

太阳能与沼气耦合综合能源系统容量与运行联合优化

李金生¹, 刘 超², 彭煜焜¹, 高 光³, 张雪莉⁴, 闫晓强⁵

(1. 张家口开放大学开放教育中心, 张家口 075041; 2. 河北建筑工程学院人事处, 张家口 075031;
3. 张家口开放大学教务处, 张家口 075041; 4. 河北大唐国际张家口热电有限责任公司, 张家口 075031;
5. 张家口开放大学教学科研处, 张家口 075041)

摘 要: 设计一种太阳能与沼气耦合综合能源系统, 并提出容量与运行联合优化方法。首先, 引入沼气生产的热力学模型, 构建容量-运行双层优化模型。上层优化沼气池大小以及能量转换和储能设备的容量, 从而最大限度地降低年总成本; 下层以上层结果为约束, 优化能量转换和储能设备的运行方案, 使运行成本最小化。其次, 通过将非线性规划法集成到遗传算法中, 求解模型以确定系统的最优容量配置和运行方案。最后, 通过5个仿真场景验证所提系统及联合优化方法的有效性。结果表明, 采用该方法优化的太阳能与沼气耦合综合能源系统具有最佳的经济性能, 且用能方案高效合理。

关键词: 可再生能源; 优化; 综合能源系统; 太阳能; 沼气

中图分类号: TM73

文献标志码: A

0 引 言

发展可再生能源是摆脱化石燃料依赖和气候变暖的重要手段^[1-2]。生物质能因其来源广泛且碳排放低的特性, 成为极具潜力的可再生能源^[3]。沼气通过生物质原料(如动物粪便、农业废弃物、工业废料和生活垃圾)的厌氧消化产生^[4], 推动了生物质能的广泛应用^[5], 但其当前利用效果仍不理想^[6]。特别是在农村地区, 沼气常被直接燃烧用于取暖或炊事, 造成能源浪费和环境污染^[7]。考虑到沼气的丰富性和广泛分布, 非常适合作为分布式综合能源系统的能源输入^[8]。文献[9]指出通过综合能源系统可提高生物质能利用率。与传统分布式能源系统相比, 基于沼气的综合能源系统在降低化石能源消耗和碳排放方面具有显著优势^[10]。与太阳能和风能不同, 沼气不受天气条件影响, 是一种稳定的可再生能源, 能够持续供能^[11]。但实际运行中, 沼气的稳定生产需要热能维持发酵温度。沼气池容量确定后, 环境温度持续波动会导致沼气池的热负荷变化。尽管生物质气有利于降低综合能源系统的能耗和碳排放, 但也增加了系统设计的复杂性和难度。

已有多种优化方法用于配置基于生物质气的综合能源系统容量^[12-13]。考虑到沼气生产的热消耗, 部分研究建立了沼气发酵罐的热负荷模型, 并优化了沼气-太阳能多能源系统的容量。这些研究主要关注系统容量优化, 缺乏先进的运行优化技术。然而, 生物质气-太阳能中环能源系统的容量配置与运行优化深度耦合。具体而言, 每日沼气产量不仅限制能

量转换组件的容量, 还影响系统热能分布。

目前沼气与太阳能耦合综合能源系统容量与运行联合优化研究较少。文献[14]开发了沼气-太阳能多能源系统的两阶段规划模型, 并利用 Benders 分解法优化配置方案; 文献[15]提出一种嵌套优化方法, 用于含光伏的沼气冷热电联供系统容量配置与运行方案优化, 提高了系统经济性和可再生能源利用率; 文献[16]开发了基于光伏和沼气的综合能源系统混合整数线性模型, 并通过分支定界法优化了能源设备的容量和输出计划; 文献[17]利用混合整数线性规划方法获得了光伏与生物质能混合能源系统的最优容量和运行方案。然而, 沼气日产量是影响系统配置和运行方案的关键设计参数, 但现有优化方法多将其作为给定值而非优化变量, 未能充分发挥生物质能与太阳能的互补耦合优势, 且配置方案难以实际应用。

为解决上述问题, 设计一种太阳能与沼气耦合综合能源系统及其容量与运行联合优化方法, 以最大限度开发利用生物质能。同时, 分析了6种仿真场景下多能源系统的投资成本、运行方案和碳排放。本研究的主要贡献如下:

1) 系统设计中引入基于热力学的沼气生产模型, 为实现稳定的沼气日生产量, 将系统热能输出返回沼气池, 维持恒温发酵, 保证生物质能的高效利用;

2) 构建了双层迭代优化模型, 模型包含大量决策变量和非线性约束, 旨在优化组件容量和运行方案, 最小化系统年度总成本。采用遗传算法与非线性规划法相结合的混合算

法求解该复杂模型。

3) 设置了 5 种仿真场景, 验证了所设计的太阳能与沼气耦合综合能源系统及其联合优化方法的有效性与先进性, 能够为生物质能和太阳能资源丰富的农村地区提供实用、可持续发展的低碳供能案例参考。

1 系统描述

1.1 系统结构

针对生物质能利用效果差的问题, 设计一种太阳能与沼气耦合综合能源系统, 如图 1 所示。该系统集成了太阳能、沼气、电力、热能和冷能等多种形式的能源。太阳能和生物质能(以牛粪为主)分别通过太阳电池和沼气发酵系统转换为电能和沼气。为保证沼气的连续高效生产, 采用中温发酵, 将沼气池持在 35 °C。由于散热, 沼气池容量和发酵温度确定后, 其热负荷随环境温度而变化。

