

DOI: 10.7667/PSPC180036

基于灰靶决策和多目标布谷鸟算法的微电网 分布式电源鲁棒优化

杨欢红¹, 王洁¹, 邰能灵², 丁宇涛¹

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 风机、光伏等可再生能源出力及负荷需求的不确定性给微电网稳定运行带来挑战。首先, 针对这一特性, 构建约束条件的不确定集, 综合考虑运行成本和环境成本, 建立微电网多目标鲁棒调度模型, 并引入鲁棒不确定预算调节不确定集合的保守度。其次, 采用基于 Pareto 支配策略的改进的非线性多目标布谷鸟算法求出 Pareto 最优解集, 并利用多目标灰靶决策从 Pareto 最优解集中选择出满意方案。最后, 针对一个小型微电网系统建立优化模型并求解, 对比分析仿真结果, 验证了所提方法的可靠性和有效性。

关键词: 微电网; 鲁棒不确定预算; Pareto 支配策略; 多目标布谷鸟算法; 灰靶决策

Robust optimization of distributed generation in a microgrid based on grey target decision-making and multi-objective cuckoo search algorithm

YANG Huanhong¹, WANG Jie¹, TAI Nengling², DING Yutao¹

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: There are uncertainties in load demands and renewable energy outputs of wind turbine and photovoltaic. These factors bring great challenges to the stable operation of microgrids. In view of the characteristic, firstly, the uncertainty set of the constraints is constructed and the operating cost and the environmental cost are considered. Thus, the multi-objective robust scheduling model of the microgrid is built. Also, robust uncertainty budget is introduced to adjust the conservatism of the uncertainty set. Secondly, an improved and nonlinear multi-objective cuckoo search algorithm based on Pareto domination is used to solve the Pareto optimal solution set. Based on multi-objective grey target decision-making, the satisfactory solution is selected from the optimal solution set. Finally, the scheduling model for a small microgrid is established and solved. The simulation results are compared to verify the reliability and validity of the proposed method.

This work is supported by Shanghai Engineering Research Center of Green Energy Grid-Connected Technology (No. 13DZ2251900) and National Natural Science Foundation of China (No. 51377104).

Key words: microgrid; robust uncertainty budget; Pareto domination strategy; multi-objective cuckoo search algorithm; grey target decision-making

0 引言

近年来, 由于分布式发电技术的快速发展, 微电网作为一种新的供给和管理能源的模式, 得到了广泛的应用^[1]。风机、光伏等分布式电源的随机性

和波动性以及负荷的不确定性都会使微电网运行的可靠性降低, 如何应对微电网调度时的各种不确定因素是当前研究的难点^[2-3]。因此, 研究含不确定参数的微电网优化调度策略十分必要。

有关微电网调度策略的研究如下: 文献[4]在满足所有约束条件的基础上分别优化各个微电源的有功、无功出力, 并分析不同调度模式对微电网经济运行的影响; 文献[5]基于机会约束规划建立了含热

基金项目: 上海绿色能源并网工程技术研究中心项目资助(13DZ2251900); 国家自然科学基金项目资助(51377104)

电联供的优化运行模型,利用粒子群算法进行求解,优化模型较为简单;而文献[6]在系统冷热电联供的基础上,考虑了分时电价和潮流的双向流动,建立了优化调度模型;文献[7]针对微电网与大电网交互时的功率波动,引入交互功率控制实现微电网优化调度;文献[8]从需求侧出发,针对可平移负荷的用电特性,提出基于可平移负荷的微电网优化调度模型;文献[9]提出结合需求侧管理,利用楼宇作为虚拟储能替代实际储能参与微电网优化调度,构建微电网虚拟储能优化模型。上述文献均未考虑风机、光伏出力 and 负荷需求不确定性对优化调度的影响。

随着风机、光伏等间歇式电源在微电网中的渗透率日渐增长,确定条件下的微电网优化调度已不能满足实际运行情况,鲁棒优化应运而生^[10-11]。在不确定空间预先设定一个集合,鲁棒优化旨在给定的不确定集合中找出一个任意不确定参数均可行的最优解。优化过程无需知道随机变量的精确概率分布形式,和随机规划相比,其求解规模也小得多^[12]。因此,鲁棒优化可运用于考虑不确定参数的微电网优化调度。

综上所述,在一定的市场框架下,考虑风机和光伏出力、负荷需求以及实时电价的不确定性对微电网优化调度的影响,本文将鲁棒优化与微电网多目标调度相结合,建立微电网鲁棒调度模型。在约束条件中引入鲁棒不确定预算来降低不确定集合的保守度。针对本文提出的多目标非线性模型,由基于 Pareto 支配策略的改进的非线性多目标布谷鸟算法求解出满足条件的 Pareto 最优解集,并采用基于熵值的多目标灰靶决策在不失客观性的情况下选出满意方案。最后,通过算例仿真对所提模型的有效性和可行性进行验证。

1 微电源模型

在微电网调度周期内,首先充分利用光伏、风机输出的能量,若不能满足负荷需求,可调度 DG、储能以及微电网与电网交互的能量三者协调配合,共同满足负荷需求。本文研究的微电网由风机、光伏、燃气轮机、燃料电池以及储能组成。

