

基于改进多目标骨干粒子群算法的电力系统环境经济调度

帅茂杭¹, 熊国江^{1†}, 胡晓¹, 陈锦龙²

(1. 贵州大学 电气工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州电网有限责任公司电力调度控制中心, 贵阳 550002)

摘要: 针对粒子群优化算法种群多样性不足、易陷入局部寻优的问题, 提出一种基于改进多目标骨干粒子群优化算法(improved bare-bones multi-objective particle swarm optimization, IBBMOPSO)的电力系统环境经济调度的求解方法. IBBMOPSO 采用一种搜索权重非线性递减策略改进骨干粒子群的位置更新模式, 并在不同搜索阶段对最差粒子设计不同的位置更新策略, 以平衡算法的全局搜索能力和局部搜索能力. IBBMOPSO 根据粒子拥挤距离选择全局最优解, 采用距离评价指标选择折衷最优解. 最后对 6 机 IEEE 30 节点的标准测试系统进行仿真计算, 并与其他算法进行对比分析, 结果显示 IBBMOPSO 在解决电力系统环境经济调度问题上优于其他算法, 具有良好的可行性和有效性.

关键词: 环境经济调度; 多目标优化; 骨干粒子群; 折衷最优解; 拥挤距离; 距离评价

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1440

引用格式: 帅茂杭, 熊国江, 胡晓, 等. 基于改进多目标骨干粒子群算法的电力系统环境经济调度[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 997-1004.

Economic emission dispatch of power system based on improved bare-bone multi-objective particle swarm optimization algorithm

SHUAI Mao-hang¹, XIONG Guo-jiang^{1†}, HU Xiao¹, CHEN Jin-long²

(1. School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Electric Power Grid Dispatching and Control Center, Guiyang 550002, China)

Abstract: Aiming at the insufficient population diversity of the particle swarm optimization algorithm and the problem of falling into local optimization easily, this paper proposes a method for economic emission dispatch of power systems based on the improved bare-bones multi-objective particle swarm optimization (IBBMOPSO). The IBBMOPSO adopts a non-linear decreasing strategy of search weight to improve the position update mode of the bare-bones particle swarm and designs different position update strategies for the worst particles in different search stages to balance the algorithm's global search ability and local search ability. The IBBMOPSO selects the global optimal solution according to the particle crowding distance and uses the distance evaluation index to select the compromise optimal solution. Finally, the 6-machine IEEE30-node standard test system is simulated and compared with other algorithms. The results show that the IBBMOPSO is superior to other algorithms in solving the problem of power system economic emission dispatch, and has good feasibility and effectiveness.

Keywords: economic emission dispatch; multi-objective optimization; bare-bones particle swarm; compromise optimal solution; crowded distance; distance evaluation

0 引言

火力发电厂在运行过程中排放大量的有害气体, 对环境造成严重污染, 是导致全球气候变暖的主要原因之一. 近些年来, 节能减排成为电力系统的一个重要调度目标, 要求发电厂发电成本或燃料费用最低的同时, 还要保证对环境造成的危害最小, 最大

限度地减少空气污染. 因此, 对于电力系统调度而言, 应同时考虑经济成本 and 环境影响, 从单目标经济调度向多目标环境经济调度 (environmental economic dispatch, EED) 改变.

在环境经济调度问题中, 发电成本函数和污染气体排放量函数是相互矛盾的. 概而论之, 发电成本最

收稿日期: 2020-10-19; 录用日期: 2021-02-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51907035); 贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合KY字[2018]108); 贵州大学引进人才科研项目(贵大人基合字[2017]16).

†通讯作者. E-mail: gjxiongee@foxmail.com.

低时,会对环境造成更严重的污染,反之,当污染气体排放量最少时,则经济效益不高.经济效益与环境利益不可偏废,所以寻找两者之间的一个利益平衡点,达到两者利益的最大化具有重要的现实意义.

EED优化问题是一个非凸、非线性、高维数、多个约束条件的多目标优化问题^[1],传统的数学优化算法在求解过程中将会出现非可行解,并且运算时间过长,也难以得到满意解.目前,智能优化算法广泛应用于环境/经济调度问题,在多目标、非线性和高维数等优化问题中具有一定的优势.文献[2]在微分进化算法中融合了粒子群优化算法,发挥两种算法的优点,并采用模糊决策技术从Pareto前沿中提取折中最优解以供决策者进行选择.文献[3]提出了基于分解的多目标进化算法(MOEA),首先采用Tchebycheff法将全部EED中Pareto最优前沿的逼近问题分解为多个子问题,同时利用差分进化处理这部分子问题,从而得到最优的调度方案.文献[4]提出了多目标随机黑洞粒子群优化算法来解决EED优化问题,提出带等式约束的Pareto占优条件,使解的可行区域包括Pareto最优解集,从中选择折衷最优解.文献[5]提出了一种差分进化-交叉粒子群算法,通过参数自适应控制更新交叉概率,使其收敛速度优于其他算法.文献[6]提出了一种基于改进遗传算法和改进粒子群优化算法的混合算法来求解EED优化问题,使用非线性时变双加权策略,提高了搜索效率,并采用两种校正方法监控和修改粒子速度和位置.

