

# 面向碳中和的多源异质全可再生能源系统 优化规划方法研究

王相宇,任洪波,吴琼,李琦芬

(上海电力大学 能源与机械工程学院,上海 201306)

**摘要:**为有效应对气候变化与能源危机,早日实现碳达峰与碳中和目标,提出多源异质全可再生能源热电气储耦合系统,在供能侧实现100%全可再生能源。首先,构建了全可再生能源系统的物理架构,并对系统内典型设备进行建模;然后,以系统年总经济成本最小为目标函数,构建了可实现系统结构、设备配置与运行策略协同优化的混合整数线性规划模型;最后,通过具体算例分析,验证了所提优化模型的正确性和可行性,确立了所提出的多源异质全可再生能源热电气储耦合系统在降低碳排放、实现全额消纳可再生能源等方面的有效性。

**关键词:**碳中和;全可再生能源;热电气储耦合;集成建模;优化模型

中图分类号:TK761 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.07.018

[引用本文格式]王相宇,任洪波,吴琼,等.面向碳中和的多源异质全可再生能源系统优化规划方法研究[J].热能动力工程,2022,37(7):136-145. WANG Xiang-yu, REN Hong-bo, WU Qiong, et al. Research on optimal planning method of multi-source heterogeneous all-renewable energy system facing carbon neutrality[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(7): 136-145.

## Research on Optimal Planning Method of Multi-source Heterogeneous All-renewable Energy System facing Carbon Neutrality

WANG Xiang-yu, REN Hong-bo, WU Qiong, LI Qi-fen

(College of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China, Post Code:201306)

**Abstract:** In order to effectively cope with climate change and energy crisis, and achieve the goal of carbon peak and carbon neutrality early, a multi-source heterogeneous all-renewable energy heat-electricity-gas storage coupling system is proposed which achieves 100% all-renewable energy on the energy supply side. First, the physical structure of the all-renewable energy system is constructed, and the typical equipment in the system is modeled. Then, taking the minimum total annual economic cost of the system as the objective function, a mixed integer linear programming model that can realize the coordinated optimization of system structure, equipment configuration and operation strategy is constructed. Finally, through the analysis of specific examples, the correctness and feasibility of the proposed optimization model is verified, and the effectiveness of the proposed multi-source heterogeneous all-renewable energy heat-electricity-gas storage coupling system in reducing carbon emissions and realizing the full consumption of renewable energy is established.

**Key words:** carbon neutrality, all-renewable energy, heat-electricity-gas storage coupling, integrated modelling, optimization model

收稿日期:2021-07-25; 修订日期:2021-09-20

基金项目:国家重点研发计划(2018YFB1502900);国家自然科学基金(71804106);上海市科委重点研究项目(19DZ1205700)

**Fund-supported Project:** National Key Research and Development Program of China(2018YFB1502900); National Natural Science Foundation of China(71804106); Key Fund of Shanghai Science Technology Committee(19DZ1205700)

作者简介:王相宇(1996-),男,安徽宿州人,上海电力大学硕士研究生。

通讯作者:任洪波(1982-),男,江苏如皋人,上海电力大学教授。

## 引言

为积极应对日益严峻的气候变化与能源危机,加快推进以新能源为主体的新型能源电力系统成为各国实现碳中和、缓解能源危机的有力措施。

有鉴于可再生能源的随机性、波动性,在新型能源电力系统中,传统单一能源结构模式已不再适用,有必要通过多元异质能源间的耦合集成和互补互济确立多能互补型综合能源系统<sup>[1]</sup>。由于各类型能源产能机理不一、品质多元,多能互补综合能源系统往往结构复杂、组合多样,如何在达成节能降碳的同时,实现系统经济优化配置与合理运行调度极具挑战。瑞士苏黎世联邦理工学院提出的能源集线器理念被广泛应用于综合能源系统的优化规划研究,但已有研究大多聚焦于传统化石能源与可再生能源的耦合分析<sup>[2]</sup>。近年来,在碳减排目标的持续推进下,有学者开始探讨基于100%可再生能源的综合能源系统。文献[3]基于粒子群优化算法提出了计及风、光的全可再生能源电力系统的优化规划方法。文献[4]为寻找风光发电的最优收益指标,提出并建立了风光互补直流电网的优化规划模型。为应对风、光波动性,有学者尝试将可控的生物质能纳入分析框架<sup>[5]</sup>。文献[6]构建了包含生物质能、太阳能、风能的全可再生能源系统优化模型,确立了混合系统经济性最优机组规模。文献[7]在考虑风-光-生物质能互补互济的同时,根据用户侧需求对电、热、气之间的耦合转化进行了优化分析。

另一方面,储能作为多能互补综合能源系统中各子系统间的连接纽带,为有效平衡可再生能源的波动性和用户负荷的不确定性提供了解决方案<sup>[8]</sup>。文献[9]在风能、太阳能和生物质能的基础上,考虑了蓄电对系统平稳运行的影响。文献[10-11]分别构建了考虑蓄电-蓄冷、蓄电-蓄热多能互补综合能源系统,深入剖析了蓄电、蓄冷、蓄热设备在综合能源系统中的关键作用。

近年来,随着氢能技术的发展,电制氢(P2G)技术作为消纳可再生能源的重要手段越发受到关

注<sup>[12]</sup>。文献[13]提出一种含P2G在内的电-气-电低碳经济优化规划模型,结果表明P2G的引入可有效提升系统整体经济性与低碳性。文献[14]基于改进的乌鸦搜索算法,对包含光伏、柴油发电机、燃料电池以及储氢系统在内的综合能源系统进行规划优化,分析了电制氢与燃料电池对降低系统运行成本、提高清洁能源消纳的效果。

综上所述,目前国内外学者对于全可再生能源系统已从不同角度进行了初步探索,并将储能技术纳入整体分析框架。然而,现有研究大多聚焦于以电为主体的多元可再生能源的互补耦合分析,对于集电、热和气等多类型终端需求于一体的全可再生能源系统的分析尚不够深入。对此,本文首先构建了包含多种可再生能源和储能设备的热电气储耦合系统物理结构,并对系统内典型设备进行数学建模;然后,以年总经济成本最小为目标函数,构建系统优化规划模型;最后,以某特色小镇为算例,验证所构建优化模型的可行性。

