

计及需求响应的海岛微电网双层优化运行

匡洪海 徐雨淞 李子龙 杨慧娴

(湖南工业大学电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要 为综合考虑微电网调度过程中供给侧和需求侧的利益, 本文建立计及需求响应的海岛微电网双层优化调度模型。该模型上层以微电网的净收益为目标优化各单元出力, 下层以居民的综合舒适度为目标优化负荷曲线。采用一种改进的蜣螂优化算法对双层优化模型进行求解。通过Sinusoidal映射初始化种群, 并利用准对立学习优化, 增加了种群的多样性; 在更新阶段引入哈里斯鹰的围攻策略和自适应t分布扰动, 增强寻优能力, 提高了解的质量; 通过测试函数与其他算法进行对比, 验证了改进蜣螂优化算法的优越性。算例分析结果表明, 利用所提改进蜣螂优化算法求解双层优化模型, 可在提高系统经济效益的同时, 提升用户的用电舒适度和用能舒适度; 与原始蜣螂优化算法进行对比, 验证了所提改进算法的有效性。

关键词: 微电网; 需求响应; 双层优化; 蜣螂优化算法

Dual-layer optimization operation of an island microgrid considering demand response

KUANG Honghai XU Yuhao LI Zilong YANG Huixian

(College of Electrical and Information Engineering, Hu'nan University of Technology, Zhuzhou, Hu'nan 412007)

Abstract To comprehensively consider the benefits of both the supply and demand sides in the scheduling process of a microgrid, an island microgrid dual-layer optimal scheduling model considering demand response is established. The upper level optimizes the output of each unit with the goal of maximizing the net revenue of the microgrid. The lower level optimizes the load curve with the goal of maximizing residents' overall comfort. An improved dung beetle optimizer is used to solve the dual-layer optimization model. The population is initialized using a sinusoidal mapping and optimized with quasi-oppositional learning to increase population diversity. During the update phase, the Harris hawks' besiege strategy and adaptive t-distribution perturbation are introduced to enhance the optimization capability and improve the solution quality. The superiority of the improved algorithm is verified by comparing its convergence on test functions with other algorithms. The case study results show that the improved algorithm not only improves the system's economic benefits but also enhances the users' electricity and energy comfort. Comparing the results with those obtained by the original dung beetle optimizer confirms the effectiveness of the im-proved method.

Keywords: microgrid; demand response; dual-layer optimization; dung beetle optimizer

0 引言

随着全球能源需求的不断增长和环境问题的日益严峻, 传统的集中式能源系统面临巨大的挑战。化石燃料的过度使用导致温室气体排放增加, 进而引发气候变化和环境污染等一系列问题。为了

应对这些挑战, 各国纷纷寻求清洁、可持续的能源解决方案^[1]。在能源结构转型的大背景下, 微电网作为一种包含分布式能源、储能设备和负荷管理的局部电力系统, 不仅为能源供给提供了新的解决方案, 也为实现低碳、环保和智能化的能源未来奠定了坚实基础^[2]。

目前,已有许多关于微电网的研究。文献[3]针对电动汽车(electric vehicle, EV)无序放电对微电网造成的损害,提出电动汽车接入微电网的两段式优化调度策略,均衡了电动汽车荷电状态和用户收益。文献[4]构建了一种考虑需求响应与主从博弈的双层调度模型,并将双层博弈模型转化为单层规划模型求解,最后实现了削峰填谷,提高了风光利用率。文献[5]将动态电价引入调度阶段,构建了含有EV参与的双层优化模型,通过求解最终实现了EV负荷平抑净负荷的效果。

智能优化算法是解决微电网优化调度问题的重要工具。文献[6]在考虑可再生能源渗透率和用户满意度的前提下,建立了海岛微电网群优化模型,并采用蜘蛛蜂优化算法求解,有效降低了系统成本。文献[7]采用一种融合天牛须的粒子群算法对考虑用户满意度的微电网模型求解,协调了微电网供需两侧的利益。文献[8]为减小孤岛微电网在建设过程中因前线流通功率导致的阶跃功率冲击对系统安全性的影响,提出一种弹性配电网主动预防调度方案,可有效地预防功率冲击,确保了孤岛微电网建设的安全性及可靠性。

