

文章编号: 1673-5196(2023)06-0041-09

基于多种可再生能源的多联产系统优化配置研究

李金平^{*1,2,3}, 牛轶男^{1,2,3}, 李紫荆^{1,2,3}, 李天澍^{1,2,3}

VOJISLAV Novakovic⁴, 王春龙^{1,2,3}

(1. 甘肃省生物质能与太阳能互补供能系统重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 西北低碳城镇支撑技术协同创新中心, 甘肃 兰州 730050; 3. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050; 4. 挪威科技大学能源与过程工程系, 挪威 特隆赫姆 NO-7491)

摘要: 为提升基于多种可再生能源的多联产系统整体性能, 合理的容量配置至关重要. 针对基于太阳能、生物质能和空气能的多联产系统, 以一次能源节约率最大化、费用年值节约率最大化和二氧化碳减排率最大化作为优化目标, 以光伏光热一体化组件、内燃机、空气源热泵的容量为决策变量, 采用改进的多目标遗传算法, 利用优劣解距离法求解系统最优容量配置. 同时, 通过算例验证优化模型的可行性, 并研究系统经济性能对成本参数的敏感性. 结果表明, 优化方案在能源、经济、环境各方面都表现出很好的性能, 系统的一次能源节约率为 29.07%, 费用年值节约率为 58.15%, 二氧化碳减排率为 54.30%, 且厌氧发酵环节的成本参数对系统经济性能影响较大.

关键词: 可再生能源; 多联产系统; 多目标优化; TOPSIS 法

中图分类号: TK519 **文献标志码:** A

Study on the optimal allocation of co-production system based on multi-renewable energy

LI Jin-ping^{1,2,3}, NIU Yi-nan^{1,2,3}, LI Zi-jing^{1,2,3}, LI Tian-shu^{1,2,3}

VOJISLAV Novakovic⁴, WANG Chun-long^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Complementary Energy System of Biomass and Solar Energy, Lanzhou 730050, China; 2. China Northwestern Collaborative Innovation Center of Low-carbon Urbanization Technologies, Lanzhou 730050, China; 3. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 4. Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim NO-7491, Norway)

Abstract: In order to improve the overall performance of co-production system based on multi-renewable energy, a reasonable capacity allocation is very important. For the co-production system based on biomass, solar and air energy, the maximization of primary energy saving rate, annual cost saving rate and carbon dioxide emission reduction rate are selected as the optimization functions, and the capacity of PV/T, internal combustion engine and air source heat pump are selected as decision variables. Using the NSGA-II algorithm and weight-TOPSIS, the optimal capacity allocation is solved. Finally, the feasibility of the optimization model is validated through illustrative examples, and the sensitivity of system economic performance to cost parameters is explored. The results show that the optimized scheme exhibits excellent performance in energy, economy and environment, with a primary energy saving rate of 29.07%, an annual cost saving rate of 58.15%, and the carbon dioxide emission reduction rate of 54.30%. Furthermore, the cost parameters of anaerobic fermentation have a substantial influence on the economic performance of the system.

Key words: renewable energy; co-production system; multi-objective optimization; TOPSIS

收稿日期: 2021-12-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFE0104900), 国家自然科学基金(51676094), 甘肃省高等学校产业支撑引导项目(2019C-13, 2021CYZC-33), 兰州市人才创新创业项目(2017-RC-34)

通讯作者: 李金平(1977-), 男, 宁夏中宁人, 博士, 教授. Email: lijinp77@163.com

基于可再生能源的分布式多联产系统是将太阳能、生物质能、地热能、风能等可再生能源与天然气等化石能源耦合,或者将几种可再生能源自身耦合互补,满足用户冷、热、电、气等负荷需求的供能系统^[1]. 该系统不仅能实现能源梯级利用,显著提升综合能源利用效率,也因污染少成为我国实现 2030 碳达峰、2060 碳中和目标的重要手段. 该系统耦合多种供能技术,在达成相辅相成效果的同时,自身结构更加复杂,设备之间的配置关系进一步深化. 为提高系统的整体性能,需要对系统设备容量进行合理配置.

目前,已有诸多学者针对分布式多联产系统的配置优化展开研究. 在研究中,优化目标数量从单一转向众多^[2],除了重要的经济性指标之外^[3],能源性指标和环境性指标也成为优化过程的导向. Yousefi 等^[4]选取一次能源节约率(PESR)、费用年值节约率(ACSR)和二氧化碳减排率(CDERR)作为优化目标,对耦合太阳能的天然气分布式多联产系统进行优化. Li 等^[5]选取年度总成本和二氧化碳排放量最小作为优化目标,采用协同进化算法对太阳能和风能互补的冷热电联产系统设备容量进行优化. Wang 等^[6]选取一次能源节约率、费用年值节约率和二氧化碳减排率作为优化目标,采用多目标遗传算法(NSGA-II)对太阳能和地热能互补的分布式联产系统进行优化. Ren 等^[7]针对太阳能和地热能互补的冷热电联产系统构建了能源、经济、环境多目标优化模型,用改进的多目标遗传算法得出 Pareto 前沿解,并采用优劣解距离(TOPSIS)法进行决策.

上述研究都是针对部分可再生能源耦合天然气系统进行的容量优化. 而生物质能作为唯一的既可储存又可运输的可再生能源,自身及其气化产物可

以用作化石燃料的替代品,近年来对研究学者的吸引力可与太阳能相媲美. 涉及生物质能的多联产系统类似于常规系统,只是化石燃料被气化子系统代替,子系统内组件的增加和耦合使多联产系统的建模更加复杂,并且计算时间也更加密集. Zhang 等^[8]针对太阳能和生物质能互补的冷热电联产系统,提出了系统容量和运行策略的两阶段嵌套优化方法,优化了系统的能源、经济和环境效益. Li 等^[9]对太阳能和生物质能互补的热电气联产系统进行了优化,并通过敏感性分析得出负荷水平和原料价格对投资决策和系统总成本有很大影响. Wu 等^[10]用混合整数非线性规划法优化了太阳能、生物质能和地热能互补的冷热电多联产系统,求解其光伏设备、发动机、吸收式制冷设备和地源热泵的容量大小. 上述研究为涉及生物质能的多联产系统优化提供了参考,但对于太阳能、生物质能和空气能的多联产系统多目标优化鲜有研究,仍存在继续深入的空间.

