

基于改进乌鸦搜索算法的微电网多目标优化

赵才¹, 张志飞^{1*}, 黎永强², 牛健¹, 王坤¹

¹佛山科学技术学院自动化学院, 广东 佛山

²广东立胜综合能源服务有限公司, 广东 佛山

Email: 644197884@qq.com, *zhifeizhang@sina.com

收稿日期: 2020年10月5日; 录用日期: 2020年10月20日; 发布日期: 2020年10月27日

摘要

为响应国家节能减排的号召, 对微电网中分布式电源的出力进行合理的发电调度, 将经济成本最小和环境成本最低作为目标函数, 并建立数学模型, 才用改进的乌鸦搜索算法(GCSA)对该模型进行求解。通过案例仿真并与传统的乌鸦搜索算法(CSA)、遗传算法(GA)和粒子群算法(PSO)相比, 验证了所提模型及算法能够有效地降低经济成本和环境成本, 改进的乌鸦搜索算法具有更好的寻优能力。

关键词

微电网, 分布式电源, 乌鸦搜索算法, 改进的乌鸦搜索算法

Multi-Objective Optimization of Microgrid Based on Improved Crow Search Algorithm

Cai Zhao¹, Zhifei Zhang^{1*}, Yongqiang Li², Jian Niu¹, Kun Wang¹

¹School of Automation, Foshan University of Science and Technology, Foshan Guangdong

²Guangdong Raising Synthesis Energy Services Co., Ltd., Foshan Guangdong

Email: 644197884@qq.com, *zhifeizhang@sina.com

Received: Oct. 5th, 2020; accepted: Oct. 20th, 2020; published: Oct. 27th, 2020

Abstract

In response to the national call for energy conservation and emission reduction, the distributed power output in the micro-grid is to be dispatched reasonably; while the lowest economic cost and the environmental cost are taken as the objective function, so as to establish mathematical models, as well as adopting the improved crow search algorithm (GCSA) to solve the model. Based on case

*通讯作者。

文章引用: 赵才, 张志飞, 黎永强, 牛健, 王坤. 基于改进乌鸦搜索算法的微电网多目标优化[J]. 计算机科学与应用, 2020, 10(10): 1777-1788. DOI: 10.12677/csa.2020.1010188

simulation and compared with the traditional crow search algorithm (CSA), genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization (PSO), it is verified that the proposed model and algorithm can effectively reduce economic and environmental costs. In addition, the improved crow search algorithm (GCSA) has better optimization capabilities.

Keywords

Microgrid, Distributed Power Supply, Crow Search Algorithm, Improved Crow Search Algorithm

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

微电网运行优化的求解本质上是一个多目标多约束条件的非线性优化的问题。传统的优化算法对解决多目标多约束条件的非线性问题成效差。随着智能算法的兴起,例如:粒子群算法、遗传算法、鸟群算法、蚁群算法等。对解决多目标多约束条件的非线性问题上有显著的效果,但是在解决此类问题上,各智能算法有利有弊。例如:文献[1]针对微电网多目标优化调度问题,作者采用二次元比较法来对每一项指标进行权重分配,然后通过线性加权方法将多目标问题转换为单目标问题,最后采用遗传算法进行求解。文献[2]为合理调度微电网中各分布式电源的出力,建立以经济成本最低和环境效益最好为目标函数,建立优化模型,并采用细菌觅食算法对该模型进行求解。文献[3]提出一种混沌遗传算法,该算法以种群优化状态自适应调整搜索精度,保证优化向 Pareto 全局最优解集方向进行。结果显示,该方法降低了运行费用,提高了运行效益。文献[4]作者针对互联区域发电调度不协调的问题,将发电成本和环境成本最小为目标函数。提出了一种新的分区设置多目标权重的方案,并按照电网规则,对其进行分布式优化。文献[5]考虑能源和环境的问题,将购电成本和治理环境成本作为目标,建立优化模型,引领多目标优化潮流。文献[6]为研究微电源的合理调度,建立微电网优化模型,并采用遗传算法对该模型进行求解,最后得到各微电源的合理配置。文献[7]以微电网的经济成本和电压偏差为目标函数,并对每一个目标设置不同的权重,最后将多目标转化为单目标,采用粒子-细菌觅食算法对模型进行求解,最终通过实例验证了有效性,但权重的选取具有主观性,不能反映各目标之间的矛盾关系。文献[8]针对用电不平衡的问题,作者采用退火算法与 BP 神经网络相结合,对日发电量进行预测尽可能达到用电平衡,降低微电网运行费用,提高微电网的运行效益。文献[9]作者提出改进的自适应智能技术来合理安排能量的存储与使用,有效避免了能量的过度浪费问题。文献[10]为提高微电网的经济效益,作者提出一种新型的资源管理分配方法,其中采用遗传算法和模糊逻辑来对微电网的运行进行合理配置。文献[11]作者以用户的停电成本最低为目标函数,建立优化模型,采用改进的粒子群算法求解,但粒子群算法容易陷入局部最优,需要进行多次运行才可以得出最优解。文献[12]作者采用深度学习的方法来预测分布式带能源的输出,模糊逻辑用于蓄电池的充放电调度,以最大程度地降低经济费用 and 环境污染。文献[13]考虑了多种分布式能源的经济模型,但该模型只考虑单一目标的优化,相对简单。文献[14]作者提出了由光伏电池,柴油发电机,风力涡轮机和蓄电池组成的微电网的最佳调度模型。并采用和谐搜索(HS)和微分进化(HE)结合求得该模型的最优解。

