

考虑柔性负荷和碳交易机制的微电网运行优化

刘立衡¹,王金平¹,华 山²

(1. 南京工程学院 能源与动力工程学院,江苏 南京 211167; 2. 国家能源集团科学技术研究院有限公司,江苏 南京 210023)

摘要:针对某微电网运行模型,建立了考虑运行成本、排放成本、柔性负荷成本和碳交易机制成本的多目标函数。通过不同目标的组合方式,设计了微电网运行的4种方案,仿真优化时,采用多种群策略对传统引力搜索算法进行了改进。结果表明:多种群引力搜索算法的优化结果明显优于遗传算法、粒子群算法和狼群算法等经典方法;对4种方案的优化结果的比较也说明,在微电网系统中引入柔性负荷和碳交易机制可有效提升微电网运行的经济性。

关键词:微电网;调度优化;柔性负荷;碳交易;多种群引力搜索算法

中图分类号:TK221 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2025.05.014

[引用本文格式]刘立衡,王金平,华 山.考虑柔性负荷和碳交易机制的微电网运行优化[J].热能动力工程,2025,40(5):121-130. LIU Liheng, WANG Jinping, HUA Shan. Optimization of microgrid operation considering flexible loads and carbon trading mechanism [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 40(5): 121-130.

Optimization of Microgrid Operation Considering Flexible Loads and Carbon Trading Mechanism

LIU Liheng¹, WANG Jinping¹, HUA Shan²

(1. School of Energy and Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing, China, Post Code: 211167;
2. National Energy Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing, China, Post Code: 210023)

Abstract: Aiming at the operation model of a microgrid, a multi-objective function considering operating costs, emission costs, flexible load costs, and carbon trading mechanism costs was established. Four schemes for microgrid operation were designed by combination method of different objectives. During simulation optimization, multiple swarm strategies were used to improve the traditional gravity search algorithm. The results show that the optimization results of the multiple swarm gravity search algorithm were significantly better than classical methods such as genetic algorithm, particle swarm algorithm, and wolf pack algorithm. In addition, the comparison of optimization results for the four schemes also demonstrates that introducing flexible loads and carbon trading mechanisms in microgrid systems can effectively improve the economic efficiency of microgrid operation.

Key words: microgrid, scheduling optimization, flexible load, carbon trading, multiple group gravity search algorithms

引言

发电行业的发展趋势是尽力挖掘新能源发电的潜力,微电网产业将成为我国以新能源为主体的新

型电力系统的重要组成部分。在当前双碳目标下,微电网的优化运行对提高运行的经济性、降低碳排放、减少污染具有重要意义。

针对微电网优化运行,很多学者设计了不同的优化策略。文献[1]建立了考虑风力发电机、光伏、

收稿日期:2024-09-27; 修订日期:2025-02-04

基金项目:江苏省产学研合作项目(BY2022863)

Fund-supported Project: Industry-University-Research Cooperation Project of Jiangsu Province (BY2022863)

作者简介:刘立衡(1978-),男,南京工程学院高级工程师。

柴油机、微型燃气轮机、燃料电池和蓄电池的独立微电网模型,并采用基于分组思想的混合天牛群算法对其进行调度优化,所得结果说明了算法的有效性。文献[2]建立了以发电成本和环境成本最小为目标的微电网运行优化模型,并采用了多智能体混沌粒子群优化算法对所提出模型进行求解,通过优化各分布式电源的发电功率,提高储能单元的使用效率,增加微电网的经济性。文献[3]针对含风、光、气和电动汽车的微电网建立了考虑经济性和环保性的优化模型,采用自适应遗传算法对优化目标进行求解,仿真结果表明,优化模型在不同运行方式下能实现经济环保运行。文献[4]建立了考虑经济成本和环境成本的微电网运行模型,通过引入精英防线学习策略和最劣粒子排斥法对粒子群算法进行改进,并应用于模型优化,所得结果验证了模型及算法的有效性。文献[5]采用改进粒子群算法对包含冷热电联供系统和储能的微电网运行模型进行调度优化,所得结果确保了微电网系统的稳定性和实用性。文献[6]提出了区域能源微电网的“源-网-荷-储”多能互补的系统构架,建立了日前动态经济调度多目标优化的调度模型,通过线性加权将多目标问题转化为单目标问题,并采用 CPLEX 求解器求解,所得结果验证了气网和储能的加入对降低运行成本的有效性。文献[7]构建了含燃气轮机、余热锅炉和制冷机等机组设备的微电网系统,以系统燃料成本、环境治理成本和运行维护成本等为目标进行优化,采用改进的动态惯性权重粒子群算法进行求解,所得结果验证了所建模型和算法的有效性。

近年来,柔性负荷调度逐渐成为吸纳新能源发电功率及提高微电网运行经济性的有效手段。文献[8]针对微电网优化运行,建立了考虑柔性负荷的需求侧响应模型,并采用粒子群算法求解,仿真结果表明柔性负荷在微电网优化调度中能达到更好的“削峰填谷”的效果。文献[9]对多能互补微电网进行建模,加入柔性负荷调节,然后以微电网经济调度成本最小为目标,采用蚁狮算法进行优化,所得结果证明了调度策略的合理性。文献[10]在能源系统运行优化中引入柔性负荷调度技术,通过调整负荷曲线来提升风电消纳能力和降低综合运行成本。文献[11]在微电网运行过程中设计了一种考虑柔性负荷的低碳调度模型,通过仿真优化,对比不同场景下的调度结果,达到降低运行成本、减少碳排放的目的。

此外,随着碳排放量的持续增长,微电网运行优化调度作为运行决策的重要环节,必然也会收到碳交易机制的影响^[11]。文献[12]提出了一种阶梯式碳交易机制下计及电-气-热综合能源需求响应的优化运行模型,并通过设计的相关场景对所建模型进行验证,说明了碳交易和经济性相关的因素。文献[13]设计了考虑绿证-碳联合交易与需求响应综合能源系统经济运行策略,并设计了相应的目标,仿真结果说明绿证-碳联合交易与需求响应机制优越的低碳经济性。