蜣螂优化算法(dung beetle optimizer, DBO)是于2022年提出的一种新式群体智能优化算法^[9],文献[10]引入变螺旋策略对DBO进行改进,以增强算法的全局搜索能力;文献[11]加入动态权重系数对DBO进行改进,使算法前期全局搜索能力强,后期自适应变小,更快收敛;文献[12]将正弦算法与蜣螂优化算法融合,扩大了DBO的全局搜索能力。上述改进只针对一个种群,并未协调DBO各个种群间的搜索能力。

在协调微电网与用户的关系时,现有文献大多侧重于用户的经济需求,忽视了用户的舒适度需求,关于用户在微电网调度过程中的舒适度研究较为匮乏。因此,本文在考虑用户用电舒适度及用能舒适度的基础上,搭建海岛微电网双层优化模型,并提出一种融合多策略的改进蜣螂优化算法(improved dung beetle optimizer, IDBO),并通过与其他算法的对比及算例仿真验证改进算法的优越性和有效性。

1 微电网双层优化数学模型

1.1 微电网结构

微电网结构如图1所示,主要由光伏发电机组(photovoltaic, PV)、风力发电机组(wind turbine,

WT)、波浪能发电机组(wave energy generator, WEG)、柴油发电机组(diesel generator, DG)和蓄电池(battery, BT)组成的储能系统及需求侧负荷构成,通过联络线与主网(Grid)相连。

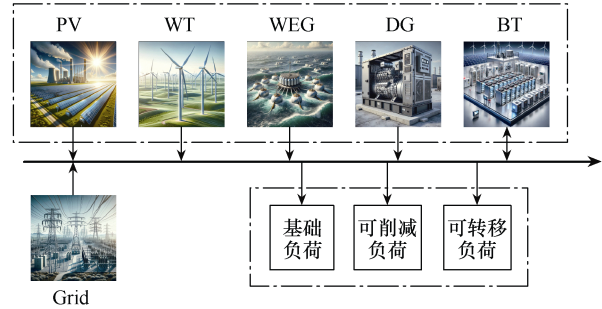


图1 微电网结构

1.2 微电网电源侧模型

1) 光伏发电模型

$$P_{PV} = P_s \frac{G_a}{G_s} [1 + \varepsilon(T_c - T_s)] \quad (1)$$

式中: P_{PV} 为光伏发电功率; P_s 为标准条件下的光照强度对应功率; G_a 和 G_s 分别为实际条件下和标准条件下的光照强度; T_c 为光伏组件实际工作温度; T_s 为标准测试温度,一般取 25°C ; ε 为温度系数。

2) 风力发电模型

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & V < V_m \text{ 或 } V > V_t \\ \frac{P_n(V - V_m)}{V_n - V_m} & V_m \leq V \leq V_n \\ P_n & V_n < V \leq V_t \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_{WT} 为风力发电功率; P_n 为额定功率; V 和 V_n 分别为实际风速和额定风速; V_m 和 V_t 分别为切入和切出风速。

3) 波浪能发电模型

$$P_{WEG} = 0.5h^2T_w \quad (3)$$

式中: P_{WEG} 为波浪能发电功率; h 为波浪的高度; T_w 为波浪的周期^[13]。

4) 柴油发电机发电模型

$$P_{DG} = \eta_{DG} \frac{Q_{\text{fuel}}}{H_{\text{fuel}}} \quad (4)$$

式中: P_{DG} 为柴油发电机发电功率; η_{DG} 为柴油发电机发电效率; Q_{fuel} 为柴油消耗量; H_{fuel} 为柴油的低位热值。

5) 蓄电池储能模型

$$S_{OC}(t) = S_{OC}(t-1) + \frac{P_{BT}(t)}{E_{BT}} \eta_{BT} \Delta t \quad (5)$$

式中: $S_{OC}(t)$ 为蓄电池 t 时刻的电量; $P_{BT}(t)$ 为蓄电池充放电功率; E_{BT} 为蓄电池容量; η_{BT} 为充放电效率; Δt 为时间间隔。

