

基于激励型需求响应的热电联供微电网多目标优化

陆亚舒¹, 殷利平^{1,2}, 徐国育¹, 赵逸飞¹

(1. 南京信息工程大学自动化学院, 南京 210044; 2. 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心(南京信息工程大学), 南京 210044)

摘要: 将由激励型需求响应引起的微电网用户侧的利益考虑到经典的环境经济调度模型中, 提出了改进的考虑多种混合负荷的用户满意度模型, 并将其作为衡量用户侧利益的标准, 建立了以最小化系统运营成本、环境成本、最大化用户综合满意度为目标的多目标调度模型。为提升灰狼优化算法在多目标问题中的求解表现, 利用搜索种群变异因子、收敛因子非线性化余弦变换等策略对其进行改进, 并将改进的算法应用到该多目标调度模型的求解中, 并基于模糊集理论从 Pareto 解集中选择最优折衷解, 同时对不同类型用户、多种负荷响应的调度结果进行分析比较, 最后, 仿真结果表明, 设计合理的需求响应机制能保障用户用电满意度的前提下, 提高经济和环境效益, 实现系统、环境和用户利益的多重共赢, 为构建绿色可持续的电力管理体系提供了理论支持。

关键词: 激励型需求响应; 用户用电满意度; 多目标灰狼优化算法; 优化调度; 最优折衷解

Multi-Objective Optimization for Combined Heat and Power Microgrid Based on Incentive-Based Demand Response

LU Yashu¹, YIN Liping^{1,2}, XU Guoyu¹, ZHAO Yifei¹

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The interests of microgrid users driven by incentive-based demand response are incorporated into the classic environmental economic dispatch model. An improved electricity satisfaction model for users with diverse mixed loads is proposed, serving as a metric to evaluate user-side benefits. A multi-objective dispatch model is established with the goals of minimizing system operating costs, environmental costs, and maximizing user electricity satisfaction. In order to improve the performance of the grey wolf optimization algorithm in solving multi-objective problems, the algorithm is improved by using strategies such as searching population variation factor and nonlinear cosine transform of convergence factor. Then the improved multi-objective grey wolf algorithm is applied to solve the multi-objective dispatch model. At the same time, the optimal compromise solution is selected from the Pareto solution set based on fuzzy set theory to analyze and compare the dispatch results of various load responses and different types of users. Finally, the simulation results demonstrate that a well-designed demand response mechanism can enhance both economic and environmental benefits while ensuring user satisfaction with electricity consumption. This approach achieves a win-win situation for the power system, the environment, and users benefits, offering valuable theoretical support for the development of a green and sustainable power management system.

Key words: incentive-based demand response; user electricity satisfaction; multi-objective gray wolf optimization algorithm; optimal dispatch; optimal compromise solution

0 引言

随着全球能源需求的持续增长,化石能源危机愈发严重,环境污染问题也日益严峻。近年来,风电、光电等可再生能源技术迅速发展^[1-2],热电联供微电网通过高效利用燃料显著提高能源效率、降低温室气体的排放。其在能源自主性、成本节约以及可再生能源整合方面展现出强大的优势,是实现绿色低碳发展的重要途径^[3-4]。

在此背景下,微电网系统的优化调度研究对象从传统的经济调度转变为环境经济调度。文献[5]通过电-热转换提高微网的灵活性,通过协调热电联产、电泵、锅炉等设备实现系统经济成本的最小化。文献[6]建立了以系统运维成本和污染处罚成本之和为综合成本的优化调度模型,能相对有效地实现系统的经济绿色发展,这种将多目标转变为单目标的妥协模型在电力系统优化调度的研究中也极为常见。文献[7-8]采用多目标智能算法得到经济成本和环境成本的 Pareto 前沿,可以直观地得到两目标函数的具体情况,选取不同的优化方案。然而,微电网的运行优化涉及多种复杂因素,包括经济成本、环境成本、系统稳定性、能效水平等,这对优化调度提出了更高的要求。如何构建高效、低污染且具有弹性的微电网系统成为能源领域研究的热点与难点。事实上,通过优化负荷侧管理能够充分发挥需求侧的可调度潜力,从而更高效地促进能源利用优化与可持续发展。为此,文献[9-11]引入了需求响应机制,充分利用需求侧的可调度能力减少供应侧的压力。然而,该机制的决策是以系统自身利益为导向,忽略了需求侧用户的利益。需求响应的实施需要充分考虑用户的体验和满意度,以确保其可持续性和用户的积极参与^[12]。因此,如何在优化系统经济与环境效益的同时保障用户的高满意度成为微电网多目标优化调度中的关键问题。文献[13]综合考虑了微网的经济型和居民用电舒适度,将柔性负荷以不可平移和可平移进行对比研究,未充分考虑多种混合负荷。文献[14-15]考虑多种混合负荷,但仅将用户用电方式满意度作为约束条件,使负荷保持在居民舒适范围内进行调节。

总之,现有研究多侧重于系统运营成本与环境成本的优化,较少涉及用户满意度的综合考量,且对用户满意度模型的建立不够完善。本文引入了激

励型需求响应 (incentive-based demand response, IBDR) 机制,并构建了改进的综合满意度模型,针对微电网内不同特性的负荷制定不同的经济补偿策略,旨在通过合理的激励措施和补偿机制协调系统运营与用户需求之间的关系,实现系统长期稳定的可持续发展。因此本文构建了以系统运营成本、环境成本和用户满意度为目标的日前优化调度模型,并采用改进的多目标灰狼优化算法以获得 Pareto 最优前沿。进一步地,基于模糊集理论对出力决策信息进行模糊化处理,选取最优折衷解,确保在提升系统经济与环境效益的同时保持用户的高满意度,实现系统、环境和用户的共赢。

1 热电联供微电网系统模型

本文所构建的热电联供微电网是一个能满足电、热负荷的能源站,主要组成如图 1 所示。从图 1 可以看出,该系统能实现电、热的互补,提高综合能源的利用效率^[16]。

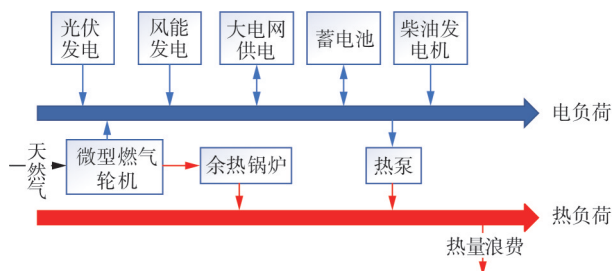


图 1 热电联供微电网的组成

Fig. 1 Composition of a combined heat and power microgrid

1.1 蓄电池模型

蓄电池的充放电功率与荷电状态的关系如式(1)~(2)所示^[17]。

$$S_{oc}(t) = S_{oc}(t-1) + \frac{p_c \Delta t \eta_c}{E_c} \quad (1)$$

$$S_{oc}(t) = S_{oc}(t-1) - \frac{p_d \Delta t}{E_c \eta_d} \quad (2)$$

式中: $S_{oc}(t)$ 为蓄电池在 t 时刻的荷电状态, 取值范围 $[0, 1]$; p_c 、 p_d 分别为蓄电池的充、放电功率; η_c 、 η_d 分别为充、放电效率; Δt 为蓄电池充放电时间; E_c 为蓄电池的额定容量。

1.2 热电联供装置 (combined heat and power, CHP)