乌鸦搜索算法作为一种新兴的智能算法,它通过乌鸦把食物隐藏到最好的位置这一行为来解决优化问题。常规的乌鸦搜索算法是通过随机选择一只乌鸦进行学习,这样乌鸦有较大可能移动到较差乌鸦附近,容易陷入局部最优,需要进行多次运行才可以得出最优解。本文提出改进的乌鸦搜索算法,提高了

乌鸦的学习能力，每次乌鸦在选择目标时，都会在所有种群中随机选择三个目标乌鸦进行学习，从而跳出局部最优，尽可能达到全局最优，极大提高了收敛速度。不仅如此，常规的乌鸦搜索算法，生成的新解只包含了父代的信息，而改进的乌鸦搜索算法，生成的新解不仅包含来自父代的信息，也包括一些来自迄今为止最好的粒子的信息，从而提高了改进的乌鸦搜索算法(GCSA)的开发能力。本文为解决微电网发电过程中的发电成本高、环境污染的问题，建立以微电网的经济成本和环境成本为目标函数，构建了孤岛、并网型微电网多目标优化调度模型。并用 GCSA 进行求解，实验结果表明，与传统的乌鸦搜索算法(CSA)、遗传算法(GA)和粒子群算法(PSO)相比，GCSA 具有更好的寻优能力。

2. 微电网模型运行优化函数

微电网优化目标函数

微电网优化调度是以在满足用户负荷需求和有一定的约束条件的目标函数为前提，采用合理的控制策略或者某些智能算法来优化各分布式出力情况，以使得系统运行结果的多目标或某一单目标函数达到最优。微电网的组成方式多种多样。微电网的结构一般有分布式能源(DER)、能量存储装置、控制器和负载等组成。其中 DER 包括：光伏、风能、蓄电池、燃料电池和柴油发电机等。本文采用的微电网系统结构如图 1 所示。

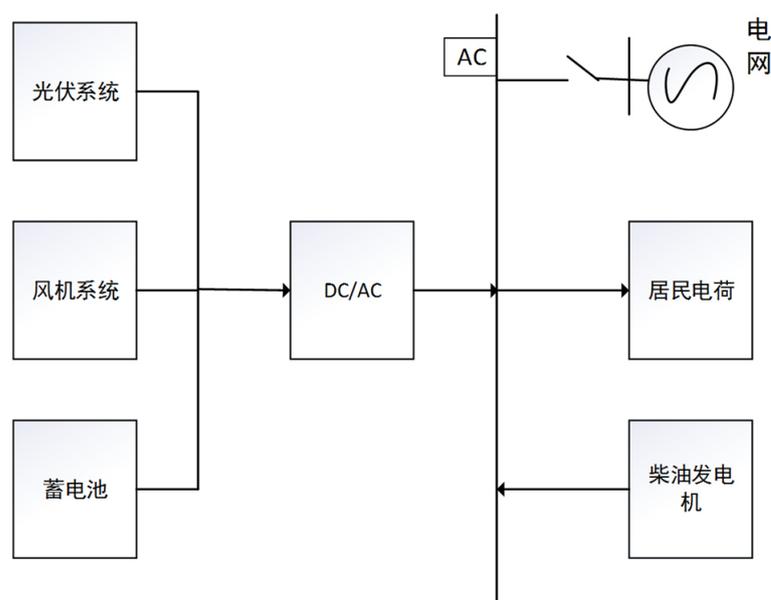


Figure 1. Microgrid structure diagram
图 1. 微电网结构图

在环境污染日趋严重的全球背景下，发电调度的决策从单一的只考虑经济效益变成了越来越多的考虑经济效益和环境保护的相互协调，从而目标函数变成一个多目标问题，两者之间相互制约又相互协调，其通用模型如公式(1)：

$$\begin{aligned} \min F(x) &= \min \left([f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T \right) \\ \text{s.t. } x &\in \Omega \\ G(x) &= 0 \\ H(x) &\leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中: x 是优化变量; f_i 是第 i 个优化目标; Ω 是可行解的解决的方案空间; G 和 H 为在可行域内等式和不等式的约束条件。

