

基于能量枢纽的沼-风-光综合能源系统 双层协同优化配置

李梓萌¹, 王天阔², 胡鹏飞¹, 于彦雪¹, 杜翼³, 蔡期堦³

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 华电电力科学研究院有限公司, 浙江 杭州 310030;
3. 国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福建 福州 350012)

摘 要: 针对沼-风-光乡村综合能源系统协同优化问题, 构建了综合能源系统能量枢纽模型, 并提出沼-风-光综合能源系统配置-运行协同优化双层规划模型, 上层以年化总成本最小和碳排放量最小为目标, 采用 NSGA-II 算法获取配置方案 Pareto 最优解集; 下层以运行成本 (包括碳排放成本) 最小为目标获取最优运行方案, 引入启发性规则, 排除上层输入配置方案可能存在的设备冗余, 加速上层优化配置。通过对福建某乡村沼-风-光综合能源系统进行算例验证, 结果证明了所提优化配置和运行方案的多元性和优越性。

关键词: 沼-风-光综合能源系统; 经济性; 环保性; 能量枢纽; Pareto 最优解集

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202303062

0 引言

2021 年 12 月, 国家能源局联合农业农村部和国家乡村振兴局印发《加快农村能源转型发展助力乡村振兴的实施意见》, 明确提出到 2025 年, 建成一批农村能源绿色低碳试点, 持续提升风电、太阳能、生物质能等占农村能源的比重, 加快形成绿色、多元的农村能源体系。然而, 目前生物质能和其他可再生能源在多能源转换和储存方面的耦合作用复杂, 给乡村综合能源系统的发展带来了一定的挑战^[1], 构建并研究沼-风-光综合能源系统优化配置和运行模型极具现实意义。

能量枢纽 (energy hub, EH) 目前广泛应用于基于混合可再生能源的综合能源系统研究领域, 其实质上是采用耦合矩阵清晰地描述输入能源和输出负荷之间的平衡关系^[2-3]。通过构建能量枢纽模型, 可以实现混合可再生能源在多能源转换和储存方面的耦合, 促进实现多能互补, 进一步缓解综合能源系统对化石燃料的依赖^[1]。因此, 构

建能量枢纽数学模型是分析沼-风-光综合能源系统协同优化模型的基础。

由于综合能源系统负荷类型多样, 不同能量转换设备输入输出存在耦合关系, 所以综合能源系统规划问题要同时考虑系统配置和运行^[4-5]。目前, 沼-风-光综合能源系统的协同优化研究较少, 大多是针对单独的配置优化或运行优化。文献^[6-7]以年化总成本最小为目标实现风光沼容量的最优配置, 证明沼气与其他可再生能源的互补可以降低系统对化石燃料和储能电池的依赖。文献^[8]考虑经济性和可靠性研究了沼-风-光综合能源系统配置方案, 实现系统稳定、持续、可靠、经济运行。文献^[9]提出了一种考虑乡村多元产业的乡村多能源系统规划模型, 实现资源充分利用和多元产业协同。文献^[10]构建了基于 CCG 算法的分布式鲁棒优化运行模型。文献^[11-12]考虑负荷的不确定性, 构建了基于沼气等可再生能源的综合能源系统优化运行模型。

由于传统单层规划模型存在求解维数高、模型层次不清晰等问题^[13], 宜采用双层规划模型来协调配置和运行优化。其中, 经济性和环保性是综合能源系统规划问题中相互独立、量纲不同的 2 个关键因素^[14-15]。文献^[16]中上、下层模型分别考虑经济性和环保性, 在有效降低年化总成本的

收稿日期: 2023-03-14; **修回日期:** 2024-02-03。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52007167); 浙江省教育厅科研项目 (Y202250813); 国家电网公司科技项目 (52130N22000G)。



基础上兼顾环境友好性。文献[17]中上、下层模型将环保性指标转化为经济性指标,进而围绕经济性进行单目标优化。文献[13]采用权重分析法优化规划模型,但2个指标的权重设置具有主观性,可能存在不同目标权重得到相同配置方案的情况,给真实权重分析带来困难。

综上,本文首先构建沼-风-光综合能源系统能量枢纽模型,然后基于非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm-II, NSGA-II)获得 Pareto 最优解集的多目标优化方法,构建沼-风-光综合能源系统配置-运行协同优化双层规划模型,同时考虑经济性和环保性,获取沼-风-光综合能源系统优化配置及优化运行方案。最后通过算例验证所得优化配置和运行方案的有效性和优越性。

1 沼-风-光综合能源系统能量枢纽模型

1.1 沼气池输出模型

沼气是未来乡村能源的重要组成部分,来自乡村农业发展产生的大量农业废物[18]。其中,温度是影响沼气产量的重要环境因素[19]。一般情况下,沼气池的最佳内部环境温度为 35 ℃[1]。当沼气池内部环境温度高于或低于 35 ℃ 时都会导致沼气产量降低。本文忽略影响沼气产量的其他环境因素,建立沼气产量和沼气池内部环境温度的关系[1]为

$$E_{\text{bioz}} = a_0(T_{\text{in}} - T_0)^2 - b_0 \quad (1)$$

式中: E_{bioz} 为单位时间沼气池产量; T_{in} 为沼气池实际内部环境温度; T_0 为沼气池最佳内部环境温度; a_0 、 b_0 为数据拟合系数。

本文通过建立沼气池热网络模型节点热平衡方程[1],将非线性动力模型线性化,然后将状态空间形式的线性模型离散化,求解沼气池实际内部环境温度,计算沼气池单位时间沼气产量。沼气池内部温度状态方程为

$$T_{\text{in}}(k+1) = AT_{\text{in}}(k) + BQ_{\text{EH}}(k) + DT_{\text{out}}(k) \quad (2)$$

$$Q_{\text{EH}} = S_{\text{hftz}} + \eta_b S_{\text{efz}} \quad (3)$$

式中: $T_{\text{in}}(k)$ 和 $T_{\text{out}}(k)$ 分别为第 k 个时段沼气池内、外部的温度; $Q_{\text{EH}}(k)$ 为第 k 个时段沼气池从综合能源系统能量枢纽中反馈得到的热能; S_{efz} 和 S_{hftz} 分

别为综合能源系统能量枢纽模型中的余电、热反馈; η_b 为电锅炉电转热能量转换效率; A 为系统状态系数; B 为与可控变量 Q_{EH} 对应的输入系数; D 为外部干扰变量 T_{out} 对应的输入系数,均通过历史数据拟合得到。

1.2 沼-风-光综合能源系统能量枢纽框架

在沼-风-光综合能源系统能量枢纽中,风能和太阳能产生的电能和热能通过能量枢纽反馈用于沼气池加热,提高沼气池内部环境温度,增加沼气池的沼气产量。沼气池产生的多余沼气可以储存在沼气罐中,以备在风能和太阳能不足时满足能量平衡。同样作为储能装置,可以减少储能电池充放电次数,避免储能电池不必要的充放电以减少能量损失。

沼-风-光综合能源系统能量枢纽框架如图1所示。综合能源系统能量枢纽框架中,风能、太阳能、生物质能、电网电能作为能量输入,通过风力涡轮机(WT)、光伏热能系统(PVT)和沼气池将能量转换为负荷可利用的电能、热能、沼气;燃气轮机(CHP)、沼气炉、电锅炉、储能电池、沼气罐作为能量转换和存储设备,可以实现电能、热能、沼气3种能量载体的多能流耦合,提高能源综合利用效率,并通过优化调度与电、热、气负荷3种能量输出实现能源供需平衡。

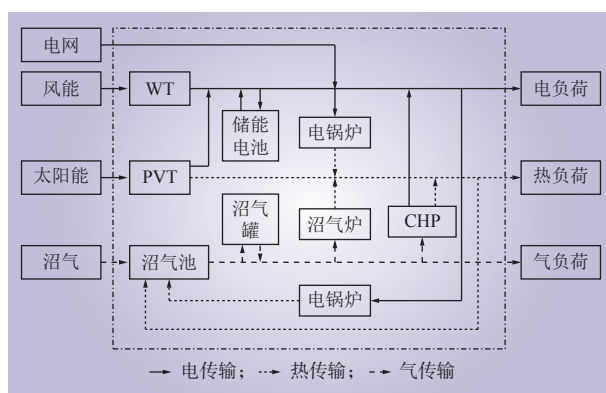


图 1 沼-风-光综合能源系统能量枢纽框架示意

Fig. 1 Schematic diagram of energy hub framework of biogas wind solar integrated energy system

