

基于改进粒子群优化算法的负荷分配方法研究

魏家柱, 潘庭龙

(江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:针对多目标粒子群优化算法求解负荷优化分配问题时所出现的最优解分布不均、局部最优等问题,引入了精英交叉算子并基于拥挤度对非劣解集进行排序,给出了精确计及网损时的机组出力等式不等式约束处理方法。在忽略和计及网损两种情况下针对 3 机组系统进行负荷优化分配,仿真结果表明改进后的粒子群优化算法寻优能力得到提升。同样利用模糊隶属度函数筛选 Pareto 解集,所提方法得到的结果明显优于常规粒子群优化算法,在降低发电成本及污染物排放的同时使得求解结果严格满足约束条件。

关键词:经济环保负荷分配;粒子群优化算法;精英交叉算子;拥挤距离排序

DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2022.10.017

中图分类号:TM731

文献标识码:A

文章编号:1001-1390(2022)10-0117-06

Research on load distribution method based on improved particle swarm optimization algorithm

Wei Jiazhu, Pan Tinglong

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the problem of uneven distribution of the optimal solution and local optimality when the multi-objective particle swarm optimization algorithm is used to solve the problem of optimal load distribution, the elite crossover operator is introduced and the non-inferior solution sets are ranked based on the congestion. This paper presents a method to deal with the equality and inequality constraints of the unit output when the network loss is taken into account accurately. Load optimization distribution is performed for the three-unit system with or without network loss. Simulation results show that the improved particle swarm optimization algorithm has improved the optimization ability. When the fuzzy membership function is used to screen Pareto solution set, the result of the method proposed in this paper is obviously better than that of the conventional particle swarm optimization algorithm, which can reduce the cost of power generation and pollutant emission while making the solution strictly meet the constraints.

Keywords: economic and environmental load distribution, particle swarm optimization algorithm, elite crossover operator, congestion distance ranking

0 引言

电力经济调度问题可以归纳为如何进行负荷分配,实现总煤耗最低。然而,单纯追求经济效益已经不能满足新形势下电网建设的需要。随着人们环保意识的提高,污染物的排放量正成为衡量电力系统调度优良性的重要指标之一。由此引出环保经济发电调度(Environmental-Economic Dispatch, EED)的多目标优化问题。

当前在研究 EED 问题时主要有 3 类方法:文献[1-2]中的多目标问题转化为单目标问题求解。文献[3-4]的多目标优化算法直接求解,文献[5]中的单个目标转换为约束条件求解。文献[1]在容量优化分配问题中引入了模糊集理论,将多个目标函数整合得到单个目标函数并进行优化,对不同权重下的计算结果进行对比,选取最优的满意度,使得火电机组的出力曲线更为平滑,保证自动发电控制系统的经济、环保运行。文献[2]在微电网并网运行时,综合考虑需求侧响应建立多目标优化模型,利用层次分析法将该多目标优化问

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61672266)

题转化为单目标优化问题,使得运行过程中的成本有所降低。文献[1-2]只在特定的权重组合下说明文章算法的先进性,缺乏和多目标优化算法的对比。而多目标优化算法则有效避免了对各个子目标权重组合的选择,一次性地给出多个 Pareto 最优解,能够很好地保证决策者的选择空间,简化计算过程。为了找到更加真实的 Pareto 解集并维护解集的多样性,文献[3]针对机组启停和负荷分配的综合模型,在非支配排序遗传算法 II 的基础上引入了 0-1 混合变量动态求解该多目标优化问题。文献[4]为了降低帕累托锋的产生和满意解的选择带来的计算复杂性,通过混合混沌微分进化算法和鲍威尔模式搜索算法的实现,得到了多目标火电负荷调度问题的满意解。粒子群优化算法原理相对简单,迭代过程中不会出现交叉和变异,只要设定搜索范围和全局最优位置,就可以计算出优化问题中的最优解,因而在负荷优化分配问题中得到了广泛的应用^[6-8]。

而常规的多目标粒子群优化(Multi Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO)算法在求解 EED 问题时容易陷入局部最优且难以保证求解结果分布的均匀性。在利用 MOPSO 求解 EED 问题时引入了精英交叉算子,并通过拥挤度排序的方法保留较好的粒子,同时在精确计及网损时给出了等式不等式约束的处理方法。

