

陈致远, 曾国辉, 赵晋斌. 基于 ISSA 的孤岛型微电网多目标优化调度研究[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(10): 120-125.
DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.241016

基于 ISSA 的孤岛型微电网多目标优化调度研究

陈致远¹, 曾国辉¹, 赵晋斌²

(1 上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620; 2 上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 针对含光伏电池、风机、柴油发电机、微型燃气轮机、蓄电池的孤岛微电网经济性、稳定性、环保性协同优化问题, 提出一种改进麻雀算法 (Improved Sparrow Search Algorithm, ISSA) 的孤岛微电网多目标调度模型。首先, 构建孤岛微电网系统模型和系统约束条件; 其次, 将微电网运行成本和污染治理费用设为目标函数; 同时, 改进算法将动态发现者与自适应螺旋因子相结合, 提高了原算法的寻优精度和收敛速度。算例结果验证了该孤岛微电网模型的可行性及改进算法的优越性、适用性。

关键词: 孤岛微电网; 优化调度; 改进麻雀搜索算法; 多目标优化问题

中图分类号: TM 315

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)10-0120-06

Multi-objective optimal scheduling of islanded microgrids based on ISSA

CHEN Zhiyuan¹, ZENG Guohui¹, ZHAO Jinbin²

(1 School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2 School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: A multi-objective scheduling model of islanded microgrid with improved Sparrow Search Algorithm (ISSA) is proposed for the problem of co-optimization of economy, stability and environmental protection of islanded microgrid containing photovoltaic cells, wind turbines, diesel generators, micro gas turbines and batteries. Firstly, the islanded microgrid system model and system constraints are constructed; secondly, the microgrid operation cost and pollution control cost are set as the objective function; meanwhile, the improved algorithm combines the dynamic discoverer with the adaptive spiral factor, which improves the optimization finding accuracy and convergence speed of the original algorithm. The results verify the feasibility of the islanded microgrid model and the superiority and applicability of the improved algorithm.

Key words: islanded microgrid; optimized scheduling; improved Sparrow Search Algorithm; multi-objective optimization

0 引言

温室效应、臭氧衰减等环境问题正日益突出, 吸引了更多关注。微电网作为新能源产业的一个重要组成部分, 对优化能源结构、解决环境污染问题以及经济的可持续发展均具有重要意义^[1-2]。孤岛型微电网包含各种分布式能源 (Distributed Generation, DG), 在缺少大电网支撑的背景下, 具有较低的稳定性和鲁棒性。因此, 在满足各约束条件和微电网系统的经济性、环保性和可靠性的多目标优化 (Multi-Objective Optimization, MOO) 的前提下, 合理分配各

DG 出力是微电网研究中的重要环节^[3]。

文献[4]论述了微电网的结构, 并分析合理地分配 DG 出力可显著提升微电网的电能质量和可靠性。文献[5]建立一种孤岛微电网优化调度模型, 以风-潮流能-储-柴为能源结构, 通过经济性和供电稳定性论证 DG 配比在孤岛微电网的重要性。文献[6]建立一种含电转气 (Pow to Gas, P2G) 系统的微电网调度模型, 并采用新型生物地理学优化算法 (Novel Biogeography-Based Optimization, NBBO) 求解, 验证了 NBBO 算法在该算例中的可行性和合理性, 但其收敛性有待考察。文献[7]设立隶属函数

基金项目: 国家自然科学基金 (51777120)。

作者简介: 陈致远 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 直流微电网控制技术; 赵晋斌 (1972-), 男, 教授, 主要研究方向: 电力电子电路智能化模块化控制及新能源发电技术。

通讯作者: 曾国辉 (1975-), 男, 教授, 主要研究方向: 新能源渗透率电力系统控制。Email: zenggh@sues.edu.cn

收稿日期: 2023-04-06

选择折中解并结合改进 NSGA-II 算法求解微电网多目标优化调度,但对特殊气候的鲁棒性较低。文献[8]将模拟退火(Simulated Annealing, SA)算法中的 Metropolis 判别准则引入自适应人工鱼群算法(AAFSA)并对微电网优化调度模型求解,提高了算法求解模型的收敛速度,但没有提升求解精度。