热电联供装置由燃气轮机和余热锅炉组成, 其中燃气轮机使用天然气作为燃料发电, 其发电效率

如式(3)所示,并且他们之间存在热电耦合,其关系如式(4)所示^[18-19]。

$$n_{MT}(t) = 0.0753 \left(\frac{p_{MT}(t)}{p_{MT}^r} \right)^3 - 0.3095 \left(\frac{p_{MT}(t)}{p_{MT}^r} \right)^2 + 0.4174 \frac{p_{MT}(t)}{p_{MT}^r} + 0.1068 \quad (3)$$

$$p_{bl}(t) = K_{hc} \frac{p_{MT}(t)}{n_{MT}(t)} \quad (4)$$

式中: $n_{MT}(t)$ 为 t 时刻燃气轮机发电效率; $p_{MT}(t)$ 、 $p_{MT}^r(t)$ 分别为 t 时刻燃气轮机的发电功率和额定发电功率; $p_{bl}(t)$ 为 t 时刻 CHP 的余热制热功率; K_{hc} 为余热制热系数。

1.3 热泵

如果仅依靠 CHP 装置一个热功率来源,可能会存在电功率或者热功率的浪费,造成不必要的污染。热泵能充分利用新能源,其能量转换公式如式(5)所示。

$$p_{h_e2h}(t) = n_{e2h} p_{e_e2h}(t) \quad (5)$$

式中: $p_{h_e2h}(t)$ 、 $p_{e_e2h}(t)$ 分别为 t 时刻热泵电转热补偿热功率、热泵耗电功率; n_{e2h} 为电转热效率因数。

1.4 激励型需求响应下的电/热负荷

激励型需求响应是一种通过向用户提供经济激励来促使其调整消费行为的机制^[20-21],其目标是通过用户的主动参与,在系统负荷高峰期或系统稳定性受到威胁时减轻系统负荷压力,提升系统的可靠性和经济性。

1.4.1 电负荷响应

如图2所示,电负荷根据其特性可以分为固定负荷和柔性负荷两大类。固定负荷即不可控负荷,是指无法随意削减或转移的电力需求,这类负荷必须在特定时间段内满足,是用户的基本需求和核心业务运营所需的电力。因此,针对固定负荷本文不制定经济补偿策略,因为其不可调节性使其无法参与需求响应机制。柔性负荷即可控负荷,包括可削减负荷和可转移负荷,可削减负荷通常对用户的核心业务或生活质量影响较小,因此可以在一定时间内削减来缓解电力系统的压力;可转移负荷是指可以通过调整使用时间仍满足用户需求的电负荷^[22]。本文对以上特性的电负荷制定了不同的经济补偿策略。

1.4.2 热负荷响应

由于用户对温度具有感知模糊性,所以在舒适

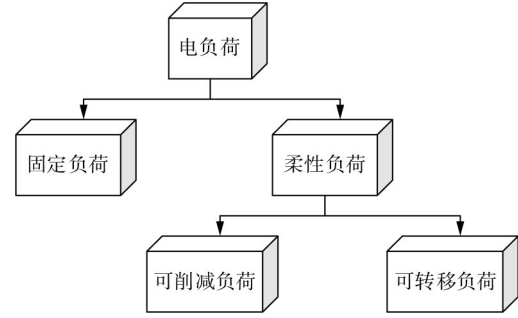


图2 电负荷分类

Fig. 2 Classification of electrical loads

度范围内调节温度不会对用户产生较大的影响,因此热负荷可作为柔性负荷参与需求响应。

热负荷模型为^[23]:

$$Q_{w,t} = C_w \cdot V_t \cdot (T_{w,t} - T_0) \quad (6)$$

$$Q_{w,t} = 3600 p_H(t) \quad (7)$$

式中: $Q_{w,t}$ 为 t 时刻热水负荷; $T_{w,t}$ 、 T_0 分别为 t 时刻热水温度和冷水初始温度; C_w 为水单位面积下的热容,取 $4.2 \times 10^3 \text{ J/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$; V_t 为 t 时刻热水用量; $p_H(t)$ 为 t 时刻热负荷需求功率。

2 居民综合满意度环境经济调度模型

2.1 目标函数

本文以系统运营成本和环境成本最小、居民综合满意度最大为目标,构建了一个三目标优化模型。这种模型能平衡经济效益、环境效益和社会影响,实现系统的综合优化。

2.1.1 系统运营成本

热电联供微电网的综合经济成本包括运行维护成本 C_{om} 、购能成本 C_F 、弃能成本 C_{ac} 以及需求侧经济补偿成本 C_{com} , 运营成本 F_1 可表示为:

$$F_1 = C_{om} + C_F + C_{ac} + C_{com} \quad (8)$$

2.1.1.1 运行维护成本 C_{om} 可表示为^[24]:

$$C_{om} = \sum_{i=1}^m k_i p_i \quad (9)$$

式中: m 为参与运行设备的种类数量; k_i 为第 i 类运行设备的维护成本系数; p_i 为第 i 类运行设备的输出功率(设备包括风电、光电、微型燃气轮机、柴油发电机、微电网与上级电网交互、热泵、余热锅炉和蓄电池)。其中,蓄电池的储能维护成本 C_{ESS} 为:

$$C_{ESS} = \sum_{t=1}^T r_{cc} |P_{bess}(t)| \quad (10)$$

式中: $P_{bess}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的出力功率($P_{bess}(t) >$

0 表示 t 时刻蓄电池处于放电状态, $P_{\text{bess}}(t) < 0$ 表示 t 时刻蓄电池处于充电状态; r_{cc} 为蓄电池充放电维护成本系数; T 为调度周期。

2.1.1.2 购能成本 C_F

$$C_F = C_{\text{grid}} + C_{\text{MT.F}} + C_{\text{DE.F}} \quad (11)$$

式中 C_{grid} 、 $C_{\text{MT.F}}$ 、 $C_{\text{DE.F}}$ 分别为与上级电网的电交易成本、微型燃气轮机和柴油发电机的燃料成本, 具体计算如式(12)~(14)所示。

$$C_{\text{grid}} = \sum_{t=1}^T (k_{\text{buy}} p_{\text{buy}}(t) - k_{\text{sell}} p_{\text{sell}}(t)) \quad (12)$$

$$C_{\text{MT.F}} = \frac{C_{\text{gas}}}{L_{\text{HV}}} \sum_{t=1}^T \frac{p_{\text{MT}}(t)}{n_{\text{MT}}(t)} \quad (13)$$

$$C_{\text{DE.F}} = \sum_{t=1}^T (a_{\text{DE}} p_{\text{DE}}^2(t) + b_{\text{DE}} p_{\text{DE}}(t) + c_{\text{DE}}) \quad (14)$$

式中: $p_{\text{buy}}(t)$ 、 $p_{\text{sell}}(t)$ 分别为 t 时刻与上级电网的买、卖功率; k_{buy} 、 k_{sell} 分别为买、卖电价; C_{gas} 为天然气的价格, 取 2.65 元/ m^3 ; L_{HV} 为天然气低热值, 取 9.7 kWh/ m^3 ; $p_{\text{DE}}(t)$ 为 t 时刻柴油发电机的输出功率; a_{DE} 、 b_{DE} 、 c_{DE} 为柴油发电机的系数, 分别取 0.000 11、0.180 1、6。

2.1.1.3 弃热惩罚成本

在微型燃气轮机的发电过程中会产生的热量可能会超出用户的热量需求, 造成热量的浪费, 弃热惩罚成本 C_{ac} 为:

$$\begin{aligned} C_{\text{ac}} &= \sum_{t=1}^T k_{\text{hless}} p_{\text{H,less}}(t) \\ &= \sum_{t=1}^T k_{\text{hless}} (p_{\text{h,e2h}}(t) - p_{\text{HL}}(t) - \Delta p_{\text{h,t}}(t)) \end{aligned} \quad (15)$$

式中: k_{hless} 为弃热惩罚系数; $p_{\text{H,less}}(t)$ 为 t 时刻弃热功率(为非负值); $p_{\text{HL}}(t)$ 为 t 时刻初始热负荷; $\Delta p_{\text{h,t}}(t)$ 为 t 时刻热负荷削减量。