1 负荷分配的多目标优化模型

1.1 经济性单目标函数

在对出力进行调节时,机组既发出有功功率又发出无功功率。其中无功功率对机组的煤耗量影响较小,利用二次函数拟合机组煤耗量和承担的有功负荷总量可以得到发电总成本的目标函数为:

$$F_e(P_i) = \sum_{i=1}^N (a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i) \quad (1)$$

式中 P_i 为第 i 台机组发出的总功率(MW); N 是参与电力系统调节的机组总数; a_i 、 b_i 、 c_i 是机组的煤耗量系数,由机组的自身特性决定。

1.2 环保性单目标函数

燃煤过程中主要排放 SO_2 、 CO_2 和 NO_x 三种气体,其中 SO_2 和 CO_2 的排放量较低,可以忽略。用三次函数来拟合 NO_x 排放量和机组承担的有功负荷之间的关系,则 NO_x 排放量函数可以表示为:

$$F_g(P_i) = \sum_{i=1}^N (\alpha_i P_i^3 + \beta_i P_i^2 + \gamma_i P_i) + \lambda_i \quad (2)$$

式中 α_i 、 β_i 、 γ_i 和 λ_i 是机组的污染物排放系数,由

机组的自身特性所决定。

1.3 约束条件

(1) 考虑到整个互联电力系统的安全,机组在输出功率时首先要满足系统的功率平衡约束条件。互联电网机组出力的功率平衡约束条件为:

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_D + P_L \quad (3)$$

式中 P_D 表示电力系统的负荷需求; P_L 表示电力系统的网络损耗。其计算公式为:

$$P_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_i B_{i,j} P_j + \sum_{i=1}^N B_{0i} P_i + B_{00} \quad (4)$$

式中 B 、 B_0 、 B_{00} 为网损系数。

(2) 为了保证机组的稳定运行,机组出力大小需限制在一定范围内。互联电网机组出力的不等式约束为:

$$P_{\min i} \leq P_i \leq P_{\max i}, (i = 1, \dots, N) \quad (5)$$

式中 $P_{\max i}$ 为机组 i 的有功出力上限; $P_{\min i}$ 为机组 i 的有功出力下限。

2 基于改进粒子群优化算法的 EED 问题求解

2.1 约束条件的处理

(1) 等式约束

在设定机组出力的等式约束时,一些文献直接忽略了网损^[1]。还有另外一些文献为了处理方便,只考虑了 B 项系数^[9],这样都会造成优化结果存在误差。为使求解结果严格满足发电机出力等式不等式约束条件,在粒子初始化位置和更新位置时选取机组 1 作为等式约束平衡机组。

由式(3)和式(4)可以得到:

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_D + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_i B_{i,j} P_j + \sum_{i=1}^N B_{0i} P_i + B_{00} \quad (6)$$

选取机组 1 作为平衡机组时,将式中机组 1 的出力分离出来可以得到:

$$P_1 + \sum_{j=2}^N P_j = P_D + B_{11} P_1^2 + P_1 \sum_{j=2}^N B_{1j} P_j + P_1 \sum_{i=2}^N B_{i1} P_i + \sum_{i=2}^N \sum_{j=2}^N P_i B_{ij} P_j + B_{01} P_1 + \sum_{j=2}^N B_{0j} P_j + B_{00} \quad (7)$$

又因为网损系数中存在 $B^T = B$,故存在:

$$P_1 \sum_{j=2}^N B_{1j} P_j = P_1 \sum_{i=2}^N B_{i1} P_i \quad (8)$$

将式(8)带入式(7)中合并同次幂,可得到:

$$B_{11} P_1^2 + \left[\sum_{j=2}^N 2B_{1j} P_j + B_{01} - 1 \right] P_1 + [P_D + B_{00} + \sum_{i=2}^N \sum_{j=2}^N P_i B_{ij} P_j + \sum_{j=2}^N B_{0j} P_j - \sum_{j=2}^N P_j] = 0 \quad (9)$$

