

考虑余热梯级利用的综合能源系统减碳协同优化模型

洪明志, 吴杰康, 罗伟明, 孙烨桦, 方梓康, 詹耀国, 黄泽杭
(广东工业大学自动化学院, 广州 510006)

摘要: 针对垃圾焚烧电厂能量利用率低及余热潜力未被充分挖掘问题, 引入余热梯级利用技术, 提出一种考虑垃圾电厂与余热梯级利用技术的综合能源系统减碳协同优化模型。首先, 构建含垃圾电厂的系统框架, 分析垃圾电厂电热气联产可行性, 构建电厂能流关系模型, 并对渗滤液厌氧处理过程进行数学建模。其次, 引入余热梯级利用技术设计余热回收系统, 对底灰固体高温颗粒设计超临界CO₂布雷顿循环系统进行余热回收。然后, 通过碳核算模型计算碳排放量并结合碳交易机制限制碳排放, 建立以系统总运行成本最小化为目标函数的综合能源系统减碳协同优化模型。算例分析结果表明该模型不仅降低了购能成本和对外能源依赖程度, 还实现了减碳效果, 有效证明模型具备经济-环保效益。

关键词: 综合能源系统; 减碳协同优化; 余热梯级利用; 超临界CO₂布雷顿循环

Coordinative Optimization Model for Carbon Reduction in Integrated Energy Systems Considering Cascading Utilization of Waste Heat

HONG Mingzhi, WU Jiekang, LUO Weiming, SUN Yehua, FANG Zikang, ZHAN Yaoguo,
HUANG Zehang

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In response to the problem of low energy utilization and under-exploitation of waste heat potential in waste-to-energy plants, a carbon-reduction coordinative optimization model of the integrated energy system considering waste-to-energy plants and waste heat cascading utilization technology is proposed by introducing waste heat gradient utilization technology. Firstly, the system framework of a waste-to-energy plant is constructed, the feasibility of combined electricity, heat and gas production in waste-to-energy plants is analyzed, the energy flow relationship model of the plant is constructed, and the anaerobic leachate treatment process is mathematically modelled. Secondly, waste heat recovery system is designed by introducing waste heat cascading technology, and a supercritical CO₂ Brayton cycle system is designed for waste heat recovery of solid high temperature particles of bottom ash. Then, carbon emissions are calculated through a carbon accounting model and combined with a carbon trading mechanism to limit carbon emissions, and a coordinative optimization model for carbon reduction of the integrated energy system is established with the minimization of total system operating costs as the objective function. The numerical analysis results show that the model not only reduces the cost of energy purchase and external energy dependency, but also achieves carbon reduction, effectively demonstrating the economic and environmental benefits of the model.

Key words: integrated energy systems; carbon reduction coordinative optimization; cascading utilization of waste heat; supercritical CO₂ Brayton cycle

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金区域联合基金项目—粤港澳研究团队项目(2020B1515130001)。

Foundation item: Supported by Regional Joint Fund Project of Basic and Applied Basic Research Fund of Guangdong Province (Research Team Project of Guangdong, Hong Kong and Macao)(2020B1515130001).

0 引言

在气候恶化与全球能源格局动荡的形势下,能源清洁化与低碳化已经成为全球发展趋势^[1]。为实现“3060”碳达峰碳中和目标^[2],具有多源协同优化、多能互补联供的综合能源系统(integrated energy system, IES)成为解决能源供需矛盾以及环境保护问题的关键途径^[3-4]。在此背景下,垃圾焚烧发电技术不仅为城市垃圾处理提供了有效方案,还提升了能源的综合利用效率^[5]。

目前,垃圾焚烧电厂的研究主要集中在全生命周期温室气体排放跟踪、性能与经济性评估、以及近零碳优化运行模式等方面^[6-9],然而关于垃圾焚烧电厂的能效提升和垃圾渗滤液再利用的研究还相对较少。文献[10]构建了垃圾焚烧电厂-烟气处理-P2G协调优化运行模型,通过在烟气处理后加装CO₂回收装置,实现碳循环利用的研究。文献[11]提出一种将太阳能热集热器集成到垃圾焚烧电厂的方案,以提高发电效率和可靠性,结果表明该方案比传统的垃圾焚烧电厂具有更高的能量和效率。文献[12]提出一种基于垃圾焚烧厂-碳捕集(WIP-CC)系统和市场机制的近零碳综合能源系统调度策略,开发了可调节的WIP热电比模型和带储罐的CC模型,以增强热电输出的灵活性,实现废物能源利用和低碳排放。文献[13]将垃圾焚烧电厂、电动垃圾车和可再生能源进行整合,通过双层规划模型实现虚拟电厂系统稳定运行,促进了垃圾资源利用,提高了城市固体废物清除效率。对于渗滤液的处理和利用,文献[14]采用了新AB工艺对垃圾渗滤液进行处理,大幅降低运行成本。文献[15]利用垃圾焚烧电厂处理过程中产生的渗滤液改进原始高岭土对重金属氯化物的吸附效果。这些研究在提高垃圾电厂的能效和垃圾渗滤液处理利用方面取得了一定成果,但对于渗滤液厌氧处理后产生的甲烷再利用的研究仍然较少。

在国内外,垃圾焚烧电厂运行过程中存在的较大能量损失问题,主要通过余热回收技术解决。文献[16]提出了一种基于混合太阳能-废弃物的利用廉价微结构箔片的菲涅尔透镜热集热器解决方案,通过有机朗肯循环提供低品位热能、电能和工业热能。结果表明该种混合化对于高效和经济的多能源利用非常有效。文献[17]通过加装烟气余热回收装

置回收余热,并利用压缩式热泵进行能量转移,有效提高垃圾焚烧电厂能效。文献[18]提出了一种有机朗肯循环和吸收式制冷循环相结合的新型余热回收系统,提高了余热利用效率。文献[19]提出了一种将城市固体废弃物焚烧产生的灰渣转化为吸附剂,用于后燃烧CO₂捕集和储存的方法,以减少废弃物填埋和减少碳排放。通过上述文献可知,垃圾焚烧电厂中的余热回收主要聚焦于太阳能与烟气余热回收,对于余热能量品位利用不对称造成的浪费问题和焚烧炉底部的底灰高温颗粒热资源回收研究较少,该部分高温底灰颗粒蕴含大量的余热能,具有很高的研究价值。

鉴于IES热电负荷变化规律不同,且负荷需求量大,垃圾焚烧电厂通常位于负荷中心,并具备处理垃圾和生产热电的能力,能较好地满足电热需求。目前,一些学者已将垃圾焚烧电厂引入IES^[20-22],将其作为热电联供的核心机组,结合电转气装置实现新能源消纳和电热气多能联供,进而实现IES的低碳化运行。

综上所述,本文在IES运行优化的基础上,将深入探讨余热梯级利用技术在日前阶段的优化运行策略,进一步挖掘垃圾焚烧电厂的减碳潜力。本文旨在为含垃圾焚烧电厂的IES日前优化运行提供更为高效的决策支持,实现节能减排和提升经济效益的目的。本文创新点如下。

1) 分析垃圾焚烧电厂电热气联供可行性,对渗滤液厌氧处理后所产生的甲烷再利用进行研究,并将所产甲烷供至IES,以扩宽气源,减少购能成本;

2) 在垃圾电厂中引入余热梯级利用技术,充分挖掘蒸汽、烟气和高温底灰颗粒余热潜力。采用有机朗肯循环系统和热泵系统对蒸汽和烟气的余热进行回收,并根据能量品位匹配原则实现余热梯级利用。设计超临界CO₂布雷顿循环系统对高温底灰固体颗粒余热进行回收,减少回收过程换热损失;

