

采用多目标纵横交叉算法的电力系统动态环境经济调度

孟安波, 李专

(广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要: 针对带非线性约束的电力系统动态环境经济调度问题, 提出一种多目标纵横交叉算法。对动态调度中燃料费用和污染排放两个相互约束、冲突的目标同时进行优化。求解过程中, 结合非约束支配策略, 提出一种双交叉机制, 增强粒子穿越非可行区域的能力, 使得生成的帕累托最优解落在可行区域内。通过边缘探索, 增强算法的全局搜索能力。同时, 采用外部存档集合储存非劣解, 并通过拥挤度对比, 保持非劣解的多样性。最后, 采用模糊决策理论获得最优折中解。对10机电力系统的仿真结果验证了所提方法的有效性与优越性。

关键词: 动态环境经济调度; 多目标纵横交叉算法; 双交叉机制; 边缘探索; 帕累托最优; 多目标优化

Dynamic environmental economic dispatch of power system adopting multi-objective crisscross optimization algorithm

MENG Anbo, LI Zhuan

(Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: For the constrained non-linear dynamic environmental economic power dispatch (DEED), a multi-objective crisscross optimization algorithm (MOCSO) is proposed. The two conflicting, constraining objective functions of fuel cost and pollutant emission in the process of dynamic dispatch are optimized simultaneously. In the optimization process, combined with non-constrained domination principle, this paper presents a new double cross mechanism to enhance the ability of crossing feasible regions, so that the Pareto optimal solution may falls within the feasible region. With searching on the periphery, the algorithm's ability of global searching is improved greatly. Meanwhile, the proposed approach adopts an external elitist archive to retain non-dominated solutions and maintain the diversity by using the crowded-comparison operator. Finally, fuzzy theory is used to obtained the best compromise solution. Simulation results of 10 generator test system validate the effectiveness and advantages of the proposed method.

Key words: dynamic environmental economic load dispatch; multi-objective crisscross optimization algorithm; double cross mechanism; edge exploration; Pareto optimality; multi-objective optimization

中图分类号: TM73

文章编号: 1674-3415(2016)02-0109-07

0 引言

电力系统动态经济调度(Dynamic Economic Dispatch, DED)^[1-4]是指在各个调度时段内, 满足负荷需求的基础上优化各发电机组的有功出力, 使得发电成本最小的操作。其过程考虑了机组的爬坡约束、死区约束和网络损耗等因素, 调度策略比传统的静态经济调度^[5-8]更贴合实际, 但难度相对也更大。近年来, 随着环境污染问题的日益凸显, 各火电厂在追求发电效益的同时更多地考虑了废气的减排, 并纷纷制定了污染气体排放限制法规。电力调度也由传统的单目标经济调度更多地转向了环境经

济调度(Environmental Economic load Dispatch, EED)^[9-11]。EED问题是一个多目标优化问题, 须在满足各种约束的前提下对费用和排放这两个相互约束、冲突的目标进行优化, 但其为确定性的静态调度, 过程并没有考虑到机组的爬坡约束和负荷变化等实际情况, 不能很好地反映实际调度要求。

因此, 电力系统调度的研究热点开始转向如何解决考虑随机性影响因素情况下的不确定性动态多目标优化调度(Dynamic Economic Emission Dispatch, DEED)^[12-17]。对比DED和EED, DEED是考虑了排放调度和爬坡约束在内的动态多目标调度, 更符合实际要求, 操作难度也更高。国内外众

多学者对此热点课题进行了研究,并提出了许多解决方案。总的来说可以分为传统方法和智能算法优化两大类。传统方法有:文献[12]通过权系数将多目标问题转化成单目标问题,但权系数的确定需要多次尝试,选择较为困难;文献[13]采用价格惩罚因子将排放值转化为费用来求解,是一种近似解法,不能得到精确解;文献[14]采用的模糊满意度法需在每次优化中都按经验确定不同的权重值,因此很难得到一组 Pareto 最优解,也不尽合理。智能算法有: NSGA-II 算法^[15]采用快速非支配排序、外部存档和拥挤距离计算等策略,提高了计算速率。但以遗传算法为核心的 NSGA-II 算法未免继承了遗传算法容易早熟收敛等缺点; MOPSO 算法^[16]概念简单、易于操作和鲁棒性强,但是算法性能对参数的设置较为敏感,且容易陷入局部最优; GSOMP 算法^[17]将 GSO 算法拓展到多目标优化领域,增加了非劣解的多样性,缩短了迭代次数,但是算法复杂,需要设置的参数多,不便于操作。