## 1 多源异质全可再生能源系统结构

图1为所构建多源异质全可再生能源热电气储耦合系统物理结构,综合考虑了生物质能、太阳能、风能及地热能等当前最为主流的可再生能源。该能源系统主要由供能系统和储能系统组成。供能系统包括发电设备、供热设备和供冷设备。其中,发电设备又包括生物质热电联产(CHP)机组、风电机组、光伏电池以及燃料电池等;供热设备包括光热设备、地源热泵等;供冷设备主要由电制冷机、吸收式制冷机等组成。储能系统包括蓄电池、蓄热罐、冰蓄冷及储氢罐等。

## 2 全可再生能源系统物理建模

### 2.1 供能设备模型

#### 2.1.1 发电设备模型

图1为全可再生能源系统物理结构,在所构建的能源系统中,生物质发电采用生物质燃料热解气化再燃烧的发电方式。在任一时刻,生物质CHP机组能量输入和终端电能输出的关系<sup>[15]</sup>可表示为:

$$P_t^{BCHP} = m_t^{BM} \cdot L_{BM} \cdot \eta^{BCHP} / 3600 \quad (1)$$

式中： $P_t^{BCHP}$ — $t$ 时刻生物质 CHP 机组的发电量； $m_t^{BM}$ — $t$ 时刻生物质燃料消耗量； $L_{BM}$ —生物质燃料热值； $\eta^{BCHP}$ —生物质发电系统从生物质能到电能的总转化效率。

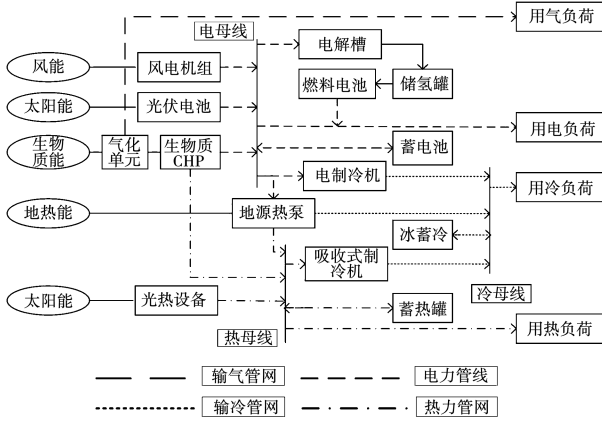


图 1 全可再生资源系统物理结构

Fig. 1 Physical structure of the all-renewable energy system

风力发电与风轮直径和风速等参数有关,其逐时发电可表示为:

$$P_t^{WT} = \begin{cases} 0.5 C_p \rho A^{WT} v_t^3 / 1000, v_c \leq v_t < v_r \\ P_r^{WT}, v_r \leq v_t \leq v_t \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $P_t^{WT}$ — $t$ 时刻风电机组发电量； $C_p$ —风能利用系数； $\rho$ —空气密度； $A^{WT}$ —机组叶片扫过面积在与风速垂直平面上的投影； $v_t$ — $t$ 时刻风速； $P_r^{WT}$ —风电机组额定发电功率； $v_c$ 、 $v_r$ —分别为风电机组切入、切出风速； $v_r$ —风电机组额定风速。

光伏发电出力主要取决于本地太阳辐射,可表示为:

$$P_t^{PV} = Ra_t \cdot A^{PV} \cdot \eta^{PV} \quad (3)$$

式中： $P_t^{PV}$ — $t$ 时刻光伏发电量； $Ra_t$ — $t$ 时刻太阳辐射强度； $A^{PV}$ —光伏板面积； $\eta^{PV}$ —光伏阵列总效率。

通过 P2G 技术可以利用富余电力电解水制氢气储存,必要时释放氢气,利用燃料电池进行发电。考虑当前较为成熟的碱性电解槽和质子交换膜燃料

电池,其数学模型<sup>[16]</sup>分别为:

$$m_{t,H_2}^{ELZ} = P_t^{ELZ} \cdot \eta^{ELZ} / L_{H_2} \quad (4)$$

$$P_t^{FC} = \eta^{FC} \cdot m_{t,H_2}^{FC} \cdot L_{H_2} \quad (5)$$

式中： $m_{t,H_2}^{ELZ}$ — $t$ 时刻电解槽电解水产生氢气的质量； $P_t^{ELZ}$ — $t$ 时刻电解槽消耗的电能； $\eta^{ELZ}$ —电解槽制氢效率； $L_{H_2}$ —氢的低位热值； $P_t^{FC}$ — $t$ 时刻燃料电池发电出力； $\eta^{FC}$ —燃料电池发电效率； $m_{t,H_2}^{FC}$ — $t$ 时刻燃料电池发电消耗氢气量。

### 2.1.2 供热设备模型

太阳能集热器是常见的光热转化设备,其数学模型可表示为:

$$H_t^{PT} = A^{PT} \cdot Ra_t \cdot \eta^{PT} \quad (6)$$

式中： $H_t^{PT}$ — $t$ 时刻太阳能集热器的热出力； $A^{PT}$ —集热器集热板面积； $\eta^{PT}$ —集热器的集热效率。

地源热泵是将低品位地热能转换为高品位冷、热负荷的设备,其数学模型可表示为:

$$H_t^{GSHP} = f^{GSHP} \cdot P_t^{GSHP} \cdot I_H^{GSHP} \quad (7)$$

$$C_t^{GSHP} = (1 - f^{GSHP}) \cdot P_t^{GSHP} \cdot I_C^{GSHP} \quad (8)$$

式中： $H_t^{GSHP}$ 、 $C_t^{GSHP}$ —分别为  $t$  时刻地源热泵的热出力和冷出力； $P_t^{GSHP}$ — $t$  时刻地源热泵输入的电功率； $I_H^{GSHP}$ 、 $I_C^{GSHP}$ —分别为地源热泵的制热能效系数、制冷能效系数； $f^{GSHP}$ —取 0 或 1,表示地源热泵设备不能同时制热和制冷。