(2) 不等式约束

粒子在进行位置更新时,可能会飞离限定的区域。对于求解结果需要判定是否满足 1.3 节中的不等式约束条件。粒子第 i 维度的大小 X_i 在不满足约束条件时根据式(10)进行更新^[8]:

$$X_i^t = \begin{cases} X_{\max i} & \text{if } X_i > X_{\max i} \\ X_i & \text{if } X_{\min i} < X_i < X_{\max i} \\ X_{\min i} & \text{if } X_i < X_{\min i} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (10)$$

式中 X_i^t 表示第 t 次迭代粒子中第 i 维度的大小; $X_{\max i}$ 和 $X_{\min i}$ 分别表示粒子中第 i 维度的上下限。

而机组 1 的出力是由式(9)确定的,作为平衡机组其出力必须满足不等式约束条件。若不满足,应该通过设置不满足条件使得粒子重新开展此次循环,直到 1 机组的出力满足不等式约束条件。

在初始化粒子位置和更新粒子位置时处理其等式和不等式约束的一般流程图如图 1 所示。

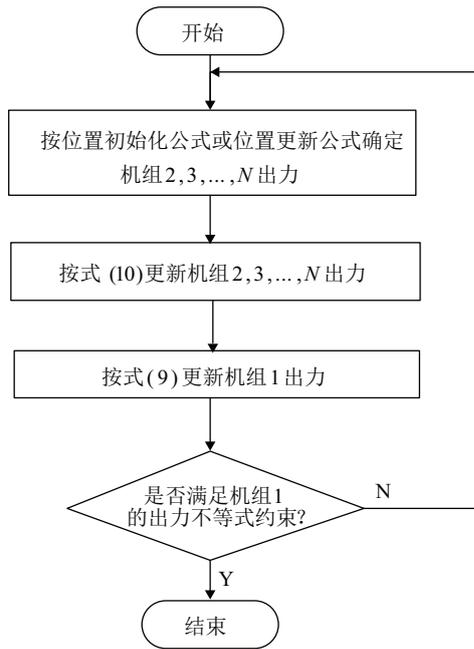


图 1 等式不等式约束处理方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of treatment method of equality and inequality constraints

具体步骤为:

Step 1: 位置初始化时按照初始化公式确定机组 2, ..., N 出力,位置更新时按照粒子群优化算法的位置更新公式更新机组 2, ..., N 出力;

Step2: 按式(10)约束机组 2, ..., N 的出力;

Step3: 按式(9)更新机组 1 的出力;

Step4: 按式(5)判断机组 1 的出力是否满足机组 1 的出力不等式约束条件,若满足跳出此次位置更新过程,若不满足返回 Step1 重新更新所有机组出力大小,直到所有机组同时满足出力不等式约束条件时跳出粒子位置更新循环程。粒子位置每更新一次,等式不等式处理过程同步进行一次。

2.2 寻优参数设置

一个优化算法的好坏的关键在于能否权衡全局以及局部搜索,粒子群优化算法全局以及局部搜索受到惯性权重 w 设置的影响。动态改变 w ,可以加快粒子群算法的收敛速度。现阶段普遍采用的三者独立的调整策略削弱了粒子群算法在进化过程中的统一性。根据惯性权重的变化规律,采用了惯性权重 w 、学习因子 c_1 、 c_2 的联动策略,具体为:

$$\begin{cases} w(t) = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min}) * \sin(\frac{t * \pi}{2 * T_{\max}}) \\ c_1 = 2.5 - 2 * \frac{w_{\max} - w(t)}{w_{\max} - w_{\min}} \\ c_2 = 0.5 + 2 * \frac{w_{\max} - w(t)}{w_{\max} - w_{\min}} \end{cases} \quad (11)$$

