

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240425

考虑能量转换装置可变效率的综合能源系统多目标优化调度

姜延卓¹, 高冲², 刘艳云¹, 张真理¹, 叶荣江², 李万彬³, 谢庆¹

(1. 华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003; 2. 华北电力大学经济管理学系, 河北 保定 071003;
3. 国网山东省电力公司德州供电公司, 山东 德州 253075)

摘要: 为了全面考虑综合能源系统的运行性能, 提出一种计及能量转换装置可变效率的综合能源系统多目标优化运行方法。首先, 对具有可变效率的能量转换设备运行特性曲线进行分段线性化处理。其次, 建立以经济成本、碳排放量和综合能源利用效率为优化对象的多目标优化调度模型, 并通过 Charnes-Cooper 变换解决综合能源利用效率目标的非凸非线性问题。最后, 在求解该多目标模型时, 运用规格化法平面约束法生成均匀分布的帕累托前沿, 再采用改进熵权双基点法决策出折衷最优解。对修改的 IEEE 33 节点电网和 8 节点热网耦合的综合能源系统进行仿真分析。结果表明: 优化后的模型和算法可以得到兼顾综合能源系统经济性、低碳性及高效性的优化运行方案, 为决策者提供科学的决策参考。

关键词: 综合能源系统; 多目标优化; 可变效率; 规格化法平面约束法; 改进熵权双基点法

Multi-objective scheduling optimization of an integrated energy system considering variable efficiency of energy conversion devices

JIANG Yanzhuo¹, GAO Chong², LIU Yanyun¹, ZHANG Zhenli¹, YE Rongjiang², LI Wanbin³, XIE Qing¹

(1. Department of Electric Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. Department of Economic Management, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
3. Dezhou Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Dezhou 253075, China)

Abstract: To comprehensively assess the operational performance of an integrated energy system, this paper introduces a multi-objective optimal operational method that takes into account the variable efficiency of energy conversion devices. First, the operational characteristic curves of energy conversion devices with variable efficiency are segmented and linearized. Second, a multi-objective optimal scheduling model is established considering the economic costs, carbon emissions and comprehensive energy utilization efficiency. The non-convex nonlinear problem with comprehensive energy utilization efficiency is solved by the Charnes-Cooper transformation. Finally, to solve the multi-objective model, the normalized normal constraint method is employed to generate a Pareto optimal set with uniform distribution. Following this, the improved entropy weight double-base point method is used to identify the compromise optimal solution. The modified IEEE 33-bus power distribution network and 8-bus heating network coupled integrated energy system are simulated and analyzed. The results show that the optimized model and algorithm are capable of obtaining an operational scheme that considers economy, low-carbon, and high efficiency of an integrated energy system. This offers decision makers scientific references for decision-making.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFB0906005).

Key words: integrated energy system; multi-objective optimization; variable efficiency; normalized normal constraint method; improved entropy weight double-base point method

0 引言

中国预计到 2060 年, 清洁低碳安全高效的能

源体系将全面建立, 整体能源利用效率将大幅提高^[1]。在此背景下, 考虑综合能源系统(integrated energy system, IES)的经济性、低碳性和能效性具有重要意义^[2-3]。因此, 研究综合能源系统优化运行问题时需要综合考虑多个指标, 包括总成本、碳排放量和综

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2020YFB0906005)

合能源利用效率。然而, 这些指标之间存在相关性和矛盾性, 如何协调这些目标仍然是该领域的关键问题^[4-6]。对于综合能源系统的优化运行方法, 主要分为优化模型以及求解算法两大部分, 有必要围绕这两方面进行深入研究, 使多个目标尽可能达到最优状态, 促进能源系统的可持续发展。

当前国内外学者针对 IES 优化模型展开了相关研究。文献[7]提出了一种基于一致性的低碳经济调度策略来提高 IES 的经济性和环保性。文献[8]针对含可再生能源发电的综合能源系统, 以烟效率最大和运行成本最低为目标, 构建多目标调度模型。文献[9]在含氢综合能源系统经济低碳调度策略中考虑了光热电站和电制氢系统之间的耦合性。现有研究主要聚焦于经济-低碳或经济-能效方面, 对于综合考虑经济、低碳和能效的研究相对较少。此外, 在上述文献中, 能量转换效率被视为常数, 但在实际运行中, 能量转换设备的运行效率会随运行条件发生变化, 使用恒定能量效率模型将不再准确^[10]。

另一方面, 多目标优化调度的求解算法分为启发式优化算法和传统优化算法。文献[11]验证了在求解大规模优化问题时, 启发式优化算法容易出现求解困难或陷入局部最优解的问题。文献[12-14]验证了在传统的优化求解算法中, 规格化法平面约束(normalized normal constraint, NNC)法能得到分布广泛且均匀的帕累托(Pareto)前沿解。在实际应用中, 决策者只需从帕累托解集中选择一个折衷最优解(compromise optimal solution, COS)来制定调度方案。现有文献多采用熵权法^[15]、模糊隶属度函数法^[16]和熵权双基点法^[17]等从 Pareto 前沿解集中选择折衷最优解作为调度的决策方案。然而, 熵权法对原始数据依赖较大, 求解得到的权重没有考虑调度员的主观偏好; 模糊隶属度函数法存在信息损失和不够准确的问题; 熵权双基点法难以有效呈现待评价对象与理想点的差异。为弥补上述方法在选取折衷最优解问题上的不足, 本文提出改进熵权双基点法, 基于该算法求解电-热综合能源系统的折衷解既可以将定量分析与定性分析相结合, 又全面考虑了 Pareto 前沿解集与理想点的加权欧式距离和关联度, 保证了决策者能够选择出最优的解决方案。

综上, 本文提出一种以总成本、碳排放量和综合能源利用效率为目标函数的多目标综合能源系统优化调度模型。利用 Charnes-Cooper 变换, 将综合能源利用效率转化为一个线性规划问题, 并通过分段线性化方法将具有可变效率的能量转换装置划分为若干效率恒定的等效组件。为了求解该模型, 本文利用 NNC 法得到一系列均匀分布的帕累托解, 然后采用改进熵权双基点法从帕累托前沿解集中选

取出折衷最优解。对修改的 IEEE 33 节点电网和 8 节点热网耦合的综合能源系统进行仿真分析, 验证了本文模型和算法对于此类多目标优化问题的适用性。

1 可变效率分段线性化模型

在综合能源系统中, 燃气锅炉(gas boiler, GB)的热效率、储能装置的充放能效率和热电联产机组(combined heat and power, CHP)的转换效率都受到输入功率变化的影响。这些能量转换设备的可变效率会对短期计划产生显著的影响^[18], 因此使用恒定能量效率模型将不再准确。

本文采用分段线性化方法对具有可变效率的能量转换设备进行建模。通过分段线性化, 将一个可变效率的能量转换装置划分为若干效率恒定的等效组件。图 1 给出了在一定负载水平下的输出功率曲线及其线性化示意图。图中, 利用 $m+1$ 个分段点将能量转换设备 c 的输入功率 E_c^{in} 和输出功率 E_c^{out} 分成 m 段。能量转换设备分为单输入单输出(single-input single-output, SISO)和单输入多输出(single-input multi-output, SIMO)。

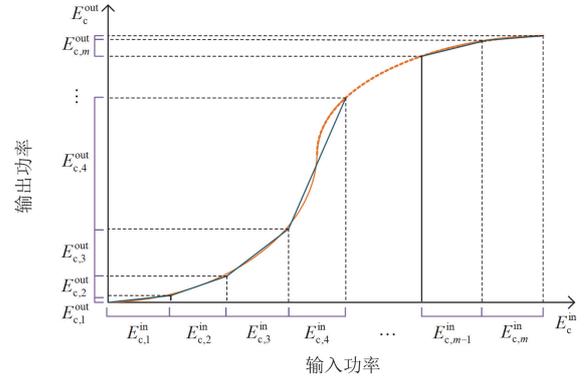


图 1 转换器件输出功率曲线及其线性化示意图
Fig. 1 Output power curve of conversion devices and its linear approximation

1.1 单输入单输出能量转换设备

单输入单输出能量转换设备有燃气锅炉、蓄电池(battery, BT)、热储能设备(heat storage, HS)等。其能量效率受负载率、温度、气压、湿度等因素影响, 在实际运行中转换效率发生变化^[19]。为解决转换设备非恒定能量效率给优化模型带来的影响, 构建如图 2 所示的分段线性化模型。