燃气锅炉是通过燃烧天然气产生热能的设备,其数学模型可表示为:

$$H_t^{GB} = \eta^{GB} \cdot V_{t,gas}^{GB} \cdot L_{gas} \quad (9)$$

式中： $H_t^{GB}$ — $t$ 时刻燃气锅炉热出力； $\eta^{GB}$ —燃气锅炉效率； $V_{t,gas}^{GB}$ —燃气锅炉燃烧消耗天然气体积； $L_{gas}$ —天然气热值。

### 2.1.3 供冷设备模型

电制冷机的数学模型可表示为:

$$C_t^{ER} = P_t^{ER} \cdot I_c^{ER} \quad (10)$$

式中： $C_t^{ER}$ — $t$ 时刻电制冷机冷出力； $P_t^{ER}$ — $t$ 时刻电制冷机消耗电能； $I_c^{ER}$ —电制冷机制冷性能系数。

吸收式制冷机是利用吸收器-发生器将热能转化为冷负荷的设备,可表示为:

$$C_t^{AC} = H_t^{AC} \cdot I_c^{AC} \quad (11)$$

式中:  $C_t^{\text{AC}}$  —  $t$  时刻吸收式制冷机冷出力;  $H_t^{\text{AC}}$  —  $t$  时刻吸收式制冷机输入热量;  $I_c^{\text{AC}}$  — 吸收式冷机性能系数。

## 2.2 储能设备模型

蓄电设备通过削峰填谷将电负荷的峰谷差降至最低,可缓解高峰负荷供电压力,提高电能利用率和系统运行效率。蓄热设备在热能较多时储存热量,并在系统有热负荷需求时释放供热。对于氢能的储存,目前市场上较为成熟的储氢方式是利用高压将气态氢储存在球形或圆柱形氢罐中,这种储氢方式成本低,且储存和释放方便快捷。蓄电、蓄热及储氢的数学模型类似,所储存能量均会随着时间消散,同时在储放时会有部分损耗。

以蓄电设备为例,任意时刻蓄电设备状态均等同于前一时刻蓄电设备状态值与当前时间段内蓄电设备充放电净功率值之和,其数学模型可表示为:

$$P_{t+\Delta t}^{\text{SBT}} = (1 - \lambda^{\text{SBT}})P_t^{\text{SBT}} + \eta_{\text{in}}^{\text{SBT}} P_{t,\text{in}}^{\text{SBT}} \Delta t - \frac{P_{t,\text{out}}^{\text{SBT}}}{\eta_{\text{out}}^{\text{SBT}}} \Delta t \quad (12)$$

式中:  $P_{t+\Delta t}^{\text{SBT}}$ 、 $P_t^{\text{SBT}}$  分别为  $t + \Delta t$ 、 $t$  时刻蓄电设备的电能储量;  $\lambda^{\text{SBT}}$  — 蓄电设备的自放电能率;  $\eta_{\text{in}}^{\text{SBT}}$ 、 $\eta_{\text{out}}^{\text{SBT}}$  — 蓄电设备的充、放电效率;  $P_{t,\text{in}}^{\text{SBT}}$ 、 $P_{t,\text{out}}^{\text{SBT}}$  —  $t$  时刻蓄电设备的充、放电功率;  $\Delta t$  — 时间长度。

### (2) 冰蓄冷设备

冰蓄冷设备一般只在用户侧有冷负荷需求的季节启动,通过蓄冰介质储存冷量,在用冷高峰时融冰释放冷量。冰蓄冷空调系统由制冷机组、蓄冰槽以及融冰设备等组成,其数学模型<sup>[17]</sup>可表示为:

$$C_t^{\text{IM}} = P_t^{\text{IM}} \cdot I_c^{\text{IM}} \quad (13)$$

$$C_{t+\Delta t}^{\text{ISD}} = (1 - \lambda^{\text{ISD}})C_t^{\text{ISD}} + \eta_{\text{in}}^{\text{ISD}} C_{t,\text{in}}^{\text{ISD}} \Delta t - \frac{C_{t,\text{out}}^{\text{ISD}}}{\eta_{\text{out}}^{\text{ISD}}} \Delta t \quad (14)$$

$$C_t^{\text{MI}} = P_t^{\text{MI}} \cdot I_c^{\text{MI}} \quad (15)$$

式中:  $C_t^{\text{IM}}$  —  $t$  时刻制冷机制冷量;  $P_t^{\text{IM}}$  —  $t$  时刻制冷机耗电量;  $I_c^{\text{IM}}$  — 制冷性能系数;  $C_{t+\Delta t}^{\text{ISD}}$ 、 $C_t^{\text{ISD}}$  —  $t + \Delta t$ 、 $t$  时刻蓄冰槽含冷量;  $\lambda^{\text{ISD}}$  — 蓄冰槽的自放冷能率;  $\eta_{\text{in}}^{\text{ISD}}$ 、 $\eta_{\text{out}}^{\text{ISD}}$  — 蓄冰槽的储、释冷效率;  $C_{t,\text{in}}^{\text{ISD}}$ 、 $C_{t,\text{out}}^{\text{ISD}}$  —  $t$  时刻蓄冰槽的储、释冷量;  $C_t^{\text{MI}}$  —  $t$  时刻融冰所得冷量;  $P_t^{\text{MI}}$  —  $t$  时刻融冰耗电量;  $I_c^{\text{MI}}$  — 融冰

制冷性能系数。

## 3 全可再生能源系统优化规划模型

### 3.1 目标函数

多源异质全可再生能源热电耦合系统优化规划目标是系统年总经济成本  $W_{\text{total}}$  最小,包括设备年均总投资成本  $Z_{\text{total}}$ ,设备年总维护费用  $M_{\text{total}}$ ,系统年运行费用  $U_{\text{total}}$ 。

$$\min W_{\text{total}} = Z_{\text{total}} + M_{\text{total}} + U_{\text{total}} \quad (16)$$

#### 3.1.1 设备年均总投资成本

$Z_{\text{total}}$  为系统中每个设备初始投资成本均摊到全寿命周期每一年所花费用之和,与设备单位容量投资成本和系统中该设备额定容量有关,即:

$$Z_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n \delta (1 + \delta)^{Y^i} Z_{\text{sc}}^i N^i / ((1 + \delta)^{Y^i} - 1) \quad (17)$$