综上所述,本文首先建立了考虑风电、光伏、柴油机、燃气轮机和储能电池等分布式电源的微电网运行经济性模型。然后,设立了4种方案的优化目标:方案1不考虑柔性负荷和碳交易的微电网经济运行目标;方案2考虑碳交易不考虑柔性负荷的目标;方案3考虑柔性负荷不考虑碳交易的目标;方案4考虑柔性负荷和碳交易的目标。最后,设计了多种群引力搜索算法(MGSA),对微电网进行调度优化,并从经济性等方面对不同方案下的仿真结果进行分析比较。

1 微电网结构及优化数学模型

1.1 微电网结构

微电网是一种小型分布式能源系统,区域微电网结构如图1所示。该微电网系统由风电(WT)、光伏(PV)、柴油发电机(DE)、燃气轮机(MT)和储能电池(BAT)组成,并与外电网(GD)连接,共同满足所在区域的负荷要求。

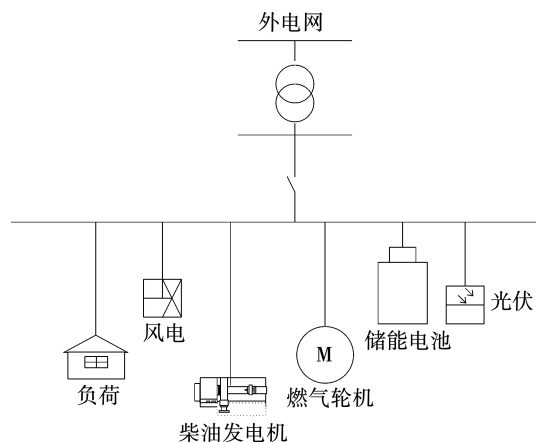


图1 区域微电网结构

Fig. 1 Regional microgrid structure

1.2 优化数学模型

微电网运行优化的数学模型由微电网运行成本、污染物排放成本、柔性负荷转移成本和碳交易成本组成。

1.2.1 运行成本

微电网运行成本 F_1 主要由燃料成本、维护成本和与外电网的交互成本 3 部分组成^[14-15]。

$$F_1 = C_{\text{fuel}} + C_{\text{main}} + C_{\text{exc}} \quad (1)$$

式中: C_{fuel} —微电网的燃料成本; C_{main} —微电网的维护成本; C_{exc} —微电网与外电网的电力交互成本。

$$C_{\text{fuel}} = C_{\text{fDE}} + C_{\text{fMT}} \quad (2)$$

$$C_{\text{fDE}} = \sum_{t=1}^{24} (\alpha \cdot P_{\text{DE}}^2(t) + \beta \cdot P_{\text{DE}}(t) + \gamma) \quad (3)$$

$$C_{\text{fMT}} = \sum_{t=1}^{24} \left(\frac{c_m \cdot P_{\text{MT}}(t)}{\eta \cdot \text{LHV}} \right) \quad (4)$$

其中,微电网的燃料成本主要由柴油发电机燃料成本 C_{fDE} 和微型燃气轮机燃料成本 C_{fMT} 构成。 $P_{\text{DE}}(t)$ 和 $P_{\text{MT}}(t)$ 分别为柴油发电机和微型燃气轮机在一天中第 t h 的发电功率; α, β, γ 为柴油发电机的燃料成本系数, $\alpha = 0.0009, \beta = 0.1, \gamma = 8$; c_m 为天然气价, 取值为 2.8 元/m^3 , LHV 为低热值, 取值为 $9.7 \text{ kW} \cdot \text{h/m}^3$; η 为燃气轮机效率, 取值为 0.3 。

$$C_{\text{main}} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{k_1=1}^m C_{k_1} \cdot P_{k_1}(t) + \sum_{t=1}^{24} \sum_{k_2=1}^n C_{k_2} |P_{k_2}(t)| \quad (5)$$

式中: C_{k_1} —除蓄电池外的分布式电源单位发电量运行维护成本; C_{k_2} —蓄电池单位电量运行维护成本; $P_{k_1}(t), P_{k_2}(t)$ —在 t 时刻除蓄电池外的分布式电源和蓄电池的输出功率; m, n —分布式电源和蓄电池的数量。

$$C_{\text{exc}} = \sum_{t=1}^{24} \lambda \cdot C(t) \cdot P_{\text{exc}}(t) \quad (6)$$

式中: $P_{\text{exc}}(t)$ — t 时段刻电网与外网的交互功率; $C(t)$ —电价, λ 为电价; $\lambda=1$ 时为购电价格, 为 -1 时为售电价格。

1.2.2 排放成本

排放成本主要包含两部分: 碳排放和污染物排放, 污染物排放主要为 NO_x 和 SO_2 。

$$F_2 = F_{\text{CO}_2} + F_{\text{NO}_x} + F_{\text{SO}_2} \quad (7)$$

$$F_{\text{CO}_2} = \sum_{i=1}^k S_{\text{CO}_2} \lambda_i P_i \quad (8)$$

$$F_{\text{NO}_x} = \sum_{i=1}^k S_{\text{NO}_x} \mu_i P_i \quad (9)$$

$$F_{\text{SO}_2} = \sum_{i=1}^k S_{\text{SO}_2} \nu_i P_i \quad (10)$$

式中: F_2 —排放总成本; $F_{\text{CO}_2}, F_{\text{NO}_x}, F_{\text{SO}_2}$ —二氧化碳、氮氧化物和二氧化硫的排放成本; $S_{\text{CO}_2}, S_{\text{NO}_x}, S_{\text{SO}_2}$ —二氧化碳、氮氧化物和二氧化硫的排放单价; λ_i, μ_i, ν_i —第 i 个分布式电源或外电网二氧化碳、氮氧化物和二氧化硫的排放系数; P_i — i 个分布式电源发电功率。