能量转换设备输入功率 E_c^{in} 和输出功率 E_c^{out} 的关系为

$$E_c^{\text{out}} = \eta_c \cdot E_c^{\text{in}} \quad (1)$$

式中, η_c 为能量转换设备的效率。

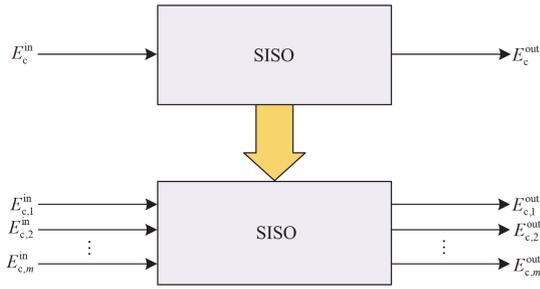


图2 单输入单输出设备分段线性化模型

Fig. 2 Piecewise linearization model of SISO device

如图2所示, 输入功率的范围可分为 m 段。

$$\begin{aligned} & [0, E_{c,1}^{in}], [E_{c,1}^{in}, E_{c,1}^{in} + E_{c,2}^{in}], \dots, \\ & [E_{c,1}^{in} + \dots + E_{c,m-1}^{in}, E_{c,1}^{in} + \dots + E_{c,m}^{in}] \end{aligned} \quad (2)$$

引入变量 $E_{c,p}^{in}$ ($p=1, 2, \dots, m$) 来表示落在每个段中的输入功率, $E_{c,p}^{in}$ 计算公式如式(3)所示。

$$E_{c,p}^{in} = \begin{cases} E_{c,p}^{in}, E_c^{in} \geq \sum_{i=1}^p E_{c,i}^{in} \\ E_c^{in} - \sum_{i=1}^{p-1} E_{c,i}^{in}, \sum_{i=1}^{p-1} E_{c,i}^{in} < E_c^{in} < \sum_{i=1}^p E_{c,i}^{in} \\ 0, E_c^{in} \leq \sum_{i=1}^{p-1} E_{c,i}^{in} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $E_{c,p}^{in}$ 为第 p 段的输入功率。

$E_{c,p}^{in}$ ($p=1, 2, \dots, m$) 满足:

$$E_c^{in} = \sum_{p=1}^m E_{c,p}^{in} \quad (4)$$

E_c^{out} 的范围可以划分为与 E_c^{in} 相同数量的段, 类似地, 变量 $E_{c,p}^{out}$ ($p=1, 2, \dots, m$) 满足:

$$E_c^{out} = \sum_{p=1}^m E_{c,p}^{out} \quad (5)$$

在第 p 段, 变效率 η_c 转换为固定效率 $\eta_{c,p}$, 如式(6)所示。

$$\begin{cases} E_{c,p}^{out} = \eta_{c,p} \cdot E_{c,p}^{in} \\ \eta_{c,p} = \frac{E_{c,p}^{out}}{E_{c,p}^{in}} \end{cases} \quad (6)$$

通过引入二进制变量 $u_{c,1}, u_{c,2}, \dots, u_{c,m-1}$ 可以保证 E_c^{in} 和 E_c^{out} 的连续性。二进制变量表示为

$$\begin{cases} u_{c,1} \cdot E_{c,1}^{in} \leq E_{c,1}^{in} \leq E_{c,1}^{in} \\ u_{c,2} \cdot E_{c,2}^{in} \leq E_{c,2}^{in} \leq E_{c,2}^{in} \\ \vdots \\ u_{c,m-1} \cdot E_{c,m-1}^{in} \leq E_{c,m-1}^{in} \leq E_{c,m-1}^{in} \\ 0 \leq E_{c,m}^{in} \leq E_{c,m}^{in} \end{cases} \quad (7)$$

如果在第 p ($1 < p < m$) 段, 二进制变量表示如式(8)所示。

$$\begin{cases} u_{c,1}, u_{c,2}, \dots, u_{c,p-1} = 1 \\ u_{c,p}, u_{c,p+1}, \dots, u_{c,m-1} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

1.2 单输入多输出能量转换设备

单输入多输出能量转换设备有背压式运行模式下的 CHP 和抽汽冷凝模式下的 CHP 等。在背压运行模式下, CHP 热电输出功率之比恒定^[20], 从输入端口到每个输出端口的能量转换过程可以用类似于 SISO 能量转换设备的方式分段地单独线性化。因此, 从输入端到每个输出端的能量转换过程也可以分段线性化, 如图3所示。

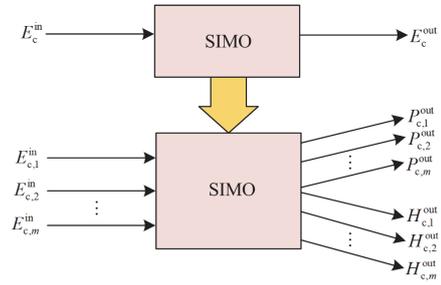


图3 单输入多输出设备分段线性化模型

Fig. 3 Piecewise linearization model of SIMO device

第 p 段的输出电功率 $P_{c,p}^{out}$ 、输出热功率 $H_{c,p}^{out}$ 和输入功率 $E_{c,p}^{in}$ 的关系如式(9)所示。

$$\begin{cases} P_{c,p}^{out} = \sum_{p=1}^m \eta_{c,p}^{el} E_{c,p}^{in} \\ H_{c,p}^{out} = \sum_{p=1}^m \eta_{c,p}^{therm} E_{c,p}^{in} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\eta_{c,p}^{el}$ 为 CHP 机组第 p 段产生电能的效率; $\eta_{c,p}^{therm}$ 为 CHP 机组第 p 段产生热能的效率。

如果每个输出端口的能量输出与能量输入不成正比, 例如热电联产机组在抽汽冷凝运行模式下, SIMO 能量转换器的特性可以建模为多元二次函数, 并对输入输出进行线性映射, 此处不再赘述。

2 多目标 IES 优化调度模型

2.1 优化目标

2.1.1 经济目标

IES 的经济目标函数如式(10)所示。

$$\min f_1 = \min \sum_{t=1}^{24} (C_t^{gas} + C_t^{on} + C_t^{net}) \quad (10)$$

式中: f_1 为总运行成本; C_t^{gas} 、 C_t^{on} 和 C_t^{net} 分别为 t 时刻燃气成本、运行维护成本和从上级电网购电成

本。详细计算见附录 A 式(A1)。

2.1.2 碳排放目标

IES 的经济目标函数如式(11)所示。

$$\min f_2 = \min \sum_{t=1}^{24} (T_t^{\text{CHP}} + T_t^{\text{GB}} + T_t^{\text{net}}) \quad (11)$$

式中: f_2 为碳排放量; T_t^{CHP} 、 T_t^{GB} 和 T_t^{net} 分别为 t 时刻热电联产机组、燃气锅炉和主电网的碳排放量。详细计算见附录 A 式(A2)。

2.1.3 综合能源利用效率

综合能源利用效率 η_{IES} 为电力需求总量和热需求总量与能源投入的比值^[21], 其计算公式如式(12)所示。

$$\eta_{\text{IES}} = \frac{\sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^N E_{j,t}^{\text{load}} \alpha_j}{\sum_{t=1}^{24} \sum_{j=1}^N \left(\frac{E_{j,i,t}}{\eta_{s,j}} \right) \alpha_j} \quad (12)$$

式中: $E_{j,t}^{\text{load}}$ 为 t 时刻量子系统 j 的总负荷; N 为量子系统的个数; $E_{j,i,t}$ 为 t 时刻量子系统 j 中供能装置 i 的供能量; α_j 为第 j 类能源的折标准煤参考系数; $\eta_{s,j}$ 为第 j 个能源子系统的能效。

2.2 约束条件

配电网和供热系统约束见文献[22]。

本文涉及到的能量转换设备有热电联产机组和燃气锅炉, 其变效率特性模型见文献[23]。

3 求解算法

3.1 Charnes-Cooper 变换

为了统一 3 个目标函数的优化方向, 求解 IES 综合能源利用率最高可转化为综合能源利用率的倒数最小。

$$f_3 = \frac{1}{\eta_{\text{IES}}} \quad (13)$$

Charnes-Cooper 变换方法见附录 B。

3.2 规格化法平面约束法

本节采用 NNC 方法生成多目标问题的 Pareto 解。NNC 方法主要有 3 个优点: 1) 对于一个多目标优化问题, 它可以搜索整个解空间, 并且不忽略任何区域^[24]; 2) Pareto 点的生成是在归一化的目标空间中进行的, 这导致了非常有益的缩放特性; 3) Pareto 最优解的个数随着乌托邦平面上离散点个数的增加而增加, 并且产生一个有规则分布的 Pareto 前沿解集^[25]。