3) 通过引入电转气设备与储气罐实现风力发电时间解耦,提高风电消纳能力,并建立碳排放核算模型,验证垃圾焚烧电厂采用余热梯级利用技术对IES减碳的有效性。

1 含垃圾焚烧电厂的IES运行框架

含垃圾焚烧电厂的IES运行框架如图1所示。

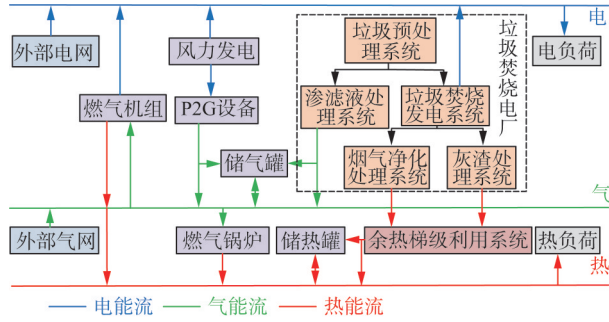


图 1 含垃圾焚烧电厂的综合能源系统运行框架

Fig. 1 Operation framework of integrated energy system with waste incineration power plant

其中电能由垃圾焚烧电厂、风电、燃气机组以及外部电网购电供给, 热负荷由燃气机组、燃气锅炉、余热梯级利用系统以及储热罐供给, 甲烷由 P2G 设备、垃圾焚烧电厂渗滤液处理系统以及储气罐供给, P2G 设备中的电能来自风电机组。

1.1 垃圾焚烧电厂多能联产能流模型

1.1.1 垃圾焚烧电厂电热气联产可行性分析

垃圾焚烧电厂架构如图 2 所示。与传统燃煤燃气机组相比, 垃圾焚烧电厂不仅为垃圾处理提供新的路径, 同时还兼备产气功能, 可通过燃烧生活垃圾获得能量供应, 实现发电、产气、供热等多种运行功能。

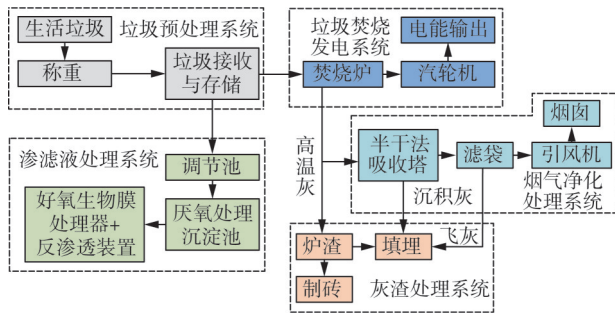


图 2 垃圾焚烧电厂架构

Fig. 2 Waste incineration plant architecture

垃圾焚烧电厂由五部分组成。在垃圾预处理与渗滤液处理系统中, 利用厌氧处理技术使渗滤液厌氧发酵产生沼气, 其主要成分是甲烷, 可通过燃气机组燃烧发电、供热, 满足部分热电需求; 在垃圾焚烧发电系统中, 对被处理后的垃圾进行燃烧发电; 在烟气处理与灰渣处理系统中, 对烟气与灰渣进行环保处理并将其余热进行回收供热。

1.1.2 垃圾焚烧电厂能量系统结构

因垃圾焚烧电厂所需燃料为生活垃圾, 本文假

设垃圾焚烧电厂不需要考虑燃料成本, 且每日的垃圾配额固定, 单位吨垃圾产生的蒸汽、烟气、底灰的量相对固定, 则 t 时刻产生的蒸汽、烟气和底灰能量如式(1)—(4)所示。

$$Q_z = \sum_{i=1}^n T_i \cdot Q_1 \quad (1)$$

$$Q_y = \sum_{i=1}^n T_i \cdot Q_2 \quad (2)$$

$$Q_d = \sum_{i=1}^n T_i \cdot Q_3 \quad (3)$$

$$T_{\text{all}} = \sum_{i=1}^n T_i \quad (4)$$

式中: T_i 为 t 时刻燃烧吨垃圾数量; T_{all} 为每日垃圾配额; Q_z 、 Q_y 、 Q_d 分别为每日燃烧垃圾产生的蒸汽、烟气和底灰能量总量; Q_1 、 Q_2 、 Q_3 分别为燃烧单位吨垃圾所产生的蒸汽、烟气和底灰能量; n 为一天 24 h。

垃圾焚烧电厂采用抽气式热电联产机组, 通过控制蒸汽进入汽轮机低压部分数量, 调节热电产量, 其热电关系可通过抽气量与总进气量描述^[22]。

$$P_{G,t} = k_1 \cdot D_{\text{in},t} - k_2 \cdot D_{\text{c},t} + k_3 \quad (5)$$

式中: $P_{G,t}$ 为 t 时刻热电联产机组发电量; k_1 、 k_2 、 k_3 为常数; $D_{\text{in},t}$ 、 $D_{\text{c},t}$ 分别为 t 时刻总进气量和抽气量。

为了降低计算复杂度, 假设蒸汽各状态参数不随流量变化, 蒸汽量与蒸汽能量之间为线性关系, 则可通过蒸汽能量来描述热电关系。

$$D_{\text{in},t} = k_4 \cdot Q_{z,t} \quad (6)$$

$$D_{\text{c},t} = k_5 \cdot Q_{c,t} \quad (7)$$

代入式(5)中得:

$$P_{G,t} = k_1 \cdot k_4 Q_{z,t} - k_2 \cdot k_5 \cdot Q_{c,t} + k_3 \quad (8)$$

$$Q_{G,t} = \eta_Q \cdot Q_{c,t} \quad (9)$$

式中: $Q_{c,t}$ 为 t 时刻抽出蒸汽所含能量; k_4 、 k_5 为常数; $Q_{G,t}$ 为 t 时刻机组产热量; η_Q 为机组产热效率。

热电联产机组运行约束为:

$$P_G^{\min} \leq P_{G,t} \leq P_G^{\max} \quad (10)$$

$$Q_G^{\min} \leq Q_{G,t} \leq Q_G^{\max} \quad (11)$$

$$P_G^{\text{down}} \leq |P_{G,t+1} - P_{G,t}| \leq P_G^{\text{up}} \quad (12)$$

$$Q_G^{\text{down}} \leq |Q_{G,t+1} - Q_{G,t}| \leq Q_G^{\text{up}} \quad (13)$$

$$\lambda_G^{\min} \leq Q_{G,t}/P_{G,t} \leq \lambda_G^{\max} \quad (14)$$

式中: $P_G^{\max}$ 、 $P_G^{\min}$ 分别为机组最大最小电出力; $Q_G^{\max}$ 、 $Q_G^{\min}$ 分别为机组最大最小热出力; P_G^{up} 、 P_G^{down} 分别为

最大上、下电爬坡出力; Q_G^{up} 、 Q_G^{down} 分别为最大上、下热爬坡出力; λ_G^{max} 、 λ_G^{min} 分别为热电比上下限。

1.1.3 渗滤液厌氧处理

垃圾预处理系统将生活垃圾静置出的渗滤液送入厌氧处理沉淀池, 渗滤液经过厌氧发酵产生沼气, 沼气中甲烷含量约为 70%。由于渗滤液的产生需要提前将垃圾静置 3~5 d, 本文假设每日垃圾配额固定, 则认为渗滤液量为当天垃圾所产生, 并且单位吨垃圾所产生的渗滤液量相对固定。本文所提到的燃气即为燃烧甲烷, 设每日所产生的甲烷量固定为:

$$\sum_{t=1}^n V_{s,t} = \sum_{t=1}^n T_t \cdot \omega_s \quad (15)$$

$$V_z = \sum_{t=1}^n V_{s,t} \cdot \omega_z \quad (16)$$

$$V_{\text{CH}_4} = k_6 \cdot V_z \quad (17)$$

式中: $V_{s,t}$ 为 t 时刻渗滤液产出量; V_z 为每日产生沼气总量; V_{CH_4} 为每日产生甲烷总量; ω_s 、 ω_z 分别为单位吨垃圾产生的渗滤液量和渗滤液产生的沼气体积; k_6 为常数, 取 0.7。