1.2.3 柔性负荷成本

柔性负荷包括可平移负荷、可转移负荷以及可消减负荷^[16-18]。本文以可转移负荷和可平移负荷为主。通过可转移负荷, 使各时刻负荷在一定范围内进行调整。

$$\sum_{t=1}^{24} L_{\text{trans}}(t) = 0 \quad (11)$$

式中: $L_{\text{trans}}(t)$ —负荷调整后各时刻的可转移负荷。

$$F_{\text{trans}} = S_{\text{trans}} \sum_{t=1}^{24} |L_{\text{trans}}(t)| \quad (12)$$

式中: F_{trans} —24 h 内总的负荷转移成本; S_{trans} —单位功率负荷可转移补偿价格。

可平移负荷在调度过程中应遵循“整段平移, 不可中断”的原则, 则每一时间段内的可平移负荷成本 F_{trans} 可表示为:

$$F_{\text{shift}} = S_{\text{shift}} \sum_{t=t_s}^{t_e} \theta \cdot L_{\text{shift}}(t) \quad (13)$$

式中: S_{shift} —可平移负荷单位成本; $L_{\text{shift}}(t)$ —可平移负荷; t_s —可平移负荷的起始时间; t_e —可平移负荷的结束时间, 负荷调整后, 若有可转移负荷变化, θ 为 1 , 否则为 0 。

柔性负荷调整成本 F_3 可表示为:

$$F_3 = F_{\text{trans}} + F_{\text{shift}} \quad (14)$$

1.2.4 碳交易成本

碳交易机制成本是根据微电网系统碳排放量是否超出碳配额量来进行计算的^[18]。微电网系统中含有碳排放的发电单元为燃气轮机、柴油机以及外电网, 其碳交易成本模型可表示为:

$$Q_{\text{quota}} = \sum_{t=1}^{24} (E_{\text{QMT}} \cdot P_{\text{MT}}(t) + E_{\text{QDE}} \cdot P_{\text{DE}}(t) + E_{\text{QEX}} \cdot P_{\text{exc}}(t)) \quad (15)$$

$$Q_{\text{emis}} = \sum_{t=1}^{24} (E_{\text{MTE}} \cdot P_{\text{MT}}(t) + E_{\text{DEE}} \cdot P_{\text{DE}}(t) + E_{\text{EXE}} \cdot P_{\text{exc}}(t)) \quad (16)$$

$$F_4 = \nu_{\text{quota}} (Q_{\text{emis}} - Q_{\text{quota}}) \quad (17)$$

其中,柴油机和燃气轮机单位负荷碳排放量分别为 E_{DEE} 和 E_{MTE} ,柴油机碳配额量为 E_{QDE} ,燃气轮机碳配额量为 E_{QMT} ,购售电单位负荷碳排放量为 E_{EXE} ,碳配额量为 E_{QEX} ,总碳配额量为 Q_{quota} ,总碳排放为 Q_{emis} ,碳配额系数为 ν_{quota} ,碳配额成本为 F_4 。

本文针对上述目标共设计了 4 种方案:方案 1 考虑运行成本和排放成本;方案 2 考虑运行成本、排放成本和碳交易成本;方案 3 考虑运行成本、排放成本和柔性负荷成本;方案 4 考虑运行成本、排放成本、碳交易成本和柔性负荷成本。由于 F_1, F_2, F_3, F_4 具有相同的量纲,最终目标函数可表示为相应部分成本之和:

$$\begin{aligned} \text{obj}_1 &= F_1 + F_2 \\ \text{obj}_2 &= F_1 + F_2 + F_4 \\ \text{obj}_3 &= F_1 + F_2 + F_3 \\ \text{obj}_4 &= F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \end{aligned} \quad (18)$$

式中: $\text{obj}_1 \sim \text{obj}_4$ —对应 4 种方案的优化目标。

1.2.5 约束条件

(1) 平衡约束

各时刻下各分布式电源与外网功率之和应该与当前时刻负荷相等,可表示为:

$$\sum_{i=1}^z P_i(t) = L_L(t) \quad (19)$$

式中: z —分布式电源的数量; $P_i(t)$ —第 i 个分布式电源 t 时刻的发电功率; $L_L(t)$ — t 时刻负荷。

(2) 各分布式电源发电功率上下限约束

各分布式电源在任一时刻发电功率应在允许范围之内,表示为:

$$P_i^{\min} \leq P_i(t) \leq P_i^{\max} \quad (20)$$

式中: $P_i^{\min}, P_i^{\max}$ —第 i 个分布式电源发电功率的下限和上限。

(3) 蓄电池充放电约束^[19-20]

每个时段内蓄电池充放电的约束需要满足如下公式:

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t-1) + \mu \Delta \text{SOC}(t) \quad (21)$$

$$\Delta \text{SOC}(t) = \begin{cases} P_{\text{bat}}(t) \Delta t / (\eta_c D) \\ P_{\text{bat}}(t) \Delta t \eta_c / D \end{cases} \quad (22)$$

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC}(t) \leq \text{SOC}_{\max} \quad (23)$$

$$P_{\text{cd}}^{\min} \leq P_{\text{bat}}(t) \leq P_{\text{cd}}^{\max} \quad (24)$$

$$\text{SOC}(0) = \text{SOC}(T) \quad (25)$$

式中: $\text{SOC}(t)$ —当前时段蓄电池的荷电状态; $\text{SOC}(t-1)$ —蓄电池上一时刻的荷电状态; $\text{SOC}(0)$ —初始时段的荷电状态; $\text{SOC}(T)$ —一天最终荷电状态; $P_{\text{bat}}(t)$ —当前时段蓄电池的充电或者放电功率; $P_{\text{cd}}^{\max}, P_{\text{cd}}^{\min}$ —各时段电池的充放电功率上限与下限; D —电池容量; η_c —充电效率; η_d —放电效率。

(4) 各时刻可转移负荷上下限约束

$$(1 - \delta) L_L(t) \leq L_L^{\text{new}}(t) \leq (1 + \delta) L_L(t) \quad (26)$$