1.1 微型燃气轮机模型

微型燃气轮机以可燃性气体为燃料,污染小、效率高,其发电效率与输出功率的关系为^[13]

$$\eta_{MT} = 0.0753\left(\frac{P_{MT}}{65}\right)^3 - 0.3095\left(\frac{P_{MT}}{65}\right)^2 + 0.4174\left(\frac{P_{MT}}{65}\right) + 0.1068 \quad (1)$$

式中: η_{MT} 为微燃机的效率; P_{MT} 为微燃机输出的电功率。

1.2 燃料电池模型

燃料电池利用电化学反应直接产生电能,环保、高效,其发电效率与输出功率关系为^[14]

$$\eta_{FC} = -0.0023P_{FC} + 0.6735 \quad (2)$$

式中: η_{FC} 为燃料电池的效率; P_{FC} 为其输出功率。

1.3 储能模型

蓄电池作为本文采用的储能模型,其荷电状态(SOC)应满足一定的约束条件,如式(3)—式(5)^[15]。

$$SOC(t) = (1 - \sigma_{SDR})SOC(t-1) + \frac{\Delta t (s_0 \eta_{cha} + (1 - s_0) / \eta_{dis}) P_{BT}}{E_b} \quad (3)$$

$$SOC(0) = SOC(T_0) \quad (4)$$

$$SOC_{min} \leq SOC(t) \leq SOC_{max} \quad (5)$$

式中: $SOC(t)$ 、 SOC_{min} 、 SOC_{max} 分别为蓄电池的荷电状态及其上下限; σ_{SDR} 为自放电率; η_{cha} 、 η_{dis} 为蓄电池的充放电效率; P_{BT} 为蓄电池的充放电功率; E_b 为蓄电池容量, kW/h; 调度周期的开始和结束时刻,其荷电状态必须相等。此外蓄电池不能同时进行充放电,因此,当 $P_{BT} > 0$ 时, $s_0 = 1$, 当 $P_{BT} < 0$ 时, $s_0 = 0$ 。

光伏和风机的输出功率模型见文献[16-17]。

2 微电网鲁棒优化模型

2.1 目标函数

本文基于一定的市场框架和市场需求,优化模型的目标函数有两个:运行成本和环境成本。

目标 1 运行成本

$$F_1(x) = C_{MT} + C_{FC} + C_{BT} + C_G \quad (6)$$

式中: C_{MT} 、 C_{FC} 分别为微型燃气轮机和燃料电池的燃料消耗成本; C_{BT} 为蓄电池充放电成本; C_G 为微电网与电网的交互成本。具体公式分别为

$$C_{MT} = c_1 \sum_t \frac{P_{MT}^t}{\eta_{MT}^t} \quad (7)$$

$$C_{FC} = c_2 \sum_t \frac{P_{FC}^t}{\eta_{FC}^t} \quad (8)$$

$$C_{BT} = c_3 \sum_t |P_{BT}^t| \quad (9)$$

$$C_G = \sum_t [y_0 c_{buy} + (1 - y_0) c_{sell}] P_G^t \quad (10)$$

式中: c_1 、 c_2 为燃料价格,单位为元/m³; c_3 为蓄电池充放电价格,单位为元/kW; c_{buy} 、 c_{sell} 分别为购电和售电价格,单位为元/kW; P_G^t 为 t 时刻微网与

电网的交互功率, 当 $P'_G > 0$ 时, $y_0 = 1$, 当 $P'_G < 0$ 时, $y_0 = 0$, 购电和售电不能同时进行。

目标 2 环境成本

$$F_2(x) = \sum_{k=1}^3 \left(\left(\sum_{i=1}^2 a_{ki} \cdot b_{ki} \cdot \sum_t P'_i \right) + a_{kG} \cdot b_{kG} \cdot \sum_t (P'_G \cdot q_0) \right) \quad (11)$$

式中: a_k 为治污的外部成本, 单位为元/kg; b_k 为分布式电源的排放系数, 单位为 kg/kW; $k=1\sim 3$ 分别代表污染物为 NO_x 、 SO_2 和 CO_2 ; $i=1\sim 2$ 分别代表微燃机和燃料电池。当 $P'_G > 0$ 时, $q_0 = 1$; 当 $P'_G < 0$ 时, $q_0 = 0$, 计及购电时的治理电网排污费用。

2.2 约束条件

2.2.1 传统约束条件

1) 分布式电源出力约束

$$P'_i^{\min} \leq P'_i \leq P'_i^{\max} \quad (12)$$

式中, P'_i 、 P'_i^{\min} 、 P'_i^{\max} 分别是电源的出力及其上下限, $i=1, 2$ 时分别代表 t 时刻的微燃机出力 P'_{MT} 和 t 时刻燃料电池出力 P'_{FC} 。

2) 机组爬坡约束

$$-R_{\text{in,down}} \cdot \Delta t \leq P'_i - P'^{i-1} \leq R_{\text{in,up}} \cdot \Delta t \quad (13)$$

式中: $R_{\text{in,down}}$ 、 $R_{\text{in,up}}$ 分别为机组向下及向上的爬坡速率; $\Delta t = 1 \text{ h}$, $i=1, 2$ 时同上。