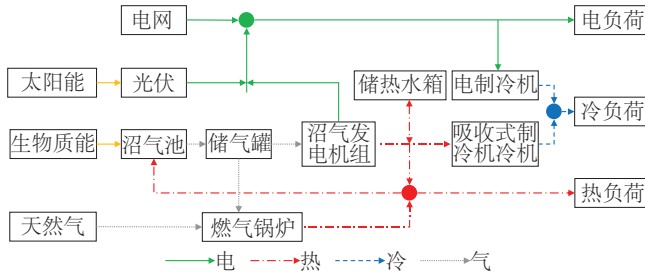


图1 太阳能与沼气耦合综合能源系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of solar-biogas integrated energy system

电力负荷由光伏系统和沼气发电机组提供, 系统并网运行以确保电能供需平衡。当电能供应不足时从电网购电, 多余电能可售回电网。发电机组余热由热回收单元收集, 与燃气锅炉一起用于满足建筑热负荷、吸收式制冷机和沼气池的热能需求。冷负荷由电制冷机和吸收式制冷机满足, 优先使用吸收式制冷机, 电制冷机作为备用。由于沼气使用受其日产量限制, 当沼气不足时, 采用天然气作为备用燃料驱动锅炉补充供热。此外, 安装储热水箱以提高系统运行灵活性和余热利用率。

1.2 能量流与设备模型

该综合能源系统的电、热、多能流能量供需平衡关系可表示为:

$$E_{pv}(t) + E_{bpgu}(t) + E_{grid}(t) = E_{load}(t) + E_{ec}(t) \quad (1)$$

$$Q_{rh}(t) + Q_{b,h}(t) + Q_{hs,h}(t) = Q_{load,h}(t) + Q_{ad,h}(t) + Q_{ac,rh}(t) \quad (2)$$

$$Q_{ac,c}(t) + Q_{ec,c}(t) = Q_{load,c}(t) \quad (3)$$

式中: E_{pv} ——光伏输出电功率, kW; E_{bpgu} ——沼气发电机组输出电功率, kW; E_{grid} ——系统与电网交互电功率($E_{pgu} > 0$ 为购电, $E_{bpgu} < 0$ 为售电), kW; E_{load} ——电负荷, kW; Q_{rh} ——发电机

组回收热功率, kW; $Q_{b,h}$ ——燃气锅炉输出热功率, kW; $Q_{hs,h}$ ——储热水箱热功率($Q_{hs,h} < 0$ 为储能, $Q_{hs,h} > 0$ 为放能), kW; $Q_{load,h}$ ——热负荷, kW; $Q_{ad,h}$ ——沼气池热负荷, kW; $Q_{ac,rh}$ ——吸收式制冷机消耗的余热功率, kW; $Q_{ac,c}$ ——吸收式制冷机输出冷功率, kW; $Q_{ec,c}$ ——电制冷机输出冷功率, kW; $Q_{load,c}$ ——冷负荷, kW。

1.3 设备模型

1.3.1 沼气池

现有研究常忽略沼气发酵过程中的热能需求, 偏离实际情况。发酵温度是影响沼气产率的重要因素, 但维持沼气池在 35 °C 的最佳温度需要持续供热。因此, 建立沼气池的热力学模型是优化沼气产量的前提。假设生物质原料选定后, 发酵温度是影响沼气产率的唯一因素。沼气中甲烷(CH_4)含量为 60%, 沼气池的 CH_4 产率由式(4)确定:

$$\gamma_{CH_4} = \frac{B_o S_o}{W} \left(1 - \frac{K}{\mu_m W - 1 + K} \right) \quad (4)$$

式中: B_o ——最终甲烷产量, $L(CH_4)/g(VS)$; S_o ——物料的总挥发性固体浓度, $g(VS)/L$; W ——水力停留时间, d; K ——沼气池动力参数。 μ_m 可由式(5)计算得到:

$$\mu_m = 0.013T_{ad} - 0.129 \quad (5)$$

式中: T_{ad} ——沼气池发酵温度, °C。

沼气池体积可由沼气日产量决定:

$$V_{ad} = \frac{V_{CH_4}}{\gamma_{CH_4}} \quad (6)$$

进入沼气池的物料为:

$$q_v = \frac{V_{ad}}{24W} \quad (7)$$

沼气池所需热能通常由两部分组成: 一部分用于对物料进行预热, 另一部分用于补充热损失以维持发酵温度。沼气池的热能公式如下:

$$\rho V_{ad} S_{bf} \frac{dT_{ad}}{d\tau} = Q_{ad} - q_v \rho S_{bf} (T_{ad} - T_a) - Q_{loss} \quad (8)$$

式中: β ——生物质原料的密度, kg/m^3 ; S_{bf} ——生物质原料的比热容, $J/(kg \cdot K)$ 。假设它们的值与水相同, 沼气池消耗的热量为:

$$Q_{loss} = UA(T_{ad} - T_a) \quad (9)$$

式中: U ——总换热系数, 设为 $0.01 \text{ kW}/(m^2 \cdot ^\circ C)$, A ——沼气池表面积, m^2 。这里使用圆柱形沼气池, 推荐宽高比为 60%^[18]。

1.3.2 沼气发电机组

以沼气为燃料的发电机组是系统的核心电力组件。其额定发电效率为:

$$\eta_{bpgu, rated} = \left(0.102 \frac{L_{bio}}{L_{ng}} + 0.897 \right) 28.08 (N_{bpgu})^{0.0563} \quad (10)$$