基于改进熵权双基点法的多目标优化调度模型可写成如式(14)所示的紧凑形式。

$$\begin{cases} \min F = (f_1, f_2, f_3) \\ \text{s.t. } G(x) \leq 0 \\ H(x) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

对目标函数 f_1 进行单目标优化, 得到了最优解 x_{1*} , 其在空间几何坐标系下对应于点 $f_{1*}(f_1(x_{1*}), f_2(x_{1*}), f_3(x_{1*}))$ 。类似地, 分别以 f_2 和 f_3 为目标函数进行单目标优化, 得到了点 f_{2*} 和 f_{3*} 。将 3 个目标值最小的点定义为乌托邦点 $(f_1(x_{1*}), f_2(x_{2*}), f_3(x_{3*}))$, 即理想最优点^[26]。

形成帕累托前沿曲面的步骤见文献[27]。

3.3 改进熵权双基点法

为弥补传统方法在选取综合能源系统多目标优化问题折衷最优解时的不足, 本文在熵权双基点法的基础上, 采用灰色关联分析法进行改进。灰色关联分析法通过评估各指标对目标的贡献, 有效反映被评价对象各指标属性值与理想点的差异。改进后既可以将定量分析与定性分析相结合, 又全面考虑了 Pareto 前沿解集与理想点的加权欧式距离和关联度, 保证决策者能够选择出最优的解决方案。具体步骤如下所述。

1) 建立评价矩阵, 规格化处理数据。

针对本文 3 个目标函数, M 个帕累托前沿解, 建立评价矩阵 \bar{P} 。

$$\bar{P} = \begin{pmatrix} \bar{P}_{11} & \bar{P}_{12} & \cdots & \bar{P}_{1j} & \cdots & \bar{P}_{1M} \\ \bar{P}_{21} & \bar{P}_{22} & \cdots & \bar{P}_{2j} & \cdots & \bar{P}_{2M} \\ \bar{P}_{31} & \bar{P}_{32} & \cdots & \bar{P}_{3j} & \cdots & \bar{P}_{3M} \end{pmatrix} \quad (15)$$

式中, \bar{P}_{ij} ($i=1,2,3$) 为第 i 个目标第 j 个帕累托最优解对应的目标函数值。

为了消除目标函数之间量纲和数量级的差异, 按照式(16)对原始数据进行规格化处理。

$$P_{ij} = \frac{\bar{P}_{ij} - \min_j(\bar{P}_{ij})}{\max_j(\bar{P}_{ij}) - \min_j(\bar{P}_{ij})} \quad (16)$$

式中: P_{ij} 为规格化后第 i 个目标第 j 个帕累托最优解的目标函数值; $\max_j(\bar{P}_{ij})$ 和 $\min_j(\bar{P}_{ij})$ 分别为 \bar{P} 中第 i 行的最大值和最小值。

规格化后的评价矩阵 P 如式(17)所示。

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1j} & \cdots & P_{1M} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2j} & \cdots & P_{2M} \\ P_{31} & P_{32} & \cdots & P_{3j} & \cdots & P_{3M} \end{pmatrix} \quad (17)$$

2) 建立加权化无量纲矩阵。

熵权的值取决于在特定目标下不同解之间的差

异程度, 熵权的计算公式如式(18)所示。

$$\begin{cases} E_i = \frac{-\sum_{j=1}^M \left[\frac{P_{ij}}{\sum_{j=1}^M P_{ij}} \ln \left(\frac{P_{ij}}{\sum_{j=1}^M P_{ij}} \right) \right]}{\ln M} \\ \beta_i = \frac{1 - E_i}{\sum_{j=1}^M (1 - E_i)} \end{cases} \quad (18)$$

利用调度人员的主观权值 $\omega_i (i=1,2,3)$, 求修正权系数 α_i , $\alpha_i = \beta_i \omega_i / \sum_{i=1}^3 \beta_i \omega_i$ 。 α_i 既考虑了主观需求, 又计及了 Pareto 前沿上不同解差异程度的熵权。将评价矩阵 P 加权化, 得到加权化无量纲矩阵 \hat{P} 。

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} \hat{P}_{11} & \hat{P}_{12} & \cdots & \hat{P}_{1j} & \cdots & \hat{P}_{1M} \\ \hat{P}_{21} & \hat{P}_{22} & \cdots & \hat{P}_{2j} & \cdots & \hat{P}_{2M} \\ \hat{P}_{31} & \hat{P}_{32} & \cdots & \hat{P}_{3j} & \cdots & \hat{P}_{3M} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1 P_{11} & \alpha_1 P_{12} & \cdots & \alpha_1 P_{1j} & \cdots & \alpha_1 P_{1M} \\ \alpha_2 P_{21} & \alpha_2 P_{22} & \cdots & \alpha_2 P_{2j} & \cdots & \alpha_2 P_{2M} \\ \alpha_3 P_{31} & \alpha_3 P_{32} & \cdots & \alpha_3 P_{3j} & \cdots & \alpha_3 P_{3M} \end{pmatrix} \quad (19)$$

3) 确定双基点。

由于评价指标为负指标, 有 $\hat{P}_i^+ = \min_{1 \leq j \leq M} \{\hat{P}_{ij}\}$,

$$\hat{P}_i^- = \max_{1 \leq j \leq M} \{\hat{P}_{ij}\}。$$

定义 \hat{P}^+ 为正理想值, \hat{P}^- 为负理想值。

$$\hat{P}^+ = \{\hat{P}_1^+, \hat{P}_2^+, \hat{P}_3^+\}, \quad \hat{P}^- = \{\hat{P}_1^-, \hat{P}_2^-, \hat{P}_3^-\}$$

4) 计算加权欧式距离和灰色关联度。

定义第 j 个帕累托前沿点与正负理想值的加权欧式距离为 d_j^+ 、 d_j^- , 计算公式如式(20)所示。

$$\begin{cases} d_j^+ = \left[\sum_{i=1}^3 \alpha_i (\hat{P}_{ij} - \hat{P}_i^+)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, j=1,2,\dots,M \\ d_j^- = \left[\sum_{i=1}^3 \alpha_i (\hat{P}_{ij} - \hat{P}_i^-)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, j=1,2,\dots,M \end{cases} \quad (20)$$

在矩阵 \hat{P} 中, \hat{P}_{ij} 与正、负理想值之间的灰色关联系数的计算公式如式(21)所示。

$$\begin{cases} c_{ij}^+ = \frac{\min_j \min_i |\hat{P}_i^+ - \hat{P}_{ij}^+| + \rho \max_j \max_i |\hat{P}_i^+ - \hat{P}_{ij}^+|}{|\hat{P}_i^+ - \hat{P}_{ij}^+| + \rho \max_j \max_i |\hat{P}_i^+ - \hat{P}_{ij}^+|} \\ c_{ij}^- = \frac{\min_j \min_i |\hat{P}_i^- - \hat{P}_{ij}^-| + \rho \max_j \max_i |\hat{P}_i^- - \hat{P}_{ij}^-|}{|\hat{P}_i^- - \hat{P}_{ij}^-| + \rho \max_j \max_i |\hat{P}_i^- - \hat{P}_{ij}^-|} \end{cases} \quad (21)$$

式中, ρ 为分辨系数, 表明关联系数间差异的显著程度, 本文 ρ 取 0.5。

根据上述所得到的灰色关联系数进行灰色关联度的计算, 第 j 个帕累托最优解与正、负理想值的灰色关联度 u_j^+ 、 u_j^- 为

$$\begin{cases} u_j^+ = \frac{1}{3}(c_{1j}^+ + c_{2j}^+ + c_{3j}^+), j=1,2,\dots,M \\ u_j^- = \frac{1}{3}(c_{1j}^- + c_{2j}^- + c_{3j}^-), j=1,2,\dots,M \end{cases} \quad (22)$$

5) 计算帕累托前沿点与正、负理想值的相对贴进度。

根据熵权法和灰色关联分析法的衡量指标, 当帕累托前沿点与正理想值的加权欧式距离较小时, 则认为该点距离乌托邦点较近; 反之则推断出该点距离乌托邦点较远。同时, 当帕累托前沿点与正理想值的关联度较大时, 则认为该点距离乌托邦点较近; 反之则推断出该点距离乌托邦点较远^[28]。帕累托前沿点与理想值的接近度 T_j^+ 、 T_j^- 为

$$\begin{cases} T_j^+ = 0.5 \times d_j^- + 0.5 \times u_j^+, j=1,2,\dots,M \\ T_j^- = 0.5 \times d_j^+ + 0.5 \times u_j^-, j=1,2,\dots,M \end{cases} \quad (23)$$