1.3 能量枢纽数学模型

综合能源系统输入输出关系的数学模型如式(4)所示, L 、 P 为能量枢纽的能量输出和输入矩阵; C 为能量枢纽中能量转换耦合矩阵。

$$\underbrace{\begin{bmatrix} L_e \\ L_h \\ L_g \end{bmatrix}}_L = \underbrace{\begin{bmatrix} h_e & \eta_{e,PVT}h_e & Q_{bio}h_{CHP}\eta_{e,CHP}h_e & h_e & Q_{bio}h_{CHP}\eta_{e,CHP}h_e & h_e \\ h_b\eta_b h_h & (\eta_{e,PVT}h_b\eta_b + \eta_{h,PVT})h_h & Q_{bio}(h_{CHP}\eta_{e,CHP}h_b\eta_b + h_{CHP}\eta_{h,CHP} + h_f\eta_f)h_h & h_b\eta_b h_h & Q_{bio}(h_{CHP}\eta_{e,CHP}h_b\eta_b + h_{CHP}\eta_{h,CHP} + h_f\eta_f)h_h & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} Q_{WT} \\ Q_{PVT} \\ E_{bio} \\ P_e \\ V_{bio} \\ P_{grid} \end{bmatrix}}_P \quad (4)$$

式中： L_e 、 L_h 、 L_g 分别为单位时间内的电、热、气负荷，是能量枢纽中的输出量； Q_{WT} 、 Q_{PVT} 、 E_{bio} 、 P_{grid} 分别为单位时间内 WT 输出功率、PVT 输出功率、沼气产量（体积）、从电网购入的电能，是能量枢纽中的输入量； P_e 和 V_{bio} 分别为单位时间内储能电池净输出功率、沼气罐净排气量（体积）； Q_{bio} 为沼气热值； h_e 、 h_h 、 h_b 、 h_f 、 h_{chp} 分别为电、热、气 3 种能量载体在电负荷、热负荷、电锅炉、沼气炉、CHP 中的调度因子； $\eta_{e,PVT}$ 、 $\eta_{h,PVT}$ 、 $\eta_{e,CHP}$ 、 $\eta_{h,CHP}$ 分别为 PVT、CHP 发电和发电效率； η_f 为沼气炉产热效率。

由于耦合矩阵 C 中存在调度因子的乘积，导致能量枢纽数学模型是一个高度非线性的系统。

$$\underbrace{\begin{bmatrix} L_e \\ L_h \\ L_g \end{bmatrix}}_L = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & \eta_{e,PVT} & 0 & -1 & 1 & 0 & -1/\eta_b & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & \eta_{h,PVT} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \eta_{h,CHP}/\eta_{e,CHP} & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1/Q_{bio}\eta_{e,CHP} & -1/Q_{bio}\eta_f & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{C'} \underbrace{\begin{bmatrix} Q_{WT} & Q_{PVT} & E_{bio} & P_{ch} & P_{dis} & V_{bio} & P_b & P_{chp} & P_f & S_{efz} & S_{hfz} & P_{grid} \end{bmatrix}^T}_{P'} \quad (5)$$

2 多目标优化配置-运行模型及其求解算法

2.1 模型思路

本文建立沼-风-光综合能源系统配置-运行协同优化双层规划模型，解决经济性和环保性 2 个相互制约指标引起的系统规划问题。

上层建立的综合能源系统优化配置模型，基于 NSGA-II 算法获得 Pareto 最优解集的多目标优化方法，分别建立满足经济性和环保性的 2 个目标函数，将得到的优化配置方案输入到下层；下层建立的综合能源系统优化运行模型，利用上层得到的优化配置结果建立约束条件，将环保性指标纳入经济性指标，得到优化运行方案，并引入启发性规则为上层优化配置提供依据，加快迭代寻优。

2.2 上层优化配置模型

2.2.1 目标函数

上层优化配置模型目标函数由相互独立的经

济性目标函数 f_1 和环保性目标函数 f_2 组成。其中，经济性目标为年化总成本 C_{fval} 最小，包括投资成本 C_{in} 、运维成本 C_{ma} 、运行成本 C_{on} 。环保性目标为碳排放量 G 最小。控制变量为综合能源系统能量枢纽模型中各设备的台数，包括 WT、PVT、储能电池、沼气池、沼气罐、CHP、沼气炉、电锅炉。上层经济性目标函数 f_1 为

$$\min f_1 = \min C_{fval} = \min(C_{in} + C_{ma} + C_{on}) \quad (6)$$

$$C_{in} = \sum_i^{N_{inv}} \frac{r(1+r)^{y_i}(1-R)}{(1+r)^{y_i}-1} n_i P_i C_i \quad (7)$$

$$C_{ma} = \sum_i^{N_{inv}} \varepsilon_i n_i P_i C_i \quad (8)$$

式中： N_{inv} 为综合能源系统能量枢纽模型内设备种类数； r 为贴现率； R 为固定资产残值率； n_i 、 y_i 、 P_i 、 C_i 、 ε_i 分别为第 i 种设备的台数、生命周期、单位额定容量、单位额定容量成本、运维系数。



在本文建立的综合能源系统能量枢纽模型中,碳排放量来源于煤炭和沼气燃烧,涉及电网这一能量输入以及 CHP、沼气炉 2 个能量转换设备。上层环保性目标函数 f_2 为

$$\min f_2 = \min G = \min(G_g + G_b) \quad (9)$$

$$G_g = \sum_i^n P_{\text{grid}}(i) G_{\text{c,grid}} t_0 \quad (10)$$

$$G_b = \sum_i^n L_{\text{gcf}}(i) G_{\text{c,bio}} t_0 \quad (11)$$

$$L_{\text{gcf}}(i) = \frac{P_{\text{chp}}(i)}{Q_{\text{bio}} \eta_{\text{e,CHP}}} + \frac{P_{\text{f}}(i)}{Q_{\text{bio}} \eta_{\text{f}}} \quad (12)$$

式中: G_g 为电网购电的碳排放量; G_b 为沼气燃烧产生的碳排放量; n 为一个运行周期的总时段数; $L_{\text{gcf}}(i)$ 为第 i 个时段 CHP 和沼气炉运行燃烧产生的沼气体积之和; $G_{\text{c,grid}}$ 为单位容量大电网的碳排放量; $G_{\text{c,bio}}$ 为单位体积沼气燃烧的碳排放量; t_0 为一个时段长度; $P_{\text{f}}(i)$ 为第 i 个时段沼气炉热输出功率; $P_{\text{chp}}(i)$ 为第 i 个时段 CHP 电输出功率。

2.2.2 约束条件

1) 定容设备投运约束。

考虑到工程实际,综合能源系统能量枢纽模型内设备安装数量受限,不同定容设备的最大允许安装数量须考虑综合能源系统实际负荷需求^[15]。本文在满足最大负荷需求条件下,以设备容量不冗余为目标确定不同定容设备的最大允许安装数量,定容设备投运约束为

$$0 < n_i \leq n_{i,\max} \quad (13)$$

式中: n_i 为第 i 个定容设备的安装数量; $n_{i,\max}$ 为第 i 个定容设备的最大允许安装数量。

2) 沼气池选型约束。

由于沼气池内部温度状态方程中的系统状态系数 A , 与可控变量 Q_{EH} 对应的输入系数 B , 外部干扰变量 T_{out} 对应的输入系数 D , 均不与沼气池体积成正比, 因此需要设置沼气池选型约束为

$$T_{\text{end}} = T(\delta_s) \quad (14)$$

$$\delta_1 + \delta_2 + \cdots + \delta_s = 1 \quad (15)$$

$$T = \begin{bmatrix} a_{0,1} & b_{0,1} & A_1 & B_1 & D_1 \\ a_{0,2} & b_{0,2} & A_2 & B_2 & D_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{0,s} & b_{0,s} & A_s & B_s & D_s \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: $\delta_s \in \{0,1\}$ 为沼气池第 s 种类型的选型系数; T_{end} 为沼气池选型后的设备性能参数矩阵; T 为沼气池所有类型性能参数矩阵。