式中: L_{bio} ——沼气低热值, $kW \cdot h/m^3$; L_{ng} ——天然气低热值, $kW \cdot h/m^3$; N_{bpgu} ——沼气发电机组额定容量, kW。机组的沼气消耗可计算为:

$$F_{\text{bpgu}}(t) = \frac{E_{\text{bpgu}}(t)}{\eta_{\text{bpgu}}(t)} \quad (11)$$

式中: η_{bpgu} ——沼气发电机组电效率。由于光伏发电的间歇性和负荷的时变性, 机组通常处于非设计工况。实时电效率可计算为^[19]:

$$\eta_{\text{bpgu}}(t) = \eta_{\text{bpgu, rated}} \left(0.13 + 2.47P_{\text{bpgu}}(t) - 1.6P_{\text{bpgu}}^2(t) \right) \quad (12)$$

式中: P_{bpgu} ——发电机组负载率。机组余热回收功率为:

$$Q_{\text{ch}}(t) = F_{\text{bpgu}}(t) (1 - \eta_{\text{bpgu}}) \eta_{\text{ch}} \quad (13)$$

式中: η_{ch} ——余热回收效率。

1.3.3 制冷机组

电制冷机和吸收式制冷机的输出冷功率分别由式(14)和式(15)计算:

$$Q_{\text{ec, c}}(t) = E_{\text{ec}}(t) \eta_{\text{ec}} \quad (14)$$

$$Q_{\text{ac, c}}(t) = Q_{\text{ac, rh}}(t) \eta_{\text{ac}} \quad (15)$$

式中: η_{ec} ——电制冷机制冷效率; η_{ac} ——吸收式制冷机制冷效率。

1.3.4 燃气锅炉

燃气锅炉的输出热功率为:

$$Q_{\text{b, h}}(t) = F_{\text{b}}(t) \eta_{\text{b}} \quad (16)$$

式中: η_{b} ——燃气锅炉的制热效率; F_{b} ——锅炉消耗的燃气功率, kW。

1.3.5 储热水箱

储热水箱提高了余热的利用效率, 受如下约束:

$$Q_{\text{sta}}(t+1) = \eta_{\text{hs}} Q_{\text{sta}}(t) + Q_{\text{hs, h}}(t) \quad (17)$$

$$Q_{\text{sta}}(1) = Q_{\text{sta}}(1+K) \quad (18)$$

式中: Q_{sta} ——储热水箱的储能状态, kW·h。由(13)约束一个运行周期(K)内, 储热水箱的始末状态一致。

2 容量与运行联合优化

为实现生物质能的高效利用, 引入基于热力学模型的沼气生产模型, 进而提出容量与运行联合优化方法。该方法通过建立双层交互机制实现嵌套优化。如图2所示, 上层为容量配置层, 优化沼气池大小以及能量转换和储能设备的容量,

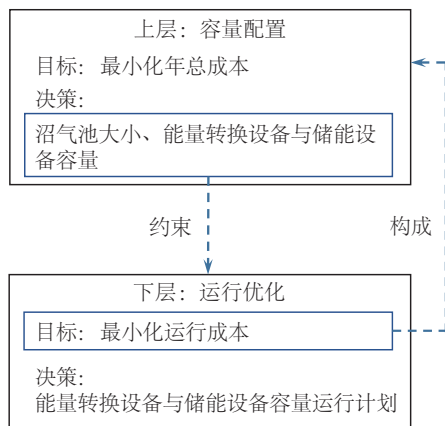


图2 联合优化框架

Fig.2 Joint optimization framework

从而最大限度地降低年总成本。然后, 将配置结果传递给下层, 作为运行优化的约束, 进而优化能量转换和储能设备的运行方案, 使运行成本最小化。因下层优化目标是上层优化目标的一部分, 所以下层模型将优化结果返回给上层进行迭代计算, 最后得出最优容量和运行方案。

2.1 上层优化模型

2.1.1 目标函数

上层模型以综合能源系统年总成本最低为目标, 目标函数为:

$$\min f_{\text{upper}} = C_{\text{ies}} = C_{\text{ic}} + C_{\text{oc}} + C_{\text{mc}} \quad (19)$$

式中: C_{ic} ——年化投资成本, 元; C_{oc} ——年运行成本, 元; C_{mc} ——年维护成本, 元。 C_{ic} 可由式(20)计算:

$$C_{\text{ic}} = \sum_{i \in \Omega} N_i U_{\text{C}, i} R_i \quad (20)$$

式中: N_i ——设备 i 的容量, kW·h; $U_{\text{C}, i}$ ——设备 i 的单位容量投资成本, 元/kW; Ω ——设备集合; R_i ——投资回收系数, 可由式(21)计算:

$$R = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (21)$$

式中: r ——利率, 为 6%; n ——设备寿命, a。

年运行成本包括生物质原料(C_{bf})、天然气(C_{ng})、电网交互成本(C_{grid})和碳排放成本。计算方法如下:

$$\begin{aligned} C_{\text{oc}} &= \sum_{d=1}^{365} C_{\text{oc}, d} \\ &= \sum_{d=1}^{365} (C_{\text{bf}, d} + C_{\text{ng}, d} + C_{\text{grid}, d} + C_{\text{et}} \cdot C_{\text{E}, d}) \end{aligned} \quad (22)$$