粒子群优化算法(particle swarm optimization, PSO)^[7-10]具有参数设置少、收敛速度快、实现简单等优点,已广泛应用于电力系统无功优化、光电并网、负荷预测等领域.然而,PSO算法的不足之处在于求解精度低、易发散等.在算法前期收敛速度快,若速度参数长时间保持一个较大值,则有可能错过最优解,陷入局部最优解.在算法后期,所有粒子都朝着最优解的位置飞去,多样性不足,导致后期收敛速度缓慢.骨干粒子群优化算法(bare-bones particle swarm optimization, BBPSO)^[8]具有无需整定参数、原理简单等优点,能够有效解决因参数设置带来的问题,但BBPSO算法与PSO算法均易陷入早期收敛且多样性不足.

针对上述几个方面,本文将全局搜索能力更佳的全局搜索权重非线性递减策略与骨干粒子群优化算法相结合,针对寻优能力最差的粒子设计一种在不同搜索阶段不同位置的更新策略.改进算法不需要设置速度参数,避免了前期因为速度过大而错过最优解,并

引入搜索权重,在算法前期侧重于全局搜索,后期侧重于局部搜索.同时,更新策略能够加快粒子之间信息的交流,获得更好的寻优能力以及增加粒子的多样性,在算法后期也有较好的收敛速度.将其运用到EED优化问题中,并通过IEEE 30节点测试系统进行仿真计算.

1 EED问题数学模型

EED问题需要满足等式约束以及诸多不等式约束,以发电机组发电成本最低和污染气体排放量最少为目标,详细描述如下.

1.1 目标函数

1) 经济调度.以系统所有发电机组发电成本最低为调度目标,总发电成本 $F(P_G)$ 的目标函数表达式用一个二次函数^[11]表示,即

$$F(P_G) = \sum_{i=1}^N (a_i + b_i P_{G_i} + c_i P_{G_i}^2). \quad (1)$$

其中: N 为发电系统中发电机组总数; a_i 、 b_i 、 c_i 为发电机组 i 的发电成本系数; P_{G_i} 为发电机组 i 的有功功率; P_G 为系统发电机组有功出力向量,有

$$P_G = [P_{G_1}, P_{G_2}, \dots, P_{G_N}]. \quad (2)$$

2) 环境调度.以发电机组污染气体排放量最少为调度目标,各污染气体排放量与各机组注入系统的实际功率有关,且均为单独的函数关系.为了便于计算建立综合函数关系,采用如下综合排放模型^[11]:

$$E(P_G) = \sum_{i=1}^N [10^{-2}(\alpha_i + \beta_i P_{G_i} + \gamma_i P_{G_i}^2) + \zeta_i e^{\lambda_i P_{G_i}}], \quad (3)$$

其中 α_i 、 β_i 、 γ_i 、 ζ_i 、 λ_i 为发电机组 i 的污染气体排放特性方程系数.

1.2 约束条件

系统负荷平衡约束为

$$\sum_i^N P_{G_i} - P_D - P_{\text{loss}} = 0. \quad (4)$$

其中: P_{G_i} 为发电机组 i 的有功功率; P_D 为负荷的有功功率; P_{loss} 为系统总传输网络损耗.

P_{loss} 与发电机组有功功率、传输线路参数以及系统结构有关,求解方法有潮流计算或B系数法,本文采用B系数法求解.此方法将网络损耗与系统发电机组输出水平建立函数关系,进而计算网络损耗,具体公式如下:

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_{G_i} B_{ij} P_{G_j} + \sum_i P_{G_i} B_{i0} + B_{00}, \quad (5)$$

其中 B_{ij} 、 B_{i0} 、 B_{00} 为发电系统网络损耗系数。

发电机组出力约束为

$$P_{G_i \min} \leq P_{G_i} \leq P_{G_i \max}. \quad (6)$$

其中: $P_{G_i \min}$ 为发电机组 i 的有功出力下限; $P_{G_i \max}$ 为发电机组 i 的有功出力上限。

2 改进算法求解EED问题

2.1 骨干粒子群算法

Kennedy^[8]于2003年提出了骨干粒子群优化算法,该算法原理简单,无需设置速度因子、惯性权重以及加速因子等参数。设BBPSO算法在一个 d 维的搜索空间中,种群由 m 个粒子组成,其中第 i 个粒子在迭代时的位置为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$, $i = 1, 2, \dots, m$ 。它是优化问题的一个潜在解,将其代入优化目标函数可以计算出相应的适应值。第 i 个粒子经历过的最好位置为 $p_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$, 群所经历过的最好位置为 $p_{gd} = (g_{i1}, g_{i2}, \dots, g_{id})$ 。BBPSO算法中,粒子位置更新采用高斯采样法生成新的位置,更新公式如下:

$$x_{id}^{t+1} = N\left(\frac{p_{id}^t + p_{gd}^t}{2}, |p_{id}^t - p_{gd}^t|\right). \quad (7)$$