3) 交互功率约束

$$P'_G^{\min} \leq P'_G \leq P'_G^{\max} \quad (14)$$

式中, P'_G^{\min} 、 P'_G^{\max} 分别是交互功率的下限和上限。

4) 蓄电池约束

$$P'_{\text{BT}}^{\min} \leq P'_{\text{BT}} \leq P'_{\text{BT}}^{\max} \quad (15)$$

式中, P'_{BT}^{\min} 、 P'_{BT}^{\max} 分别为蓄电池充放电功率的限值, 蓄电池荷电状态约束见式(3)一式(5)。

2.2.2 含不确定参数的约束条件

由于约束条件中含有不确定参数, 功率守恒约束可表示为

$$P'_{\text{MT}} + P'_{\text{FC}} + P'_G - P'_{\text{BT}} \geq \tilde{P}'_{\text{L}} - \tilde{P}'_{\text{PV}} - \tilde{P}'_{\text{WT}} \quad (16)$$

$$P'_{\text{MT}} + P'_{\text{FC}} + P'_G - P'_{\text{BT}} \geq \tilde{P}'_{\text{L}} - \tilde{P}'_{\text{PV}} - \tilde{P}'_{\text{WT}} + \Delta P'_{\text{Lmax}} \quad (17)$$

式中: \tilde{P}'_{PV} 、 \tilde{P}'_{WT} 、 \tilde{P}'_{L} 分别为含有不确定参数的光伏、风机出力和负荷; P'_G^{\max} 、 P'_{BT}^{\max} 、 $\Delta P'_{\text{Lmax}}$ 分别为交互功率、蓄电池充放电以及负荷波动的最大值。

2.2.3 多面体不确定集

鲁棒优化中的不确定集包含调度时不确定参数波动的全部范围, 为了描述调度时各不确定参数的波动范围, 本文采用保守度低的多面体不确定集, 多面体不确定集是在盒式不确定集的基础上引入 1-范数^[18]。

$$\tilde{b}_{ij} = b_{ij} + \xi_{ij} \hat{b}_{ij} \quad (18)$$

$$U = \left\{ \xi \left| \sum_{j \in J_i} |\xi_{ij}| \leq \Gamma_i, |\xi_{ij}| \leq 1, \forall j \in J_i \right. \right\} \quad (19)$$

式中: \tilde{b}_{ij} 是不确定集中的不确定参数; b_{ij} 为标称值; \hat{b}_{ij} 是鲁棒模型中第 i 个不确定因素在第 j 个约束中的波动参数, 一般为正数; 随机变量 $\xi_{ij} \in [-1, 1]$, 在区间上对称分布; $j \in J_i$, J_i 包含所有不确定的不等式约束; Γ_i 为鲁棒不确定预算, 其本质是约束不确定参数的波动范围, 其值越大, 波动程度越高, 模型保守度越高, 因而调节 Γ_i 可以调节模型保守度。

基于上述的区间多面体不确定集, 引入辅助决策变量 z_i , 定义 $z_i \geq \hat{b}_{ij} |x_0| = \max_j \hat{b}_{ij} |x_0|$ 。将含有不确定参数的约束条件变为鲁棒约束条件^[19], 如式(20)。

$$P'_{\text{MT}} + P'_{\text{FC}} + P'_G - P'_{\text{BT}} + z_1 \Gamma_1 \geq P'_{\text{L}} - P'_{\text{PV}} - P'_{\text{WT}} \quad (20)$$

$$P'_{\text{MT}} + P'_{\text{FC}} + P'_G - P'_{\text{BT}} + z_2 \Gamma_2 \geq P'_{\text{L}} - P'_{\text{PV}} - P'_{\text{WT}} + \Delta P'_{\text{Lmax}} \quad (21)$$

式中: $\Gamma_1 = \Gamma_2 = \xi_{\text{L}} + \xi_{\text{PV}} + \xi_{\text{WT}}$, $\Gamma_i \in [0, 3]$; ξ_{L} 、 ξ_{PV} 、 ξ_{WT} 分别代表不确定集中负荷、光伏、风机的随机变量。

综上所述, 优化模型的目标函数为式(6)和式(11), 约束条件为式(3)一式(5)、式(12)一式(15)、式(20)和式(21)。决策变量为 P'_{MT} 、 P'_{FC} 、 P'_G 、 P'_{BT} , 辅助决策变量为 z_1 、 z_2 。

3 模型求解

布谷鸟搜索算法基于布谷鸟借巢产卵、寄生的繁衍习性和莱维飞行机制产生, 原理简单, 需要设置的参数少, 并且能够很好地避免滞于局部最优, 使算法全局寻优能力强。但标准的多目标布谷鸟搜索算法搜索速度慢、耗时长, 如果发现概率 p_α 值很小, 步长 α 值很大, 那么算法的迭代次数多且搜索精度不高; 如果 p_α 值很大, α 值很小, 虽然迭代次数有所减小, 但不能确保可以搜索到最优解。而微电网鲁棒多目标优化问题是一个复杂的非线性优化问题^[20], 因此本文采用基于 Pareto 支配策略的改进的非线性多目标布谷鸟算法, 算法流程如图 1 所示。在多目标布谷鸟算法的基础上, 引入 Pareto 支配策略以及密度距离, 发现概率 p_α 和步长 α 由固定值变为随迭代次数的变化而变化的动态变量, 改进后的公式为

$$p_\alpha(t) = p_{\alpha, \max} - \frac{m}{m_s} (p_{\alpha, \max} - p_{\alpha, \min}) \quad (22)$$

$$\alpha(t) = \alpha_{\max} \exp\left(\frac{m}{m_s} \ln\left(\frac{\alpha_{\min}}{\alpha_{\max}}\right)\right) \quad (23)$$