1.3 微电网负荷侧模型

1) 基础负荷

基础负荷 L_{base} 是海岛居民日常固定使用的负荷, 属于不可调度负荷。

2) 可削减负荷

可削减负荷 L_{curt} 可以根据微电网的需求进行调整^[14], 第 t 个时段需求响应后的可削减负荷 $P_{curt_new}(t)$ 表示为

$$P_{curt_new}(t) = P_{curt_ori}(t) - \delta P_{curt}(t) \quad (6)$$

式中: $P_{curt_ori}(t)$ 为第 t 个时段的原始可削减负荷; $\delta P_{curt}(t)$ 为第 t 个时段的削减量, 如式 (7) 所示。

$$\delta P_{curt}(t) = D_{RFcurt}(t) r_{P_{curt}} \quad (7)$$

式中: $D_{RFcurt}(t)$ 为第 t 个时段的削减比例因子, 取值范围为 (0, 1); $r_{P_{curt}}$ 为可削减负荷的容量。

3) 可转移负荷

可转移负荷 L_{trans} 是指可以在不同时间段之间转移使用电力负荷^[15], 但是在一个周期内的负荷总量保持不变。第 t 个时段需求响应后的可转移负荷 $P_{trans_new}(t)$ 可表示为

$$P_{trans_new}(t) = \frac{D_{RFtrans}(t)}{\sum_{i=1}^{24} D_{RFtrans}(i)} \sum_{i=1}^{24} P_{trans_ori}(i) \quad (8)$$

式中: $D_{RFtrans}(t)$ 为第 t 个时段的转移比例因子;

$\sum_{i=1}^{24} D_{RFtrans}(i)$ 为所有时间段转移比例因子总和;

$\sum_{i=1}^{24} P_{trans_ori}(i)$ 为所有时间段原始可转移负荷总和。

2 微电网调度模型

2.1 目标函数

在考虑各机组设备的投资成本 C_{invest} 和维护成本 C_{main} 的前提下, 引入需求侧的用户综合舒适度 C_{cus} 。

$$C_{invest} = r_i Q_i c_{invest_i} \quad (9)$$

$$C_{main} = r_i Q_i c_{main_i} \quad (10)$$

式中: r_i 为第 i 种设备的容量; Q_i 为第 i 种设备的

安装数量; c_{invest_i} 和 c_{main_i} 分别为第 i 种设备单位容量的投资成本和维护成本。

$$C_{cus} = 0.5(C_{ebs} + C_{eus}) \quad (11)$$

式中, C_{ebs} 和 C_{eus} 分别为海岛居民的用电舒适度和用能舒适度。

用电舒适度主要通过购电量的变化来衡量, 它反映了系统在需求响应后用户对电力供应的适应性, 其表达式为

$$C_{ebs} = 1 - \frac{\Delta P_{grid}}{\sum P_{buy_ori}} \quad (12)$$

$$\Delta P_{grid} = \sum |P_{buy_ori} - P_{buy_new}| \quad (13)$$

式中: ΔP_{grid} 为购电量的差值; $\sum P_{buy_ori}$ 为原始购电量的总和; P_{buy_new} 为需求响应后的购电量。

用能舒适度通过可削减负荷和可转移负荷的变化来衡量, 反映了用户的负荷需求被调整后的舒适度, 其表达式为

$$C_{eus} = 1 - \frac{\Delta P_{load}}{\sum (P_{curt_ori} + P_{trans_ori})} \quad (14)$$

$$\Delta P_{load} = \sum |P_{curt_ori} - P_{curt_new}| + \sum |P_{trans_ori} - P_{trans_new}| \quad (15)$$

式中: ΔP_{load} 为负荷变化量; $\sum (P_{curt_ori} + P_{trans_ori})$ 为原始可削减负荷和可转移负荷的总和。

2.2 多目标处理

针对不同量纲的目标函数, 加权求和法是一种常见的多目标优化方法, 通过将多个目标函数按一定的权重线性组合成一个单一的目标函数, 从而将多目标优化问题转化为单目标优化问题。其计算公式通常为

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i f_i(x) \quad (16)$$

式中: ω_i 为第 i 个目标函数的权重; $f_i(x)$ 为第 i 个目标函数; n 为目标函数数量。

本文中加权处理后的综合目标函数可表示为

$$F = \omega_1 C_{invest} + \omega_2 C_{main} + \omega_3 C_{cus} \quad (17)$$

式中, ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别为投资成本、维护成本和用户综合舒适度的权重, 其中 ω_1 取 0.000 1, ω_2 取

