

# 基于混合整数非线性规划的综合能源系统 优化配置研究

金泰<sup>1,2</sup>, 李娜<sup>3</sup>, 秦建华<sup>1,2</sup>, 李天奇<sup>1,2</sup>, 李悦<sup>1,2</sup>, 潘崇超<sup>1,2</sup>

(1. 北京科技大学能源与环境工程学院, 北京 100083;

2. 北京科技大学智慧能源研究中心, 北京 100083;

3. 国网综合能源服务集团有限公司, 北京 100053)

**[摘要]** 综合能源系统(integrated energy system, IES)的容量配置是系统运行稳定性及经济效益的重要影响因素之一, 是系统规划阶段的重点研究内容。为探究电转气设备在系统中的最佳工作模式及储能设备、光伏、风机对系统经济性的影响, 本文将上述设备引入综合能源系统, 并以经济效益为优化目标, 构建了计及容量配置约束、五母线平衡约束及储能约束的混合整数非线性规划模型。以北方某市民服务中心为例, 验证了模型的有效性, 并对6种运行方案做了对比分析。结果表明, 电转气等设备的合理配置可以有效提高综合能源系统的经济性, 为其后续运行阶段的研究提供了理论基础及技术支撑。

**[关键词]** 综合能源系统; 混合整数非线性规划; 储能; 优化配置; 电转气

**[中图分类号]** TK01+1 **[文献标识码]** A **[DOI编号]** 10.19666/j.rlfd.202104064

**[引用本文格式]** 金泰, 李娜, 秦建华, 等. 基于混合整数非线性规划的综合能源系统优化配置研究[J]. 热力发电, 2021, 50(8): 131-140. JIN Tai, LI Na, QIN Jianhua, et al. Optimization allocation of integrated energy system based on mixed integer nonlinear programming[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 131-140.

## Optimization allocation of integrated energy system based on mixed integer nonlinear programming

JIN Tai<sup>1,2</sup>, LI Na<sup>3</sup>, QIN Jianhua<sup>1,2</sup>, LI Tianqi<sup>1,2</sup>, LI Yue<sup>1,2</sup>, PAN Chongchao<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Smart Energy Research Center, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

3. State Grid Integrated Energy Service Group Company Limited, Beijing 100053, China)

**Abstract:** The capacity allocation of integrated energy system (IES) is one of the important factors affecting system operation stability and economic benefit, and is the key research content in the system planning stage. To explore the best working mode of power-to-gas equipment in the system and the influences of such factors as energy storage equipment, photovoltaic equipment and fan on the system economy, this paper introduces the above equipment into the IES. Then, a mixed integer nonlinear programming model considering the capacity allocation constraints, five-bus equilibrium constraints and energy storage constraints is constructed with economic benefit as the optimization objective. Moreover, a citizen service center in north China is taken as an example to verify the effectiveness of the model, and the six operation schemes are compared. The results show that, the reasonable allocation of power-to-gas equipment can effectively improve the system economy, which provides a theoretical basis and technical support for the subsequent research on the operation stage of the IES.

**Key words:** integrated energy system, mixed integer nonlinear programming, energy storage, optimization allocation, power to gas

近年来, 能源需求激增, 污染日趋严重, 能源利用率过低等问题已成为我国乃至全世界亟待解

决的问题<sup>[1]</sup>。综合能源系统(integrated energy system, IES)是一种研究冷、热、电、气等多种能

收稿日期: 2021-04-12

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(527899190000F); 中央高校基本科研业务费项目(FRF-MP-20-34)

Supported by: Science and Technology Project of State Grid (527899190000F); Fundamental Research Funds for the Central Universities (FRF-MP-20-34)

第一作者简介: 金泰(1996), 男, 硕士, 主要研究方向为综合能源系统优化建模, g20198163@xs.ustb.edu.cn。

通信作者简介: 潘崇超(1980), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为综合能源系统建模及标准化, panchch@ustb.edu.cn。

源整体协调的一种新型运行规划系统,可以实现可再生能源规模化开发及能源梯级利用,有效提高能源利用率,减少温室气体排放,并加强多能流的耦合程度,实现削峰填谷<sup>[2-3]</sup>。IES 响应我国可持续发展战略,是实现“碳中和”的有效途径,对于破解我国所面临的能源需求激增等问题具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。

为了将 IES 在能源领域的优势最大化,国内外众多研究学者考虑了 IES 的多维度影响因素。文献[6]考虑电热需求响应对 IES 的影响,在负荷管理策略的基础上建立了考虑经济性与综合能效的 IES 多目标优化模型,并使用 VIKOR 方法在粒子群算法的解集中获取最优解;文献[7]提出了一种多目标能源枢纽非线性优化模型,更好地展现 IES 中各设备的运行工况;文献[8]考虑当地的法律限制,提出了一种计及法律约束的 IES 优化模型,实现能源与政策的高度结合;文献[9]考虑到可再生能源及负荷波动,提出一种改进的烟花蛙跳算法求解 IES 优化模型,仿真结果证明该调度模型能够有效平抑负荷波动并提高系统经济性及能源利用率。

电转气(Power to Gas, P2G)技术协调了电与气之间的耦合关系,实现了电网与天然气网的双向传输,通过能量转换的形式实现多能流的协调供应,促进可再生能源消纳<sup>[10]</sup>。文献[11]在 IES 中引入 P2G 精细化模型,构建了日前调度鲁棒优化模型,有效提高系统灵活性及稳定性;文献[12]将 P2G 与碳捕捉技术耦合,实现二氧化碳循环利用,有效提高系统的环境效益;文献[13]考虑了 P2G 对电力

天然气一体化网络的市场影响,构建了计及 P2G 稳态模型的 IES 调度模型,并通过松弛能流的概念对 2 个网络展开协调优化。

综上所述,国内外学者从结构选取、模型构建及求解方案等不同角度对 IES 进行研究并取得了突破性进展。但已有研究成果局限于供能模式及运行层面的调度策略研究,忽略了 IES 规划层面设备容量配置对系统的影响。本文针对 IES 规划阶段展开容量配置优化,考虑了 P2G、储能及可再生能源出力设备对系统的影响,构建了 IES 经济效益模型,采用混合整数非线性规划理论进行求解,实现 IES 科学配置。

## 1 IES 结构及设备出力模型

IES 中各设备可以划分为原动机、转换设备、储能设备及可再生能源出力设备 4 类。本文所研究的 IES 结构中,原动机为燃气轮机(gas turbines, GT)、燃气锅炉(gas boiler, GB);转换设备为电制冷机(electric refrigerator, ER)、吸收式制冷机(absorption chiller, AC)、余热锅炉(waste heat boiler, WHB)、地源热泵(ground source heat pump, GSHP)及 P2G;储能设备为储电设备(electricity storage, ES)、储热设备(heat storage, HS)、储冷设备(cool storage, CS)、储气设备(gas storage, GS);可再生能源出力设备为光伏(photovoltaic, PV)和风机(wind turbine, WT)。综合能源系统结构如图 1 所示。