本文考虑了微电网的经济效益和环境效益的双重目标, 其目标函数如下:

$$F(x) = \min \left(\left[f_c(x), f_e(x) \right]^T \right) \quad (2)$$

式(2)中: $f_c(x)$ 为经济效益; $f_e(x)$ 为环境效益; x 为微电网模型中的优化变量, 例如, 在动态优化模型调度中, 它可以是分布式电源的充放电功率, 以及每个调度期间的与大电网之间的交互功率作为优化变量。

本文针对微电网的经济效益主要考虑了运行和维护成本、燃料成本、购电成本以及电池的折旧成本, 公式如下:

$$f_c(x) = C_{Ec}(x) + C_{Mn}(x) + C_{Fuel}(x) + C_{Bss}(x) \sum_{i, p_{bss,i} > 0}^H P_{bss,i} \quad (3)$$

式(3)中: C_{Ec} 为电网的购电成本; C_{Mn} 为设备的运行和维护成本; C_{Fuel} 为燃料成本; C_{Bss} 为电池放电的折旧成本; $P_{bss,i}$ 表示 i 期间电池的充放电功率, 正数表示放电, 负数表示充电; H 为调度期间的总时间。

环境效益主要考虑污染气体的排放和颗粒物对环境的影响, 为了反映不同污染物对环境的影响, 计算环境效益的公式如下:

$$f_e(x) = \sum_{i=1}^n (V_{e,i} Q_i(x) + V_i) \quad (4)$$

式(4)中: $V_{e,i}$ 为治理第 i 种污染物的所花费用; n 为污染物的种类; $Q_i(x)$ 为污染物 i 的排放量; V_i 排放污染物 i 的罚款。

3. 算法优化

3.1. 传统的乌鸦搜索算法

乌鸦搜索算法作为一种新兴的智能算法, 主要通过乌鸦藏食这一行为, 提供了一种解决优化问题的方法。即乌鸦会把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。

在 CSA 中, 第 i 只乌鸦的位置用向量 $x^{i,iter}$ ($i=1,2,\dots,Q, iter=1,2,\dots,N$) 表示。其中 $x^{i,iter} = [x_1^{i,iter}, x_2^{i,iter}, x_3^{i,iter}, \dots, x_d^{i,iter}]$, N 表示迭代次数, Q 表示乌鸦的数量, d 表示决策变量的维数。每只乌鸦都有记忆中的最好食物的位置 $m^{i,iter}$, 在迭代中乌鸦 x 随机跟随一只乌鸦 j 去偷取食物, 这时候根据感知概率(AP)会有两种情况找到了其他乌鸦的藏食之处, 便会偷走隐藏的食物。通过乌鸦藏食这一行为, 提供了一种解决优化问题的方法。

1) 乌鸦 j 不知道乌鸦 i 在后面跟随着, 这是乌鸦 i 更新自己的位置为:

$$x^{i,iter+1} = x^{i,iter} + r_i \times fl^{i,iter} \times (m^{j,iter} - x^{i,iter}) \quad r_i \gg AP \quad (5)$$

式(5)中: r_i 表示的是区间 $[0,1]$ 随机数, $fl^{i,iter}$ 表示乌鸦 i 在第 $iter$ 次迭代中的飞行距离。飞行距离的大小决定了其搜索能力的强弱, 距离小局部搜索能力强, 距离大全局搜索能力强。

2) 乌鸦 j 知道乌鸦 i 在后面跟随着, 这时候乌鸦 j 会随机进入搜索空间的位置以此骗乌鸦 i 。

3.2. 改进的乌鸦搜索算法

针对常规的乌鸦搜索算法的缺点, 本文提出改进的乌鸦搜索算法, 每次乌鸦在选择目标时, 都会在所有种群中随机选择三个目标乌鸦, 选择增加多样性, 从而跳出局部最优。不仅如此, 常规的乌鸦搜索算法, 生成的新解只包含了父代的信息, 而改进的乌鸦搜索算法, 生成的新解不仅包含来自父代的信息,

也包括一些来自迄今为止最好的粒子的信息。从而提高了 GCSA 的开发能力。即改进的更新公式如下:

$$\begin{cases} x^{i,iter+1} = x^{i,iter} + r_i \times fl^{i,iter} \times (m^{j,iter} - x^{i,iter}) \times fl^{i,iter} \times (G_{best} - x^{i,iter}) & r_i \geq AP \\ \text{a random position} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: G_{best} 为乌鸦最好的位置, r_i 表示的是区间[0,1]随机数, $fl^{i,iter}$ 表示乌鸦 i 在第 $iter$ 次迭代中的飞行距离, AP (取 0.1)为感知概率, $m^{i,iter}$ 表示每只乌鸦都有记忆中的最好食物的位置。具体算法流程如图 2 所示。