其中: N 为高斯分布函数; p_{id}^t 和 p_{gd}^t 分别为第 t 次迭代个体最优解和全局最优解; t 为粒子当前的迭代次数; x_{id}^t 为第 i 个粒子中第 d 维在第 t 次迭代的位置。第 d 维粒子元素的位置变化范围限制为 $[X_{d,\min}, X_{d,\max}]$ 。迭代过程中,若某一维粒子元素的 x_{id} 超出边界值则令其等于边界值。

2.2 算法改进

BBPSO算法中,个体最优解与全局最优解的权重相同,不满足算法在不同搜索阶段对于搜索性能的要求。为了加强算法前期的全局搜索能力和后期的局部搜索能力,提出了一种IBBMOPSO算法,更新公式如下:

$$x_{id}^{t+1} = \begin{cases} N\left(\frac{\omega_1 p_{id}^t + \omega_2 p_{gd}^t}{2}, \alpha |p_{id}^t - p_{gd}^t|\right), & r < 0.5; \\ p_{gd}^t, & r \geq 0.5. \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$\begin{cases} \omega_1 = 1.6 - \frac{1.2}{1 + e^{a-bt}}, \\ \omega_2 = 0.4 + \frac{1.2}{1 + e^{a-bt}}, \\ \alpha = 1 - \frac{0.5}{1 + e^{a-bt}}, \end{cases} \quad (9)$$

ω_1 、 ω_2 分别为个体最优解和全局最优解的搜索权重; r 为 $[0, 1]$ 范围内变化的随机数; α 为搜索范围; n

为迭代次数; T 为最大迭代次数,本文 T 取 500, b 取 0.03, $a = bT/2$ 。在位置更新之前,产生一个 $[0, 1]$ 范围内变化的随机数 r 。若 $r \leq 0.5$,则第 $t+1$ 代粒子 i 在第 d 维度上的位置 x_{id}^{t+1} 由高斯分布直接获得。高斯分布的均值为 $(\omega_1 p_{id}^t + \omega_2 p_{gd}^t)/2$, 标准差为 $\alpha |p_{id}^t - p_{gd}^t|$ 。若 $r \geq 0.5$,则第 $t+1$ 代粒子 i 在第 d 维度上的位置 x_{id}^{t+1} 等于全局最优值的第 d 维度上的位置 p_{gd}^t 。

ω_1 、 ω_2 和 α 的变化曲线如图1所示。在算法前期, ω_1 和 α 较大,以全局搜索为主。在算法后期, ω_2 较大,以局部搜索为主。骨干粒子群算法的概率式搜索方式提高了算法的精度和效率,不需要设置复杂的参数,避免了因加速因子、惯性权重等参数设置过大而错过最优解。

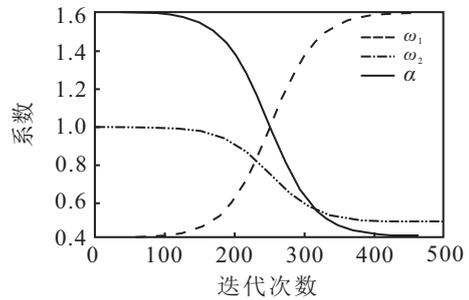


图1 相关系数变化趋势

在PSO算法中,粒子结合自身信息和全局最佳粒子传递的信息更新自身位置。每一次迭代后,各粒子都应向最优解靠近。算法前期 ($t < T/2$),对寻优能力最差的粒子采用新的位置更新公式,有

$$x_{id}^{t+1} = r(x_{gd}^t - x_{kd}^t) + x_{id}^t; \quad (10)$$

算法后期 ($t \geq T/2$) 更新公式如下:

$$x_{id}^{t+1} = r(x_{gd}^t - x_{2d}^t) + x_{2d}^t. \quad (11)$$

其中: r 为 $[0, 1]$ 范围内变化的随机数; x_{gd}^t 为当前全局最优的粒子位置; x_{kd}^t 为第 k 个粒子位置, k 值随机产生; x_{2d}^t 为当前全局第2优的粒子位置; x_{id}^t 为寻优能力最差的粒子。在IBBMOPSO算法中,计算各粒子在群体中被支配粒子的数量,按从小到大的顺序排列,被支配粒子数目最多的粒子为寻优能力最差的粒子,被支配粒子数目为零的粒子为寻优能力最强的粒子。

算法前期,最差粒子通过全局最优粒子、种群中某一粒子和自身信息更新位置,具有较快的信息流动,能够获得更好的寻优能力。在算法后期,最差粒子仅通过全局最优粒子和全局第2优粒子信息更新位置,使该粒子的位置复位到全局最优粒子位置附近,能够使PSO算法收敛到全局最优,该改进提升了PSO算法的收敛速度和寻优能力。

EED问题约束处理:在满足发电机组最大和最

小出力约束的条件下,随机产生初始粒子,将初始值代入式(5),计算出网络损耗.将这部分损耗加到第1个机组的有功出力,若不满足不等式约束条件,则加到第2个机组有功出力,依次推之.

