

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.01.024

基于乌鸦搜索算法的孤岛微网多目标优化调度

黄景光¹, 陈波¹, 林湘宁², 吴巍¹, 于楠¹, 叶元¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北宜昌 443002; 2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要:为促进孤岛微网中可再生能源的消纳,减小负荷峰谷差。文中在孤岛微网中引入价格型需求响应,以微网运行成本最低和柴油发电机出力最少为目标,综合考虑功率平衡、抽水蓄能机组启停与工况转换等约束条件,构建了含风电、抽水蓄能和柴油发电机的孤岛微网多目标优化调度模型,并采用乌鸦搜索算法进行求解。仿真结果表明:在孤岛微网中引入价格型需求响应能有效削减负荷峰谷差,经济效益显著。与粒子群优化算法相比,乌鸦搜索算法在收敛速度和全局寻优的能力上具有明显优势。

关键词: 乌鸦搜索算法; 需求响应; 孤岛微网; 优化调度

Multi-objective Optimal Operation of Islanded Microgrid Based on Crow Search Algorithm

HUANG Jingguang¹, CHEN Bo¹, LIN Xiangning², WU Wei¹, YU Nan¹, YE Yuan¹

(1. College of Electrical & New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to promote the renewable energy accommodation of insular island microgrid and reduce the load peak and off-peak difference. In this paper the islanded microgrid introduced price-based demand response, with minimized the cost of operation and diesel generator output as the objective function, considering the constraints of power balance, unit startup-shutdown and state change of pumped storage. A multi objective optimal operation model for insular island microgrid is established, and solved using crow search algorithm(CSA). The simulation results show that the introduction of price-based demand response in the insular island microgrid can effectively reduce the load peak and off-peak difference, and the economic benefit is remarkable. Compared with the particle swarm optimization (PSO) algorithm, the crow search algorithm has obvious advantages in the ability of convergence speed and global optimization.

Key words: crow search algorithm; demand response; islanded microgrid; optimal operation

0 引言

中国海岸线长,岛屿众多,利用可再生能源发电给孤立海岛提供电能是解决海岛供电问题的理想方案^[1]。相对于大电网而言,孤岛微网容量小,抗干扰能力差^[2]。为保证孤岛微网安全、稳定、经济的运行,发电侧必须采取调峰措施。而发电侧的调峰能力往往有限,且是以牺牲能源利用率或者增大装机容量为代价。为了高效合理的利用资源,用电侧也必须采取调峰措施。

微网优化调度是一个复杂的问题,它的优化结果直接影响到微网的经济性与可靠性。目前常用的算法有粒子群优化算法、遗传算法、人工神经网络等^[3]。文[4-5]构建了含有可再生能源与抽水蓄能的独立微电网容量优化配置模型,并使用遗传算法求解。文[6]用粒子群优化算法求解风电—抽水蓄能联合调度的问题,结果表明风电—抽水蓄能联合运行具备削峰填谷的能力。文[7]在海岛微电网中加入海水淡化类可时移负荷,结合海岛的实际情况构建了风/光/储/柴多能互补模型,并用混沌自由搜

收稿日期:2019-05-06; 修回日期:2019-07-10

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51537003)。

Project Supported by the State Key Program of National Natural Science Foundation of China (51537003).

索算法对模型进行求解, 得出了海岛微电网分布式电源容量的最优配置方案。文[8]针对包含风/蓄/柴的独立微网, 建立了考虑系统网架结构特征的优化调度模型。以系统运行成本最小为目标, 采用遗传算法求解。文[9]采用改进的多目标粒子群算法(MOPSO)算法求解以微网综合发电成本最低、环境效益最好、蓄电池损耗最小为目标的微网优化运行问题, 通过多样性维护策略与拉丁超立方抽样等方法使 MOPSO 具有良好的收敛速度与精度。文[10]将粒子群优化算法与混沌理论相结合, 建立了以微网运行成本最低为目标的微网优化运行模型, 通过对 IEEE-14 节点模型的优化验证了算法的有效性。文[11]以微网的经济性和环保性作为优化目标, 综合 MOPSO 与引入模糊相似矩阵的多目标粒子群算法(FMOPSO), 提出了混合策略下的多目标粒子群优化算法(HMOPSO), 结果表明该算法具有良好的寻优能力。