0.001, ω_3 近似取 1。

2.3 约束条件

1) 微电源安装数量约束

$$\begin{cases} Q_i \leq Q_i^{\max} \\ Q_{DG} \leq Q_{DG}^{\max} \\ Q_{BT} \leq Q_{BT}^{\max} \end{cases} \quad (18)$$

式中, Q_i^{\max} 、 Q_{DG}^{\max} 、 Q_{BT}^{\max} 分别为第 i 个清洁发电装置、柴油发电机和储能蓄电池的安装数量上限。

2) 蓄电池荷电状态约束

$$\begin{cases} S_{\min} \leq S(t) \leq S_{\max} \\ \xi_{\text{dis}}(t) + \xi_{\text{ch}}(t) \leq 1 \\ 0 \leq P_{\text{dis}}(t) \leq P_{\text{dis}}(t)\xi_{\text{dis}}(t)P_{\max} \\ 0 \leq P_{\text{ch}}(t) \leq P_{\text{ch}}(t)\xi_{\text{ch}}(t)P_{\max} \end{cases} \quad (19)$$

式中: S_{\max} 、 S_{\min} 分别为蓄电池 t 时刻荷电状态 $S(t)$ 的上、下限; $\xi_{\text{dis}}(t)$ 和 $\xi_{\text{ch}}(t)$ 均为 0-1 变量, 其中 $\xi_{\text{dis}}(t)=1$ 表示放电, $\xi_{\text{ch}}(t)=1$ 表示充电; $P_{\text{dis}}(t)$ 和 $P_{\text{ch}}(t)$ 分别为 t 时刻的放电和充电功率; P_{\max} 为蓄电池额定功率。

3) 电功率平衡约束

$$\begin{aligned} L_{\text{base}} + L_{\text{curt}} + L_{\text{trans}} = \\ P_{\text{PV}} + P_{\text{WT}} + P_{\text{WEG}} + P_{\text{DG}} + P_{\text{BT}} + P_{\text{grid}} \end{aligned} \quad (20)$$

式中: P_{BT} 为蓄电池的充放电功率; P_{grid} 为主网与微电网交互功率。

3 改进蜣螂优化算法

蜣螂优化算法作为一种新式群体智能优化算法, 相较于传统群智能算法具有更好的寻优能力和收敛精度, 但是仍存在收敛速度较慢、易陷入局部最优等问题。针对上述问题, 本文做出以下改进:

①引入 Sinusoidal 序列初始化种群; ②采用准反向学习优化初始种群; ③在滚球阶段引入哈里斯鹰的围攻策略; ④在觅食阶段加入自适应 t 分布扰动策略。

3.1 改进策略

1) Sinusoidal 映射

Sinusoidal 映射是一种用于生成混沌序列的非线性映射, 相较于随机生成的初始个体, 可以保证初始解均匀分布。

$$x_{n+1} = a \sin(\pi x_n) \quad (21)$$

式中: x_n 为第 n 次迭代值; a 为一个常数, 通常取 1。

2) 准反向学习策略

准反向学习根据每个个体到中心点的距离来更新位置, 增加了种群的多样性, 使算法更具有探索性。

$$x_i^{\text{qo}} = \text{rand} \left(\frac{l_{bi} + u_{bi}}{2}, x_i \right) \quad (22)$$

式中: x_i 为原始位置; x_i^{qo} 为 x_i 的对立数; l_{bi} 和 u_{bi} 分别为下边界和上边界。

3) 哈里斯鹰围攻策略

哈里斯鹰算法^[16]通过模仿哈里斯鹰捕食机制进行寻优, 其围攻策略是捕食过程中的重要机制, 使算法具有强大的全局搜索能力。

$$\sigma = \left[\frac{\Gamma(1+\lambda) \sin \frac{\pi\lambda}{2}}{2^{\frac{\lambda-1}{2}} \Gamma\left(\frac{1+\lambda}{2}\right) \lambda} \right]^{\frac{1}{\lambda}} \quad (23)$$

$$L_F(D) = \frac{0.01u\sigma}{|v|^{\frac{1}{\lambda}}} \quad (24)$$

式中: σ 为步长尺度参数; $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数; λ 为 Levy 分布参数; $L_F(D)$ 为 Levy 步长函数; u 和 v 为 (0, 1) 之间的随机数。