式中 w_{\max} 和 w_{\min} 分别表示权重因子的最大和最小值; T_{\max} 表示最大的迭代次数。

2.3 精英交叉算子

传统粒子群优化算法中的粒子只学习最优粒子中的飞行经验,而没有参照其他粒子的经验。这样的一大缺陷在于粒子的多样性优势难以发挥,很可能会陷入早熟。且在初始化粒子时存在相似粒子,会出现收敛速度慢,易陷入局部最优等问题^[10]。交叉操作则能很好地解决该问题,交叉操作一方面能够使得粒子进行信息交换,另外一方面使得优秀的基因得以保留。为了使 MOPSO 尽快跳出局部最优,本文将精英交叉算子^[11]引入 MOPSO 之中。即在每次更新粒子位置后,产生一个随机数 a ,如果 a 小于默认的交叉概率 p_c ,则利用更新后的所有粒子中适应度最好的两个粒子生成两个新的粒子,新产生的两个粒子将替换更新后适应度最差的两个粒子并参与循环更新过程。新粒子的计算公式为:

$$\begin{cases} \text{Newparticle1} = bx_{\text{bestpart}}^1 + (1 - b)x_{\text{bestpart}}^2 \\ \text{Newparticle2} = (1 - b)x_{\text{bestpart}}^1 + bx_{\text{bestpart}}^2 \end{cases} \quad (12)$$

式中 b 代表从适应度最好的粒子中继承的比例; x_{bestpart}^1 和 x_{bestpart}^2 表示粒子位置更新后适应度最好的两个粒子; Newparticle1 和 Newparticle2 表示产生的新粒子。

2.4 外部档案维护策略

外部归档集的作用为储存粒子在更新过程中所探索到的非支配解。寻优过程开始前,在外部设置归档集,其大小和粒子大小相同。循环过程正式开始之前即将非支配解集全部存储到归档集中。每次循环结束,都将排序较高的粒子放入归档集中。循环次数到达上限时,归档集中存放的结果就是该经济环保负荷优化分配问题的 Pareto 解集。

由于循环结束后排序较高的粒子会不断地写入档案,而归档集的容量有限,当写入粒子的数量大于档案规模时应该删除排序较低的粒子,并再次重新排序,重复上述操作得到排序较高且和种群规模相等的外部归档集。一般认为,求解结果分布范围广且分布均匀视为优化效果较好。为了保证最终的 Pareto 解集分布的广度和均匀性,本文将非支配排序遗传算法(NSGA-II)中按照拥挤距离排序的方法引入到粒子群优化算法中来求解经济环保负荷优化分配问题。

设定任一粒子的初始拥挤距离为 0,单个目标拥挤距离的计算方法如下^[13]:

(1) 将归档集中的各粒子依次按照某一目标进行升序排序;

(2) 为了让粒子更能向排序在两端的地方飞行,定义边界点的拥挤距离大小为无穷大;

(3) 按照公式(13)计算各个体的拥挤距离。

$$L[j]_d = L[j]_d + (L[j+1]_i - L[j-1]_i) / (f_{max_i} - f_{min_i}) \quad (13)$$

式中 $L[j+1]_i$ 表示第 $j+1$ 个粒子的目标函数 i 的值; f_{max_i} 和 f_{min_i} 则分别表示各个粒子下目标函数 i 的最大值和最小值。

对于多个目标函数均执行(1)~(3)中的过程,得到所有粒子的拥挤距离,并将其从大到小排序。

2.5 求解 EED 问题时总体运算流程

根据以上思路,改进后的粒子群算法在求解负荷优化分配问题时的一般流程如图 2 所示,整个过程的实现均依靠机组的本地控制器。

具体步骤为:

Step1: 在机组 2, ..., N 承担的负荷界限内随机选取 Q 个点作为粒子初始位置。为了加速寻优过程,初始化公式为^[13]:

$$P_i = P_{min_i} + (P_{max_i} - P_{min_i}) \times \text{rand}(i = 2, \dots, N) \quad (14)$$

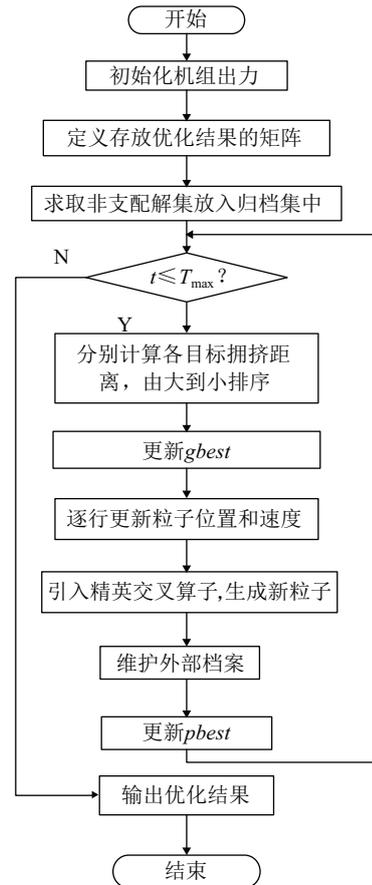


图 2 改进后的粒子群优化算法的流程图

Fig. 2 Flow chart of the improved particle swarm optimization algorithm

按照 2.1 节中的所提方法处理机组 1 的出力大小,粒子初始化为 Q 行 N 列的矩阵;