2.1.1.4 补偿成本 C_{com}

$$\begin{aligned} C_{\text{com}} &= \sum_{t=1}^T \alpha_{\text{red}} \Delta p_{\text{L,r}}(t) + \sum_{t=1}^T \beta_{\text{tran}} \Delta p_{\text{L,t}}(t) + \\ &\quad \sum_{t=1}^T \chi_{\text{h}} \Delta p_{\text{h,t}}(t) \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $\Delta p_{\text{L,r}}(t)$ 、 $\Delta p_{\text{L,t}}(t)$ 分别为 t 时刻可削减负荷和可转移负荷变化量($\Delta p_{\text{L,r}}(t)$ 恒为负); $\Delta p_{\text{h,t}}(t)$ 为热负荷的削减量; α_{red} 、 β_{tran} 、 χ_{h} 为柔性负荷的补偿价格系数。

2.1.2 环境成本

环境成本指的是在经济活动或生产过程中对环

境造成的负面影响所带来的经济成本, 这些成本通常没有直接体现在市场交易价格中, 但会影响社会、生态系统和未来的经济活动。环境成本包括自然资源的过度开发和使用所带来的损失和生产过程造成的污染所需的治理成本。环境成本 F_2 可表示为:

$$F_2 = C_{\text{en}} + C_{\text{po}} \quad (17)$$

式中 C_{en} 、 C_{po} 分别为能源损失成本和污染物治理成本, 具体计算如式(18)~(19)所示。

$$C_{\text{en}} = \sum_{i=1}^n V_i p_{\text{ie}} \quad (18)$$

式中: n 为消耗能源的种类数量(包括天然气、柴油、电网); p_{ie} 为第 i 种能源消耗总功率; V_i 为第 i 种能源的损失成本系数。污染物治理成本可表示为:

$$C_{\text{po}} = \sum_{i=1}^l V_{\text{pi}} Q_i \quad (19)$$

式中: l 为能源产生污染物的种类(包括 NO_x 、 CO_2 、 SO_2 三种主要污染物); V_{pi} 为第 i 种污染物的处理费用系数; Q_i 为第 i 种污染物的排放总量^[25]。

2.1.3 用户综合满意度模型

在电力系统的需求侧响应问题中, 目标是通过调整原有的负荷曲线来降低峰值电量实现削峰填谷的效果。然而, 这种调整可能会影响用户的用电体验。因此, 文献[26]提出一种综合满意度模型, 帮助电力部门在进行需求侧管理时更好地考虑用户的利益, 从而实现供应侧和需求侧效益的最大化。

本文提出了改进的综合满意度模型, 其中包括用电满意度 M_e 和用热满意度 M_h , 定义为 $M = \frac{M_e + M_h}{2}$ 。其中用户用电满意度包括变化量满意度和利润提升率, 即用电舒适度和用电经济性之和。用电满意度 M_e 如式(20)所示^[27]。

$$M_e = \alpha M_a + \beta M_b \quad (20)$$

式中: M_a 、 M_b 分别为用电舒适度和用电经济性; α 、 β 为权重系数($\alpha + \beta = 1$)。用电舒适满意度 M_a 如式(21)所示。

$$M_a = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T |p_{\text{L}}(t) - p_{\text{L,e}}(t)|}{\sum_{t=1}^T p_{\text{L}}(t)} \quad (21)$$

式中 $p_{\text{L}}(t)$ 、 $p_{\text{L,e}}(t)$ 分别为 t 时刻 IBDR 前后的负荷量。

本文通过用电经济满意度 M_b 来评估 IBDR 造成

用户经济损失的影响,如式(22)所示。

$$M_b = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T |\Delta p_{L,t}(t)| (J - \lambda_t - \alpha_{red}) + \sum_{t=1}^T \Delta p_{L,t}(t) (\beta_{tran} + \lambda_t)}{\sum_{t=1}^T p_L(t) J} \quad (22)$$

式中: λ_t 为 t 时刻的电价; J 为柔性电负荷单位功率能产生的净收益。

用热满意度 M_h 如式(23)所示。

$$M_h = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T \Delta T_{w,t}}{\sum_{t=1}^T T_{w,t}^0} \quad (23)$$

式中: $T_{w,t}^0$ 为 t 时刻原来热水温度; $\Delta T_{w,t}$ 为 t 时刻热水温度变化量。

2.2 约束条件

2.2.1 微电网的功率平衡约束

微电网运行约束包括电功率平衡约束和热功率约束,如式(24)所示。

$$\begin{cases} p_{MT}(t) + p_{DE}(t) + p_{grid}(t) + p_{pv}(t) + p_{wt}(t) + p_{bess}(t) \\ = p_L(t) + \Delta p_{L,t}(t) + \Delta p_{L,t}(t) + p_{e_2h}(t) \\ p_{b1}(t) + p_{h_e2h}(t) \geq p_{HL}(t) - \Delta p_{h,t}(t) \end{cases} \quad (24)$$

式中: $p_{MT}(t)$ 、 $p_{DE}(t)$ 和 $p_{grid}(t)$ 分别为 t 时刻燃气轮机、柴油发电机出力功率和电网交互功率; $p_{pv}(t)$ 、 $p_{wt}(t)$ 分别为 t 时刻光伏和风力发电功率; $p_{bess}(t)$ 为 t 时刻蓄电池充放电功率; $p_L(t)$ 、 $p_{HL}(t)$ 分别为 t 时刻初始电、热负荷。

2.2.2 蓄电池运行约束

$$\begin{cases} p_{bess}^{\min} \leq p_{bess}(t) \leq p_{bess}^{\max} \\ S_{oc}^{\min} \leq S_{oc}(t) \leq S_{oc}^{\max} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $p_{bess}(t)$ 为 t 时刻蓄电池充放电功率; $p_{bess}^{\max}$ 、 $p_{bess}^{\min}$ 分别为蓄电池充放电功率上、下限; $S_{oc}(t)$ 为 t 时刻蓄电池荷电状态; $S_{oc}^{\max}$ 、 $S_{oc}^{\min}$ 分别为蓄电池荷电状态上、下限。

2.2.3 供电设备运行约束

$$\begin{cases} 0 \leq p_{MT}(t) \leq p_{MT}^{\max} \\ 0 \leq p_{DE}(t) \leq p_{DE}^{\max} \\ p_{grid}^{\min} \leq p_{grid}(t) \leq p_{grid}^{\max} \\ r_{MT,dn} \leq p_{MT}(t) - p_{MT}(t-1) \leq r_{MT,up} \\ r_{DE,dn} \leq p_{DE}(t) - p_{DE}(t-1) \leq r_{DE,up} \end{cases} \quad (26)$$

式中: $p_{MT}^{\max}$ 、 $p_{DE}^{\max}$ 分别为燃气轮机和柴油发电机出力上限; $p_{grid}(t)$ 为 t 时刻与上级电网交互功率; $p_{grid}^{\max}$ 、 $p_{grid}^{\min}$ 分别为交互功率上、下限; $r_{MT,up}$ 、 $r_{MT,dn}$ 分别为燃气轮机爬坡速率上、下限; $r_{DE,up}$ 、 $r_{DE,dn}$ 分别为柴油发电机爬坡速率上、下限。

2.2.4 柔性负荷响应约束

$$\begin{cases} \Delta p_{L,t}^{\min}(t) \leq \Delta p_{L,t}(t) \leq 0 \\ \Delta p_{L,t}^{\min}(t) \leq \Delta p_{L,t}(t) \leq \Delta p_{L,t}^{\max}(t) \\ \sum_{t=1}^T \Delta p_{L,t}(t) = 0 \\ T_{w,t}^{\min} \leq T_{w,t} \leq T_{w,t}^{\max} \end{cases} \quad (27)$$