综上所述,本文针对基于太阳能、生物质能和空气能的多联产系统,从能源、经济、环境这 3 个角度出发建立多目标优化配置模型,采用改进的多目标遗传算法得到 Pareto 前沿解,并用 TOPSIS 法进行决策,从而得到系统最优配置方案,且通过算例分析验证所提模型的可行性. 该研究将对基于多种可再生能源的多联产系统配置优化提供可借鉴的思路和方法.

1 系统构建

1.1 系统描述

图 1 是多种可再生能源互补的多联产系统流程图. 系统以生物质能、太阳能和空气能为输入,向用户输出冷、热、电、沼气和沼肥. 生物质原料在发酵

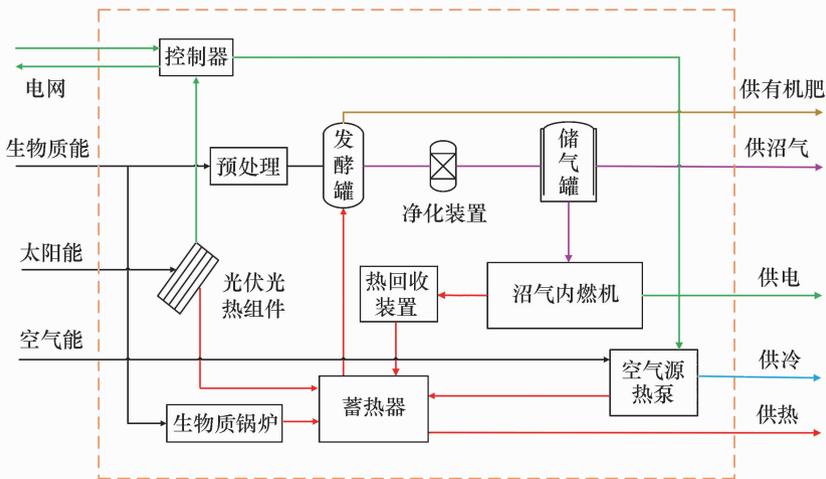


图 1 基于多种可再生能源的多联产系统

Fig. 1 Co-production system based on multi-renewable energy

罐恒温发酵后生成沼气,沼气经过净化后进入储气罐,一部分直接供给用户炊事使用,另一部分进入内燃机进行热电联产.太阳能经光伏光热一体化组件(PV/T)同时转化为热能和电能.内燃机结合PV/T组件发电供用户使用.当供电量多于需电量时,多余电量售向电网;当供电量不足时,由电网提供,保证系统供电的稳定性.内燃机发电余热和PV/T组件产生的热量在供厌氧发酵罐保温的同时,满足用户的供暖和生活热水热负荷.空气源热泵在不同季节分别进行制热和制冷满足用户需求.蓄热器是系统的储能装置.当热量不足时,采用生物质锅炉补燃,保证系统供热的可靠性.厌氧发酵过程所产沼液、沼渣经处理后成为有机肥,出售后可获得一定经济收入.

1.2 系统模型

1.2.1 厌氧反应器

厌氧反应器模型采用 Hashimoto 和 Chen 等提出的甲烷动力学方程^[11-12],即

$$V_a = \frac{q_b \varphi_v}{\gamma_v \varepsilon} \quad (1)$$

$$\gamma_v = \frac{B_0 S_0}{\text{HRT}} \left(1 - \frac{K}{\text{HRT} \cdot \mu_m + K - 1} \right) \quad (2)$$

$$K = 0.8 + 0.0016 \exp(0.06 S_0) \quad (3)$$

$$\mu_m = 0.013 T - 0.129 \quad (4)$$

式中: V_a 为发酵罐体积, m^3 ; q_b 为所需的沼气体积, m^3/d ; φ_v 为沼气中甲烷体积分数; γ_v 为池容产甲烷率, $\text{m}^3 \cdot /(\text{m}^3 \cdot \text{d})$; ε 为发酵罐容积率; S_0 为挥发性固体浓度, kg/m^3 ; HRT 为水力停留时间, d ; B_0 为有机废弃物的极限甲烷产率, m^3/kg ; K 为无量纲动力学参数; μ_m 为微生物的最大生长速率, d^{-1} ; T 为发酵温度,取值范围为 $20 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$,此处取 $37 \text{ }^\circ\text{C}$.

此外,需要不断的热量来维持恒温厌氧发酵的稳定运行,即

$$Q_f = Q_{m,\text{in}} + Q_{\text{AD},\text{loss}} \quad (5)$$

$$Q_{m,\text{in}} = q_{m,\text{in}} c_{p,\text{d}} (T - T_a) \quad (6)$$

$$Q_{\text{AD},\text{loss}} = (A_r K_r + A_f K_f + A_w K_w) (T - T_a) \quad (7)$$

式中: Q_f 为发酵过程所需热负荷, kW ; $Q_{m,\text{in}}$ 为进料增温耗热量, kW ; $Q_{\text{AD},\text{loss}}$ 为发酵罐保温耗热量, kW ; $q_{m,\text{in}}$ 为发酵罐加入新料液的质量流量, kg/s ; $c_{p,\text{d}}$ 为料液的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_a 为环境温度, $^\circ\text{C}$; A_r 为发酵罐顶部的面积, m^2 ; K_r 为发酵罐顶部的平均传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A_f 为发酵罐底部的面积, m^2 ; K_f 为发酵罐底部的平均传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A_w 为发酵罐侧壁的面积, m^2 ; K_w 为

发酵罐侧壁的平均传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.相关参数取值参考文献[13-14].