综上所述,本文提出一种基于 ISSA 的孤岛型微电网多目标优化调度策略。首先,对孤岛模式下微电网各 DG 进行建模并分析其功率特性。其次,在考虑微电网经济性、稳定性、环保性的前提下,以运行成本、污染处理成本为目标函数并计算相应的权重值,建立孤岛型微电网多目标优化调度模型。然后,对麻雀算法进行改进,将基于适应度值的动态发现者和自适应螺旋因子策略相结合,提升了麻雀算法的收敛速度和寻优精度。最后,采用提升了算法性能的 ISSA 求解该模型并通过相应算例验证该算法在多目标优化调度中的有效性。

1 含分布式发电单元的微电网架构

微电网构架如图 1 所示。图 1 中,光伏电池(Photo Voltaic cell, PV)、风力发电机(Wind Turbine, WT)为不可控型 DG;微型气轮机(Micro Turbine, MT)、柴油发电机(Diesel Generator, DE)为可控型及蓄电池作为储能单元。孤岛模式下,微电网不与主网进行电能互换,仅有内部 DG 对负载进行供电。



图 1 微电网架构

Fig. 1 Structure of DC microgrid

1.1 光伏电池

光伏出力与光照强度、入射角度相关,输出功率模型^[9]如下所示:

$$P_{pv} = \zeta \eta_m A_p \eta_p \cos \theta \quad (1)$$

其中, P_{pv} 表示 PV 实际输出功率; ζ 表示光照强度; η_m 表示最大功率跟踪点下的效率; A_p 表示电池板面积; η_p 表示光伏电池效率; θ 表示光照入射角

大小。

1.2 风力发电机

WT 输出功率与实际风速相关,其功率输出模型^[10]可以描述为:

$$P_{WT} = \begin{cases} 0, & v < v_{in} \\ \frac{v^3 - v_{in}^3}{v_r^3 - v_{in}^3} P_r, & v_{in} \leq v \leq v_r \\ P_r, & v_r \leq v \leq v_{out} \\ 0, & v > v_{out} \end{cases} \quad (2)$$

其中, P_{WT} 表示 WT 实际输出功率; P_r 表示 WT 额定功率; v 表示实际风速; v_{in} 表示切入风速; v_{out} 表示切出风速; v_r 表示额定风速。

1.3 微型燃气轮机

MT 消耗燃料发电,可自由调节其输出功率,其工作效率与 MT 输出功率呈三次函数关系,燃料成本表达式可写为:

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

$$C_{MT} = C \frac{1}{LHV} \cdot \frac{P_{MT}}{\eta_{MT}} \quad (4)$$

其中, P_{MT} 表示 MT 输出功率; η_{MT} 表示 MT 的燃料利用率; C 表示天然气价格; LHV 表示天然气低热值; C_{MT} 表示 MT 消耗的燃料费用。

1.4 柴油发电机

DE 在运行中产生燃料费、污染处理费、运维费,其燃料成本^[11]可由如下公式来运算求得:

$$C_{DE} = \alpha + \beta P_{DE} + \gamma P_{DE}^2 \quad (5)$$

其中, P_{DE} 表示 DE 输出功率; C_{DE} 表示 DE 的燃料费用; α 、 β 、 γ 分别表示 DE 燃料的费用系数。

1.5 蓄电池

微电网在孤岛模式下缺少大电网支撑,主要由蓄电池作为储能模块起“削峰填谷”的作用,抑制风力发电和光伏发电波动,提升供电稳定性和可靠性。蓄电池的荷电状态(State Of Charge, SOC)表示为:

$$SOC(t) = \begin{cases} SOC(t-1) + \frac{1}{\eta_{dis}} P_{bat}(t), P_{bat}(t) \leq 0 \\ SOC(t-1) + \eta_{cha} P_{bat}(t), P_{bat}(t) > 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $SOC(t)$ 表示蓄电池在 t 时的容量值; η_{cha} 、 η_{dis} 分别表示蓄电池充放电效率; $P_{bat}(t)$ 表示蓄电池在 t 时的输出功率。当 $P_{bat}(t) \leq 0$ 时,蓄电池放电;当 $P_{bat}(t) > 0$ 时,蓄电池充电。