2.3 下层优化运行模型

2.3.1 目标函数

下层优化运行模型为在综合能源系统能量枢纽模型设备配置方案确定的情况下,建立的经济性和环保性多目标优化运行模型,由运行维护、碳税征收整体最优为目标。目标函数 f 为运行成本 C_{on} 最小,运行成本包括 CHP 启停成本 C_{chp} 、能量损失成本 C_{t} 、购电成本 C_{grid} 、污染物处理成本 C_{d} 、碳排放成本 C_{c} 。控制变量为各设备出力。目标函数 f 为

$$\min f = \min C_{\text{on}} = \min(C_{\text{chp}} + C_{\text{t}} + C_{\text{grid}} + C_{\text{d}} + C_{\text{c}}) \quad (17)$$

$$C_{\text{chp}} = \sum_i^n [\lambda_{\text{on,chp}} q_i (1 - q_{i-1}) + \lambda_{\text{off,chp}} q_{i-1} (1 - q_i)] \quad (18)$$

$$C_{\text{t}} = r_{\text{grid}}(i) [(P_{\text{b}}(i)/\eta_{\text{b}} + S_{\text{efz}})(1 - \eta_{\text{b}}) + P_{\text{ch}}(i)(1 - \eta_{\text{e,ch}}) + P_{\text{dis}}(i)(1 - \eta_{\text{e,dis}})] t_0 + r_{\text{bio}} [P_{\text{chp}}(i)(1 - \eta_{\text{e,CHP}} - \eta_{\text{h,CHP}})/\eta_{\text{e,CHP}} + P_{\text{f}}(i)(1 - \mu_{\text{f}})/\mu_{\text{f}}] t_0 \quad (19)$$

$$C_{\text{grid}} = \sum_i^n r_{\text{grid}}(i) P_{\text{grid}}(i) t_0 \quad (20)$$

$$C_{\text{d}} = \sum_i^n P_{\text{grid}}(i) (G_{\text{s,grid}} r_{\text{SO}_2} + G_{\text{n,grid}} r_{\text{NO}_x}) t_0 \quad (21)$$

$$C_{\text{c}} = \sum_i^n P_{\text{grid}}(i) G_{\text{grid}} r_{\text{CO}_2} t_0 + L_{\text{gcf}}(i) G_{\text{bio}} r_{\text{CO}_2} \quad (22)$$

式中: $\lambda_{\text{on,chp}}$ 和 $\lambda_{\text{off,chp}}$ 分别为单位次数 CHP 启停成本; q_i 为 0-1 变量,表示第 i 个时段 CHP 的开关状态,1 表示开启,0 表示关闭; $r_{\text{grid}}(i)$ 为第 i 个时段单位容量电价; r_{bio} 为单位体积沼气价格; $G_{\text{s,grid}}$ 、 $G_{\text{n,grid}}$ 分别为单位功率大电网 SO_2 、 NO_x 排放量; r_{SO_2} 、 r_{NO_x} 分别为单位质量 SO_2 、 NO_x 处理价格; r_{CO_2} 为单位体积碳交易价格。

2.3.2 约束条件

1) 能量平衡约束。能量平衡约束为 1.3 节建立的综合能源系统能量枢纽数学模型,如式(5)所示。

2) 出力设备约束。

① 电网联络线功率约束。在本文中,不考虑综合能源系统能量枢纽模型多余的电能向电网卖电的情况,而是储存在系统中以供负荷利用。

$$0 \leq P_{\text{grid}}(i) \leq P_{\text{grid,max}} \quad (23)$$

式中：\$P_{\text{grid,max}}\$ 为电网联络线允许的最大功率。

② 沼气池内部温度限制约束。

$$T_{\text{in,min}} \leq T_{\text{in}}(i) \leq T_{\text{in,max}} \quad (24)$$

式中：\$T_{\text{in,min}}\$、\$T_{\text{in,max}}\$ 分别为沼气池正常运行最小、最大内部温度。

3) 能量转换设备约束。

① 电锅炉容量约束。

$$0 \leq P_{\text{b}}(i) \leq n_5 P_{\text{b,max}} \quad (25)$$

式中：\$P_{\text{b,max}}\$ 为电锅炉单位额定容量；\$n_5\$ 为电锅炉配置台数。

② 沼气炉容量约束。

$$0 \leq P_{\text{f}}(i) \leq n_4 P_{\text{f,max}} \quad (26)$$

式中：\$P_{\text{f,max}}\$ 为沼气炉单位额定容量；\$n_4\$ 为沼气炉配置台数。

③ CHP 容量和爬坡率约束。

$$q(i)n_3 P_{\text{chp,min}} \leq P_{\text{chp}}(i) \leq q(i)n_3 P_{\text{chp,max}} \quad (27)$$

$$\frac{|P_{\text{chp}}(i) - P_{\text{chp}}(i-1)|}{t_0} \leq n_3 P_{\text{chp,ramp}} \quad (28)$$

式中：\$n_3\$ 为 CHP 配置台数；\$P_{\text{chp,max}}\$、\$P_{\text{chp,min}}\$ 分别为 CHP 单位额定容量电输出上、下限；\$P_{\text{chp,ramp}}\$ 为 CHP 爬坡率最大值。

4) 能量存储设备约束。

① 储能电池约束。

$$S_{\text{bes}}(i) = S_{\text{bes}}(i-1) + \frac{\eta_{\text{ch}} P_{\text{ch}}(i-1)t_0}{n_1 E_r} - \frac{\eta_{\text{dis}} P_{\text{dis}}(i-1)t_0}{n_1 E_r} \quad (29)$$

$$S_{\text{bes,min}} \leq S_{\text{bes}}(i) \leq S_{\text{bes,max}} \quad (30)$$

$$0 \leq P_{\text{ch}}(i) \leq n_1 P_{\text{ch,max}} \quad (31)$$

$$0 \leq P_{\text{dis}}(i) \leq n_1 P_{\text{dis,max}} \quad (32)$$

式中：\$S_{\text{bes}}(i)\$ 为第 \$i\$ 个时段结束时刻储能电池荷电状态；\$n_1\$ 为储能电池配置台数；\$E_r\$ 为储能电池单位额定容量；\$S_{\text{bes,min}}\$、\$S_{\text{bes,max}}\$ 分别为储能电池最小、最大荷电状态限值；\$P_{\text{ch,max}}\$、\$P_{\text{dis,max}}\$ 分别为储能电池单位最大充、放电功率；\$\eta_{\text{ch}}\$、\$\eta_{\text{dis}}\$ 分别为储能电池充、放电效率。

② 沼气罐约束。储能电池和沼气罐都是能量存储设备，类似于储能电池荷电状态 (state of charge,

SOC) 概念，引入能量状态 (state of energy, SOE) 表征沼气罐某时段结束时刻的剩余能量^[16]，即沼气罐某时段结束时刻等气体密度下剩余气体体积 (气体密度取沼气罐充满时的值)。

$$S_{\text{bio}}(i) = S_{\text{bio}}(i-1) - \frac{V_{\text{gs}}(i)t_0}{n_2 V_r} \quad (33)$$

$$S_{\text{bio,min}} \leq S_{\text{bio}}(i) \leq S_{\text{bio,max}} \quad (34)$$

$$n_2 V_{\text{gs,min}} \leq V_{\text{gs}}(i) \leq n_2 V_{\text{gs,max}} \quad (35)$$

式中：\$S_{\text{bio}}(i)\$ 为第 \$i\$ 个时段结束时刻沼气罐能量状态；\$n_2\$ 为沼气罐配置台数；\$V_r\$ 为沼气罐单位额定体积；\$S_{\text{bio,min}}\$、\$S_{\text{bio,max}}\$ 分别为沼气罐最小、最大能量状态限值；\$V_{\text{gs,min}}\$、\$V_{\text{gs,max}}\$ 分别为沼气罐单位最小、最大排气体积，其中 \$V_{\text{gs,min}}\$ 可以为负值，表示沼气罐进气状态。

5) 碳排放约束。

$$G \leq G_{\text{bef}} \quad (36)$$

式中：\$G_{\text{bef}}\$ 为沼-风-光综合能源系统最大允许碳排放量，假设为原本未利用综合能源系统时碳排放量的 90%。

2.4 模型求解算法

上层优化配置模型为混合整数非线性规划模型，利用 NSGA-II 算法求解获取 Pareto 最优解集。下层优化运行模型为非线性模型，借助 Yalmip 求解器调用 Gurobi 在 Matlab 中对所提模型进行求解获取优化运行方案。具体算法流程如图 2 所示。在下层运行优化模型中随机配置方案可能存在明显的设备容量冗余，即部分配置的设备没有参与实际综合能源系统运行。因此，本文引入启发性规则，查找上层配置方案中各设备台数是否冗余，如果冗余则在不改变下层优化运行方案的前提下，修改上层配置方案以获得相同碳排放量，即相同环保性指标下，经济性更优的配置方案，输入到上层以加速迭代进程。