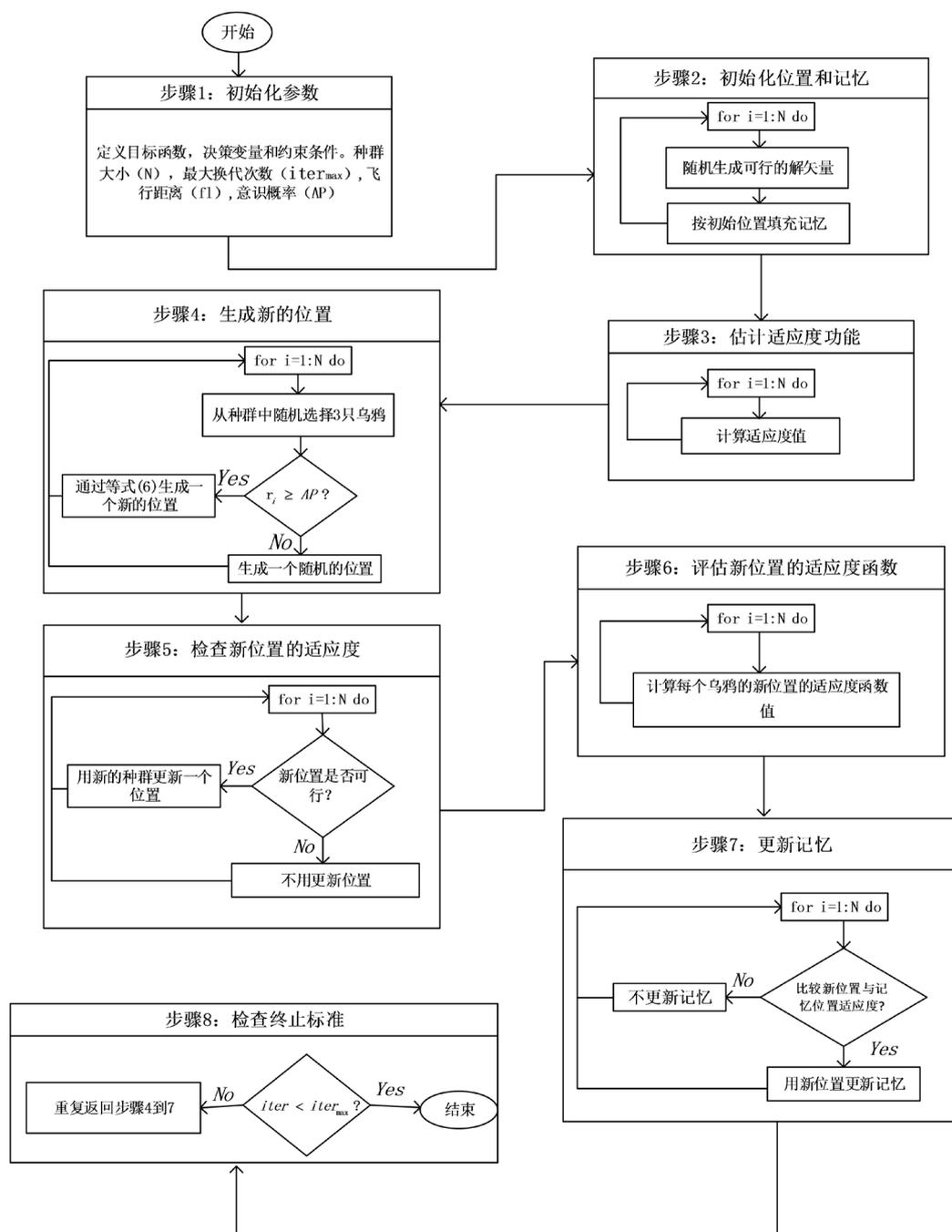


Figure 2. GCSA algorithm flow chart
图 2. GCSA 算法流程图

4. 算例分析

4.1. 算例基础数据

本文以 MATLAB 为仿真平台。各分布式电源的具体参数如表 1 所示。污染物的排放参数如表 2 所示。

Table 1. Parameters of distributed power sources in microgrid
表 1. 微电网中各分布式电源参数

DG 类型	功率下限/kw	功率上限/kw	运行成本/(元/kg)	燃料成本/(元/kg)
WT	0	150	0.045	0
PV	0	100	0.0096	0
DE	0	150	0.0789	0.211
BSS	-60	60	0.055	0