式中: $p_{\alpha}(t)$ 、 $p_{\alpha,\max}$ 、 $p_{\alpha,\min}$ 分别为动态发现概率及其最大、最小值; $\alpha(t)$ 、 α_{\max} 、 α_{\min} 分别为动态步长及其最大、最小值; m 、 m_s 分别为当前迭代次数和总迭代次数。

在迭代初期, 使 p_{α} 和 α 的值足够大, 以增加解向量的多样性; 随着 m 增加, 减小 p_{α} 和 α 使算法能够搜索到最优解, 提高搜索精度, 减少迭代次数。采用几组基本测试函数, 分别对 $(p_{\alpha,\max}, p_{\alpha,\min})$ 为 $(0.5, 0.05)$ 、 $(1, 0.005)$ 和 $(0.5, 0.005)$ 三组参数以及 $(\alpha_{\max}, \alpha_{\min})$ 为 $(0.5, 0.01)$ 、 $(1, 0.001)$ 和 $(0.5, 0.001)$ 三组参数测试。测试时, 首先保持 α 值不变, $p_{\alpha,\min}$ 减小及 $p_{\alpha,\max}$ 增大可以使算法获得更好的结果; 其次保持 p_{α} 值不变, α_{\min} 减小对算法影响不大, α_{\max} 增大使算法性能恶化。因此, $(p_{\alpha,\max}, p_{\alpha,\min})$ 选择 $(1, 0.005)$ 、 $(\alpha_{\max}, \alpha_{\min})$ 选择 $(0.5, 0.01)$, 具体测试函数及测试过程见文献[21]。

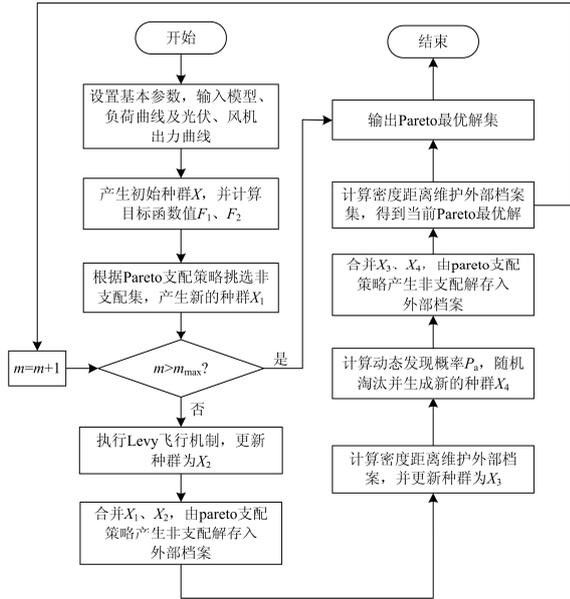


图1 模型求解流程

Fig. 1 Model solving process

4 灰靶决策选择满意方案

本文采用基于熵值的多目标灰靶决策从求解出的 Pareto 最优解集中选择满意方案。在由满意解形成的灰靶区域中设定一个靶心, 满意解与靶心的距离是灰靶决策的重要判据, 灰靶决策根据靶心距对各方案进行排序^[22]。基于熵值求出各个方案的权重及靶心距而不依赖专家评判或决策者的偏好, 提高

决策的可信度和真实度。

4.1 靶心向量确定

基于布谷鸟算法求出的 Pareto 最优解集确定出 n 个决策方案, 每个决策方案有 m 个目标。其中, 第 i 个方案的第 j 个目标值为效果样本值 x_{ij} ($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$), 效果样本矩阵为 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{n \times m}$ 。

基于“奖优罚劣”算子 z_j 及效果样本矩阵 \mathbf{X} 求决策矩阵 \mathbf{V} , 其中算子 z_j 为

$$z_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}, \quad j=1, 2, \dots, m \quad (24)$$

若目标值为效益型指标, 则

$$v_{ij} = \frac{x_{ij} - z_j}{\max\{\max_{1 \leq i \leq n}\{x_{ij}\} - z_j, z_j - \min_{1 \leq i \leq n}\{x_{ij}\}\}} \quad (25)$$

若目标值为成本型指标, 则

$$v_{ij} = \frac{z_j - x_{ij}}{\max\{\max_{1 \leq i \leq n}\{x_{ij}\} - z_j, z_j - \min_{1 \leq i \leq n}\{x_{ij}\}\}} \quad (26)$$

