

# 一种求解环境经济发电调度的交互式多目标优化方法

龙 军<sup>1</sup>, 郑 斌<sup>1</sup>, 郭小璇<sup>1</sup>, 李 赢<sup>2</sup>

(1. 广西大学 电气工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 浙江省舟山市电力局, 浙江 舟山 316021)

**摘要:** 针对环境经济发电调度问题, 提出一种基于评价函数的交互式多目标优化方法并结合改进的粒子群优化的求解方法。构造的总体协调度评价函数可以较好地平衡节能和减排 2 个优化目标。决策者可以通过调整各单目标满意度来体现其主观愿望。该方法克服了多目标向单目标转化过程中权重系数选择的困难, 增强了决策方案选择的互动性。对一个含 6 台发电机组的系统进行仿真分析, 结果验证了该方法在求解环境经济调度问题方面的可行性和有效性。

**关键词:** 环境经济调度; 评价函数; 交互式; 优化; 满意度; 模型; 发电

**中图分类号:** TM 73

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.05.015

## 0 引言

传统电力系统经济发电调度在满足负荷需求和各项运行约束条件下, 只追求发电成本最小化的单一目标<sup>[1-4]</sup>。火力发电厂由于化石燃料燃烧排放的大量污染气体, 如氮氧化物、硫氧化物和二氧化碳等, 不仅对环境产生很大影响, 同时也危及人类的健康。常见的减少污染物排放措施有 3 种: 安装脱硫装置、使用低污染排放的燃料以及实施以追求污染物排放最小为目的的发电调度或传统的经济调度中考虑环境保护因素。其中, 环境经济调度 EED (Environmental/Economic Dispatch) 不失为一种投资少、见效快的技术措施。

EED 问题中发电成本和污染物排放量 2 个待优化的目标往往是相互制约的, 单纯追求发电成本最小, 会损害环境保护效益; 而仅追求污染气体排放量最小, 一定程度上会损害经济效益。研究如何同时兼顾 2 个相互冲突的优化目标, 更好地协调经济效益与环境保护效益具有重要的现实意义。

EED 问题是一个典型的非线性多目标优化问题, 国内外众多学者对其进行研究, 提出了很多解决方法。文献[5]对 EED 问题的相关求解算法进行了较为全面的介绍; 文献[6]在 EED 问题中, 将污染气体的排放量作为约束条件考虑, 采用单目标优化问题进行求解; 文献[7-8]利用价格惩罚因子将污染气体的排放量转化为费用值整合到发电成本中, 从而

将多目标转化为单目标问题, 并给出了一种惩罚因子的构造方法; 文献[9]采用平均价格惩罚因子获得了更为理想的效果, 但惩罚因子毕竟只是一种估算, 因而很难获得最优解; 实现多目标向单目标转化的方法还有权重系数法<sup>[10-11]</sup>、模糊隶属函数法<sup>[12-13]</sup>等, 但权重系数的选择容易受主观因素的影响, 隶属函数的确定也比较复杂。此外, 近年来基于启发式搜索的人工智能算法<sup>[14-16]</sup>亦被广泛用来求解 EED 问题, 并逐渐成为研究的热点。

交互式多目标决策方法是常用的多目标处理方法。对于经典的电力系统 EED 问题, 本文提出了一种新的基于评价函数的交互式多目标处理方法实现多目标向单目标转化, 并结合改进的粒子群优化方法进行求解。对一个含 6 台发电机组的系统进行仿真计算, 以验证该方法求解 EED 问题的有效性和适用性。

## 1 环境经济调度问题的数学模型

### 1.1 目标函数

**a.** 为提高电力系统经济效益, 应使系统总发电成本最小。实际计算中, 发电成本通常表示为机组有功输出的二次函数:

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

其中,  $F$  为总的发电成本 (\$/h);  $F_i(P_i)$  为第  $i$  台机组的发电成本;  $a_i, b_i, c_i$  为机组  $i$  的发电成本相关特征系数;  $N$  为系统中的机组数;  $P_i$  为第  $i$  台机组的有功功率。

**b.** 为提高环境保护效益, 应尽量减少火力发电厂排放的污染气体, 如  $\text{SO}_x$ 、 $\text{NO}_x$  等。不失一般性, 本文选取  $\text{NO}_x$  排放量为研究对象, 污染气体排放量最小化目标函数表示为:

$$\min E = \sum_{i=1}^N E_i(P_i) = \sum_{i=1}^N \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \quad (2)$$