Table 2. Pollutant treatment costs and emission coefficients
表 2. 污染物的治理费用和排放系数

污染物类型	排放系数/(g/kw) DE	治理费用/(元/kg)
CO ₂	4.33	0.02805
NO _x	2.32	8.5
SO ₂	0464	5.95

本次仿真以一天为一个周期，取单位时段 Δt 为 1 小时。数据来源以广东某地区用户用电情况，如图 3 所示为一天之中 PV、WT 和负载的功率变化曲线图。

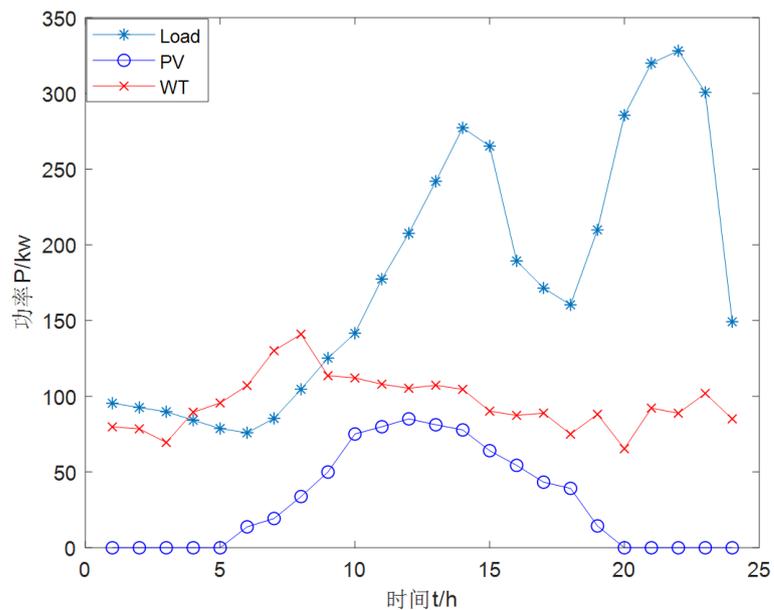


Figure 3. Residential load, PV, WT power change curve
图 3. 居民负荷、PV、WT 功率变化曲线图

参照广东某地区电价, 各时段的售电与购电的价格如表 3 所示。

Table 3. Prices of electricity sales and purchases in each period
表 3. 各时段售电与购电的价格

时段	峰时段	谷时段	平时段
时间(h)	10:00~14:00 18:00~20:00	07:00~09:00 15:00~17:00 21:00~22:00	00:00~06:00 23:00~24:00
购电价格(元)	0.69	0.46	0.31
售电价格(元)	0.64	0.38	0.23

4.2. 孤岛算例分析

本文考虑以单日微电网优化运行问题。取单位时间段为 1 小时, $n = 24$ 。微电网模型包含风能系统、光伏系统、蓄电池和柴油发电机, 属于孤岛模式。

4.2.1. 风力(WT)涡轮机模型

风力涡轮机的输出功率受风速、风向、涡轮机的位置等因素影响。因此风力涡轮机的输出功率 P_{WT} 可以近似表示为:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & 0 \leq u \leq u_i \\ P_{WT,rate} (u - u_i) / (u_r - u_i) & u_i \leq u \leq u_r \\ P_{WT,rate} & u_r \leq u \leq u_0 \\ 0 & u_0 \leq u \end{cases} \quad (7)$$

其中: $P_{WT,rate}$ —— 风机额定输出功率;

u_i —— 为切入风速;

u_0 —— 为切出风速;

u_r —— 为额定风速。

风力涡轮机功率平衡约束:

$$P_{WT_{min}} \ll P_{WT} \leq P_{WT_{max}} \quad (8)$$

4.2.2. 光伏(PV)模型

光伏系统是将太阳能转换为电能的装置, 它的输出功率受光照强度和温度等因素的影响, 输出功率计算公式为:

$$P_{pv} = P_{stc} \frac{G_C}{G_{STC}} [1 + K (T_s - T_{STC})] \quad (9)$$

其中: G_{STC} —— 标准条件下的光照强度;

P_{stc} —— 标准条件下的最大输出功率;

T_{STC} —— 参考温度;

G_C —— 实际光照强度;

T_s —— 工作温度;

K —— 功率温度系数。

光伏系统功率平衡约束:

$$P_{PV_{\min}} \ll P_{PV} \ll P_{PV_{\max}} \quad (10)$$

4.2.3. 蓄电池(BSS)模型

蓄电池 t 时刻的充电或放电的状态可表示为:

$$\begin{cases} SOC(t) = SOC(t-1) - P_k(t)\eta_c P_k(t) \geq 0 \\ SOC(t) = SOC(t-1) - P_k(t)\eta_d P_k(t) \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中: $SOC(t)$ 、 $SOC(t-1)$ ——代表的是 t 、 $t-1$ 时刻剩余的电量;

$P_k(t)$ ——代表蓄电池的充放电功率($P_k(t) \geq 0$ 代表充电状态、 $P_k(t) \leq 0$ 代表放电状态);

η_c 、 η_d ——代表是充、放电效率。

蓄电池功率平衡约束:

$$P_{BSS_{\min}} \ll P_{BSS} \ll P_{BSS_{\max}} \quad (12)$$

蓄电池充放电功率约束条件:

$$SOC_{\min} \ll SOC \ll SOC_{\max} \quad (13)$$

SOC_{\min} 、 SOC_{\max} 分别表示粗电池最小(取 0.2)和最大(取 0.8)剩余电量比例, SOC 低于 0.2 不再放电、 SOC 高于 0.8 不再充电。