Step2: 定义同时存放机组出力大小,经济及环保性能指标和拥挤距离的矩阵,则该矩阵的维度为 $N+2+1$;

Step3: 对外部归档集进行初始化,选取非支配解集进入速度位置更新的循环中;

Step4: 循环开始,按照 2.4 节中的方法计算非支配解集中各粒子经济环保目标函数的拥挤距离,并从大到小排序;

Step5: 拥挤距离前 10% 的粒子中随机选取一行作为全局最优位置,此时的最优位置处于比较分散的区间,能够很好地提高算法的全局寻优能力;

Step6: 逐行更新粒子的速度和位置,公式为:

$$\begin{cases} v_j^{t+1} = wv_j^t + c_1 \times \text{rand}() \times (pbest_j^t - x_j^t) + c_2 \times \text{rand}() \times (gbest_j^t - x_j^t), (j = 1, \dots, Q) \\ x_j^{t+1} = x_j^t + v_j^t, (j = 1, \dots, Q) \end{cases} \quad (15)$$

式中 $\text{rand}()$ 介于 0 到 1 之间的随机数; x_j^i 表示第 j 个粒子当前的位置; v_j^i 表示第 j 个粒子当前的速度, $v_j^i = [v_{p2}^i, \dots, v_{pN}^i]^T$, 即选取的飞行粒子的总维度为 $N-1$;

$pbest_j^i$ 和 $gbest_j^i$ 分别表示第 j 个粒子当前的个体最优位置和群体最优位置。

按照 2.1 节中的所提方法处理机组 1 的出力大小;

Step7: 引入 2.3 节中的交叉算子, 生成新粒子;

Step8: 按照 2.4 节中的所提方法维护外部档案, 防止写入外部档案中的粒子溢出;

Step9: 当前粒子支配个体最优粒子时则用当前粒子替代个体最优粒子, 否则不操作;

Step10: 若迭代次数不满足则回到 Step4; 迭代次数满足后输出外部档案, 得到多行 $N+2+1$ 列的矩阵。

3 实例分析

将所提的负荷分配方法在三机组上进行测试, 其对应的特性参数^[14]如表 1 所示, 网损系数如下:

$$B = \begin{bmatrix} 0.06760 & 0.00953 & -0.00957 \\ 0.00953 & 0.05210 & 0.00901 \\ -0.00957 & 0.00901 & 0.02940 \end{bmatrix},$$

$$B_0 = \begin{bmatrix} -0.07660 \\ -0.00342 \\ 0.01890 \end{bmatrix} B_{00} = 0.04036$$

由表 1 可知扰动出现前 3 机组承担的总负荷大小为 908.06 MW, 而扰动出现后调度中心所给指令值大小为 1 200 MW, 为了避免各机组反向调节, 设置当前机组的出力作为出力下限, 计煤耗的单价为 71 \$/t。考虑忽略和计及网损两种情况下经济环保负荷分配的结果, 每种情况下均用文献[15]中的标准 MOPSO 和本文所提的 IMOPSO 分别求解。为了保证求解结果的公平性且简化获取最终分配结果的工作, 四次求解的算法粒子大小均为 50 个, 迭代次数均为 20 次。改进前 $c_1 = c_2 = 2, w = 1$, 改进后 $w_{\max} = 0.9, w_{\min} = 0.4$, 引入的精英交叉算子中交叉概率 $p_c = 0.8$, 从适应度最好的粒子中继承的比例 $b = 50\%$ 。