3 算例分析

3.1 参数设置

本文以福建某乡村为研究对象进行分析。该乡村夏、冬季典型日电、热、气负荷数据如图 3、4 所示，电力、热力和沼气的基本负荷分别设置为 350 kW、150 kW 和 10 m³。本文考虑风、光不

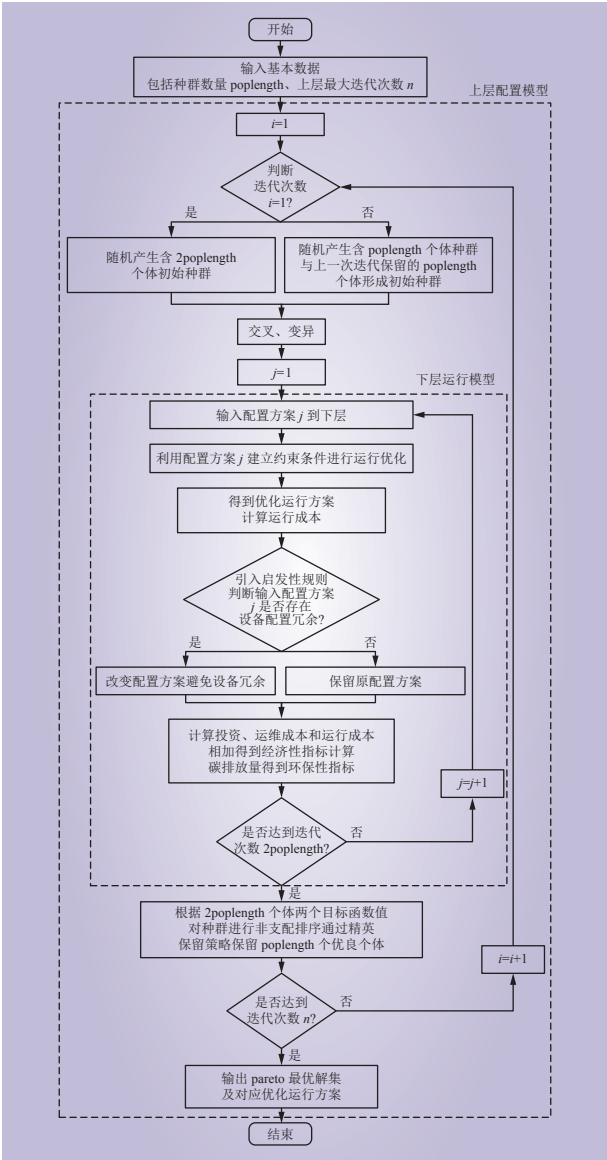


图 2 综合能源系统协同优化双层规划模型算法流程

Fig. 2 Algorithm flow chart of the integrated energy system co-optimization bi-level planning model

确定性，选取福建某乡村所在区域 2021 年全年并网风电和光伏出力数据（每 15 min 一个点）为样本，将其标么化后采用基于 k -means 算法的场景聚类法^[20-21]得到夏、冬季典型日 WT 出力曲线和外部环境温度曲线如图 5、6 所示。该乡村地区电网峰谷电价和综合能源系统能量枢纽模型中各设备参数如表 1-3 所示^[16]。

3.2 配置结果和分析

为了直观体现本文所提沼-风-光综合能源系统优化配置方案的有效性和优越性，设置 3 种协同优化方案进行对比分析和讨论，如表 4 所示。

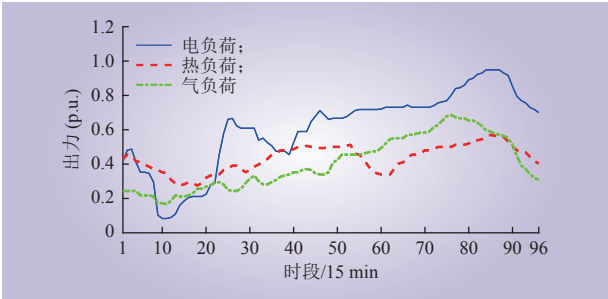


图 3 夏季典型日电、热、气负荷曲线

Fig. 3 Typical daily load curves of electricity, heat and gas in summer

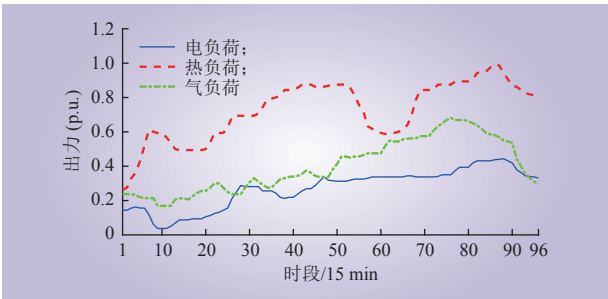


图 4 冬季典型日电、热、气负荷曲线

Fig. 4 Typical daily load curves of electricity, heat and gas in winter

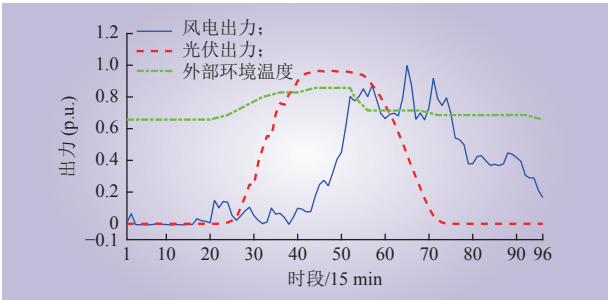


图 5 夏季典型日可再生能源出力和外部温度曲线

Fig. 5 Typical daily renewable energy output curves and ambient temperature in summer

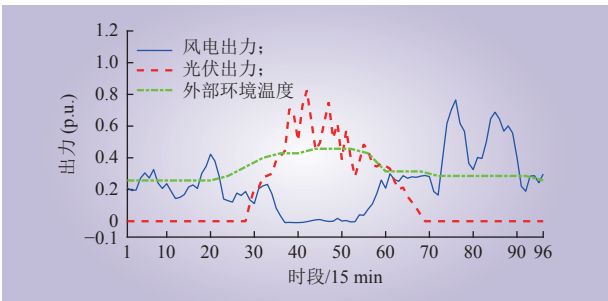


图 6 冬季典型日可再生能源出力和外部温度曲线

Fig. 6 Typical daily renewable energy output curves and ambient temperature in winter

表 1 福建电网电价表

Table 1 Electricity price of Fujian power grid

时段	电价/ (元·(kW·h) ⁻¹)
高峰时段 (08:30—11:30; 14:30—16:30; 18:00—20:00)	0.808
平峰时段 (06:00—08:30; 11:30—14:30; 16:30—18:00)	0.548
低谷时段 (00:00—06:00; 20:00—24:00)	0.288

表 2 设备投资及运维参数表

Table 2 Equipment investment and operation & maintenance parameters

设备	单位额定 容量/kW	单位额定容量 成本/万元	运维系数/ 万元	最大允许 安装数量/台
风机	50.000	0.600	0.019	4
PVT	50.000	1.270	0.010	4
沼气池	300.000	0.500	0.011	2
沼气罐	150.000	0.170	0.011	4
储能电池	100.000	0.290	0.003	4
CHP	100.000	0.880	0.085	10
沼气炉	100.000	0.210	0.045	10
电锅炉	50.000	0.200	0.021	5