乌鸦搜索算法^[12](crow search algorithm, CSA)作为一种新的群智能仿生算法, 它通过模仿乌鸦藏食这一行为来解决优化问题。文中首先在孤岛微网中引入价格型需求响应(price-based demand response, PBDR), 然后以微网运行成本最低和柴油发电机出力最少为目标, 综合考虑功率平衡、抽水蓄能机组启停与工况转换等约束条件, 构建了孤岛微网多目标优化调度模型。最后采用乌鸦搜算法对模型进行求解。

1 孤岛微网基本结构

1.1 孤岛微网结构

孤岛微网系统包括风电场、抽水蓄能电站、柴油发电机组以及负荷。其典型结构见图1。

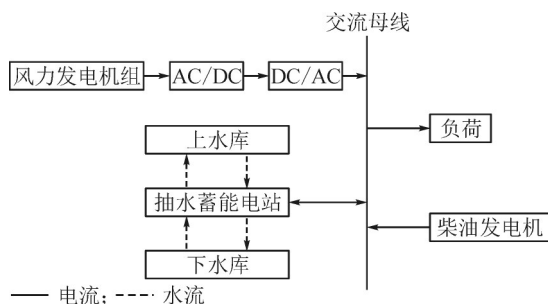


图1 孤岛微网系统结构图

Fig. 1 Structure of island microgrid

风电出力的随机性与波动性较大。因此, 让风电与抽水蓄能电站相配合使出力趋于平稳。孤岛微网系统中, 主要由风电—抽水蓄能电站联合出力给负荷供电。考虑到抽水蓄能电站的最小抽水功

率, 柴油发电机不仅要弥补可再生能源发电出力的不足, 并且可以参与抽水蓄能电站的抽水作业。抽水蓄能电站的综合效率约为75%^[13]。

1.2 价格型需求响应

PBDR通过实施峰谷分时电价, 引导用户合理用电, 削减负荷峰谷差。用户的需求弹性可以表示为^[14]

$$e_{st} = \frac{\Delta P_1^s / P_{10}^s}{\Delta C^t / C_0^t} \begin{cases} e_{st} \leq 0, & \text{if } s=t \\ e_{st} \geq 0, & \text{if } s \neq t \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: ΔP_1^s 为 PBDR 后时段 s 的负荷需求变化量; ΔC^t 为 PBDR 后时段 t 的电价变化量; P_{10}^s 为 PBDR 前时段 s 的负荷需求; C_0^t 为 PBDR 前时段 t 的电价。

PBDR 后, 负荷需求变化量为

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^1 / P_{10}^1 \\ \Delta P_1^2 / P_{10}^2 \\ \vdots \\ \Delta P_1^{24} / P_{10}^{24} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & \cdots & e_{1,24} \\ \vdots & & \vdots \\ e_{24,1} & \cdots & e_{24,24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta C^1 / C_0^1 \\ \Delta C^2 / C_0^2 \\ \vdots \\ \Delta C^{24} / C_0^{24} \end{bmatrix} \quad (2)$$

若峰(peak)、平(flat)、谷(valley)时段集合内任意时段 t 的负荷需求变化比例均一致, 则

$$\begin{bmatrix} \Delta P_1^p / P_{10}^p \\ \Delta P_1^f / P_{10}^f \\ \Delta P_1^v / P_{10}^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{pp} & e_{pf} & e_{pv} \\ e_{fp} & e_{ff} & e_{fv} \\ e_{vp} & e_{vf} & e_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta C^p / C_0^p \\ \Delta C^f / C_0^f \\ \Delta C^v / C_0^v \end{bmatrix} \quad (3)$$

PBDR 后, 负荷需求可以表示为

$$P_1^t = P_{10}^t \times \left(1 + \Delta P_1^q / P_{10}^q\right) \quad t \in t_q \quad (4)$$

