GTnom}} + c_2 \left( \frac{P_{GT.e,t}}{P_{GTnom}} \right)^2 + d_2 \left( \frac{P_{GT.e,t}}{P_{GTnom}} \right)^3 \right) / 100 \quad (26)$$

式中： $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$ 、 $d_1$ 为发电效率函数系数； $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_2$ 、 $d_2$ 为产热效率函数系数<sup>[19]</sup>。

5) 余热锅炉模型及约束。

$$Q_{WHB,t} = \eta_{WHB} P_{GT.h,t} \quad (27)$$

式中： $\eta_{WHB}$ 为余热锅炉的效率。

6) 燃气锅炉模型及约束。

$$Q_{GB,h,t} = \eta_{GB} P_{GB,g,t} \quad (28)$$

$$0 \leq Q_{GB,h,t} \leq Q_{GBnom} \quad (29)$$

式中： $\eta_{GB}$ 为燃气锅炉产热效率； $Q_{GBnom}$ 为燃气锅炉的额定功率。

7) 蓄热槽模型及约束。

$$E_{HS,t+1} = (1 - \sigma) E_{HS,t} + \eta_{HS.c} Q_{HS.c,t} - \frac{Q_{HS.d,t}}{\eta_{HS.d}} \quad (30)$$

$$E_{HS.min} \leq E_{HS,t} \leq E_{HS.max} \quad (31)$$

$$Q_{HS.c.min} \leq Q_{HS.c,t} \leq Q_{HS.c.max} \quad (32)$$

$$Q_{HS.d.min} \leq Q_{HS.d,t} \leq Q_{HS.d.max} \quad (33)$$

式中： $E_{HS,t}$ 为  $t$  时段蓄热槽储热容量； $\sigma$ 代表热储能自散热损失率； $E_{HS.max}$ 、 $E_{HS.min}$ 分别代表蓄热槽容量的上下限； $Q_{HS.c.max}$ 、 $Q_{HS.c.min}$ 、 $Q_{HS.d.max}$ 、 $Q_{HS.d.min}$ 分别代表储热设备充放热功率的上下限； $\eta_{HS.c}$ 、 $\eta_{HS.d}$ 分别代表储热设备充放热效率。

8) 其他约束。

$$E_{EC.H_2,t} = E_{M.H_2,t} + E_{HT.c,t} \quad (34)$$

$$P_{HFC.in,t} = G_{H_2} E_{HT.d,t} \quad (35)$$

式中： $G_{H_2}$ 为氢气热值。

### 3 求解方法

粒子群优化 ( Particle Swarm Optimization, PSO ) 算法虽然简单方便，但有易出现早熟现象、精度较差等缺点。针对此问题，本文提出采用混沌搜索策略和基于空间距离的惯性权重策略对传统粒子群算法进行改进。

#### 3.1 混沌搜索策略

混沌搜索是以混沌变量的形式进行搜索，利用混沌运动的遍历性提升后期搜索效率，避免出现早熟现象。混沌序列有混沌映射产生，常见的混沌映射函数有：Logistic、Chebyshev、Tent。本文采用 Logistic 映射来产生混沌向量。

$$y_{i+1} = \mu y_i (1 - y_i), \mu \in [3.57, 4] \quad (36)$$

#### 3.2 基于空间距离的惯性权重策略

在传统 PSO 算法中，随着迭代次数的增加，惯性权重一般会因线性递减导致与粒子适应度值不匹配，降低了算法的寻优性能。本文采用基于粒子之间空间距离大小而自动适应调节的惯性权重，对粒子的惯性权重进行在线修改，增强了粒子的寻优能力，提高了算法的准确性。

基于空间距离的粒子惯性权重修改公式如下所示：

$$\omega = \begin{cases} \omega_{min} + (\omega_{max} - \omega_{min}) \ln \left( (e - 1) \frac{D(X, G_{best})}{D_{ave}} \right), & \text{其他} \\ \omega_{max}, & D(X, G_{best}) > D_{ave} \end{cases} \quad (37)$$

$$D(i, j) = \sqrt{\sum_{\sigma=1}^d (x_{i\sigma} - x_{j\sigma})^2 + (f(X_i) - f(X_j))^2} \quad (38)$$

$$D_{ave} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{D(i, j)}{N^2} \quad (39)$$