表 3 设备技术参数表

Table 3 Equipment technical parameters

参数	设定值	参数	设定值
$\lambda_{\text{on, chp}}/(\text{元} \cdot \text{次}^{-1})$	53.350	$\eta_{\text{e, PVT}}$	0.450
$\lambda_{\text{off, chp}}/(\text{元} \cdot \text{次}^{-1})$	53.350	$\eta_{\text{h, PVT}}$	0.550
$\eta_{\text{e, CHP}}$	0.400	$T_{\text{in, min}}/^\circ\text{C}$	15.000
$\eta_{\text{h, CHP}}$	0.450	$T_{\text{in, max}}/^\circ\text{C}$	55.000
$P_{\text{chp, min}}/\text{kW}$	5.000	$Q_{\text{bio}}/((\text{kW} \cdot \text{h}) \cdot \text{m}^{-3})$	6.110
$P_{\text{chp, max}}/\text{kW}$	100.000	$Pr_{\text{bio}}/(\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$	0.245
η_{f}	0.750	$S_{\text{bes, min}}$	0.100
$P_{\text{f, max}}/\text{kW}$	100.000	$S_{\text{bes, max}}$	1.000
η_{b}	0.750	$V_{\text{gs, min}}/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	-150.000
$P_{\text{b, max}}/\text{kW}$	50.000	$V_{\text{gs, max}}/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	150.000
$G_{\text{s, grid}}/(\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$	3.120	$S_{\text{bes, min}}$	0.100
$G_{\text{n, grid}}/(\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$	2.350	$S_{\text{bes, max}}$	0.900
$G_{\text{c, grid}}/(\text{g} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$	0.890	$P_{\text{ch, max}}/\text{kW}$	80.000
$G_{\text{c, bio}}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.960	$P_{\text{dis, max}}/\text{kW}$	80.000
G_{bef}/kg	3 721.550	η_{ch}	0.910
r	0.050	η_{dis}	0.910
N_{inv}	8.000	$r_{\text{SO}_2}/(\text{元} \cdot \text{g}^{-1})$	0.006
R	0.050	$r_{\text{NO}_x}/(\text{元} \cdot \text{g}^{-1})$	0.008
$P_{\text{grid, max}}/\text{kW}$	1 000.000	$r_{\text{CO}_2}/(\text{元} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.060

表 4 协同优化方案

Table 4 Collaborative optimization scheme

方 案	上层优化 配置算法	下层优化 运行算法	上层优化 配置方法	下层优化 运行方法
1	NSGA-II 算法	Gurobi 求解器	基于 Pareto 最优解集的多目标优化方法	将环保性指标转化为经济性指标的多目标优化方法
2	遗传算法	Gurobi 求解器	单目标优化方法	单目标优化方法
3	遗传算法	Gurobi 求解器	基于权重分析法的多目标优化方法	将环保性指标转化为经济性指标的多目标优化方法

方案 1：本文所提沼-风-光综合能源系统能量枢纽模型；方案 2：上层优化配置目标考虑年化总成本最小（代表经济性），下层优化运行目标考虑碳排放量最小（代表环保性）的综合能源系统能量枢纽系统模型；方案 3：上层优化配置方法采用权重分析法（权重系数 $\alpha=0.2/0.5/0.8/1$ ），下层优化运行方法与本文相同。其中，上层优化配置模型的目标函数为

$$\min f = \min(1 - \alpha)f_1 + \alpha f_2 \quad (37)$$

方案 1 产生的优化配置方案 Pareto 最优解集如图 7 所示，图中每个点表示一种配置方案。

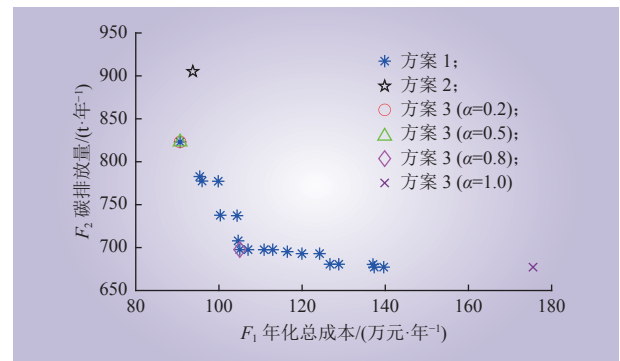


图 7 Pareto 最优解集

Fig. 7 Pareto optimal solution set graph

根据 Pareto 最优化原理，方案 1 得到的优化配置方案均具有参考价值，只是在经济性和环保性两方面各有侧重，能为用户提供更加多元化和精细化的决策方案。用户可以根据自身需求选择适应自身发展的最优配置方案。优化配置方案 Pareto 最优解集中的典型配置方案如表 5 所示。为了向用户提供更人性化的服务，本文利用模糊决策法[22]、理想点法[23]、超体积决策法[24]，得到优化配置方案 Pareto 最优解集中的折衷解配置方案及其相应优化结果也如表 5 所示。



表 5 方案 1 优化配置方案及对应优化结果
Table 5 Scheme I optimized configuration scheme and corresponding optimized results

解集	风机/ 台	光伏/ 台	储能 电池/ 台	沼气 池/ 台	沼气 罐/ 台	CHP/ 台	沼气 炉/ 台	电锅 炉/ 台	年化总 成本/ (万元·年 ⁻¹)	碳排 放量/ (t·年 ⁻¹)
折衷 解	4	4	1	1	2	1	1	2	105.02	697.70
典型 解1	4	1	1	1	1	1	1	3	90.66	823.00
典型 解2	4	2	1	1	2	1	1	2	95.95	777.51
典型 解3	4	3	1	1	2	1	1	2	100.33	737.73
典型 解4	4	4	2	2	4	1	1	2	126.70	680.64

由图 7 可见，方案 2 所得优化配置方案相比方案 1 不是最优配置方案。方案 3 中环保性权重系数 $\alpha=0.2/0.5$ 时的优化配置方案相同，导致无法确定此优化配置方案经济性和环保性的真实侧重，具有盲目性。同时，方案 3 中环保性权重系数 $\alpha=1$ 时得到的优化配置方案不是最优配置方案，在环保性指标相同情况下，方案 1 中有经济性更优的配置方案。

综上，方案 1 利用基于 Pareto 最优解集的多目标优化方法能够得到更加多元化和精细化的优化配置方案集，同时保证在相同目标侧重时得到最优配置方案，即在系统能够正常运行情况下，兼顾经济性和环保性。

3.3 运行结果和分析

设置如下 3 种运行方案进行对比分析和讨论（方案 1 和 3 输入的配置方案利用 3.2 节方案一的折衷配置方案）：方案 1：本文所提沼-风-光综合能源系统能量枢纽模型；方案 2：不考虑能量枢纽中沼气池余热余电反馈的综合能源系统模型（配置方案满足系统运行的投资成本最低）；方案 3：上层优化配置目标考虑年化总成本最小（代表经济性），下层优化运行目标考虑碳排放量最小（代表环保性）的综合能源系统能量枢纽系统模型。

3.3.1 可再生能源产生和消纳分析

方案 1 和 2 夏、冬季沼气池内部环境温度曲线如图 8 所示，其中方案 2 沼气池内部环境温度曲线即为沼气池外部环境温度曲线。可以看出，方案 2 沼气池无余热余电反馈，冬季外部环境温

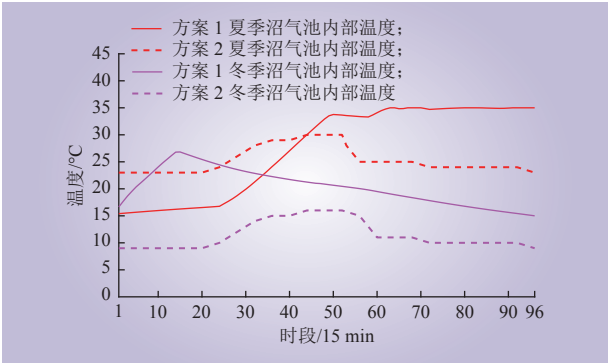


图 8 沼气池内部环境温度曲线
Fig. 8 Ambient temperature curve inside biogas digester

度低于 15 °C，沼气池近乎停产。而方案 1 增加沼气池余热余电反馈，沼气池在极寒气候情况下也可以正常运作。夏季外部环境温度偏高，方案 2 沼气池能够正常工作，但沼气产量较低；方案 1 增加沼气池余热余电反馈，沼气池内部环境温度逐渐趋于并保持在 35 °C，极大程度增加了沼气产量，促进生物质能的产生。

方案 1、2 优化运行方案对比结果如表 6 所示。可以看出，方案 2 不考虑能量枢纽中的余热余电反馈，沼气产量显著降低，运行成本增加；其次在储能电池满配的情况下，风、光可再生能源仍不能实时消纳，最终通过增加能量转换和存储设备配置台数以应对实时负荷和可再生能源突变的情况，投资成本增加。

表 6 方案 1、2 优化运行对比结果
Table 6 Comparison results of optimized operation of Scheme I and Scheme II

方案	储能 电池/ 台	沼气 罐/ 台	CHP/ 台	沼气 炉/ 台	电锅 炉/ 台	投资 成本/ (万元·年 ⁻¹)	运行 成本/ (万元·年 ⁻¹)	沼气 产量/ (t·年 ⁻¹)	可再生 能源消 纳率/ %
1	1	2	1	1	2	76.60	21.95	529.70	100.00
2	4	1	3	3	3	111.46	41.60	143.00	69.88