1.2.2 沼气内燃机

沼气内燃机满负荷运行时发电效率为^[15]

$$\eta_{\text{ice}}^* = \left(0.102 \frac{\text{LHV}_{\text{bg}}}{\text{LHV}_{\text{ng}}} + 0.897 \right) \times 0.2808 (P_{\text{ice},r})^{0.0563} \quad (8)$$

当内燃机以一定负荷率运行时,负荷率和实际发电效率的关系为^[16]

$$\eta_{\text{ice}} = \eta_{\text{ice}}^* (0.13 + 2.47 \times \text{PLR} - 1.6 \times \text{PLR}^2) \quad (9)$$

由此可得内燃机的发电量和可利用余热量为

$$E_{\text{ice}} = \eta_{\text{ice}} F_{\text{ice}} \quad (10)$$

$$Q_{\text{ice}} = F_{\text{ice}} (1 - \eta_{\text{ice}}) \eta_{\text{rec}} \quad (11)$$

式中: η_{ice}^* 为内燃机额定功率下的发电效率; LHV_{bg} 为进入内燃机实际燃料的热值, kJ/Nm^3 ; LHV_{ng} 为进入内燃机天然气的热值, kJ/Nm^3 ; $P_{\text{ice},r}$ 为内燃机的额定功率, kW ; η_{ice} 为内燃机部分负荷运行时发电效率; PLR 为内燃机运行时负荷率; E_{ice} 为沼气内燃机发电量, kW ; F_{ice} 为进入内燃机的沼气热量, kW ; Q_{ice} 为内燃机可利用的余热, kW ; η_{rec} 为热回收效率.

1.2.3 PV/T 组件

PV/T 组件采用扩展后 HOTTEL-WHILLIER 模型^[17],即

$$Q_{\text{pv/t}} = A_c F_R [\bar{S} - \bar{U}_L (t_{f,i} - t_a)] \quad (12)$$

$$E_{\text{pv/t}} = \frac{A_c S \eta_a}{\alpha} \left\{ 1 - \frac{\eta_r \beta_r}{\eta_a} [F_R (t_{f,i} - t_a) + \frac{\bar{S}}{\bar{U}_L} (1 - F_R)] \right\} \quad (13)$$

$$\bar{U}_L = U_L - \frac{S}{\alpha} \eta_r \beta_r \quad (14)$$

$$\bar{S} = S \left(1 - \frac{\eta_a}{\alpha} \right) \quad (15)$$

式中: $Q_{\text{pv/t}}$ 为PV/T组件的热功率, W ; A_c 为PV/T组件的面积, m^2 ; F_R 为PV/T集热器的热迁移因子; \bar{S} 为PV/T集热器每平方米吸收的当量太阳辐射, W/m^2 ; \bar{U}_L 为PV/T集热器的当量总热损失系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; U_L 为PV/T组件的总热损系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $t_{f,i}$ 为PV/T组件工质的进口温度, $^\circ\text{C}$; t_a 为外界环境温度, $^\circ\text{C}$; $E_{\text{pv/t}}$ 为PV/T组件的电功率, W ; S 为PV/T组件每单位面积吸收的太阳辐射强度, W/m^2 ; η_a 为环境温度下光伏电池的发电效率; α 为PV/T集热器的吸收率; η_r 为测试条件

下光伏电池的发电效率; β_r 为光伏电池的温度效率系数.

1.2.4 空气源热泵

空气源热泵提供的热量和冷量分别为

$$Q_{h, hp} = COP_h \cdot E_{h, hp} \quad (16)$$

$$Q_{c, hp} = COP_c \cdot E_{c, hp} \quad (17)$$

式中: $Q_{h, hp}$ 和 $Q_{c, hp}$ 分别为空气源热泵提供的热量和冷量, kW; $E_{h, hp}$ 和 $E_{c, hp}$ 分别为空气源热泵制热和制冷的耗电量, kW; COP_h 和 COP_c 分别为空气源热泵制热和制冷的能效比.

1.2.5 蓄热水箱

蓄热水箱的储能状态为

$$Q_{wst}(t) = \eta_{wst} Q_{wst}(t-1) + Q_{wst, in} - Q_{wst, out} \quad (18)$$

式中: $Q_{wst}(t-1)$ 和 $Q_{wst}(t)$ 分别为蓄热水箱储热或放热前后的储能状态, kW; $Q_{wst, in}$ 和 $Q_{wst, out}$ 分别为蓄热水箱的储热量和放热量, kW; η_{wst} 为蓄热水箱的效率.

1.2.6 生物质锅炉

生物质锅炉的输出热量为

$$Q_b = \eta_b F_b \quad (19)$$

式中: Q_b 为生物质锅炉的输出热量, kW; η_b 为生物质锅炉热效率; F_b 为输入的生物质燃料能量, kW.

2 优化方法

2.1 决策变量

多联产系统设备容量的选择对系统的整体性能有很大影响. 沼气内燃机作为供能系统的核心部件, 容量大小直接影响到其他设备的容量和运行状态. 而 PV/T 组件的能量输出具有不确定性, 需要合理地选择装机容量. 另外, 空气源热泵作为重要的电热-电冷转化设备, 可以提高系统运行的灵活性, 容量的选择也至关重要. 因此, 综合各方面因素, 本文选取沼气内燃机容量、PV/T 组件容量和空气源热泵容量作为决策变量.

PV/T 组件的出力情况由太阳辐射决定, 系统总是优先利用太阳能产生的电能和热能. 沼气内燃机的出力情况由用户负荷和 PV/T 组件的出力情况共同决定, 当 PV/T 组件产生的能量大于用户负荷时, 沼气内燃机不开启. 然而, 应尽可能根据季节负荷调整运行策略, 使内燃机尽量保持在高负荷率运行, 更好地利用产生的沼气, 提高能源利用率. 根据不同的季节负荷, 空气源热泵在制热和制冷模式之间切换, 出力情况由用户负荷、PV/T 组件和沼气内燃机的出力情况共同决定. 生物质锅炉作为补热

设备, 保证系统供能的可靠性, 视供需关系开启.

上述决策变量一旦确定, 厌氧发酵罐容积和生物质锅炉容量便可随即确定.