针对以上问题和现有方法的不足,本文提出了一种多目标纵横交叉算法 (Multi-Objective Crisscross Optimization Algorithm, MOCSO),并应用到 DEED 问题中。该算法采用粒子两两配对、折中更新、精英保存的策略,充分利用搜索区域内所有粒子的信息,使得粒子能够很好地穿越非可行区域,保证粒子的多样性,使得算法具有强大的全局搜索性能、高效的收敛速率,且算法简单,易于操作,运行时间短,对 10 机系统的仿真结果表明了该算法的可行性与优越性。

1 动态环境经济调度数学模型

DEED 问题是一个动态、多目标、非线性、多约束的优化问题,如何在考虑各种约束条件的前提下,对各个时段内的费用和排放这两个目标进行优化,并取得满意的折中解是问题的核心,问题的描述如下。

1.1 目标函数

1) 燃料费用函数

传统的经济调度是通过合理分配各机组的有功出力来使得发电费用最小,该模型可用机组有功出力的二次函数来表示,如式(1)。

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N a_i + b_i P_{i,t} + c_i (P_{i,t})^2 + |d_i \sin[e_i (P_{i,\min} - P_{i,t})]| \quad (1)$$

式中: T 为调度时段数; N 为机组总数; $P_{i,t}$ 为机组 i 在第 t 时段的有功出力; a_i 、 b_i 、 c_i 为机组 i 的燃料费用系数; d_i 、 e_i 为机组 i 的阀点效应系数。

2) 污染气体排放函数

热发电机组运行时产生的污染气体主要为 SO_2 、 NO_x 和 CO_2 ,其排放量取决于机组的发电容量,本文综合考虑三种气体的排放,并将其表达为如下二次函数:

$$\min E = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \alpha_i + \beta_i P_{i,t} + \gamma_i (P_{i,t})^2 + \xi_i \exp(\lambda_i P_{i,t}) \quad (2)$$

式中, α_i 、 β_i 、 γ_i 、 ξ_i 和 λ_i 为机组 i 的排放系数。

1.2 约束条件

1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} - P_{L,t} - P_{D,t} = 0, t = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

式中, $P_{L,t}$ 、 $P_{D,t}$ 分别为时段 t 时的负荷需求和传输网损。负荷值可通过预测得到,系统传输损耗则表示如下,对于 t 时段有

$$P_{D,t} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_{i,t} B_{i,j} P_{j,t} + \sum_{i=1}^N P_{i,t} B_{i,0} + B_{00} \quad (4)$$

式中: $B_{i,j}$ 为网损系数第 i 行第 j 列分量; $B_{i,0}$ 为网损向量 B_0 的第 i 个分量; B_{00} 为网损常数。

2) 机组运行约束

各发电机组必须运行在其有功出力的上下限以内,可表达为

$$P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max}, i = 1, 2, \dots, N; t = 1, 2, \dots, T \quad (5)$$

式中, $P_{i,\min}$ 、 $P_{i,\max}$ 分别为机组 i 的出力上下限。

3) 机组爬坡约束

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq U_{R,i}, & P_{i,t} > P_{i,t-1} \\ P_{i,t} - P_{i,t-1} > U_{R,i}, & P_{i,t} < P_{i,t-1} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $U_{R,i}$ 、 $D_{R,i}$ 分别为机组 i 在相邻时段出力所允许的最大上升值和下降值。

1.3 多目标优化模型

动态环境经济调度优化问题可描述为

$$\min [F, E] \quad (7)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} g(P_{G,t}) = 0 \\ h(P_{G,t}) \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: g 、 h 分别为等式约束不等式约束; $P_{G,t} = P_{i,t} (i = 1, 2, \dots, N)$ 。

2 多目标纵横交叉算法

为解决上述多目标优化问题,本文提出了一种多目标纵横交叉算法,使得能对费用和排放两个相互冲突、约束的目标同时进行优化。

2.1 进化算子

多目标纵横交叉算法的寻优过程主要包括横向

交叉和纵向交叉两个主要算子。横向交叉执行对搜索空间的全局搜索, 纵向交叉引入维度层面的算术交叉, 相当于一个小概率的突变, 横向交叉和纵向交叉交替进行, 促进种群内信息交流。且进化过程中, 种群内所有粒子通过贪婪思想始终保持自身历史最优值 $pbests$, 具体描述如下。