综上，增加能量枢纽反馈机制可以促进可再生能源的产生和消纳，促进可再生能源间的多能互补，进一步降低可再生能源系统投资和运行成本。

3.3.2 优化运行方案分析

方案 1 和 3 夏、冬季综合能源系统电、热、气功率（体积）平衡图如图 9~20 所示。与方案 3 相比，方案 1 能够更好地协调各种能源转换、

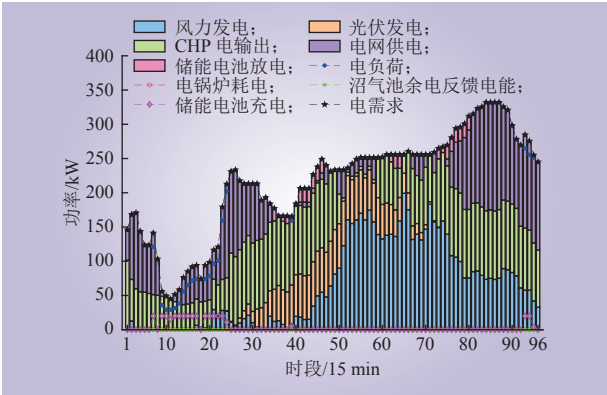


图 9 方案 1 夏季典型日电功率平衡图
Fig. 9 Scheme I electric load balance power diagram in summer

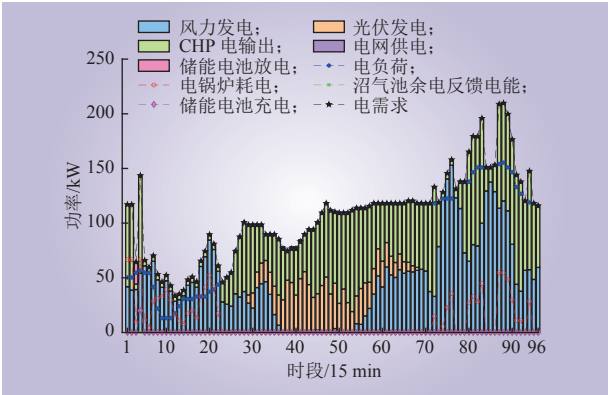


图 12 方案 3 冬季典型日电功率平衡图
Fig. 12 Scheme III electric load balance power diagram in winter

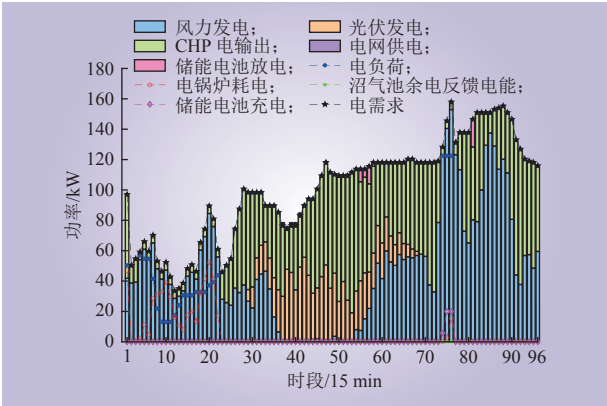


图 10 方案 1 冬季典型日电功率平衡图
Fig. 10 Scheme I electric load balance power diagram in winter

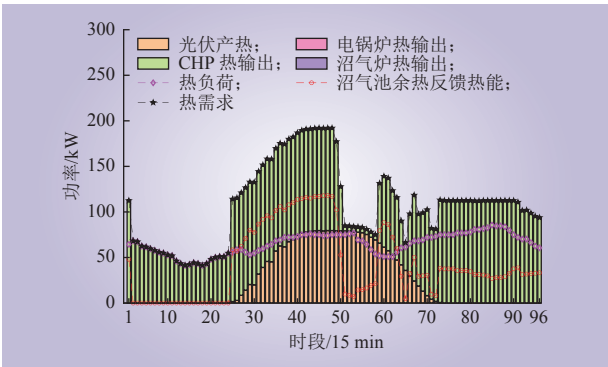


图 13 方案 1 夏季典型日热功率平衡图
Fig. 13 Scheme I thermal load balance power diagram in summer

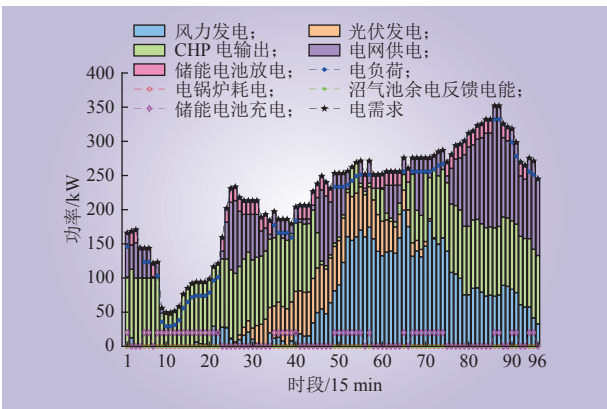


图 11 方案 3 夏季典型日电功率平衡图
Fig. 11 Scheme III electric load balance power diagram in summer

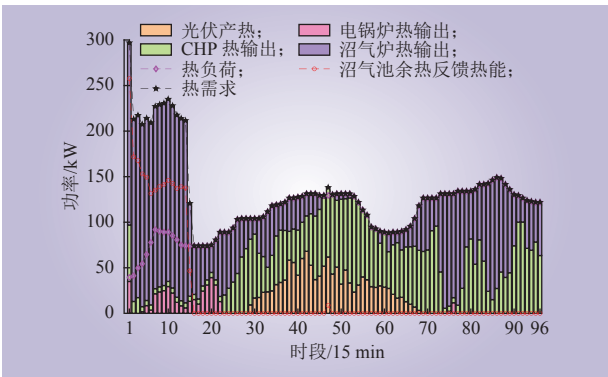


图 14 方案 1 冬季典型日热功率平衡图
Fig. 14 Scheme I thermal load balance power diagram in winter

电能和沼气储存，提高系统能效，降低系统成本和碳排放量。冬季电负荷较少时，主要利用可再生能源供能，而不是从电网购电来满足电负荷需

求；夏季电负荷较多时，系统在电价低谷时段从电网购入电能，利用储能电池储存起来，在电价高峰时段供给电负荷需求。

由于 CHP 的能量转换效率高于沼气炉和电锅

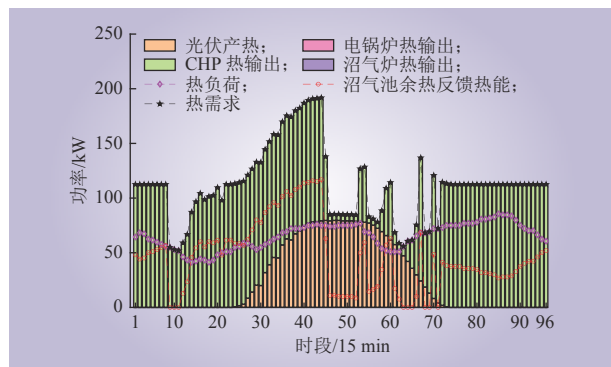


图 15 方案 3 夏季典型日热功率平衡图
Fig. 15 Scheme III thermal load balance power diagram in summer

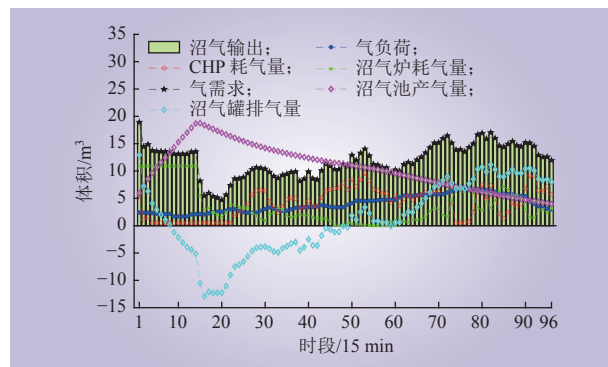


图 18 方案 1 冬季典型日气功率平衡图
Fig. 18 Scheme I biogas load balance power diagram in winter