2.2 优化目标

评价指标可以衡量多联产系统的性能优劣, 不同的评价指标作为优化目标得到的优化结果可能完全不同. 本文以分供系统为对照, 从能源、经济和环境这 3 个方面对应选取一次能源节约率、费用年值节约率和二氧化碳减排率作为优化目标. 传统分供系统如图 2 所示.

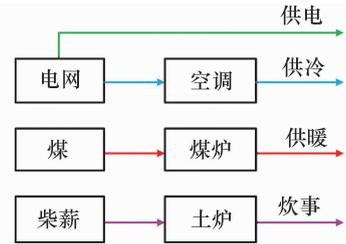


图 2 传统分供系统

Fig. 2 Traditional divided energy supply system

2.2.1 能源性目标

系统的一次能源节约率为

$$PESR = \frac{\sum_{i=1}^o F_i^{ref} - \sum_{i=1}^o F_i^{ps}}{\sum_{i=1}^o F_i^{ref}} \quad (20)$$

式中: o 为年运行小时数; F_i^{ref} 和 F_i^{ps} 分别为参考系统和多联产系统的燃料消耗量, kW.

2.2.2 经济性目标

系统的费用年值节约率为

$$ACSR = \frac{AC^{ref} - AC^{ps}}{AC^{ref}} \quad (21)$$

$$AC = ACC + AOC \quad (22)$$

$$ACC = \sum_{k=1}^l N_k C_k \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (23)$$

式中: AC^{ref} 和 AC^{ps} 分别为参考系统和多联产系统的费用年值, 元; ACC 为系统年设备投资成本, 元; N_k 为第 k 种设备的容量, kW; C_k 为第 k 种设备的单位容量造价, 元; l 为设备的种类; i 为贴现率; n 为设备的使用年限; AOC 为年运维费用, 元.

对于多联产系统来说, 运维费用包括生物质原料费用、购电-售电费用、维护管理费用和沼液-沼渣售出效益. 对于参考系统来说, 运维费用包括购电-购煤费用、购秸秆费用和维护管理费用.

2.2.3 环境性目标

系统的二氧化碳减排率为

$$CDERR = \frac{\sum_{i=1}^T CDE_i^{\text{ref}} - \sum_{i=1}^T CDE_i^{\text{ps}}}{\sum_{i=1}^T CDE_i^{\text{ref}}} \quad (24)$$

式中: CDE_i^{ref} 和 CDE_i^{ps} 分别为参考系统和多联产系统的二氧化碳排放量,kg。

2.3 约束条件

约束条件包括等式约束和不等式约束,是保证系统安全稳定运行的关键。等式约束为能量平衡约束,不等式约束为设备的容量约束和运行约束。

2.3.1 能量平衡约束

电平衡为

$$E_{\text{ice}} + E_{\text{pv/t}} + E_{\text{grid}} = E_{\text{u}} + E_{\text{hp}} + E_{\text{p}} + E_{\text{exc}} \quad (25)$$

式中: E_{grid} 和 E_{exc} 为系统购电量和售电量,kW; E_{u} 为用户电负荷,kW; E_{hp} 为热泵运行耗电量,kW; E_{p} 为系统伴随电耗,kW。

热平衡为

$$Q_{\text{ice}} + Q_{\text{pv/t}} + Q_{\text{h, hp}} + Q_{\text{wst, out}} + Q_{\text{b}} = Q_{\text{h}} + Q_{\text{f}} + Q_{\text{wst, in}} \quad (26)$$

式中: Q_{h} 为用户热负荷,kW。

冷平衡为

$$Q_{\text{c, hp}} = Q_{\text{c}} \quad (27)$$

式中: Q_{c} 为用户冷负荷,kW。

2.3.2 设备容量约束

$$P_{\text{ice}}^{\min} \leq P_{\text{ice}}^{\text{r}} \leq P_{\text{ice}}^{\max} \quad (28)$$

$$P_{\text{pvt}}^{\min} \leq P_{\text{pvt}}^{\text{r}} \leq P_{\text{pvt}}^{\max} \quad (29)$$

$$P_{\text{hp}}^{\min} \leq P_{\text{hp}}^{\text{r}} \leq P_{\text{hp}}^{\max} \quad (30)$$

式中: $P_{\text{ice}}^{\text{r}}$ 、 $P_{\text{pvt}}^{\text{r}}$ 、 P_{hp}^{r} 分别为沼气内燃机、PV/T组件、空气源热泵的安装容量,kW; P_{ice}^{\max} 、 P_{ice}^{\min} 、 P_{pvt}^{\max} 、 P_{pvt}^{\min} 、 P_{hp}^{\max} 、 P_{hp}^{\min} 分别为沼气内燃机、PV/T组件、空气源热泵的安装容量上限和下限,kW。

2.3.3 设备运行约束

$$0 \leq E_{\text{ice}} \leq P_{\text{ice}}^{\text{r}} \quad (31)$$

$$0 \leq E_{\text{pvt}} \leq P_{\text{pvt}}^{\text{r}} \quad (32)$$

$$0 \leq E_{\text{hp}} \leq P_{\text{hp}}^{\text{r}} \quad (33)$$

$$0 \leq Q_{\text{b}} \leq P_{\text{b}}^{\text{r}} \quad (34)$$

$$0 \leq Q_{\text{wst}} \leq Q_{\text{wst}}^{\text{r}} \quad (35)$$

$$0 \leq Q_{\text{wst, in}} \leq 0.3Q_{\text{wst}}^{\text{r}} \quad (36)$$

$$0 \leq Q_{\text{wst, out}} \leq 0.3Q_{\text{wst}}^{\text{r}} \quad (37)$$

式中: P_{b}^{r} 为生物质锅炉的额定功率,kW; $Q_{\text{wst}}^{\text{r}}$ 为蓄热水箱的最大蓄热量,kW。

2.4 优化算法

本文采用NSGA-II算法对多联产系统容量进

行优化求解。NSGA-II算法是Deb等^[18]针对多目标优化问题在NSGA算法基础上提出的,利用精英策略、非支配排序和拥挤度准则,适合应用于复杂、非线性的多目标优化问题。