式中: δ —可转移负荷占比; $L_L^{\text{new}}(t)$ —转移后负荷。

(5) 柔性负荷调整后的平衡约束

$$\sum_{t=1}^{24} L_L(t) = \sum_{t=1}^{24} L_L^{\text{new}}(t) \quad (27)$$

柔性负荷调整后, 24 h 内总负荷应保持不变。

(6) 与外电网的功率交互约束

为保证电网的安全运行,一般与外网功率交互需满足上下限约束,表示为:

$$P_{\text{exc}}^{\min} \leq P_{\text{exc}}(t) \leq P_{\text{exc}}^{\max} \quad (28)$$

式中: $P_{\text{exc}}^{\min}$ —交互功率下限; $P_{\text{exc}}^{\max}$ —交互功率上限。

2 多种群引力优化算法

引力搜索算法 (GSA) 的思想基于万有引力定律,通过群体中个体之间的万有引力引导优化搜索的过程^[21]。GSA 算法从可行域随机产生一组初始解,并把该组数据看成有一定质量的质点集,每个质点的质量越大,对其他质点的吸引力越强。每次迭代过程中,不断更新合力、加速度、速度和位置等信息。总体而言, GSA 算法参数设置简便,实现容易,搜索效率较高,但也存在易于陷入局部最优的问题。为了进一步提高 GSA 算法的求解质量,本文设计了多种群引力搜索算法 (MGSA),在不同种群中设计

不同的计算参数,算法步骤如下:

第一步:随机生成 H 个种群,第 i 个种群群体规模为 Num_i ,最大迭代次数为 maxGen_i ,每个种群随机初始化个体位置值,每个个体维度为 w ,对应带求解问题的自变量个数,初始速度为零,其位置信息可表示为:

$$X_{ik}(g) = (x_{ik}^1(g), x_{ik}^2(g), \dots, x_{ik}^w(g)) \quad (29)$$

式中: i —第 i 个种群; k —该种群中第 k 个个体; g —当前迭代次数;

第二步:根据目标函数计算每个种群中的个体适应度值 $f_{ik}(g)$ 及惯性质量 $M_{ik}(g)$:

$$m_{ik}(g) = \frac{f_{ik}(g) - \text{worst}_{ik}(g)}{\text{best}_{ik}(g) - \text{worst}_{ik}(g)}$$

$$M_{ik}(g) = \frac{m_{ik}(g)}{\sum_{j=1}^{\text{Num}_i} m_{ik}(g)} \quad (30)$$

式中: $\text{best}_{ik}(g)$ 、 $\text{worst}_{ik}(g)$ —最佳和最差适应度值; Num_i —种群中个体数量。

第三步:计算每个种群中个体所受的合力,加速度和速度,并根据当前速度更新其位置 $X_{ik}(g)$ 。

其中,在第 i 个种群中,在第 g 次迭代时,质点 k 作用与质点 j 在第 l 维的作用力可表示为:

$$N_{ijk}^l(g) = G_i(g) \frac{M_{ij}(g) M_{ik}(g)}{R_{ijk}(g) + \varepsilon} (x_{ij}^l(g) - x_{ik}^l(g)) \quad (31)$$

式中: $N_{ijk}^l(g)$ —质点 k 与质点 j 在 l 维的作用力; $M_{ij}(g)$ —第 i 个种群中质点 j 在第 g 次迭代过程中的质量; $M_{ik}(g)$ —质点 k 的质量,其数值都可由式(29)~式(30)得出; $G_i(g)$ —万有引力常量; $R_{ijk}(g)$ —质点 j 和质点 k 的欧几里得距离; ε —小常数,防止分母为零。

求得 $N_{ijk}^l(g)$ 后,质点 k 在 l 维所受合力 $N_{ik}^l(g)$ 可表示为:

$$N_{ik}^l(g) = \sum_{j=1, j \neq k}^{\text{Num}_i} \text{rand}_j N_{ijk}^l(g) \quad (32)$$

式中: rand_j —第 j 个随机数。

求得合力后,质点 k 在第 l 维度的加速度 $a_{ik}^l(g)$ 可表示为:

$$a_{ik}^l(g) = \frac{N_{ik}^l(g)}{M_{ik}(g)} \quad (33)$$

得到加速度 $a_{ik}^l(g)$ 后,质点 k 在第 l 维 $v_{ik}^l(g)$ 的速度可表示为:

$$v_{ik}^l(g) = \text{rand}_k v_{ik}^l(g-1) + a_{ik}^l(g) \quad (34)$$

之后,第 i 个种群中第 k 个个体第 l 维的位置 $x_{ik}^l(g)$ 可按式(35)更新:

$$x_{ik}^l(g) = x_{ik}^l(g-1) + v_{ik}^l(g) \quad (35)$$

依次更新 w 维变量。

第四步:返回第二步,直到每个种群迭代达到最大迭代次数 maxGen_i ;

第五步:输出 H 个种群中适应度最佳个体。

MGCSA 算法流程如图2所示。

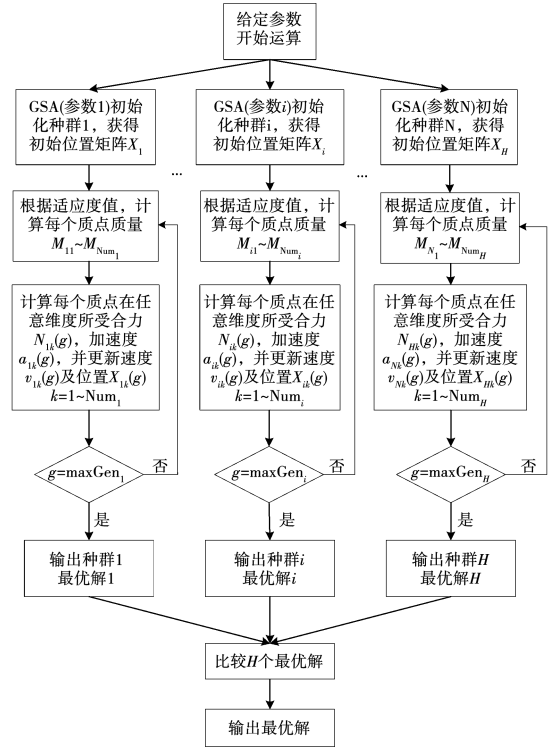


图2 MGCSA 算法流程

Fig.2 MGCSA algorithm process

3 算例分析

以某地区微电网系统为例,其24 h内的负荷需求风电及光伏发电功率曲线如图3所示。从图3可看出,光伏发电功率在12:00附近最大,而风电功率整体较为均衡,用电高峰集中在12:00和20:00附近。各分布式电源发电功率上下限和维护参数如表1所示。