式中: $\Delta p_{L,t}^{\min}(t)$ 为 t 时刻可削减负荷变化量的最小值; $p_{L,t}^{\max}(t)$ 、 $\Delta p_{L,t}^{\min}(t)$ 分别为 t 时刻可转移负荷变化量的上、下限; $T_{w,t}^{\max}$ 、 $T_{w,t}^{\min}$ 分别为 t 时刻热水温度上、下限。

3 改进的灰狼算法

3.1 多目标灰狼算法 (multi-objective grey wolf optimizer, MOGWO)

MOGWO 是一种进化算法,基于自然界中灰狼捕猎行为的仿生学原理,用于处理多目标优化问题。该算法扩展了原始的灰狼优化算法,通过模拟灰狼的社会结构(包括 α 狼、 β 狼、 δ 狼和 ω 狼的层次),以及它们在捕猎过程中定位、包围和攻击猎物的行为来引导种群在解空间中搜索最优解。

在 MOGWO 中,多个冲突目标通过非支配排序方法进行优化,这一过程生成一组 Pareto 最优解集,即不存在其他解在所有目标上都优于这些解。为维持解集的多样性,MOGWO 使用拥挤距离计算来选择、更新解集的个体,从而确保解集能够广泛覆盖 Pareto 前沿。通过不断迭代 MOGWO 有效地探索全局解空间,并在各个目标之间找到平衡,最终为复杂的多目标优化问题提供一组优质解决方案^[28]。

MOGWO 已被广泛应用于工程设计优化、能源管理、调度问题 and 经济优化等领域,展现出强大的优化能力和适应性。该算法的主要优势在于其全局搜索能力强、收敛速度快,在处理多目标问题时具有显著的效果。

3.2 改进的多目标灰狼算法

本文以系统的运营成本和环境成本最小,居民综合满意度最大为优化目标,而传统的 MOGWO

在处理多目标问题时,往往难以有效维护种群的多样性,尤其是在高维目标空间中,由于MOGWO的探索与开发平衡依赖于参数 a 的线性递减策略,当面对多目标问题的复杂性时,这种策略可能不够灵活,无法有效应对不同阶段的搜索需求。为了改善这些问题,本文算法进行了如下改进。

1) 调整收敛因子 a

由于本文对不同阶段搜索能力的需要,所以对收敛因子 a 进行了调整。由于 a 越大,算法的搜索能力越强,本文通过使用如式(28)的余弦函数的自适应参数来提高算法在不同阶段的表现,增强了算法的适应性。在算法初期提供较大的探索能力,而随着迭代次数的增加,逐渐减小,从而增强局部寻优能力。总的来说可以使灰狼优化算法在搜索过程中更加灵活,适应不同搜索阶段的要求。

$$a = 1 + \cos\left(\frac{k}{k_{\max}}\pi\right) \quad (28)$$

式中: k 为当前迭代次数; $k_{\max}$ 为最大迭代数量。

2) 加入变异因子

在优化过程中,可能因为缺乏多样性机制而导致种群多样性不足,所以本文在优化后期加入灰狼种群变异因子,保持解的多样性,避免种群过早收敛,陷入局部最优,增强了算法的探索能力。

3) 步步为营

在优化过程中,引入步步为营的狩猎思想,从存储矩阵即最新的帕累托解集中选取一部分返回到狼群中,再次服从头狼的指挥进行搜索,进一步提高了算法在局部的寻优能力。

3.3 最优折衷解

基于拥挤度排序对外部存档进行更新以获得 Pareto 最优前沿。为了实现目标函数的优化效果,决策者可以依据具体情况在 Pareto 前沿中选择一个最优解。然而,在实际过程中,由于决策者对于目标的侧重点不同,选择的解具有相对主观性,所以本节采用模糊集理论对决策信息进行模糊化处理,帮助决策者选择相对客观的最优折衷解。首先,通过模糊隶属度函数从 Pareto 最优前沿中选择一个最佳方案,模糊隶属函数的表达式为^[29]:

$$\psi_{i,n} = \begin{cases} 1, & f_{i,n} \leq f^{\min,n} \\ \frac{f^{\max,n} - f_{i,n}}{f^{\max,n} - f^{\min,n}}, & f^{\min,n} < f_{i,n} < f^{\max,n} \\ 0, & f_{i,n} \geq f^{\max,n} \end{cases} \quad (29)$$

式中: $\psi_{i,n}$ 为第 i 个非支配解在第 n 个目标函数上的隶属度函数值; $f_{i,n}$ 为第 i 个非支配解在第 n 个目标函数上的适应度; $f^{\max,n}$ 、 $f^{\min,n}$ 分别为第 n 个目标函数的最大和最小适应值。隶属函数值的取值范围为 $[0, 1]$,其值越接近1表示决策方案越优,然后对每一个非支配解的隶属函数值进行归一化处理。

$$\zeta_i = \frac{\sum_{j=1}^k \psi_{i,j}}{\sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^k \psi_{i,j}} \quad (30)$$

式中: ζ_i 为第 i 个非支配解的隶属度归一化值; $\psi_{i,j}$ 为第 i 个非支配解在第 j 个目标函数上的隶属度函数值; k 为目标函数的数量; S 为非支配解的数量。

3.4 算法测试

为了全面评估本文提出的改进灰狼优化算法(improved grey wolf optimizer, IGWO)在多目标优化问题上的性能优势,本节选取了经典的 Zitzler - Deb - Thiele 测试函数(ZDT)中的 ZDT1、ZDT2 和 ZDT3 进行测试,并将其与粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)、遗传算法(genetic algorithm, GA)和传统 GWO 算法进行了对比分析。为了量化各算法的优化效果,采用了生成距离(generational distance, GD)、反向生成距离(inverse generational distance, IGD)、扩展度(spread)和超体积(hypervolume)评价指标。

由图3和表1可以看出 IGWO 在多个方面均表现出较优的优化性能,相较于 GA、GWO 和 PSO 能够更有效地提高解的分布性和收敛性,具有更优的全局搜索能力和优化稳定性。算法流程图如图4所示。

4 优化算例分析

4.1 基础数据

本文对一个热电联供微电网进行仿真分析,以验证本文所提出的模型的合理性和算法的有效性。该系统中已安装如图1中的发电装置,在算例仿真中,调度的周期设为1 d,调度时间段以小时为单位划分为24个。微电网的相关设备参数如表2—3所示,蓄电池的容量上下限分别为800和200 kWh,初始容量为400 kWh。新能源最大额定输出曲线和需求侧负荷预测曲线如图5—6所示,其中,可削减负荷和可转移负荷各占电负荷的20%。风力发