式中： $f$ 为适应度值； $D(i, j)$ 为种群中粒子  $i$  与粒子  $j$  距离； $D_{ave}$ 为平均距离； $N$ 为粒子总数。

#### 3.3 基于空间距离的混沌粒子群算法求解流程

结合上述 2 种优化策略，并考虑含 P2G 的区域综合能源系统经济优化调度问题，基于空间距离的混沌粒子群算法步骤如下：

1) 输入电、气、热负荷的相关数据以及风电预测输出功率、电网分时电价、天然气价格，相关费用系数以及所需设备的运行参数。

2) 参数初始化, 设定算法种群规模、最大迭代次数、混沌寻优次数、学习因子以及决策变量搜索空间上下限。

3) 根据各设备运行的约束条件, 随机初始化粒子种群。

4) 判断不等式约束条件是否满足, 若决策变量超过取值的最大范围, 则令其等于最大值; 若小于最小值, 则令其等于最小值。

5) 计算目标函数值。

6) 更新个体最优解和全局最优解。比较当前粒子的适应度值 $f_i^k$ 和个体极值 $f_{pi}$ , 若 $f_i^k < f_{pi}$ , 则将 $f_i^k$ 赋给 $f_{pi}$ 、 $x_i^k$ 赋给 $p_i$ , 否则,  $p_i$ 、 $f_{pi}$ 不变; 然后比较当前粒子的个体极值 $f_{pi}$ 和全局极值 $f_g$ , 若 $f_{pi} < f_g$ , 则将 $f_{pi}$ 赋给 $f_g$ 、 $p_i$ 赋给 $g_b$ , 否则 $g_b$ 、 $f_g$ 不变。

7) 按照式(37)(38)更新粒子的惯性权重, 进而更新粒子的速度与位置, 并判断是否满足约束条件。

8) 对全局最优解的每一维进行混沌优化, 将 $g_b$ 映射到 Logistic 方程的定义域, 然后用 Logistic 方程迭代产生混沌序列, 再把产生的混沌序列逆映射到原解空间得一可行解序列。

9) 在原解空间对混沌变量经历的每一个可行解计算其适应值并保留性能最好的可行解, 若优于 $g_b$ , 则更新 $g_b$ 。

10) 判断迭代次数是否小于最大迭代次数, 若是则返回步骤6), 重复步骤6) —9)。若达到最大代数或得到满意解, 则优化过程结束, 输出全局最优解。

## 4 算例分析

### 4.1 原始数据说明

本文利用图1所示系统结构构造算例, 验证上述模型的实用性和有效性。算例中电、热、气负荷以及风力发电的预测值如附录中图A1、A2所示。以 $d$ 为调度周期, 以 $h$ 为单位调度时段。电网售电采用分时电价的模式<sup>[20]</sup>, 具体电价如表1所示。电网购价取售价的70%, 天然气单位价格取2.50元/m<sup>3</sup>。

以运行总成本 $C$ 最小为目标函数, 利用基于空间距离的混沌粒子群算法进行模型求解, 算法设置粒子群规模为100, 最大迭代次数为300, 学习因子 $c_1$ 、 $c_2$ 取2,  $\omega_{max}$ 取0.9,  $\omega_{min}$ 取0.4。

为了分析本文所提出含P2G的调度优化模型系统中所发挥的效用, 考虑到冬季与夏季的风电、

表1 电网售电分时电价

Table 1 TOU price of electricity sold by the grid

时刻	电价/(元/kW·h)
11:00—15:00	0.9
19:00—21:00	0.9
7:00—10:00	0.55
16:00—18:00	0.55
22:00—23:00	0.55
0:00—6:00	0.18

负荷特性各有不同, 设置以下3种调度方案:

方案1) 仅有燃气式热电联产机组, 不含P2G;

方案2) 在方案1的基础上加入P2G两阶段模型;