在忽略和计及网损两种情况下, 利用所提的粒子群优化算法和常规的粒子群优化算法得到的 Pareto 最优解集分别如图 3 和图 4 所示。

分析图 3 和图 4 中的结果可以发现引入精英交叉算子后 Pareto 解集的大部分点在改进前的下方, 只在经济成本较高的一段才重合。这说明精英交叉算子的引入很好地增强了粒子的多样性, 使其很快的跳出了

局部最优, 克服了常规粒子群优化算法求解高维粒子容易陷入局部最优的缺陷。此外, 引入的拥挤度排序的方法使得求解结果在分布上更加均匀, 和改进前相比能够为决策者提供更大的决策空间。

表 1 3 机组特性系数

Tab. 1 Characteristic coefficients of the three-unit

unit	a	b	c	α	β
1	0.000 4	0.108 2	26.591	1×10^{-4}	-0.073
2	0.000 1	0.263 0	13.155	-6×10^{-5}	0.0281
3	0.000 1	0.166 7	42.516	0	-0.002

unit	γ	λ	P_{\min}/MW	P_{\max}/MW	P/MW
1	17.151	-1 189.6	160	320	284.98
2	-7.511	733.82	160	320	174.63
3	2.021	-200.62	160	820	448.45

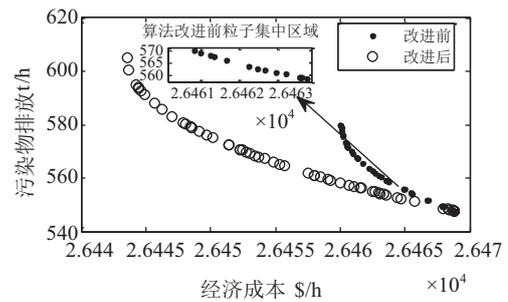


图 3 忽略网损时的 Pareto 最优解集

Fig. 3 Pareto optimal solution set without network loss

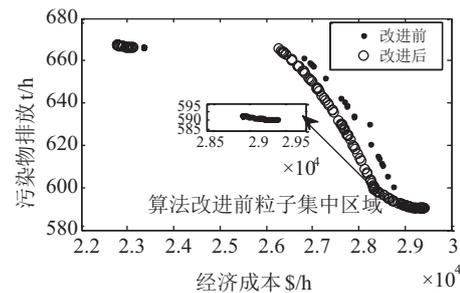


图 4 计及网损时的 Pareto 最优解集

Fig. 4 Pareto optimal solution set with network loss

在实际优化配置过程中, 最终实施的方案一般只有一个。利用文献[16-19]中的模糊隶属度函数筛选各种情况下的 Pareto 解集, 得到的该经济环保负荷优化分配的最终解如表 2 所示。该求解结果包括经济成本 F_e 、污染物排放量 F_g 、各机组出力大小 P_i , 并进一步计算各机组出力之和 P_Σ 以及网损 P_L 。

分析表 2 中结果可以发现,同样在 Pareto 解集中利用模糊隶属度函数对求解结果进行筛选,忽略网损时粒子群优化算法在改进后使得发电成本降低了 7 \$/h,污染物排放降低了 5.432 3 t/h。计及网损时粒子群优化算法在改进后使得发电成本降低了 174 \$/h,污染物排放降低了 11.041 8 t/h。该结果表明,所提算法在忽略和计及网损两种情况下都能

较好的适用于经济环保负荷多目标优化分配问题中。

同在算法改进后,计及网损时和忽略网损时相对比经济成本和污染物排放分别上升了 1 894 \$/h 和 30.722 8 t/h,该结果说明所研究的电力系统中网损对优化结果影响较大,进一步论证了给出精确计及网损时等式约束不等式处理方法的必要性。

表 2 算法改进前后的最优解

Tab. 2 Optimal solution before and after algorithm improvement

约束条件	求解方法	F_c /\$/h	F_g /t/h	P_1 /MW	P_2 /MW	P_3 /MW	P_Σ /MW	P_L /MW
忽略网损时	MOPSO	26 460	573.920 5	289.149 6	191.938 2	718.912 2	1200	0
	IMOPSO	26 453	568.470 2	284.980 0	190.451 0	724.569 0	1200	0
计及网损时	MOPSO	28 521	610.234 0	298.142 7	312.197 1	680.568 9	1 290.908 7	90.928 7
	IMOPSO	28 347	599.192 2	284.980 0	320.000 0	678.926 7	1 283.906 7	83.906 7