2 微电网多目标优化数学模型

随着研究的深入,微电网优化不再局限于稳定性优化,而是着力于开发微电网在经济性、环保性等多领域的应用价值。微电网多目标优化的目标函数由经济性优化、环保性优化等部分组成,多目标优化模型具体如下:

$$\begin{cases} \min F(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_i(x)]^T \\ \text{s. t. } G_j(x) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \\ H_k \leq 0, \quad k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (7)$$

其中, x 表示待优化变量,即各 DG 输出功率; $f_i(x)$ 表示第 i 个待优化目标函数; $F(x)$ 表示总目标函数; $G_j(x)$ 表示该多目标优化的第 j 个等式约束; H_k 表示该多目标优化的第 k 个不等式约束。

2.1 目标函数

2.1.1 微电网运行成本函数

运行成本函数主要由燃料成本、运维成本和可中断负载补偿三部分组成。其中,燃料成本为 DG 出力时消耗的能源单元燃料费用,由于 PV 和 WT 在运行时不消耗化石能源,故不考虑其燃料成本; DG 运行时对设备进行维修检查是保证其安全运行的前提。运维成本包括电源设备故障、维修费用,以及 DG 启停补偿费用;孤岛微电网无法与主网进行电能传输,在用电高峰时间段存在供电不足情况,需切断部分负荷保证系统平稳运行,并对中断负载进行相应的补偿。微电网运行成本函数具体如下:

$$\begin{cases} f_1 = C_f + C_g + C_{ir} \\ C_f = \sum_{t=1}^T \sum_i^N C_i(t) \\ C_g = \sum_{t=1}^T \sum_i^N [OM_i P_i(t) + ST_i a_i(t)] \\ C_{ir} = \sum_{t=1}^T [A + B \times P_x(t) + C \times P_x^2(t)] \end{cases} \quad (8)$$

其中, C_f 、 C_g 、 C_{ir} 分别表示燃料成本、运维成本和可中断负载补偿; $C_i(t)$ 表示 t 时间段第 i 个 DG 的燃料费用; $P_i(t)$ 表示 t 时刻第 i 个 DG 的输出功率; OM_i 表示第 i 个 DG 的维护成本系数; ST_i 表示第 i 个 DG 的启停补偿; $a_i(t)$ 表示 t 时刻第 i 个 DG 的启停状态,取 0 或 1; $P_x(t)$ 表示 t 时刻的中断负载功率; A 、 B 、 C 分别表示可中断负载的经济补偿系数。

2.1.2 环境保护成本函数

本文所涉及的环境污染来源为各 DG 运行过程中排放的污染气体,如 CO_2 、 SO_2 以及 NO_x 的排放处理成本。PV 和 WT 属于清洁能源,在运行过程中不

产生污染气体,故不考虑其环境成本。此处需用到的公式为:

$$f_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^K \alpha_j \sum_{i=1}^N \beta_{ij} P_i(t) \quad (9)$$

其中, K 表示污染气体种类; α_j 表示第 j 类污染气体的单位处理费用; β_{ij} 表示第 i 个 DG 输出 $P_i(t)$ 功率时的第 j 类污染气体排放系数。污染气体排放系数和处理费用系数见表 1。

表 1 温室气体排放系数和处理系数

Table 1 Greenhouse gas emission factors and treatment factors

气体类型	排放系数/(g · kW ⁻¹)				处理系数/ (¥ · kg ⁻¹)
	MT	DE	PV	WT	
CO ₂	1.600	1.700	0	0	0.092
NO _x	0.440	21.800	0	0	27.540
SO ₂	0.008	0.454	0	0	6.490

2.2 约束条件

(1) 功率平衡约束。推得的数学公式为:

$$\sum_{i=1}^N P_i(t) + P_{bat}(t) = P_{load}(t) - P_x(t) \quad (10)$$

(2) 微源输出功率约束。推得的数学公式为:

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (11)$$

(3) 微源爬坡约束。推得的数学公式为:

$$|P_i(t) - P_{i-1}(t)| \leq \Delta P_i \quad (12)$$

(4) 蓄电池约束。推得的数学公式为:

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

$$P_{bat}^{\min} \leq P_{bat} \leq P_{bat}^{\max} \quad (14)$$

$$\sum_{t=1}^T P_{bat}(t) = 0 \quad (15)$$

其中, $P_{load}(t)$ 表示 t 时刻微电网用户的供电需求大小; P_i^{\max} 、 P_i^{\min} 分别表示第 i 个 DG 输出功率上下限; ΔP_i 表示第 i 个 DG 的功率爬坡上限; SOC^{\max} 、 SOC^{\min} 分别表示蓄电池 SOC 值的上下限; P_{bat}^{\min} 、 P_{bat}^{\max} 分别表示蓄电池的放电、充电功率上限。

3 ISSA 的微电网优化调度

从第 2 节分析可得,DE 发电成本低但污染排放高,MT 污染排放低但发电成本较高。因此微电网优化调度中无法同时兼顾经济性和环保性,该问题是典型的多目标优化问题 (Multi - Objective Optimization, MOO),具有高维、多约束、非线性等特点。MOO 各目标间相互牵制,优化其中一个目标同时伴随着牺牲其他目标为代价,有时还存在着目标约束和可行解范围约束。为了与单目标优化问题的求解有所区别,多目标优化问题的最优解常常表现

为一系列目标折衷后的解。元启发式优化算法不需要梯度信息,在求解高维、非线性系统时,计算过程简便。凭借其优越性能,在求解多维、非线性、非连续的 MOO 时,元启发式优化算法受到了广泛关注^[12-13]。

3.1 麻雀搜索算法

通过模拟麻雀群体的协作习性,文献[14]提出了麻雀搜索算法(Sparrow Search Algorithm, SSA)。麻雀群体搜寻食物时,为使种群达到目的会进行集体协作,麻雀种群各司其职,分为发现者、加入者和警戒者。其中,发现者大范围觅食引导种群,加入者在发现者周围进行协作觅食,而警戒者为种群提供安全保障,在感应到捕食者威胁时带领种群向安全方向移动。发现者具有较好的适应度值,位置迭代公式如下:

$$\mathbf{x}_{id}^{t+1} = \begin{cases} \mathbf{x}_{id}^t \cdot \exp\left(\frac{-i}{\alpha \cdot T}\right), & R_2 < ST \\ \mathbf{x}_{id}^t + Q \cdot \mathbf{L}, & R_2 \geq ST \end{cases} \quad (16)$$

其中, t 表示迭代次数; T 表示迭代次数上限; i 表示麻雀在种群中的编号; d 表示维度; R_2 表示 0 ~ 1 之间的随机数; ST 表示警戒值; α 表示 0 ~ 1 之间的随机数; Q 表示服从正态分布的随机数; \mathbf{L} 表示 D 维行向量, 元素均为 1。麻雀群体中, 除发现者之外, 其余均为跟随者, 跟随者位置迭代公式如下:

$$\mathbf{x}_{id}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{\mathbf{x}w_d^t - \mathbf{x}_{id}^t}{i^2}\right), & i > \frac{n}{2} \\ \mathbf{x}b_d^t + |\mathbf{x}_{id}^t - \mathbf{x}b_d^t| \mathbf{A}^+, & i \leq \frac{n}{2} \end{cases} \quad (17)$$

其中, $\mathbf{x}w_d^t$ 表示第 t 次迭代时最劣位置; n 表示种群数量; \mathbf{A} 表示元素随机赋值 1 或 -1 的 d 维行向量; $\mathbf{x}b_d^t$ 表示第 t 次迭代时最佳位置。麻雀在觅食过程中, 会选取一部分麻雀作为警戒者来提防捕食者, 警戒者数量通常为种群的 10% ~ 20%, 警戒者位置迭代公式如下:

$$\mathbf{x}_{id}^{t+1} = \begin{cases} \mathbf{x}b_d^t + \beta(\mathbf{x}_{id}^t - \mathbf{x}b_d^t), & f_i \neq f_g \\ \mathbf{x}_{id}^t + K \left(\frac{\mathbf{x}_{id}^t - \mathbf{x}w_d^t}{|f_i - f_w| + e} \right), & f_i = f_g \end{cases} \quad (18)$$