方案3) 在方案2的基础上将热电联产机组变效率运行改为固定效率。

### 4.2 优化运行结果及分析

1) P2G运行分析。

在含有P2G两阶段模型的调度方案中, 冬季P2G运行情况如图3所示, 夏季情况如图4所示。

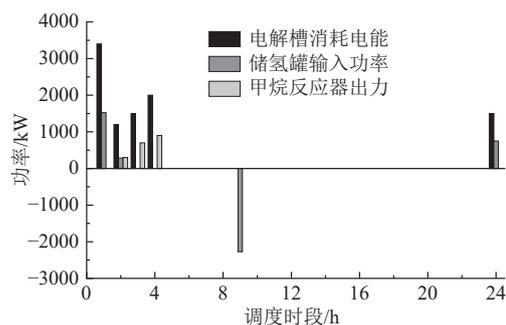


图3 冬季P2G出力

Fig. 3 Output of P2G in winter

由图3可知, 在0:00—4:00和23:00—24:00时段, 风力发电预测值较高但是电负荷处于低谷时刻, 风力发电除了用于供给电负荷还有剩余, 此时P2G工作, 消纳多余的风电, 将电能转化为氢气或者天然气的形式, 在负荷高峰且电价较高时刻辅助供应电热负荷, 提高可再生能源的消纳能力。通过电解槽将制得的氢气优先放入储氢罐中, 在1:00—4:00时段储氢罐的容量已经达到了上限, 此后将电解水得到的氢气全部输入到甲烷反应器中得到天然气输入到天然气网络。其他时段风电没有富裕, P2G不工作。当储氢罐出力为负时, 代表此时储氢罐输出氢气用作氢燃料电池的燃料辅助供电负荷, 相比于将氢气进行甲烷化再利用, 减少了能量损耗。

在图4夏季典型日场景, 电负荷水平要远高

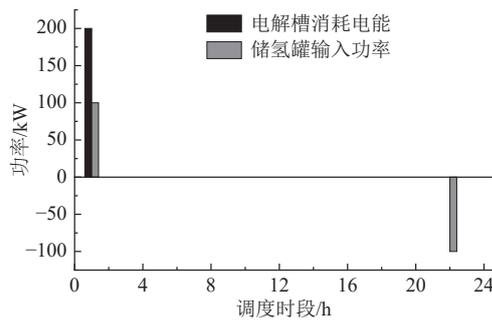


图 4 夏季 P2G 出力

Fig. 4 Output of P2G in summer

于风电预测值，区域综合能源系统电能匮乏，风力发电基本没有富裕，在 0:00—1:00 时段，P2G 有较小出力，该时段所制得的氢气全部注入储氢罐中，在负荷较高时刻用作氢燃料电池燃料发电，降低热电联供机组的购气量。

### 2) 热电耦合运行分析。

从图 5 可以看出，冬季时，热负荷全天需求旺盛，尤其是 0:00—6:00 时段和 22:00—24:00 时段，其余时段处于相对较低水平。在 6:00—9:00 时段和 17:00—24:00，燃气轮机的热出力和电出力一直处于较高水平，主要是由于此时的电负荷与热负荷都比较高且购气成本较购电成本低，因此选择燃气轮机供电、供热比较划算，并有燃气锅炉辅助供应热负荷。在 10:00—16:00 时段，虽然电负荷处于高峰时刻，但是热负荷却处于低谷时刻，因此，此时燃气轮机的出力水平并不高。在 6:00—9:00 时段，氢燃料电池利用 P2G 生成的氢气供电供热。

由图 6 可知，夏季由于风力资源远不如冬季，P2G 出力较低，制得的氢气少，因此氢燃料电池出力也较低，仅在夜间作为热负荷较高时的补充供热，其他时段主要依靠燃气轮机组出力。而且对比热负荷曲线可以看出，燃气轮机供热已经足够，基本不需要燃气锅炉辅助供热。

### 3) 变效率运行分析。

图 7、图 8 分别为冬季与夏季燃气轮机运行时的发电、供热效率曲线。当燃气轮机的发电效率降低时，产热效率就会相应升高，但整体燃气轮机的发电水平较低，产热水平较高。燃气轮机的效率曲线整体波动不大，变化较为平缓，这是由于燃气轮机燃料稳定且充裕，所以由燃气轮机承担大部分的电热出力，而氢燃料电池的出力受环境影响较大，与季节和风电水平息息相关，不够稳定，所以氢燃料电池与蓄热槽只辅助供应电