若目标值为 $[a, b]$ 的区间型指标, 则

$$v_{ij} = \begin{cases} \frac{2x_{ij} - a - \min_{1 \leq i \leq n}\{x_{ij}\}}{a - \min_{1 \leq i \leq n}\{x_{ij}\}}, & x_{ij} < a \\ 1, & a \leq x_{ij} \leq b \\ \frac{2x_{ij} - b - \max_{1 \leq i \leq n}\{x_{ij}\}}{\max_{1 \leq i \leq n}\{x_{ij}\} - b}, & x_{ij} > b \end{cases} \quad (27)$$

式中, $v_{ij} \in [-1, 1]$ 。

基于以上变换, 得出决策矩阵为 $\mathbf{V} = (v_{ij})_{n \times m}$ 。

由 $v_j^0 = \max\{v_{ij} | 1 \leq i \leq n\}$, $j=1, 2, \dots, m$, 定义其靶心向量为 $\mathbf{v}^0 = \{v_1^0, v_2^0, \dots, v_m^0\}$ 。

4.2 权重及靶心距计算

权重的确定是灰靶决策评价指标的一个重要步骤, 一般权重确定是基于专家评判或决策者的偏好, 具有较强的主观性。本文采用客观方法计算权重。

根据各方案的目标值不同, 计算出不同的比重 y_{ij} 和熵值 E_j , 并由熵值得出权重, 分别为

$$y_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^n x_{ij}, \quad x_{ij} > 0 \quad (28)$$

$$E_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n y_{ij} \ln y_{ij}, \quad E_j > 0 \quad (29)$$

$$\omega_j = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^m (1 - E_j) \quad (30)$$

根据灰靶定义可知, $\mathbf{v}^0 = \{v_1^0, v_2^0, \dots, v_m^0\}$ 是 m 维

椭圆灰靶的靶心,各方案的目标值离靶心距离越近,则方案越优,距离表示为

$$d_i = |v_i - v^0| = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (v_{ij} - v_j^0)^2} \quad (31)$$

5 算例分析

5.1 算例描述

本文以某小型微电网为例进行验证。将一天24 h 平均分为 24 个调度时刻,根据对风机、光伏出力以及负荷的预测并结合市场的实时电价,利用 Matlab 求解调度策略。其中,种群数量为 100,外部档案集的大小为 200,最大迭代次数为 200 次。微型燃气轮机和燃料电池参数见文献[23],蓄电池参数参考文献[24],微网具体参数见表 1。

表 1 微电网参数

Table 1 Parameters of the microgrid

类型	限值功率/kW		爬坡功率/kW	
	下限	上限	下坡	上坡
MT	15	150	-60	80
FC	0	40	-30	40
SB	-100	100	—	—
中心电网	-100	200	—	—

此外,市场中天然气价格为 3.99 元/m³,则 $c_1 = c_2 = 0.412$ 元/kW,蓄电池的充放电费用 $c_3 = 0.12$ 元/kW。风机、光伏出力以及负荷预测见图 2 和图 3。太阳能、风能作为清洁能源,假设其发电时不产生污染气体,其他分布式电源污染物处理价格和排放系数见表 2。

表 2 污染物的外部成本和排放系数

Table 2 External cost and emissions parameters of pollutant

污染物类型	NO _x	SO ₂	CO ₂
外部成本/(元·kg ⁻¹)	8	6	0.23
排放系数 (g·(kWh) ⁻¹)	MT	0.2	0.003 6
	FC	0.014	0.002 7
	中心电网	0.32	0.005 2

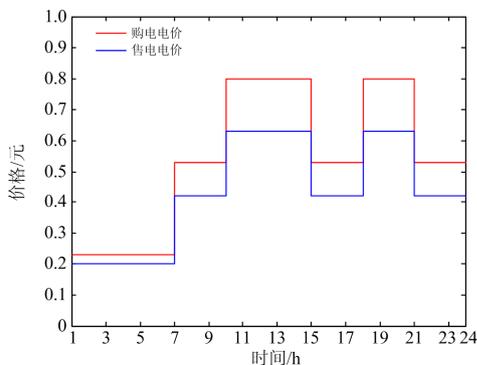


图 2 实时电价
Fig. 2 Spot price

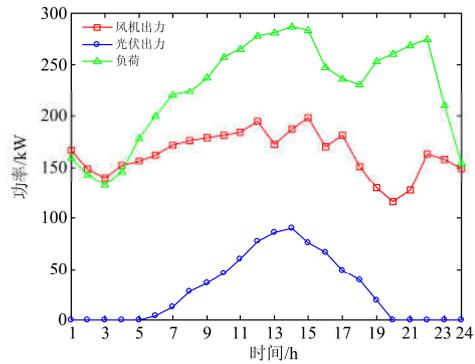


图 3 风机、光伏出力及负荷曲线

Fig. 3 Wind turbine and photovoltaic outputs and load curve

5.2 方案选择

基于文中求解算法得出模型解的 Pareto 前沿,删除重复方案,给出以下 8 组方案,如表 3 所示。采用基于熵值的智能加权灰靶决策对这 8 种方案进行排序。

表 3 不同方案调度结果

Table 3 Scheduling results of different schemes

方案	运行成本/元	环境成本/元
1	2 012.4	87.8
2	1 987.6	91.6
3	1 493.8	157.8
4	1 512.7	151.9
5	1 623.4	132.6
6	1 681.7	124.9
7	1 742.5	117.4
8	1 793.6	107.7