1) 横向交叉

横向交叉是两个不同粒子的所有维之间进行的算术交叉, 交叉前须对种群中所有粒子进行两两不重复配对。假设粒子 i 和 j 的父代 $pbest_i$ 和 $pbest_j$ 的第 d 维执行横向交叉, 则它们的子代可表示为

$$MH_i^d = r_1^d \cdot pbest_i^d + (1 - r_1^d) \cdot pbest_j^d + c_1^d \cdot (pbest_i^d - pbest_j^d) \quad (9)$$

$$MH_j^d = r_2^d \cdot pbest_j^d + (1 - r_2^d) \cdot pbest_i^d + c_2^d \cdot (pbest_j^d - pbest_i^d) \quad (10)$$

式中: r_1^d 、 r_2^d 为 $[0,1]$ 之间的均匀分布随机数; c_1^d 、 c_2^d 为 $[-1,1]$ 之间的均匀分布扩展系数; MH_i 、 MH_j ($d=1, 2, \dots, D$) 称为中庸解, 分别为 $pbest_i$ 和 $pbest_j$ 的子代。

横向交叉将多维寻优空间拆分成了一半种群大小的超立方体, 每对父代粒子在各自的超立方体子空间及其外缘产生子代。在父代包围空间中, 子代以平均概率产生, 而在外缘空间产生子代的概率则会随着与父代粒子的距离呈线性下降概率分布, 这种方式能减少横向交叉的搜索盲点, 增强算法的全局搜索能力。横向交叉得到的中庸解通过贪婪思想与其父代(纵向交叉后得到的 $pbests$, 第一代除外)进行比较, 择其优者作为新一代 $pbests$ 。随后, 新产生的 $pbests$ 将被作为纵向交叉的父代粒子, 进入到纵向交叉阶段。

2) 纵向交叉

纵向交叉是所有粒子维度层面的算术交叉, 其效果相当于小概率突变。交叉前须对所有粒子的所有维进行归一化并配对, 假设粒子 i 的第 d_1 和第 d_2 维进行纵向交叉, 则第 d_1 维的子代可表示为

$$MV_i^{d_1} = r_3 \cdot pbest_i^{d_1} + (1 - r_3) \cdot pbest_i^{d_2} \quad (11)$$

式中, r_3 为 $[0,1]$ 之间的均匀分布随机数。

由式(11)可知, 纵向交叉同样采用类似的繁殖机制来产生中庸解。但是, 该交叉是粒子维度层面的交叉, 它能使陷入局部最优的维摆脱出来, 进而增加种群多样性。由于粒子各个维的取值范围可能不同, 因而, 为了使每一维产生的子代均能介于其取值范围以内, 交叉前须对所有粒子的每一维进行归一化处理。纵向交叉使用了一个交叉概率 P_v 来控

制当前种群中参与交叉的维的数量规模, 通常取 $P_v=0.8$ 。而且, 为了使其中一维跳出局部最优而又不损坏另外一维的值, 每次交叉只有其中一维产生子代。当纵向交叉执行完以后, 须对子代粒子进行反归一化, 得到中庸解 MV , 中庸解再通过贪婪思想与其父代(横向交叉后更新的 $pbests$)比较, 择其优者作为个体历史最优值 $pbests$ 。随后, 新产生的 $pbests$ 将被作为横向交叉的父代种群, 进入到下一阶段。

2.2 优化策略

1) 帕累托占优原则

上述 DEED 模型中的 2 个目标函数是相互约束、冲突的, 一个目标的优化必然会导致另外一个目标的劣化, 因而并不存在使两者同时达到最优的唯一解, 而是一组解。为此引入帕累托占优的概念:

对于决策变量 a 、 b , $f_i(a) \leq f_i(b)$, $\forall i=1, 2, \dots, m$ 且 $f_i(a) < f_i(b)$, $\exists i=1, 2, \dots, m$ 时, 称决策变量 a 支配 $b(a < b)$, 其中, m 为目标个数。

利用 Pareto 占优的概念得出的解集中, 任意一个解都不可能比其他的任一解更优, 因而把这组解称为 Pareto 非劣解, 非劣解所组成的平面称为 Pareto 前沿。