4.2.4. 柴油(DE)发电机模型

柴油发电机的发电成本采用二次函数表达式计算公式如下:

$$C_{DE} = \alpha + \beta P_{DE} + \gamma P_{DE}^2 \quad (14)$$

其中: C_{DE} ——表示燃料成本;

P_{DE} ——表示柴油发电机的发电功率;

α 、 β 、 γ ——表示燃料成本的系数。

柴油发电机功率平衡约束:

$$P_{DE_{\min}} \ll P_{DE} \ll P_{DE_{\max}} \quad (15)$$

微电网系统功率约束条件:

$$P_{PV} + P_{WT} + P_{BSS} + P_{DE} = P_L \quad (16)$$

其中: P_{PV} 、 P_{WT} 、 P_{BSS} 、 P_{DE} 分别表示 PV、WT、BSS、DE 的输出功率; P_L 代表的是负载功率。

4.3. 结果分析

该微电网在孤岛模式下,各个分布式电源的出力情况,居民一天的负荷全部由各分布式电源供给,图 4 为优化后的各分布式电源的出力情况。

从图 4 可以看出当 PV 和 WT 的输出功率大于负载时,蓄电池进行充电(4:00~7:00),此时柴油发电机不工作,当 PV 和 WT 的输出功率小于负载时,蓄电池进行放电(12:00~16:00, 19:00~22:00),其余时间处于不充电也不放电的状态。柴油发电机则弥补其余子系统与负载的差值部分。

4.4. 算法比较

为验证该算法的可靠性,将 GCSA 算法与粒子群(PSO)算法、遗传(GA)算法和 CSA 算法比较,通过研究各时段所花得费用比较。图 5 为一天之中各时段所花的费用。