式中:  $Z_{\text{sc}}^i$  — 系统中第  $i$  类设备的单位容量投资成本;  $N^i$  — 第  $i$  类设备的额定容量;  $Y^i$  — 第  $i$  类设备的使用寿命;  $\delta$  — 设备折现率; 其中,  $i$  类设备包括生物质 CHP 机组、风电机组、光伏电池、P2G 电解槽、燃料电池、光热设备、地源热泵、电制冷机、吸收式制冷机、蓄电池、蓄热罐、冰蓄冷和储氢罐等。

#### 3.1.2 设备年总维护费用

$M_{\text{total}}$  为系统内各设备运行一年所需的维护费用之和,与设备单位出力维护费用和各设备年总出力状况有关,所以有:

$$M_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{8760} (M_{\text{so}}^i P_{t,\text{out}}^i) \quad (18)$$

式中:  $M_{\text{so}}^i$  — 系统中第  $i$  类设备单位出力所需维护费用;  $P_{t,\text{out}}^i$  — 第  $i$  类设备  $t$  时刻出力。

#### 3.1.3 系统年运行费用

在全可再生能源系统中,  $U_{\text{total}}$  主要指生物质 CHP 机组运行一年所消耗生物质燃料费用,可以表示为每个时间段生物质燃料消耗量与相对应时间内生物质燃料单价乘积之和:

$$U_{\text{total}} = \sum_{t=1}^{8760} \frac{P_t^{\text{BCHP}} \cdot 3600}{L_{\text{BM}} \cdot \eta^{\text{BCHP}}} \cdot u_t^b \quad (19)$$

式中:  $P_t^{\text{BCHP}}$  — 生物质 CHP 机组在  $t$  时刻发电功率;  $u_t^b$  — 生物质燃料价格。

### 3.2 约束条件

为保证多源异质全可再生能源热电气储耦合系统稳定运行,整体上系统需满足能量平衡约束;局部上,系统各供能设备及储能设备均需满足一定的运行约束。

#### 3.2.1 系统能量平衡约束

根据系统供能设备产出能量以及用户所需负荷形式的差异,将能量平衡分为电能平衡、热能平衡和冷量平衡。

发电设备所发电量一方面满足用户直接和间接电负荷,同时也可用于制氢或存储,可表示为:

$$P_t^{\text{BCHP}} + P_t^{\text{WT}} + P_t^{\text{PV}} + P_t^{\text{FC}} + P_{t,\text{out}}^{\text{SBT}} = P_{t,l}^{\text{U}} + P_t^{\text{ELZ}} + P_t^{\text{GSHP}} + P_t^{\text{ER}} + P_t^{\text{IM}} + P_t^{\text{MI}} + P_{t,\text{in}}^{\text{SBT}} \quad (20)$$

式中:  $P_t^{\text{BCHP}}, P_t^{\text{WT}}, P_t^{\text{PV}}, P_t^{\text{FC}}$ —生物质 CHP 机组、风电机组、光伏、燃料电池在  $t$  时刻的发电量;  $P_{t,l}^{\text{U}}$ —用户电负荷需求;  $P_t^{\text{ELZ}}, P_t^{\text{GSHP}}, P_t^{\text{ER}}, P_t^{\text{IM}}, P_t^{\text{MI}}$ —P2G 电解槽、地源热泵、电制冷机、冰蓄冷空调制冰和融冰耗电功率;  $P_{t,\text{in}}^{\text{SBT}}, P_{t,\text{out}}^{\text{SBT}}$ —蓄电池充电、放电功率。

供热设备每小时产出热量必须等于用户和用热设备消耗的热量,可表示为:

$$H_t^{\text{BCHP}} + H_t^{\text{GSHP}} + H_t^{\text{PT}} + H_{t,\text{out}}^{\text{HSD}} = H_{t,l}^{\text{U}} + H_t^{\text{AC}} + H_{t,\text{in}}^{\text{HSD}} \quad (21)$$

式中:  $H_t^{\text{BCHP}}, H_t^{\text{GSHP}}, H_t^{\text{PT}}$ —生物质 CHP 机组余热、地源热泵、光热设备  $t$  时刻的热出力;  $H_{t,l}^{\text{U}}$ —用户所需热负荷;  $H_{t,\text{in}}^{\text{HSD}}, H_{t,\text{out}}^{\text{HSD}}$ —蓄热设备  $t$  时刻储、释热量;  $H_t^{\text{AC}}$ —吸收式制冷机耗热量。

供冷设备每小时产出冷量必须等于用户和用冷设备消耗冷量,可表示为:

$$C_t^{\text{GSHP}} + C_t^{\text{ER}} + C_t^{\text{AC}} + C_{t,\text{out}}^{\text{ISD}} = C_{t,l}^{\text{U}} + C_{t,\text{in}}^{\text{ISD}} \quad (22)$$

式中:  $C_t^{\text{GSHP}}, C_t^{\text{ER}}, C_t^{\text{AC}}$ —分别为地源热泵、电制冷机、吸收式制冷机在  $t$  时刻的输出冷量;  $C_{t,\text{in}}^{\text{ISD}}, C_{t,\text{out}}^{\text{ISD}}$ — $t$  时刻冰蓄冷空调的储冷、释冷功率;  $C_{t,l}^{\text{U}}$ — $t$  时刻用户所需冷负荷。

#### 3.2.2 供能设备运行约束

供能系统中发电设备、供热设备和供冷设备出力需满足其正常工作范围的上下限:

$$\begin{cases} P_{\min}^l \leq P_t^l \leq P_{\max}^l \\ H_{\min}^j \leq H_t^j \leq H_{\max}^j \\ C_{\min}^k \leq C_t^k \leq C_{\max}^k \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $P_t^l$ —发电设备中第  $l$  类设备  $t$  时刻输出电功率;  $P_{\min}^l, P_{\max}^l$ —第  $l$  类发电设备正常运行所允许的最小、最大发电功率;  $H_t^j$ —供热设备中第  $j$  类设备  $t$  时刻输出热量;  $H_{\min}^j, H_{\max}^j$ —第  $j$  类供热设备正常运行所允许的最小、最大产热量;  $C_t^k$ —供冷设备中第  $k$  类设备  $t$  时刻输出冷量;  $C_{\min}^k, C_{\max}^k$ —第  $k$  类供冷设备正常运行所允许的最小、最大冷出力。