式中: C_{et} ——碳税, 元/kg; C_{E} ——碳排放量, kg。日运行成本($C_{\text{oc}, d}$)由下层优化模型确定。

维护成本为:

$$C_{\text{mc}} = \sum_{i \in \Omega} N_i U_{\text{MC}, i} \quad (23)$$

式中: $U_{\text{MC}, i}$ ——设备 i 的单位容量维护成本, 元/kW。

运行成本包括燃料成本、购电成本和碳排放成本, 计算为:

$$C_{\text{oc}} = C_{\text{fuel}} + C_{\text{grid}} + C_{\text{e}} \cdot C_{\text{E}} \quad (24)$$

式中: C_{e} ——碳税, 元/kg。

2.1.2 决策变量

上层模型的决策变量为、光伏、沼气发电机组和储热水箱的容量和沼气日产量, 表示为

$$X_1 = [D_{\text{bio}}, N_{\text{pv}}, N_{\text{bpgu}}, N_{\text{hs}}] \quad (25)$$

式中: D_{bio} ——沼气日产量, Nm³/d。然后可以计算其他设备容量, 其中可以通过 D_{bio} 计算沼气池的大小。

2.1.3 约束条件

上层模型应满足以下约束:

$$0 \leq D_{\text{bio}} \leq D_{\text{bio, max}} \quad (26)$$

$$0 \leq N_{\text{pv}} \leq N_{\text{pv, max}} \quad (27)$$

$$0 \leq N_{\text{bpgu}} \leq N_{\text{bpgu, max}} \quad (28)$$

$$0 \leq N_{hs} \leq N_{hs, \max} \quad (29)$$

2.2 下层优化模型

2.2.1 目标函数

下层模型以上层模型的配置结果为约束,最小化系统日运行成本,故目标函数表示为:

$$\min f_{\text{lower}} = C_{oc,d} \quad (30)$$

$$C_{oc,d} = \omega_{ng,d} \left(\frac{P_{ng}}{Q_{LHV}} + C_{et} \mu_{ng} \right) \left[\sum_{t=1}^{24} (F_{bpgu,d}(t) + F_{b,d}(t)) \Delta t - D_{bio} Q_{LHV} \right] + C_{bf,d} + C_{et} \mu_{bio} F_{bio,d} + \sum_{t=1}^{24} [(P_{grid}(t) + C_{et} \mu_{grid}) E_{grid,d}(t)] \quad (31)$$

$$\omega_{ng,d} = \begin{cases} 1, & \sum_{t=1}^{24} (F_{bpgu,d}(t) + F_{b,d}(t)) \Delta t - D_{bio} L_{bio} \geq 0 \\ 0, & \sum_{t=1}^{24} (F_{bpgu,d}(t) + F_{b,d}(t)) \Delta t - D_{bio} L_{bio} < 0 \end{cases} \quad (32)$$

$$F_{bio,d} = \begin{cases} D_{bio} L_{bio}, & \sum_{t=1}^{24} (F_{bpgu,d}(t) + F_{b,d}(t)) \Delta t - D_{bio} L_{bio} \geq 0 \\ \sum_{t=1}^{24} (F_{bpgu,d}(t) + F_{b,d}(t)) \Delta t, & \sum_{t=1}^{24} (F_{bpgu,d}(t) + F_{b,d}(t)) \Delta t - D_{bio} L_{bio} < 0 \end{cases} \quad (33)$$

式中: μ_{bio} ——沼气的碳排放因子, $\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; μ_{ng} ——天然气的碳排放因子, $\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; μ_{bio} ——电网的碳排放因子, $\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; P_{ng} ——天然气价格, $\text{元}/\text{m}^3$; P_{grid} ——购电价格和售电价格, $\text{元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; $F_{bio,d}$ ——日沼气消耗量, $\text{kW} \cdot \text{h}$; $C_{bf,d}$ 由生物质原料的单价和流速决定; $\omega_{ng,d} = 1$ 表示用天然气驱动锅炉。

2.2.2 决策变量

下层模型的决策变量为沼气发电机组的输出计划,表示为:

$$X_2 = [E_{bpgu}(1), \dots, E_{bpgu}(24)] \quad (34)$$

2.2.3 约束条件

沼气发电机组是电与热能耦合的核心部件:一旦对其电功率进行优化,就可得到余热的输出值。进而制定了储热水箱的余热跟踪储能计划,最大限度地利用余热。然后,根据分析的能量平衡方程,可以计算出其他设备的运行方案。

运行优化模型受能量平衡约束,同时受设备模型约束。需求响应策略旨在将部分高峰负荷转移至低谷时段,从而节约购电成本,如下所示:

$$\sum_{t=1}^{24} F_{bpgu}(t) \Delta t \leq D_{bio} Q_{LHV_{bio}} \quad (35)$$

$$0 \leq E_{bpgu}(t) \leq N_{bpgu} \quad (36)$$

2.3 求解方法

为求解上述模型,本研究将非线性优化法嵌入遗传算法中。为了计算个体适应度,遗传算法反复调用稀疏非线性优

化器来优化每个个体的运行方案并使运行成本最小化,然后将结果返回来计算每个个体的年总成本,从而进行迭代计算,最终得到系统最优配置方案。

3 算例分析

3.1 参数设置

以图1所示系统为配置对象,为缩短求解时间,采用北方某城镇园区的典型日负荷(夏季、过渡季和冬季),而非全年负荷。图3和图4分别展示了典型日的光伏发电和负荷情况。表1和表2分别汇总了设备的主要经济参数和效率参数,表3列出了分时电价。电网排放转换系数为 $0.968 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,碳税单价 $0.3 \text{ 元}/\text{kg}$ 。假设沼气生产系统成本为 $3000 \text{ 元}/\text{m}^3$ [20],生物质原料价格为 $250 \text{ 元}/\text{t}$ [21]。天然气和沼气的技术参数见表4。