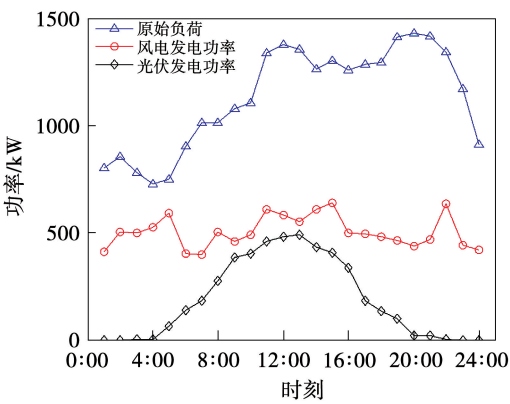


图3 原始负荷、风机及光伏各时刻发电功率

Fig.3 Power output by original load, wind turbine and photovoltaic power generation in each moment

表1 分布式电源性能参数

Tab.1 Performance parameters of distributed power sources

序号	发电单元 类型	单位电量维护		
		上限/kW	下限/kW	成本/元· (kW·h) ⁻¹
1	风机	700	0	0.055
2	光伏	500	0	0.010
3	燃气轮机	400	0	0.140
4	柴油机	400	0	0.300
5	蓄电池	100	-100	0.050
6	外电网	300	-300	-

注：“-”表示无数据。

微电网和外网购售电价格如表2所示,分布式电源污染物排放系数如表3所示,其中CO₂处理成本为0.22元/kg,SO₂处理成本为15.01元/kg,NO_x处理成本为63元/kg。负荷平移及负荷转移成本均为0.05元/(kW·h),柴油机、微型燃气轮机和外网交互电力单位负荷碳配额为0.7kg/(kW·h),蓄电池蓄电状态SOC参数范围为[0.2,1],初始状态SOC

为0.4,充放电效率均为0.95。仿真过程中,针对各分布式电源在各时刻上下限范围内进行个体操作运算;针对蓄电池状态则随着时间推进动态更新状态值,调整发电功率的上下限,以最终状态与初始状态之差绝对值的罚函数保证最终状态;对于各时刻的平衡约束,均采用罚函数进行处理。

表2 微电网和外网购售电价格表

Tab.2 Electricity exchange price between microgrid and external grid

负荷	时段	价格/元/(kW·h) ⁻¹	
		购电	售电
谷	0:00-7:00,23:00-24:00	0.4	0.55
平	8:00-10:00,14:00-18:00	0.6	0.55
峰	11:00-14:00,19:00-22:00	0.9	0.55

表3 分布式电源污染物排放系数

Tab.3 Distributed power source pollutant emission coefficient

分布式电源 类型	CO ₂ 排放系数/ kg·(kW·h) ⁻¹	污染气体排放系数/g·(kW·h) ⁻¹	
		SO ₂	NO _x
微型燃气轮机	0.184	0.000 928	0.619
柴油机	0.232	0.464	4.33
外电网	0.889	1.8	1.6

不同方案下得到微电网运行调度优化所得结果:

(1) 方案1

分别采用多种群引力算法 MGGSA、遗传算法 (GA)、粒子群算法 (PSO) 及狼群算法 (GWO) 对方案1进行仿真,种群规模为60,MGGSA迭代次数为5 000,GA、PSO和GWO迭代次数为8 000,分别运行10次,方案1不同算法仿真结果如表4所示。

表4 方案1不同算法仿真结果

Tab.4 Simulation results of different algorithms in scheme 1

算法	运行成本/元	环境成本/元	总成本/元	平衡约束绝对值	电池状态约束绝对值
MGGSA	7 889.03	3 042.98	10 932.01	2.63×10^{-9}	7.12×10^{-13}
GA	8 998.94	2 643.23	11 651.75	4.69	0.19×10^{-3}
PSO	9 334.79	2 485.31	11 820.09	60.75	0.78×10^{-3}
GWO	9 114.93	2 689.54	11 804.47	61.65	0.38×10^{-3}

由表 4 可看出,MGGSA 算法在约束满足以及最终结果上最优,其他 3 种算法中 GA 算法在约束满足及最终结果皆优于其他两种。MGGSA 和 GA 优化后各微源出力结果如图 4、图 5 所示。

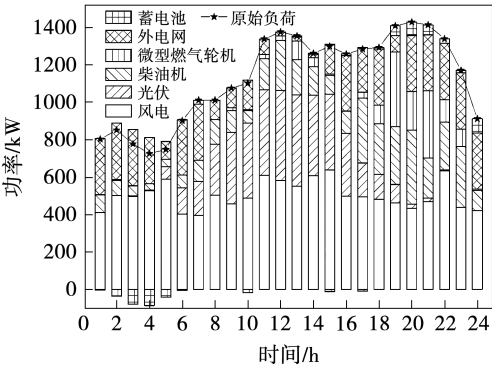


图 4 MGGSA 优化后各分布式电源发电功率结果
Fig. 4 Power output of each distributed power source obtained by MGGSA optimization algorithm