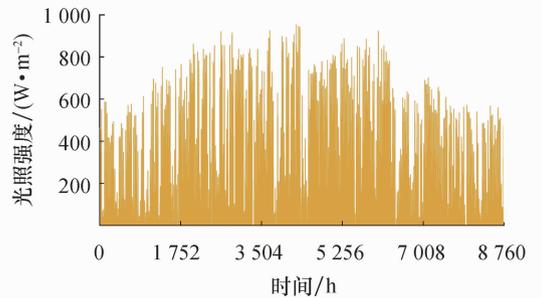
2.5 决策方法

多目标优化问题中,所有的Pareto前沿解均可作为优化方案解。然而,工程实际的需求和决策者对目标函数的重视程度使得优化方案只能唯一。近年来,TOPSIS法被广泛采用。TOPSIS法通过归一化后的数据规范化矩阵找出多个目标中最优目标和最劣目标,分别计算各评价目标与理想解和负理想解的距离,获得各评价目标与理想解的贴近度,按理想解贴近度的大小排序,以此作为评价目标优劣的依据^[19]。

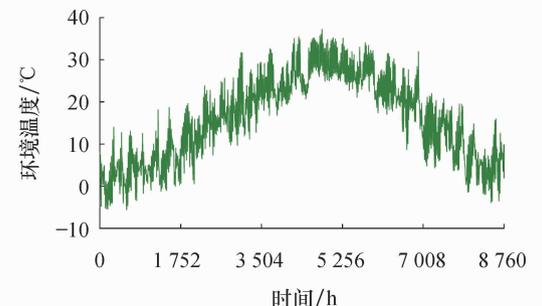
3 算例分析

3.1 基础数据

本文选取江苏省南京市50户单体面积117 m²的农村住宅作为研究对象。环境参数中环境温度和光照强度如图3所示,用户全年的冷、热、电、气负荷如图4所示。考虑到负荷特点,全年可被分为供暖季、供冷季和过渡季。供冷季和供暖季的冷、热负荷波动大,生活热水负荷季节性较强,供冷季的高环境温度使得生活热水负荷低于其他季节。电负荷虽然不随季节波动,但是在1 d中波动很大,频率变化快。



(a) 全年光照强度



(b) 全年环境温度

图3 逐时环境参数

Fig. 3 Hourly environmental parameters

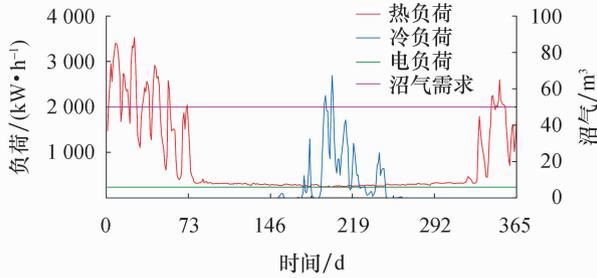


图 4 农村住宅全年冷、热、电、气负荷

Fig. 4 Annual cold, heat, electricity and gas load of rural houses

用于炊事的沼气负荷全年保持不变,用户每日总需气量为 50 m³. 算法参数设定和优化变量搜索范围如表 1 所列,所涉及的系统相关参数如表 2 所列.

表 1 NSGA-II 参数和优化变量搜索范围

Tab. 1 NSGA-II parameters the search ranges of the optimization variables

类别	参数	数值
NSGA-II 参数	种群数	100
	繁衍代数	100
	交叉率/%	80
	变异率/%	20
优化变量搜索范围	PV/T 组件数	0~500
	内燃机数	2~4
	空气源热泵容量/kW	40~80

表 2 系统相关参数

Tab. 2 System related parameters

项目	参数	数值
能源	煤炉的热效率/%	35 ^[20]
	土灶的热效率/%	15.77 ^[21]
	沼气灶的热效率/%	55.67 ^[21]
	电网输电效率/%	92 ^[22]
	电厂发电效率/%	45 ^[22]
经济	恒温厌氧发酵系统定额投资/元	369 268.4 ^[23]
	恒温厌氧发酵系统定额投资/(元·m ⁻³)	2 322.9 ^[23]
	沼气内燃机热电联产系统/(元·kW ⁻¹)	4 300 ^[24]
	空气源热泵系统/(元·kW ⁻¹)	4 500 ^[25]
	蓄热水箱/(元·m ⁻³)	850 ^[25]
	PV/T 组件/(元·块 ⁻¹)	1 250 ^[26]
	生物质锅炉/(元·kW ⁻¹)	263 ^[25]
	牛粪价格/(元·kg ⁻¹)	0.3 ^[25]
	沼液价格/(元·kg ⁻¹)	0.078 ^[27]
	电价/(元·kW·h ⁻¹)	0.56 ^[25]
环境	燃煤取暖 CO ₂ 排放因子/(g·kW·h ⁻¹)	731.94 ^[28]
	电厂供电 CO ₂ 排放因子/(g·kW·h ⁻¹)	968 ^[28]
	秸秆燃烧 CO ₂ 排放因子/(g·kW·h ⁻¹)	1 845.4 ^[28]
	沼气燃烧 CO ₂ 排放因子/(g·kW·h ⁻¹)	201.96 ^[28]

3.2 运行策略

运行策略对多联产系统的性能有至关重要的影响,依据算例的负荷特点实行混合运行策略.

供暖季以热定电. 总热负荷包括供暖热负荷、生活热水负荷和厌氧反应所需热负荷. 总电负荷包括用户电负荷、空气源热泵制热需电量和系统伴随电耗. 系统热负荷先由 PV/T 组件和蓄热器提供,不足部分通过内燃机余热提供. 当开启内燃机后还不能完全满足用户热负荷时,视供需平衡情况再依次开启热泵和生物质锅炉进行补热. 当内燃机和 PV/T 组件发电量小于电需求时,不足部分由电网补充;当内燃机和 PV/T 组件发电量大于电需求时,多余的部分售向电网.