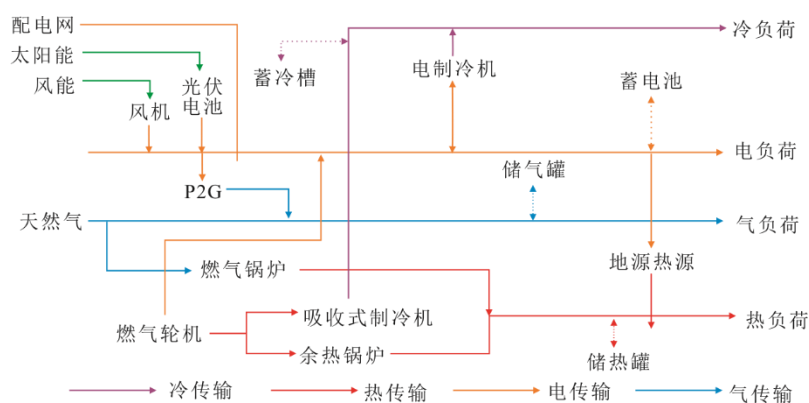


图 1 综合能源系统结构  
Fig.1 Structure of the integrated energy system

本文所提出的优化模型与各分布式单元的运行特性及状态变换有关,故对综合能源系统模型简化处理,主要构建各设备的数学功率模型。

### 1.1 原动机出力模型

#### 1) 燃气轮机模型

$$P_{GT,in}(t) = H_{GHV} V_{GT}(t) \quad (1)$$

$$P_{GT}(t) = H_{GHV} V_{GT}(t) \eta_{GTP} \quad (2)$$

$$Q_{GT}(t) = H_{GHV} V_{GT}(t) \eta_{GTH} \quad (3)$$

式中:  $P_{GT,in}(t)$  为  $t$  时刻 GT 输入功率;  $P_{GT}(t)$ 、 $Q_{GT}(t)$  分别为  $t$  时刻 GT 的输出电功率与热功率;  $H_{GHV}$  为天然气热值, 取值为  $9.75 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ <sup>[14]</sup>;  $V_{GT}(t)$  为  $t$  时刻天然气消耗量;  $\eta_{GTP}$ 、 $\eta_{GTH}$  分别为燃气轮机的电效率和热效率。

## 2) 燃气锅炉模型

$$Q_{GB}(t) = V_{GB}(t) H_{GHV} \eta_{GB} \quad (4)$$

式中:  $Q_{GB}(t)$  为燃气锅炉  $t$  时刻的输出热功率;  $V_{GB}(t)$  为燃气锅炉  $t$  时刻燃料消耗量;  $\eta_{GB}$  为燃气锅炉的热效率。

## 1.2 转换设备出力模型

### 1) 电制冷机模型

$$Q_{ER}(t) = C_{COP,ER} P_{ER,in}(t) \quad (5)$$

### 2) 吸收式制冷机模型

$$Q_{AC}(t) = C_{COP,AC} Q_{AC,in}(t) \quad (6)$$

式中:  $Q_{ER}(t)$ 、 $Q_{AC}(t)$  分别为  $t$  时刻 ER、AC 的输出功率;  $C_{COP,ER}$ 、 $C_{COP,AC}$  分别为 ER、AC 的制冷性能系数;  $P_{ER,in}(t)$ 、 $Q_{AC,in}(t)$  分别为  $t$  时刻 ER、AC 的输入电功率和热功率。

### 3) 地源热泵模型

$$Q_{GSHP}(t) = Q_{in}(t) + P_{GSHP}(t) C_{COP,GSHP} \quad (7)$$

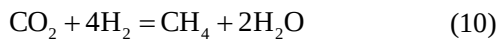
式中:  $Q_{GSHP}(t)$  为  $t$  时刻的 GSHP 输出热功率;  $Q_{in}(t)$  为地热换热器交换功率;  $P_{GSHP}(t)$  为  $t$  时刻 GSHP 输入电功率;  $C_{COP,GSHP}$  为 GSHP 的平均能效比。

在 IES 中 GSHP 的输入热能较小且计量困难, 可以忽略不计。所以 GSHP 的最终模型如下:

$$Q_{GSHP}(t) = P_{GSHP}(t) C_{COP,GSHP}(t) \quad (8)$$

### 4) P2G 模型

P2G 技术根据其内部发生的化学反应, 可分为电解水与甲烷化 2 个反应阶段。反应机理是利用电解水反应产生的氢气经二氧化碳在高温高压的条件下催化产生甲烷。2 个阶段的化学反应方程式如下:



本文仅考虑天然气负荷, 忽略电解水的过程, P2G 数学模型如下:

$$P_{P2G,CH_4}(t) = \eta_{P2G} P_{P2G,e}(t) \quad (11)$$

式中,  $P_{P2G,CH_4}(t)$ 、 $P_{P2G,e}(t)$  分别为  $t$  时刻电转气设备输出天然气功率与输入电功率,  $\eta_{P2G}$  为电转气效率。

## 1.3 储能设备模型

储能设备是 IES 的核心设备, 本文将通过标准矩阵的形式来描述内部能量充放状态 (state of

charge, SOC) 的变化, 具体表达式如下:

$$\begin{bmatrix} E(t+1) \\ H(t+1) \\ C(t+1) \\ G(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E(t)(1-\delta_{ES}) \\ H(t)(1-\delta_{HS}) \\ C(t)(1-\delta_{CS}) \\ G(t)(1-\delta_{GS}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_{eS,C} \frac{-1}{\eta_{eS,D}} \\ \eta_{hS,C} \frac{-1}{\eta_{hS,D}} \\ \eta_{cS,C} \frac{-1}{\eta_{cS,D}} \\ \eta_{gS,C} \frac{-1}{\eta_{gS,D}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{eS,C}(t)\theta_{eS,C}(t)P_{eS,D}(t)\theta_{eS,D}(t) \\ Q_{hS,C}(t)\theta_{hS,C}(t)Q_{hS,D}(t)\theta_{hS,D}(t) \\ Q_{cS,C}(t)\theta_{cS,C}(t)Q_{cS,D}(t)\theta_{cS,D}(t) \\ P_{gS,C}(t)\theta_{gS,C}(t)P_{gS,D}(t)\theta_{gS,D}(t) \end{bmatrix}^T \quad (12)$$

式中:  $E(t+1)$ 、 $E(t)$  分别为蓄电池在  $t+1$  和  $t$  时刻的荷电容量状态;  $\delta_{es}$  为蓄电池的自放电率;  $\eta_{eS,C}$ 、 $\eta_{eS,D}$  分别为蓄电池充放电效率;  $\theta_{eS,C}(t)$ 、 $\theta_{eS,D}(t)$  属于 0—1 变量, 表示  $t$  时刻蓄电池的运行状态;  $P_{eS,C}(t)$ 、 $P_{eS,D}(t)$  分别为  $t$  时刻蓄电池的充放电电量; 其余为冷、热、气储能设备的特性参数, 其含义与蓄电池相同。