帕累托最优解与理想值的相对贴进度 ε_j 计算公式如式(24)所示。

$$\varepsilon_j = \frac{T_j^+}{T_j^+ + T_j^-}, j=1,2,\dots,M \quad (24)$$

其中 ε_j 值越大, 表明帕累托最优解越接近于正理想值; 反之 ε_j 值越小, 表明帕累托最优解越接近于负理想值。

综上所述, 求解算法的流程如图 4 所示。

4 算例分析

以 IEEE 33 节点配电网络和 8 节点区域供热网络组成的综合能源系统为基础算例模型, 如图 5 所示。算例中各设备参数见附录 C 表 C1, 电网分时电价见附录 C 图 C1, 各时段向天然气站购气价格为 2 元/m³, 管道参数见附录 C 表 C2, 热网节点参数见附录 C 表 C3, 典型日负荷与风电功率预测曲线如附录 C 图 C2 所示。由于可再生能源出力及负荷预测具有不确定性, 本文采用文献[29]提出的不确定性场景生成方法得到了 5 个典型场景及其概率, 分别如附录 C 图 C3 和表 C4 所示。各个场景分别与其概率加权相加得到风电和负荷功率期望值, 如附录 C 图 C4 所示, 将期望值作为调度求解的实际值。案例研究在配备英特尔酷睿 i5-1240U 和 16 GB RAM 的 PC11 上进行, 通过 Matlab 2016a 调用 GUROBI 求解器进行

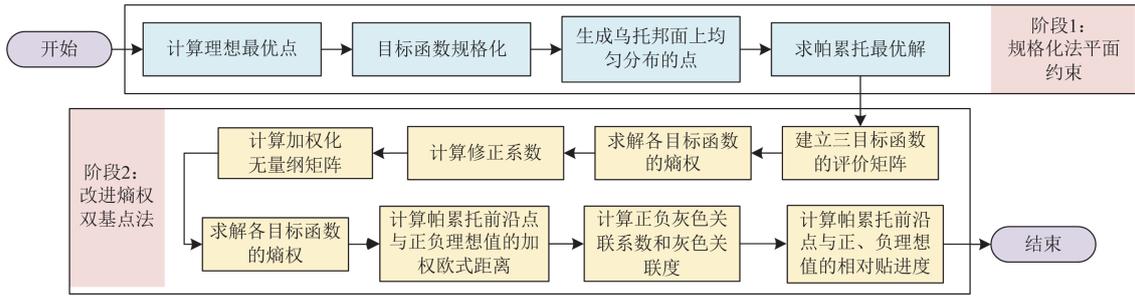


图 4 求解算法流程图

Fig. 4 Algorithm solution flow

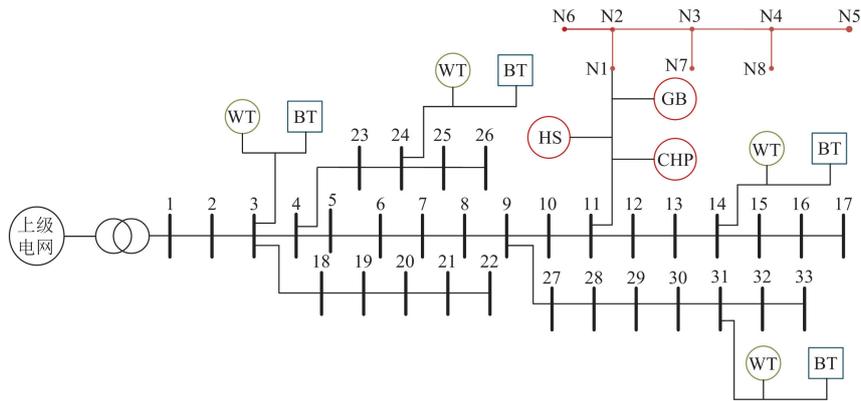


图 5 案例研究中的 IES 示意图

Fig. 5 Diagram of IES in case studies

求解。为了验证所提模型和算法的有效性，本文设置了以下 3 种场景进行算例仿真。

场景 1：单目标优化仅考虑经济目标，进行设备效率分段线性化的研究。

场景 2：双目标优化同时考虑经济和碳排放目标，验证 NNC 方法的优势。

场景 3：三目标优化同时考虑经济、碳排放和综合能效目标，验证改进熵权双基点法对于协调多维目标的优越性。

4.1 单目标优化

优化的目标是将整个系统经济成本降至最低，考虑两种情况。

情况 1：热电联产机组和燃气锅炉的效率取额定效率；

情况 2：采用本文提出的分段线性化方法对具有可变能量效率的装置进行建模，同时考虑了不同分段数对结果的影响。

两种情况下的最优经济成本、计算机运行时间和相对误差分别如表 1 和图 6 所示，其中 m 为分段数，以情况 2($m=200$) 的优化结果为基准计算每个场景的相对误差。对于情况 1($m=0$)，最优经济成本的相对误差为 10.1%，这表明恒定能量效率模型

不能充分地模拟具有可变效率的运行设备。

表 1 不同情况下求解结果的对比

Table 1 Comparison of solution results in different conditions

情况	最优经济成本/万元	计算机运行时间/s	相对误差/%
情况 1($m=0$)	17.372	23.3	10.1
情况 2($m=2$)	17.730	26.4	8.25
情况 2($m=4$)	18.311	27.9	5.24
情况 2($m=8$)	19.104	29.1	1.14
情况 2($m=24$)	19.281	32.7	0.22
情况 2($m=32$)	19.316	36.7	0.04
情况 2($m=64$)	19.322	68.1	0.01
情况 2($m=100$)	19.323	89.1	0.005
情况 2($m=200$)	19.324	180.0	0

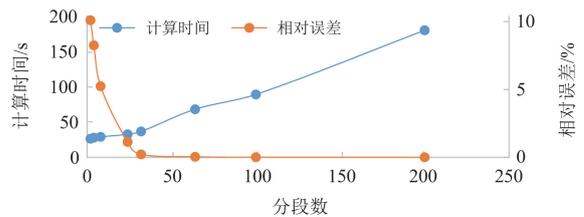


图 6 计算时间与相对误差的比较

Fig. 6 Comparison of calculation time and relative error

本文提出的建模方法将一个非线性规划问题转换为混合整数线性规划问题, 许多现有的商业软件(如 *gurobi*, *complex*, *mosek*)都可以求解。还应该注意到的, 当分段线性化中的段数增加时, 最优经济成本得到了更好的近似, 但这导致了更高的运行时间(操作成本)。由图 6 可知, 当 m 从 2 增加到 24 时, 相对误差迅速减小, 而当 m 从 32 增加到 200 时, 相对误差减少的相对缓慢。因此, 考虑到逼近精度和计算效率之间的平衡, m 的最优个数在 24~32 之间。本文之后的算例分析中, m 取 24。

4.2 双目标优化

为了验证 NNC 方法在生成 Pareto 边界方面的优越性, 本文将其与加权和法、 ε -约束法和 NSGA-II 方法进行比较。由于问题规模过大, NSGA-II 方法无法在 24 h 内求解所建立的模型。图 7 为采用 NNC 法、加权和法和 ε -约束法得到的由 20 个点组成的 Pareto 边界。

采用 NNC 方法以经济成本和碳排放量为目标绘制 Pareto 前沿曲线, 如图 7 所示。由图 7 可知, IES 碳排放量的减少会增加总运行成本, 这表明了 IES 的运行经济成本与碳排放量之间的矛盾。

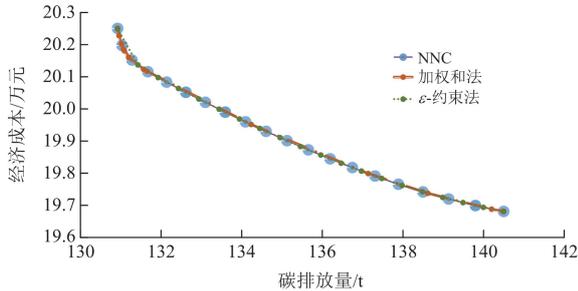


图 7 不同方法下 Pareto 边界的比较

Fig. 7 Comparison of Pareto frontier under different methods

观察图 7 可知, 采用加权和法和 ε -约束法得到的解分布较为分散, 而通过 NNC 法得到的 Pareto 前沿点在空间分布上更为集中和均匀。加权和法获得的点分布不均匀的原因在于经济成本和碳排放量这两个目标的量纲和量级有差异; ε -约束法得到的 Pareto 点在引入约束的目标侧分布密集, 而在参考目标侧的分布稀疏。3 种方法相邻解的平均间距、相邻解间距的变异系数对比结果如表 2 所示, 与其他两种方法相比, NNC 方法所得相邻解间的离散程度更低, 因此所得的结果更合理。