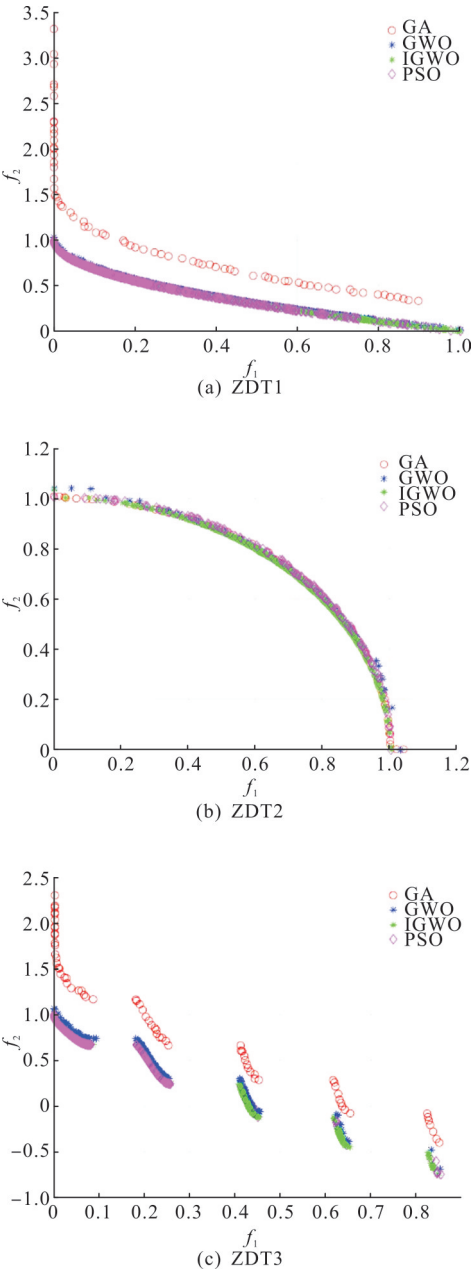


图3 3个测试函数的结果对比

Fig. 3 Comparison of results of three test functions

电的运维成本为0.029 6元/kWh, 光伏发电的运维成本为0.009 6元/kWh。

该系统与上级电网之间的交互电价如表3所示, 对于柔性负荷的补偿政策如表3—4所示, 取该类柔性负荷的生产净收益为8元/kWh, 环境参数如表5所示。

4.2 最优折衷解的选取与分析

根据上述基础数据, 鉴于不同用户对需求侧管理的响应积极性存在差异, 为平衡经济、环境和社

表 1 算法指标对比

Tab. 1 Comparison of algorithm index					
算法		GA	GWO	PSO	IGWO
ZDT1	GD	0.518	0.015	0.007	0.004
	IGD	0.250	0.141	0.003	0.001
	Spread	0.809	0.620	0.715	0.612
	Hypervolume	0.411	0.398	0.872	0.874
ZDT2	GD	0.082	0.115	0.102	0.113
	IGD	0.074	0.084	0.077	0.073
	Spread	0.447	0.737	0.546	0.695
	Hypervolume	0.411	0.398	0.410	0.420
ZDT3	GD	0.318	0.024	0.013	0.018
	IGD	0.190	0.188	0.199	0.191
	Spread	0.659	0.619	0.953	0.611
	Hypervolume	0.893	1.247	1.309	1.324

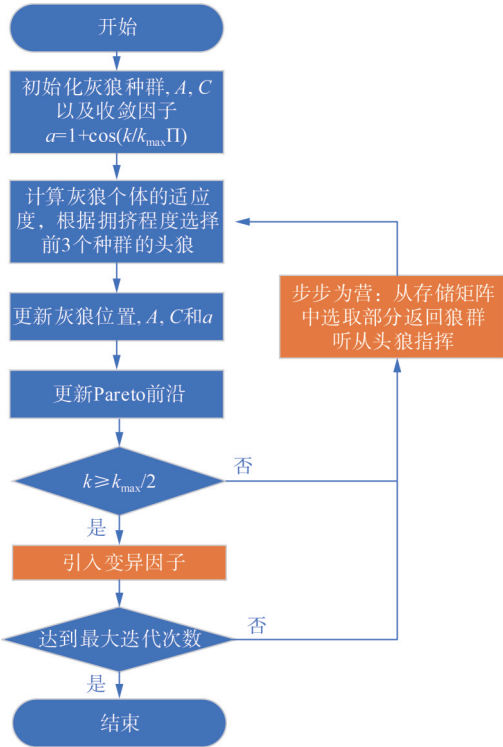


图4 改进的灰狼算法流程图

Fig. 4 Flow chart of improved grey wolf optimization algorithm

会效益, 特设置了三类具有不同用电特征的用户群体如见表6所示, 其中, α 、 β 为用户对用电舒适度与经济性的权重, 反映了用户的偏好倾向。

由图7可知, 居民用电满意度与运营成本和环境成本都呈正相关, 即随着居民综合满意度的降低, 系统的运营成本和环境成本都明显降低。对于3种不同用电特征的用户群体, IBDR对其综合满意

表2 发电设备的相关参数

Tab. 2 Relevant parameters of power generation equipments

设备	设备运行上限/kW	设备运行下限/kW	维护成本/(元·kWh ⁻¹)
微型燃气轮机	600	0	0.04
柴油发电机	400	0	0.094 6
蓄电池	200	-300	0.045
电网交互	600	-600	0.012
热泵	600	0	0.02

表3 分时电价表

Tab. 3 Time-of-use electricity prices table 元·kWh

时段	电网交互电价		居民用电电价	可削减负荷补偿价格	热负荷补偿价格
全天划分	购电	售电	售电	补偿价格	
峰时段 (10—14) (19—22)	1.25	1.12	1.09	0.9	0.6
平时段 (7—10) (14—19)	0.72	0.47	0.68	0.5	0.3
谷时段 (22—7)	0.34	0.18	0.35	0.3	0.2

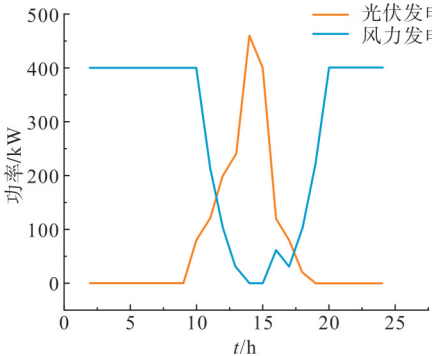


图5 新能源最大额定输出功率

Fig. 5 Maximum rated output powers of new energy sources

度的影响程度也有所不同，具体表现为：当居民用电舒适度所占权重越大，IBDR 对综合满意度的负面影响越明显。因此，对于用电舒适度权重较大的群体，系统可通过适当增加经济补偿的方式，弥补因用电舒适度下降带来的综合满意度降低，在这种情况下，系统的运营成本将有所增加。

以用户类型 2 为例，综合考虑系统运营成本，环境成本以及居民综合满意度，最终选取的最优折衷解如图 8 所示，此时运营成本和环境成本分别为 14 994 元和 3 787.6 元，居民综合满意度为

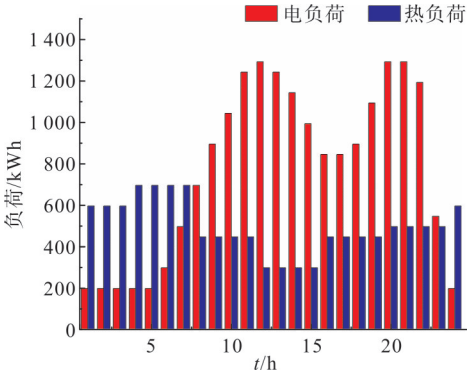


图6 需求侧负荷预测曲线

Fig. 6 Forecast curves of demand-side loads

表4 可转移负荷补偿政策

Tab. 4 Transferable load compensation policy

初始位置时段	终止位置时段	补偿价格/(元·kWh ⁻¹)
峰时段	平时段	0.2
峰时段	谷时段	0.6
平时段	谷时段	0.1

94.25 %，实现了经济效益、环境效益和用户满意度之间的良好平衡。图 9 给出了该方案下不同时刻的计划出力和负荷情况，可以看出，在用电高峰时段，通过 IBDR 系统能够有效削减部分不必要的负荷，从而降低高峰时段的电力需求，减轻系统压力。同时，一些灵活性较高的负荷通过需求响应机制被转移到用电低谷时段。蓄电池也在用电低谷时段进行充电，在用电高峰期放电以减轻系统负荷。在用电低谷时段，微型燃气轮机和柴油发电机的出力较低，微电网优先使用更加低廉的大电网供电，同时热泵作为热负荷的主要出力设备，通过将电能转化为热能满足热负荷；相同地，在用电高峰时段，由于大电网的购电电价相对较高，微型燃气轮机和柴油发电机的出力较高，大电网供电出力较低，相应的余热锅炉的制热功率作为热能需求的主要来源，同时出现向大电网卖电的情况，充分降低了成本。