为了提高储能设备的循环利用能力, 在一个调度周期内, 储能设备容量的结束状态与初始状态应保持一致<sup>[15]</sup>, 其表达式如下:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}^T \\ \mathbf{H}^T \\ \mathbf{C}^T \\ \mathbf{G}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}^0 \\ \mathbf{H}^0 \\ \mathbf{C}^0 \\ \mathbf{G}^0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

## 1.4 可再生能源出力模型

### 1) 光伏电池

$$P_{PV}(t) = P_{pv rated} \frac{G_s(t)}{G_{STC}} [1 + K(T_s(t) - T_{STC})] \quad (14)$$

$$T_s(t) = T_{amd}(t) + 0.0138(1 + 0.031T_{amd}(t))(1 - 0.042V(t))G_s(t) \quad (15)$$

式中:  $K$  为功率温度系数;  $P_{PV}(t)$  为  $t$  时刻 PV 的实际输出功率;  $P_{pv rated}$  为标准额定条件下 PV 的最大功率;  $G_s(t)$  为  $t$  时刻实际光照强度;  $G_{STC}$  为标准额定条件下光照辐射密度, 取值为  $1 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$ ;  $T_{STC}$  为额定环境温度, 取值为  $298 \text{ K}$ ;  $T_s(t)$  为  $t$  时刻电池板实际温度;  $T_{amd}(t)$  为  $t$  时刻实际环境温度。

### 2) 风机

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0 & V(t) \leq V_{cut,in} \text{ or } V(t) \geq V_{cut,out} \\ a_{WT} V(t)^3 - b_{WT} P_{WT rated} V_{cut,in} \leq V(t) \leq V_{rated} \\ P_r V_{rated} & \leq V(t) \leq V_{cut,out} \end{cases} \quad (16)$$

$$a_{WT} = \frac{P_r}{V_{rated}^3 - V_{cut,in}^3} \quad (17)$$

$$b_{WT} = \frac{V_{cut,in}^3}{V_{rated}^3 - V_{cut,in}^3} \quad (18)$$

式中:  $V_{cut,in}$ 、 $V_{rated}$ 、 $V_{cut,out}$  分别为切入风速、额定风速、切出风速, 取值为 3、12、25 m/s<sup>[16]</sup>;  $V(t)$  为  $t$  时刻的实际风速;  $P_{WT rated}$  为风机的额定功率。

## 2 IES 优化配置模型

### 2.1 目标函数

本文所提出的 IES 规划模型, 以系统的年经济效益作为优化目标, 其表达式如下:

$$F_{ECO} = F_{inv} + F_{LOC} - F_{RV} \quad (19)$$

式中,  $F_{inv}$  为设备投资成本,  $F_{LOC}$  为年运行成本,  $F_{RV}$  为设备残值费用。

#### 1) 设备投资成本

$$F_{inv} = \sum_{n=1}^N U_n P_{n,rated} R_n \quad (20)$$

$$R_n = \frac{r(1+r)^{L_n}}{1+r^{L_n}-1} \quad (21)$$

式中:  $N$  为系统设备数量;  $U_n$  为设备单位投资成本;  $P_{n,rated}$  为设备容量;  $r$  为设备折现率, 本文取值 0.067<sup>[17]</sup>;  $L_n$  为设备寿命。

#### 2) 系统年运行费用

$$F_{LOC} = \sum_{k=1}^K D_k F_{POC,k} \quad (22)$$

$$F_{POC,k} = \sum_{t=1}^T (F_{OM,k}(t) + F_{FC,k}(t) + F_{EX,k}(t) + F_{EG,k}(t) + F_{P2G,k}(t)) \quad (23)$$

式中:  $k$  为第  $k$  个典型日;  $F_{POC,k}$  为第  $k$  个典型日的规划层运行成本;  $D_k$  为第  $k$  个典型日代表的天数;  $F_{OM,k}(t)$  为  $t$  时刻系统的设备维护费用;  $F_{FC,k}(t)$  为  $t$  时刻系统的燃料费;  $F_{EX,k}(t)$  为  $t$  时刻系统的电能交互费用;  $P_{CCHPEG,k}(t)$  为  $t$  时刻系统的环境治理费用;  $F_{P2G,k}(t)$  为  $t$  时刻 P2G 设备购买二氧化碳费用。

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^T F_{OM,k}(t) = & \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T P_{RGI,k}(t) \alpha_{OM,i} + \\ & \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T P_{j,k}(t) \alpha_{OM,j} + \\ & \sum_{e=1}^E \sum_{t=1}^T P_{EXe,k}(t) \alpha_{OM,e} + \\ & \sum_{v=1}^V \sum_{t=1}^T [P_{ES,Cv,k}(t) + P_{ES,Dv,k}(t)] \alpha_{OM,v} \end{aligned} \quad (24)$$

式中:  $P_{RGI,k}(t)$  为可再生能源机组  $t$  时刻的设备出力值;  $P_{j,k}(t)$  为联供机组  $t$  时刻的设备出力;  $P_{EXe,k}(t)$  为转换机组  $t$  时刻的设备出力值;  $P_{ES,Cv,k}(t)$  与  $P_{ES,Dv,k}(t)$  分别为储能机组  $t$  时刻的设备充放功率;  $\alpha_{OM}$  为各个设备单位维护成本;  $T$  为调度时间;  $I$ 、 $J$ 、 $E$ 、 $V$  分别为各机组设备数量。

$$\sum_{t=1}^T F_{FC,k}(t) = \sum_{t=1}^T V_{ngas,k}(t) C_{ngas} \quad (25)$$

式中,  $V_{ngas,k}(t)$  为  $t$  时刻购气量,  $C_{ngas}$  为天然气单位价格。

$$\sum_{t=1}^T F_{EX,k}(t) = C_{gird,b}(t) P_{gird,b,k}(t) - C_{gird,s}(t) P_{gird,s,k}(t) \quad (26)$$

式中:  $P_{gird,b,k}(t)$ 、 $P_{gird,s,k}(t)$  分别为  $t$  时刻购售电量;  $C_{gird,b}(t)$ 、 $C_{gird,s}(t)$  分别为  $t$  时刻购售电价格。

$$\sum_{t=1}^T F_{EG,k}(t) = \sum_{o=1}^O \sum_{t=1}^T \theta_o ((Q_{GB,in,k}(t) + P_{GT,in,k}(t)) \mu_{ngas,o} + P_{gird,b,k}(t) \mu_{gird,o}) \quad (27)$$

式中:  $\mu_{ngas,o}$ 、 $\mu_{gird,o}$  分别为天然气、电的有害气体排放系数;  $\theta_o$  为第  $o$  类温室气体的单位排放价格,  $O$  为温室气体数量。

$$\sum_{t=1}^T F_{P2G,k} = \sum_{t=1}^T \alpha P_{g,k}(\text{CH}_4)(t) C(\text{CO}_2) \quad (28)$$

式中:  $P_{g,k}(\text{CH}_4)$  为 P2G 设备  $t$  时刻产生的天然气功率;  $\alpha$  为生成单位天然气所需  $\text{CO}_2$  的成本系数, 取值为 0.2 kg/kW;  $C(\text{CO}_2)$  为  $\text{CO}_2$  价格, 取 32 美元/t<sup>[18]</sup>。