供冷季以电定热. 空气源热泵提供冷负荷,空气源热泵需电量与电负荷之和先由 PV/T 组件提供,再由内燃机提供. 内燃机不产生多余电量,当内燃机余热、PV/T 组件产热量与蓄热器放热量之和小于热需求时,不足部分由生物质锅炉提供.

过渡季以电定热. 用户电负荷由 PV/T 组件、沼气内燃机依次满足,不足部分由电网补充. 当内燃机余热、PV/T 组件产热量与蓄热器放热量之和小于热需求时,不足部分由空气源热泵提供.

3.3 优化结果分析

本算例在满足冷、热、电、气负荷需求的前提下,对多联产系统进行优化. 图 5 是从 NSGA-II 算法中得到的 Pareto 前沿解,表 3 是优化后的目标函数值,表 4 是 TOPSIS 法选择的最终容量方案.

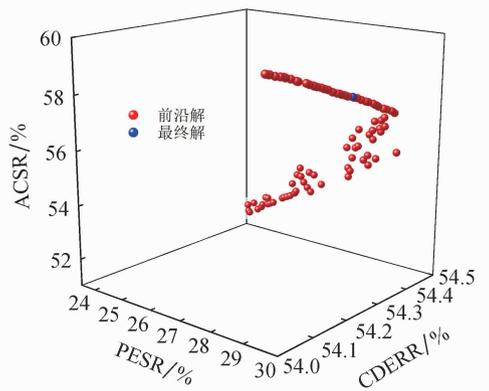


图 5 Pareto 前沿解

Fig. 5 Pareto frontier solution

表 3 优化得到的目标函数值

Tab. 3 Optimized objective function value

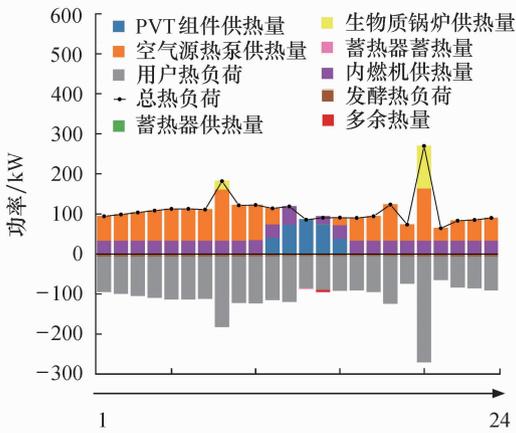
目标函数	数值
PESR	29.07%
ACSR	58.15%
CDERR	54.30%

表 4 系统优化结果

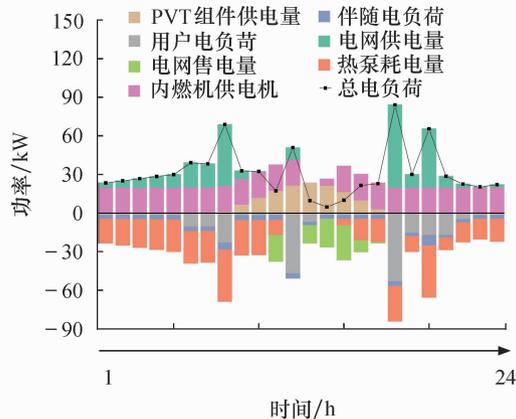
Tab. 4 System optimization result

设备	容量
PV/T 组件/块	378
内燃机/kW	20
空气源热泵/kW	40
厌氧发酵罐体积/m ³	232.85
生物质锅炉/kW	105

为了更直观地反映最优容量配置方案下系统的实际运行效果,选取冬季典型日和夏季典型日进行分析.冬季典型日的热、电平衡如图 6 所示,夏季典型日的冷、热、电平衡如图 7 所示.



(a) 冬季日热平衡

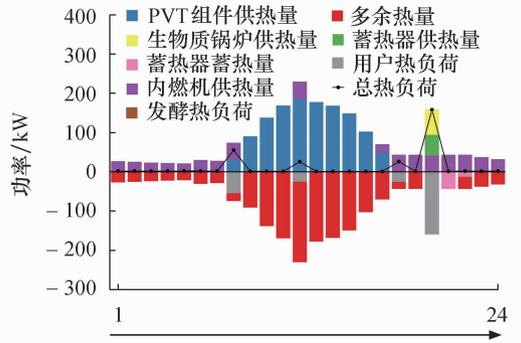


(b) 冬季日电平衡

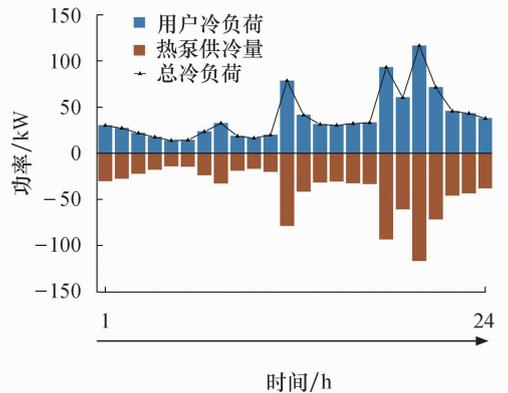
图 6 冬季典型日运行分析

Fig. 6 Operation analysis in the winter day

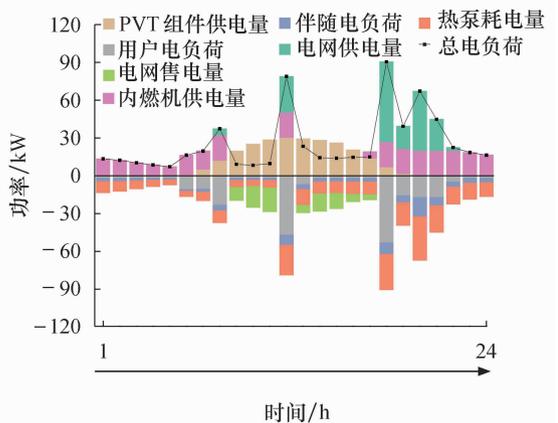
从图 6a 可以看出:冬季 PV/T 组件可以在 11:00—15:00 运行提供热量,在 13:00 时 PV/T 组件产热量可以完全满足总热负荷,剩余热量被储存在蓄热罐内,供后续使用;沼气内燃机在 13:00 时不开启,在 14:00 时以最低负荷率运行来弥补所需热量,其余时间段都保持满负荷运行状态;总热负荷在



(a) 夏季日热平衡



(b) 夏季日冷平衡



(c) 夏季日电平衡

图 7 夏季典型日运行分析

Fig. 7 Operation analysis in the summer day

8:00—20:00 激增,且在 20:00 时达到峰值,这是由生活热水负荷激增所致,此时生物质锅炉开启运行,保证系统供热的可靠性;在其余时间段,由沼气内燃机和空气源热泵共同给用户供热;空气源热泵提供的热量在 1 d 内占比最多.