1.2 余热梯级利用能量系统

根据高、低品位能量适配利用与减少能量损失原则, 设计一种结合有机朗肯循环(organic rankine cycle, ORC)、热泵系统(heat pump, HP)与超临界 CO_2 布雷顿循环(supercritical CO_2 Brayton cycle, S- CO_2)的余热梯级利用回收系统。

1.2.1 余热梯级利用技术原理

余热梯级利用系统根据热量来源分为 3 个部分: 蒸汽、烟气和高温底灰固体颗粒的余热梯级回收。余热梯级利用系统如图 3 所示。

对于蒸汽余热回收部分: 垃圾在锅炉焚烧所释放的热量被低温水所吸收, 产生蒸汽。蒸汽小部分通过换热器 HE1 直接供热, 大部分进入高压膨胀机(high-pressure expansion turbine, HT)做功发电。此时 HT 做功出口后的蒸汽压强降低, 但仍具有大量热量, 设计低压膨胀机(low-pressure expansion turbine, LT)再次利用做功发电, 实现热量适配利用。蒸汽经过 LT 做功后变得低温低压, 该部分蒸汽仍具有一定的潜热, 通过设计 HE5 回收该部分潜热, 为 HP 系统中即将进入压缩机做功的工质进行预热, 实现对蒸汽余热进行二次梯级回收。

对于烟气余热回收部分: 设计 ORC+HP 系统回收烟气热量, 将回收的余热做功发电, 一部分电能供给负荷, 一部分电能用于驱动 HP 系统中的压缩机。在 ORC 系统中, 工质泵将冷凝器出口的工质加压, 然后进入换热器中吸热和膨胀机中做功发电。在 HP 系统中, 利用 HE5 回收的蒸汽潜热对工质进行预热, 并通过压缩机将温度提高至热水供应范围, 使蒸汽与烟气余热得到充分利用。

对于高温底灰固体颗粒余热部分: 超临界 CO_2 布雷顿循环对于高温固体有更好的回收效果。超临界状态下的 CO_2 没有相变, 能更好的匹配高温热源温度, 增强换热效果。因此设计 S- CO_2 系统回收高温底灰固体颗粒热量。 CO_2 工质通过压缩预热, 在 HE7 中吸收底灰热量后进入涡轮机 T 做功。T 出口的余热首先经过回热器预热即将流入 HE7 的 CO_2 工质, 以此减少换热温度差, 提高换热效率。此时, 回热器出口的余热刚好达到供热水的温度范围, 将该部分热量用于供热, 实现温度对口、余热梯级利用, 有效减少热量损失。

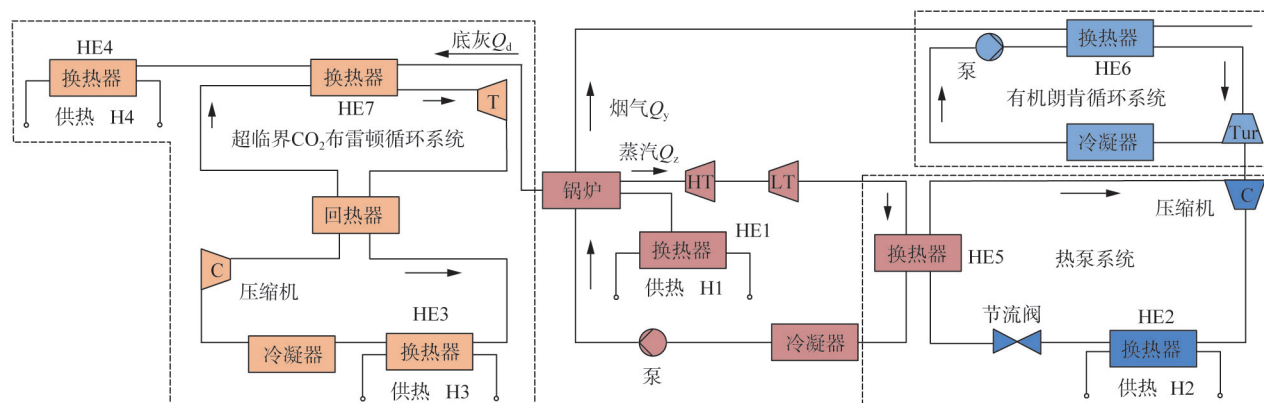


图3 余热梯级利用系统

Fig. 3 Waste heat cascading utilization system

1.2.2 余热梯级利用系统能流关系

烟气余热梯级利用系统能流关系如式(18)—(22)所示。

$$Q_{\text{tur},t} = Q_{\text{y},t} \cdot \eta_{\text{HE6}} \quad (18)$$

$$P_{\text{tur},t} = Q_{\text{tur},t} \cdot \alpha_{\text{tur}} \quad (19)$$

$$P_{\text{c},t} = P_{\text{tur},t} - P_{\text{tur},t}^{\text{out}} \quad (20)$$

$$Q_{\text{c},t} = P_{\text{c},t} \cdot \alpha_{\text{c}} \quad (21)$$

$$Q_{\text{HE2},t} = Q_{\text{c},t} \cdot \eta_{\text{HE2}} \quad (22)$$

式中: $Q_{\text{tur},t}$ 为 t 时刻换热器回收的余热; $P_{\text{tur},t}$ 为 t 时刻膨胀机做功发电量; $P_{\text{c},t}$ 为 t 时刻压缩机耗电量, 由烟气余热做功发电量提供; $P_{\text{tur},t}^{\text{out}}$ 为 t 时刻供给负荷电量; $Q_{\text{c},t}$ 为 t 时刻压缩机出口热量; η_{HE6} 、 η_{HE2} 分别为换热器 HE6 和换热器 HE2 回收效率; α_{tur} 、 α_{c} 分别为膨胀机和压缩机能效系数。

高温底灰固体颗粒物余热梯级利用系统能流关系如式(23)—(28)所示。

$$Q_{\text{T},t}^{\text{in}} = Q_{\text{dh},t} \cdot \eta_{\text{HE7}} \quad (23)$$

$$P_{\text{T},t} = Q_{\text{T},t}^{\text{in}} \cdot \alpha_{\text{T}} \quad (24)$$

$$Q_{\text{T},t}^{\text{out}} = Q_{\text{T},t}^{\text{in}} \cdot \eta_{\text{T}} \quad (25)$$

$$Q_{\text{HE3},t}^{\text{in}} = Q_{\text{T},t}^{\text{out}} \cdot (1 - \eta_{\text{hr}}) \quad (26)$$

$$Q_{\text{HE3},t} = Q_{\text{HE3},t}^{\text{in}} \cdot \eta_{\text{HE3}} \quad (27)$$

$$Q_{\text{HE4},t} = Q_{\text{dh},t} \cdot (1 - \eta_{\text{HE7}}) \cdot \eta_{\text{HE4}} \quad (28)$$

式中: $Q_{\text{T},t}^{\text{in}}$ 为 t 时刻底灰供给膨胀机做功的余热; $P_{\text{T},t}$ 为 t 时刻膨胀机做功发电量; $Q_{\text{T},t}^{\text{out}}$ 为 t 时刻膨胀机出口余热; $Q_{\text{HE3},t}^{\text{in}}$ 为 t 时刻经过回热器后进入 HE3 的余热; $Q_{\text{HE3},t}$ 、 $Q_{\text{HE4},t}$ 分别为 t 时刻 HE3、HE4 供热量; η_{HE7} 、 η_{HE4} 、 η_{hr} 、 η_{T} 分别为 HE7、HE4、回热器、膨胀机的热效率; α_{T} 为膨胀机 T 能效系数。