#### 3) 系统残值费用

$$F_{RV} = F_{SC} \frac{r}{(1+r)^{L_n} - 1} \quad (29)$$

式中,  $F_{SC}$  为系统设备报废的残余材料费用, 取值为投资费用的 0.05<sup>[19]</sup>。

### 2.2 约束条件

#### 2.2.1 设备容量约束

##### 1) 燃气轮机

GT 的容量配置与电负荷有关, 表达式如下:

$$P_{GT,min} \leq P_{GT,rated} \leq E_{load,max} \quad (30)$$

式中,  $P_{GT,rated}$  为燃气轮机容量,  $E_{load,max}$  为电负荷最大值。

##### 2) 燃气锅炉

在系统运行过程中, GB 的容量应根据系统的热负荷及热能补充需求来确定, 表达式如下:

$$Q_{GB,rated} = \max[H_{load}(t) - Q_{WHB}(t) - Q_{GSHP}(t)] \quad (31)$$

式中,  $Q_{GB,rated}$  为 GB 容量,  $H_{load}(t)$  为  $t$  时刻热负荷。

## 3) 余热锅炉

WHB 的热源源于 GT 燃烧所发出的热功率, 所以其容量取值与 GT 的容量有关, 表达式如下:

$$Q_{WHB,min} \leq Q_{WHB,rated} \leq \frac{P_{GT,rated} \eta_{GTH} \eta_{WHB}}{\eta_{GTP}} \quad (32)$$

式中  $Q_{WHB,rated}$  为 WHB 容量。

## 4) 电制冷机

在实际运行过程中, ER 的容量取值范围应不超过系统的最大冷负荷, 表达式如下:

$$Q_{ER,min} \leq Q_{ER,rated} \leq C_{load,max} \quad (33)$$

式中  $Q_{ER,rated}$  为 ER 容量。

## 5) 吸收式制冷机

AC 是作为辅助设备进行补冷, 其配置容量由 ER 容量及冷负荷决定, 表达式如下:

$$Q_{AC,rated} = \max[C_{load}(t) - Q_{ER,rated}] \quad (34)$$

式中,  $Q_{AC,rated}$  为 AC 容量,  $C_{load}(t)$  为  $t$  时刻冷负荷。

## 6) 地源热泵

地源热泵是 IES 的核心制热设备, 其容量与 WHB 的实时出力及热负荷有关, 其表达式如下:

$$Q_{GSHP,rated} = \max[H_{load}(t) - Q_{WHB}(t)] \quad (35)$$

式中  $Q_{GSHP,rated}$  为 GSHP 的容量。

## 7) 电转气

P2G 容量配置主要与气负荷有关, 其表达式如下:

$$P_{P2G,min} \leq P_{P2G,rated} \leq G_{load,max} \quad (36)$$

式中,  $P_{P2G,rated}$  为 P2G 设备容量,  $G_{load,max}$  为气负荷最大值。

## 8) 储能设备

储能设备最大输出功率应不超过最大负荷, 可以通过倒推法构建储能设备的容量配置模型, 其表达式如下:

$$P_{ES,D,max} = C_{apES,rated} \gamma_{ES,D} \quad (37)$$

$$0 \leq P_{ES,D,max} \leq E_{load,max} \quad (38)$$

式中,  $P_{ES,D,max}$  为储能设备最大输出功率,  $C_{apES,rated}$  为储能设备容量,  $\gamma_{ES,D}$  为储能设备最大充电倍率。

## 9) 光伏电池和风机

2 种设备的出力与实时电负荷有关, 实时最大出力占比不得超过同时刻电负荷的 30%<sup>[20]</sup>, 表达式如下:

$$P_{PV,min} \leq P_{PV}(t) \leq 0.3E_{load}(t) \quad (39)$$

$$P_{WT,min} \leq P_{WT}(t) \leq 0.3E_{load}(t) \quad (40)$$

## 2.2.2 设备出力约束

$$\gamma_{IES}(t) \beta_{IES} P_{rated} \leq P_{IES}(t) \leq \gamma_{IES}(t) P_{rated} \quad (41)$$

式中,  $\gamma_{IES}(t)$  为  $t$  时刻各设备开闭状态,  $\beta_{IES}$  为各设备的最小负荷率。

## 2.2.3 母线平衡约束

## 1) 电母线平衡约束

$$P_{GT}(t) + P_{PV}(t) + P_{WT}(t) + P_{gird,b}(t) + P_{eS,D}(t) = E_{load}(t) + P_{gird,s}(t) + P_{eS,C}(t) + P_{P2G,e}(t) + P_{GSHP}(t) + P_{ER,in}(t) \quad (42)$$

## 2) 气母线平衡约束

$$P_{GIntngas}(t) + P_{P2G,CH_4}(t) + P_{GS,D}(t) = G_{load}(t) + P_{GS,C}(t) + P_{GT,in}(t) + P_{GB,in}(t) \quad (43)$$

式中  $P_{GIntngas}(t)$  为气负荷的购气功率。

## 3) 热母线平衡约束

$$Q_{WHB}(t) + Q_{GSHP}(t) + Q_{bGB}(t) + Q_{HS,D}(t) = H_{load}(t) + Q_{HS,C}(t) \quad (44)$$

## 4) 冷母线平衡约束

$$Q_{EC}(t) + Q_{AC}(t) + Q_{CS,D}(t) = C_{load}(t) + Q_{CS,C}(t) \quad (45)$$

## 5) 烟母线平衡约束

$$Q_{GT}(t) = Q_{WHBin}(t) + Q_{AC,in}(t) \quad (46)$$

## 2.2.4 储能约束

## 1) 充放状态约束

$$0 \leq \theta_{ES,C}(t) + \theta_{ES,D}(t) \leq 1 \quad (47)$$

## 2) 充放上下限约束

$$\begin{cases} \theta_{ES,C}(t) P_{ES,Cmin} \leq P_{ES,C}(t) \leq \theta_{ES,C}(t) P_{ES,Cmax} \\ \theta_{ES,D}(t) P_{ES,Dmin} \leq P_{ES,D}(t) \leq \theta_{ES,D}(t) P_{ES,Dmax} \\ P_{ES,Cmax} = C_{apES} \gamma_{ES,C} \\ P_{ES,Dmax} = C_{apES} \gamma_{ES,D} \end{cases} \quad (48)$$

式中,  $\gamma_{ES,C}$ 、 $\gamma_{ES,D}$  分别为最大充放能倍率。

## 3) 储能容量约束

$$S_{min} C_{apES,rated} \leq W_{ES}(t) \leq S_{max} C_{apES,rated} \quad (49)$$

式中,  $S_{min}$ 、 $S_{max}$  分别为储能设备的最小、最大容量状态,  $W_{ES}(t)$  为  $t$  时刻储能设备的容量。

## 2.3 约束嵌套法

规划层的设备出力及储能约束中既包括连续型变量, 又包括 0—1 变量, 属于非线性约束条件。为了降低求解难度, 本文提出了约束嵌套的方法将约束条件进行解耦。以 GT 为例, 具体分为 2 步。