收稿日期: 2011-10-25; 修回日期: 2013-03-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50767001); 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2007AA04Z197); 高等学校博士学科点专项科研基金课题(20094501110002); 广西壮族自治区研究生教育创新计划项目(105931003100)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50767001), the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2007AA-04Z197), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education(20094501110002) and Innovation Project of Guangxi Graduate Education(105931003100)

其中,  $E$  为污染气体总排放量(t/h);  $E_i(P_i)$  为第  $i$  台机组污染气体排放量;  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  为机组  $i$  污染气体排放特征系数, 可以通过采集多组电厂污染气体排放量与有功功率实时监测数据后, 利用数据曲线拟和方法得到<sup>[5]</sup>。

## 1.2 约束条件

### a. 功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^N P_i - P_D + P_{\text{loss}} = 0 \quad (3)$$

其中,  $P_D$  为总负荷需求;  $P_{\text{loss}}$  为系统有功损耗, 其与系统中机组有功出力、传输线参数及网络拓扑结构有关, 本文采用  $B$  系数法计算<sup>[16]</sup>, 如式(4)所示。

$$P_{\text{loss}} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_i B_{ij} P_j \quad (4)$$

其中,  $B_{ij}$  为网损系数。

式(4)可以用矩阵表示为:

$$P_{\text{loss}} = \mathbf{P}^T \mathbf{B} \mathbf{P} \quad (5)$$

其中,  $\mathbf{P} = [P_1, P_2, \dots, P_N]^T$ , 为有功功率列向量;  $\mathbf{B}$  为  $N \times N$  维网损系数矩阵。

### b. 机组有功出力约束:

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (6)$$

其中,  $P_i^{\min}, P_i^{\max}$  分别为机组  $i$  的最小和最大有功出力。

### c. 备用约束:

$$\sum_{i=1}^N P_i^{\max} - P_D - P_{\text{loss}} - S_R \geq 0 \quad (7)$$

其中,  $S_R$  为调度时段内系统总备用容量。

## 1.3 模型的数学描述

综合考虑以上目标函数与约束条件, EED 问题可以表示为如下非线性多目标优化问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & [F(\mathbf{P}), E(\mathbf{P})]^T \\ \text{s.t.} \quad & g(\mathbf{P}) = 0 \\ & h(\mathbf{P}) \leq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $F(\mathbf{P}), E(\mathbf{P})$  为待优化的 2 个目标, 分别为发电成本和污染气体排放量;  $g(\mathbf{P})$  为等式约束, 即功率平衡约束;  $h(\mathbf{P})$  为不等式约束, 即机组功率上下限约束和备用约束。

## 2 交互式多目标优化方法

EED 问题为典型的非线性双目标优化问题, 为了不失一般性, 考虑如下双目标优化问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x})]^T \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{x} \in S \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $\mathbf{x}$  为决策向量,  $S$  为决策向量的约束集。

式(9)所描述的双目标优化问题, 目标  $f_1(\mathbf{x})$  和  $f_2(\mathbf{x})$  同时达到最优值所对应的解是问题的绝对最优解, 但在一般情况下, 目标  $f_1(\mathbf{x})$  和  $f_2(\mathbf{x})$  之间存在冲突性, 所以绝对最优解往往并不存在。此时, 多目标优

化模型的最优解一般是从帕累托最优解集 POE (Pareto Optimal Front) 中选择一个符合决策者要求的满意解。交互式决策方法能够充分体现决策者的主观愿望, 是一种实用性比较强的多目标决策方法<sup>[17-18]</sup>。鉴于多目标向单目标转化过程中, 往往存在权重系数选择的困难, 本文构建了一种基于评价函数的交互式多目标优化方法。

### 2.1 单目标满意度函数

假设分别以  $f_1(\mathbf{x})$  和  $f_2(\mathbf{x})$  为目标函数进行单目标优化得到的最优解为  $\mathbf{x}_1^*$  和  $\mathbf{x}_2^*$ 。记  $f_1(\mathbf{x}_1^*) = f_1^{\min}$ ,  $f_2(\mathbf{x}_1^*) = f_2^{\max}$ ,  $f_1(\mathbf{x}_2^*) = f_1^{\max}$ ,  $f_2(\mathbf{x}_2^*) = f_2^{\min}$ , 其中  $f_1^{\min}$  和  $f_2^{\min}$  分别为目标  $f_1(\mathbf{x})$  和  $f_2(\mathbf{x})$  的理想最优值。由于目标  $f_1(\mathbf{x})$  和  $f_2(\mathbf{x})$  一般代表不同的实际含义, 具有不同的量纲, 为了便于比较, 需要进行归一化处理。记:

$$\begin{cases} \rho_1(\mathbf{x}) = \frac{f_1^{\max} - f_1(\mathbf{x})}{f_1^{\max} - f_1^{\min}} \\ \rho_2(\mathbf{x}) = \frac{f_2^{\max} - f_2(\mathbf{x})}{f_2^{\max} - f_2^{\min}} \end{cases} \quad (10)$$