其中, β 表示服从均值为 0, 方差为 1 的正态分布随机数; f_g 表示当前最佳适应度值; f_w 表示上一次迭代的最差适应度值; f_i 表示该警戒者的适应度值; K 表示 -1 ~ 1 之间的随机数; e 表示极小常数。

3.2 改进麻雀算法

传统麻雀算法求解多维、多峰、非线性、非连续的现代工程问题时, 存在易于陷入局部最优、收敛精

度不高等问题^[15]。针对上述问题, 本文研发了改进麻雀算法(Improved Sparrow Search Algorithm, ISSA), 其中提出了以下 2 种改进策略。

3.2.1 基于适应度值的动态发现者策略

模仿动物习性的元启发算法主要分为 2 个阶段: 探索和开发。其中, 探索阶段算法应大范围搜索, 该阶段通常处于迭代前中期; 开发阶段算法在适应度值较好的位置附近进行小规模搜索, 提升精度。在 SSA 中, 发现者对应探索, 加入者对应开发。但是, 发现者与加入者的数量比例保持不变, 就会导致在迭代前期, 发现者数目相对较少, 容易过早收敛陷入局部最优; 迭代后期加入者数量不足, 则将导致算法精度不高。针对该问题, 本文提出一种基于适应度值的动态发现者策略, 发现者数量公式如下:

$$PD = \frac{a}{1 + \exp(-f_g/f_g')} \quad (19)$$

其中, PD 表示发现者数量; a 表示比例系数; f_g' 表示初始种群的最佳适应度值。更改后的发现者数量随着适应度值变小也随之减少, 在迭代过程中根据适应度的变化从初期的探索阶段逐渐转变成开发阶段。

3.2.2 自适应螺旋搜索策略

发现者作为 SSA 的探索策略, 需要在维度范围内大范围搜索可行解, 然而当 $R^2 < ST$ 时, 发现者的位置呈指数形式下降, 容易过早陷入局部最优。文献[15]提出一种螺旋探索策略, 在发现者迭代公式中引入螺旋因子来提高算法的探索能力。本文在文献[15]的基础上提出自适应螺旋搜索策略, 公式如下:

$$\mathbf{x}_{id}^{t+1} = \begin{cases} z \cdot \mathbf{x}_{id}^t \cdot \exp\left(\frac{-i}{\alpha \cdot T}\right), & R_2 < ST \\ \mathbf{x}_{id}^t + z \cdot Q \cdot \mathbf{L}, & R_2 \geq ST \end{cases} \quad (20)$$

$$z = \left(b - \frac{t}{T}\right) \cdot \exp(l \times p) \cdot \cos(2\pi p)$$

其中, b 表示螺旋因子系数; p 表示 [-1, 1] 之间的随机数; l 表示螺旋状态常数; z 表示螺旋因子。该策略下算法迭代前期具有更广的搜索范围, 不易过早收敛; 在迭代中后期减小搜索范围, 进一步提升了收敛精度。

4 算例仿真

4.1 算例参数

为验证该模型, 本文采用 Matlab 编程, 对上述包含 PV、WT、MT、DE 和蓄电池的孤岛型微电网进行算例仿真分析, 将 1 天设为计算周期, 选取 IEEE-

RTS 提供的典型负载数据作为参考,其负荷峰值为 127.24 kW。为避免“弃风弃光”现象,PV 和 WT 均处于最大功率跟踪模式,尽可能多地消纳吸收风光能源,可中断负荷比重约占最大负荷的 15%。微电

网中各 DG 参数见表 2,蓄电池参数见表 3。ISSA 的相关参数为:迭代上限为 250,麻雀种群为 100,警戒者为麻雀种群数量的 20%。

表 2 分布式电源参数

Table 2 Distributed power parameters

类型	出力下限/kW	出力上限/kW	维护系数/(元·kW ⁻¹)	启停成本/元	爬坡下限/(kW·h ⁻¹)	爬坡上限/(kW·h ⁻¹)
PV	0	40	0.010	-	-	-
WT	0	50	0.298	-	-	-
MT	0	50	0.031	1.94	-15	15
DE	0	40	0.087	1.20	-15	15