1) 扩大设备出力区间, 设置设备的开闭状态约束。

因为  $P_{GT,rated} \leq E_{load,max}$ , GT 的出力约束可转换为

$$\gamma_{GT} P_{GT,min} \leq P_{GT}(t) \leq \gamma_{GT} E_{load,max} \quad (50)$$

2) 根据设备的开闭状态进一步确定设备出力约束。

$$\begin{cases} P_{GT}(t) = 0, & (\gamma_{GT} = 0) \\ \beta_{GT} P_{GT,rated} \leq P_{GT}(t) \leq P_{GT,rated}, & (\gamma_{GT} = 1) \end{cases} \quad (51)$$



同理,其他设备也可利用此方法实现非线性解耦。

综上所述,本文所提出的 IES 优化模型是一个完整的混合整数非线性规划模型,将使用 MATLAB 软件调用工具箱 YALMIP 进行建模,并采用 CPLEX 进行求解。

### 3 案例分析

#### 3.1 基础数据

以北方某服务中心为例,为了减少模型计算量,本文考虑了需求负荷的季节性特征,将该区域全年分为夏季(5—10月),冬季(11—2月),过渡季(3—4月,10—11月),构成3个( $K=3$ )典型日场景,每种典型日的持续天数 $d$ 分别取153、110、102,其负荷曲线如图2所示。

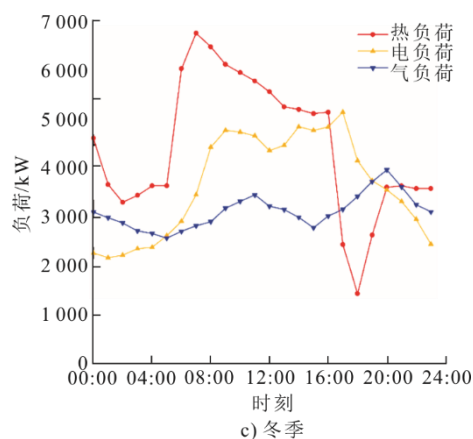
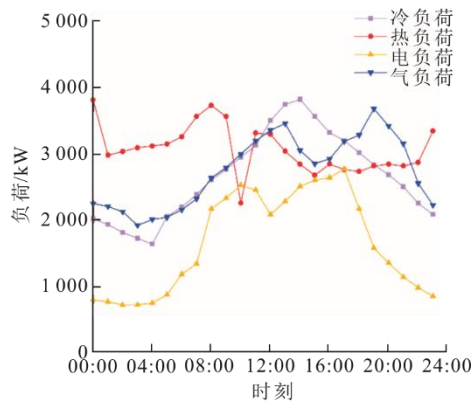
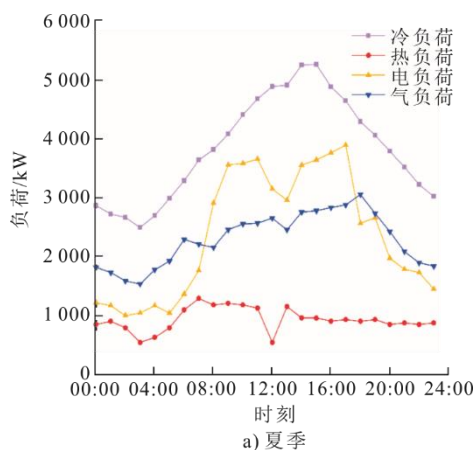


图2 典型日负荷曲线

Fig.2 The typical daily load curves

IES 各设备经济技术参数见表1和表2<sup>[21-23]</sup>,当地电价及天然气价格见表3,环境参数见表4<sup>[24]</sup>。

表1 储能设备经济技术参数

Tab.1 Economic and technical parameters of energy storage equipments

| 设备  | 自损耗率  | 充/放效率 | 最小状态 | 最大状态 | 初始状态 | 最大充放倍率 | 维护成本/(元·kW <sup>-1</sup> ) | 投资成本/(元·kW <sup>-1</sup> ) | 寿命/a |
|-----|-------|-------|------|------|------|--------|----------------------------|----------------------------|------|
| 蓄电池 | 0.001 | 0.95  | 0.2  | 0.8  | 0.3  | 0.2    | 0.0018                     | 800                        | 10   |
| 储热罐 | 0.010 | 0.90  | 0.1  | 0.8  | 0.3  | 0.2    | 0.0016                     | 150                        | 20   |
| 蓄冷槽 | 0.010 | 0.90  | 0.1  | 0.8  | 0.3  | 0.2    | 0.0016                     | 150                        | 20   |
| 储气罐 | 0.010 | 0.90  | 0.1  | 0.8  | 0.3  | 0.2    | 0.0018                     | 60                         | 20   |

表2 其他设备经济技术参数

Tab.2 Economic and technical parameters of other equipments

| 设备     | 电效率  | 热效率  | 气效率 | 最小负荷率 | 维护成本/(元·kW <sup>-1</sup> ) | 投资成本/(元·kW <sup>-1</sup> ) | 寿命/a |
|--------|------|------|-----|-------|----------------------------|----------------------------|------|
| 光伏     |      |      |     |       | 0.01                       | 9 000                      | 30   |
| 风机     |      |      |     |       | 0.06                       | 6 000                      | 20   |
| 燃气轮机   | 0.32 | 0.54 |     | 0.3   | 0.025                      | 6 000                      | 30   |
| 燃气锅炉   |      | 0.85 |     | 0.1   | 0.04                       | 400                        | 15   |
| 余热锅炉   |      | 0.85 |     | 0.1   | 0.13                       | 1 200                      | 15   |
| 吸收式制冷机 |      | 1.20 |     | 0.1   | 0.001 3                    | 1 200                      | 15   |
| 电制冷机   |      | 3.50 |     | 0.1   | 0.097                      | 970                        | 15   |
| 地源热泵   |      | 4.00 |     | 0.1   | 0.026                      | 1 200                      | 15   |
| 电转气    |      |      | 0.6 | 0.1   | 0.006                      | 1 500                      | 15   |

表 3 能源价格参数  
Tab.3 Parameters of energy price

| 能源  | 时刻          | 购价/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> ) | 售价/(元·(kW·h) <sup>-1</sup> ) |
|-----|-------------|------------------------------|------------------------------|
| 天然气 | 00:00—24:00 | 0.25                         |                              |
|     | 24:00—07:00 | 0.348 3                      | 0.243 8                      |
| 电   | 12:00—18:00 | 0.564 4                      | 0.395 1                      |
|     | 08:00—11:00 | 0.886 2                      | 0.620 3                      |
|     | 19:00—23:00 |                              |                              |