称  $\rho_1(\mathbf{x}), \rho_2(\mathbf{x})$  为单目标满意度函数。对于某一具体问题,  $\rho_1(\mathbf{x}) \in [0, 1], \rho_2(\mathbf{x}) \in [0, 1]$ 。  $\rho_1(\mathbf{x}), \rho_2(\mathbf{x})$  值越大, 表示目标  $f_1(\mathbf{x})$  和  $f_2(\mathbf{x})$  值越小, 即越接近各自最优值, 决策者越满意。在定义了单目标满意度函数的基础上, 式(9)可转化为如下规范化的多目标优化问题:

$$\begin{aligned} \max \quad & [\rho_1(\mathbf{x}), \rho_2(\mathbf{x})]^T \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{x} \in S \end{aligned} \quad (11)$$

记  $\boldsymbol{\rho}(\mathbf{x}) = [\rho_1(\mathbf{x}), \rho_2(\mathbf{x})]^T$ , 称之为规范化的综合目标函数。

### 2.2 总体协调度评价函数

单目标满意度反映了单个目标的达成程度。对于多目标优化问题, 不仅需要考虑到各单目标满意度, 还应考虑到各单项目标相互作用的整体效果, 以实现对目标的总体协调控制。式(11)表示的多目标优化问题, 单目标的满意度  $\rho_1(\mathbf{x})$  和  $\rho_2(\mathbf{x})$  都达到最优值是决策者期望的理想情况, 但由于各单目标之间存在矛盾, 单目标满意度同时达到最优值实际上是不可能的。此时, 希望构建一个能够较好地反映目标整体达成程度的评价函数。记  $\rho_1^*(\mathbf{x}), \rho_2^*(\mathbf{x})$  分别为  $\rho_1(\mathbf{x}), \rho_2(\mathbf{x})$  的理想最优值, 则  $\boldsymbol{\rho}(\mathbf{x})$  的理想目标点为  $\boldsymbol{\rho}^*(\mathbf{x}) = [\rho_1^*(\mathbf{x}), \rho_2^*(\mathbf{x})]^T$ , 如果能够在约束集  $S$  中找到一个决策向量值  $\mathbf{x}^*$ , 对应的综合目标函数值为  $\boldsymbol{\rho}(\mathbf{x}^*)$ , 在某种距离的意义下, 使得它离理想目标点  $\boldsymbol{\rho}^*(\mathbf{x})$  最近, 那么  $\mathbf{x}^*$  即为此距离意义下的偏好解。据此, 可以选择总体协调度评价函数为:

$$d(\mathbf{x}) = \|\boldsymbol{\rho}(\mathbf{x}) - \boldsymbol{\rho}^*(\mathbf{x})\| \quad (12)$$

其中,  $\|\cdot\|$  为向量空间中的某种距离。若选取向量空间的距离为“欧氏距离”, 则总体协调度评价函数

$d(\mathbf{x})$ 可以定义为:

$$d(\mathbf{x}) = \sqrt{[\rho_1(\mathbf{x}) - \rho_1^*(\mathbf{x})]^2 + [\rho_2(\mathbf{x}) - \rho_2^*(\mathbf{x})]^2} \quad (13)$$

由式(10)、(13)可知,当目标 $f_1(\mathbf{x})$ 和 $f_2(\mathbf{x})$ 同时达到最优值 $f_1^{\min}$ 和 $f_2^{\min}$ ,单目标的满意度 $\rho_1(\mathbf{x})$ 和 $\rho_2(\mathbf{x})$ 分别达到最优值 $\rho_1^*(\mathbf{x})$ 和 $\rho_2^*(\mathbf{x})$ , $d(\mathbf{x})=0$ ,决策者最满意。一方面, $d(\mathbf{x})$ 是随着目标 $f_1(\mathbf{x})$ 和 $f_2(\mathbf{x})$ 函数值减小而减小的单调函数;另一方面, $d(\mathbf{x})$ 越小,一定程度上表明 $\rho_1(\mathbf{x})$ 和 $\rho_2(\mathbf{x})$ 越大,相应的 $f_1(\mathbf{x})$ 和 $f_2(\mathbf{x})$ 越小,即越接近各自最优值。因此, $d(\mathbf{x})$ 能很好地反映目标的整体满意程度,通过控制 $d(\mathbf{x})$ 的大小就可以实现目标整体平衡。