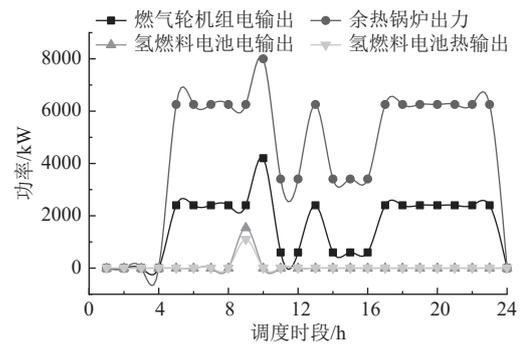


图 5 冬季热电联产单元出力

Fig. 5 Output of cogeneration unit in winter

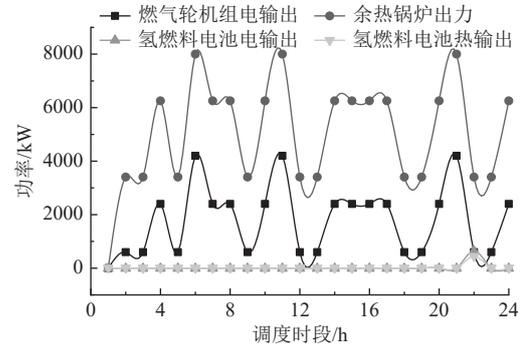


图 6 夏季热电联产单元出力

Fig. 6 Output of cogeneration unit in summer

热负荷。

### 4) 调度结果分析。

在方案 2 的基础上，分别采用传统粒子群算法、混沌粒子群算法以及基于空间距离的混沌粒子群算法进行仿真。由图 9 可知，仿真结果表明，基于空间距离的混沌粒子群算法增大了粒子的搜索能力，在收敛速度和收敛精度上都优于传统粒子群算法与普通混沌粒子群算法，但基于空间距离的混沌粒子群算法迭代的时间也是最长的。

表 2 分别列出了冬季与夏季 3 种方案的日运行成本和风电利用率。

从表 2 来看，不论冬夏，方案 2 与其它 2 种方案相比，运行成本是最少的，其中较方案 3 含 P2G 固定效率运行经济性提高最为显著。方案 2 冬季运行成本较方案 3 降低了 21.5%，较方案 1 降低了 11.5%；方案 2 夏季运行成本较方案 3 降低了 7.8%，较方案 1 降低了 7.2%。这是由于冬季风电资源比较丰富，P2G 两阶段模型可以充分发挥消纳可再生能源的作用，改善热电耦合的作用，除此之外，冬季热需较高，采用固定效率运行方式对运行成本相较夏季有更大的影响。除此之外，在冬季，P2G 的加入显著提高了风能的利用率。