2) 约束处理

这里采用约束支配^[8]来对 DEED 问题中的平衡约束进行处理, 当满足以下任一条件时, 称决策变量 a 约束支配 $b(a < b)$ 。

- (1) a 为可行解, b 为非可行解;
- (2) a 和 b 都为非可行解, 且 a 的惩罚值比 b 小;
- (3) a 和 b 都为可行解, 且 a 帕累托支配 b 。

3) 拥挤距离计算

为保证非劣解的质量和提算法运行速度, 必须对外部存档中的非劣解进行维护, 保留拥挤距离大且分布较为均匀的 N_c 个个体。这里采取以下方案来计算外部存档中粒子的拥挤距离。

$$\sum_{i=1}^m [|f_i(A) - f_i(C)| - |f_i(B) - f_i(O)|] = \sum_{i=1}^m \{0.5 |f_i(A) - f_i(C)| + \min[|f_i(A) - f_i(B)|, |f_i(B) - f_i(C)|]\} \quad (12)$$

式中: O 为邻域中心; $f_i(A)$, $f_i(B)$, $f_i(C)$ 和 $f_i(O)$ 分别为粒子 A , B , C 和邻域中心 O 的第 i 个目标函数。该方法能全面地反映粒子 B 的稀疏度和均匀程度, 有效地对外部存档中的粒子进行维护, 促进种群的收敛进度。

4) 最优折中解

本文采用模糊决策理论来对 Pareto 最优前沿中的非劣解进行选择。在决策中, 运用隶属度函数来

评价每一个决策变量的满意度, 对于 Pareto 前沿中的每一个非劣解 k , 隶属度函数表示为:

$$u_{i,k}(P_k) = \frac{f_{i,k}^{\max} - f_i(P_k)}{f_{i,k}^{\max} - f_{i,k}^{\min}} \quad (13)$$

式中, $f_{i,k}^{\max}$ 、 $f_{i,k}^{\min}$ 分别为第 i 个目标函数的最大最小值。

$$FDM_i(P_k) = \begin{cases} 0 & u_{i,k}(P_k) \leq 0 \\ u_{i,k}(P_k) & 0 < u_{i,k}(P_k) < 1 \\ 1 & u_{i,k}(P_k) \geq 1 \end{cases} \quad (14)$$

显然, 当 $FDM_i(P_k)=0$ 时是完全不满意的; 当 $FDM_i(P_k)=1$ 时是完全满意的; 进行归一化处理, 对每个非劣解 k 的满意度评价如下:

$$FDM^k = \frac{\sum_{i=1}^2 FDM_i(P_k)}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^2 FDM_i^j} \quad (15)$$

Pareto 最优解集中满意度最大的解即为 DEED 问题的最优折中解。

2.3 算法步骤

本文算法具体步骤如下:

- 1) 初始化种群大小 N 、最大迭代次数 $\max gen$ 、纵向交叉率 P_v 和外部存档容量 N_c , 随机初始化粒子位置 X_0 。
- 2) 计算所有粒子的适应度, 采用约束支配概念初步筛选非劣解, 存入外部存档集合。
- 3) 根据式(9)、式(10)对种群执行横向交叉。
- 4) 根据式(11)对种群执行纵向交叉。
- 5) 更新后的种群与外部存档集合中的非劣解进行合并, 更新升级非劣解集合。
- 6) 若外部存档集合中非劣解的数量超过容量 N_c , 则根据式(12)计算各非劣解的拥挤距离, 选择拥挤距离较大的 N_c 个个体。
- 7) 若满足结束条件, 则停止迭代, 输出所有非劣解, 并根据式(13)一式(15)选出最优折中解; 否则, $gen=gen+1$, 转步骤 3)。

MOCOSO 的流程图如图 1。

3 算例分析

3.1 系统参数设置

本文将 MOCOSO 算法应用到 10 机电力系统的动态环境经济调度中, 系统模型考虑了阀点效应、网络损耗和爬坡约束等, 调度周期为 24 h, 分为 24 个时段, 每个时段长为 1 h, 机组参数和负荷数据见文献[19]。