4.3 三目标优化

采用 NNC 方法将乌托邦三角形平面上的每条边划分为 9 个等线段, 在乌托邦平面上得到了 55 个点。接下来再用本文所提的改进熵权双基点法对帕

表 2 不同方法下求解结果的对比

方法	解的数目	相邻解的平均间距	相邻解间距的变异系数/%
NNC 法	20	0.293	17.274
加权法	20	0.581	159.243
ε -约束法	20	0.528	39.193

累托最优解进行排序。主观权值 ω 可以根据需求进行选择, 本文假设 $\omega = \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}\right)^T$ 。熵权法得到的修正系数为(0.272, 0.561, 0.167), 由此碳排放量在综合评价中所起的作用最大。通过计算加权欧式距离和灰色关联度后, 选取相对贴度最大的点作为折衷最优解, 图 8 为三目标 Pareto 前沿面与计算得出的折衷最优解 COS。

图 8 展示了三目标 Pareto 前沿面, 横轴为碳排放量 (t) 和经济成本 (万元), 纵轴为综合能源利用率 (%)。图中显示了 Pareto 前沿面的分布, 并标注了折衷最优解 COS 的位置。

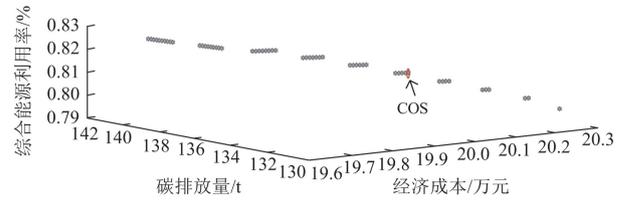


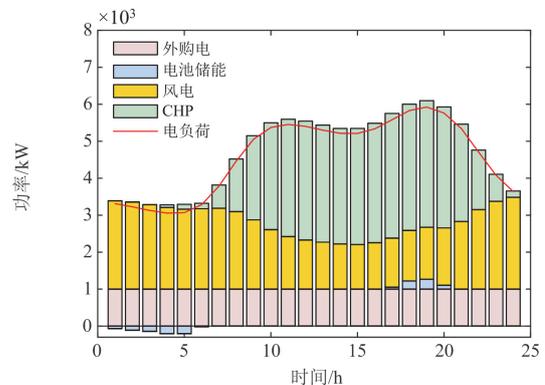
图 8 三目标 Pareto 最优解

Fig. 8 Three-objective Pareto optimal solution

4.3.1 优化结果分析

本文对仅考虑成本最低、碳排放量最低、能效最高以及统筹兼顾三目标时的优化结果进行分析。

1) 仅考虑成本: 其优化结果如图 9 所示, 全天电网购电量保持不变, 这是因为在本文参数设置中, 尽管电价随着时间变化, 但相较于 CHP 发电, 电网购电的成本更低。剩余的电负荷由 CHP 机组承担, 相较于其他场景, CHP 机组出力最低。此外, 由于热电联产机组输出的电功率较低, 导致输出的热功率也较低。因此, 燃气锅炉将承担更多的热负荷。



(a) 配电网

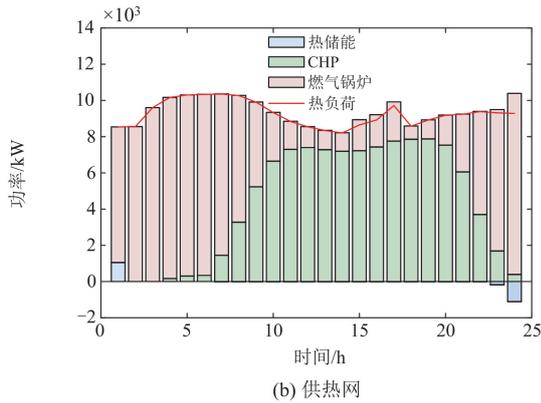


图 9 仅考虑成本的优化结果

Fig. 9 Optimization results considering costs only

仿真结果也验证了这一结论。由于电网的碳排放系数和燃气锅炉的碳排放系数高，以经济成本最低为目标函数会导致碳排放量最高。

2) 仅考虑碳排放：其优化结果如图 10 所示，全天电需求几乎全部由风电机组、CHP 机组、储能电池来满足，几乎没有电网购电，主要原因在于考虑碳排放成本后，系统更倾向于使用清洁能源设备进行供能，相比于风电机组和 CHP 机组，电网购电的

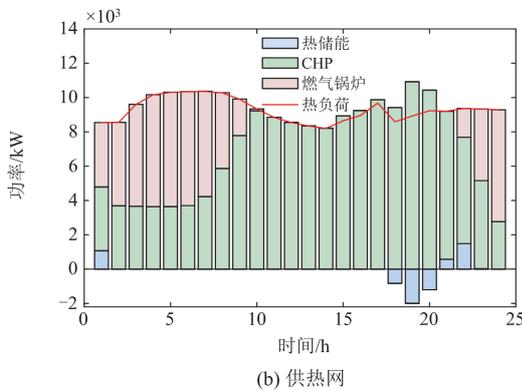
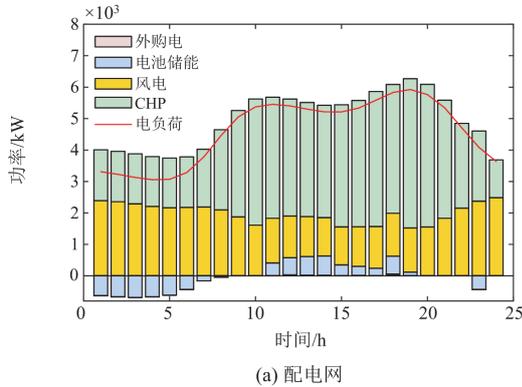


图 10 仅考虑碳排放的优化结果

Fig. 10 Optimization results considering carbon emissions only

碳排放成本较高，只适用于弥补系统的电负荷缺口。同时，CHP 机组电出力的增加导致热出力也增加，减少了燃气锅炉承担的热负荷。此外，为了降低碳排放量，储能设备在电力需求低谷时储存能量，在需求高峰时释放能量，以满足负荷需求并减少对高碳排放能源的依赖，有效发挥了储能削峰填谷的负荷调节作用。

3) 仅考虑综合能源利用率：其优化结果如图 11 所示，燃气锅炉的运行效率较 CHP 高，因此燃气锅炉的出力较多。在这种情况下，CHP 机组的热出力较少，运行在以热定电模式下，热电联产机组的电出力也较少。由于不需要通过能量转化，上级电网购买的电力也较多。剩余的电力需求可以由储能装置来满足。这种系统运行方式既充分利用了燃气锅炉和 CHP 机组的优势，又通过储能装置的调度实现了能源的有效利用和灵活调配，从而提高了系统的综合能源利用率。

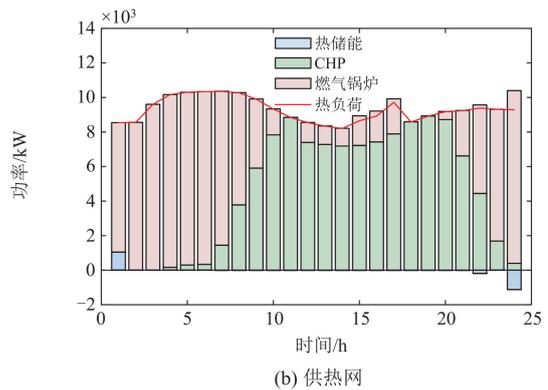
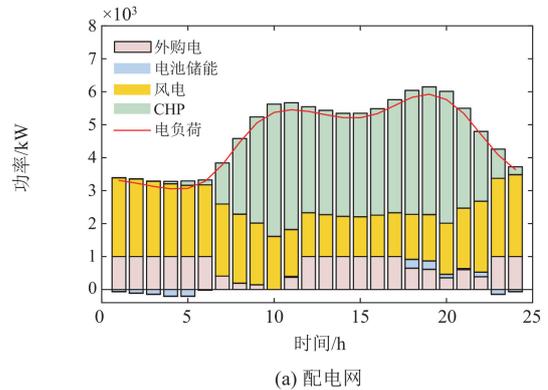