从图 6b 可以看出:冬季 PV/T 组件可以在 8:00—17:00 运行提供电量,在 11:00 时和 13:00—15:00 PV/T 组件产电量可以完全满足总电负荷;

总电负荷在 8:00、12:00、18:00 和 20:00 时激增,且在 18:00 时达到峰值,这是由用户电负荷激增所致;在 11:00 时和 13:00—15:00 PV/T 组件与沼气内燃机所提供电量之和大于总电负荷,多余电量可售向电网获得收益;在其余时间段,PV/T 组件与沼气内燃机所提供电量之和小于总电负荷,不足电量由电网进行补充。

从图 7a 可以看出:夏季 PV/T 组件可以在 8:00—17:00 运行提供热量;总热负荷只有发酵罐保温热负荷和生活热水热负荷,生活热水热负荷在 8:00、12:00、18:00 和 20:00 时出现,且在 20:00 时达到峰值;在 20:00 时沼气内燃机余热与蓄热器供热之和不能满足总热负荷,生物质锅炉开启运行;在 21:00 时内燃机的余热可以储存在蓄热器中,此时没有多余热量;而在其他时间段,系统提供的热负荷远大于总热负荷,存在热量浪费。

从图 7b 可以看出:夏季冷负荷在晚间较大,且在 20:00 时达到峰值,这是由晚上人员热扰较大所致;冷负荷完全由空气源热泵提供。

从图 7c 可以看出,夏季 PV/T 组件可以在 7:00—19:00 运行提供电量,在 9:00—11:00 和 13:00—16:00 PV/T 组件产电量可以完全满足总电负荷;总电负荷在 12:00、18:00 和 20:00 时水平较高,且在 18:00 时达到峰值,这是因为在 18:00 时用户电负荷和热泵需电量都很大;在 9:00—11:00 和 13:00—17:00 PV/T 组件与沼气内燃机所提供电量之和大于总电负荷,多余电量可售向电网获得收益;在 1:00—6:00 和 23:00—24:00 沼气内燃机所提供电量完全可以满足总电负荷;而在其他时间段,PV/T 组件与沼气内燃机所提供电量之和小于总电负荷,不足电量由电网进行补充。

对比图 6a 与图 6b 可以发现,PV/T 组件产生电能时,有时没有产生热量,这是因为进口水温水平

高,且太阳辐射低,不足以驱动 PV/T 组件产生热量.对比图 6a 与图 7a、图 6b 与图 7c 可以发现,夏季 PV/T 组件的出力时长大于冬季,且夏季 PV/T 组件的产热量和产电量都大于冬季,这是因为夏季的光照时间长且太阳辐射强度大。

3.4 敏感性分析

经济性能对投资者来说是优先考虑的,常用的经济性指标有费用年值节约率、动态投资回收期(PB)和净现值(NPV).费用年值节约率越大,方案越优;动态投资回收期越小,投资回本的时间越快,方案越优;净现值大于零则方案可行,且净现值越大,投资效益越好,方案越优.将某经济参数数值分别增大或减小 10% 和 20%,其他参数保持不变,分析 3 个经济性指标对经济参数的敏感性,结果如图 8 所示。

从图 8a 可以看出,费用年值节约率随沼液、沼渣价格的增大而增大,随电价、牛粪价格、厌氧反应器成本、运行管理费用的增大而减小.其中,影响较大的是牛粪价格和沼液价格.在基准下,当沼液价格增大 20% 时,费用年值节约率由 58.18% 增至 60.4%.费用年值节约率对电价的敏感度最小。

从图 8b 可以看出,动态投资回收期随沼液、沼渣价格的增大而减小,随电价、牛粪价格、厌氧反应器成本、运行管理费用的增大而增大.其中,影响较大的是厌氧反应器成本和牛粪价格.在基准下,当厌氧反应器成本减小 20% 时,动态投资回收期由 5 a 减至 4.37 a.动态投资回收期对电价的敏感度最小。

从图 8c 可以看出,净现值随沼液、沼渣价格的增大而增大,随电价、牛粪价格、厌氧反应器成本、运行管理费用的增大而减小.其中,影响较大的是牛粪价格和沼液价格.在基准下,当牛粪价格减小 20% 时,净现值由 272.84 万元增至 316.17 万元.净现值对电价的敏感度最小。