本文参数设置为: 种群大小 $N=100$ 、最大迭代次数 $\max gen=1\ 000$ 、纵向交叉率 $P_v=0.8$ 和外部存档

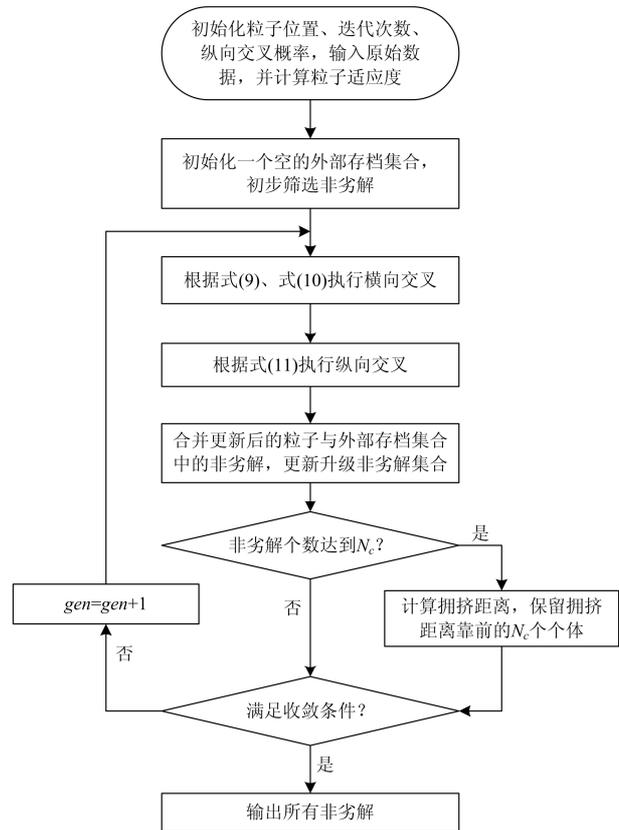


图 1 多目标纵横交叉算法流程图

Fig. 1 Flowchart of multi-objective crisscross optimization algorithm

容量 $N_c=60$ 。本文算法所得结果与 NSGA-II^[19]和 MODEDCH^[20]算法的结果进行对比分析。

3.2 结果分析

图 2 示出了 NSGA-II^[19]算法、EMODEDCH^[20]算法和本文所提 MOCOSO 算法求得的最优 Pareto 前沿。表 1 列出了 NSGA-II 算法中最小费用、最小排放单目标优化的极值, EMODEDCH 算法和本文算法所求得 Pareto 前沿端点处目标极值。为验证解的正确性, 表 2 给出了各种方法的折中解, 表 3 则列出了 MOCOSO 算法所得折中解的详细信息。

表 1 中各算法的优化极端值给出了非劣解集的近似范围, 通过数据可知, MOCOSO 算法求得的所有非劣解均在合理范围内, 验证了本文算法所求得的最优解集的正确性。其中, 最小目标值比 NSGA-II 和 EMODEDCH 的略小, 表明了本文算法全局搜索能力更强。

通过表 2 和表 3 中最优折中解的情况可知, 本文算法所得到的折中解正确、合理, 且对比其他算法得到了更小的费用值和排放值, 体现了在调度决策中的优越性。

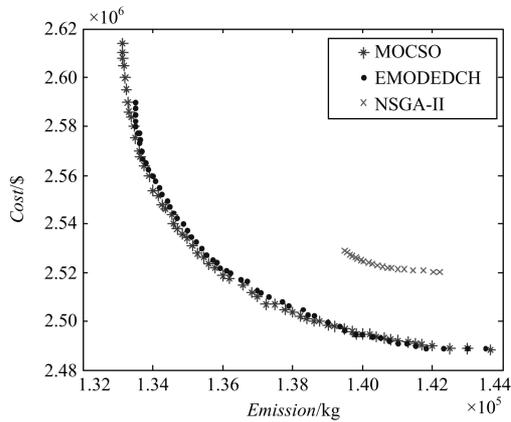


图 2 最优 Pareto 前沿比较
Fig. 2 Comparison of Pareto-optimal front

表 1 极端值比较

Table 1 Comparison of the extreme values

算法	$C_{\min}/10^6 \$$	$C_{\max}/10^6 \$$	$E_{\min}/10^5 \text{ kg}$	$E_{\max}/10^5 \text{ kg}$
MOCSO	2.488 2	2.613 8	1.332 5	1.436 7
EMODEDCH ^[20]	2.489 3	2.590 6	1.337 3	1.434 9
NSGA-II ^[19]	2.5168	2.656 3	1.379 5	1.439 7