1.3 风力发电模型及能源耦合设备

1.3.1 风电发电模型

风速是风力发电的主要影响因素, 其风电机组预测出力与风速之间的关系如式(29)所示^[23]。

$$P_{\text{w},t} = \begin{cases} 0, & 0 \leq v_t \leq v_{\text{in}}, v_t > v_{\text{out}} \\ \frac{v_t - v_{\text{in}}}{v_r - v_{\text{in}}} \cdot P_r, & v_{\text{in}} \leq v_t \leq v_r \\ P_r, & v_r \leq v_t \leq v_{\text{out}} \end{cases} \quad (29)$$

式中: $P_{\text{w},t}$ 为 t 时刻风电机组预测出力; v_t 为 t 时刻风速; v_{in} 、 v_{out} 、 v_r 分别为切入风速、切出风速、额定风速; P_r 为额定功率。

由于对风速的预测存在不确定性, 一般采用 Weibull 分布来描述各个时段风速情况的概率分布,

具体表达式如式(30)所示^[24]。

$$f(v) = \frac{\alpha}{\beta} \cdot \left(\frac{v}{\beta}\right)^{\alpha-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{\beta}\right)^{\alpha}} \quad (30)$$

式中: v 为实际风速; α 、 β 分别为形状、尺度参数。

1.3.2 燃气锅炉

燃气锅炉(gas boiler, GB)燃烧天然气产生热能, 实现气-热能转化。GB 模型如式(31)所示^[25]。

$$Q_{\text{GB},t} = V_{\text{GB},t} \cdot Q_g \cdot \eta_{\text{GB}} \quad (31)$$

式中: $Q_{\text{GB},t}$ 为 t 时刻 GB 产生的热能; $V_{\text{GB},t}$ 为 t 时刻 GB 耗气量; Q_g 为天然气热值, 取 39MJ/m³; η_{GB} 为 GB 效率。

1.3.3 CHP 机组

热电联供机组(Combined heat and power, CHP)燃烧天然气产生电热能, 实现气-电-热能转化。CHP 模型如式(32)—(34)^[25]所示。

$$P_{\text{PH},t} = P_{\text{CHP},t} + Q_{\text{CHP},t} \quad (32)$$

$$P_{\text{CHP},t} = V_{\text{CHP},t} \cdot Q_g \cdot \eta_{\text{CHP}}^{\text{e}} \quad (33)$$

$$Q_{\text{CHP},t} = V_{\text{CHP},t} \cdot Q_g \cdot \eta_{\text{CHP}}^{\text{h}} \quad (34)$$

式中: $P_{\text{PH},t}$ 、 $P_{\text{CHP},t}$ 、 $Q_{\text{CHP},t}$ 分别为 t 时刻 CHP 产生的总功率、电功率、热功率; $V_{\text{CHP},t}$ 为 t 时刻 CHP 耗气量; $\eta_{\text{CHP}}^{\text{e}}$ 、 $\eta_{\text{CHP}}^{\text{h}}$ 为 CHP 的电效率和热效率。

1.3.4 电转气设备

电转气设备(power to gas, P2G)通过电解水和甲烷化两阶段实现电-气能转化, 实现消纳风电的作用。P2G 生成天然气表达式如式(35)所示^[26]。

$$V_{\text{P2G},t} = \frac{3.6 \cdot \eta_{\text{P2G}} \cdot P_{\text{P2G},t}}{Q_g} \quad (35)$$

式中: $V_{\text{P2G},t}$ 为 t 时刻 P2G 产气量; $P_{\text{P2G},t}$ 为 t 时刻 P2G 耗电量; η_{P2G} 为 P2G 转换效率。

2 碳排放核算

本文将 IES 的地理边界作为核算边界。其中碳排放包含直接与间接碳排放, 边界内的垃圾焚烧电厂与燃气机组为直接碳排放源。外部购能属于边界外活动, 为间接碳排放源。

2.1 垃圾焚烧电厂碳排放核算

垃圾焚烧电厂采用 IPCC 国家温室气体清单指南法进行计算, 碳排放计算表达式如式(36)所示^[27]。

$$E_{\text{CO2}} = \sum (I_{\text{Mi}} \cdot C_{\text{CW},i} \cdot F_{\text{CF},i} \cdot E_{\text{Fi}} \cdot 44/12) \quad (36)$$

式中: E_{CO_2} 为 CO_2 排放量; i 为不同生活垃圾废弃物类型; I_{Mi} 为第 i 种废弃物焚烧量; C_{CWi} 为第 i 种废弃物含碳比; F_{CFi} 为第 i 种废弃物化石碳占总碳比重; E_{Fi} 为第 i 种废弃物燃烧效率; 44/12 为 CO_2 与碳的相对分子质量比。

2.2 燃气机组及外购电碳排放核算

根据《中国发电企业温室气体排放核算方法与报告指南(实行)》, 燃气机组碳排放计算表达式如式(37)所示。

$$E_g = \sum (F_{\text{Cg}} \cdot C_g \cdot O_{\text{Fg}} \cdot 44/12) \quad (37)$$

式中: E_g 为燃气机组 CO_2 排放量; F_{Cg} 为天然气燃烧量; C_g 为天然气基本素碳含量; O_{Fg} 为天然气碳氧化率。

对于外购电碳排放核算表达式如下。

$$E_e = \chi_e \cdot P_e^{\text{buy}} \quad (38)$$

式中: E_e 为外购电能产生的 CO_2 排放量; χ_e 为电网排放因子; P_e^{buy} 为外购电量。

2.3 电转气设备碳排放核算

电转气设备在工作过程中吸收 CO_2 合成甲烷, 能够起到减碳作用, 表达式如下。

$$E_{\text{P2G}} = \lambda_{\text{P2G}} \cdot P_{\text{P2G}} \quad (39)$$

式中: E_{P2G} 为电转气设备吸收的 CO_2 排放量; λ_{P2G} 为电转气设备吸收 CO_2 的系数。

2.4 碳排放核算模型

系统最终的碳排放核算模型表达式为:

$$E = E_{\text{CO}_2} + E_g + E_e - E_{\text{P2G}} \quad (40)$$

式中 E 为系统最终的 CO_2 排放量。

3 考虑余热梯级利用的 IES 经济优化模型

3.1 目标函数

本文所构建的优化模型以总运行成本最小为目标函数, 包括有: 购能成本、碳交易成本、运维成本和弃风惩罚成本经济因素。目标函数为:

$$\min C = \sum_{t=1}^T (C_{\text{gn},t} + C_{\text{CO}_2,t} + C_{\text{yw},t} + C_{\text{qf},t}) \quad (41)$$

式中 $C_{\text{gn},t}$ 、 $C_{\text{CO}_2,t}$ 、 $C_{\text{yw},t}$ 、 $C_{\text{qf},t}$ 分别为 t 时刻购能成本、碳交易成本、运维成本、弃风惩罚成本。

1) 购能成本

购能成本包含购电与购气成本, 购电价格采用分时电价。购能成本表达式为:

$$C_{\text{gn},t} = \alpha_{\text{e},t}^{\text{buy}} \cdot P_{\text{e},t}^{\text{buy}} + \alpha_{\text{g}}^{\text{buy}} \cdot V_{\text{g},t}^{\text{buy}} \quad (42)$$

式中: $\alpha_{\text{e},t}^{\text{buy}}$ 为 t 时刻电价; $\alpha_{\text{g}}^{\text{buy}}$ 为购气价; $P_{\text{e},t}^{\text{buy}}$ 为 t 时刻购电量; $V_{\text{g},t}^{\text{buy}}$ 为 t 时刻购气量。

2) 碳交易成本

本文碳排放权配额采用无偿配额法, 碳交易成本采用阶梯式碳交易模型进行计算, 具体模型参考文献[26]。

3) 运维成本

$$C_{\text{yw},t} = \gamma_{\text{G}} \cdot P_{\text{G},t} + \gamma_{\text{CHP}} \cdot P_{\text{PH},t} + \gamma_{\text{GB}} \cdot Q_{\text{GB},t} + \gamma_{\text{P2G}} \cdot V_{\text{P2G},t} + \gamma_{\text{w}} \cdot P_{\text{w},t} \quad (43)$$