表 3 蓄电池参数

Table 3 Battery parameters

参数	数据	参数	数据
最大容量/(KW·h)	80.0	初始容量/(KW·h)	50
最小容量/(KW·h)	20.0	充电功率上限/(KW)	15
充放电效率	0.9	放电功率上限/(KW)	15

本文选取的典型日风、光与负荷功率大小如图 2 所示。由图 2 可知,波峰时用户供电需求较高,且 PV 和 WT 出力波动较大。

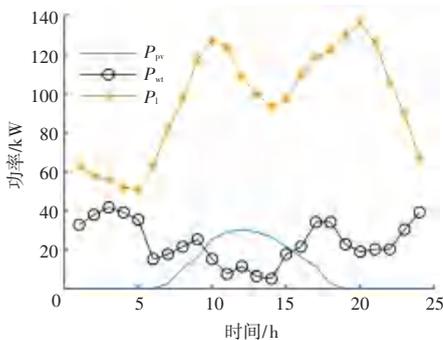


图 2 光伏、风电和负荷预测值

Fig. 2 Photovoltaic, wind power and load forecast values

4.2 仿真结果分析

4.2.1 改进算法的比较分析

分别采用传统 SSA 与 ISSA 对上述模型算例进行仿真分析。算法结果比较见表 4。经过 250 次迭代后,SSA 和 ISSA 求出的运行成本为 1 701.4 元和 1 479.9 元,下降约 13.02%;环境成本为 407.21 元和 387.82 元,下降约 4.76%;综合成本为 2 108.61 元和 1 867.72 元,下降约 11.42%。在运行成本、环境成本及综合成本上均有显著提升,因此 ISSA 对比 SSA 在求解多目标、多约束的模型时具有更好的性能。

表 4 SSA 与 ISSA 比较

Table 4 Comparison of SSA and ISSA 元

算法	运行成本	环境成本	综合成本
SSA	1 701.4	407.21	2 108.61
ISSA	1 479.9	387.82	1 867.72

最优值迭代对比曲线和 24 h 综合成本对比如图 3、图 4 所示。由图 3 可知,SSA 算法约在第 160 次迭代时收敛,而 ISSA 算法仅在第 50 次迭代时即可收敛。由图 4 可知,2 种算法求得的 24 h 综合成本局部时间段非常接近,但 ISSA 寻优后的成本整体低于 SSA 寻优后的成本,日成本优化幅度约为 10%。综上所述,ISSA 算法求解孤岛微电网多目标优化调度问题表现出更快的收敛速度以及更高的寻优精度。