表 2 最优折中解

Table 2 Best compromise solutions

算法	费用/ $(\$/10^6)$	排放/ $(\text{kg}/10^5)$	网损/MW
MOCSO	2.516 4	1.354 8	1 264.29
EMODEDCH ^[20]	2.520 3	1.362 2	1 276.62
NSGA-II ^[19]	2.552 6	3.099 4	-

表 3 最优折中调度方案

Table 3 Best compromise dispatch solutions

时段	P_1/MW	P_2/MW	P_3/MW	P_4/MW	P_5/MW	P_6/MW	P_7/MW	P_8/MW	P_9/MW	P_{10}/MW	总出/ MW	网损/ MW	时段 负荷/MW
1	150.07	135.35	93.94	124.99	125.93	127.39	96.53	95.54	56.13	45.71	1 051.25	15.23	1 036
2	150.73	135.42	86.58	108.55	175.93	132.57	111.06	117.67	60.51	44.39	1 124.26	14.21	1 110
3	150.19	135.21	143.15	128.10	222.50	159.59	129.63	119.65	55.19	39.55	1 282.83	24.76	1 258
4	150.49	135.17	192.14	178.10	242.97	159.76	129.94	119.75	79.89	43.92	1 436.68	30.65	1 406
5	219.27	184.47	197.30	178.51	226.10	153.76	127.29	116.03	68.22	49.95	1 520.92	40.89	1 480
6	223.52	234.03	226.57	226.29	235.44	155.62	126.19	119.99	74.49	50.75	1 672.97	44.91	1 628
7	225.47	248.73	228.99	247.17	234.10	159.30	128.36	119.60	79.08	53.94	1 754.74	52.73	1 702
8	235.63	295.86	274.94	241.71	242.77	159.45	129.86	119.90	79.78	54.68	1 834.66	58.58	1 776
9	313.42	308.56	286.94	291.71	242.68	159.88	129.84	119.97	79.91	54.38	1 995.15	71.09	1 924
10	322.92	357.20	337.33	298.62	241.94	159.48	129.77	119.70	79.64	53.99	2 100.62	78.64	2 022
11	374.66	391.62	339.97	299.84	242.92	159.90	129.85	119.95	79.93	54.91	2 193.69	87.60	2 106
12	405.46	408.98	339.98	299.99	242.99	159.99	129.99	119.99	79.99	54.99	2 242.43	92.41	2 150
13	356.41	372.57	339.88	299.97	242.98	159.92	129.92	119.95	79.90	54.88	2 156.47	84.44	2 072
14	292.14	310.13	310.93	297.21	241.88	159.09	129.60	119.71	79.81	53.23	1 993.84	69.78	1 924
15	224.58	261.62	295.44	279.12	238.65	158.60	128.62	119.32	78.09	49.46	1 883.65	57.55	1 776
16	231.32	210.30	201.38	241.96	223.60	157.78	128.53	102.27	56.07	44.85	1 598.16	44.11	1 554
17	193.15	194.37	169.06	194.44	231.98	158.26	126.36	119.70	79.15	54.14	1 520.72	40.66	1 480
18	221.71	211.91	232.46	237.01	239.96	159.76	128.23	117.99	78.74	46.93	1 674.74	46.74	1 628
19	268.52	291.91	280.65	236.10	234.44	151.26	127.11	117.39	78.98	48.15	1 835.69	59.65	1 776
20	327.59	312.08	318.37	286.10	242.71	159.73	129.46	119.94	79.79	54.54	2 044.17	72.05	1 972
21	303.20	310.74	301.24	291.89	242.98	159.97	129.98	119.98	79.99	54.97	1 994.94	70.94	1 924
22	223.55	235.32	225.62	242.01	242.68	127.61	129.89	116.43	79.61	54.87	1 677.59	49.59	1 628
23	164.96	157.17	209.92	214.75	204.08	132.93	100.81	87.44	51.44	40.56	1 364.26	32.15	1 332
24	154.92	158.52	134.61	180.91	168.91	119.18	123.44	87.94	45.57	35.32	1 209.45	25.36	1 184