2.3 改进算法IBBMOPSO的EED问题求解

多目标算法与单目标算法的区别在于全局最优解不是单一的,是由多个最优解构成,这便需要重新定义种群的全局最优解和个体最优解.最优解由一个确定的解变成了一组解,其优化得到的结果为一组Pareto最优解,或称为Pareto最优前沿.

由目标函数、等式约束条件以及不等式约束条件共同构建有约束的非线性多目标优化模型,即

$$\begin{aligned} \min Y(\mathbf{X}) &= \min[F(\mathbf{X}), E(\mathbf{X})]; \\ \text{s.t. } g(P_G) &= 0, h(P_G) \leq 0. \end{aligned} \quad (12)$$

其中: $F(\mathbf{X})$ 、 $E(\mathbf{X})$ 为目标函数; $g(P_G)$ 、 $h(P_G)$ 分别为模型的等式约束和不等式约束.在EED问题中, $F(\mathbf{X})$ 为总发电成本, $E(\mathbf{X})$ 为污染气体排放量,分别满足系统负荷平衡约束和发电机组出力约束.

EED属于多目标问题,目标的度量往往不一致,各目标之间存在矛盾性,某个目标值最优时往往另一个目标值会变劣,所以不存在满足所有约束条件下能使得所有目标达到最优的解,要求求出一组非劣解.对一个或多个目标函数不能继续优化,对其他目标函数不至于变劣的解称为Pareto最优解,定义如下:对于多优化目标求最小值,若可行域中有解向量 x_1 和 x_2 ,当且仅当满足如下两个条件:

$$\forall i \in \{1, 2, \dots, N_{\text{obj}}\}: f_i(x_1) \leq f_i(x_2), \quad (13)$$

$$\exists j \in \{1, 2, \dots, N_{\text{obj}}\}: f_j(x_1) < f_j(x_2), \quad (14)$$

称 x_1 支配 x_2 ,或称 x_1 占优.其中 N_{obj} 为优化目标函数的总个数.

Pareto最优解集由所有的Pareto最优解构成,这些解经目标函数映射构成了该问题的Pareto最优前沿(POF),即Pareto最优解对应的目标函数值即为Pareto最优前沿.

本文算法采用Pareto支配关系确定个体最优值,即判断本次迭代产生的粒子是否支配上一次迭代产生的个体最优值,是则本次粒子取代个体最优值,否则保持不变.使用外部存档集合是当前确定全局最优解最常用的方法,保存Pareto最优解,计算外部档案中每个Pareto最优解的拥挤距离,拥挤距离越大,被选作全局最优解的概率就越大.

IBBMOPSO算法的步骤如下.

step 1: 随机产生 n 个粒子,初始化这 n 个粒子在种群中的初始位置,每个粒子的维度和搜索空间的维度相同.

step 2: 进行约束条件处理,计算每个粒子的适应度,依照非支配关系形成个体最优值解集和全局最优值解集,并存储数据.

step 3: 通过支配关系和拥挤距离确定每个粒子的个体最优值和全局最优值.

step 4: 结合改进粒子群算法的位置更新公式,调整每个粒子的位置,并判断位置是否满足约束条件,不满足则需要调整位置.

step 5: 更新外部存储数据,将非支配解集存储,被支配解删除.

step 6: 更新全局最优解和个体最优解,算法达到最大迭代次数或者满足迭代要求后停止迭代,如果不满足迭代结束条件则返回step 2.

2.4 折衷最优解的选择

本文选择距离评价指标^[4]选择折衷最优解,如图2所示.图中所有点均处在Pareto最优前沿上, Q_1 为发电成本最小值, Q_3 为污染气体排放量最小值; P 为理想解,表示发电成本最低的同时污染气体排放量最少,但在现实中还未实现.在空间中,距离 P 点最近的点 Q_2 为折衷最优解.

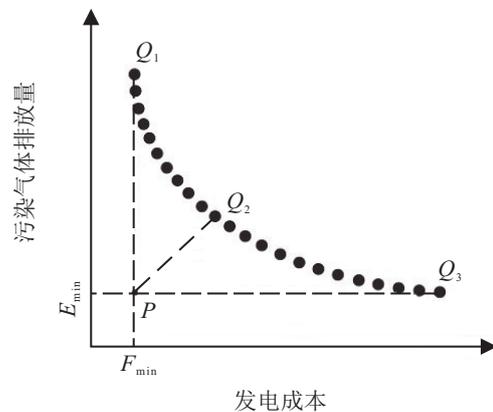


图2 距离评价指标方法

3 仿真算例

将IBBMOPSO算法应用到电力系统环境经济调度优化计算中,选择IEEE 30节点系统,系统有功负荷总和为283.4 MW,发电机组能耗参数、污染气体排放量参数、发电机组最大功率约束、最小功率约束如表1所示,网络损耗系数矩阵见文献[12].为了验证算法有效、准确,分别对考虑网络损耗和不考虑网络损耗两种情况进行仿真分析.在配备Intel Core i-5 5200U和8 GB RAM的计算机上执行,操作系统为Windows 7,使用Matlab 9.0进行仿真计算.