表 4 污染物排放系数及环境治理成本  
Tab.4 The pollutant emission coefficients and environmental control costs

| 污染物             | 排放系数/(g·(kW·h) <sup>-1</sup> ) |        | 治理成本/(元·kg <sup>-1</sup> ) |
|-----------------|--------------------------------|--------|----------------------------|
|                 | 天然气                            | 电      |                            |
| CO <sub>2</sub> | 203.74                         | 326.37 | 0.210                      |
| SO <sub>2</sub> | 0.011                          | 1.8    | 14.842                     |
| NO <sub>x</sub> | 0.202                          | 1.6    | 62.964                     |

为探究 P2G、储能及可再生能源出力设备对系统的影响,提出以下 6 种方案展开对比分析。

方案 1: 采用冷、热、电、气分供的运行模式。电、气负荷分别由电网和气网供应,热负荷由 GB 供应,冷负荷由电制冷机供应。

方案 2: 采用冷、热、电、气联供的运行模式,电负荷由电网及燃气轮机供应,热负荷由地源热泵、燃气锅炉及燃气轮机供应,冷负荷由电制冷机及吸收式制冷机供应,气负荷仅由气网供应。

方案 3: 在方案 2 的基础上引入储能及可再生能源出力设备。

方案 4: 在方案 3 的基础上将 P2G 设备引入电与天然气的耦合网络。气负荷由 P2G、储气罐及天然气网供应。

方案 5: 在方案 4 的基础上,忽略天然气网供应,气负荷仅仅由 P2G 及储气罐供应。

方案 6: 将 P2G 直接接入风机和光伏发电设备。风机与光伏发电所产生的电能一部分供应给电力网络,一部分输入至 P2G 设备,生成的天然气导入天然气网络,来满足气负荷。

### 3.2 优化结果

图 3 为 6 种方案的经济性成本优化结果,其中净投资成本指设备投资成本与残值费用的差值。从图 3 可以看出:相较于方案 1 这种传统分供系统,虽然方案 2 的设备需求较多,会导致投资成本略高,但在设备维护、电网交互、燃料、环境治理 4 个层面都展现出了较好的优化成果,年经济效益提高了 11.34%;与方案 2 相比,方案 3 将储能与可再生能源出力设备引入 IES,使系统的投资、维护及燃料费用略有提高,但极大减少了电网交互成本与环境

治理费用,系统总经济性成本得到进一步优化,经济效益提高至 14.50%。从图 3 还可以看出,方案 4 中 P2G 设备的引入使 IES 增加了部分电网交互成本及 CO<sub>2</sub> 购买费用,这是由 P2G 的工作原理及运行特性所导致,同时由于电的污染物排放系数高于天然气,所以电能消耗量的增加导致环境治理成本的增加。但是,P2G 设备有效提高了电气耦合程度,实现了电气之间的双向转换,形成了一个闭环系统,极大减少了燃料费用,使系统经济效益提高至 14.82%。另外,方案 5 如果只是单纯的引入 P2G 而忽略天然气网的作用,系统的经济效益不会得到明显的提高,相反还会略差于方案 2,可见天然气网是综合能源系统中无法取代的一环。方案 6 的优化结果略低于方案 4,说明方案 4 的 P2G 引入模式最佳,经济效益最优,其容量配置最具有科学性。

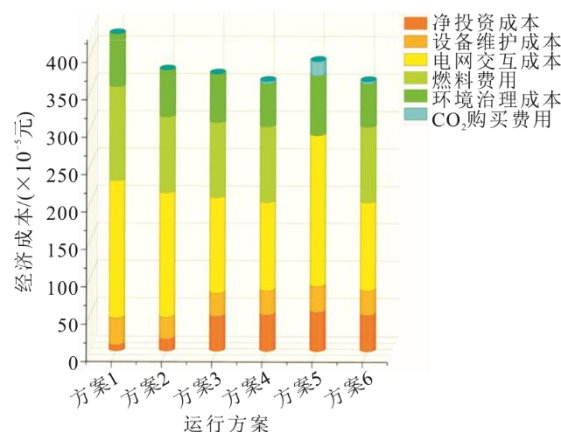


图 3 6 种方案下的经济性成本优化结果  
Fig.3 Optimization results of economic cost under six schemes

表 5 为 6 种方案下 IES 设备的容量配置优化结果。针对当地的冷负荷状况,由于冷负荷需求仅发生在夏季和过渡季,需求量相对较小,所以蓄冷槽的容量配置也相对较小。针对当地的气负荷状况,IES 的最佳容量配置没有选择储气罐,比较方案 3 与方案 4 的配置优化结果可以看出,IES 无论是否引入 P2G 设备,储气罐都没有被选择到。只有当天然气网被忽略时,储气罐才会被选中,且容量配置较大,但这种方案的经济性较差,缺乏实用性。由此可见,无论是从经济性角度还是从供能角度出发,P2G 与气网的优先级都要高于储气罐。

光伏电池与风机的容量仅受到实时电负荷的限制,所以无论是系统中引入新设备,还是改变设备的引入模式,优化结果都没有发生变化。根据当地典型日的环境温度、风速及光照强度,结合光伏

电池与风机的容量优化结果,得到了2种设备的出力曲线如图4所示。由图4可以看出,风机在过渡季及冬季的出力远高于夏季,而光伏电池在夏季的

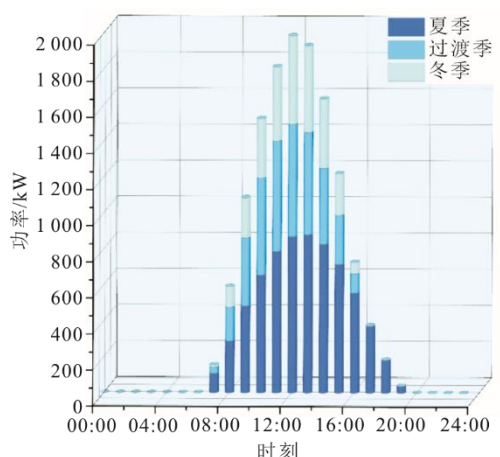
出力远高于过渡季及冬季,2种设备可以很好地实现能量互补。

表5 综合能源系统设备容量配置优化结果

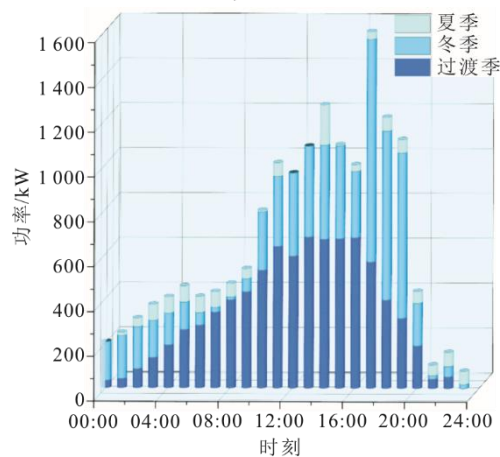
单位: kW

Tab.5 Optimization results of equipment capacity allocation of the integrated energy system