4 结束语

为了提升粒子群优化算法在求解 EED 问题时的表现,提出在求解过程中引入了精英交叉算子,并利用基于拥挤度排序的粒子群优化算法求解该模型,得出的结论如下:

(1) 引入精英交叉算子和基于拥挤度排序的 MOPSO 求解 EED 问题优化效果更好且 Pareto 前沿分布更加均匀。利用模糊隶属度函数筛选 Pareto 解集得到的唯一负荷优化分配结果证明所提方法能有效降低发电成本及污染物排放;

(2) 在计及网损时,为了保证分配结果的精确性同时考虑了网损计算式中的 B 、 B_0 、 B_{00} 系数。通过设置平衡机组的方式处理等式不等式约束,在该种方法下给出了平衡机组出力大小的设定公式和等式不等式处理的一般流程,使得求解结果能严格满足等式不等式约束条件;

(3) 机组在实际运行时在出力上限和下限之间还存在着禁止运行区间,如何利用改进的粒子群优化算法处理多段禁止的运行区间,将是下一步要解决的问题。

参 考 文 献

[1] 李滨, 粟归玉. 低碳电力下多目标机组组合优化调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(11): 1-8.
Li Bin, Su Guiyu. Multi-objective Unit commitment optimization dispatch in the low-carbon Electricity[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(11): 1-8.
[2] 李燕青, 全年. 基于多属性决策的微电网多目标优化运行[J]. 电测与仪表, 2018, 55(4): 55-60, 69.

Li Yanqing, Tong Nian. Multi-objective optimization of micro-grid operation based on multiple attribute decision making[J]. Electric Measurement & Instrumentation, 2018, 55(4): 55-60, 69.
[3] 傅利, 周步祥, 林虹江, 等. 基于混合变量动态优化算法的含风电电力系统多目标动态优化调度[J]. 电测与仪表, 2015, 52(10): 1-7.
Fu Li, Zhou Buxiang, Lin Hongjiang, et al. Dynamic optimization dispatching of power system multi-objective containing wind power based on hybrid variable dynamic optimization algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(10): 1-7.
[4] Singh N J, Dhillon J S, Kothari D P. Non-interactive Approach to Solve Multi-objective Thermal Power Dispatch Problem using Composite Search Algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2018, 65(11): 644-658.
[5] 王治国, 刘吉臻, 谭文, 等. 基于快速性与经济性多目标优化的火电厂厂级负荷分配研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 86-92.
Wang Zhiguo, Liu Jizhen, Tan Wen, et al. Multi-objective optimal load distribution based on speediness and economy in power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(19): 86-92.
[6] 马一鸣, 周夕然, 董鹤楠, 等. 考虑电转气与冷热负荷惯性的综合能源系统优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(8): 118-127, 138.
[7] 曾飞, 苏伟, 徐广开, 等. 含快充负荷的低压直流互联配电网多时间尺度经济调度[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(1): 14-23.
[8] Niknam T, Doagou-Mojarrad H. Multiobjective economic/emission dispatch by multiobjective thetas-particle swarm optimisation[J]. Iet Generation Transmission & Distribution, 2012, 6(5): 363-377.
[9] 周任军, 李绍金, 李红英, 等. 空间粒子群优化算法及其在电力系统环保经济负荷分配中的应用[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 7-12.
[10] 强国栋, 高锋阳, 乔垚, 等. 基于改进粒子群算法的配电网无功优化[J]. 电测与仪表, 2018, 55(14): 21-26.

(下转第 129 页)

tion algorithm of multi-carrier signals based on CAF coherent integration [J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(8): 1881-1886.

[18] 毛虎, 吴德伟, 刘海波, 等. GPS 军码信号监测与参数估计方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(11): 2431-2438.
Mao Hu, Wu Dewei, Liu Haibo, et al. GPS military signal monitoring and parameter estimation method [J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(11): 2431-2438.

[19] 曹保锋, 李鹏, 李小强, 等. 基于强耦合 Duffing 振子的微弱脉冲信号检测与参数估计 [J]. 物理学报, 2019, 68(8): 63-73.
Cao Baofeng, Li Peng, Li Xiaoqiang, et al. Detection and parameter estimation of weak pulse signal based on strongly coupled Duffing oscillators [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(8): 63-73.