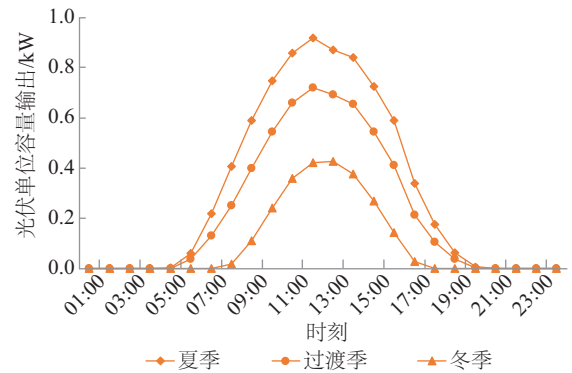
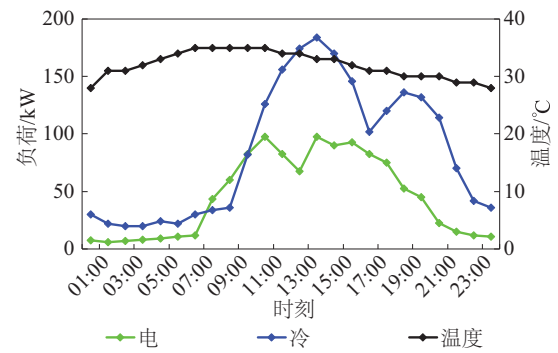
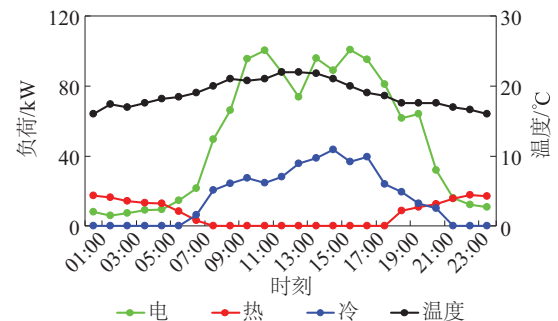


图3 典型日光伏单位容量输出功率

Fig. 3 photovoltaic unit capacity output power on typical days



a. 夏季典型日



b. 过渡季

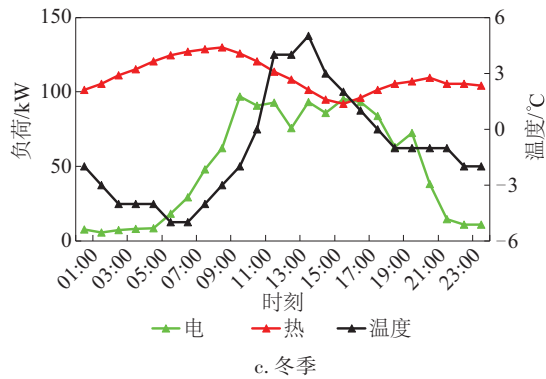


图4 典型日负荷

Fig. 4 Loads on typical days

通过对比 5 个仿真场景,验证了所提系统及其联合优化方法的先进性与有效性,仿真场景具体设置如下:

场景 1:对太阳能与沼气耦合综合能源系统的容量配置和运行方案进行联合优化。

表1 设备主要经济参数

Table1 Main economic parameters of devices

设备	购置成本/ (元/kW)	年维护成本/(元/kW)	寿命/a
光伏	3400	100	25
沼气发电机组	4500	45	20
吸收式制冷机	1200	30	20
燃气锅炉	330	38	15
电制冷机	100	35	20
储热水箱	230	5	12

表2 设备效率参数

Table 2 Efficiency parameters of devices

设备	符号	效率
吸收式制冷机	COP_{ab}	0.85
电制冷机	COP_{ac}	3.0
燃气锅炉	η_b	0.85
余热回收	η_{rh}	0.8
储热水箱	η_{hs}	0.9

表3 分时电价

Table 3 Time-of-use electricity price

电价	10:00—13:00; 07:00—10:00; 23:00—18:00—23:00	13:00—18:00	次日 07:00
购电/[元/(kW·h)]	0.925	0.614	0.402
售电/[元/(kW·h)]	0.4	0.3	0.2