式中 γ_{G} 、 γ_{CHP} 、 γ_{GB} 、 γ_{P2G} 、 γ_{w} 分别为垃圾电厂、CHP、GB、P2G、风电机组的单位运维系数。

4) 弃风惩罚成本

为了提高风电消纳积极性, 设计弃风惩罚机制。表达式为:

$$P_{\text{qf},t} = P_{\text{w},t} - P_{\text{w},t}^{\text{load}} - P_{\text{P2G},t} \quad (44)$$

$$C_{\text{qf},t} = \lambda \cdot P_{\text{qf},t} \quad (45)$$

式中: $P_{\text{qf},t}$ 为 t 时刻弃风量; $P_{\text{w},t}^{\text{load}}$ 为风电供给电负荷量; λ 为单位弃风成本。

3.2 约束条件

1) 电平衡约束

$$P_{\text{load},t} = P_{\text{G},t} + P_{\text{T},t} + P_{\text{tur},t}^{\text{out}} + P_{\text{CHP},t} + P_{\text{w},t}^{\text{load}} + P_{\text{e},t}^{\text{buy}} \quad (46)$$

式中 $P_{\text{load},t}$ 为 t 时刻电负荷。

2) 热平衡约束

$$Q_{\text{load},t} = Q_{\text{G},t} + Q_{\text{H},t} + Q_{\text{GB},t} + Q_{\text{CHP},t} + Q_{\text{TSD},t} - Q_{\text{TSC},t} \quad (47)$$

$$Q_{\text{H},t} = Q_{\text{HE2},t} + Q_{\text{HE3},t} + Q_{\text{HE4},t} \quad (48)$$

式中: $Q_{\text{TSC},t}$ 、 $Q_{\text{TSD},t}$ 分别为 t 时刻储热系统充放量; $Q_{\text{H},t}$ 为余热回收系统回收的热能。

3) 气平衡约束

$$V_{\text{g},t}^{\text{buy}} = V_{\text{GB},t} + V_{\text{CHP},t} + V_{\text{QSC},t} - V_{\text{CH4},t} - V_{\text{P2G},t} - V_{\text{QSD},t} \quad (49)$$

式中 $V_{\text{QSC},t}$ 、 $V_{\text{QSD},t}$ 分别为 t 时刻储气系统充放量。

4) 风电运行约束

$$P_{\text{w},t}^{\text{load}} \geq 0 \quad (50)$$

5) GB、CHP、P2G 运行约束

$$Q_{\text{GB}}^{\text{min}} \leq Q_{\text{GB},t} \leq Q_{\text{GB}}^{\text{max}} \quad (51)$$

$$Q_{\text{GB}}^{\text{down}} \leq |Q_{\text{GB},t+1} - Q_{\text{GB},t}| \leq Q_{\text{GB}}^{\text{up}} \quad (52)$$

$$P_{\text{CHP}}^{\text{min}} \leq P_{\text{CHP},t} \leq P_{\text{CHP}}^{\text{max}} \quad (53)$$

$$Q_{\text{CHP}}^{\text{min}} \leq Q_{\text{CHP},t} \leq Q_{\text{CHP}}^{\text{max}} \quad (54)$$

$$P_{\text{PH}}^{\text{down}} \leq |P_{\text{PH},t+1} - P_{\text{PH},t}| \leq P_{\text{PH}}^{\text{up}} \quad (55)$$

$$0 \leq P_{\text{P2G},t} \leq P_{\text{w},t} \quad (56)$$

式中, $Q_{GB}^{\max}$ 、 $Q_{GB}^{\min}$ 为 t 时刻 GB 运行的最大最小值;
 Q_{GB}^{up} 、 Q_{GB}^{down} 为 GB 爬坡上下限; $P_{CHP}^{\max}$ 、 $P_{CHP}^{\min}$ 、 $Q_{CHP}^{\max}$ 、 $Q_{CHP}^{\min}$ 分别为 CHP 电、热出力的最大最小值; P_{PH}^{up} 、 P_{PH}^{down} 为 CHP 爬坡上下限。

6) 储能运行约束

$$0 \leq Q_{TSC,t} \leq Q_{TSC,t}^{\max} \cdot B_{TSC,t} \quad (57)$$

$$0 \leq Q_{TSD,t} \leq Q_{TSD,t}^{\max} \cdot B_{TSD,t} \quad (58)$$

$$0 \leq B_{TSC,t} + B_{TSD,t} \leq 1 \quad (59)$$

$$S_{TS}^{\min} \leq S_{TS,t} \leq S_{TS}^{\max} \quad (60)$$

$$S_{TS,0} = S_{TS,24} \quad (61)$$

$$S_{TS,t+1} = S_{TS,t} + \eta_{TSC} \cdot Q_{TSC,t} - Q_{TSD,t} / \eta_{TSD} \quad (62)$$

式中: $Q_{TSC}^{\max}$ 、 $Q_{TSD}^{\max}$ 分别为充放热功率的最大值;
 $B_{TSC,t}$ 、 $B_{TSD,t}$ 分别为充放状态的布尔变量, 处于充放状态为 1, 否则为 0; $S_{TS}^{\max}$ 、 $S_{TS}^{\min}$ 分别为储热容量最大最小值; $S_{TS,0}$ 、 $S_{TS,24}$ 分别为储热罐一天的始末值; η_{TSC} 、 η_{TCD} 分别为储热罐充、放效率。储气罐与储热罐约束一致, 不再赘述。

3.3 模型求解

结合式(1)–(62)完整的构建了本文所提的优化模型。求解流程如图 4 所示。

步骤 1: 设置 Weibull 分布参数, 得到风速概率密度分布;

步骤 2: 利用 Weibull 分布模拟预测风速集;

步骤 3: 利用风速集计算得风电预测数据集;

步骤 4: 通过调用 K-means 聚类函数计算风电预测出力集中最大概率风电数据, 并作为风电预测数据输入至系统模型中;

步骤 5: 将其余基本参数及负荷数据输入;

步骤 6: 在 YALMIP 环境下调用 MATLAB 中的 CPLEX 商业求解器进行模型求解。

4 算例分析

4.1 算例参数

本文以一天 24 h 为调度周期, 垃圾焚烧电厂运行基本参数如表 1 所示, 垃圾组分有关参数取值参考自文献[25]。余热梯级利用系统中, 所有换热器换热效率均取 98%, 其余基本参数如表 2 所示。

GB 最大热功率为 10 MW, 热效率为 40%, 单位功率运维系数为 0.02 万元/MW; CHP 最大电热功率均为 10 MW, 电效率 35%, 热效率为 40%, 热电比最大值为 2.1, 最小值为 0.5, 单位功率运

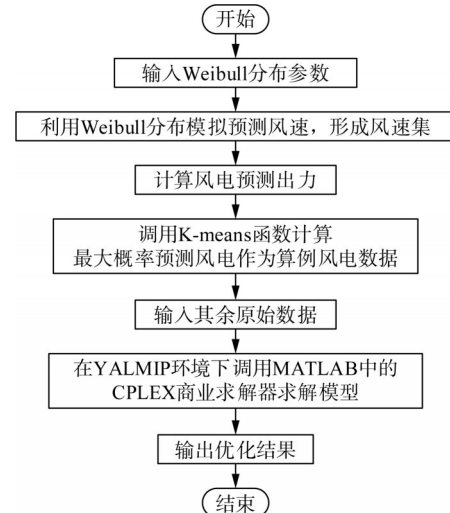


图 4 求解流程图

Fig. 4 Solution flowchart

表 1 垃圾焚烧电厂基本参数

Tab. 1 Basic parameters of waste incineration power plant

参数	数值	参数	数值
T_{all}/t	1 000	$P_G^{\min}/\text{MW}$	10
Q_1/MW	0.894 6	$P_G^{\max}/\text{MW}$	40
Q_2/MW	0.03	$Q_G^{\min}/\text{MW}$	0
Q_3/MW	0.3	$Q_G^{\max}/\text{MW}$	20
$\eta_Q/\%$	60	$\lambda_G^{\min}$	0.5
$\gamma_G/(\text{万元} \cdot \text{MW}^{-1})$	0.06	$\lambda_G^{\max}$	2.1
ω_s/t	0.1	ω_z/m^3	30