### 2.3 交互式优化模型

在定义了单目标满意度和总体协调度评价函数的基础上,结合决策者对于各单目标满意度下限值的要求,可以将式(11)描述的多目标优化模型转化为如下单目标优化模型:

$$\begin{aligned} \min \quad & d(\mathbf{x}) \\ \text{s.t.} \quad & \rho_1(\mathbf{x}) \geq \rho_{1-} \\ & \rho_2(\mathbf{x}) \geq \rho_{2-} \\ & \mathbf{x} \in S \end{aligned} \quad (14)$$

其中, $\rho_{1-}$ 、 $\rho_{2-}$ 分别为决策者要求的单目标 $f_1(\mathbf{x})$ 和 $f_2(\mathbf{x})$ 满意度的下限值。

## 3 改进的粒子群优化方法

粒子群优化 PSO (Particle Swarm Optimization) 算法是一种随机性算法,与传统的优化方法相比,对函数的连续性和可导性要求很低,适用于一般的复杂工程优化问题<sup>[19]</sup>。

与其他智能算法类似,PSO 算法在处理复杂优化问题时也存在容易陷入局部最优、收敛精度低的缺点。文献[20]提出一种改进的 PSO 算法,借鉴电磁理论中合力计算的思想,将自然界中的吸引排斥机制引入标准 PSO 算法中,以增强粒子跳出局部最优的能力。测试函数的仿真结果表明该算法不仅有效避免了早熟收敛,而且获得了较好的收敛精度。

本文采用文献[20]提出的基于吸引排斥机制的 PSO (记为 PSO-C) 算法来求解式(14)所描述的单目标优化问题。仿真计算参数设置中,粒子群规模 $m=100$ ,最大迭代次数 $T_{\max}=3000$ ,算法的其他参数选取情况同文献[20]。

## 4 求解 EED 问题的步骤

求解 EED 问题的步骤如下:

- 仅追求发电成本最小,不考虑污染气体排放量,进行传统的单目标经济调度,利用 PSO-C 算法求得发电成本最优值 $F^{\min}$ 及对应的污染气体排放量 $E^{\max}$ 。
- 只追求污染气体排放量最小,而不考虑发电

成本,进行单目标环境调度,利用 PSO-C 算法求得污染气体排放量最优值 $E^{\min}$ 及对应的发电成本 $F^{\max}$ 。

- 在步骤 a 和 b 基础上,定义各单目标满意度函数如下:

$$\begin{cases} \mu_1 = (F^{\max} - F) / (F^{\max} - F^{\min}) \\ \mu_2 = (E^{\max} - E) / (E^{\max} - E^{\min}) \end{cases} \quad (15)$$

其中, $\mu_1$ 为发电成本的单目标满意度, $\mu_2$ 为污染气体排放量的单目标满意度。

- 记 $\mu_1^*$ 、 $\mu_2^*$ 分别为单目标满意度的最优值,具体问题中, $\mu_1^*=1$ , $\mu_2^*=1$ 。总体协调度评价函数 $\lambda(\mathbf{P})$ 可以表示为:

$$\lambda(\mathbf{P}) = \sqrt{(\mu_1 - \mu_1^*)^2 + (\mu_2 - \mu_2^*)^2} \quad (16)$$

- 假设决策者要求发电成本和污染气体排放量各单目标满意度的下限值分别为 $\mu_{1-}$ 、 $\mu_{2-}$ ,根据式(14)可将多目标优化数学模型式(8)转化为如下单目标模型:

$$\begin{aligned} \min \quad & \lambda(\mathbf{P}) \\ \text{s.t.} \quad & \mu_1 \geq \mu_{1-}, \mu_2 \geq \mu_{2-} \\ & g(\mathbf{P}) = 0, h(\mathbf{P}) \leq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