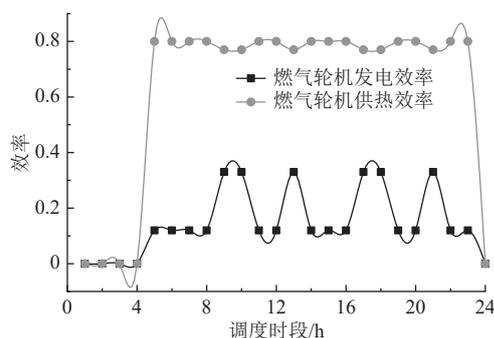


图7 冬季热电耦合效率

Fig. 7 Efficiency of thermoelectric coupling in winter

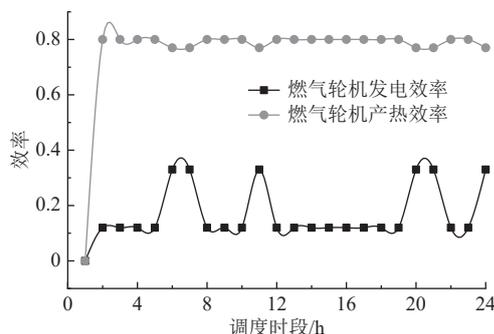


图8 夏季热电耦合效率

Fig. 8 Efficiency of thermoelectric coupling in summer

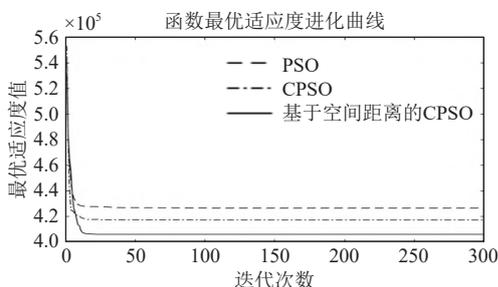


图9 系统运行成本优化迭代过程

Fig. 9 Optimization iterative process of system operation cost

P2G 消耗的是日间多余未利用的风电, 并且 P2G 所产生的氢气是后续氢燃料电池的原料, 虽然能量转化不能达到百分之百, 但由于利用的本就是被弃置的风能, 即便有损耗, 可再生能源的消纳能力依然有所提高。由于夏季的风电资源不如冬季, 因此 P2G 在夏季没有充分发挥作用。

## 5 结论

1) 电转气两阶段模型将电、氢、天然气 3 种能源联系起来, 通过氢燃料电池发掘出氢气的利用潜力, 将氢气变为连接电能与热能的桥梁, 降

表2 3种方案运行成本与风电利用率

Table 2 Operating cost and wind power utilization rate of the three schemes

方案	冬季		夏季	
	运行成本/元	风电利用率/%	运行成本/元	风电利用率/%
方案1	459260	79.7	506590	85.4
方案2	406210	97.8	470300	95.1
方案3	517770	89.6	510620	87.4

低了梯级转化造成的能量损耗, 有效提高了可再生能源的利用效率。

2) 燃气轮机机组和氢燃料电池的变效率运行方式有效提高了综合能源系统的经济性, 但由于夏季热需较低, 还是会出现热能浪费的现象。

3) 由于冬季的风电水平远高于夏季, 因此电转气 2 阶段模型在冬季更能得到充分利用。

(本刊附录请见网络版, 印刷版略)