4) 自适应 t 分布扰动

自适应 t 分布扰动的变异幅度根据迭代次数或适应度动态调整, 从而在优化初期进行广泛搜索, 在优化后期进行精细搜索, 平衡全局搜索和局部搜索的能力。

$$X_{\text{new}} = X_{\text{cur}} + \psi X_{\text{cur}} t_{\text{dof}} \quad (25)$$

式中: X_{new} 为更新后的解; X_{cur} 为当前解; ψ 为缩放因子; t_{dof} 为自由度是 d_{of} 的 t 分布随机数。

3.2 改进性能测试

为了验证改进后算法的性能, 采用测试函数 F1-Bent cigar、F2-Griewank、F3-Composition function 2 ($N=4$)、F4-Rotated hybrid 进行测试。其中, F1 为单峰函数, F2 为多峰函数, F3 为复合函数, F4 为混合复合函数。将所提 IDBO 与 DBO、鲸鱼优化算法 (whale optimization algorithm, WOA)、哈里斯鹰优化算法 (Harris hawks optimization, HHO) 和灰狼优化算法 (grey wolf optimizer, GWO) 进行对比。初始种群设置为 30, 迭代次数为 500。不同算法的收敛曲线如图 2 所示。

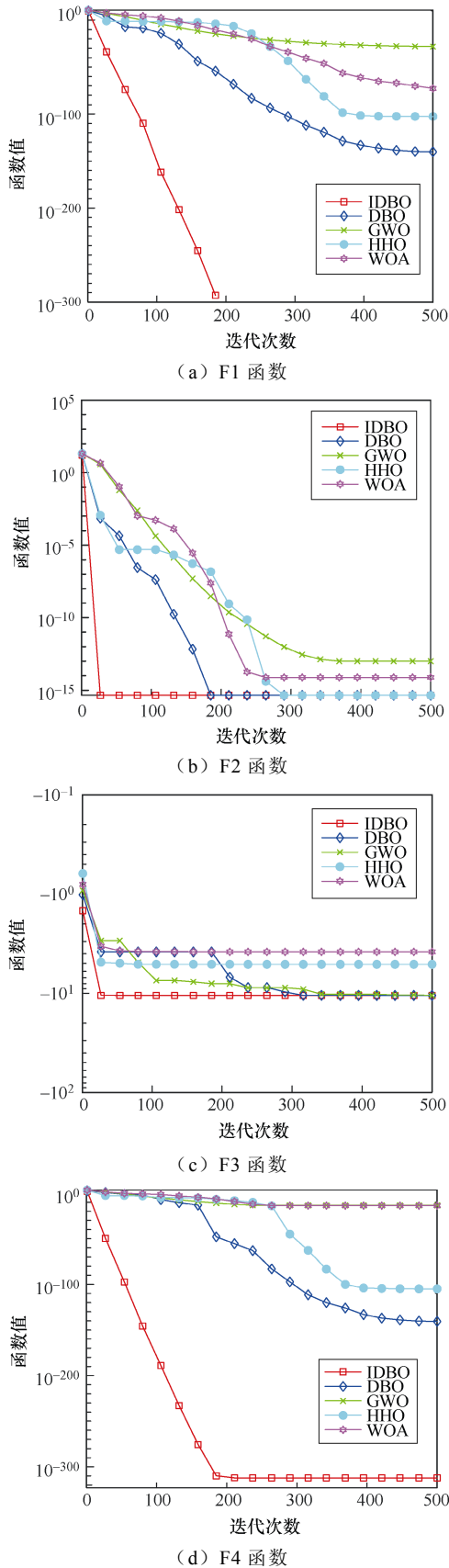


图2 不同算法的收敛曲线

由图2可知,在应对不同类型的函数时, IDBO比 DBO 的收敛速度快, 寻优能力强, 且 IDBO 优于其他算法, 证明 IDBO 具有更强的寻优能力。

3.3 模型求解

本文的微电网双层优化模型综合考虑供给侧和需求侧的利益, 通过 IDBO 求解得到设备配置和负荷调整的最优解。