- 若决策者对 $\mu_{1-}$ 、 $\mu_{2-}$ 没有特殊要求,即 $\mu_{1-}=0$ , $\mu_{2-}=0$ ,采用 PSO-C 算法求解式(17)单目标优化问题,得到总体协调度 $\lambda(\mathbf{P})$ 和各单目标满意度 $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 以及对应的发电成本 $F$ 和污染气体排放量 $E$ ,将此非劣解作为最优折中解。

- 根据决策者提出的主观偏好要求,分别改变各单目标满意度下限值 $\mu_{1-}$ 、 $\mu_{2-}$ ,将得到满足决策者要求的发电成本和污染气体排放量。

## 5 算例分析

### 5.1 算例描述

本文选取的算例为一个含 6 台发电机组的电力系统<sup>[16]</sup>。该系统中各发电机组允许的有功出力极限、发电成本特性系数、排放特性系数如表 1 所示,网损系数见表 2。分别在 500 MW、700 MW 和 900 MW 这 3 种负荷情况下进行仿真计算,并与文献[16]提出的算法 NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II) 得到的仿真结果进行对比。

### 5.2 仿真结果分析

- 利用 PSO-C 算法进行单目标优化,分别得到最小发电成本和最小污染气体排放量的仿真结果如表 3 和表 4 所示。

由表 3 可知,在 3 种不同负荷情况下,PSO-C 算法与文献[16]所用 NSGA-II 相比:进行传统经济调度时,PSO-C 算法得到的发电成本最小值均优于 NSGA-II 得到的结果,并且对应的污染气体排放量前者也都略优于后者;进行单目标环境调度时,无论是污染气体排放量,还是对应的发电成本,PSO-C 算法

表 1 发电机组参数  
Tab.1 Parameters of generation units

| 机组    | $P_i^{\min}/\text{MW}$ | $P_i^{\max}/\text{MW}$ | $a_i$  | $b_i$ | $c_i$  | $\alpha_i$ | $\beta_i$ | $\gamma_i$ |
|-------|------------------------|------------------------|--------|-------|--------|------------|-----------|------------|
| $G_1$ | 10                     | 125                    | 756.8  | 38.54 | 0.1520 | 13.86      | 0.328     | 0.0042     |
| $G_2$ | 10                     | 150                    | 451.3  | 46.16 | 0.1060 | 13.86      | 0.328     | 0.0042     |
| $G_3$ | 35                     | 225                    | 1050.0 | 40.40 | 0.0280 | 40.27      | -0.546    | 0.0068     |
| $G_4$ | 35                     | 210                    | 1243.5 | 38.31 | 0.0355 | 40.27      | -0.546    | 0.0068     |
| $G_5$ | 130                    | 325                    | 1658.6 | 36.33 | 0.0211 | 42.90      | -0.511    | 0.0046     |
| $G_6$ | 125                    | 315                    | 1356.7 | 38.27 | 0.0180 | 42.90      | -0.511    | 0.0046     |

表 2 网损系数  
Tab.2 Loss coefficients

| $B_{11}$  | $B_{22}$  | $B_{33}$  | $B_{44}$  | $B_{55}$  | $B_{66}$  |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.002022  | -0.000290 | -0.000530 | -0.000570 | -0.000450 | -0.000100 |
| -0.000290 | 0.003243  | 0.000016  | -0.000310 | -0.000420 | -0.000150 |
| -0.000530 | 0.000016  | 0.002085  | 0.000831  | 0.000023  | -0.000270 |
| -0.000570 | -0.000310 | 0.000831  | 0.001129  | 0.000113  | -0.000300 |
| -0.000450 | -0.000420 | 0.000023  | 0.000113  | 0.000460  | -0.000150 |
| -0.000100 | -0.000150 | -0.000270 | -0.000300 | -0.000150 | 0.000898  |