表1 发电机组能耗参数

机组编号	a	b	c	$P_{G \max}$	$P_{G \min}$	α	β	γ	δ	λ
G_1	10	2.0	0.010	150	5	4.091	-5.554e-2	6.490e-4	2.00e-4	2.857e-2
G_2	10	1.5	0.012	150	5	2.543	-6.047e-2	5.638e-4	5.00e-4	3.333e-2
G_3	20	1.8	0.004	150	5	4.258	-5.094e-2	4.586e-4	1.00e-6	8.000e-2
G_4	10	1.0	0.006	150	5	5.326	-3.550e-2	3.380e-4	2.00e-3	2.000e-2
G_5	20	1.8	0.004	150	5	4.258	-5.094e-2	4.586e-4	1.00e-6	8.000e-2
G_6	10	1.5	0.010	150	5	6.131	-5.555e-2	5.151e-4	1.00e-5	6.667e-2

3.1 经济调度与环境调度

分别求解发电成本费用最低时和污染气体排放量最少时的发电机组有功出力. 粒子数目为50, 最大迭代次数为500, 与其他文献的求解结果以及MOPSO算法和BBMOPSO算法进行对比. 其中MOPSO为基本多目标粒子群算法, ω 采用惯性权重线性递减策略, BBMOPSO为基本多目标骨干粒子群算法. 采用式(7)更新策略.

1) 考虑网损.

表2给出了考虑网损的经济调度计算结果. 本文

算法求得的发电成本费用为605.9894 \$/h, 优于其他算法, 且本文算法得出的网络损耗值最小. 此时的污染气体排放量为0.22033 t/h, 优于除文献[4]算法外的其他算法, 但文献[4]算法所求出的发电成本是所有算法中最高的, 因此不具有可比性. 表3(污染气体排放量最优)中, 本文算法求得的污染气体排放量最小值为0.194179 t/h, 与MA θ -PSO算法、文献[11]算法和MODEPSO算法所求得的最小值一样, 优于其他算法所求出的排放量值, 但本文算法求得的发电成本费用为645.9038 \$/h, 低于上述3种算法的结果, 因此本文算法取得了更好的最优解.

表2 考虑网损的经济调度计算结果(成本最优)

算法	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	网损/MW	发电成本/(\$/h)	排放量/(t/h)
文献[11]算法	12.0962	28.6327	58.3572	99.2875	52.3938	35.1888	2.5562	605.9983	0.2207
文献[4]算法	11.28	30.9507	60.0571	96.5087	50.5667	36.9587	2.9386	607.0217	0.21871
MA θ -PSO ^[13]	12.0969	28.6312	58.3557	99.2854	52.397	35.1899	2.5562	605.9983	0.2206
MODEPSO ^[14]	12.20	28.43	58.57	99.62	51.49	35.66	2.555	606.0073	0.22089
CMOPSO ^[14]	11.55	27.64	58.09	98.58	53.42	36.69	2.560	606.0472	0.220468
SMOPSO ^[14]	12.17	29.33	57.07	99.59	52.68	35.14	2.597	605.9909	0.220692
MOPSO	39.26	47.24	54.84	41.33	55.03	49.09	3.3922	642.7938	0.194250
BBMOPSO	11.3909	28.1332	57.6257	100.6156	53.0015	35.2222	2.5891	606.0212	0.22191
IBBMOPSO	12.0370	28.5936	58.0695	98.8797	52.2117	36.1634	2.5551	605.9894	0.22033

表3 考虑网损的环境调度计算结果(排放量最优)

算法	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	网损/MW	发电成本/(\$/h)	排放量/(t/h)
文献[11]算法	41.0880	46.3668	54.4424	39.0374	54.4459	51.5485	3.5328	646.2073	0.194179
文献[14]算法	40.8842	46.0386	53.9616	40.6479	54.8185	50.2548	3.09	643.6474	0.19420
MA θ -PSO ^[13]	41.0925	46.3685	54.4419	39.0374	54.4459	51.5485	3.533	649.2070	0.194179
MODEPSO ^[14]	41.18	46.16	54.35	39.22	54.54	51.48	3.535	646.0243	0.194179
CMOPSO ^[14]	40.67	46.66	54.470	39.17	54.17	51.77	3.517	645.9985	0.194182
SMOPSO ^[14]	39.80	47.83	54.98	36.29	55.18	52.82	3.495	648.5035	0.194250
TVMOPSO ^[14]	39.26	47.24	54.84	41.33	55.03	49.09	3.3922	642.7938	0.194250
MOPSO	42.2792	44.5419	55.1428	38.6125	52.1592	54.2868	3.6225	647.7023	0.194283
BBMOPSO	41.5338	46.2817	55.2272	39.0276	52.5176	52.3776	3.5656	646.7851	0.194205
IBBMOPSO	41.0080	46.3373	54.3674	39.3403	54.3899	51.4924	3.5355	645.9038	0.194179

2) 不考虑网损.