上层优化的目标是最大化微电网的净收益, 综合考虑各分布式电源和储能设备的投资成本和维护成本。上层首先初始化设备配置, 计算各类设备的投资成本和维护成本, 然后将当前设备配置传递给下层模型; 下层接收设备配置方案后, 计算需求响应前的购电量和售电量, 通过需求响应策略调整可削减负荷和可转移负荷, 计算用电舒适度和用能舒适度; 下层优化完成后, 将舒适度指标返回上层, 上层利用指标计算综合适应度值, 并使用 IDBO 调整设备配置, 通过迭代更新设备数量, 获得最优配置方案。双层优化模型求解流程如图3所示。

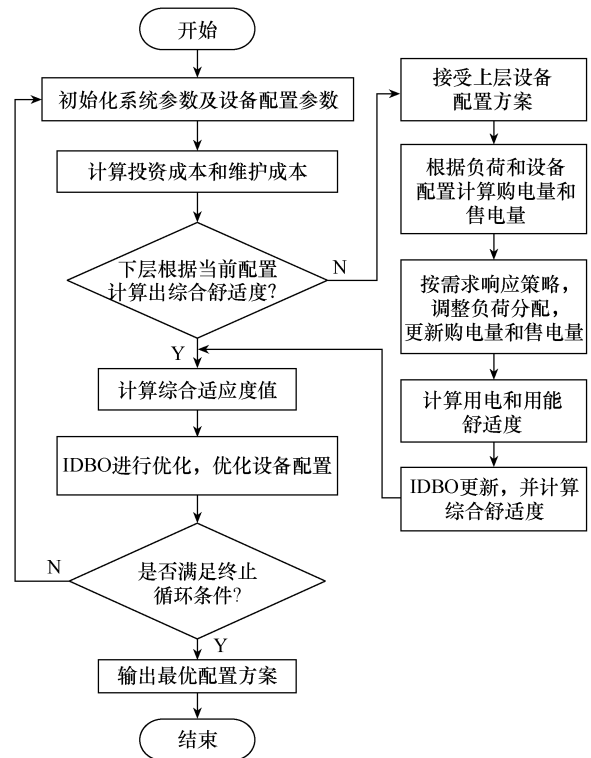


图3 双层优化模型求解流程

4 算例仿真分析

4.1 基础参数设定

以某海岛一天 24h 为一个调度周期, 在一天中, 光照辐射强度、风速大小和波浪高度的变化可

按照一定比例折算成变化因子,再根据变化因子可以得到各机组的出力曲线。光照、风力和波浪能变化曲线如图 4 所示,各微电源参数^[17]见表 1。由图 4 可知,风力输出功率受风速影响较大,通常在早晨和下午风力较强,而傍晚风力较弱;波浪能受风力影响,但与风力发电规律存在一定差异;光伏发电依赖太阳辐射,主要在白天有输出,在中午达到峰值,夜间无输出;光伏、风力和波浪能三者之间形成互补关系,光伏发电在白天提供主要电力,风力发电在全天提供补充,而波浪能则提供稳定的基荷电力。

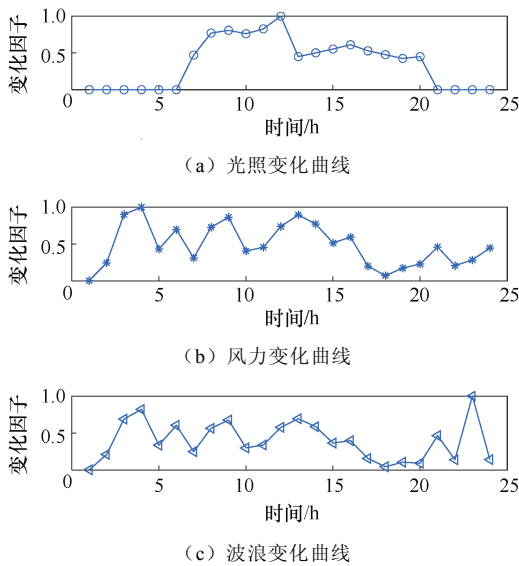


图 4 光照、风力和波浪变化曲线

表 1 各微电源参数

微电源	容量/kW	投资成本/(元/kW)	维护成本/(元/kW)
PV	500	3 500	0.009 6
WT	400	8 000	0.045 0
WEG	400	4 500	0.087 5
DG	300	1 500	0.021 1
BT	600	9 500	0.045 0