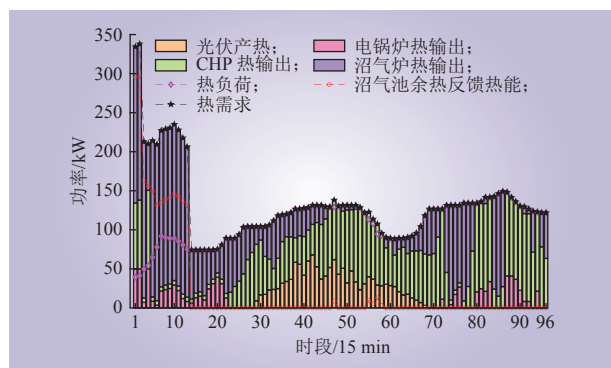


图 16 方案 3 冬季典型日热功率平衡图
Fig. 16 Scheme III thermal load balance power diagram in winter

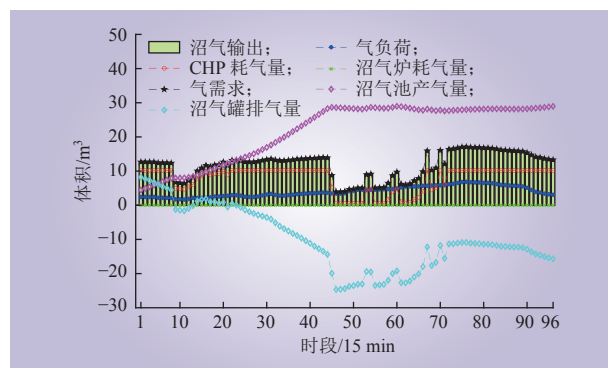


图 19 方案 3 夏季典型日气功率平衡图
Fig. 19 Scheme III biogas load balance power diagram in summer

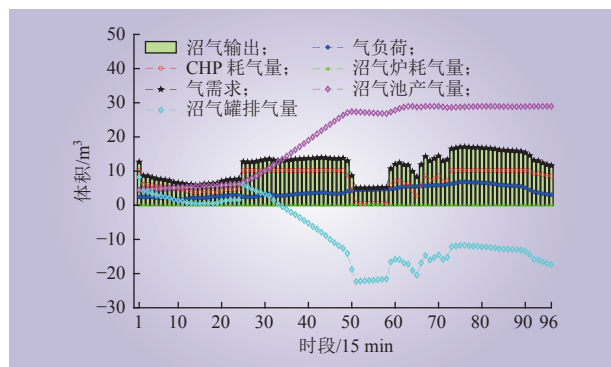


图 17 方案 1 夏季典型日气功率平衡图
Fig. 17 Scheme I biogas load balance power diagram in summer

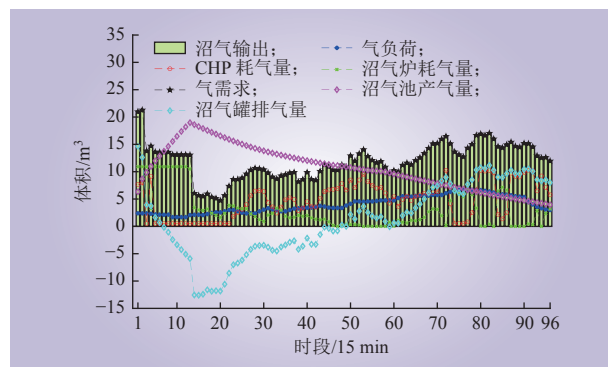


图 20 方案 3 冬季典型日气功率平衡图
Fig. 20 Scheme III biogas load balance power diagram in winter

炉，因此夏季热负荷低时主要由 CHP 供给，而不利用能量损失成本更大的电锅炉和沼气炉；冬季电负荷需求较低时，由于 CHP 同时产电和产热，在不需要更多电能的情况下，也不能生产更多的热能，因此需要利用能量转换效率相对较低的沼

气炉和电锅炉供给冬季较高的热负荷。

由于余热反馈可以直接以热能的形式作用于沼气池，而余电反馈仍需要通过电锅炉这一能量转换设备将电能转换为热能作用于沼气池；由式 (10)~(12) 可知，单位功率电网输入电能产生

的碳排放量远高于 CHP 和沼气炉产生的碳排放量，因此用于沼气池的余热反馈几乎为 0，只作为余热反馈的补充，沼气池基本通过能量枢纽的余热反馈提高沼气池内部温度。

与方案 1 相比，方案 3 由于不考虑经济性，导致夏季从电网购电未考虑电价高低时段；未能考虑电网和 CHP 以及储能电池之间的协调互补，徒增购电和能量损失成本。方案 1、3 夏季能量存储设备 SOC 曲线如图 21 所示。由于电网不同时段的碳排放量相同，而储能电池不产生碳排放量，因此与方案 1 相比，方案 3 储能电池频繁充放电以减小电网输入电能，徒增能量损失成本。

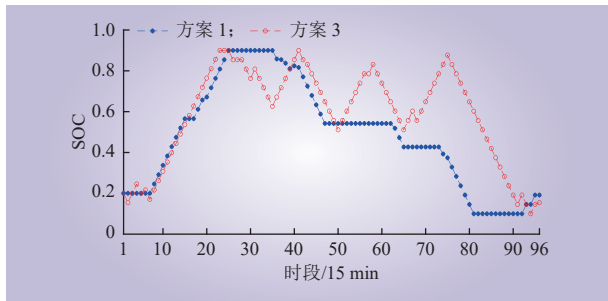


图 21 方案 1、3 夏季能量存储设备 SOC 曲线

Fig. 21 Energy storage equipment SOC curve in summer of Scheme I & III

方案 1、3 优化运行结果如表 7 所示，由表 7 可以看出：方案 1 在保证碳排放量较低的同时，运行成本较低、能量损失更少，本文提出的优化运行方案相较于下层只考虑降低碳排放量的方案更具有实践和参考价值。

表 7 方案 1、3 优化运行对比结果

Table 7 Comparison results of optimized operation of Scheme I and Scheme III

方案	碳排放量/(t·年 ⁻¹)	运行成本/(万元·年 ⁻¹)	CHP 启停成本/(万元·年 ⁻¹)	能量转换成本/(万元·年 ⁻¹)	购电成本/(万元·年 ⁻¹)	污染物排放成本/(万元·年 ⁻¹)	碳排放成本/(万元·年 ⁻¹)
1	736.7	21.95	0	7.43	9.28	0.88	4.35
3	736.3	23.30	0	7.85	10.31	0.82	4.32

4 结论

1) 对于本文提出的沼-风-光综合能源系统配置-运行协同优化双层规划模型来说，降低年化总成本和降低碳排放量存在一定的矛盾关系。基于

NSGA-II 算法得到配置方案的 Pareto 最优解集，相比双层单目标优化方法和权重分析法，能为用户提供更加多元化和精细化的规划方案。在保证最优性的同时，避免权重设置的主观性以及可能存在不同目标权重得到相同配置方案，给真实权重分析带来困难的问题。

2) 能量枢纽反馈机制利用风、光可再生能源的余热余热反馈给沼气池供热以提高沼气池内部温度，提升了沼气产量，促进了可再生能源的产生和消纳，降低了沼-风-光综合能源系统的投资和运行成本。

3) 考虑经济性和环保性多目标得到的优化运行方案，相比双层单目标优化方法，能够保证在碳排放量只增加 0.05% 的情况下，运行成本降低 6%。

本研究中多个综合能源系统的多能协调和交互尚未涉及，在后续的研究工作中，将计及网架结构，进一步采用分布式算法，考虑多个综合能源系统间的协同优化调度方案。

参考文献：

- [1] ZHOU B, XU D, LI C B, *et al.* Optimal scheduling of biogas-solar-wind renewable portfolio for multicarrier energy supplies[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(6): 6229–6239.
- [2] YU C T, LAI X Y, CHEN F, *et al.* Multi-time period optimal dispatch strategy for integrated energy system considering renewable energy generation accommodation[J]. *Energies*, 2022, 15(12): 4329.
- [3] 王瑞, 程杉, 徐建宇, 等. 基于主从博弈和混合需求响应的能量枢纽多时间尺度优化调度策略[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(1): 32–40.
WANG Rui, CHENG Shan, XU Jianyu, *et al.* Multi-time scale optimal scheduling strategy of energy hub based on master-slave game and hybrid demand response[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(1): 32–40.
- [4] 王丹, 孟政吉, 贾宏杰, 等. 基于配置-运行协同优化的分布式能源站选型与定容规划[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(8): 152–160.
WANG Dan, MENG Zhengji, JIA Hongjie, *et al.* Siting and sizing planning for distributed energy station based on coordinated optimization of configuration and operation[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(8): 152–160.
- [5] 宋晨辉, 冯健, 杨东升, 等. 考虑系统耦合性的综合能源协同优