图 11 仅考虑能源综合利用率的优化结果

Fig. 11 Optimization results considering energy utilization efficiency only

4) 三目标优化：折衷最优解对应的购电量、各种能源设备的出力等如图 12 所示。总成本、碳排放量和综合能源利用率的值分别为：19.883 万元、135.218 t、81.89%。与上述 3 种优化结果相比，系

统各设备的运行方案更加均衡, 兼顾了 IES 的经济性、环保性及能效性。

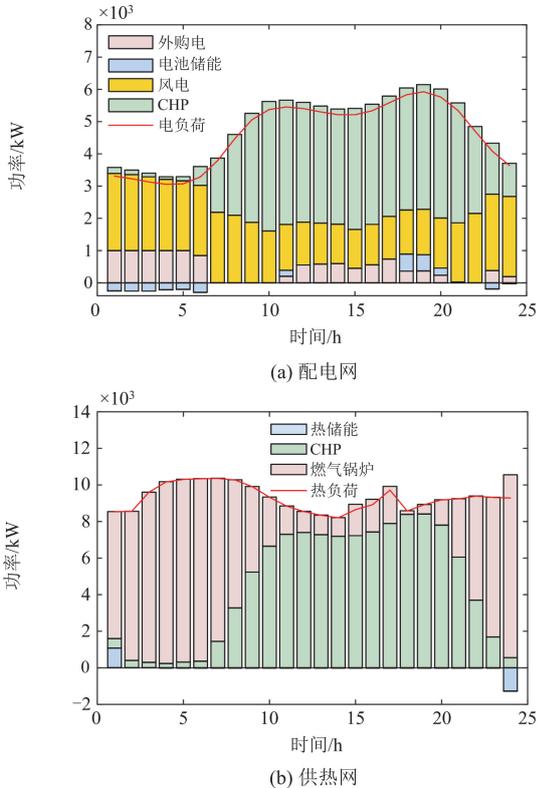


图 12 考虑三目标的优化结果

Fig. 12 Optimization results considering three objectives

5) 不考虑能量转换设备变效率的三目标优化: 考虑设备变效率 ($m = 24$) 与不考虑设备变效率 ($m = 0$) 的购能成本、碳排放量和综合能源利用效率对比结果见附录 D 表 D1。由表 D1 可知, 与不考虑能量转换装置变效率相比, 考虑变效率的购气成本较低, 购电成本较高, 这是因为前者运行在额定状态下, 能量效率高, CHP 和燃气锅炉出力多, 购电量少, 这也导致了较高的综合能源利用率和较低的碳排放量。然而, 实际工程中 CHP 和燃气锅炉不会一直运行在额定负载下, 无法达到预期效果。

4.3.2 折衷解选取方法的对比

为说明改进熵权双基点法求取折衷解的优越性, 本小节将其与熵权双基点法和模糊数学理论求取的折衷最优解进行对比分析。3 种方法的比较结果见表 3。

熵权双基点法更偏向于碳排放目标, 这是因为熵权法得到的目标权重中碳排放的权重大, 相对贴近度大; 模糊数学理论更偏向于经济成本。可见采用本文方法选择折衷解能够综合考虑经济、碳排放和综合能效目标, 全面考虑了帕累托最优解与正、

负理想值的加权欧式距离和关联度。综上, 采用本文提出的改进熵权双基点法选取折衷最优解可以协调多维目标, 为决策者提供科学的决策参考。

表 3 折衷解选取方法的对比

Table 3 Comparison of methods for selecting COS

方法	经济成本/ 万元	碳排放量/t	综合能源 利用率/%
改进熵权双基点法	19.883	135.218	81.89
熵权双基点法	20.104	130.917	81.44
模糊数学理论	19.404	140.223	82.21

4.4 3 种场景的对比

单目标、双目标和三目标场景优化下的目标值 (求双目标的折衷解也采用本文提出的改进熵权双基点法) 如表 4 所示。

表 4 3 种场景下的目标函数值

Table 4 Values of objective functions in three scenarios

场景	经济成本/万元	碳排放量/t	综合能源利用效率/%
单目标	19.281	140.018	80.93
双目标	19.934	134.221	81.23
三目标	19.883	135.218	81.89

从表 4 数据可知, 对于多目标优化场景来说, 虽然其折衷最优运行方案中总成本、碳排放量以及综合能源利用率均不是最优值, 但是与前两个优化场景相比, 三类目标函数都达到了相对折衷的数值, 为决策者提供更加全面的优化运行决策参考, 对于实现 IES 的经济、环保、高效运行有一定的积极意义。

5 结论

为了构建经济低碳高效的新型能源体系, 本文建立了一个考虑能量转换装置可变效率的综合能源系统多目标优化模型, 通过对可变效率设备运行特性曲线分段线性化处理 and 综合能源利用效率目标 Charnes-Cooper 变换使非凸非线性模型转换为混合整数凸优化模型。提出一种结合规格化法平面约束法与改进熵权双基点法的求解方法。通过实例验证, 得到以下结论:

1) 与转换设备恒定能量效率模型相比, 本文所提出的可变效率分段线性化模型考虑了能量转换装置的可变效率, 提高了设备模型精确度, 相对误差随着段数的增加而减小;

2) 与单目标或双目标的综合能源系统优化问题相比, 本文所提出的模型可以统筹兼顾系统经济性、环保性及能效性等多个目标, 为构建经济低碳高效的新型能源体系提供重要参考;

3) 验证了 NNC 方法能得到在空间分布上集中和均匀的 Pareto 最优解集, 同时改进熵权双基点法全面考虑了 Pareto 前沿解集与理想点的加权欧式距离和关联度, 能够有效选择折衷最优解, 从而为决策者提供科学的决策参考。

附录 A

IES 的经济目标为化配电网系统与供热系统的总运行成本最小。

$$\begin{cases} C_t^{\text{gas}} = c^{\text{gas}} \sum_{i \in I_{\text{bus}}} (x_{i,t}^{\text{GB}} + x_{i,t}^{\text{CHP}}) \Delta t \\ C_t^{\text{on}} = \sum_{i \in I_{\text{bus}}} \left(c_i^{\text{GB}} H_{i,t}^{\text{GB}} + c_i^{\text{CHP}} (H_{i,t}^{\text{CHP}} + P_{i,t}^{\text{CHP}}) + c_i^{\text{WT}} P_{i,t}^{\text{WT}} + c_i^{\text{BT}} (P_{i,t}^{\text{BT,dis}} + P_{i,t}^{\text{BT,chr}}) + c_i^{\text{TST}} (P_{i,t}^{\text{HS,dis}} + P_{i,t}^{\text{HS,chr}}) \right) \Delta t \\ C_t^{\text{net}} = c_t^{\text{net}} P_t^{\text{net}} \Delta t \end{cases} \quad (\text{A1})$$

式中: c^{gas} 为天然气的单位能量成本; c_i^{GB} 、 c_i^{CHP} 、 c_i^{WT} 、 c_i^{BT} 、 c_i^{TST} 分别为燃气锅炉 i 、CHP 机组 i 、风电机组 i 、储电装置 i 、储热装置 i 的运行维护费用系数; $H_{i,t}^{\text{GB}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{WT}}$ 分别为 t 时刻燃气锅炉 i 、风电机组 i 的出力; $H_{i,t}^{\text{CHP}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{CHP}}$ 分别为 t 时刻 CHP 机组 i 输出的电、热功率; $P_{i,t}^{\text{BT,chr}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{BT,dis}}$ 分别为 t 时刻蓄电池 i 充、放电功率; $P_{i,t}^{\text{HS,chr}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{HS,dis}}$ 分别为 t 时刻储热装置 i 储存、输出的热功率; c_t^{net} 为单位购电成本; P_t^{net} 为母线从上级电网购电的功率; I_{bus} 为配电网节点集合。

IES 的低碳目标为配电网系统与供热系统的碳排放量最小。

$$\begin{cases} T_t^{\text{CHP}} = \sum_{i \in I_{\text{bus}}} (\gamma_{i,e}^{\text{CHP}} P_{i,t}^{\text{CHP}} + \gamma_{i,h}^{\text{CHP}} H_{i,t}^{\text{CHP}}) \Delta t \\ T_t^{\text{GB}} = \sum_{i \in I_{\text{bus}}} \gamma_i^{\text{GB}} H_{i,t}^{\text{GB}} \Delta t \\ T_t^{\text{net}} = \gamma_t^{\text{net}} P_t^{\text{net}} \Delta t \end{cases} \quad (\text{A2})$$