| 设备类型   | 设备容量配置  |         |         |         |          |         |
|--------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|
|        | 方案1     | 方案2     | 方案3     | 方案4     | 方案5      | 方案6     |
| 光伏电池   | 0       | 0       | 1 212.5 | 1 212.5 | 1 212.5  | 1 212.5 |
| 风机     | 0       | 0       | 2 076.2 | 2 076.2 | 2 076.2  | 2 076.2 |
| 燃气轮机   | 0       | 868     | 1 349.2 | 1 397.5 | 1 229.7  | 1 397.6 |
| 燃气锅炉   | 6 780.7 | 2 252.1 | 2 135.2 | 1 531.5 | 871.4    | 1 641.0 |
| 余热锅炉   | 0       | 747     | 1 161.2 | 1 202.7 | 1 058.3  | 1 202.8 |
| 吸收式制冷机 | 0       | 703     | 1 092.9 | 1 132.0 | 996.1    | 1 132.1 |
| 电制冷机   | 5 299.7 | 4 596.7 | 3 813.5 | 3 813.5 | 3 950.2  | 3 813.5 |
| 地源热泵   | 0       | 3 806.5 | 3 923.4 | 3 806.5 | 3 860.4  | 3 806.5 |
| 电转气    | 0       | 0       | 0       | 1 943.2 | 6 579.5  | 1 943.2 |
| 蓄电池    | 0       | 0       | 7 098.3 | 6 335.3 | 6 700.5  | 6 329.8 |
| 储热罐    | 0       | 0       | 5 681.4 | 6 612.2 | 6 037.9  | 6 666.0 |
| 蓄冷槽    | 0       | 0       | 4 331.5 | 2 284.9 | 1 767.0  | 2 267.8 |
| 储气罐    | 0       | 0       | 0       | 0       | 19 996.8 | 0       |



a) 光伏电池



b) 风机

图4 光伏电池、风机典型日出力曲线

Fig.4 Power output curves of photovoltaic cells and wind turbine on typical day

为探究最佳容量配置下的 IES 的环保性,将方案4与传统分供系统、基础性的 IES 进行对比分析。图5为3种方案的污染物排放对比(为方便绘图,将 CO<sub>2</sub> 的数值缩小了 1 000 倍)。

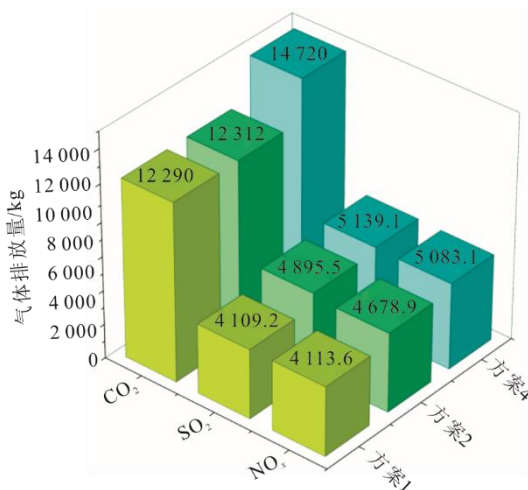


图5 污染物排放示意

Fig.5 Schematic diagram of pollutant emission

由图5可以看出,3种方案的污染物排放量具有相同的特点,CO<sub>2</sub>排放量都远高于SO<sub>2</sub>与NO<sub>x</sub>。相较于传统的分供系统,综合能源系统中配置了冷、热、电联供(combined cold heat and power, CCHP)系统,实现了能源的梯级利用,使3种污染物排放量都取得了一定程度的优化。同时,本文所提出的最佳容量配置下的 IES 中引入了可再生能源



发电、储能及 P2G 设备,进一步减少了污染物排放量,提高了系统的环境效益。

图 6 为方案 4 的购电量与蓄电池出力曲线。从图 6 可以看出,3 个典型日的购电量都有 2 个高峰期和低谷期。

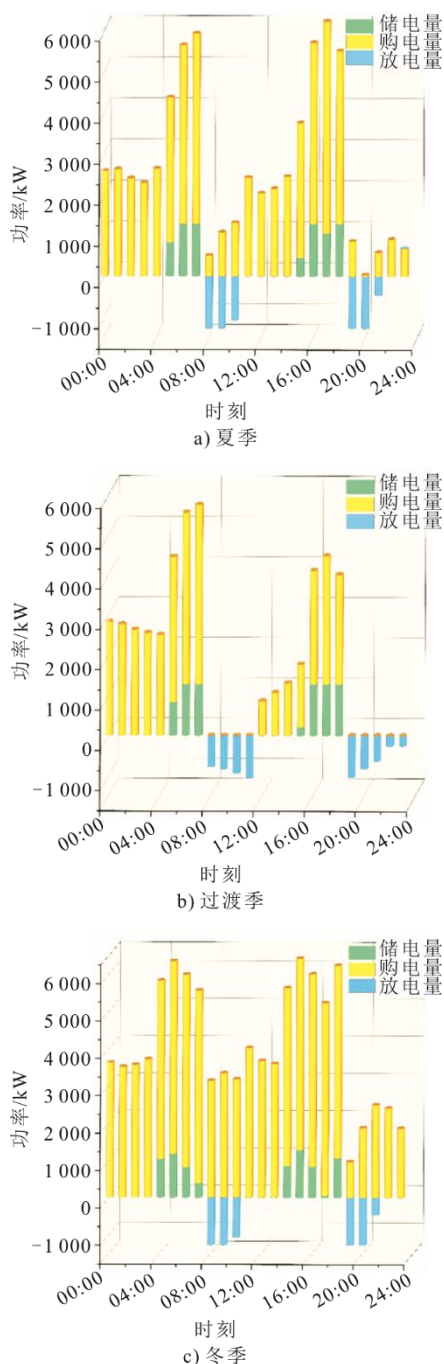


图 6 方案 4 的典型日购电量与蓄电池出力曲线  
Fig.6 The purchasing power and storage battery power curves in a typical day of Scheme 4

IES 的购电高峰期皆发生在谷时电价时刻,此时蓄电池呈现充电状态,系统在满足电负荷的同时将多余电量储入蓄电池中;当时间来到峰时电价,

系统向电网的购电量来到低谷期,此时蓄电池开始向系统放电,从而满足电负荷需求。综上所述,蓄电池在 IES 中弥补了分时电价问题对系统造成的波动性影响,起到了很好的削峰填谷作用,进一步提高了多能流转换的灵活性。

## 4 结 论

1) 与分供系统相比,本文所提出的最佳容量配置下的 IES 加强了电气之间的耦合程度,形成了一个闭环系统,实现多能流灵活调度以及削峰填谷,有效提高了系统的经济性,将经济效益提高了 14.8%。

2) 将 P2G 设备直接引入电与天然气的耦合网络是其在 IES 中的最佳工作模式,同时天然气网络对系统经济性影响较大,两者的优先级皆高于储气罐。

3) 光伏电池与风机的容量配置受到实时负荷的限制,随着运行方案发生变化,优化结果不变。两者设备出力皆具有季节性特征,可以实现能源互补。

4) 本文所提出的 IES 中,3 种污染物排放量都得到了一定程度的优化,有效提高了系统的环境效益,对于实现“碳中和”具有重大意义。

5) 本文构建了设备出力模型,提出了非线性解耦方法,但忽略了系统运行过程中能量管道损失。同时,在本文所提出的最佳容量配置的基础上,需求响应约束及供能模式对系统调度策略的影响将成为后续研究重点。