4.3 场景对比分析

为了明确不同柔性负荷响应对三方的影响，本节对以下 4 种情景的结果进行对比分析。

- Case 1: 无柔性负荷参与响应；
- Case 2: 电需求侧多种特性负荷参与响应；
- Case 3: 电需求侧单种可削减负荷参与响应；
- Case 4: 电/热需求侧柔性负荷参与响应。

表 5 环境成本治理相关系数^[25]

Tab. 5 Coefficients of environmental cost governance correlation^[25]

污染物排放系数	NO _x	CO ₂	SO ₂	能源损耗成本/(g·kWh ⁻¹))
燃气轮机	0.2	724	0.003 6	0.098 57
电网购电	1.6	889	1.8	0.044 662
柴油发电机	10.09	680	0.306	0.044 106 5
污染治理成本系数/(元·kg ⁻¹)	8	0.21	6	
污染治理成本系数/(元·kg ⁻¹)	8	0.21	6	

表 6 不同用电特征群体权重取值表

Tab. 6 Weight values table of different electricity consumption characteristic groups

用户群体	α	β
用户类型1	0.7	0.3
用户类型2	0.5	0.5
用户类型3	0.3	0.7

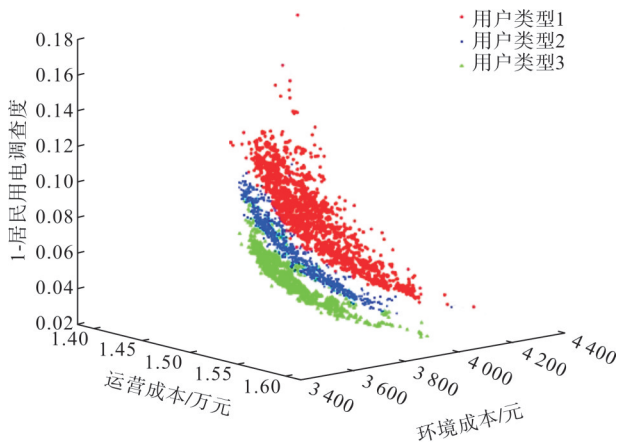


图 7 不同类型用户 Pareto 最优前沿对比图

Fig. 7 Comparison chart of Pareto optimal frontiers of different types of users

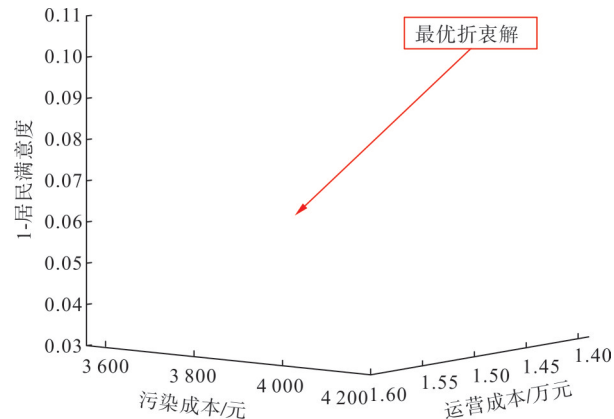
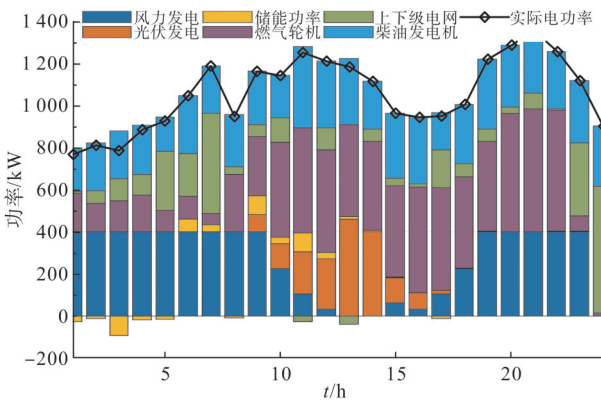
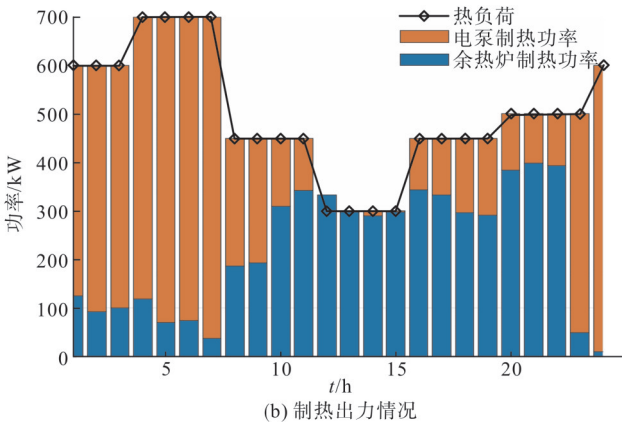


图 8 三目标 Pareto 最优前沿

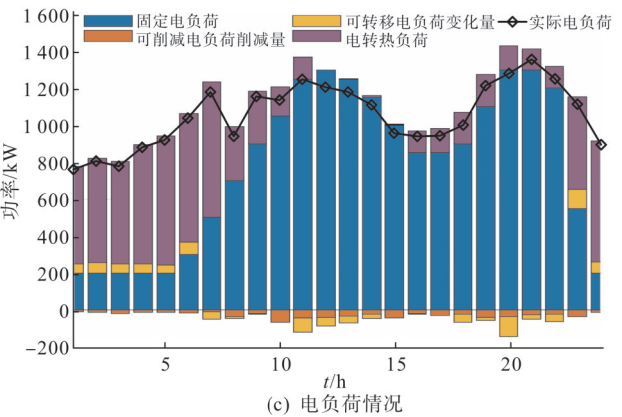
Fig. 8 Three-objective Pareto optimal frontier



(a) 发电设备出力情况



(b) 制热出力情况



(c) 电负荷情况

图 9 最优折衷解下的负荷和出力情况

Fig. 9 Loads and outputs under the optimal compromise solution

4.3.1 IBDR 的合理性

为验证所提出模型中 IBDR 的合理性, 本节对 Case 1 和 Case 2 进行对比分析。在 Case 2 中, 考虑系统经济效益和环境效益, 不考虑用户利益, 即将系统的运营成本和环境成本费用作为两个优化目标进行仿真实验。

采用前文所提到的改进的灰狼算法进行仿真, 设置灰狼种群个数为 500 只, 迭代次数为 500 次。如图 10 所示, Pareto 前沿给出的运营成本和环境成本呈负相关的制约关系, 当运营成本减少时环境成本增加, 且引入 IBDR 可以有效降低环境成本和运营成本。图 11 展示了在引入 IBDR 后不考虑用户利益的最优折衷解下的负荷和出力情况, 当用户满意度模型参数 $\alpha=\beta=0.5$ 时, 最优折衷解下的用户综合满意度为 93.04 %, 结果表明 IBDR 通过削减或转移柔性负荷减少了高峰时段的用电需求, 有效地减少了系统的运营成本。此外, 通过减少对化石燃料发电的需求, 降低温室气体和其他污染物排放, 从而进一步减小环境成本。总体而言, IBDR 不仅提升了经济效益, 还显著改善了系统的环保性能。