表4给出了不考虑网损的各种算法的经济调度计算结果. 本文算法求得的发电成本费用最小值为600.1114 \$/h, 与MA θ -PSO算法和文献[11]算法所求出的结果相同, 均明显优于其他算法. 此时的污染气体排放量为0.22211 t/h, 与MA θ -PSO算法和文献[11]算法所求结果接近. 其他算法求出的发电成本值均大于本文算法, 因此不具有可比性. 表5(污染气

体排放量最优)中, 求出的污染气体排放量最小值为0.19420 t/h, 与DE-IMOPSO算法、文献[11]算法和FCPSO算法所求得结果相同, 优于NPGA、MA θ -PSO和MOPSO算法, 且发电成本637.8873 \$/h明显低于其他算法.

由表2~表4数据对比可以看出, 无论是否计算网络损耗, 本文算法所求解出的环境经济调度方案均优于其他算法.

表4 不考虑网损的经济调度计算结果(成本最优)

算法	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	发电成本/(\$/h)	排放量/(t/h)
文献[11]算法	10.9714	29.9758	52.4324	101.6216	52.4271	35.9717	600.1114	0.22210
DE-IMOPSO ^[12]	11.56	30.44	52.78	116.90	51.47	35.43	600.124	0.22190
NPGA ^[12]	10.80	32.84	53.86	100.67	49.49	35.74	600.259	0.22116
FCPSO ^[12]	10.70	28.97	52.50	99.03	53.00	36.73	600.131	0.22226
MA θ -PSO ^[13]	10.9719	29.9766	52.4298	101.6199	52.4298	35.9719	600.1114	0.22210
MOPSO	11.8210	29.7517	54.7533	102.2916	50.2331	33.9243	600.2121	0.22312
BBMOPSO	11.2284	29.9416	50.4932	102.4182	52.7037	36.6147	600.1353	0.22250
IBBMOPSO	10.9929	29.9753	52.4137	101.5984	52.4230	35.9966	600.1114	0.22211

表5 不考虑网损的环境调度计算结果(排放量最优)

算法	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	发电成本/(\$/h)	排放量/(t/h)
文献[11]算法	40.6093	45.9072	53.7959	38.2924	53.7968	50.9984	638.2757	0.19420
DE-IMOPSO ^[12]	40.97	46.06	53.73	38.63	53.47	52.38	639.415	0.19420
NPGA ^[12]	40.02	44.74	51.66	36.88	57.51	52.59	639.182	0.19433
FCPSO ^[12]	40.97	45.50	53.63	38.42	53.48	51.40	638.357	0.19420
MA θ -PSO ^[13]	40.6074	45.9069	53.7939	38.2953	53.7939	51.0027	638.2734	0.19422
MOPSO	41.6875	44.1327	54.8251	35.8507	54.2608	52.6429	640.7179	0.19427
BBMOPSO	37.9262	48.7142	56.7343	37.6358	50.8123	51.5769	638.6734	0.19439
IBBMOPSO	39.9311	45.7694	53.7123	38.3797	54.2030	51.4041	637.8873	0.19420

3.2 环境经济调度

对机组发电成本费用和污染气体排放量同时进行优化, Pareto最优解集个数为50. 为了充分表明本文改进算法的有效性, 应用MOPSO算法、BBMOPSO算法以及本文算法对考虑网损和不考虑网损两种情况下的测试系统进行求解, 结果如图3(考虑网损)和图4(不计网损)所示.

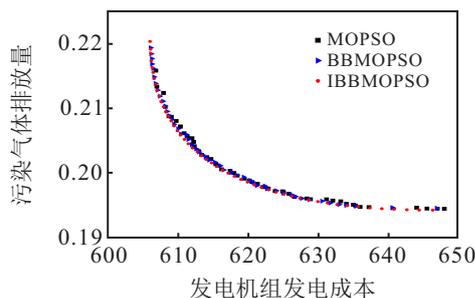


图3 Pareto最优前沿对比(考虑网损)

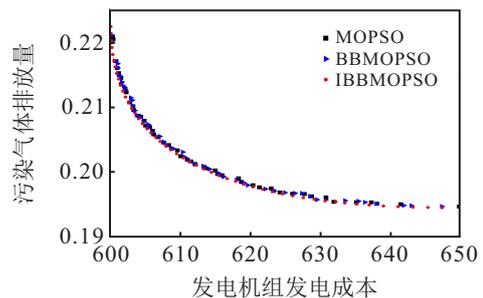


图4 Pareto最优前沿对比(不计网损)

由MOPSO和BBMOPSO算法得到的Pareto最优前沿分布不均匀, 本文算法所得到的Pareto最优前沿更加光滑和均匀, 分布范围更广, 并且没有重叠解. 通过距离评价指标选择出折衷最优解, 并与其他算法结果作比较, 结果见表6. 考虑网损时, 本文算法求出的折衷最优解排放量最优, 发电成本略高于NPGA和文献[11]算法, 发电成本和污染气体排放量均优