光伏板的面积受到场地实际情况的制约,应满足约束:

$$0 \leq A^{\text{PV}} + A^{\text{PT}} \leq S \quad (24)$$

式中:  $S$ —实际情况所允许光伏板和光热设备最大占地面积。

电解槽运行约束:

$$P_{\min}^{\text{ELZ}} \leq P_t^{\text{ELZ}} \leq P_{\max}^{\text{ELZ}} \quad (25)$$

式中:  $P_{\min}^{\text{ELZ}}, P_{\max}^{\text{ELZ}}$ —电解槽空转功率和额定功率。

#### 3.2.3 储能设备运行约束

电、热、冷等能量的长期储存损失较大,会大幅降低能源系统经济性,而且储能设备导入的出发点也是及时实现对系统负荷的削峰填谷。为此,蓄电、蓄热、蓄冷等储能设备的储放能周期一般设为 1 d, 当天储存的能量当天释放完。另外,氢能相对于电、热、冷的优势在于长期储存能量损失较小,可以实现跨能源形式的季节性大规模储存,因此氢能的储放周期可设定为 1 a。

以蓄电池为例,运行约束可表示为:

$$\begin{cases} \beta \cdot P_{\max}^{\text{SBT}} \leq P_t^{\text{SBT}} \leq P_{\max}^{\text{SBT}} \\ P_{t=24r}^{\text{SBT}} = \beta \cdot P_{\max}^{\text{SBT}} \quad (r \text{ 为自然数}) \\ 0 \leq P_{t,\text{in}}^{\text{SBT}} \leq P_{\max,\text{in}}^{\text{SBT}} \\ 0 \leq P_{t,\text{out}}^{\text{SBT}} \leq \min(P_{t,\text{in}}^{\text{SBT}}, P_{\max,\text{out}}^{\text{SBT}}) \\ P_{t,\text{out}}^{\text{SBT}} \leq M \cdot f_{\text{out}}^{\text{SBT}} \\ P_{t,\text{in}}^{\text{SBT}} \leq M \cdot f_{\text{in}}^{\text{SBT}} \\ f_{\text{out}}^{\text{SBT}} + f_{\text{in}}^{\text{SBT}} \leq 1 \end{cases} \quad (26)$$

式中:  $P_{\max}^{\text{SBT}}$ —蓄电池额定容量;  $\beta$ —大于 0 小于 1, 起到保护蓄电池的作用;  $P_{t=24r}^{\text{SBT}}$ —每个储放电周期开始或者结束时蓄电池含电量;  $P_{\max,\text{in}}^{\text{SBT}}, P_{\max,\text{out}}^{\text{SBT}}$ —蓄电池单位时间所允许的最大充、放电量;  $P_{t,\text{in}}^{\text{SBT}}, P_{t,\text{out}}^{\text{SBT}}$ — $t$  时刻蓄电池的充、放电量;  $f_{\text{in}}^{\text{SBT}}, f_{\text{out}}^{\text{SBT}}$ —蓄电

池充、放电的状态值,取 0 或 1; $M$ —蓄电池不能同时充放电,引入极大值  $M$  对其充、放电状态进行限制。

### 4 算例分析

将图 1 所示的多源异质全可再生能源热电气储能耦合系统结合本文所提出的混合整数线性规划模型应用于某特色小镇。小镇以居民用户为主,总建筑面积约 15 万  $m^2$ ,屋顶可用面积约 10 000  $m^2$ ,用户需求为电、热及冷负荷。

#### 4.1 算例参数

图 2 为每月典型日逐时负荷曲线。图 3 为对应的逐时太阳辐射和风速。系统各设备的技术和经济参数<sup>[18-22]</sup>如表 1、表 2 所示。当地生物质燃料价格<sup>[23]</sup>如表 3 所示。天然气价格设定为 4.01 元/ $m^3$ 。购电方式按照分时电价原则:1:00-6:00,22:00-24:00 电价为 0.3 元/( $kW \cdot h$ );7:00-21:00 电价为 0.6 元/( $kW \cdot h$ )。

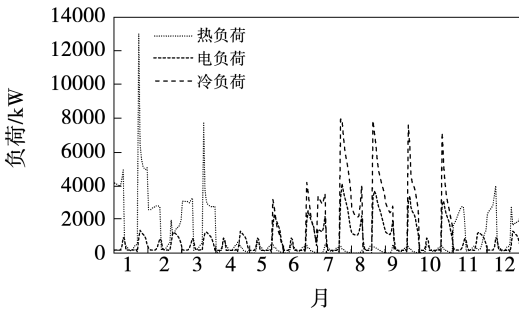


图 2 每月典型日逐时能源负荷

Fig. 2 Typical daily hourly energy load per month

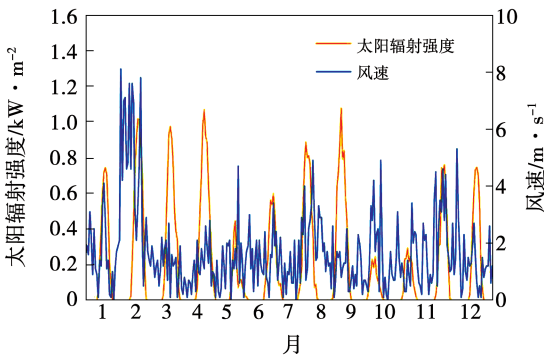


图 3 每月典型日小时太阳辐射强度/风速

Fig. 3 Typical daily hourly solar radiation intensity/wind speed per month

表 1 典型设备参数

Tab. 1 Typical equipment parameters

设备	单位容量 投资成本/ 元· $kW^{-1}$	单位出力 维护成本/ 元· $kW^{-1}$	效率/性能系数			生命周 期/a
			电	热	冷	
生物质 CHP 机组	10055	0.08	0.33	0.51	-	20
风电机组	6000	0.08	0.35	-	-	20
光伏电池	7800	0.01	0.1538	-	-	20
燃料电池	15000	0.20	0.38	-	-	20
光热设备	2250	0.008	-	0.60	-	20
地源热泵	3000	0.0097	-	4.40	5.0	20
电制冷机	828.75	0.008	-	-	4.0	20
吸收式制冷机	1127.75	0.008	-	-	1.2	20
燃气锅炉	971.5440	0.0043	-	0.82	-	20
电解槽	16170	0.0140	-	-	-	20