由表 4 及图 4、图 5 可知,MGGSA 算法所得结果运行成本低于 GA,环境成本高于 GA,整体成本低于 GA。这是因为在图 4 中,外电网购入负荷增加,柴油机和燃气轮机发电功率减少,从而造成运行

成本减少,环境成本增加。此外,图 4 中由于蓄电池在0:00 ~ 5:00 谷时充电,19:00 ~ 22:00 峰时放电更为充分,从而也对总成本的降低起到了一定作用。

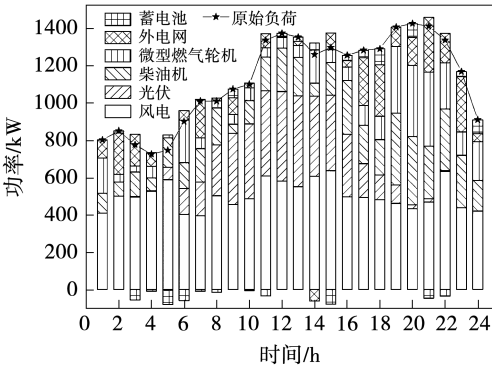


图 5 GA 优化后各分布式电源发电功率结果
Fig. 5 Power output of each distributed power source obtained by GA optimization algorithm

由于 MGGSA 算法在优化过程中明显优于其他几种方法,因此,在后续方案中,均采用该算法进行优化。采用 MGGSA 算法,不同方案所得优化结果如表 5 所示。

表 5 MGGSA 算法下不同方案所得优化结果

Tab. 5 Optimization results of MGGSA algorithm in different schemes

方案	运行成本/ 元	环境成本/ 元	柔性负荷 成本/元	碳交易 成本/元	总成本/ 元	用户满意 度 ^[15] /%	各时刻负荷 平衡约束 绝对值之和	电池最终状态 约束绝对值	引入柔性负荷 前后平衡约束
1	7 889.03	3 042.98	—	—	10 932.01	100	2.63×10^{-9}	7.12×10^{-13}	—
2	8 056.89	2 859.63	—	-211.91	10 704.62	100	2.10×10^{-8}	1.00×10^{-9}	—
3	7 692.29	3 065.36	53.88	—	10 811.53	96.03	1.92×10^{-6}	4.87×10^{-10}	1.49×10^{-6}
4	7 833.86	2 964.44	49.89	-214.42	10 633.79	96.32	2.26×10^{-6}	3.91×10^{-10}	1.17×10^{-7}

注:“—”表示无数据。

(2) 方案 2

在方案 2 中加入碳交易后,运行成本与方案 1 相比增加 167.86 元,环境成本降低 183.35 元,碳交易成本为 -211.91 元,总体成本降低 227.39 元。考虑碳交易后的各分布式电源出力结果如图 6 所示。与图 4 相比,减少了向外电网购电,增加了柴油机和燃气轮机发电功率,减少了碳排放,从而可出售碳配额增加收益,降低了总体运行成本。

(3) 方案 3

在方案 3 中加入柔性负荷,加入柔性负荷前后负荷曲线及组成如图 7、图 8 所示,引入柔性负荷后各分布式电源发电功率结果如图 9 所示。

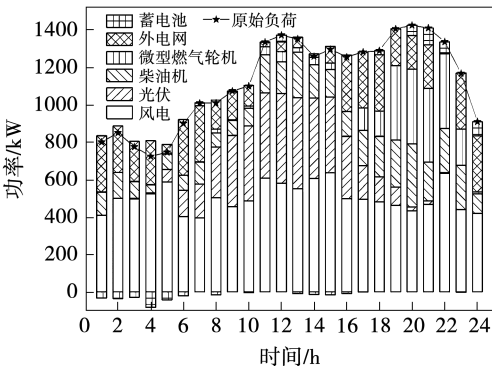


图 6 考虑碳交易的各分布式电源优化发电功率结果
Fig. 6 Optimized power output of each distributed power source considering carbon trading

由表 5 可知,方案 3 中引入柔性负荷后,在满足约束的前提下,用户满意度略有降低,但微电网整体运行成本从 10 932.01 元降至 10 811.53 元,明显提高了微电网的经济性。这是因为由图 7、图 8 可看出,柔性负荷的可平移部分由 11:00 ~ 13:00 及 19:00 ~ 21:00 调整到 4:00 ~ 9:00,各时刻可转移负荷也有不同程度变化,整体而言,从电价较高的峰时段往电价较低的谷时段进行转移,在一定程度上达到了“削峰填谷”的目的。此外,从图 9 可以看出,外电网发电功率向低负荷段移动,从而实现对蓄电池充电,并在高峰时提供负荷需要的电力,共同作用下提高了微电网运行的经济性。

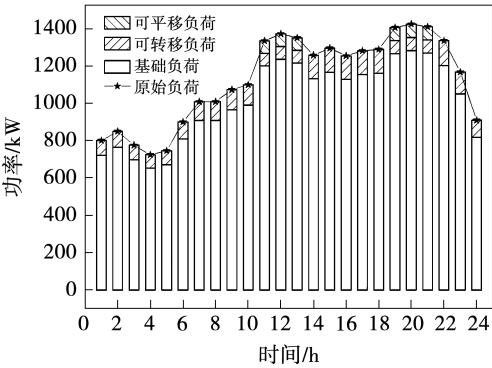


图 7 引入柔性负荷前负荷曲线及组成
Fig. 7 Load curve and composition before introducing flexible load

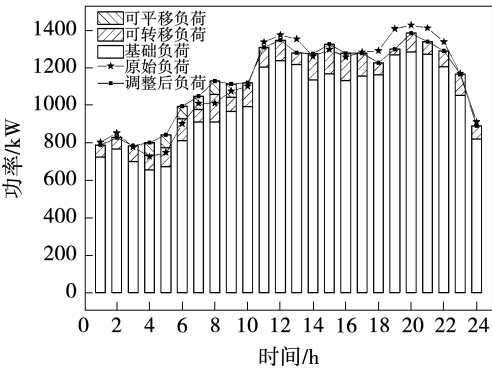


图 8 引入柔性负荷后负荷曲线及组成
Fig. 8 Load curve and composition after introducing flexible load