式(4)中, q 为峰、平、谷时段。

2 孤岛微网联合优化模型

2.1 目标函数

以孤岛微网系统运行成本最低为目标函数。孤岛微网中引入 PBDR 后, 运行成本主要由机组发电成本和 PBDR 成本构成。因此目标函数 1 可以表示为

$$\min F_1 = F_G + F_{PBDR} \quad (5)$$

而联合运行系统的成本主要来自水泵机组的启停费用、水泵抽水费用以及柴油机组的燃烧成本。 F_G 可以表示为

$$F_G = \sum_{t=1}^T \left[C_p^t P_p^t + C_{su} n_{su}^t + C_{sd} n_{sd}^t + C_{die} f(P_{die}^t) \right] \quad (6)$$

式(6)中: t 表示时间序列; C_p^t 为 t 时段抽水电价; P_p^t 为 t 时段抽水蓄能机组以水泵机组方式运行的抽水功率; C_{su} 和 C_{sd} 为水泵机组的启/停成本; n_{su}^t 和 n_{sd}^t 为 t 时段启/停水泵机组台数; C_{die} 为柴油价格;

$f(P_{\text{die}}^t)$ 表示第 t 时段柴油发电机的能耗,其能耗特性函数一般可用多项式表示^[15]。

$$f(P_{\text{die}}^t) = c_1 P_{\text{die}}^t + c_2 P_{\text{die},r}^t \quad (7)$$

式(7)中: c_1 、 c_2 为多项式系数; P_{die}^t 第 t 小时单台柴机输出的平均发电功率; $P_{\text{die},r}$ 为单台柴机的额定功率。

PBDR 的成本可根据 PBDR 前后的售电收益确定^[16],即

$$F_{\text{PBDR}} = \sum_{t=1}^T (C_0 P_{10}^t - C^t P_1^t) \quad (8)$$

柴油发电机发电成本较高且尾气对环境污染严重^[17]。考虑到能源问题与环保问题,系统中柴油发电机组应尽量减少出力。因此,目标函数2可以表示为

$$\min F_2 = \sum_{t=1}^T (P_{\text{die}}^t) \quad (9)$$

2.2 约束条件

1)风电。由于风力发电建成之后日发电成本较低,所以应尽可能的多发电,故其约束条件为

$$0 \leq P_w^t \leq P_w^{\max} \quad (10)$$

式(10)中: $P_w^{\max}$ 为风力发电机组出力上限。

2)功率平衡约束。

PBDR 前:

$$\sum_{t=1}^T (P_w^t + P_h^t + P_{\text{die}}^t) = \sum_{t=1}^T (P_{10}^t + P_p^t) \quad (11)$$

PBDR 后:

$$\sum_{t=1}^T (P_w^t + P_h^t + P_{\text{die}}^t) = \sum_{t=1}^T (P_1^t + P_p^t) \quad (12)$$

3)抽水蓄能电站库容约束。文中所采用抽水蓄能电站,以大海作为电站的下水库,因此不考虑下水库库容变化。上水库的约束条件为

$$V_u^{\min} \leq V_u^t \leq V_u^{\max} \quad (13)$$

$$V_u^{t+1} = V_u^t + \Delta t \left(\eta_p P_p^t - \frac{P_h^t}{\eta_h} \right) \quad (14)$$

$$|V_u^0 - V_u^T| \leq \delta (V_u^{\max} - V_u^{\min}) \quad (15)$$

式(13)–(15)中: $V_u^{\max}$ 、 $V_u^{\min}$ 分别为上水库容量的上下限; V_u^t 为第 t 时段上水库的库容; η_p 、 η_h 分别为抽水蓄能电站的抽水与发电效率; Δt 为每个时段的时长; V_u^0 、 V_u^T 分别为上水库的初末库容; δ 为最大库容变动系数。