图 3 用图形直观地示出了本文所求得折中解满足电量平衡方程的情况及网损所占的比重。由表 3 和图 3 可知, 本文求得的最优折中解在所有时段的

网损值加负荷值均等于该时段的总发电量, 很好地满足了电量平衡约束。且各时段各机组的出力均在其允许的范围以内, 很好地满足了机组运行约束。

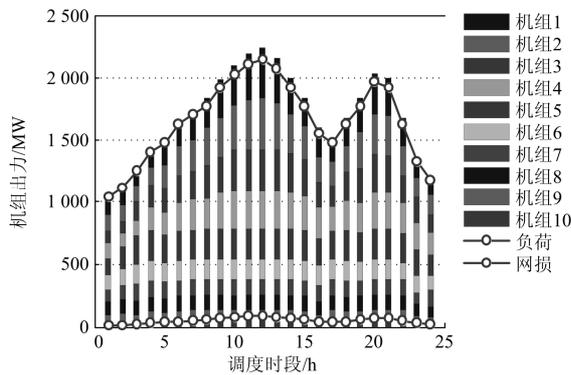


图3 电量平衡约束图

Fig. 3 Figure of power balance constraint

结合图2和表1可知,与NSGA-II和EMODEDCH算法所求得的 Pareto 前沿相比,本文 MOCSO 获得的 Pareto 非劣解在解空间中分布均匀且范围更广,更接近全局最优。NSGA-II 算法求得 Pareto 最优前沿分布范围较窄是因为算法进化过早地早熟,使得算法的全局收敛能力不足,难以跳出局部最优。EMODEDCH 算法虽然效果不错,但是其种群在进化过程中缺乏有效的保持粒子多样性的机制,因而导致其 Pareto 前沿分布不够广泛。以上2种算法所求得的最优 Pareto 前沿不具有很好的全局最优性,不利于决策者做出合理的决策判断。

结合表3和图3可知,在考虑网损影响的情况下,各时段的机组总出力略大于电力负荷需求,差额即为网损值,且网络损耗会随着电力负荷的增加而增加,如:在负荷高峰时段(时段12),网损值达到了最大值,为92.41 MW,比机组9和机组10在该时段的出力还要高。由此可见不能忽略网络损耗。网损的计及使得电量平衡约束更加非线性化,增加了调度的难度,但本文 MOCSO 算法却可很好地解决这一问题,得出更令人满意的调度方案。综上所述,本文算法在计及网损的 EELD 问题上更具可行性与潜力。

4 结论

电力系统 DEED 问题是在动态调度的情况下,对燃料费用和污染排放两个相互约束、冲突的目标进行优化的过程,其中计及了网络损耗和爬坡约束等多种约束条件的影响,优化目标变得非线性,求解极其困难。本文提出的多目标纵横交叉算法采用了双交叉寻优机制对解空间进行搜索,结合非劣排序策略获得一组 Pareto 前沿,并采用模糊决策策略得到最优折中解。

文中对一个10机电力系统进行了仿真分析。结

果显示,在所有24个调度时段内,机组运行约束和功率平衡约束都得到了很好的满足。通过对比 NSGA-II 和 EMODEDCH 算法,均取得了更小的燃料费用、排放值和网损值,所得到的 Pareto 前沿分布更为均匀广泛,并且能够取得更好的折中解。

上述结果表明,MOCSO 算法能很好地穿越层层不可行区域,得到分布性、逼近性都比较好的 Pareto 前沿,取得比其他多目标优化算法更小的发电费用和排放量,显示出了在求解带约束的动态环境经济调度问题中的优越性与潜能。

参考文献

- [1] 陈珍, 胡志坚. 基于 PSO-BBO 混合优化算法的动态经济调度问题[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 44-49.
- [2] CHEN Zhen, HU Zhijian. A modified hybrid PSO-BBO algorithm for dynamic economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 44-49.
- [3] NIKNAM T, AZIZIPANAH-ABARGHOEE R, AGHAEI J. A new modified teaching-learning algorithm for reserve constrained dynamic economic dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 749-763.
- [4] LEE J C, LIN W M, LIAO G C, et al. Quantum genetic algorithm for dynamic economic dispatch with valve-point effects and including wind power system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2011, 33(2): 189-197.
- [5] MOHAMMADI-IVATLOO B, RABIEE A, EHSAN M. Time-varying acceleration coefficients IPSO for solving dynamic economic dispatch with non-smooth cost function[J]. Energy Conversion and Management, 2012(56): 175-183.
- [6] 詹俊鹏, 郭创新, 吴青华, 等. 快速群搜索优化算法及其在电力系统经济调度中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(增刊1): 1-6.
- [7] ZHAN Junpeng, GUO Chuangxin, WU Qinghua, et al. Fast group search optimizer and its application to the economic dispatch of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 32(S1): 1-6.
- [8] 许丹, 赵鸿图, 丁强, 等. 基于实用化安全约束经济调度扩展建模策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 76-81.
- [9] XU Dan, ZHAO Hongtu, DING Qiang, et al. Modeling strategy based on utility of security constrained economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 76-81.