表 2 余热梯级利用系统基本参数

Tab. 2 Basic parameters of waste heat cascading utilization system

参数	数值	参数	数值
α_{ur}	0.4	α_c	2.7
α_T	0.15	$\eta_T/\%$	10
$\eta_{\text{hr}}/\%$	20		

维系数为 0.03 万元/MW; P2G 产气效率为 60%, 输入电功率最大值为 5 MW, 单位体积运维系数为 0.05 万元/MW; 风电机组单位功率运维系数为 0.02 万元/MW, 单位弃风成本为 0.15 万元/MW。天然气基本素碳含量为 20%, 碳氧化率为 2.75。外购电与阶梯式碳交易模型基本参数均取自文献[29–30]。储热罐最大充放热功率为 10 MW, 初始容量为 25 MW, 总容量为 50 MW, 充放效率为 88%; 储气罐最大充放天然气体积为 200 m³, 初始容量为 250 m³, 总容量为 500 m³, 充放效率为 98%。

Weibull 分布参数参考文献[24]。图 5 为购能价格，图 6 为风电预测数据集，图 7 为通过 k-means 聚类得出的最大概率风电预测值及数据集波动域。图 8 为 IES 负荷预测曲线以及风电机组出力预测曲线。

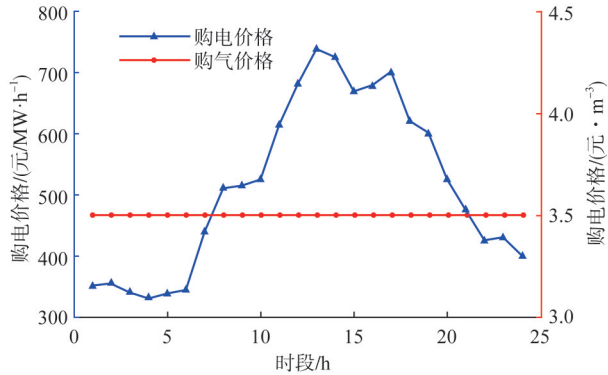


图 5 购能价格

Fig. 5 Energy purchase price

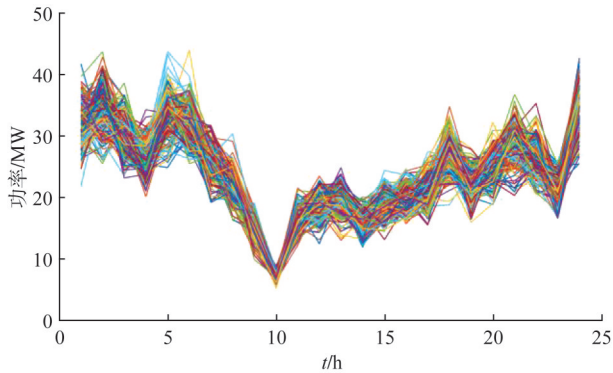


图 6 风电预测数据集

Fig. 6 Wind power prediction dataset

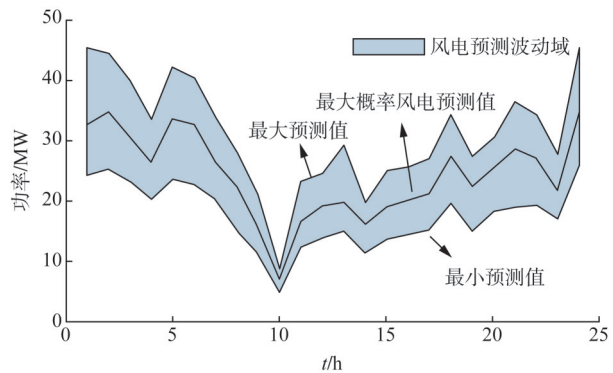


图 7 风电预测波动域

Fig. 7 Wind power prediction fluctuation range

4.2 基础运行结果分析

为了验证所提运行模型及策略能够满足负荷，对模型运行结果进行分析。图 9、图 10、图 11 分别

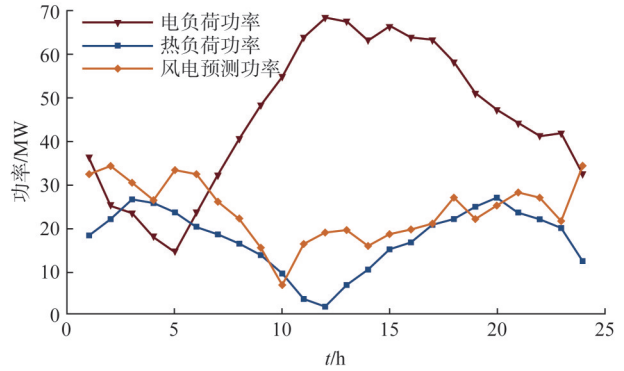


图 8 系统功率预测曲线

Fig. 8 System power prediction curves

对应电功率、热功率和天然气平衡。

由图 9 可得：IES 仅在 8—16 时电负荷需求较大时段需外部购电，其余时间可通过系统内部供电满足电需求，说明 IES 具备良好供电能力。2—6 时风电预测功率较大，但风电直接供电量并不大，因为该时段电需求小而热负荷需求大，风电优先供给 P2G，利用 P2G 消纳风电产气供给 GB 与 CHP 机组产热，以减少风电机组弃风量和购气量。9—19 时电负荷高峰时段，垃圾电厂在此时段集中焚烧垃圾，加大出力，其余时段处于基础运行状态，稳定供电。

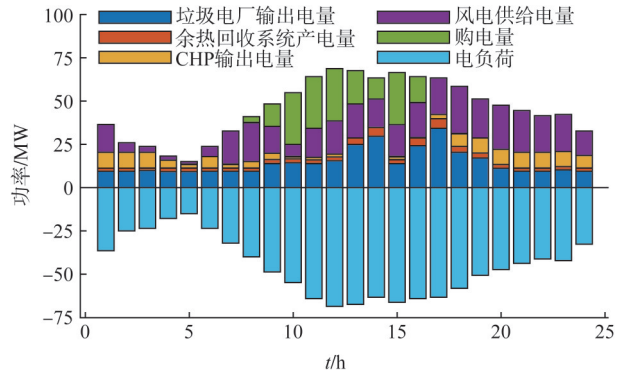


图 9 电平衡

Fig. 9 Electric balance

由图 10 可得：1—8 时和 20—24 时，垃圾焚烧电厂处于基础运行状态，可回收余热也处于稳定状态。10—14 时，垃圾电厂出力增加，余热回收量同步增加，而此时热负荷需求较小，富余热量通过储热罐存储。1—9 时和 18—23 时，热负荷需求增大，主要通过 GB 和 CHP 机组产热进行满足。同时优先对储热罐进行放热，使得垃圾焚烧电厂的余热得到充分利用。24 时，此时热电负荷需求小且风电出力

富余, 并因为储气罐受运行约束的影响, 导致 P2G 产生多余的甲烷无法存储。为了促进风电消纳, 通过燃气机组燃气产热将多余部分甲烷转化成热量进行存储。因此说明 IES 通过余热回收梯级利用提高了能源利用率, 很好地满足热电需求。