4)抽水蓄能电站机组启停及功率约束。一般认为抽水蓄能电站机组在以水泵方式工作时不应启动水轮机发电,反之,以水轮机方式工作时不

应该启动水泵抽水。文[18]中采用二次约束来解决此问题,不过二次约束求解过程复杂。文[19]通过旗变量标记机组的工况,旗变量求解虽然简单,但是约束条件中没有考虑到最小抽水功率。针对上述问题,引入符号函数 $\text{sgn}(x)$ 与阶跃函数 $\varepsilon(x)$ 对此进行约束。

$$n_p^t \leq N_{\text{hp}} \quad (16)$$

$$\rho^t = [1 - \text{sgn}(n_p^t)] [\varepsilon(P_h^t - P_h^{\min})] \quad (17)$$

$$\rho^t \in \{0, 1\} \quad (18)$$

$$\rho^t \cdot P_h^{\min} \leq P_h^t \leq \rho^t \cdot P_h^{\max} \cdot N_{\text{hp}} \quad (19)$$

$$n_p^t \cdot P_p^{\min} \leq P_p^t \leq n_p^t \cdot P_p^{\max} \quad (20)$$

$$\sum_{t=1}^T (n_{\text{su}}^t + n_{\text{sd}}^t) \leq 2N_{\text{hp}} \quad (21)$$

$$n_p^{t+1} = n_p^t + n_{\text{su}}^{t+1} - n_{\text{sd}}^{t+1} \quad (22)$$

式(16)–(20)中: n_p^t 为第 t 时段水泵开启的总数; ρ^t 为旗变量,值为1时表示机组处于抽水工况,值为0时表示机组处于非抽水工况; N_{hp} 为抽水蓄能电站机组总台数; $P_h^{\max}$ 、 $P_h^{\min}$ 分别为水轮机出力的上下限; $P_p^{\max}$ 、 $P_p^{\min}$ 分别为水泵抽水功率的上下限; n_{su}^t 、 n_{sd}^t 分别为 t 时段启/停水泵机组台数。文中取抽水蓄能电站的综合效率为75%。

式(16)–(18)为0、1变量与抽蓄电站中机组启停的关系;式(19)为考虑了水轮机最小出力的约束条件。

3 乌鸦搜索算法

3.1 算法简介

乌鸦的聪明行为之一是,它们把多余的食物藏在特定的隐蔽处,并在需要时回忆食物的位置。此外,乌鸦有一个贪婪的习惯,它们会跟着其他乌鸦去寻找它们的藏食之处。如果乌鸦找到了其他乌鸦的藏食之处,便会偷走隐藏的食物。乌鸦搜索算法(CSA)通过模仿这种行为,提供了一种有效的方法来解决优化问题。

在 CSA 中,第 i 只乌鸦的位置用向量 $\mathbf{x}^{i, \text{iter}}$ ($i = 1, 2, \dots, N$; $\text{iter} = 1, 2, \dots, \text{iter}_{\max}$) 表示。其中, $\mathbf{x}^{i, \text{iter}} = [x_1^{i, \text{iter}}, x_2^{i, \text{iter}}, \dots, x_d^{i, \text{iter}}]$, N 为乌鸦的数量, $\text{iter}_{\max}$ 是最大迭代次数, d 是决策变量的维数。每只乌鸦都有记忆中最优的藏食之处。在第 iter 次迭代时,藏食位置为 $m^{i, \text{iter}}$ 。乌鸦试图搜索和跟踪其他乌鸦来发现比现有的更好的食物来源。

在 CSA 的每一次迭代中,为了更新乌鸦 i 的位

置, 乌鸦 i 随机选择另一只乌鸦 (例如 j)。乌鸦 i 试图跟随乌鸦 j 接近它的藏食之处, $m^{j, iter}$ 。根据感知概率 (AP), 将有如下两种情况:

1) 情况 1。如果乌鸦 j 不知道被乌鸦 i 跟踪, 乌鸦 i 更新它的位置为

$$\mathbf{x}^{i, iter+1} = \mathbf{x}^{i, iter} + r_i \times fl^{i, iter} \times (m^{j, iter} - \mathbf{x}^{i, iter}) \quad (23)$$

式(23)中: r_i 是区间 $[0, 1]$ 之间均匀分布的随机数; $fl^{i, iter}$ 是乌鸦 i 在第 $iter$ 次迭代中的飞行距离。飞行距离决定移动到选定隐藏位置的步长。飞行距离较小则局部搜索能力强, 飞行距离较大则全局搜索能力强。