4.2 运行结果分析

上层运行结果如图 5 所示,下层运行结果如图 6 所示。由图 5 和图 6 可知,在凌晨至早晨(00:00—06:00),光伏几乎不发电,这段时间购电功率较高,表明微电网需要从主网购电来满足负荷需求;基础负荷较稳定,可削减负荷和可转移负荷在此时段内较少,表明居民用电需求较低;蓄电池在 02:00 放电,随后进行充电,平衡系统负荷。

在早晨至中午(06:00—12:00),光伏发电量增

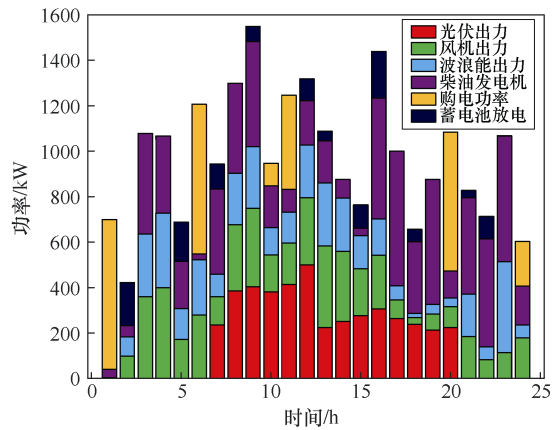


图 5 上层运行结果

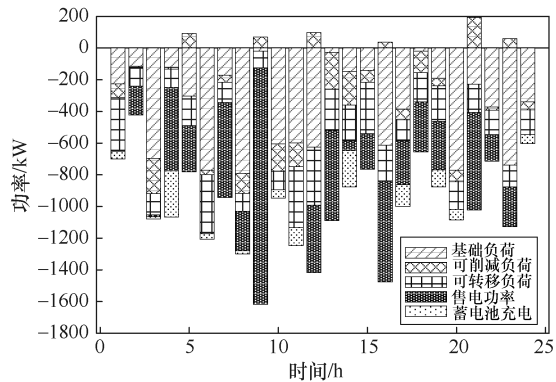


图 6 下层运行结果

加,并在中午达到高峰;柴油发电机的出力减少;购电功率在 06:00—08:00 较多,随后减少,表明光伏发电开始满足部分负荷需求。需求响应后,可削减负荷和可转移负荷的负荷曲线变平滑,负荷波动减少;售电功率在中午前后有所增加,微电网将多余电力售给主网。蓄电池在 10:00 前后放电以平衡负荷。

中午至傍晚(12:00—18:00),光伏发电量在中午达到高峰后逐渐减少;基础负荷在下午达到高峰,可削减负荷和可转移负荷在需求响应后有所减少;蓄电池在 15:00 前后进行充电,平衡系统负荷。

傍晚至夜间(18:00—24:00),光伏发电在傍晚几乎为零;可削减负荷和可转移负荷在需求响应后显著减少,特别是在 20:00—22:00;蓄电池在夜间放电,以平衡负荷。

从运行结果分析来看,上层调度充分利用了可再生能源,减少了对柴油发电机和主网的依赖,提高了可再生能源的利用率;下层通过合理的负荷削减和转移,平滑了负荷曲线,减少了尖峰负荷,从而减轻了上层发电设备的压力;蓄电池在不同时间