- [7] 刘国静, 韩学山, 杨明, 等. 电力系统运行协同的经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2668-2675.
LIU Guojing, HAN Xueshan, YANG Ming, et al. Synergetic economic dispatch in power system operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2668-2675.
- [8] 侯贸军, 罗春辉, 隗霖捷, 等. 基于微分进化算法的水火电短期优化调度的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 54-61.
HOU Maojun, LUO Chunhui, WEI Linjie, et al. Study on short-term hydrothermal scheduling based on differential evolution[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 54-61.
- [9] 彭春华, 孙惠娟, 余廷芳. 考虑竞价风险的多目标优化发电研究[J]. 电工技术学报, 2014, 27(2): 210-216.
PENG Chunhua, SUN Huijuan, YU Tingfang. Multi-objective optimization of thermal power units output considering the bidding risk[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 27(2): 210-216.
- [10] 郑晓, 张静, 马韬韬, 等. 基于改进决策方法的电力系统多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 151-156.
ZHENG Xiao, ZHANG Jing, MA Taotao, et al. Power system multi-objective optimization dispatch based on an improved decision-making method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 151-156.
- [11] 卢有麟, 周建中, 王永强, 等. 水火电力系统多目标环境经济调度模型及其求解算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 93-100.
LU Youlin, ZHOU Jianzhong, WANG Yongqiang, et al. Research on multi-objective environmental economic scheduling model of hydrothermal power system and its solving algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 93-100.
- [12] 杨柳青, 林舜江, 刘明波, 等. 考虑风电接入的大型电力系统多目标动态优化调度[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 286-295.
YANG Liuqing, LIN Shunjiang, LIU Mingbo, et al. Multi-objective dynamic optimal dispatch for large-scale power systems considering wind power penetration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 286-295.
- [13] PANDIT N, TRIPATHI A, TAPASWIS, et al. Static/dynamic environmental economic dispatch employing chaotic micro bacterial foraging algorithm[J]. Swarm Evolutionary and Memetic Computing, 2011(7076): 585-592.
- [14] 卢有麟, 周建中, 覃晖, 等. 差分进化算法在电力系统环境经济调度中的应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(8): 121-124.
LU Youlin, ZHOU Jianzhong, QIN Hui, et al. Application of differential evolution algorithm to environmental/economic dispatch of power systems[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 38(8): 121-124.
- [15] 赵媛媛, 艾芊, 余志文, 等. 考虑多种因素评估的微电网优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 23-30.
ZHAO Yuanyuan, AI Qian, YU Zhiwen, et al. A microgrid optimal scheduling considering the assessment of various factors[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 23-30.
- [16] WANG L, SINGH C. Balancing risk and cost in fuzzy economic dispatch including wind power penetration based on particle swarm optimization[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78: 1361-1368.
- [17] GUO C X, ZHAN J P, WU Q H. Dynamic economic emission dispatch based on group search optimizer with multiple producers[J]. Electric Power Systems Research, 2012, 86: 8-16.
- [18] RUGHOOPUTH H C S, AH KING R T F. Environmental/economic dispatch of thermal units using an elitist multi-objective evolutionary algorithm[J]. Industrial Technology, 2003, 1: 48-53.
- [19] BASU M. Dynamic economic emission dispatch using nondominated sorting genetic algorithm-II[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2008, 30(2): 140-149.
- [20] 江兴稳, 周建中, 王浩, 等. 电力系统动态环境经济调度建模与求解[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 385-391.
JIANG Xingwen, ZHOU Jianzhong, WANG Hao, et al. Modeling and solving for dynamic economic emission dispatch of power system[J]. Power System Technology, 2013, 27(2): 385-391.

收稿日期: 2015-03-31; 修回日期: 2015-04-24

作者简介:

孟安波(1971-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统控制与运行、大规模分布式优化、人工智能在电力系统中的应用; E-mail: mengambo@vip.sina.com

李专(1990-), 男, 通信作者, 硕士生, 研究方向为大规模分布式优化、人工智能在电力系统中的应用。E-mail: 646370663@qq.com

(编辑 周金梅)