表 2 储能设备参数

Tab. 2 Energy storage equipment parameters

设备	单位容量 投资成本/ 元·( $kW \cdot h$ ) $^{-1}$	单位出力 维护成本/ 元·( $kW \cdot h$ ) $^{-1}$	储/放 能效率	自放 能率	生命周 期/a
蓄热设备	150	0.0017	0.88/0.88	0.01	20
蓄冰槽	190	0.0020	0.95/0.95	0.01	20
储氢罐	250	0.5	0.95/0.95	0.01	20

表 3 生物质燃料价格

Tab. 3 Price of biomass fuel

月份	单价/元· $kg^{-1}$
1	0.46
2	0.45
3	0.43
4	0.41
5	0.39
6	0.38
7	0.39
8	0.40
9	0.41
10	0.43
11	0.44
12	0.45

### 4.2 优化规划结果分析

#### 4.2.1 设备选型与配置结果

表 4 为求解算例所得到的系统各设备最优容量配置。对比图 1 所构建的能源系统结构,风电机组、电制冷机以及光热设备配置容量为零,即没有选择。经分析可知,风电机组未被选中是因为当地风速过小,经济性较差。此外,在该全可再生能源系统中,由于生物质 CHP 机组的废气和夹套水携带的大量余热可作为系统热源,从而引入吸收式制冷机替代电制冷机。用户全年热负荷需求量、需求时间相对固定,生物质 CHP 机组和地源热泵是稳定的产热设备,而且实际算例中光伏和光热设备的可用面积有一定限制,太阳能发电效益高于产热,因此光热设备也没有被规划进算例系统。

#### 4.2.2 系统经济性和碳减排效果分析

表 5 为优化规划求解得到的多源异质全可再生能源系统和常规能源系统(电均由电网供应,热由

燃气锅炉供应)的经济性和碳减排效果对比分析。

表 4 全可再生能源系统设备最优容量配比

Tab. 4 Optimal capacity allocation of all-renewable energy system equipment

设备	容量
生物质 CHP 机组/kW	2 737
风电机组/kW	0
光伏电池/kW	1 546
燃料电池/kW	236
光热设备/kW	0
地源热泵/kW	2 667
电制冷机/kW	0
吸收式制冷机/kW	4 902
蓄电设备/kW·h	4 900
蓄热设备/kW·h	6 992
蓄冷设备/kW·h	3 451
储氢罐/m <sup>3</sup>	21
P2G 电解槽/kW	442

表 5 经济性和环境性对比

Tab. 5 Comparison of economic and environmental performances

能源系统	设备年均总投	设备年总维护	系统年运行	系统年总	CO <sub>2</sub> 年排
	资成本/万元	费用/万元	费用/万元	成本/万元	
全可再生能源系统	4232	77	203	4512	-
常规能源系统	1151	10	1316	2477	8427
各项差值	3081	67	- 1113	2035	- 8427

由表 5 可知,多源异质全可再生能源热电气储耦合系统年总经济成本比常规能源系统高,这主要是因为在全可再生能源系统中应用了大量先进的供、储能设备,设备当前投资成本均较大,以至于全可再生能源系统中设备年均总投资成本占系统年总经济成本的比例高达 93%;全可再生能源系统年运行费用显著低于常规能源系统年运行费用,主要是因为全可再生能源系统中多种供、储能设备彼此之间能够实现冷、热、电负荷的耦合转化与互补互济,系统能量来源不仅仅依赖于生物质 CHP 机组,这使得购买生物质燃料的成本大大降低,系统年运行费用较低。此外,从表 5 中可以看出,通过导入全可再生能源系统,每年可减少 CO<sub>2</sub>排放 8 427 t,减碳边际成本为每千克 CO<sub>2</sub>2.4 元,表明实现零碳的代价

较高。

#### 4.2.3 系统典型日逐时能量平衡分析

为进一步了解多源异质全可再生能源热电气储耦合系统的实际运行情况,以冬、夏季典型日为例分析其能量平衡。冬季典型日供电设备、供热设备时序出力如图 4 所示,夏季典型日供电设备、供冷设备时序出力如图 5 所示。

由图 4(a)、图 5(a)可知,生物质 CHP 机组和光伏发电具有较强的互补性。白天太阳辐射较强,光伏是全可再生能源系统主要的发电设备;在太阳辐射较弱和夜间时段,光伏出力不足,生物质 CHP 机组成为系统主要的发电设备,二者互补互济共同为系统提供稳定电能。光伏电池出力时间一般在 9:00 至 17:00,且这段时间发电量较大,所以蓄电设备一

般在这一时段储电,并在夜晚系统用电高峰时段释放电能,以降低系统运行成本。在整个冬季典型日和夏季典型日的大部分时间,系统供电量均大于系统用电负荷,多余的电量会被储存在蓄电池中或者用来驱动电解槽电解水制氢。在夏季典型日的 17、18 和 24 时,生物质 CHP 机组发电量和蓄电池释放电量无法满足系统电负荷需求,此时启动燃料电池发电为系统补足多余电负荷需求。储氢和燃料电池的应用消纳了更多清洁能源,降低了系统调度成本,提高了系统经济性。