表4 沼气与天然气技术参数

Table 4 Technical parameters of biogas and natural gas

气体	低热值/ (kW·h/m ³)	价格/ (元/m ³)	排放系数/ [kg/(kW·h)]
天然气	9.3	2.9	0.22
沼气	6.11		0.05

场景 2:对太阳能与天然气耦合综合能源系统的容量配置和运行方案进行联合优化。

场景 3:对基于沼气的综合能源系统的容量配置和运行方案进行联合优化。

场景 4:对太阳能与沼气耦合综合能源系统的容量配置和运行方案进行联合优化,其中预设沼气日产量为 800 m³/d。

场景 5:对太阳能与沼气耦合综合能源系统进行容量配置优化,采用以电定热的运行策略。

进一步用成本节约率来展现综合能源系统的经济性优势,表示为:

$$C_{SR} = 1 - \frac{C_{ies}}{C_{sp}} \quad (36)$$

式中: C_{sp} ——传统分供系统的年总成本,元。分供系统的电、冷、热负荷分别由电网、电冷水机组和燃气锅炉满足^[21]。

3.2 优化结果分析

表 5 总结了 5 个场景下综合能源系统的最优容量配置。由于光伏运行成本低且无碳排放,4 个场景的光伏容量均为最大值。沼气发电机组的容量受到可再生能源和需求的限制。对比场景 1 和场景 3,无光伏系统的发电机组容量增大,以满足更高的电力负荷,吸收式制冷机以回收的余热为输入,因此发电机组与吸收式制冷机呈正相关关系。储热水箱确保最大限度地利用余热。当燃料是天然气时,需要储存的余热会更多,因此场景 2 的储热水箱容量较大,而锅炉容量较小。燃气锅炉和电制冷机作为备用部件,其容量由最大输出决定,也保证了系统的可靠性。

表5 容量配置结果对比

Table 5 Comparison of capacity configuration results

设备	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	场景 5	分供系统
光伏/kW	20	20		20	20	
发电机组/kW	73	75	78	86	83	
沼气日产量/(m ³ /d)	560		650	800	500	
吸收式制冷机/kW	95	97	101	110	102	
燃气锅炉/kW	141	106	183	160	184	184
电制冷机/kW	93	103	84	75	114	130
储热水箱/(kW·h)	35	50	0	0	10	

表6总结了5种方案的全生命周期年度综合能源系统投资成本、典型日运行成本和成本节约率。虽然综合能源系统的初始投资成本较大,但运行成本明显低于传统分供系统。沼气生产系统的建设进一步增加了投资成本,但运行成本的节约更加明显。与天然气系统相比,以沼气为一次能源的系统更具经济优势。但当给定的日产气量过大时,综合能源系统的经济性会因投资过高而降低,说明了沼气日产量优化的重要性。光伏的加入可以进一步降低系统运行成本,特别是在夏季,阳光充足时,其效果更为显著。场景1、2和3展示了沼气和太阳能对改善综合能源系统经济性能的累积效应。此外,通过场景1与5的对比,验证了所提出的容量与运行联合优化方法的优越性。

表6 5个场景的经济性结果对比

Table 6 Economic differences of five scenarios

优化结果	场景1	场景2	场景3	场景4	场景5
年投资成本/元	181730	74894	202750	233390	180400
夏季典型日运行成本/元	456	1203	513	400	782
过渡季典型日运行成本/元	382	1109	427	398	554
冬季典型日运行成本/元	1491	1670	1465	1368	1568
成本节约率/%	35.8	22.79	31.62	31.41	26.33

通过对比场景1与其他仿真场景的运行情况,包括各设备供能比例与发电机组运行效率,进一步分析所提出的联合优化方法。注意,这里只分析了典型的夏季和冬季工况。图5的横轴表示系统的总能耗。用电量包括建筑物用电负荷、制冷机用电量、售电量。热耗为建筑物和沼气发酵的热负荷。由于储能单元本身不产生或转换能量,因此不考虑它。发电机组运行时的发电效率如图6所示。当机组关闭时,没有发电效率。

首先根据图5a和图6a对夏季工况进行分析。当系统配备光伏时,4种场景下光伏发电占比基本相同。在800 m³/d的沼气产量方案中,沼气发电机组全天保持高效运行,因此其电网供电比例最低,吸收式制冷机供冷比例最高。对于以天然气为一次能源的综合能源系统,电网供能比例明显偏高。从图6a可看出,由于天然气的热值高于沼气,因此在用电负荷高峰时段,发电机组的发电效率通常高于其他方案。由于电价较低和天然气价格固定,发电机组在低负荷期间关闭,导致从电网购买的电力增加。如场景3所示,当系统未配置光伏时,电力需求主要由发电机组来满足,其供电比例是所有方案中最高的。

5个场景的冬季运行情况如图5b和图6b所示。由于无冷负荷,电制冷机不工作,各方案购电比例较夏季工况明显降低。但基于沼气的系统发酵热负荷增加,与天然气系统相比,需要锅炉补充更大的加热能量。特别是场景4发酵热负荷最大,而冬季夜间用电负荷较小,需要发电机组与锅炉一起运行加热,导致机组效率较低。在场景3中,发电机组在谷负荷期间启动,以同时满足电负荷和热负荷。因此,冬季工况下天然气系统与沼气系统运行费用的差额明显小于夏季,如表6所示。

对夏季和冬季工况运行结果的综合分析表明,联合优化实现了发电机组全天高效输出。因此,生物质能可以在整个运行周期内持续供应给用户。由于光伏系统受太阳辐照度条件的影响,其输出峰值出现在高峰负荷时段。沼气的均匀分布弥补了太阳能间歇性输出特性的不足。虽然最大可用沼气产量的方案减少了对电网的依赖,但也存在发电机组运行效率低下的情况。因此,联合优化促进了两种可再生能源的互补和高效利用。这也会导致发电机组容量的降低,如表5所示。

当设计方法中未考虑运行优化方案时,发电机组运行效率低下,如夏季21:00,冬季06:00。在场景5中,夏季和冬季运行工况下发电机组供能比例最低;因此,沼气需求也是最低的。这就解释了为什么场景5的沼气日产量在表5中最低。