(4) 方案 4

在方案 4 中加入柔性负荷和碳交易机制,加入柔性负荷和碳交易机制前后负荷曲线及组成如图

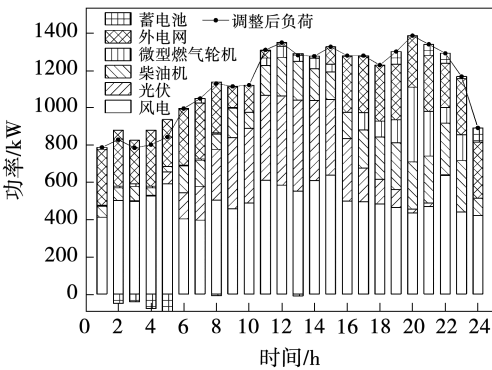


图 9 引入柔性负荷优化后各分布式电源发电功率结果
Fig. 9 Power output of each distributed power source after introducing flexible load optimization

10 所示,各分布式电源发电功率结果如图 11 所示。

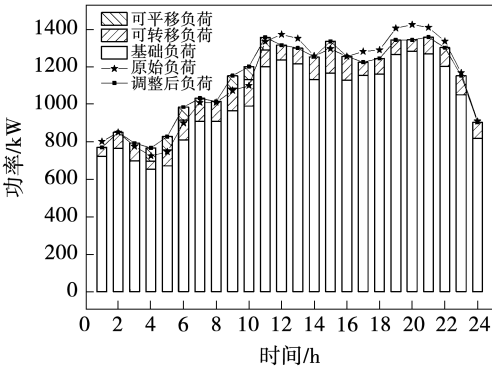


图 10 考虑碳交易和柔性负荷调整后的
负荷曲线及组成

Fig. 10 Load curve and composition considering carbon trading and flexible load adjustment

由表 5 可知,方案 4 中在满足约束的前提下,用户满意度略有降低,但微电网整体运行成本从 10 932.012 元降至 10 633.79 元,在 4 种方案中经济性最佳。这是因为由图 10 可知,柔性负荷的可平移部分由 11:00 ~ 13:00 及 19:00 ~ 21:00 调整到 4:00 ~ 6:00 及 9 ~ 11:00,各时刻可转移负荷也有不同程度变化,整体而言,从电价较高的峰时段往电价较低的谷时段进行转移,在一定程度上达到了“削峰填谷”的目的;此外,从图 11 可以看出,外电网发电功率向低负荷段移动,从而实现对蓄电池充电并在高峰时放电;最后,由于加入了碳交易机制,通过出售碳权,也降低了部分成本,从而达到微电网运行经济性最佳的效果。

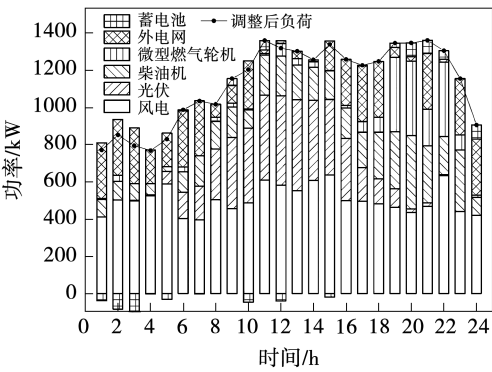


图 11 考虑碳交易和柔性负荷的各分布式电源发电功率结果

Fig. 11 Power output of each distributed power source considering carbon trading and flexible loads

4 结 论

(1) 针对包含风电,光伏,燃气轮机,柴油机,蓄电池等分布式电源的微电网运行系统,建立了各分布式电源运行成本、环境成本、柔性负荷成本和碳交易机制的多目标模型。并针对不同目标模型的组合设立了 4 种运行方案。

(2) 设计了多种群引力搜索算法,对方案 1 进行优化结果表明,该算法所得结果在满足各种约束条件的前提下,所得经济性结果明显优于 GA, PSO, GWO 4 种算法的优化结果。

(3) 在不同运行方案中,与方案 1 相比,考虑碳交易机制的方案 2 通过出售微电网碳配额,可进一步降低微电网运行成本;考虑了柔性负荷的方案 3 在允许范围内对负荷曲线进行调整,从而实现削峰填谷,尽管用户满意度略有下降,但也明显降低微电网运行成本。最后,在方案 4 中,同时考虑柔性负荷和碳交易机制,微电网运行经济成本达到最佳。说明碳交易机制和柔性负荷的引入,可有效降低微电网运行成本,具有一定经济、低碳效益。

参考文献:

[1] 王怡云,吴 雷. 基于改进天牛群算法的微电网优化调度[J]. 电子测量技术,2020,43(16):76-81.
WANG Yiyun, WU Lei. Optimization of micro-grid scheduling based on improved algorithm of beetle swarm optimizaiton[J]. Electronic Measurement Technology,2020,43(16):76-81.
[2] 王继东,宋启明,李继方. 基于多智能体混沌粒子群算法的微