根据式(24)一式(31)确定靶心,计算 8 种方案的靶心距得出, $d_3 > d_4 > d_1 > d_5 > d_6 > d_2 > d_7 > d_8$ 。方案 8 的靶心距最小,离靶心最近,是本次决策的满意方案。从表 3 中看,虽然方案 8 的运行成本和环境成本都不是最低,但二者都相对较低,体现了多目标优化的折中效果。

5.3 场景仿真与结果分析

针对灰靶决策选出的满意方案,采用不同的不确定预算 Γ_i 以及优化目标,验证模型调节保守度的能力以及多目标优化的折中作用。

5.3.1 不同不确定预算的多目标优化分析

选取 $\Gamma_i = 0$ 、 $\Gamma_i = 1.5$ 、 $\Gamma_i = 3$ 时的调度策略进行分析,如图 4—图 6 所示。

由图 4 可以看出, $\Gamma_i = 0$ 时,系统不考虑各种不确定性,是一个确定的微电网多目标优化。蓄电池在 1~7 h 电价谷时大幅充电, SOC 值上升很快,以便在后期电价较高时放电供给负荷;在 15~18 h,为了兼顾环境成本,蓄电池略有充电, SOC 略有升高。由于负荷在 19~21 h 达到峰值,因此,即使此时电价较高,微电网依然从电网购电供给负荷。

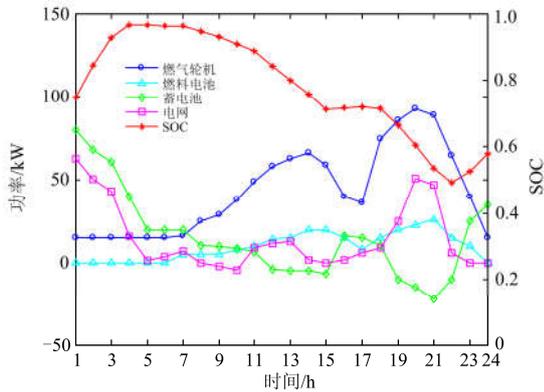


图 4 $\Gamma_i = 0$ 时的多目标调度策略

Fig. 4 Multi-objective scheduling strategy when $\Gamma_i = 0$

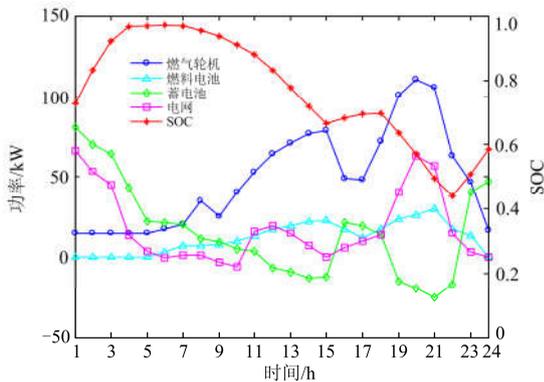


图 5 $\Gamma_i = 1.5$ 时的多目标调度策略

Fig. 5 Multi-objective scheduling strategy when $\Gamma_i = 1.5$

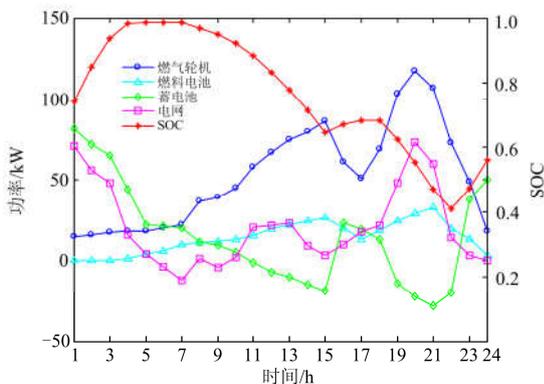


图 6 $\Gamma_i = 3$ 时的多目标调度策略

Fig. 6 Multi-objective scheduling strategy when $\Gamma_i = 3$

从图 5 可以看出, $\Gamma_i = 1.5$ 时, 系统考虑不确定性因素, 从确定多目标优化转变为不确定性多目标优化。为了应对由不确定因素带来的波动性, 在用电负荷高峰时期燃气轮机、电网等化石能源的出力较图 4 有了明显的增长, 蓄电池仍是谷时充电, 峰时放电, 在负荷波动较大区域放电略有增多, 变化不大。

如图 6 所示, $\Gamma_i = 3$ 时, 系统的不确定因素最强, 此时, 系统的保守度最高。与 $\Gamma_i = 1.5$ 相比, 为了应对不确定因素的进一步增强, 蓄电池在电价谷时的充电力度加大, SOC 值接近为 1, 为后期负荷大且波动较强时的放电做出准备, 在负荷高峰时蓄电池的放电深度也进一步加深。燃气轮机、燃料电池、电网的出力较图 5 也进一步增长。