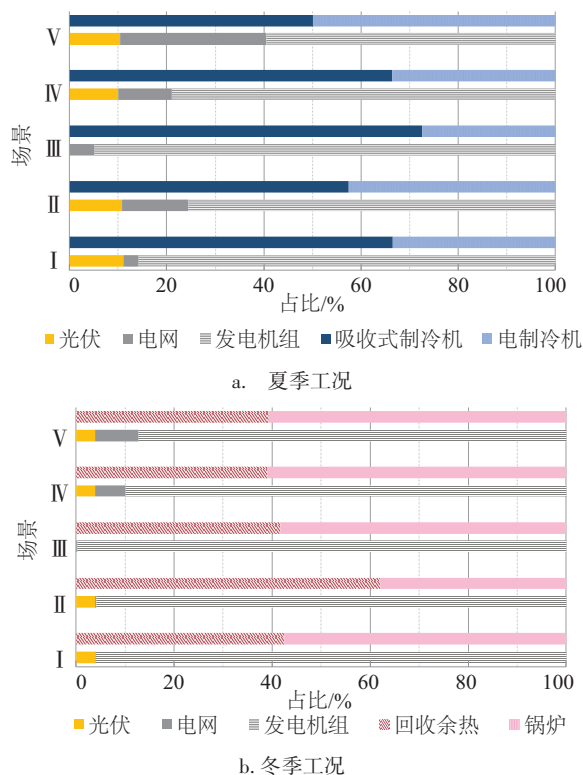


图5 5个场景各设备供能占比

Fig. 5 power supply proportion of each device in five scenarios

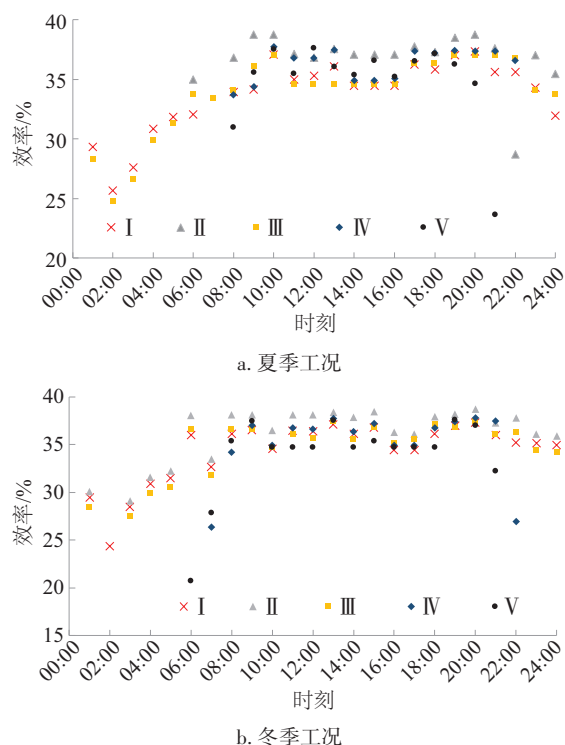


图6 5个场景的发电机组运行效率

Fig. 6 Power generation efficiency of BPGU in five scenarios

4 结 论

为实现生物质能的高效利用,本研究提出了太阳能与沼气耦合综合能源系统容量与运行联合优化方法。通过引入沼气生产的热力学模型,构建了容量-运行双层优化模型,并通过将非线性规划法集成到遗传算法完成求解。利用五种仿真场景,验证了所提方法的有效性。联合优化使太阳能与沼气耦合系统解决方案更经济高效,通过联合优化能量转换和储能组件的容量和输出,避免了沼气发电机组的低效运行。与现有基于以电定热运行策略的设计方法相比,其运行成本显著降低。所提优化方法促进了综合能源系统中生物质能与太阳能的协调互补,为偏远地区生物质能和太阳能的经济低碳发展提供了指导意义。未来将进一步考虑沼气“产-运-储-用”全过程中的损耗与安全问题,从而保证优化方法的实际应用效果。

[参考文献]

- [1] 胡福年, 周小博, 张彭成, 等. 计及碳捕集的综合能源系统低碳经济优化调度[J]. 太阳能学报, 2024, 45(3): 419-427.
HU F N, ZHOU X B, ZHANG P C, et al. Low carbon economy optimal dispatching of integrated energy system taking into account carbon capture [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(3): 419-427.
- [2] ALISHAVANDI A M, MOGHADDAS-TAFRESHI S M. Optimal sizing of a multi-energy system using a multi-agent

decentralized operation model considering private-ownership [J]. Sustainable energy technologies and assessments, 2022, 49: 101699.