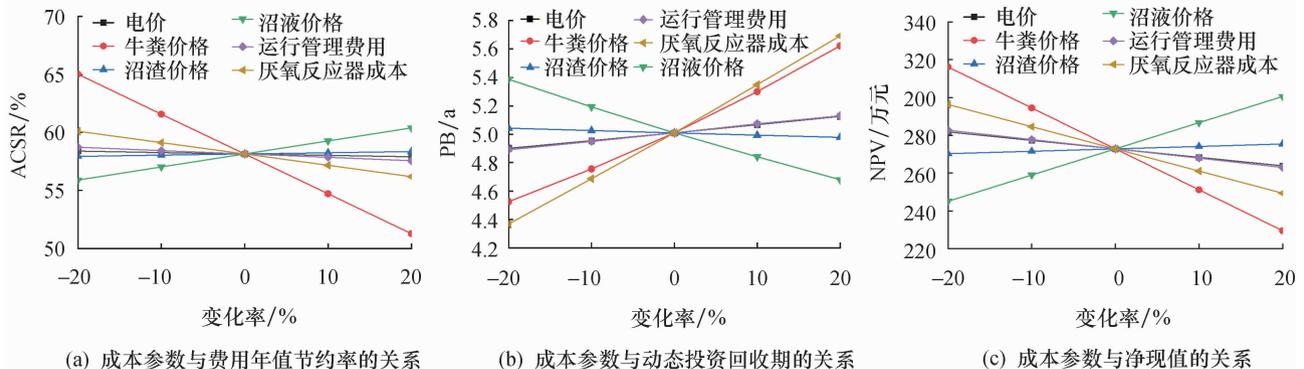


图 8 经济参数敏感性分析

Fig. 8 Sensitivity analysis of economic parameters

4 结论

本文采用 NSGA-II 算法对多种可再生能源互补的多联产系统进行多目标优化,结合 TOPSIS 决策方法求解系统容量配置方案,得出以下结论:

1) 通过本文所提优化配置方法,多联产系统在能源性、经济性和环保性等方面相比传统分供系统有了明显提升,验证了本文所提方法和系统结构的优越性.优化后系统的一次能源节约率为 29.07%,费用年值节约率为 58.15%,二氧化碳减排率为 54.30%.

2) 厌氧发酵作为整个系统的重要环节,成本参数对系统经济性能影响较大.其中,牛粪价格对费用年值节约率和净现值影响最大,厌氧反应器成本对动态投资回收期影响最大.因此,为了促进多联产系统的推广应用,尽可能选用沼气转化效率高的厌氧发酵系统.

参考文献:

[1] 李高潮,卢怀宇,孙启德,等.基于可再生能源的冷热电联供系统集成配置与运行优化研究进展[J].电网与清洁能源,2021,37(3):106-119.

[2] 王江江,王 壮,杨 颖,等.分布式冷热电联供系统集成设计与优化研究进展[J].分布式能源,2017,2(2):1-10.

[3] WU D, HAN Z H, LIU Z J, *et al.* Study on configuration optimization and economic feasibility analysis for combined cooling, heating and power system [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 190(7): 91-104.

[4] YOUSEFI H, GHODUSINEJAD M H, NOOROLLAHI Y. GA/AHP-based optimal design of a hybrid CCHP system considering economy, energy and emission [J]. Energy and Buildings, 2017, 138(3): 309-317.

[5] LI G Z, WANG R, ZHANG T, *et al.* Multi-objective optimal design of renewable energy integrated CCHP system using PI-CEA-g [J]. Energies, 2018, 11(4): 1-26.

[6] WANG J J, LIU Y, REN F K, *et al.* Multi-objective optimization and selection of hybrid combined cooling, heating and power systems considering operational flexibility [J]. Energy, 2020, 197: 117313.

[7] REN F K, WANG J J, ZHU S T, *et al.* Multi-objective optimization of combined cooling, heating and power system integrated with solar and geothermal energies [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 197: 111866.

[8] 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 and Energy Systems, 2020, 123: 106236.

[9] LI C B, YANG H Y, SHAHIDEHPOUR M, *et al.* Optimal planning of islanded integrated energy system with solar-bio-gas energy supply [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2437-2448.

[10] 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.

[11] HASHIMOTO A G. Methane from cattle waste: Effects of temperature, hydraulic retention time, and influent substrate concentration on kinetic parameter (k) [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1982, 24(9): 2039-2052.

[12] CHEN Y R, HASHIMOTO A G. Substrate utilization kinetic model for biological treatment process [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1980, 22(10): 2081-2095.

[13] 刘建禹,邓斯文,杨胜明,等.寒区低能耗厌氧发酵反应器热工性能参数确定[J].农业工程学报,2019,35(17):248-255.

[14] 李 娜.太阳能辅助沼气生产和综合利用系统数值仿真[D].青岛:青岛大学,2015.

[15] WANG J J, MAO T Z, SUI J, *et al.* Modeling and performance analysis of CCHP (combined cooling, heating and power) system based on co-firing of natural gas and biomass gasification gas [J]. Energy, 2015, 93: 801-815.

[16] HE X H, CAI R X. Typical off-design analytical performances of internal combustion engine cogeneration [J]. Frontiers of Energy and Power Engineering in China, 2009, 3(2): 184-192.

[17] FLORSCHUETZ L W. Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors [J]. Solar Energy, 1979, 22(4): 361-366.

[18] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, *et al.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2002, 6(2): 182-197.

[19] LUO Z Y, YANG S, XIE N, *et al.* Multi-objective capacity optimization of a distributed energy system considering economy, environment and energy [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 200: 112081.

[20] 杨天麟,朱 能.北方地区部分小城镇建筑能耗状况调查与分析[C]//全国暖通空调制冷 2006 年学术年会论文集.北京:中国建设科技出版社,2006:18-19.

[21] 李宝山,张榕林.沼气灶与柴灶利用效率测试及可比条件探讨[J].中国能源,1983,4:25-27.

[22] 王江江,杨 昆,刘娟娟.生物质燃气冷热电联供系统性能分析[J].农业机械学报,2014,45(3):196-205.

[23] 吴 进,闵师界,朱立志,等.养殖场沼气工程商业化集中供气补贴分析[J].农业工程学报,2015,24:269-273.

[24] 黄 宇.分布式能源系统燃气内燃机国产现状及应用[J].煤气与热力,2016,36(3):19-24.

[25] 张 东.多能互补的热电沼气联供系统动态特性与地域适应性研究[D].兰州:兰州理工大学,2017.

[26] YOUSEFI H, GHODUSINEJAD M H, KASAEIAN A. Multi-objective optimal component sizing of a hybrid ICE plus PV/T 组件 driven CCHP microgrid [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 122: 126-138.

[27] 张昌爱.沼液的定价方法及其应用效果[J].生态学报,2011,31(6):1735-1741.

[28] 王革华.农村能源建设对减排 SO₂ 和 CO₂ 贡献分析方法[J].农业工程学报,1999,15(1):169-172.