电网优化运行[J]. 可再生能源,2022,40(4):513-519.
WANG Jidong, SONG Qiming, LI Jifang. Optimal operation of microgrid based on multi-agent chaotic paticle swarm optimization[J]. Renewable Energy Resources,2022,40(4):513-519.
[3] 徐琪森,陈 炯,徐广鹏. 含分布式电源与电动汽车的园区微电网优化运行方法[J]. 电测与仪表,2023,60(4):27-33.
XU Qisen, CHEN Jiong, XU Guangying. Optimized operation method of park micro-grid containing distributed power and electric vehicles[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(4):27-33.
[4] 张少明,盛四清. 基于改进粒子群算法的微电网优化运行[J]. 中国电力,2020,53(5):24-31.
ZHANG Shaoming, SHENG Siqing. Optimal operation of microgrid based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power,2020,53(5):24-31.
[5] 付光杰,曹 旭. 含 CCHP 及储能的微电网建模及经济运行优化研究[J]. 吉林大学学报,2022,40(3):339-346.
FU Guangjie, CAO Xu. Research on micro grid modeling and economic operation optimization with CCHP and energy storage[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2022, 40(3):339-346.
[6] 赵 壮,张宏立,王 聪. 区域能源互联网的“源-网-荷-储”运行优化研究[J]. 可再生能源,2022,40(2):238-246.
ZHAO Zhuang, ZHANG Hongli, WANG Cong. Research on optimization of "source-net-charge-storage" operation of regional energy internet[J]. Renewable Energy Resources,2022,40(2):238-246.
[7] 柴桂安,武家辉,姚 磊,等. 基于改进动态惯性权重粒子群算法的冷热点联供型微电网运行优化[J]. 科学技术与工程, 2022,22(4):1472-1479.
CHAI Guian, WU Jiahui, YAO Lei, et al. Operation optimization of combined cooling, heating and power microgrid based on improved dynamic inertia weighted particle swarm algorithm[J]. Science Technology and Engineering,2022,22(4):1472-1479.
[8] 高鹏程,张 春,陈首旗,等. 基于柔性负荷的微电网优化调度方法研究[J]. 四川轻化工大学学报(自然科学版),2022, 35(5):51-59.
GAO Pengcheng, ZHANG Chun, CHEN Shouqi, et al. Research on optimal dispatching method of microgrid based on flexible load[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering(Natural Science Edition), 2022,35(5):51-59.
[9] 熊瑞峰,崔双喜,王江磊,等. 基于蚁狮算法的多能互补微电网经济调度[J]. 计算机仿真,2022,39(12):121-125,159.
XIONG Ruifeng, CUI Shuangxi, WANG Jianglei, et al. Economic scheduling of multi energy complementary microgrid based on antlion algorithm[J]. Computer Simulation, 2022, 39(12):121-125,159.
[10] 林紫茵,蒋晨威,陈明辉,等. 计及柔性负荷的综合能源系统

- 低碳经济运行[J]. 电力建设, 2020, 41(5): 9-18.
- LIN Zihan, JIANG Chenwei, CHEN Minghui, et al. Low-carbon economic operation of integrated energy system considering flexible loads[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(5): 9-18.
- [11] 魏 伟, 叶 利, 方 毅, 等. 考虑碳排放配额和碳交易机制的新能源电力系统日前优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(1): 131-136.
- WEI Wei, YE Li, FANG Yi, et al. Day-ahead optimal scheduling of new energy power system considering carbon emission quota and carbon trading[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 131-136.
- [12] 袁坤龙, 张少康, 常 冉, 等. 阶梯式碳交易机制下计及电-气-热综合能源系统需求响应优化运行[J]. 电气技术, 2024, 25(1): 8-16.
- YUAN Kunlong, ZHANG Shaokang, CHANG Ran, et al. Optimal operation of demand response of electricity-gas-heat integrated energy system under the stepped carbon trading mechanism[J]. Electrical Engineering, 2024, 25(1): 8-16.
- [13] 李亚峰, 王维庆, 寇 洋, 等. 考虑绿证-碳联合交易与需求响应综合能源系统经济运行[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 538-546.
- LI Yafeng, WANG Weiqing, KOU Yang, et al. Considering green certificate-carbon joint trading and demand response integrated energy system economic operation[J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(11): 538-546.
- [14] 吴成明, 邢博洋, 李世春. 基于麻雀搜索算法的微电网分层优化调度[J]. 南方电网技术, 2023, 18(2): 115-123.
- WU Chengming, XING Boyang, LI Shichun. Hierarchical optimal dispatch of microgrid based on the sparrow search algorithm[J]. Southern Power System Technology, 2023, 18(2): 115-123.
- [15] 周孟然, 王 旭, 邵 帅, 等. 考虑需求响应和碳排放额度的微电网分层优化调度[J]. 中国电力, 2022, 55(10): 45-53.
- ZHOU Mengran, WANG Xu, SHAO Shuai, et al. Hierarchical optimal scheduling of microgrid considering demand response and carbon emission quota[J]. Electric Power, 2022, 55(10): 45-53.
- [16] 伏绍鑫, 张 路, 唐翰峰, 等. 考虑柔性电热负荷的区域综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力科技与环保, 2023, 39(5): 417-428.
- FU Shaoxin, ZHANG Lu, TANG Hanfeng, et al. Low-carbon economic dispatch of community integrated energy system considering flexible electric heating load[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2023, 39(5): 417-428.
- [17] 孟国情, 邱晓燕, 张明珂, 等. 计及柔性负荷和换电站的综合能源系统优化调度[J]. 电子测量技术, 2023, 46(14): 138-145.
- MENG Guoqing, QIU Xiaoyan, ZHANG Mingke, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering flexible loads and battery swapping station[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(14): 138-145.
- [18] 高 乐, 文 好, 李胜文, 等. 考虑柔性负荷的微电网低碳经济调度研究[J]. 山西电力, 2023(1): 10-14.
- GAO Le, WEN Hao, LI Shengwen, et al. Study on low-carbon economic dispatch of microgrid with flexible loads taken into consideration[J]. Shanxi Electric Power, 2023(1): 10-14.
- [19] AGHAJANI G, GHADIMI N. Multi-objective energy management in a micro-grid[J]. Energy Reports, 2018, 4: 218-225.
- [20] 王守相, 张善涛, 王 凯, 等. 计及分时电价下用户需求响应的分布式储能多目标优化运行[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 125-132.
- WANG Shouxiang, ZHANG Shantao, WANG Kai, et al. Multi-objective optimal operation of distributed energy storage considering user demand response under time-of-use price[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 125-132.
- [21] 许国根. 最优化方法及其 MATLAB 实现[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2018.
- XU Guogen. Optimization method and its MATLAB implementation[M]. Beijing: Beihang University Press, 2018.

(王治红 编辑)