式中: $\gamma_{i,e}^{\text{CHP}}$ 、 $\gamma_{i,h}^{\text{CHP}}$ 分别为热电联产机组电、热碳排放系数; γ_i^{GB} 为燃气锅炉碳排放系数; γ_t^{net} 为主网的碳排放系数。

附录 B

将综合能效模型作非凸非线性的分式规划的基本形式如式(B1)所示。

$$\begin{cases} f_3(\mathbf{x}) = \frac{\mathbf{ax}^T + b}{\mathbf{cx}^T + d} \\ \mathbf{x} = [\mathbf{x}_1, \boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\beta}] \end{cases} \quad (\text{B1})$$

式中: \mathbf{a} 和 \mathbf{c} 分别表示分子和分母的决策变量系数矩阵; b 和 d 分别表示分子和分母的常数项; \mathbf{x} 表示决策变量, 其中 \mathbf{x}_1 、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 和 $\boldsymbol{\beta}$ 分别表示 IES 的运行变量、区间变量和二进制变量; 将 \mathbf{x} 转换为 $\mathbf{z} = [\mathbf{y}, \boldsymbol{\varepsilon}, \boldsymbol{\beta}]$, 其中 $\mathbf{y} = \mathbf{x}_1 r$, r 为辅助变量。则综合能效模型等效为

$$\begin{cases} \max f_3(\mathbf{x}) = \mathbf{ax}^T + b \\ \text{s.t. } \mathbf{Az}^T - \mathbf{Br} \leq \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_{\text{eq}} \mathbf{z}^T - \mathbf{B}_{\text{eq}} r = \mathbf{0} \\ \mathbf{cz}^T + dr = 1 \\ \mathbf{Lr} \leq \mathbf{y} \leq \mathbf{Mr} \\ \mathbf{0r} \leq \mathbf{f}\boldsymbol{\varepsilon} \leq \mathbf{1r} \\ \mathbf{0} \leq \boldsymbol{\varepsilon} \leq \mathbf{1}, \mathbf{0} \leq \boldsymbol{\beta} \leq \mathbf{1} \\ r_{\min} \leq r \leq r_{\max} \end{cases} \quad (\text{B2})$$

式中: \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 分别为原问题的线性不等式约束系数矩阵和常数矩阵; \mathbf{A}_{eq} 和 \mathbf{B}_{eq} 分别为原问题的线性等式约束系数矩阵和常数矩阵; \mathbf{M} 和 \mathbf{L} 分别为 \mathbf{x}_1 的上、下限矩阵; \mathbf{f}' 为原分段区间按 r_{\min} 和 r_{\max} 进行放缩后的区间变量系数向量。

附录 C

表 C1 设备参数

Table C1 Equipment parameters

设备	容量/ kW	最大爬坡 功率/kW	最大滑坡 功率/kW	维护费用/ (元/kWh)	SOC 范围
CHP	9000	117	117	0.084	—
GB	9000	150	159	0.02	—
WT	2400	—	—	0.02	—
BT	500	—	—	0.05	0.2~0.9
HS	400	—	—	0.05	0.2~0.9

表 C2 管道参数

Table C2 Pipeline parameters

管道	长度/m	直径/m	流量/(t/h)
P1:1-2	450	0.6	49
P2:2-3	450	0.7	40
P3:3-4	500	0.6	30
P4:4-5	500	0.5	20
P5:3-7	450	0.6	10
P6:4-8	450	0.7	10
P7:2-6	450	0.5	9

表 C3 热网节点参数

Table C3 Heat node parameters

节点	供水温度		回水温度	
	上限	下限	上限	下限
1	70	95	40	65
2	70	95	40	65
3	70	95	40	65
4	70	95	40	65
5	70	95	40	65
6	70	95	40	65
7	70	95	40	65
8	70	95	40	65

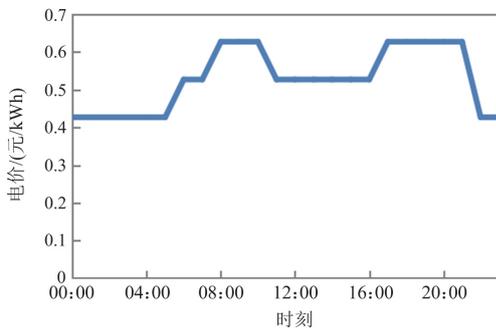


图 C1 分时电价

Fig. C1 Time-of-use electricity prices

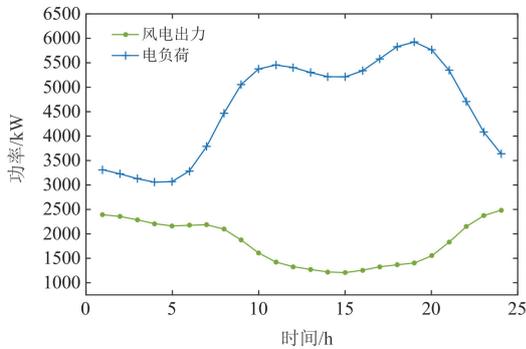
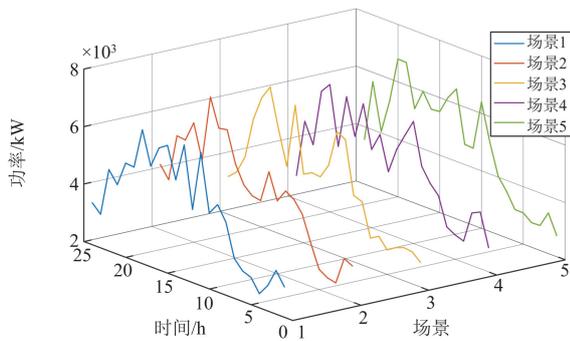
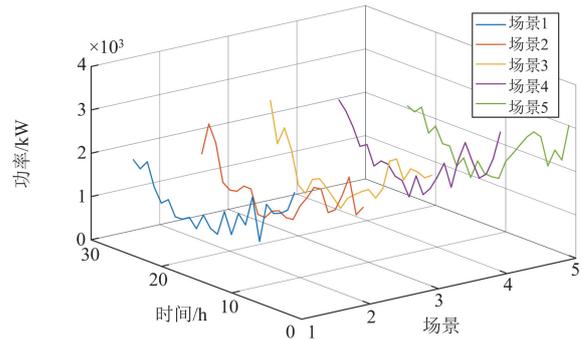


图 C2 负荷与风电功率预测曲线

Fig. C2 Load and wind power predicted values



(a) 削减后的负荷场景



(b) 削减后的风电出力场景

图 C3 削减后的负荷与风电出力场景

Fig. C3 Reduced load and wind power output scenarios

表 C4 各类场景概率

Table C4 Probability of various scenarios

场景类别	1	2	3	4	5
场景概率/%	12.2	5.8	22.4	24.6	35.0

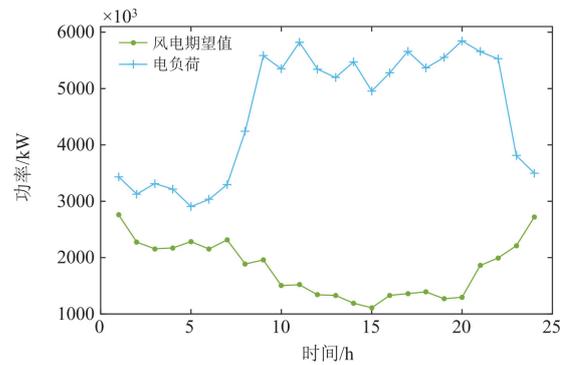


图 C4 负荷与风电功率期望值

Fig. C4 Load and wind power expected values

附录 D

考虑设备变效率 ($m=24$) 与不考虑设备变效率 ($m=0$) 的购能成本、碳排放量和综合能源利用率对比结果见表 D1。

表 D1 考虑设备变效率与不考虑设备变效率的对比结果

Table D1 Comparison of considering and not considering variable efficiency of conversion devices

	购电成本/ 万元	燃气成本/ 万元	总成本/ 万元	碳排 放量/t	综合能源 利用率/%
$m=24$	3.512	14.580	19.883	135.218	81.89
$m=0$	2.810	15.034	18.022	132.202	82.84

参考文献

- [1] 中共中央国务院. 关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. (2021-10-24) [2023-08-09]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.