- 化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 38–45, 86.
- SONG Chenhui, FENG Jian, YANG Dongsheng, *et al.* Collaborative optimization of integrated energy considering system coupling[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(10): 38–45, 86.
- [6] 尤森槟, 程志江, 张子建, 等. 风光沼储微电网系统容量优化配置[J]. 中国沼气, 2020, 38(1): 66–70.
- YOU Senbin, CHENG Zhijiang, ZHANG Zijian, *et al.* Optimal capacity allocation of PV-wind-biogas-battery microgrid system[J]. *China Biogas*, 2020, 38(1): 66–70.
- [7] 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.
- [8] LAI C S, MCCULLOCH M D. Sizing of stand-alone solar PV and storage system with anaerobic digestion biogas power plants[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(3): 2112–2121.
- [9] 李民, 刘钦浩, 赵冠, 等. 考虑多元产业协同的乡村综合能源系统规划[J]. 中国电力, 2022, 55(8): 14–22.
- LI Min, LIU Qin hao, ZHAO Guan, *et al.* Rural integrated energy system planning considering multi-industry synergy[J]. *Electric Power*, 2022, 55(8): 14–22.
- [10] 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 Zhihui, LÜ Lin, XU Lixiong. Two-stage optimal dispatch model of day-ahead and real-time for biogas-wind-solar fully renewable energy system based on energy hub[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(9): 3101–3109.
- [11] 谭洪, 颜伟, 王浩. 基于建筑物热能流分析的沼-风-光孤立微电网优化调度模型[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2483–2491.
- TAN Hong, YAN Wei, WANG Hao. Optimal dispatch model of biogas-wind-solar isolated multi-energy micro-grid based on thermal energy flow analysis of buildings[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(7): 2483–2491.
- [12] 王瑞琪, 王新立, 郭光华, 等. 农村光-氢-沼储能综合能源系统建模与鲁棒优化调度[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 89–98.
- WANG Ruiqi, WANG Xinli, GUO Guanghua, *et al.* Modeling and robust optimal dispatch of rural integrated energy system considering PV-hydrogen-methane energy storage characteristics[J]. *Electric Power*, 2023, 56(5): 89–98.
- [13] 边晓燕, 史越奇, 裴传逊, 等. 计及经济性和可靠性因素的区域综合能源系统双层协同优化配置[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4529–4543.
- BIAN Xiaoyan, SHI Yueqi, PEI Chuanxun, *et al.* Bi-level collaborative configuration optimization of integrated community energy system considering economy and reliability[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(21): 4529–4543.
- [14] 刘海涛, 朱海南, 李丰硕, 等. 计及碳成本的电-气-热-氢综合能源系统经济运行策略[J]. 电力建设, 2021, 42(12): 21–29.
- LIU Haitao, ZHU Hainan, LI Fengshuo, *et al.* Economic operation strategy of electric-gas-heat-hydrogen integrated energy system considering carbon cost[J]. *Electric Power Construction*, 2021, 42(12): 21–29.
- [15] 王志贺, 刘元园, 唐沂媛, 等. 考虑二氧化碳排放的冷热电联供系统的容量配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(8): 104–110.
- WANG Zhihe, LIU Yuanyuan, TANG Yiyuan, *et al.* Capacity configuration of CCHP system considering carbon dioxide emissions[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2017, 29(8): 104–110.
- [16] 白凯峰, 顾洁, 彭虹桥, 等. 融合风光出力场景生成的多能互补微网系统优化配置[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 133–141.
- BAI Kaifeng, GU Jie, PENG Hongqiao, *et al.* Optimal allocation for multi-energy complementary microgrid based on scenario generation of wind power and photovoltaic output[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(15): 133–141.
- [17] 刁涵彬, 李培强, 吕小秀, 等. 考虑多元储能差异性的区域综合能源系统储能协同优化配置[J]. 电工技术学报, 2021, 36(1): 151–165.
- DIAO Hanbin, LI Peiqiang, LÜ Xiaoxiu, *et al.* Coordinated optimal allocation of energy storage in regional integrated energy system considering the diversity of multi-energy storage[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(1): 151–165.
- [18] 刘广, 白晓清, 刁天一. 考虑气电网架构的沼-风-光综合能源微网优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(12): 49–58.
- LIU Guang, BAI Xiaoqing, DIAO Tianyi. Optimal scheduling of biogas-wind-solar integrated energy microgrid system considering gas-power network architecture[J]. *Power System and Clean Energy*, 2020, 36(12): 49–58.
- [19] WU T, BU S Q, WEI X, *et al.* Multitasking multi-objective operation optimization of integrated energy system considering biogas-solar-wind renewables[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 229: 113736.
- [20] 白斌, 韩明亮, 林江, 等. 含风电和光伏的可再生能源场景削减方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 141–149.
- BAI Bin, HAN Mingliang, LIN Jiang, *et al.* Scenario reduction method of renewable energy including wind power and



- photovoltaic[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 141–149.
- [21] 孙惠娟, 方杜, 彭春华. 基于可拓距 K-均值聚类和正弦微分进化算法的风储联合系统优化配置 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 20–27.
- SUN Huijuan, FANG Du, PENG Chunhua. Optimal allocation of wind-energy storage combined system based on extension distance K-means clustering and sine differential evolution algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 20–27.
- [22] 吴静, 德格吉日夫, 谭忠富, 等. 计及 P2G 与 CCHP 技术的综合能源系统多目标协同优化模型 [J]. 电测与仪表, 2021, 58(5): 20–30.
- WU Jing, DE Gejirifu, TAN Zhongfu, *et al.* Multi-objective coordinated optimization model for integrated energy systems with power-to-gas and combined-cooling-heating-power technologies[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(5): 20–30.
- [23] 张博智, 卢妍, 谭晨, 等. 光伏光热互补发电系统多目标容量优化研究 [J]. 热力发电, 2022, 51(5): 9–17.
- ZHANG Bozhi, LU Yan, TAN Chen, *et al.* Research on multi-objective capacity optimization of PV-CSP hybrid system[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(5): 9–17.
- [24] 查永星. 综合能源系统调度优化的分解型交叉熵算法 [D]. 深圳: 深圳大学, 2020.
- ZHA Yongxing. Decomposition-based cross-entropy algorithm for scheduling optimization of integrated energy systems[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2020.
- 作者简介:**
- 李梓萌 (2000—), 女, 硕士研究生, 从事电力能源互联及其智能化研究, E-mail: 22110116@zju.edu.cn;
- 王天阔 (1992—), 男, 工程师, 从事电气工程、工程管理等研究, E-mail: wangtiankuo92999@163.com;
- 胡鹏飞 (1988—), 男, 通信作者, 博士, 研究员, 从事大规模储能技术及其在电力系统的应用等研究, E-mail: hpf@zju.edu.cn.
- (责任编辑 蒋东方)

Bi-level Collaborative Configuration Optimization of Biogas-Wind-Solar Integrated Energy System Based on Energy Hub

LI Zimeng¹, WANG Tiankuo², HU Pengfei¹, YU Yanxue¹, DU Yi³, CAI Qiyuan³

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310030, China; 3. Power Economic Research Institute of State Grid Fujian Electric Power Company, Fuzhou 350012, China)

Abstract: In order to solve the collaborative optimization problem of rural biogas-wind-solar integrated energy system, a bi-level planning model of collaborative optimization of biogas-wind-solar integrated energy system was proposed based on energy hub. In the upper level, the Pareto optimal solutions of the configuration scheme were obtained using the NSGA-II algorithm with the goal of minimizing the annual total cost and carbon emissions. In the lower level, the optimal operation scheme was obtained with the objective of minimizing the operation cost (including carbon emission cost). The heuristic rule was introduced to eliminate the possible equipment redundancy of the configuration scheme from the upper and speed up the optimal configuration process. Finally, the proposed model was verified through a rural biogas-wind-solar integrated energy system in Fujian. The results have proved the plurality and superiority of the proposed optimal configuration and operation scheme.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.52007167), Scientific Research Fund of Zhejiang Provincial Education Department (No.Y202250813), Science & Technology Project of SGCC (No.52130N22000G).

Keywords: biogas-wind-solar integrated energy system; economy; environmental protection; energy hub; Pareto optimal solutions