## 参考文献

- [1] 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): 1-13.  
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): 1-13(in Chinese).
- [2] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, *et al.* The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [3] 李洋, 吴鸣, 周海明, 等. 基于全能流模型的区域多能源系统若干问题探讨[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2230-2237.  
LI Yang, WU Ming, ZHOU Haiming, *et al.* Study on some key problems related to regional multi energy system based on universal flow model[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2230-2237(in Chinese).
- [4] 杨经纬, 张宁, 王毅, 等. 面向可再生能源消纳的多能源系统: 述评与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 11-24.  
YANG Jingwei, ZHANG Ning, WANG Yi, *et al.* Multi-energy system towards renewable energy accommodation: review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 11-24(in Chinese).
- [5] GÖ TZ M, LEFEBVRE J, MÖ RS F, *et al.* Renewable power-togas: a technological and economic review[J]. Renewable Energy, 2016, 85: 1371-1390.
- [6] 卫志农, 张思德, 孙国强, 等. 计及电转气的电-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): 37-45, 320.  
WEI Zhinong, ZHANG Side, SUN Guoqiang, *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): 37-45,320(in Chinese).
- [7] 降国俊, 崔双喜, 樊小朝, 等. 计及综合需求侧响应的电-气综合能源系统协调优化运行[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 43-49.  
JIANG Guojun, CUI Shuangxi, FAN Xiaochao, *et al.* Coordinated and optimal operation of electric-gas integrated energy system considering integrated demand side response[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 43-49(in Chinese).
- [8] 董帅, 王成福, 梁军, 等. 计及电转气运行成本的综合能源系统多目标日前优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 8-15,121.  
DONG Shuai, WANG Chengfu, LIANG Jun, *et al.* Multi-objective optimal day-ahead dispatch of integrated energy system considering power-to-gas operation cost[J]. Automation of Electric Power System, 2018, 42(11): 8-15,121(in Chinese).
- [9] 黄国日, 刘伟佳, 文福拴, 等. 具有电转气装置的电-气混联综合能源系统的协同规划[J]. 电力建设, 2016, 37(9): 1-13.  
HUANG Guori, LIU Weijia, WEN Fushuan, *et al.* Collaborative planning of integrated electricity and natural gas energy systems with power-to-gas stations[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(9): 1-13(in Chinese).
- [10] 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.* Multi-objective optimization for integrated natural-gas and electricity energy system considering power-to-gas[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(8): 99-107(in Chinese).
- [11] 刘继春, 周春燕, 高红均, 等. 考虑氢能-天然气混合储能的电-气综合能源微网日前经济调度优化[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 170-179.  
LIU Jichun, ZHOU Chunyan, GAO Hongjun, *et al.* A day-ahead economic dispatch optimization model of integrated electricity-natural gas system considering hydrogen-gas energy storage system in microgrid[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 170-179(in Chinese).
- [12] PENG D. Enabling utility-scale electrical energy storage through underground hydrogen-natural gas co-storage [D]. Waterloo: University of Waterloo, 2013.
- [13] 李建林, 李光辉, 马速良, 等. 氢能储运技术现状及其在电力系统中的典型应用[J/OL]. 现代电力: 1-12[2021-05-21]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0023>.  
LI Jianlin, LI Guanghui, MA Suliang, *et al.* An overview on hydrogen energy storage and transportation technology and its typical application in power system[J/OL]. Modern Electric Power: 1-12[2021-05-21]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0023>(in Chinese).
- [14] 蒙浩, 吕泽伟, 韩敏芳. 日本家用燃料电池热电联供系统商业化应用分析[J]. 中外能源, 2018, 23(10): 1-8.  
MENG Hao, Lü Zewei, HAN Minfang. Commercial application of household fuel cell CHP system in Japan[J]. Sino-Global Energy, 2018, 23(10): 1-8(in Chinese).
- [15] El-Sharkh M Y, TANRIOVEN M, RAHMAN A, *et al.* A study of cost-optimized operation of a grid-parallel PEM fuel cell power plant[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1104-1114.
- [16] 张学军, 景江帆. 含风电的日前电力市场出清优化模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(8): 77-82.  
ZHANG Xuejun, JING Jiangfan. Optimization model of day-ahead power market clearing including wind power[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(8): 77-82(in Chinese).
- [17] 吴福保, 史如新, 桑丙玉, 等. 考虑能量成本和污染排放的综合能源系统优化配置[J]. 热力发电, 2021, 50(2): 10-17.  
WU Fubao, SHI Ruxin, SANG Bingyu, *et al.* Optimization of integrated energy system considering energy cost and pollution emission[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 10-17(in Chinese).
- [18] 李鑫, 李振荣, 赵亮富. 中国燃料天然气二氧化碳排放因子的初步计算[J]. 现代化工, 2016, 36(6): 11-14.  
LI Xin, LI Zhenrong, ZHAO Liangfu. The preliminary calculation of CO<sub>2</sub> emission factors of different fuel natural gas in China [J]. Modern Chemical Industry, 2016, 36(6): 11-14(in Chinese).
- [19] 荆有印, 白鹤, 张建良. 太阳能冷热电联供系统的多目标优化设计与运行策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 82-87,143.  
JING Youyin, BAI He, ZHANG Jianliang. Multi-objective optimization design and operation strategy analysis of a solar combined cooling heating and power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 82-87,143(in Chinese).
- [20] 吴勇, 吕林, 许立雄, 等. 考虑分时电价时段划分的微电网优化配置[J]. 电测与仪表, 2020, 57(11): 55-62.  
WU Yong, Lü Lin, XU Lixiong, *et al.* Optimal planning of micro-grid considering time division of TOU[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(11): 55-62(in Chinese).

收稿日期: 2021-05-26

作者简介:

熊军华(1973), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力系统自动化、综合能源系统运行优化、智能优化算法, E-mail: xjh2004@ncwu.edu.cn;

焦亚纯(1997), 女, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统运行优化, E-mail: 1024135773@qq.com;

王梦迪(1996), 女, 硕士研究生, 研究方向为光伏并网技术, E-mail: 642280619@qq.com。

现代电力, 2022, 39(5) <http://xddl.ncepu.edu.cn> E-mail:xddl@vip.163.com