2) 情况 2: 如果乌鸦 j 知道被乌鸦 i 跟踪, 乌鸦 j 会随机进入搜索空间的位置来愚弄乌鸦 i 。

根据情况 1 与情况 2, 乌鸦的位置更新为

$$\mathbf{x}^{i, iter+1} = \begin{cases} \mathbf{x}^{i, iter} + r_i \times fl^{i, iter} \times (m^{j, iter} - \mathbf{x}^{i, iter}) & r_j \geq AP^{j, iter} \\ \text{a random position} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (24)$$

式(24)中: r_j 是区间 $[0, 1]$ 之间均匀分布的随机数; $AP^{j, iter}$ 表示乌鸦 j 在第 $iter$ 次迭代后的 AP 。较小的 AP 值增加激烈化, 较大的 AP 值增加多样化。

3.2 算法步骤

乌鸦搜索算法流程图见图 2。算法步骤如下:

1) 初始化参数。定义决策变量, 设置乌鸦的数量 (N), 最大迭代次数 ($iter_{max}$), 飞行距离 (fl), 和感知概率 (AP)

2) 初始化乌鸦的位置和记忆。 N 只乌鸦随机分布在一个 d 维搜索空间。在首次迭代中, 假设乌鸦把食物隐藏在初始位置。

3) 评估适应度 (目标) 函数。计算每只乌鸦对应的目标函数值。

4) 更新乌鸦位置。根据式(23)生成新的位置。

5) 检测新位置的可行性。检测每只乌鸦的新位置的可行性。如果乌鸦的新位置是可行的, 乌鸦则会更新它的位置。否则, 乌鸦停留在当前位置, 不会移动到新的位置。

6) 评估新位置的适应度函数。计算每只乌鸦新位置的适应度函数值。

7) 更新记忆。如果乌鸦的新位置的适应度函数值比记忆位置的适应度函数值更好, 乌鸦就通过新的位置更新它的记忆。

8) 迭代终止条件。重复步骤 4) — 7) 直至达到最大迭代次数。当满足终止条件时, 输出最优目标函数值对应的位置。

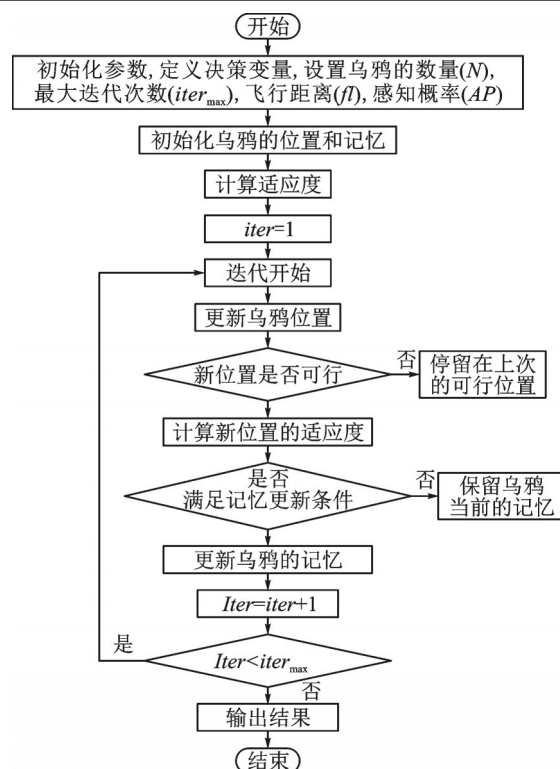


图 2 乌鸦搜索算法流程图

Fig. 2 The process of CSA

4 算例分析

4.1 参数设置

以文[20]所述的海岛微网系统为例, 参照文[21]划分负荷的峰谷平时段。PBDR前电价为 1.6 元/kW·h, PBDR后峰时段电价为 2 元/kW·h, 谷时段电价为 1.0 元/kW·h。电力价格弹性矩阵见文[22]。取抽水蓄能电站中水轮机最小出力为额定出力的 30%^[23]。