于文献[4]算法. 不考虑网损时,发电成本最优,排放量略高于其他算法. 反世代距离评价指标 (inverted generational distance, IGD)^[15] 能够评价算法性能,通过计算在真实 Pareto 最优前沿的点到算法个体的最小距离和来评价算法的收敛性能和分布性能,计算结果越小表明算法的收敛性和多样性越好,有

$$IGD(PS, Q) = \frac{\sum_{v \in P} d(v, Q)}{|PS|} \quad (15)$$

其中: PS 为真实 Pareto 最优前沿的点集; Q 为计算得到的 Pareto 最优前沿上的点集; $d(v, Q)$ 为种群个体 v 到种群 Q 的最小欧几里得距离; |PS| 为点集数目.

表 6 环境经济调度折衷最优解

算法	考虑网损	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6	发电成本/(\$/h)	排放量/(t/h)
NPGA ^[12]	是	22.27	37.87	55.60	71.47	55.00	44.24	615.097 0	0.202 1
文献[4]算法	是	26.045 8	36.965 3	55.200 4	69.002 3	55.629 4	43.444 7	616.392 8	0.200 6
文献[11]算法	是	25.472 6	37.623 4	57.007 8	68.182 4	54.652 1	43.065 7	616.010 8	0.200 6
IBBMOPSO	是	25.472 6	37.623 4	57.007 8	68.182 4	54.652 1	43.065 7	616.010 8	0.200 6
文献[11]算法	否	25.193 5	36.959 3	53.741 5	71.060 6	53.512 1	42.933 0	608.818 4	0.201 5
MOPSO	否	29.732 7	36.421 4	49.424 3	72.702 8	52.289 4	42.829 0	609.653 1	0.201 3
BBMOPSO	否	23.563 9	36.998 6	54.939 2	69.010 6	57.823 4	41.064 2	609.069 8	0.201 5
IBBMOPSO	否	24.292 7	36.194 6	55.020 8	70.565 0	53.934 5	43.391 7	608.722 7	0.201 6

分别对 MOPSO 算法、BBMOPSO 算法和本文算法进行对比实验,均独立运行 30 次,计算出 IGD 均值、标准差和算法平均运行时间,结果如表 7 和表 8 所示.

表 7 3 种算法的 IGD 指标和运行时间比较 (考虑网损)

算法	最大 IGD	最小 IGD	平均值	标准差	运行时间/s
MOPSO	0.477 1	0.230 9	0.328 0	0.079 54	3.38
BBMOPSO	0.375 7	0.222 8	0.299 5	0.047 32	4.08
IBBMOPSO	0.244 7	0.147 2	0.196 1	0.027 60	4.25

表 8 3 种算法的 IGD 指标和运行时间比较 (不计网损)

算法	最大 IGD	最小 IGD	平均值	标准差	运行时间/s
MOPSO	0.472 7	0.254 6	0.378 4	0.072 05	2.96
BBMOPSO	0.376 8	0.218 7	0.283 9	0.047 78	3.68
IBBMOPSO	0.240 2	0.139 1	0.187 2	0.028 25	3.93

由表 7 和表 8 可见,本文算法获得的平均值和标准差均优于 MOPSO 和 BBMOPSO 算法,表明本文算法在多样性和收敛性上明显优于 MOPSO 和 BBMOPSO 算法. 虽然本文算法的运行时间略长于其他两种算法,但整体运行时间很短,仅需几秒钟,完全满足实际系统的运行需要.

4 结 论

本文通过改进多目标骨干粒子群优化算法,增强该算法早期的全局搜索能力和后期的局部搜索能力,并将其运用到求解电力系统的环境经济调度问题中. 分别在考虑网络损耗和忽略网络损耗的两种情况下,用 IEEE 30 节点标准测试系统对本文算法进行仿真验证,对经济调度、环境调度和多目标环境经济

调度进行求解,通过对仿真结果的分析,本文算法具有良好的稳定性和计算效率,获得的 Pareto 最优前沿分布均匀且完整. 计算结果表明,本文算法能够为电力系统实现节能减排的调度问题提供一种可供选择的有效方法.

参考文献 (References)

- [1] 稳国栋. 基于改进 PSO 算法的动态环境经济调度研究[J]. 黑龙江电力, 2017, 39(2): 120-124.
(Wen G D. Dynamic emission economic dispatch based on improved PSO algorithm[J]. Heilongjiang Electric Power, 2017, 39(2): 120-124.)
- [2] 刘刚, 朱永利, 蒋伟. 基于混合 DE-PSO 多目标算法的动态环境经济调度[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 1-7.
(Liu G, Zhu Y L, Jiang W. Dynamic economic emission dispatch based on hybrid DE-PSO multi-objective algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 1-7.)
- [3] 朱永胜, 王杰, 瞿博阳, 等. 采用基于分解的多目标进化算法的电力环境经济调度[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1577-1584.
(Zhu Y S, W J, Qu B Y, et al. Power environmental economic dispatch using decomposition-based multi-objective evolutionary algorithm[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1577-1584.)
- [4] 刘静, 罗先觉. 采用多目标随机黑洞粒子群优化算法的环境经济发电调度[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 105-111.
(Liu J, Luo X J. Environmental economic dispatching adopting multiobjective random black-hole particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 105-111.)