## 【参 考 文 献】

- [1] 包哲,王旭,吴楠楠,等. 生物质混煤冷热电联产系统能统分析[J]. 热力发电, 2020, 49(3): 31-37.  
BAO Zhe, WANG Xu, WU Nannan, et al. Energy efficiency analysis of cold, heat and power cogeneration system based on biomass blended coal combustion[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(3): 31-37.
- [2] 吴琼,吴彦琪,任洪波,等. 基于双向耦合的综合能源系统电热联合潮流计算[J]. 热力发电, 2021, 50(4): 14-22.  
WU Qiong, WU Yanqi, REN Hongbo, et al. Power flow calculation of combined electric and thermal for integrated energy system based on two-way coupling[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(4): 14-22.
- [3] 王一帆,李娜,潘崇超,等. 基于焓分析的多能互补能源系统模型优化及调度策略研究[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(3): 249-263.  
WANG Yifan, LI Na, PAN Chongchao, et al. Research on model optimization and dispatching strategy of multi-energy complementary energy system based on exergy analysis[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(3): 249-263.
- [4] 严嘉伦,林俊光,楼可炜,等. 基于 AHP-变异系数法的楼宇型综合能源系统评价体系[J]. 热力发电, 2019, 48(12): 25-30.  
YAN Jialun, LIN Junguang, LOU Kewei, et al. Evaluation

- system for building integrated energy system based on AHP-CV method[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(12): 25-30.
- [5] 潘崇超, 金泰, 李娜, 等. 综合能源系统优化模型综述与文献计量分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(11): 4300-4310.  
PAN Chongchao, JIN Tai, LI Na, et al. Overview and bibliometric analysis on optimization models of integrated energy system[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(11): 4300-4310.
- [6] WANG Y L, MA Y Z, SONG F H, et al. Economic and efficient multi-objective operation optimization of integrated energy system considering electro-thermal demand response[J]. Energy, 2020, 205: 118022.
- [7] ZHONG Y J, ZHOU H W, ZONG X J, et al. Hierarchical multi-objective fuzzy collaborative optimization of integrated energy system under off-design performance[J]. Energies, 2019, 12(5): 830.
- [8] LOZANO M A, RAMOS J C, SERRA L M. Cost optimization of the design of CHCP (combined heat, cooling and power) systems under legal constraints[J]. Energy, 2010, 35(2): 794-805.
- [9] 李梦龙, 张鹏, 杨海柱, 等. 基于 IFWA-SFLA 算法的区域综合能源系统两级优化调度[J/OL]. 电力系统及其自动化学报, 2020: 1-9. [2021-04-12]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000669>.  
LI Menglong, ZHANG Peng, YANG Haizhu, et al. Two-level optimal scheduling of regional integrated energy system based on IFWA-SFLA algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2020: 1-9. [2021-04-12]. <https://doi.org/10.19635/j.cnki.csu-epsa.000669>.
- [10] LIU W J, WEN F S, XUE Y S. Power-to-gas technology in energy systems: current status and prospects of potential operation strategies[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2017, 5(3): 439-450.
- [11] 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.  
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 Systems, 2018, 42(11): 8-15.
- [12] 张兴平, 张又中. 计及 P2G 和 CCS 的园区级电-热-气综合能源系统多目标优化[J]. 电力建设, 2020, 41(12): 90-99.  
ZHANG Xingping, ZHANG Youzhong. Multi-objective optimization for park-level electricity-heat-gas integrated energy system considering P2G and CCS[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(12): 90-99.
- [13] CHEN Z X, ZHANG Y J, JI T Y, et al. Coordinated optimal dispatch and market equilibrium of integrated electric power and natural gas networks with P2G embedded[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(4): 495-508.
- [14] 王珺. 区域综合能源系统规划及优化运行[D]. 南京: 东南大学, 2017: 28.  
WANG Jun. Planning and optimization operation of regional integrated energy system[D]. Nanjing: Southeast University, 2017: 28.
- [15] 刘涤尘, 马恒瑞, 王波, 等. 含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 113-120.  
LIU Dichen, MA Hengrui, WANG Bo, et al. Operation optimization of regional integrated energy system with CCHP and energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 113-120.
- [16] OUARDA T, CHARRON C. On the mixture of wind speed distribution in a Nordic region[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 174: 33-44.
- [17] 仇梦林, 胡志坚, 李燕, 等. 基于可行性检测的考虑风电和需求响应的机组组合鲁棒优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3184-3194.  
ZHANG Menglin, HU Zhijian, LI Yan, et al. A robust optimization method for unit commitment considering wind power and demand response based on feasibility testing[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3184-3194.
- [18] 范梦琪, 刘建锋, 朱正航. 含电转气的电-气综合能源系统低碳经济调度策略[J]. 水电能源科学, 2019, 37(10): 204-208.  
FAN Mengqi, LIU Jianfeng, ZHU Zhenghang. Low carbon economic dispatching strategy of electricity-gas integrated energy system with power to gas[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(10): 204-208.
- [19] 郇嘉嘉, 赵瑾, 曾诚玉, 等. 园区综合能源系统规划及优化配置方案[J]. 现代电力, 2020, 37(3): 303-309.  
XUN Jiajia, ZHAO Jin, ZENG Chengyu, et al. Integrated energy system planning in parks and optimal allocation schemes[J]. Modern Electric Power, 2020, 37(3): 303-309.
- [20] 翟晶晶, 吴晓蓓, 傅质馨, 等. 考虑需求响应与光伏不确定性的综合能源系统鲁棒优化[J]. 中国电力, 2020, 53(8): 9-18.  
ZHAI Jingjing, WU Xiaobei, FU Zhixin, et al. Robust optimization of integrated energy system considering demand response and photovoltaic uncertainty[J]. Electric Power, 2020, 53(8): 9-18.
- [21] 孙强, 谢典, 聂青云, 等. 含电-热-冷-气负荷的园区综合能源系统经济优化调度研究. 中国电力, 2020, 53(4): 79-88.  
SUN Qiang, XIE Dian, NIE Qingyun, et al. Research on economic optimization scheduling of park integrated energy system with electricity-heat-cool-gas load[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 79-88.
- [22] 刘泽健, 杨苹, 许志荣. 考虑典型日经济运行的综合能源系统容量配置[J]. 电力建设, 2017, 38(12): 51-59.  
LIU Zejian, YANG Ping, XU Zhirong. Capacity allocation of integrated energy system considering typical daily economic operation[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(12): 51-59.
- [23] 周灿煌. 区域综合能源系统的规划与运行优化研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018: 17.  
ZHOU Canhuang. Research on planning and operation optimization of regional comprehensive energy system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018: 17.
- [24] ZHANG L, ZHANG L Z, SUN B, et al. Integrated optimization design of combined cooling, heating, and power system coupled with solar and biomass energy[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 123: 106236.

(责任编辑 马昕红)