4.2 引入 PBDR 后分析

引入 PBDR 前后负荷需求见图 3。

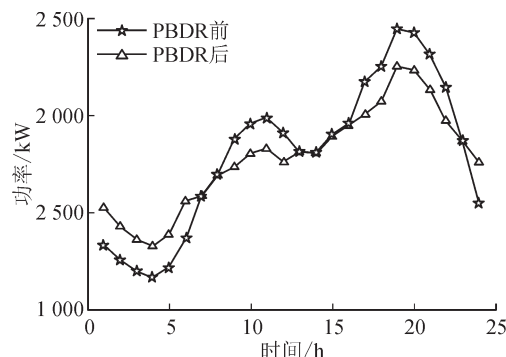


图 3 PBDR 前后负荷需求

Fig. 3 Load demand before and after PBDR

孤岛微网中引入 PBDR 后, 峰时段部分负荷被削减和转移。17:00-22:00 之间负荷需求减少了 1 065.41 kW·h, 0:00-6:00 之间负荷需求增加了

1 047.04 kW·h。可见在孤岛微网中引入PBDR后能有效减小负荷峰谷差,平滑负荷曲线,达到削峰填谷的目的。

在CSA算法中,设置乌鸦的数量为200,最大迭代次数500次,飞行距离为2,感知概率为0.1。以1 h为一个时间段,对一天24 h进行优化调度。通过理想点法选取一个折中解。抽水蓄能机组及柴油发电机的出力安排见图4、5。

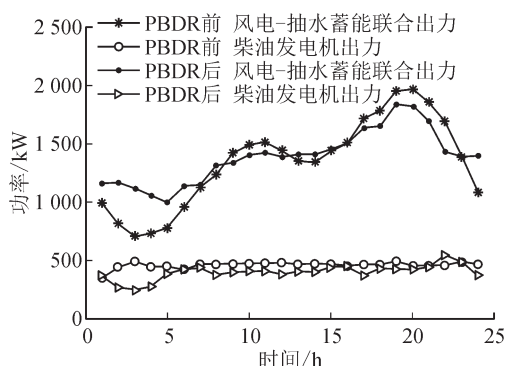


图4 PBDR前后风蓄联合出力及柴油机出力曲线

Fig. 4 Output curve of wind-storage joint system

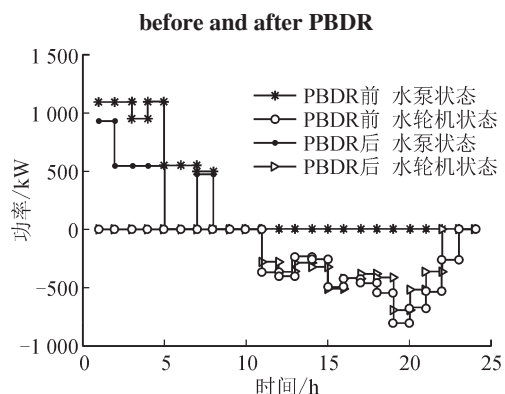


图5 PBDR前后抽蓄电站水轮机以及水泵状态出力

Fig. 5 Output curve of pumped-storage power station in pump mode and turbine mode before and after PBDR

引入PBDR前后效益对比见表1。

表1 PBDR前后效益对比

Table 1 Comparison of benefit before and after PBDR

方案	孤岛微网总成本/元	抽水蓄能机组启停费用/元	柴油发电机燃烧成本/元
PBDR前	27 478.43	480.00	17 615.95
PBDR后	18 310.79	720.00	15 253.80

由表1可知,引入PBDR后孤岛微网总成本降低了33.4%,可见,在孤岛微网中引入PBDR后经济效益显著。由图4、5可知,在孤岛微网中引入PBDR后,谷时段风电-抽蓄电站联合出力明显增加,峰时段风电-抽水蓄能联合出力比引入PBDR前略低,这主要是因为引入PBDR后,峰时段的负荷需求