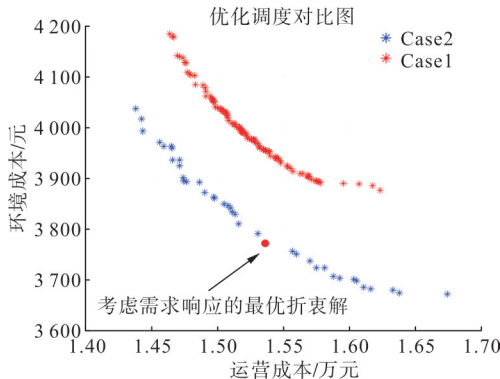


图 10 有无需求响应对比图

Fig. 10 Comparison chart with and without demand response

4.3.2 多种电负荷响应的有效性

如图 12 所示, 与 Case 3 相比, Case 2 在显著降低运营成本和环境成本的同时保持了较高的用户满意度, 实现了经济、环境效益与用户体验的协同优化。

在各自场景下选择两组典型结果进行对比。从表 7 中可以看出, Case 2 虽然在运维和燃料成本上投入稍高, 但通过合理的负荷削减与转移减少了补偿成本, 从而使整体运营成本更低, 用户满意度更高。此外, Case 2 有效降低了环境成本,

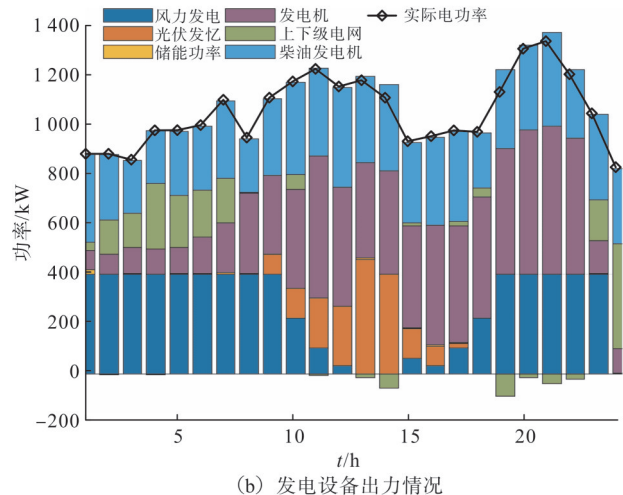
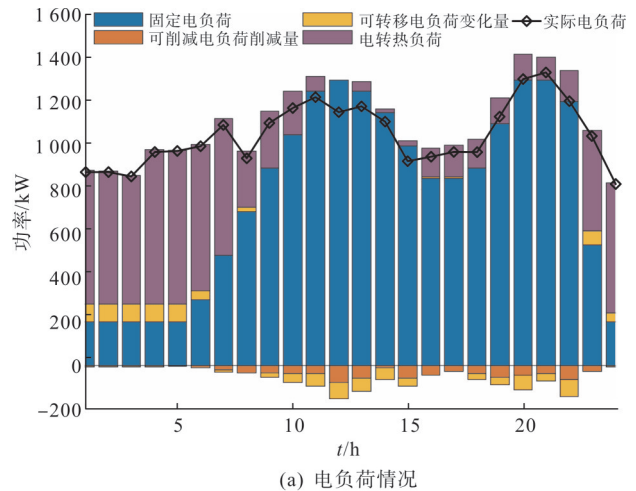


图 11 最优折衷解下在不同时段的负荷和出力情况

Fig. 11 Loads and output at different time periods under the optimal compromise solution

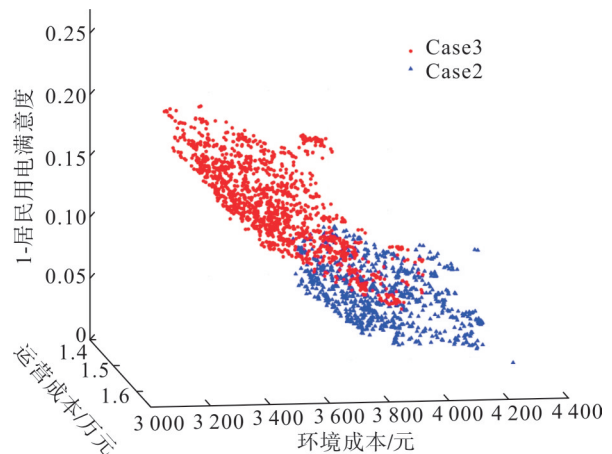


图 12 不同电负荷组合参与响应的 Pareto 前沿对比图

Fig. 12 Pareto front comparison of different electric load combinations participating in the response

表7 两典型场景的结果对比表

Tab. 7 Comparison of results of two typical scenarios

情景	补偿成本/元	运维+燃料成本/元	运营成本/元	环境成本/元	用电满意度/%
Case 2	758.5	14 014.1	14 773	3 786.9	92.7
Case 3	1 262.8	13 965.3	15 228.1	3 800.2	90.3

展现出需求侧多种特性电负荷参与响应下全面优化的效果。

4.3.3 热\电负荷协同响应的有效性

在 Case 4 中,电/热需求侧柔性负荷均参与响应,且考虑用户的热/电综合满意度。为验证热/电负荷协同响应的有效性,本节对比分析 Case 2 与 Case 4 的优化结果。由图 13 可知,在引入热/电负荷响应后,3 个优化目标均得到显著改善,表明该响应机制在优化调度中具有积极作用。

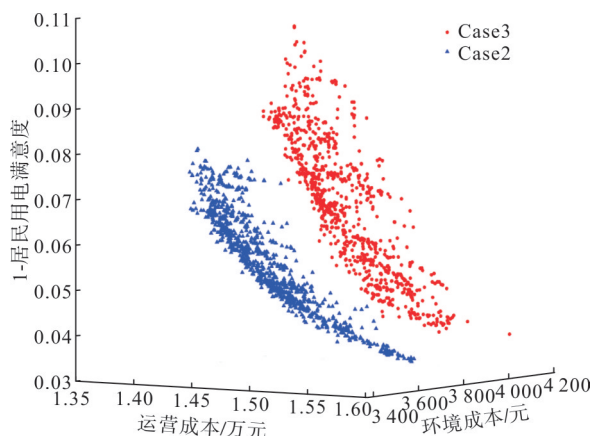


图 13 热、电负荷响应下 Pareto 前沿对比图

Fig. 13 Pareto frontier comparison under thermal and electrical load response

4.4 算法对比

为了进一步验证所提算法的优越性,本节将其与传统 GWO, GA 和 PSO 所得到的 Pareto 前沿进行比较。IGWO 设置为:灰狼搜索种群数量为 500 只,变异因子为 0.2,迭代 400 次;GWO、GA 和 PSO 算法的种群规模均为 500,并进行 400 次迭代。

实验结果表明,IGWO 在优化过程中展现出更强的全局搜索能力,相较于传统 GWO、GA 和 PSO,其所得的 Pareto 前沿在分布性与收敛性方面均表现更优。

5 结语

本文考虑了多种负荷特性,提出了一种基于

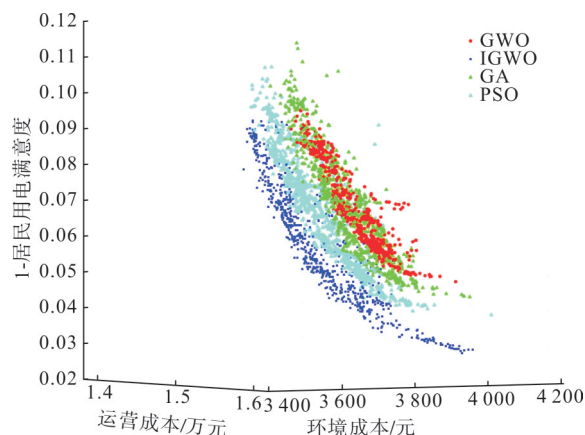


图 14 两种算法得到的 Pareto 最优前沿

Fig. 14 Pareto optimal frontiers obtained by two algorithms

IBDR 的用户综合满意度模型,针对微电网的多目标运行优化问题构建了以系统运营成本、环境成本和居民综合满意度为目标的日前优化调度模型。为此,采用了改进的 MOGWO 优化算法,以获得 Pareto 最优解集,并应用模糊集理论模糊化处理决策信息选取最优折衷解。通过理论分析与情景仿真对比,本文验证了所提模型与方法的有效性,证明了 IBDR 在多目标优化调度中的重要作用,多种负荷响应对系统全面优化的优越性。研究结果表明,合理的需求响应策略有利于实现系统、环境和用户的三赢。此外,对于不同类型的用户应制定不同的调度方案,以实现系统能长期稳定的可持续发展。这为未来微电网的优化调度提供了新的思路和方法,也为相关政策制定和实际应用提供了理论支持。