- [3] 杨雨莹, 任晓芬, 张景, 等. 基于改进 AHP-TOPSIS 的村镇太阳能+生物质能联合供暖综合评价[J]. 太阳能学报, 2024, 45(2): 342-350.
YANG Y Y, REN X F, ZHANG J, et al. Comprehensive evaluation of combined solar+biomass heating in villages and towns based on improved AHP-TOPSIS [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(2): 342-350.
- [4] SEVINCHAN E, DINCER I, LANG H X. Energy and exergy analyses of a biogas driven multigenerational system [J]. Energy, 2019, 166: 715-723.
- [5] KHISHTANDAR S. Simulation based evolutionary algorithms for fuzzy chance-constrained biogas supply chain design[J]. Applied energy, 2019, 236: 183-195.
- [6] SU B S, HAN W, ZHANG X S, et al. Assessment of a combined cooling, heating and power system by synthetic use of biogas and solar energy [J]. Applied energy, 2018, 229: 922-935.
- [7] SU B S, HAN W, JIN H G. Proposal and assessment of a novel integrated CCHP system with biogas steam reforming using solar energy[J]. Applied energy, 2017, 206: 1-11.
- [8] 黄文龙, 葛文超, 任洪波, 等. 全可再生能源多能互补系统优化配置与运行探索[J]. 太阳能学报, 2024, 45(5): 351-359.
HUANG W L, GE W C, REN H B, et al. Exploration of optimal configuration and operation for all-renewable multi-energy complementary systems [J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(5): 351-359.
- [9] MARAVER D, SIN A, ROYO J, et al. Assessment of CCHP systems based on biomass combustion for small-scale applications through a review of the technology and analysis of energy efficiency parameters [J]. Applied energy, 2013, 102: 1303-1313.
- [10] WANG J J, YANG K, XU Z L, et al. Energy and exergy analyses of an integrated CCHP system with biomass air gasification[J]. Applied energy, 2015, 142: 317-327.
- [11] KASAEIAN A, RAHDAN P, RAD M A V, et al. Optimal design and technical analysis of a grid-connected hybrid photovoltaic/diesel/biogas under different economic conditions: a case study [J]. Energy conversion and management, 2019, 198: 111810.
- [12] WANG J J, DONG F X, MA Z R, et al. Multi-objective optimization with thermodynamic analysis of an integrated energy system based on biomass and solar energies [J]. Journal of cleaner production, 2021, 324: 129257.
- [13] SARKAR T, BHATTACHARJEE A, SAMANTA H, et al. Optimal design and implementation of solar PV-wind-biogas-VRFB storage integrated smart hybrid microgrid for

- ensuring zero loss of power supply probability [J]. *Energy conversion and management*, 2019, 191: 102-118.
- [14] LI C B, YANG H Y, SHAHIDEHPOUR M, et al. Optimal planning of islanded integrated energy system with solar-biogas energy supply [J]. *IEEE transactions on sustainable energy*, 2020, 11(4): 2437-2448.
- [15] ZHANG L, ZHANG L Z, SUN B, et al. Nested optimization design for combined cooling, heating, and power system coupled with solar and biomass energy [J]. *International journal of electrical power & energy systems*, 2020, 123: 106236.
- [16] DI SOMMA M, YAN B, BIANCO N, et al. Multi-objective design optimization of distributed energy systems through cost and exergy assessments [J]. *Applied energy*, 2017, 204: 1299-1316.
- [17] JI L, LIANG X L, XIE Y L, et al. Optimal design and sensitivity analysis of the stand-alone hybrid energy system with PV and biomass-CHP for remote villages [J]. *Energy*, 2021, 225: 120323.
- [18] EL-MASHAD H M, VAN LOON W K P, ZEEMAN G. A model of solar energy utilisation in the anaerobic digestion of cattle manure [J]. *Biosystems engineering*, 2003, 84 (2): 231-238.
- [19] WANG J J, YANG Y. Energy, exergy and environmental analysis of a hybrid combined cooling heating and power system utilizing biomass and solar energy [J]. *Energy conversion and management*, 2016, 124: 566-577.
- [20] WU N Y, ZHAN X Y, ZHU X Y, et al. Analysis of biomass polygeneration integrated energy system based on a mixed-integer nonlinear programming optimization method [J]. *Journal of cleaner production*, 2020, 271: 122761.
- [21] LI F, SUN B, ZHANG C H, et al. A hybrid optimization-based scheduling strategy for combined cooling, heating, and power system with thermal energy storage [J]. *Energy*, 2019, 188: 115948.

JOINT OPTIMAZATION OF CAPACITY AND OPERATION FOR INTEGRATED ENERGY SYSTEMS COUPLED WITH SOLAR ENERGY AND BIOGAS

Li Jinsheng¹, Liu Chao², Peng Yukun¹, Gao Guang³, Zhang Xueli⁴, Yan Xiaoqiang⁵

(1. *Open Education Center, Zhangjiakou Open University, Zhangjiakou 075041, China;*

2. *Personnel Department, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075031, China;*

3. *Academic Affairs Office, Zhangjiakou Open University, Zhangjiakou 075041, China;*

4. *Hebei Datang International Zhangjiakou Thermal Power Co., Ltd., Zhangjiakou 075031, China;*

5. *Teaching and Research Office, Zhangjiakou Open University, Zhangjiakou 075041, China)*

Abstract: An integrated energy system coupled with solar energy and biogas is designed in this study, and a joint optimization method of capacity and operation is proposed. Firstly, a thermodynamic model of biogas production is introduced, and a capacity-operation two-layer optimization model is constructed. The upper layer optimizes the size of the biogas digester and the capacity of energy conversion and energy storage equipment to minimize the annual total cost. The lower layer takes the upper-layer results as constraints to optimize the operation plan of energy conversion and energy storage equipment, minimizing the operation cost. Secondly, by integrating the nonlinear programming method into the genetic algorithm, the model is solved to determine the optimal capacity configuration and operation scheme of the system. Finally, five simulation scenarios are used to verify the effectiveness of the proposed system and the joint optimization method. The results show that the integrated energy system optimized by the proposed method has the best economic performance, and the energy consumption scheme is efficient and reasonable.

Keywords: renewable energy; optimization; integrated energy system; solar energy; biogas