也降低了不少。此外,引入PBDR后,柴油发电机的出力也有所降低。总之,引入PBDR不仅促进了风电的消纳,而且使孤岛微网系统更加清洁环保。

4.3 乌鸦搜索算法与粒子群优化算法比较

仅考虑目标函数1,以引入PBDR后的负荷为例,分别使用乌鸦搜索算法与粒子群优化算法对上述算例进行求解。两种算法的收敛曲线见图6。

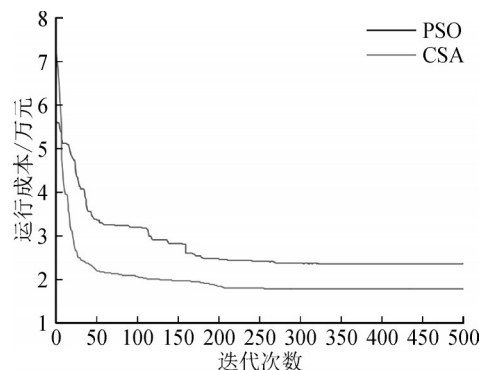


图6 PSO与CSA收敛对比图

Fig. 6 Convergence curve of PSO and CSA

通过对比CSA算法与PSO算法的收敛曲线,CSA算法迭代257次后趋于稳定,收敛结果为17 771.52元;PSO算法迭代352次后收敛结果为23 342.49元。由此可知CSA算法在收敛速度以及全局寻优的能力上均优于PSO算法。

5 结论

文中在孤岛微网中引入了价格型需求响应,建立了孤岛微网多目标优化调度模型,并采用乌鸦搜索算法求解。算例分析表明:

1)在孤岛微网中引入PBDR后,能减少峰时段用电量,增加谷时段用电量,削峰填谷效应显著。有利于孤岛微网的稳定。

2)引入PBDR后,可以促进风电的消纳,降低柴油发电机的出力。不仅经济效益显著,而且还具有一定的环保性。

3)乌鸦搜索算法在收敛速度以及全局寻优的能力上均优于粒子群算法。

参考文献:

- [1] 张建华,于雷,刘念,等.含风/光/柴/蓄及海水淡化负荷的微电网容量优化配置[J].电工技术学报,2014,29(2): 102-112.
ZHANG Jianhua, YU Lei, LIU Nian, et al. Capacity configuration optimization for island microgrid with wind/photovoltaic/ diesel/ storage and seawater desalination load [J]. Transactions of China electrotechnical society, 2014, 29