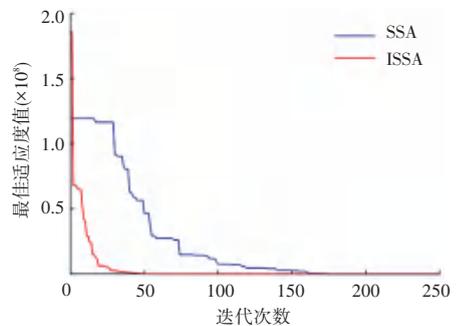


图 3 最优值迭代对比曲线图

Fig. 3 Comparison graph of optimal value iteration

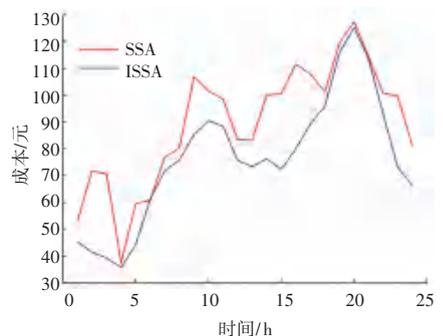


图 4 24 h 综合成本对比图

Fig. 4 Comparison chart of 24-hour comprehensive cost

4.2.2 分布式电源出力分析

在孤岛模式下,本文综合考虑微电网运行成本和环保成本,并设为目标函数。经 ISSA 寻优得到最优解后,实验绘制结果如图 5 所示。

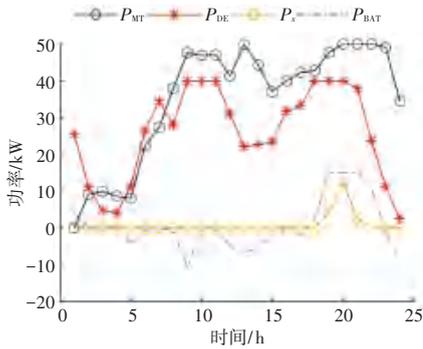


图 5 24 h 各 DG 输出功率图

Fig. 5 Output power chart of 24-hours DG

由图 5 可知,在缺乏大电网支撑下,主要由蓄电池和可中断负载起到了“削峰填谷”作用。在 19~21 时的用电高峰时刻,MT、DE、蓄电池输出均已达到上限,却仍不能满足用户供电需求时,断开部分负载来维持系统平稳。存在蓄电池充放电约束,在非用电高峰期蓄电池进行充电,保证 SOC 维持在一个平稳运行状态。

5 结束语

本文对孤岛模式下,“风-光-燃-柴-储”的微电网系统进行建模,并以经济性、稳定性、环保性为目标进行多目标调度研究。通过引入适应度值的动态发现者和自适应螺旋因子策略能够提升 SSA 在迭代初期的全局探索能力及迭代后期的局部开发能力,增强算法性能。通过算例仿真分析,ISSA 在收敛速度及精度上均有明显提升,能够在满足各种约束条件下,合理分配各 DG 出力,有效减少环境污染和发电成本。

参考文献

- [1] 李祥山,杨晓东,张有兵,等. 含母线电压补偿和负荷功率动态分配的直流微电网协调控制[J]. 电力自动化设备,2020,40(4): 198-204.
- [2] FARROKHABADI M, CAÑIZARES C A, SIMPSON-PORCO J W, et al. Microgrid stability definitions, analysis, and examples [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020,35(1):13-29.
- [3] 桑博,张涛,刘亚杰,等. 多微电网能量管理系统研究综述[J]. 中国电机工程学报,2020,40(10):3077-3093.
- [4] WASILEWSKI J. Optimisation of multicarrier microgrid layout using selected metaheuristics[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2018,99:246-260.
- [5] 陈波,于楠,吴巍,等. 含潮流能/风/蓄/柴的孤岛微网容量优化配置[J]. 电力学报,2018,33(3):207-212.
- [6] 魏利胜,杨奔奔,孙瑞霞. 基于新型 BBO 算法的微电网优化调度研究[J]. 系统仿真学报,2023,35(5): 1075-1085.
- [7] 张福民,崔海波,李占凯,等. 基于改进 NSGA-II 算法的微网交互式多目标优化[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(12):24-31.
- [8] 何力,吕红芳,李俊甫,等. 基于模拟退火算法改进的人工鱼群算法(SA_AFSA)的微电网能量优化调度研究[J]. 太阳能学报,2020,41(9):36-43.
- [9] 王子龙,于东立,门向阳,等. 含压缩空气储能的能源互联微电网系统优化配置[J]. 电力需求侧管理,2018,20(6):40-45.
- [10] LACAL-ARANTEGUI R. Materials use in electricity generators in wind turbines state-of-the-art and future specifications[J]. Journal of Cleaner Production, 2015(87): 275-283.
- [11] 李国庆,翟晓娟,李扬,等. 基于改进蚁群算法的微电网多目标模糊优化运行[J]. 太阳能学报,2018,39(8): 2310-2317.
- [12] 崔杨,姜涛,仲悟之,等. 考虑风电消纳的区域综合能源系统源荷协调经济调度[J]. 电网技术,2020,44(7): 2474-2483.
- [13] KAMBOJ V K, NANDI A, BHADORIA A, et al. An intensify Harris Hawks optimizer for numerical and engineering optimization problems[J]. Applied Soft Computing,2020,89: 106018.
- [14] XUE Jiankai, SHEN Bo. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm [J]. Systems Science & Control,2020,5(1): 22-34.
- [15] 康健,靳斌,段秀娟,等. 基于贝叶斯-粒子群算法的微电网优化运行[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(12): 32-41.