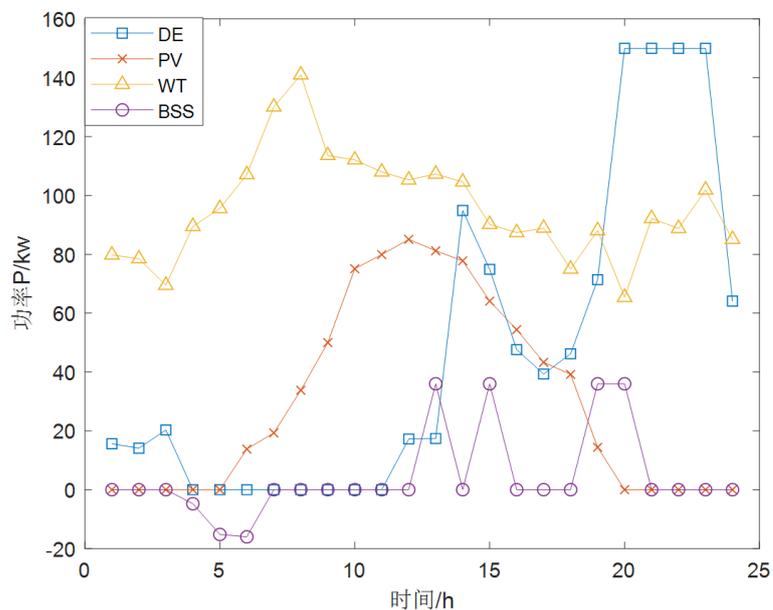


Figure 4. The output power curve of each distributed power source

图 4. 各分布式电源的输出功率曲线

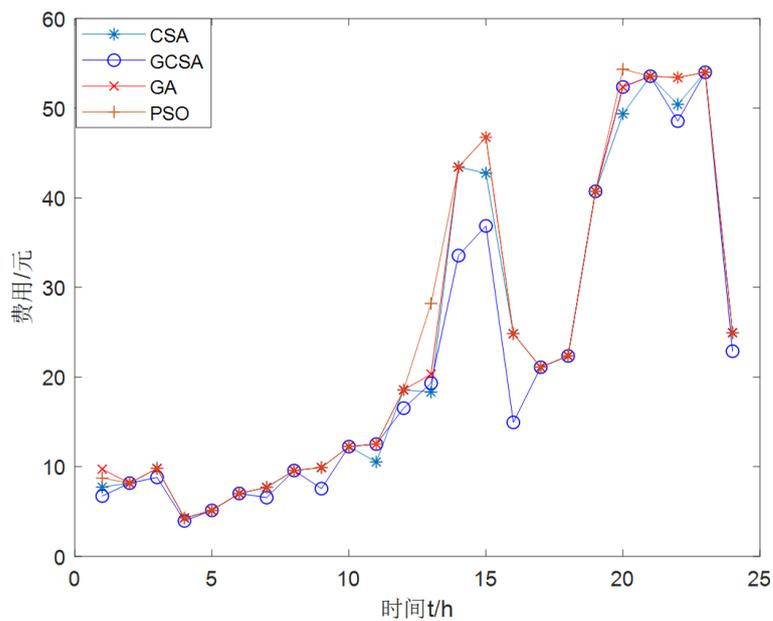


Figure 5. Cost per hour

图 5. 每小时花费的成本

Table 4. Cost comparison

表 4. 费用比较

算法	费用(元)
PSO	583.55
GA	571.55
CSA	557.55
GCSA	526.95

从图 5 和表 4 中可以看出, 各时段的费用明显低于其他三种算法。GCSA 一天所有的费用为 526.95 元、PSO 为 583.55 元、GA 为 571.55 元、CSA 为 557.55 元, GCSA 每小时花费的成本比其他三种要低得多。可见改进后的乌鸦搜索算法寻优能力更强。

4.5. 并网算例分析

本文只考虑微电网单日优化调度问题, 取单位时段为 1 小时。验证的微电网模型包括光伏系统、风能系统、蓄电池储能系统、柴油发电机各一个。属于并网模式考虑向电网购电售电情况。交互功率为 200 kw。

微电网系统功率约束条件:

$$P_{PV} + P_{WT} + P_{BSS} + P_{DE} + P_G = P_L \quad (17)$$

微电网与电网交换功率约束条件:

$$P_{Gmin} \leq P_G \leq P_{Gmax} \quad (18)$$

式(17)中: P_{PV} 、 P_{WT} 、 P_{BSS} 、 P_{DE} 、 P_L 、 P_G 分别表示光伏系统、风能系统、蓄电池、柴油发电机、负载的功率以及微电网与电网交换功率。

4.6. 结果分析

该微电网在并网模式下, 各个分布式电源的出力情况, 居民一天的负荷全部由各分布式电源供给, 图 6 为优化后的各分布式电源的出力情况。

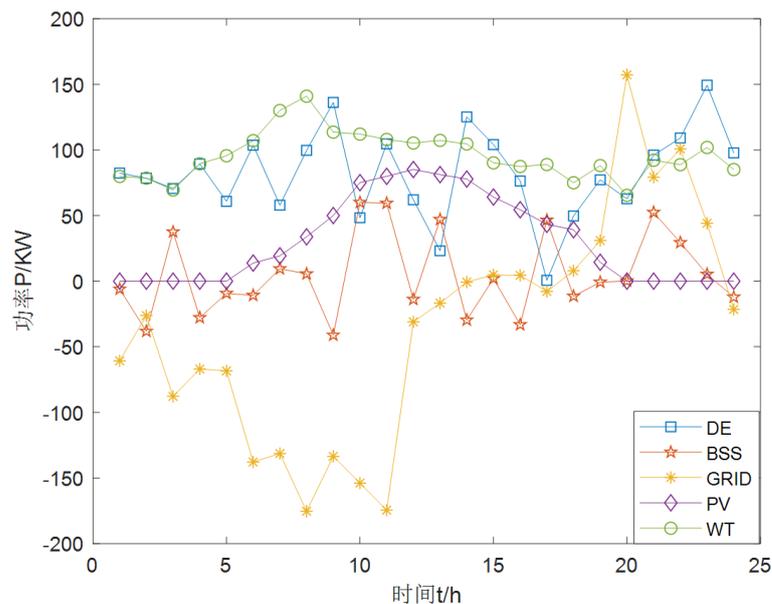


Figure 6. The output power curve of each distributed power source
图 6. 各分布式电源的输出功率曲线

PV 和 WT 为不可控力, 出力应尽可能的多。从图 6 可以看出其中蓄电池在 3:00、10:00、11:00、13:00、15:00、17:00 以及 20:00~23:00 处于放电状态, 缓解峰期的用电费用, 在 5:00 和 9:00 处于既不放电也不充电的状态, 其他时间段处于充电状态, 为用电高峰期做充足的准备。柴油发电机则弥补其余子系统与负载的差值部分。整个微电网运行期间, 微电网在电价平期优先从电网购电, 而其他系统的能量则储存在

蓄电池中。

4.7. 算法比较

验证该算法的可靠性,通过研究迭代次数与所花费用的关系,将 GCSA 算法与粒子群(PSO)算法、遗传(GA)算法和传统乌鸦搜索 CSA 算法同时对该模型进行求解。结果如图 7 所示。