由以上分析可见, 当不确定预算 Γ_i 取不同时, 系统的保守度不同, 调节不确定预算 Γ_i 可调节系统的保守度。而又由表 4 可以看出, 不确定预算 Γ_i 不同时, 目标函数值变化不大, 体现出鲁棒优化调度时若可再生能源、负荷需求发生波动, 目标函数变化不大, 系统具有较好的鲁棒性。

表 4 不同不确定预算 Γ_i 调度结果

Table 4 Scheduling results of different uncertain budget Γ_i

不确定预算	运行成本/元	环境成本/元
$\Gamma_i = 0$	1 745.3	116.8
$\Gamma_i = 1.5$	1 794.8	107.1
$\Gamma_i = 3$	1 779.2	111.6

5.3.2 相同不确定预算单目标优化分析

$\Gamma_i = 1.5$ 场景下的运行成本、环境成本单目标优化调度与图 5 多目标优化调度进行对比, 调度策略如图 7 和图 8 所示。

从图 7 可以看出, 蓄电池在电价谷时以及 15~18 h 大幅充电, 以便在负荷峰期增大蓄电池的放电深度、降低燃气轮机等出力, 从而降低运行成本。因而, 微电网在这一时段加大从电网的购电力度, 电网发电的排污高于燃气轮机和燃料电池, 同时印证了单目标模型没有兼顾环境成本, 而多目标具有折中效果。

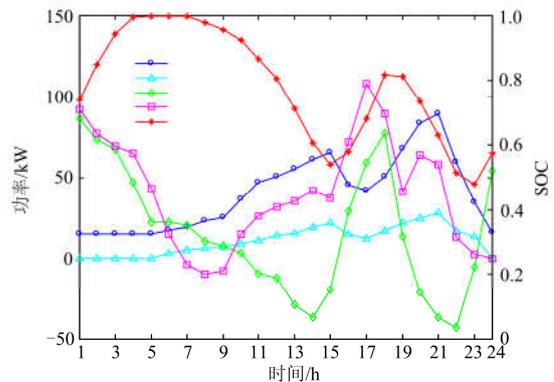


图 7 运行成本优化调度策略

Fig. 7 Scheduling strategy for operating cost optimization

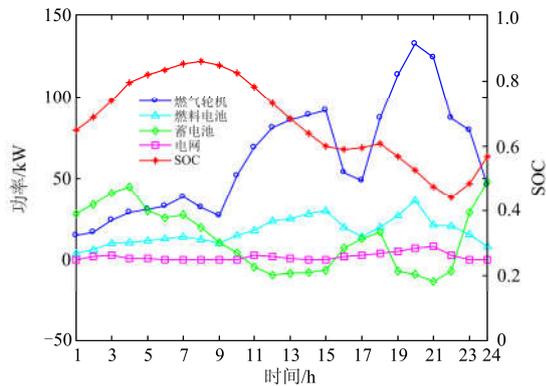


图 8 环境成本优化调度策略

Fig. 8 Scheduling strategy for environmental cost optimization

从图 8 可以看出, 由于电网发电排污高于燃气轮机和燃料电池, 微电网大大减少从电网购电, 电网出力曲线明显降低, 因而, 蓄电池充放电深度也相应降低。而燃气轮机、燃料电池出力较图 7 明显增长, 整个系统排污大大减少, 实现环境成本目标最优。分布式电源出力增大也使得系统运行成本增高, 同样从侧面印证多目标优化有较好的折中作用。

6 结论

本文针对微网中存在的不确定性问题, 构建了基于灰靶决策和多目标布谷鸟算法的分布式电源鲁棒优化模型, 通过仿真, 得出以下结论:

1) 构建可再生能源、负荷出力不确定集, 结合鲁棒多目标优化模型得出含不确定性因素场景下的优化调度方案, 可以有效抑制不确定因素对微电网运行的干扰。

2) 不同鲁棒不确定预算的引入, 有效调节了模型的保守度, 并使系统在不确定条件下具有较强的鲁棒性能。

3) 在优化算法中使用动态发现概率 p_a 和步长 α , 求解非线性多目标鲁棒优化模型是有效可行的。

4) 采用基于熵值的灰靶决策确定靶心距, 进行决策, 有效降低了决策的主观性。

未来考虑将需求侧响应以及系统故障等引入模型, 构建更加完善的模型。

参考文献

[1] 秦红霞, 王成山, 刘树, 等. 智能微网与柔性配网相关技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 17-23.
QIN Hongxia, WANG Chengshan, LIU Shu, et al. Discussion on the technology of intelligent micro-grid and flexible distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 17-23.

[2] 柳丹, 李强, 袁晓冬. 考虑随机性的微网能量优化调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 112-117.
LIU Dan, LI Qiang, YUAN Xiaodong. Economic and optimal dispatching of power microgrid with renewable energy resources based on stochastic optimization[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 112-117.

[3] LI H, ESEYE A T, ZHANG J, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.

[4] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 不同运行调度模式下微网经济运行对比分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 106-113.
CHEN Jie, YANG Xiu, ZHU Lan, et al. Comparison of microgrid economic operation among different dispatch modes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 106-113.

[5] 王锐, 顾伟, 吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 22-27.
WANG Rui, GU Wei, WU Zhi. Economic and optimal operation of a combined heat and power microgrid with renewable energy resources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 22-27.