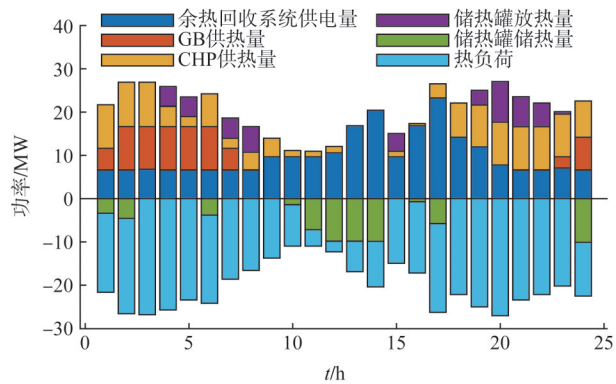


图 10 热平衡
Fig. 10 Heat balance

由图 11 可得: 购气主要集中在 18—23 时, 该时段风电主要直接供给电负荷, 因此 P2G 产生的甲烷较少, 需额外购气。10—17 时, 焚烧垃圾量增多, 渗滤液处理系统产生的甲烷增多, 而此时段 GB 与 CHP 机组不出力, 通过储气罐对多余甲烷进行存储。由此说明, 风电与 P2G 结合达到消纳风电的作用, 减少了对外部气源的依赖, 同时利用垃圾渗滤液产生的甲烷, 减少了购气成本。

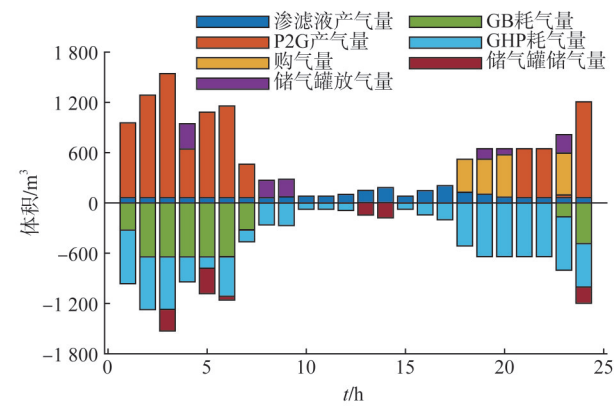


图 11 气平衡
Fig. 11 Gas balance

4.3 优化模型方案对比分析

为了验证本文所提优化模型的稳定性与经济-环保效益, 设计 6 种不同方案对优化模型进行比较分析。方案信息如表 3 所示。

表 3 方案信息

Tab. 3 Program information

方案	垃圾焚烧 电厂	渗滤液灰 氧处理	余热梯级利用技术		P2G 设备
			ORC+HP	S-CO ₂	
1	×	×	×	×	√
2	√	×	×	×	√
3	√	√	×	×	√
4	√	√	√	×	√
5	√	√	√	√	×
6	√	√	√	√	√

4.3.1 稳定性校验

文中通过 Weibull 分布模拟预测风速集计算得到的风电波动域, 需根据风电波动所带来的正负偏差对系统运行稳定性进行校验。表 4 为风电极端场景下不同运行方案的结果对比。

表 4 风电极端场景下不同方案的结果对比

Tab. 4 Comparison of results of different schemes in extreme scenarios of wind power

运行数据	正偏差最大场景			负偏差最大场景		
	方案 1	方案 2	方案 6	方案 1	方案 2	方案 6
购电成本/万元	11.49	10.29	8.95	13.71	12.92	12.87
购气成本/万元	0.96	0.61	0	1.58	1.1	0.71
运维成本/万元	4.41	4.47	4.3	4.29	4.33	4.04
碳交易成本/万元	1.84	1.82	1.33	2.83	2.79	2.95
弃风成本/万元	1.43	1.24	1.47	0.95	0.8	1.02
总运行成本/万元	20.15	18.45	16.08	23.38	21.96	21.62
碳排放量/t	687.13	681	619.88	757.60	754.07	724.10

在风电正偏差最大场景下, 方案 6 的购气成本为 0, 总运行成本较方案 1、2 降低 20.19% 和 12.84%, 碳排放量相继减少 67.25 t 和 61.12 t。而在风电负偏差最大场景下, 与方案 1、2 相比, 方案 6 的总运行成本减少 1.76 万元、0.34 万元, 碳排放量减少 33.5 t 和 29.97 t。因此, 在风电极端正负偏差场景下本文所提的模型及运行策略仍能保持良好的优化性能, 表明本文方法能应对预测风速带来的不确定性影响, 有效地验证了优化模型的稳定性。

4.3.2 经济-环保效益分析

根据通过 Weibull 分布模拟计算的风电集聚类得到的典型系统风电功率预测曲线数据, 对系统运行经济-环保效益进行分析。表 5 为各方案运行数据结果。

表 5 方案运行数据对比

Tab. 5 Scheme running data comparison

运行数据	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6
购电成本/万元	27.43	13.56	12.95	12.42	11.42	11.61
购气成本/万元	6.56	2.08	1.48	1.47	3.38	0.84
运维成本/万元	2.88	4.25	4.28	4.27	3.69	4.11
碳交易成本/万元	4.38	3.42	3.34	3.25	5.84	2.76
弃风成本/万元	0	0.66	0.52	0.54	2.39	0.63
总运行成本/万元	41.26	23.99	22.59	21.98	26.73	19.96
碳排放量/t	859.17	780.09	775.54	764.97	792.60	705.34

方案2与方案1相比,含垃圾焚烧电厂的IES运行方案,其购能成本因生活垃圾燃料的经济性下降53.99%,碳交易成本降低21.91%,碳排放量减少79.08 t,总运行成本降低41.85%。说明方案2通过引入垃圾焚烧电厂可有效实现减碳效果,并大幅提升了IES的经济性与环保性。

方案3相较于方案2,利用垃圾渗滤液产生的甲烷,使得购气成本降低28.84%,提高了经济性;方案4较方案2的购能成本、碳交易成本、碳排放量都有明显降低,说明通过利用ORC+HP系统对烟气与蒸汽的余热进行回收可给IES带来经济与环保效益;方案6较方案4引入了S-CO₂系统对底灰固体高温颗粒进行余热梯级回收利用,购能成本降低7.99%、碳排放量减少59.53 t,挖掘了底灰固体高温颗粒的节能利用潜力,有效实现了余热梯级利用技术的经济环保效益;通过加入P2G,方案6的弃风成本较方案5,大幅降低73.64%。文中弃风惩罚价格高于购电价格,因此为了满足负荷需求以及节约成本,会优先使用风电。在此基础上,模型目标函数通过弃风成本约束限制弃风量,并通过P2G将富余风电转化为甲烷存储,有效实现风电消纳。

综上所述,方案6均优于其余方案,本文所提的优化模型挖掘了垃圾渗滤液产甲烷和高温底灰固体颗粒余热潜力,降低了经济成本以及减少碳排放,有效地说明了该模型具备经济-环保效益。

4.4 余热梯级利用对碳排放的影响

图12为不同余热梯级利用技术方案下具体碳排放的情况。由于本文设定垃圾电厂中垃圾配额固定,不同方案中生活垃圾均被完全燃烧,故产生的碳排放量均为一致。

方案4较方案3引入ORC+HP系统利用蒸汽与

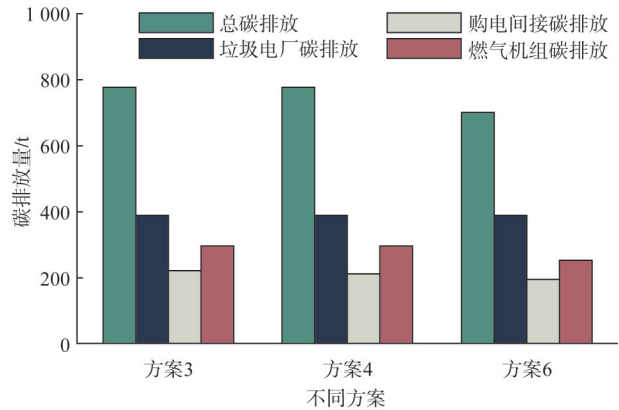


图12 不同方案下碳排放情况

Fig. 12 Carbon emissions under different scenarios

烟气余热,总碳排放减少4.55 t。方案6通过超临界CO₂布雷顿循环技术充分挖掘高温底灰固体颗粒余热潜力,该方案总碳排放量705.34 t,较方案3减少74.75 t,降低了9.58%。购电与燃气机组碳排放分别减少22.13 t和45.87 t,同时购电碳排放占总碳排放比重下降0.16%。有效说明了余热梯级利用技术不仅可以减少热量损失达到减碳目的,还可进一步减少IES对外部能源的依赖,提高了IES的能源自供能力。