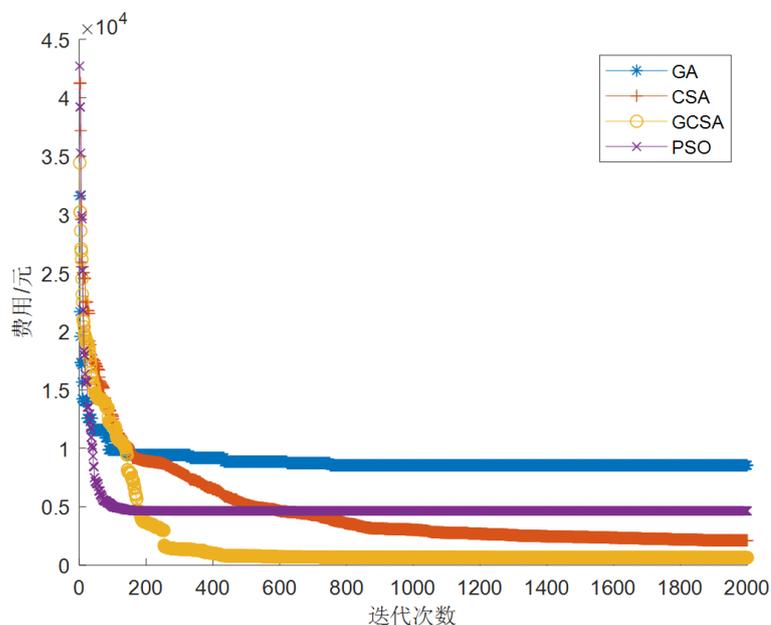


Figure 7. Comparison of optimization capabilities of various algorithms

图 7. 各算法寻优能力比较

Table 5. Cost comparison

表 5. 费用比较

算法	费用(元)
PSO	5102.15
GA	9656.89
CSA	4328.23
GCSA	2536.02

从图 7 和表 5 中可以明显看出 GCSA 算法、PSO 算法、GA 算法和 CSA 算法的收敛情况与所花费用关系。GCSA 算法收敛结果为 2536.02 元,CSA 算法收敛结果为 4328.23 元、PSO 算法的收敛结果为 5102.15 元、GA 的收敛结果为 9656.89 元。由此可以看到 GCSA 算法由于其他三种算法,在迭代中能很快找到了一个很好的搜索空间区域,并迅速收敛到最优解。

5. 结论

本文构建了以经济成本最低和环境效益最好为目标函数的数学模型,并采用 PSO 算法、GA 算法、CSA 算法以及 GCSA 算法对该模型进行求解,得到了各个子系统在各个时刻的出力以及微电网的综合运行费用,通过对微电网孤岛、并网两种运行模式进行算例仿真,结果表明本文提出的 GCSA 算法对解决微电网优化调度问题有着明显的优势。

参考文献

- [1] Liu, M.X., *et al.* (2012) An Optimal Design Method of Multi-Objective Based Island Microgrid. *Automation of Electric Power Systems*, **17**, 34-39.
- [2] 马溪原, 吴耀文, 方华亮, 等. 采用细菌觅食算法的风/光/储混合微电网电源优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 17-25
- [3] Sedighzadeh, M., Esmaili, M. and Eisapour-Moarref, A.J.A.S.C. (2017) Voltage and Frequency Regulation in Autonomous Microgrids Using Hybrid Big Bang-Big Crunch Algorithm. *Applied Soft Computing*, **52**, 176-189.
- [4] 喻洁, 李扬, 夏安邦. 兼顾环境保护与经济效益的发电调度分布式优化策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 63-8.
- [5] 刘盛松, 邵能灵, 侯志俭, 等. 基于最优潮流与模糊贴近度的电力系统环境保护研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 21-26.
- [6] 赵磊, 曾芬钰. 孤岛运行下的微电网经济性优化研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(7): 22-26.
- [7] 杨毅, 雷霞, 徐贵阳, 等. 采用 PSO-BF 算法的微电网多目标电能优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 49-55.
- [8] 张东, 陈景文, 张蓉, 等. 计及光伏预测的直流微电网能量调度研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(2): 28-33.
- [9] Morstyn, T., Hredzak, B. and Agelidis, V. (2015) Distributed Cooperative Control of Microgrid Storage. *IEEE Transactions on Power Systems*, **30**, 2780-2789. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2363874>
- [10] Al-Qubaisi, A.M., Hssian, S. and Al-Alili, A. (2015) Optimization Based Fuzzy Resource Allocation Framework for Smart Grid. *IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering*, Oshawa, ON, 1-6.
- [11] 卢锦玲, 苗雨阳, 张成相, 任惠. 基于改进多目标粒子群算法的含风电场电力系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2013(17): 25-31.
- [12] Chaouachi, A., Kamel, R.M., Aadoulsi, R., *et al.* (2012) Multiobjective Intelligent Energy Management for a Microgrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **60**, 1688-1699.
- [13] Rahbar, K., Xu, J. and Zhang, R.G. (2014) Real-Time Energy Storage Management for Renewable Integration in Microgrid: An Off-Line Optimization Approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **6**, 124-134. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2359004>
- [14] Zhang, J., Wu, Y., Guo, Y., *et al.* (2016) A Hybrid Harmony Search Algorithm with Differential Evolution for Day-Ahead Scheduling Problem of a Microgrid with Consideration of Power Flow Constraints. *Applied Energy*, **183**, 791-804.