段内的充放电操作有效地平衡了系统负荷。以上结果验证了模型的准确性和有效性。

4.3 需求响应结果分析

需求响应前后的购电功率变化、可转移负荷变化、可削减负荷变化分别如图7~图9所示。

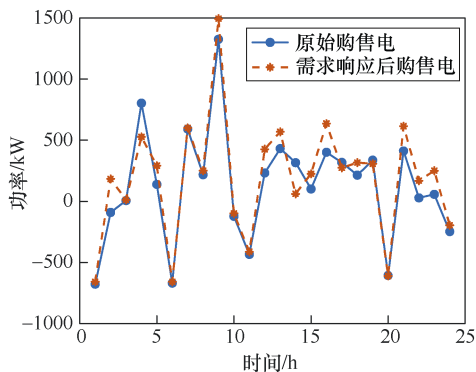


图7 需求响应前后购电功率变化

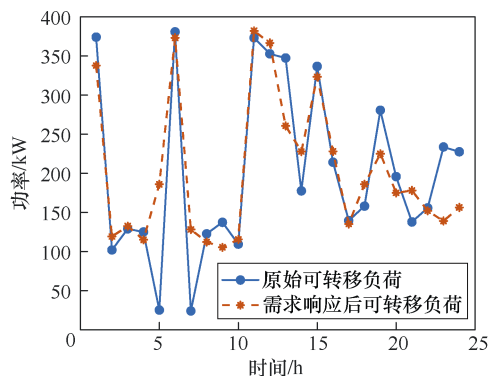


图8 需求响应前后可转移负荷变化

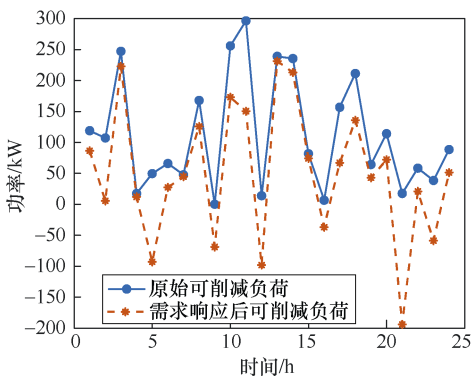


图9 需求响应前后可削减负荷变化

由图7可知,需求响应后,系统在负荷高峰期减少了购电需求,并在负荷低谷期增加了售电量,实现了系统的供需平衡。

由图8可知,可转移负荷的波动明显减小,负荷曲线变得更为平滑。通过需求响应,将高峰期的部分负荷转移到低谷期,从而减轻了高峰期的负荷

压力,提高了系统运行的平稳性。

由图9可知,可削减负荷在大部分时间有所减少,特别是在负荷高峰期,从而减轻了系统压力。

由上述结果可知,通过需求响应,微电网的购电功率、可转移负荷和可削减负荷得到了显著优化。IDBO和DBO的优化结果对比见表2。

表2 IDBO和DBO优化结果对比

参数	IDBO	DBO
投资成本/万元	1 290	1 465
维护成本/千元	91.13	95.93
用电舒适度	0.94	0.88
用能舒适度	0.60	0.51
综合舒适度	0.77	0.70

由表2可知,与DBO的优化结果相比,IDBO求解得到的投资成本减少了约11.95%,维护成本减少了约5%,用电舒适度提高了约6.82%,用能舒适度提高了约17.65%,综合舒适度提高了10%。对比结果表明,利用IDBO求解得到的优化结果可以在保持设备高效运行的同时,使维护方面的经济效益更高,并且能够在整体上更好地平衡经济效益和用户体验,提升微电网的综合运行效果。

5 结论

针对微电网的优化运行问题,本文综合考虑负荷侧的需求响应,建立了双层优化模型;通过加权法和法将多目标问题转化为单目标问题,并采用所提IDBO求解。算例仿真与分析表明:

1) 对于传统的微电网调度问题,通过引入需求响应可以有效降低微电网的运营成本;用户侧负荷可以作为灵活资源参与调度优化,减轻调度压力,提升系统运行的灵活性。

2) 通过引入Sinusoidal映射、准反向学习、哈里斯鹰的围攻策略和自适应t分布扰动,有效解决了标准蜣螂优化算法收敛慢、容易陷入局部最优的问题,平衡了各个种群间的搜索能力。

3) 对需求侧的求解主要考虑了用户的舒适度,未考虑用户的经济收益,未来可以结合用户的经济收益做进一步研究。

参考文献

[1] 张萍,陆霞,孟庆鹤.基于多策略麻雀搜索算法的微电网容量优化配置[J].电气技术,2023,24(1):1-9.

(下转第29页)