5 结论

本文将垃圾焚烧电厂引入IES,提出了一种考虑垃圾焚烧电厂与余热梯级利用技术的IES减碳协同优化方法,并通过碳排放核算模型进行减碳效果验证。通过算例分析可以得出以下结论。

1)将生活垃圾渗滤液厌氧处理后产生的甲烷利用至IES燃气机组中燃烧,有效地减少了系统购气成本,提高了系统运行经济性,同时减少了对外部气源的依赖程度。

2)垃圾焚烧电厂通过余热回收与梯级利用技术提高了能源利用率,有效减少碳排放。回收的余热经过膨胀机做功实现余热向电能转换,体现能源协同运行,提高了系统运行效率与低碳运行能力。

3)通过设计超临界CO₂布雷顿循环系统实现对高温底灰固体颗粒余热回收,进一步挖掘了垃圾焚烧电厂中余热潜力。

4)P2G具有能源耦合的作用,风电与P2G结合达到消纳风电的作用,减少弃风损失,兼具经济效益与环保效益。

参考文献

- [1] 康重庆, 杜尔顺, 郭鸿业, 等. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1741 – 1750.
KANG Chongqing, DU Ershun, GUO Hongye, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1741 – 1750.
- [2] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[R]. 北京: 中华人民共和国国务院, 2020.
- [3] 李强, 王璇, 据诚, 等. 基于广义储能的多时间尺度综合能源系统优化调度模型[J]. 南方电网技术, 2024, 18(9): 117 – 125, 137.
LI Qiang, WANG Xuan, JU Cheng, et al. Optimal scheduling model of multi-time scale integrated energy system based on generalized energy storage[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(9): 117 – 125, 137.
- [4] 陈炎森, 王鹏宇, 杨义, 等. 基于混合自动机的综合能源系统状态转移空间建模[J]. 南方电网技术, 2023, 17(1): 103 – 113.
CHEN Yansen, WANG Pengyu, YANG Yi, et al. State transition space modeling of integrated energy systems based on hybrid automata[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(1): 103 – 113.
- [5] DE CAMPOS V A F, SILVA V B, CARDOSO J S, et al. A review of waste management in Brazil and Portugal: waste-to-energy as pathway for sustainable development[J]. Renewable Energy, 2021(178): 802 – 820.
- [6] HAN X, CHANG H, WANG C, et al. Tracking the life-cycle greenhouse gas emissions of municipal solid waste incineration power plant: a case study in Shanghai[J]. Journal of Cleaner Production, 2023(398): 136635.
- [7] JU L, YIN Z, ZHOU Q, et al. Nearly-zero carbon optimal operation model and benefit allocation strategy for a novel virtual power plant using carbon capture, power-to-gas, and waste incineration power in rural areas[J]. Applied Energy, 2022(310): 118618.
- [8] WU Yunna, TAO Yao, DENG Zhongqing, et al. A fuzzy analysis framework for waste incineration power plant comprehensive benefit evaluation from refuse classification perspective[J]. Journal of Cleaner Production, 2020(258): 1 – 1.
- [9] AGHAPOUR SABAGH F, HOSSAINPOUR S, POURHEMMATI S. Energy, exergy, and economic evaluation of integrated waste incineration facility with a thermal power plant[J]. Energy Conversion and Management, 2023(20): 100434.
- [10] 黄婧杰, 刘倭志, 殷旭峰, 等. 碳循环利用的垃圾焚烧电厂-烟气处理-P2G协调优化运行[J]. 中国电力, 2022, 55(3): 152 – 158.
HUANG Jingjie, LIU Louzhi, YIN Xufeng, et al. Coordinated and optimized operation of waste incineration plant-flue gas treatment-P2G with carbon cycle[J]. Electric Power, 2022, 55(3): 152 – 158.
- [11] HUANG W, MAREFATI M. Development, exergoeconomic assessment and optimization of a novel municipal solid waste-incineration and solar thermal energy based integrated power plant: An effort to improve the performance of the power plant[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023(172): 562 – 578.
- [12] ZHENG W, XU Z, SHAO Z, et al. Optimal dispatch of nearly-zero carbon integrated energy system considering waste incineration plant-carbon capture system and market mechanisms[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(69): 27013 – 27031.
- [13] JIA D, SHEN Z, LI X, et al. Bi-level scheduling model for a novel virtual power plant incorporating waste incineration power plant and electric waste truck considering waste transportation strategy[J]. Energy Conversion and Management, 2023(298): 117773.
- [14] 蒋文化, 陈刚, 于玉彬, 等. 新AB工艺在垃圾渗滤液处理领域的应用[J]. 给水排水, 2023, 59(1): 61 – 65.
JIANG Wenhua, CHEN Gang, YU Yubin, et al. Application of new AB process in landfill leachate treatment[J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 59(1): 61 – 65.
- [15] LIU C, HUANG Y, WANG X, et al. Experimental study on adsorption of PbCl₂ and CdCl₂ on kaolin modified by leachates from municipal solid waste incineration power plant[J]. Chemosphere, 2023(340): 139970.
- [16] WANG L, TELES M P R, YU H, et al. Waste incineration and heat recovery hybridized with low-focus fresnel lens solar collectors for sustainable multi-generation; a thorough techno-economic- environmental analysis and optimization[J]. Chemosphere, 2023(346): 140409.
- [17] 钟吴君, 潘轩, 范文帅, 等. 含余热回收装置及压缩式热泵的垃圾焚烧电厂能效优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(3): 117 – 124.
ZHONG Wujun, PAN Xuan, FAN Wenshuai, et al. Energy efficiency optimization of waste incineration power plant with waste heat recovery device and compression heat pump[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(3): 117 – 124.
- [18] PAN M, LU F, ZHU Y, et al. 4E analysis and multiple objective optimizations of a cascade waste heat recovery system for waste-to-energy plant[J]. Energy Conversion and Management, 2021(230): 151210.
- [19] LIM L H, TAN P, CHAN W P, et al. A techno-economic assessment of the reutilisation of municipal solid waste incineration ash for CO₂ capture from incineration flue gases by calcium looping[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 464: 142567.
- [20] 栗劲松. 基于LNG和生活垃圾多能互补的综合能源系统性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [21] 叶文浩, 陈耀红, 黄力森, 等. 计及碳排放和垃圾发电的综合能源系统日前区间优化[J/OL]. 电测与仪表: 1 – 9[2023 – 06 – 16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220926.1412.002.html>.
- [22] YE Wenhao, CHEN Yaohong, HUANG Limiao, et al. Day-ahead interval optimization of integrated energy system considering carbon emissions and waste-to-energy generation[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1 – 9[2023 – 06 – 16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220926.1412.002.html>.
- [22] ZHAO H, CAO Y, WANG X, et al. Distributionally robust optimization for dispatching the integrated operation of rural multi-energy system and waste disposal facilities under uncertainties[J]. Energy for Sustainable Development, 2023(77): 101340.

(下转第 149 页 Continued on Page 149)