[20] 戚振彪, 凌松, 刘文焯, 等. 基于高频测试信号注入的配电网故障节点在线识别方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 110-117.
Qi zhenbiao, Ling song, Liu Wenye, et al. On-line fault node identification method for distribution network based on high frequency test signal injection [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 110-117.

[21] 高伟, 郭谋发, 许立彬. 基于改进 CWD-CNN 的配电网内部过电压类型识别方法 [J]. 电机与控制学报, 2020, 24(8): 131-140. Gao Wei, Guo moufa, Xu Libin. Recognition method of internal overvoltage type for distribution network via improved CWD-CNN [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(8): 131-140.

[22] 曾芳玲, 张海川. 利用分形盒维数的 OFDM 信号与单载波信号识别研究 [J]. 信号处理, 2019, 35(11): 1904-1910.

Zeng Fangling, Zhang Haichuan. The Study on Identification for OFDM Signal and Single Carrier Signal with Fractal Dimension Box [J]. Journal of Signal Processing, 2019, 35(11): 1904-1910.

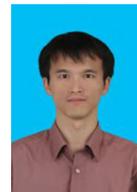
[23] 程春, 赵玉新, 李亮, 等. BDS 空间信号异常实时检测与排除方法 [J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(4): 603-616.

[24] 洪翠, 付宇泽, 郭谋发, 等. 改进多分类支持向量机的配电网故障识别方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(1): 7-15.

[25] 刘洋, 赵艳雷, 王舳舳, 等. 主动配电网故障时刻和故障区域的同步数据统计特性识别方法 [J]. 电网技术, 2019, 43(3): 826-832.

[26] 王利云, 刘奇, 陈卯蒸, 等. 宽带频谱序列干扰信号识别与统计方法 [J]. 天文学报, 2019, 60(5): 33-44.

作者简介:



严宇平(1985—),男,高级工程师,硕士,研究方向为数据挖掘技术。Email: yanyuping851024@163.com

洪雨天(1990—),男,工程师,本科,研究方向为计算机科学与技术。
陈守明(1986—),男,高级工程师,硕士,研究方向为网络安全与数字化技术。
王建永(1980—),男,高级工程师,硕士,研究方向为电力信息化技术。

收稿日期:2022-04-13;修回日期:2022-07-27

(任美辉 编发)

(上接第 122 页)

[11] Annicchiarico WD, Cerrolaza, M. Improved Dynamical Particle Swarm Optimization Method for Structural Dynamics [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019: 1-11.

[12] 陈正鹏. 多目标进化算法中外部归档集维护策略的研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.

[13] Zou D, Li S, Li Z, et al. A new global particle swarm optimization for the economic emission dispatch with or without transmission losses [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 139: 45-70.

[14] 简一帆, 陈彦桥, 曾德良. 基于 TOPSIS 的火电机组负荷优化分配 [J]. 热能动力工程, 2017, 32(1): 70-74, 122-123.

[15] 毕莹. 基于粒子群算法的多目标优化方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.

[16] Modiri-Delshad M, Rahim N A. Multi-objective Backtracking Search Algorithm for Economic Emission Dispatch Problem [J]. Applied Soft Computing, 2015, 40: 479-494.

[17] 郭浩泽, 朱晨旭, 张贻山, 等. 一种基于改进模糊聚类算法的自适应典型日选取方法 [J]. 智慧电力, 2022, 50(1): 60-67.

[18] 王磊, 张家敏. 基于模糊机会约束规划的跨区直流电网系统优化调度 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 12-19.

[19] 李志军, 王硕, 张家安, 等. 基于变论域模糊逻辑的互联电力系统负荷频率控制 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 151-160.

作者简介:



魏家柱(1994—),男,硕士研究生,从事电力系统及其自动化技术研究。Email: wjzjnu@163.com

潘庭龙(1976—),男,通信作者,教授,博士生导师,主要从事新能源发电控制及功率变换技术研究。Email: tlpn@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2020-01-14;修回日期:2022-04-23

(田春雨 编发)