- [2] 崔全胜, 白晓民, 董伟杰, 等. 用户侧综合能源系统规划运行联合优化[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(17): 4967-4981, 5279.
CUI Quansheng, BAI Xiaomin, DONG Weijie, et al. Joint optimization of planning and operation in user-side multi-energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17): 4967-4981, 5279.
- [3] 张笑演, 王橹裕, 黄蕾, 等. 考虑扩展碳排放流和碳交易议价模型的园区综合能源优化调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(9): 34-46.
ZHANG Xiaoyan, WANG Luyu, HUANG Lei, et al. Optimal dispatching of park-level integrated energy system considering augmented carbon emission flow and carbon trading bargain model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(9):34-46.
- [4] 樊伟. 考虑电碳协同的综合能源系统优化运行及效益均衡研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
FAN Wei. Research on optimal operation and benefit balance of integrated energy system considering carbon coordination[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [5] 张爱军, 刘紫玉, 邢华栋, 等. 基于 GM 估计的电-气-热综合能源系统分解协调鲁棒状态估计方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(10): 9-14, 53.
ZHANG Aijun, LIU Ziyu, XING Huadong, et al. Decomposition and coordination robust state estimation method for electric-gas-heat integrated energy system based on GM estimation[J]. Smart Power, 2023, 51(10): 9-14, 53.
- [6] 李崎勇, 郑一飞, 刘斌, 等. 基于主从博弈的含碳捕集与热电联产综合能源系统优化运行[J]. 电测与仪表, 2024, 61(6): 10-19.
LI Jiyong, ZHENG Yifei, LIU Bin, et al. Optimal operation of an integrated energy system with carbon capture system and combined heating and power based on a master-slave game[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(6): 10-19.
- [7] 贺文, 陈珍萍, 胡伏原, 等. 基于一致性的综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(19): 42-53.
HE Wen, CHEN Zhenping, HU Fuyuan, et al. Consensus-based low-carbon economic dispatching of integrated energy systems[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(19): 42-53.
- [8] 黄宇, 王宇涛, 李淑琴, 等. 计及焓分析的综合能源系统多目标优化调度[J]. 太阳能学报, 2022, 43(7): 30-38.
HUANG Yu, WANG Yutao, LI Shuqin, et al. Multi-objective optimal scheduling of integrated energy system with thermodynamic exergy analysis method[J]. Acta Energies Solaris Sinica, 2022, 43(7): 30-38.
- [9] 张虹, 孟庆尧, 王明晨, 等. 考虑火电机组参与绿证购买交易的含氢综合能源系统经济低碳调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 26-35.
ZHANG Hong, MENG Qingyao, WANG Mingchen, et al. Economic and low-carbon dispatch strategy of a hydrogen-containing integrated energy system considering thermal power units participating in green certificate purchase trading[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 26-35.
- [10] 李鹏, 王加浩, 黎灿兵, 等. 计及源荷不确定性与设备变工况特性的园区综合能源系统协同优化运行方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(20): 7802-7812.
LI Peng, WANG Jiahao, LI Canbing, et al. Collaborative optimal scheduling of the community integrated energy system considering source-load uncertainty and equipment off-design performance[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(20): 7802-7812.
- [11] 余国财. 基于 NNC 法考虑柔性负荷的综合能源系统优化调度研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
YU Guocai. Study on optimal scheduling of integrated energy system considering flexible load based on NNC method[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [12] 马静, 许冬, 王增平. 基于加权理想点法的配网故障恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 61-67.
MA Jing, XU Dong, WANG Zengping. Power restoration strategy based on weighted ideal point method for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 61-67.
- [13] PATERAKIS N G, GIBESCU M, BAKIRTZIS A G, et al. A multi-objective optimization approach to risk-constrained energy and reserve procurement using demand response[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 3940-3954.
- [14] 刘庆楷, 刘明波, 陆文甜. 预防暂态低频减载的储能容量配置多目标动态优化方法[J]. 电力建设, 2021, 42(3): 81-88.
LIU Qingkai, LIU Mingbo, LU Wentian. Multi-objective dynamic optimization method for capacity configuration of energy storage system to mitigate transient under-frequency load shedding[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(3): 81-88.
- [15] LIN Shunjiang, WU Hui, LIU Jie. A solution method for many-objective security-constrained unit commitment considering flexibility[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 857520.
- [16] 米阳, 周杰, 卢长坤, 等. 基于改进生成对抗网络与碳足迹的配电网多目标双层规划[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-15[2024-03-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11>.

- 2107.tm.20230725.1406.002.html.
MI Yang, ZHOU Jie, LU Changkun, et al. A multi-objective bi-level planning of distribution network based on improved generative adversarial network and carbon footprint[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-15[2024-03-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.tm.20230725.1406.002.html>.
- [17] WANG Shiqi, YUAN Zhongyuan, YU Nanyang. Thermo-economic optimization of organic Rankine cycle with steam-water dual heat source[J]. Energy, 2024, 274: 127358.
- [18] BISCHI A, TACCARI L, MARTELLI E, et al. A rolling-horizon optimization algorithm for the long term operational scheduling of cogeneration systems[J]. Energy, 2019, 184: 73-90.
- [19] 李虹, 杜世旗. 考虑能源枢纽变工况特性的综合能源系统优化配置[J]. 现代电力, 2022, 39(5): 547-553.
LI Hong, DU Shiqi. Optimal configuration of integrated energy system considering variable condition characteristics of energy hub[J]. Modern Electric Power, 2022, 39(5): 547-553.
- [20] 帅挽澜, 朱自伟, 李雪萌, 等. 考虑风电消纳的综合能源系统“源-网-荷-储”协同优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 18-26.
SHUAI Wanlan, ZHU Ziwei, LI Xuemeng, et al. “Source-network-load-storage” coordinated optimization operation for an integrated energy system considering wind power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 18-26.
- [21] 刘晓鸥, 葛少云. 区域综合能源系统的能效定义及其相关性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(8): 8-18.
LIU Xiaou, GE Shaoyun. Definition and correlation analysis on energy utilization efficiency of regional integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(8): 8-18.
- [22] 梁安琪, 蒋一博, 丁屹峰, 等. 园区电热协同低品位热源利用的供能规划策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(4): 167-178.
LIANG Anqi, JIANG Yibo, DING Yifeng, et al. Energy supply planning strategy of electric-heating cooperation and low-grade heat source utilization in parks[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 167-178.
- [23] 陈晚晴, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 考虑设备变工况特性的区域综合能源系统优化调度方法[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 951-958.
CHEN Wanqing, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Operation optimization method for regional integrated energy system considering part-load performances of devices[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 951-958.
- [24] 吴悔. 考虑灵活性的电力系统高维多目标安全约束机组组合问题的求解方法[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
WU Hui. A solution method for many-objective security constrained unit commitment of power system considering flexibility[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.
- [25] 赵传, 戴朝华, 周彤昕, 等. 基于 Pareto 折衷解的风电装机规划多目标优化方法[J]. 太阳能学报, 2019, 40(6): 1763-1770.
ZHAO Chuan, DAI Chaohua, ZHOU Tongxin, et al. Multi-objective optimization of wind power planning based on Pareto compromised solutions[J]. Acta Energies Solaris Sinica, 2019, 40(06): 1763-1770.
- [26] LI Honglian, HUANG Jin, HU Yao, et al. A new TMY generation method based on the entropy-based TOPSIS theory for different climatic zones in China[J]. Energy, 2021, 231: 120723.
- [27] LIU Jie, LIN Shunjiang, HE Sen, et al. Multiobjective optimal dispatch of mobile energy storage vehicles in active distribution networks[J]. IEEE Systems Journal, 2023, 17: 804-815.
- [28] 张磐, 黄旭, 高强伟, 等. 基于运行扰动数据分析的低压台区拓扑辨识方法研究[J]. 电测与仪表, 2021, 61(3): 58-63.
ZHANG Pan, HUANG Xu, GAO Qiangwei, et al. Research on topology identification method of low-voltage station based on operational disturbance data analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 61(3): 58-63.
- [29] 林顺富, 张琪, 沈运帷, 等. 面向灵活爬坡服务的高比例新能源电力系统可调节资源优化调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 90-100.
LIN Shunfu, ZHANG Qi, SHEN Yunwei, et al. Optimal dispatch model of adjustable resources in a power system with high proportion of renewable energy for flexible ramping product[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 90-100.

收稿日期: 2024-04-10; 修回日期: 2024-07-08

作者简介:

姜延卓(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统优化与运行; E-mail: 220222213014@ncepu.edu.cn

高冲(1979—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力技术经济; E-mail: 51851114@ncepu.edu.cn

谢庆(1979—), 男, 通信作者, 博士(后), 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统可靠性。E-mail: xq_ncepu@126.com

(编辑 姜新丽)