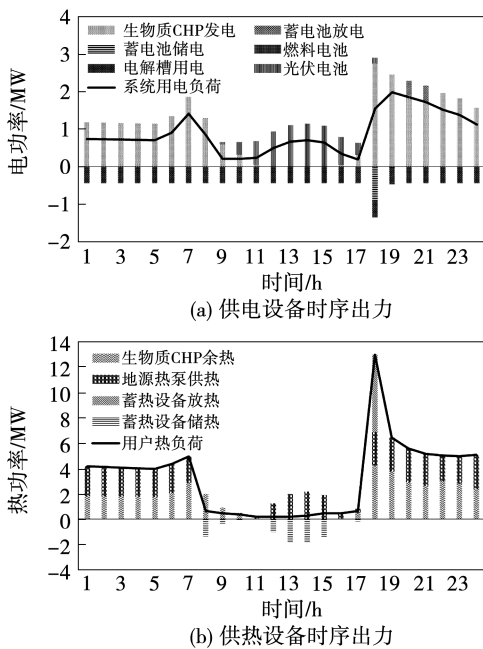


图 4 冬季典型日设备时序出力

Fig. 4 Time sequence output of equipment on typical winter day

由图 4(b)可知,在冬季典型日夜间是用户热负荷需求高峰时段,生物质 CHP 余热无法满足用户热负荷需求时,地源热泵会启动供热。在白天,太阳辐射较强、电热负荷需求较低,生物质 CHP 机组停止运作,具有较高能源转化效率的地源热泵会利用光伏发电多余电力产生热能,并将多余热负荷储存在蓄热设备中,在夜晚用热高峰时段释热以满足用户热负荷需求。多种设备之间协调互济解决了生物质 CHP 机组热电比不匹配的问题,促进了可再生能源的消纳。

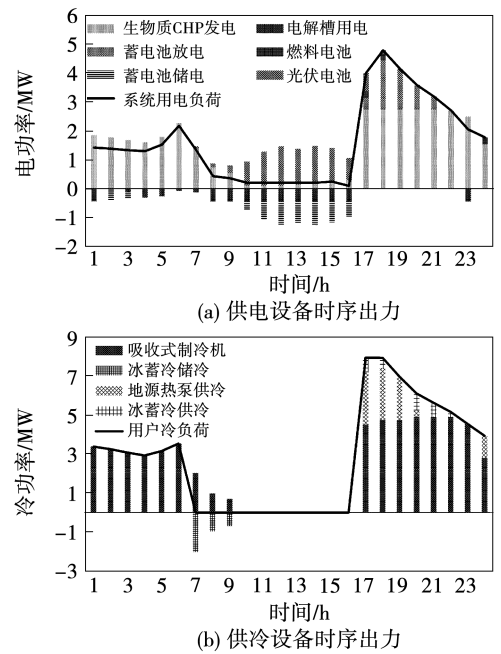


图 5 夏季典型日设备时序出力

Fig. 5 Time sequence output of equipment on typical summer day

由图 5(b)可知,在夏季典型日夜间是用户冷负荷需求高峰时段,吸收式制冷机制冷为用户提供绝大部分冷负荷需求,这主要因为吸收式制冷机可以利用生物质 CHP 余热产生冷量。地源热泵作为辅助设备在夜晚工作并为系统提供部分所需冷量。在 7:00-9:00 时段,冰蓄冷设备将多余冷量储存,并在晚上用冷高峰时段释放以满足用户冷负荷需求,实现了能量的跨时段转移与储存,使得整个系统更加灵活稳定。

#### 4.3 敏感性分析

因此,为进一步分析影响系统经济性的因素,对常规能源系统和全可再生能源系统各设备单位容量投资成本进行敏感性分析。

假定其他参数不变,以全可再生能源系统和常规能源系统年总经济成本为因变量,以系统中各设备单位投资成本为自变量,相对单位容量投资成本在 50%~90% 范围内变动,间隔为 10%。其中,设备基准单位容量投资成本为算例系统中各设备对应参数。设备单位投资成本对系统年总经济成本的影响如图 6 所示。分析可知,随着设备投资成本的降低,两个系统的年总经济成本均不断降低,但是全可



再生能源系统年总经济成本下降幅度远远大于常规能源系统。按照当前系统年总经济成本变化趋势,当设备单位容量投资成本减小到当前值的50%时,全可再生能源系统将具备与常规能源系统的竞争优势。而且,随着碳交易市场的逐步推广,常规能源系统需要考虑大量二氧化碳排放所带来的高额环境成本。因此,从长远看来,全可再生能源系统在降低碳排放、改善能源危机及提升能源系统经济效益方面均优于常规能源系统,将会是未来低碳社会下能源供应的重要方式。

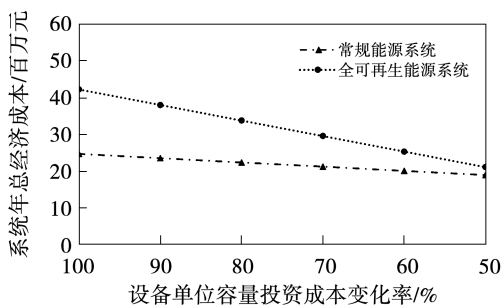


图6 设备单位容量投资成本对系统年总经济成本的影响

Fig. 6 Influence of unit capacity investment cost of equipment on total annual economic cost of system

## 5 结论

基于我国能源转型和“双碳”背景,提出了包含多种可再生能源、多种储能形式在内的多源异质全可再生能源热电气储耦合系统,并构建混合整数线性规划模型对系统进行规划优化。通过算例分析,得出结论:

(1) 生物质 CHP 机组年发电量占系统年总发电量的72%,年供热量占系统年总产热量的76%,生物质 CHP 机组是全可再生能源系统的核心供能设备,生物质能的使用是持续发展稳定可靠高比例可再生能源系统的保障。

(2) 蓄电、蓄热以及冰蓄冷等储能方式的应用,可快速响应能源系统需求并提高可再生能源消纳能力,在一定程度上促进了多种能源形式的耦合互补;季节性储氢系统与燃料电池的应用,能够保证能源系统的长期经济性,并进一步提升能源系统的可再

生能源消纳能力。

(3) 与常规能源系统相比,当前全可再生能源系统经济性尚欠佳,在能源转型的发展进程中可以考虑通过政策补贴,加快推动能源系统向低碳和零碳方向转型。基于敏感性分析得出,随着技术的进步,当设备投资成本降低50%以上时,全可再生能源系统的经济性有望凸显。