- (2): 102-112.
- [2] 赵乃卓, 王兆博. 基于ACPSO算法的独立微电网优化配置研究[J]. 高压电器, 2017, 53(10): 190-197.
ZHAO Naizhuo, WANG Zhaobo. Research of optimization configuration of independent microgrid based on ACPSO algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10): 190-197.
 - [3] 胡汉梅, 李静雅, 黄景光. 基于鸡群算法的微网经济运行优化[J]. 高压电器, 2017, 53(1): 119-125.
HU Hanmei, LI Jingya, HUANG Jingguang. Economic operation optimization of micro-grid based on chicken swarm optimization algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1): 119-125.
 - [4] MA T, YANG H X, LU L, et al. Optimal design of an autonomous solar - wind - pumped storage power supply system[J]. Applied Energy, 2015, 160(81): 728-736.
 - [5] MA T, YANG H X, LU L, et al. Pumped storage-based standalone photovoltaic power generation system: Modeling and techno - economic optimization[J]. Applied Energy, 2015, 137(64): 649-659.
 - [6] 盛四清, 孙晓霞. 利用风蓄联合削峰的电力系统经济调度[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2484-2489.
SHENG Siqing, SUN Xiaoxia. An economic dispatching strategy of peak load shifting by wind farm and pumped storage plant[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2484-2489.
 - [7] 刘柏良, 黄学良, 李 军. 计及可时移负荷的海岛微网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4250-4258.
LIU Bailiang, HUANG Xueliang, LI Jun. Optimal sizing of distributed generation in a typical island microgrid with time - shifting load[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4250-4258.
 - [8] 张德举, 郭 力, 王成山. 高风电渗透率下的独立型微网优化调度方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(9): 1-7.
ZHANG Deju, GUO Li, WANG Chengshan. Optimal dispatching method of isolated microgrids with high wind power penetration rate[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(9): 1-7.
 - [9] 胡晓通, 刘天琪, 何 川, 等. 计及蓄电池损耗特性的微网多目标优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2674-2681.
HU Xiaotong, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Multi - objective optimal operation of microgrid considering the battery loss characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2674-2681.
 - [10] 殷丽娟, 赵熙临, 梅 真. 基于混沌粒子群优化算法的微电网优化运行技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(5): 55-61.
YIN Lijuan, ZHAO Xilin, MEI Zhen. Optimizing technology for micro grid operation based on chaos particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSU - EPSA, 2016, 28(5): 55-61.
 - [11] 邱晓燕, 赵劲帅, 史光耀, 等. 基于HSMOPSO算法的微电网经济与环保协同优化方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1223-1230.
QIU Xiaoyan, ZHAO Jinshuai, SHI Guangyao, et al. Collaborative optimization method of economic and environment in microgrid based on HSMOPSO[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1223-1230.
 - [12] ALIREZA A. A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm[J]. Computers & Structures, 2016, 169(21): 1-12.
 - [13] 黄 庶, 林舜江, 刘明波. 含风电场和抽水蓄能电站的多目标安全约束动态优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 112-121.
HUANG Shu, LIN Shunjiang, LIU Mingbo. Multi - objective security constrained dynamic optimal dispatch with wind farms and pumped storage stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 112-121.
 - [14] 鞠立伟, 秦 超, 吴鸿亮, 等. 计及多类型需求响应的风电消纳随机优化调度模型[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1839-1846.
JU Liwei, QIN Chao, WU Hongliang, et al. Wind power accommodation stochastic optimization model with multi - type demand response[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1839-1846.
 - [15] 魏繁荣, 随 权, 林湘宁, 等. 考虑可转移负荷效率的风/光/柴/蓄孤岛微网日运行能量控制优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 42(5): 1-8.
WEI Fanrong, SUI Quan, LIN Xiangning, et al. Optimized energy control strategy about daily operation of islanded microgrid with wind / photovoltaic / diesel / battery under consideration of transferable load efficiency[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 42(5): 1-8.
 - [16] 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 virtual power plant connecting with wind-photovoltaic-energy storage system considering uncertainty and demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3590-3597.
 - [17] 黎嘉明, 郑雪阳, 艾小猛, 等. 独立海岛微网分布式电源容量优化设计[J]. 电工技术学报, 2016, 31(10): 176-184.
LI Jiaming, ZHENG Xueyang, AI Xiaomeng, et al. Optimal design of capacity of distributed generation in island standalone microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(10): 176-184.
 - [18] 胡泽春, 丁华杰, 孔 涛. 风电一抽水蓄能联合日运行

- 优化调度模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 40(2): 36-41.
- HU Zechun, DING Huajie, KONG Tao. A joint daily operational optimization model for wind power and pumped-storage plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 40(2): 36-41.
- [19] JAVIER G, DE-LA-MUELA-ROCÍO R, LUZ-MATRES S, et al. Stochastic joint optimization of wind generation and pumped - storage units in an electricity market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2):460-468.
- [20] 范刘洋, 汪可友, 李国杰, 等. 含有海水抽蓄电站的海岛微网优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 382-386.
- FAN Liuyang, WANG Keyou, LI Guojie, et al. A optimization dispatch study of micro grid with seawater pumped storage plant in isolated islands[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 382-386.
- [21] 孙 强. 基于价格型需求响应决策优化模型的应用研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2016.
- SUN Qiang. The application research of decision optimization model based on price-demand response[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2016.
- [22] 宋艺航, 谭忠富, 李欢欢, 等. 促进风电消纳的发电侧、储能及需求侧联合优化模型[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 610-615.
- SONG Yihang, TAN Zhongfu, LI Huanhuan, et al. An optimization model combining generation side and energy storage system with demand side to promote accommodation of wind power[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 610-615.
- [23] 梅祖彦. 抽水蓄能发电技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000, 16-18.
- MEI Zuyan. Technology of pumped storage power generation[M]. Beijing: Machine Industry Press, 2000, 16-18.
- 黄景光(1968—), 男, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护和微电网优化运行。
- 陈 波(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网优化运行。
- 林湘宁(1970—), 男, 教授, 研究方向包括电力系统保护、分析与控制、新型发电技术和新型电网技术等。
- 吴 巍(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网优化运行。
- 于 楠(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与控制。
- 叶 元(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网优化运行。