[6] 牛铭, 黄伟, 郭佳欢, 等. 微网并网时的经济运行研究[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 38-42.
NIU Ming, HUANG Wei, GUO Jiahuan, et al. Research on economic operation of grid-connected microgrid[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 38-42.

[7] 张明锐, 陈洁, 杜志超, 等. 考虑交互功率控制的微网经济运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1013-1023.
ZHANG Mingrui, CHEN Jie, DU Zhichao, et al. Economic operation of micro-grid considering regulation of interactive power[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1013-1023.

[8] 符杨, 蒋一鏊, 李振坤, 等. 计及可平移负荷的微网经济优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2612-2620.
FU Yang, JIANG Yiliu, LI Zhenkun, et al. Optimal economic dispatch for microgrid considering shiftable loads[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2612-2620.

[9] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 581-590.
JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Optimal scheduling method for a combined cooling heating and

- power building microgrid considering virtual storage system at demand side[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 581-590.
- [10] ZHANG C, XU Y, DONG Z Y, et al. Robust coordination of distributed generation and price-based demand response in microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4236-4247.
- [11] GUAN Y, WANG J. Uncertainty sets for robust unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1439-1440.
- [12] 向月, 刘俊勇, 魏震波, 等. 考虑可再生能源出力不确定性的微电网能量优化鲁棒模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(19): 3063-3072.
- XIANG Yue, LIU Junyong, WEI Zhenbo, et al. Robust model of microgrid energy optimization with uncertain renewable energy sources[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(19): 3063-3072.
- [13] ISMAIL M S, MOGHAVVEMI M, MAHLIA T M I. Design of an optimized photovoltaic and microturbine hybrid power system for a remote small community: case study of Palestine[J]. Energy Conversion & Management, 2013, 75(11): 271-281.
- [14] 李鹏, 王雪莹, 韩鹏飞. 双重不确定环境下的微网优化运行调度风险分析研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4296-4303.
- LI Peng, WANG Xueying, HAN Pengfei. Risk analysis of microgrid optimal operation scheduling under double uncertainty environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4296-4303.
- [15] LI J, XUE Y, TIAN L, et al. Research on optimal configuration strategy of energy storage capacity in grid-connected microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 389-396. DOI: 10.1186/s41601-017-0067-8.
- [16] 丁明, 刘新宇, 解蛟龙, 等. 考虑微网综合性能的并网型微网优化配置模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 18-26.
- DING Ming, LIU Xinyu, XIE Jiaolong, et al. Optimal planning model of grid-connected microgrid considering comprehensive performance[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 18-26.
- [17] 王艳松, 宋阳阳, 吴昊, 等. 基于禁忌搜索算法的微电网源/荷安全经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 21-27.
- WANG Yansong, SONG Yangyang, WU Hao, et al. Security and economic dispatch of source/load for micro-grid based on Tabu search algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 21-27.
- [18] LI Z, FLOUDAS C A. A comparative theoretical and computational study on robust counterpart optimization: II probabilistic guarantees on constraint satisfaction[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(19): 67-69.
- [19] 王鲁浩, 李歧强, 丁然, 等. 可再生能源微网鲁棒多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 184-192.
- WANG Luhao, LI Qiqiang, DING Ran, et al. Robust multi-objective optimization scheduling of micro-grids with renewable energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 184-192.
- [20] 宋玉坚, 张建同. 求解双层规划的多目标布谷鸟算法[J]. 运筹与管理, 2017, 26(8): 1-10.
- SONG Yujian, ZHANG Jiantong. Multi-objective cuckoo search algorithm for bi-level programming problems[J]. Operations Research and Management Science, 2017, 26(8): 1-10.
- [21] VALIAN E, MOHANNA S, TAVAKOLI S. Improved cuckoo search algorithm for global optimization[J]. International Journal of Communications and Information Technology, 2011, 1(1): 31-44.
- [22] 杨耀红, 谭攀静. 基于多目标加权灰靶决策的供应链供应商选择[J]. 人民长江, 2012, 43(5): 102-105.
- YANG Yaohong, TAN Panjing. Selection of supplier in supply chains based on multi-objective weighted grey target decision[J]. Yangtze River, 2012, 43(5): 102-105.
- [23] 梁子鹏, 陈皓勇, 王勇超, 等. 含电动汽车的微网鲁棒经济调度[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2647-2656.
- LIANG Zipeng, CHEN Haoyong, WANG Yongchao, et al. Robust economic dispatch of microgrids containing electric vehicles[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2647-2656.
- [24] 李东东, 徐连连, 刘翔, 等. 考虑可削减负荷参与的含风光储微网经济优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 35-41.
- LI Dongdong, XU Lianlian, LIU Xiang, et al. Optimal dispatching of microgrid considering the participation of reducible loads, distributed generators and energy storage units[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 35-41.

收稿日期: 2018-01-08; 修回日期: 2018-06-12

作者简介:

杨欢红(1965—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统优化调度、控制, 可再生能源发电技术; E-mail: 18251302353@163.com

王洁(1994—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统经济调度与运行规划。E-mail: 17621061326@163.com

(编辑 周金梅)