多源异质全可再生能源热电气储耦合系统是降低碳排放、实现碳中和的必由之路。在后续研究中可以考虑从多区域能源系统协同互联的角度对全可再生能源系统展开深入研究。

## 参考文献:

- [1] 艾芊,郝然.多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战[J].电力系统自动化,2018,42(4):2-10.  
Ai Qian,HAO Ran. Key technologies and challenges of multi energy adscititious, integrated and optimized energy system[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(4):2-10.
- [2] 张子阳,张聂鹏,王满商,等.面向可再生能源高比例消纳的综合能源系统优化规划模型研究[J].可再生能源,2020,38(8):1085-1091.  
ZHANG Zi-yang,ZHANG Nie-peng,WANG Man-shang, et al. Research on the optimization planning model of comprehensive energy system for high proportion consumption of renewable energy[J]. Renewable Energy Resources,2020,38(8):1085-1091.
- [3] ASKARZADEH A,COELHO L D S. A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system;a case study of Iran[J]. Solar Energy,2015,112:383-396.
- [4] 王康,戴明明,李强,等.基于风光互补的直流电网规划模型研究[J].四川电力技术,2020,43(4):66-69.  
WANG Kang,DAI Ming-ming,LI Qiang, et al. Research on DC power grid planning model based on wind solar complementary [J]. Sichuan Electric Power Technology,2020,43(4):66-69.
- [5] MATHIESEN B V,LUND H,KARLSSON K. 100% Renewable energy systems,climate mitigation and economic growth[J]. Applied Energy,2011,88(2):488-501.
- [6] ALSHAMMARI N,ASUMADU J. Optimum unit sizing of hybrid renewable energy system utilizing harmony search,Jaya and particle swarm optimization algorithms[J]. Sustainable Cities and Society, 2020,60:102255.
- [7] 冯智慧,吕林,许立雄.基于能量枢纽的沼-风-光全可再生能源系统日前-实时两阶段优化调度模型[J].电网技术,2019,43(9):3101-3109.  
FENG Zhi-hui,LYU Lin,XU Li-xiong. Two stage day ahead real time optimal dispatch model for biogas wind light all renewable energy system based on energy hub[J]. Power System Technology,

- 2019,43(9):3101-3109.
- [8] ZHANG Yi-song, HUA Q S, SUN Li, et al. Life cycle optimization of renewable energy systems configuration with hybrid battery/hydrogen storage: a comparative study[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 30:101470.
- [9] 李兵, 牛洪海, 余帆. 全可再生能源热电气储耦合供能系统优化调控模型研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(7): 103-108.
- LI Bing, NIU Hong-hai, YU Fan. Study on optimal regulation model of the coupled energy supply system of all renewable energy thermal and gas storage[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(7):103-108.
- [10] 孙可, 何德, 李春筱, 等. 考虑冰蓄冷空调多模式的工厂综合能源系统多能协同优化模型[J]. 电力建设, 2017, 38(12):12-19.
- SUN Ke, HE De, LI Chun-xiao, et al. Multi energy collaborative optimization model for integrated energy system of factory considering multi-mode ice storage air conditioning[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(12), 12-19.
- [11] 刁涵彬, 李培强, 王继飞, 等. 考虑电/热储能互补协调的综合能源系统优化调度[J]. 电工技术学报, 2020, 35(21): 4532-4543.
- DIAO Han-bin, LI Pei-qiang, WANG Ji-fei, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering the complementary coordination of electric and thermal energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21): 4532-4543.
- [12] 姜海洋, 杜尔顺, 朱桂萍, 等. 面向高比例可再生能源电力系统的季节性储能综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19):194-208.
- JIANG Hai-yang, DU Er-shun, ZHU Gui-ping, et al. Summary and prospect of seasonal energy storage for high proportion renewable energy power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19):194-208.
- [13] 孙建梅, 耿立杨. 含电转气技术的电气耦合系统优化运行[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(12):4754-4759.
- SUN Jian-mei, GENG Li-yang. Optimal operation of electric coupling system with electric to gas technology[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(12):4754-4759.
- [14] GHAFFARI A, ASKARZADEH A. Design optimization of a hybrid system subject to reliability level and renewable energy penetration[J]. Energy, 2020, 193:116754.
- [15] CHAUHAN A, SAINI R P. Discrete harmony search based size optimization of integrated renewable energy system for remote rural areas of Uttarakhand state in India[J]. Renewable Energy, 2016, 94:587-604.
- [16] 刘维康, 王丹, 余晓丹, 等. 考虑电气转换储能和可再生能源集成的微能源网多目标规划[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16):11-20, 72, 197-200.
- LIU Wei-kang, WANG Dan, YU Xiao-dan, et al. Multi objective planning of micro energy grid considering the integration of electric conversion energy storage and renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16):11-20, 72, 197-200.
- [17] 施泉生, 晏伟, 任洪波, 等. 含冰蓄冷装置的冷电联供型微网经济优化运行[J]. 电源学报, 2019, 17(6):145-152.
- SHI Quan-sheng, YAN Wei, REN Hong-bo, et al. Economic optimal operation of cogeneration microgrid with ice storage device[J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(6):145-152.
- [18] 周灿煌, 郑杰辉, 荆朝霞, 等. 面向园区微网的综合能源系统多目标优化设计[J]. 电网技术, 2018, 42(6):1687-1697.
- ZHOU Can-huang, ZHENG Jie-hui, JING Zhao-xia, et al. Multi objective optimization design of integrated energy system for park microgrid[J]. Power System Technology, 2018, 42(6):1687-1697.
- [19] 胡泉, 尚策, 陈东文, 等. 考虑能量品质的区域综合能源系统多目标规划方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 22-38, 139.
- HU Xiao, SHANG Ce, CHEN Dong-wen, et al. Multi objective planning method for regional integrated energy system considering energy quality[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19):22-38, 139.
- [20] 赵冬梅, 夏轩, 陶然. 含电转气的热电联产微网电/热综合储能优化配置[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 46-61.
- ZHAO Dong-mei, XIA Xuan, TAO Ran. Optimal configuration of electric thermal comprehensive energy storage of cogeneration micro grid with electricity to gas[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17):46-61.
- [21] LI J R, LIN J, ZHANG H C, et al. Optimal Investment of electrolyzers and seasonal storages in hydrogen supply chains incorporated with renewable electric networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019:1.
- [22] PANG, GU W, QIU H, et al. Bi-level mixed-integer planning for electricity-hydrogen integrated energy system considering leveled cost of hydrogen[J]. Applied Energy, 2020, 270:115176.
- [23] WU N Y, ZHAN X Y, ZHU X Y, et al. Integration of biomass into district energy systems with methanol production based on a mixed-integer nonlinear programming optimization methodology[J]. Renewable Energy, 2020.