- [5] Zhao X G, Liang J, Meng J, et al. An improved quantum particle swarm optimization algorithm for environmental economic dispatch[J]. *Expert Systems with Applications*, 2020, 152: 113370.
- [6] Goudarzi A, Li Y J, Xiang J. A hybrid non-linear time-varying double-weighted particle swarm optimization for solving non-convex combined environmental economic dispatch problem[J]. *Applied Soft Computing*, 2020, 86: 105894.
- [7] 张强, 李盼池. 一种自适应多策略行为粒子群优化算法[J]. *控制与决策*, 2020, 35(1): 115-122.
(Zhang Q, Li P C. An adaptive multi-strategy behavior particle swarm optimization algorithm[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(1): 115-122.)
- [8] Kennedy J. Bare bones particle swarms[C]. *Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium*. Indianapolis, 2003: 80-87.
- [9] 王永贵, 曲彤彤, 李爽. 基于指数衰减惯性权重的分裂粒子群优化算法[J]. *计算机应用研究*, 2020, 37(4): 1020-1024.
(Wang Y G, Qu T T, Li S. Disruption particle swarm optimization algorithm based on exponential decay weight[J]. *Application Research of Computers*, 2020, 37(4): 1020-1024.)
- [10] Zhang Y, Li H G, Wang Q, et al. A filter-based bare-bone particle swarm optimization algorithm for unsupervised feature selection[J]. *Applied Intelligence*, 2019, 49(8): 2889-2898.
- [11] 张子泳, 仇梦林, 李莎. 基于多目标粒子群算法的电力系统环境经济调度研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(10): 1-10.
(Zhang Z Y, Zhang M L, Li S. Environmental/economic power dispatch based on multi-objective particle swarm constraint optimization algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(10): 1-10.)
- [12] 徐丽青, 吴亚丽. 求解环境经济调度问题的多目标差分粒子群优化算法[J]. *西安理工大学学报*, 2011, 27(1): 62-68.
(Xu L Q, Wu Y L. Multiobjective particle swarm optimization based on differential evolution for environmental/economic dispatch problem[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2011, 27(1): 62-68.)
- [13] 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.
- [14] Gong D W, Zhang Y, Qi C L. Environmental/economic power dispatch using a hybrid multi-objective optimization algorithm[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2010, 32(6): 607-614.
- [15] Zitzler E, Thiele L, Laumanns M, et al. Performance assessment of multiobjective optimizers: An analysis and review[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2003, 7(2): 117-132.
- [16] 刘隽楷, 袁旭峰, 赵靛玮, 等. 基于 Pareto 最优的电力系统环境经济调度[J]. *电力科学与工程*, 2018, 34(8): 6-11.
(Liu J K, Yuan X F, Zhao L W, et al. Environmental and economic scheduling of power system based on Pareto optimal[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2018, 34(8): 6-11.)
- [17] 梁静, 葛士磊, 瞿博阳, 等. 求解电力系统经济调度问题的改进粒子群优化算法[J]. *控制与决策*, 2020, 35(8): 1813-1822.
(Liang J, Ge S L, Qu B Y, et al. Improved particle swarm optimization algorithm for solving power system economic dispatch problems[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(8): 1813-1822.)
- [18] 李海涛, 崔树春, 闻枫. 基于 r -BBMOPSO 算法的微电网优化运行方法[J]. *广东电力*, 2020, 33(8): 78-85.
(Li H T, Cui S C, Wen F. Optimized operation method of microgrid based on r -BBMOPSO algorithm[J]. *Guangdong Electric Power*, 2020, 33(8): 78-85.)
- [19] 申元霞, 陈健, 曾传华, 等. 层次学习骨干粒子群优化算法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(12): 2183-2188.
(Shen Y X, Chen J, Zeng C H, et al. Hierarchical learning bare-bones particle swarm optimization algorithm[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(12): 2183-2188.)
- [20] 王皓, 欧阳海滨, 高立群. 一种改进的全局粒子群优化算法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(7): 1161-1168.
(Wang H, Ouyang H B, Gao L Q. An improved global particle swarm optimization[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(7): 1161-1168.)

作者简介

帅茂杭(1996—), 男, 硕士生, 从事电力系统经济调度的研究, E-mail: 1617667757@qq.com;

熊国江(1986—), 男, 副教授, 博士, 从事电力系统最优化运行与智能化应用等研究, E-mail: gjxiong@foxmail.com;

胡晓(1985—), 男, 讲师, 博士, 从事电力系统绝缘测试的研究, E-mail: xhu3@gzu.edu.cn;

陈锦龙(1988—), 男, 高级工程师, 从事电力系统运行调度的研究, E-mail: 451710736@qq.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)