参考文献

- [1] 胡东欧. 绿色经济视角下中国区域可再生能源发展路径研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2022.
- [2] 文云峰, 杨伟峰, 汪荣华, 等. 构建 100% 可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1843 - 1856.
WEN Yunfeng, YANG Weifeng, WANG Ronghua, et al. Review and prospect of constructing 100% renewable energy power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1843 - 1856.
- [3] GU W, WU Z, YUAN X. Microgrid economic optimal operation of the combined heat and power system with renewable energy[C]// IEEE PES General Meeting, Minneapolis, Minnesota, July 25 - 29, 2010, Minneapolis, USA. New York: IEEE, 2010: 1 - 6.
- [4] SUN T K, LU J, LI Z M, et al. Modeling combined heat and power systems for microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(5): 4172 - 4180.

- [5] XU L, YANG G, ZHAO X, et al. A coordinated dispatch model for electricity and heat in a microgrid via particle swarm optimization[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2013, 35(1): 44 – 55.
- [6] WANG X, CHEN X, ZHOU Y, et al. Optimal dispatch of microgrid with combined heat and power system considering environmental cost[J]. Energies, 2018, 11(10): 2493. 1 – 2493. 23.
- [7] 帅茂杭, 熊国江, 胡晓, 等. 基于改进多目标骨干粒子群算法的电力系统环境经济调度[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 997 – 1004.
SHUAI Maohang, XIONG Guojiang, HU Xiao, et al. Environmental economic dispatch of power systems based on an improved multi-objective backbone particle swarm optimization algorithm[J]. Control and Decision, 2022, 37(4): 997 – 1004.
- [8] 罗平, 韩露杰, 孙作藩, 等. 冷热电联供型微电网系统多目标日前优化调度[J]. 自动化仪表, 2018, 39(2): 1 – 6.
LUO Ping, HAN Lujie, SUN Zuoxiao, et al. Multi-objective day-ahead optimal scheduling of CCHP microgrid systems[J]. Automation Instrumentation, 2018, 39(2): 1 – 6.
- [9] 牛文娟, 李扬, 王蓓蓓. 考虑不确定性的需求响应虚拟电厂建模[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3630 – 3637.
NIU Wenjuan, LI Yang, WANG Beibei. Modeling of virtual power plants considering uncertainty and demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3630 – 3637.
- [10] 徐辉, 焦扬, 蒲雷, 等. 计及不确定性和需求响应的风光燃储集成虚拟电厂随机调度优化模型[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3590 – 3597.
XU Hui, JIAO Yang, PU Lei, et al. Stochastic scheduling optimization model for wind-solar-gas-storage integrated virtual power plant considering uncertainty and demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3590 – 3597.
- [11] 段新会, 黄嵘, 齐传杰, 等. 计及碳交易与需求响应的微能源网双层优化模型[J]. 太阳能学报, 2024, 45(3): 310 – 318.
DUAN Xinhui, HUANG Rong, QI Chuanjie, et al. Bi-level optimization model of micro-energy networks considering carbon trading and demand response[J]. Acta Energetica Sinica, 2024, 45(3): 310 – 318.
- [12] SHENG H, WANG C, LI B, et al. Multi-timescale active distribution network scheduling considering demand response and user comprehensive satisfaction[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 1995 – 2005.
- [13] 曾君, 徐冬冬, 刘俊峰, 等. 考虑负荷满意度的微电网运行多目标优化方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3325 – 3334.
ZENG Jun, XU Dongdong, LIU Junfeng, et al. Multi-objective optimization method for microgrid operation considering load satisfaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3325 – 3334.
- [14] LONG Y, LI Y, WANG Y, et al. Low-carbon economic dispatch considering integrated demand response and multistep carbon trading for multi-energy microgrid[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 6218. 1 – 6218. 13.
- [15] 魏震波, 马新如, 郭毅, 等. 碳交易机制下考虑需求响应的综合能源系统优化运行[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 1 – 9.
WEI Zhenbo, MA Xinru, GUO Yi, et al. Optimal operation of integrated energy systems considering demand response under carbon trading mechanism[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 1 – 9.
- [16] 罗鸿轩, 肖勇, 王宗义, 等. 考虑联合热电需求响应的多能源协调优化技术[J]. 南方电网技术, 2023, 17(6): 72 – 79.
LUO Hongxuan, XIAO Yong, WANG Zongyi, et al. Multi-energy coordinated optimization technology considering combined heat and power demand response[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(6): 72 – 79.
- [17] SHUAI H, FANG J, AI X, et al. Optimal real-time operation strategy for microgrid: an adp-based stochastic nonlinear optimization approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 10(2): 931 – 942.
- [18] 李国庆, 翟晓娟, 李扬, 等. 基于改进蚁群算法的微电网多目标模糊优化运行[J]. 太阳能学报, 2018, 39(8): 2310 – 2317.
LI Guoqing, ZHAI Xiaojuan, LI Yang, et al. Multi-objective fuzzy optimization operation of microgrid based on improved ant colony algorithm[J]. Acta Energetica Sinica, 2018, 39(8): 2310 – 2317.
- [19] 戚艳, 尚学军, 聂靖宇, 等. 基于改进多目标灰狼算法的冷热电联供型微电网运行优化[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 12 – 19, 52.
QI Yan, SHANG Xuejun, NIE Jingyu, et al. Optimization of CCHP microgrid operation based on an improved multi-objective grey wolf algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 12 – 19, 52.
- [20] 杨力俊, 潘伟, 田闻旭. 计及需求响应和风光不确定性的微电网多目标优化模型[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(3): 1 – 8.
YANG Lijun, PAN Wei, TIAN Wenxu. Multi-objective optimization model of microgrid considering demand response and wind-solar uncertainty[J]. Power Demand-Side Management, 2022, 24(3): 1 – 8.
- [21] 张佳欣. 考虑需求侧响应的综合能源系统优化调度[D]. 保定: 华北电力大学, 2023.
- [22] 刘彪. 考虑用户满意度的电力系统调度问题研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2023.
- [23] 宋阳阳, 王艳松, 衣京波. 计及需求侧响应和热/电耦合的微电网能源优化规划[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3469 – 3476.
SONG Yangyang, WANG Yansong, YI Jingbo. Energy optimization planning of microgrid considering demand-side response and heat/electricity coupling[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3469 – 3476.
- [24] 朱志芳, 胡柳君, 董红, 等. 基于光-储-微网合作博弈的保供电型微电网运营模式[J/OL]. 南方电网技术, 1 – 12[2024 – 05 – 21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20240518.2102.010.html>.
ZHU Zhifang, HU Liujun, DONG Hong, et al. Operation mode of power-guaranteed microgrid based on photovoltaic-storage-microgrid cooperative game[J/OL]. Southern Power System Technology: 1 – 12[2024 – 05 – 21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20240518.2102.010.html>.
- [25] 魏学好, 周浩. 中国火力发电行业减排污染物的环境价值标准估算[J]. 环境科学研究, 2003, 16(1): 53 – 56.
WEI Xuehao, ZHOU Hao. Estimation of environmental value standards for pollutant reduction in China's thermal power industry[J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(1): 53 – 56.