表 3 发电成本最小优化结果  
Tab.3 Results of power generation cost optimization

| 负荷/MW | 算法      | 发电成本/\$ | 排放量/kg | 有功损耗/MW | $P_1/\text{MW}$ | $P_2/\text{MW}$ | $P_3/\text{MW}$ | $P_4/\text{MW}$ | $P_5/\text{MW}$ | $P_6/\text{MW}$ | 总出力/MW |
|-------|---------|---------|--------|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|
| 500   | NSGA-II | 28151   | 309.04 | 18.21   | 50.84           | 31.81           | 35.12           | 73.44           | 191.99          | 135.02          | 518.21 |
|       | PSO-C   | 28079   | 309.00 | 16.75   | 52.13           | 29.46           | 35.00           | 71.29           | 191.82          | 137.04          | 516.75 |
| 700   | NSGA-II | 38371   | 534.92 | 33.93   | 76.18           | 51.81           | 49.82           | 103.41          | 267.98          | 184.73          | 733.93 |
|       | PSO-C   | 38208   | 534.40 | 30.98   | 76.91           | 48.53           | 46.63           | 101.89          | 264.65          | 192.37          | 730.98 |
| 900   | NSGA-II | 49621   | 849.33 | 56.82   | 102.96          | 74.24           | 66.00           | 140.32          | 324.89          | 248.42          | 956.82 |
|       | PSO-C   | 49298   | 848.74 | 50.68   | 103.60          | 69.96           | 61.56           | 139.10          | 325.00          | 251.46          | 950.68 |

表 4 污染气体排放量最小优化结果  
Tab.4 Results of pollution gas emission optimization

| 负荷/MW | 算法      | 发电成本/\$ | 排放量/kg | 有功损耗/MW | $P_1/\text{MW}$ | $P_2/\text{MW}$ | $P_3/\text{MW}$ | $P_4/\text{MW}$ | $P_5/\text{MW}$ | $P_6/\text{MW}$ | 总出力/MW |
|-------|---------|---------|--------|---------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------|
| 500   | NSGA-II | 28641   | 275.54 | 25.13   | 56.93           | 41.54           | 73.90           | 84.93           | 136.50          | 131.33          | 525.13 |
|       | PSO-C   | 28567   | 274.74 | 23.61   | 58.81           | 38.49           | 75.34           | 85.96           | 139.50          | 125.50          | 523.61 |
| 700   | NSGA-II | 39473   | 467.39 | 41.08   | 103.08          | 73.51           | 91.56           | 110.79          | 187.87          | 174.29          | 741.08 |
|       | PSO-C   | 39453   | 462.92 | 37.94   | 105.70          | 76.54           | 95.58           | 105.72          | 184.78          | 169.62          | 737.94 |
| 900   | NSGA-II | 51254   | 760.05 | 68.87   | 125.00          | 109.89          | 111.08          | 141.96          | 254.36          | 226.58          | 968.87 |
|       | PSO-C   | 51093   | 749.67 | 63.09   | 125.00          | 114.64          | 110.00          | 140.64          | 250.97          | 221.84          | 963.09 |

寻优结果均优于 NSGA-II 优化结果。

分别对照表 1 与表 3、表 4, 可以看到各机组的有功出力均在其上、下限之间, 有功出力约束得到满足; 从表 3 和表 4 中的有功损耗和发电机组总出力大小可以看出, 3 种负荷情况下, 系统总出力大小均等于对应负荷与有功损耗之和, 说明功率平衡约束也得到了很好地满足。

在负荷为 700 MW 的情况下, PSO-C 算法求解单目标经济调度和环境调度时, 目标函数适应度值随迭代过程的变化情况分别如图 1 和图 2 所示。由图 1 和图 2 可见, PSO-C 算法获得了较好的收敛精度, 但引入吸引排斥机制后, 收敛速度变慢。

b. 利用本文提出的交互式多目标优化方法结合 PSO-C 算法进行环境经济调度, 得到最优折中解如表 5 所示。

由表 5 可知, 在 3 种不同负荷情况下, 利用本文

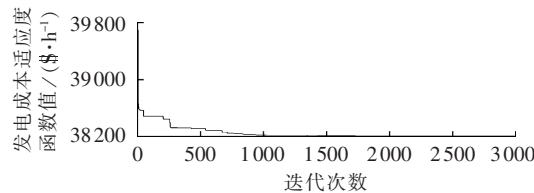


图 1 发电成本迭代曲线  
Fig.1 Iterative curve of power generation cost

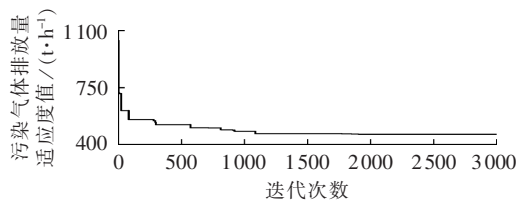


图 2 污染气体排放量迭代曲线  
Fig.2 Iterative curve of pollution gas emission

所提出的解决 EED 问题方法得到的最优折中解中, 发电成本和污染气体排放量均优于文献[16]所采用的 NSGA-II 获得的优化结果, 并且  $\mu_1$ 、 $\mu_2$  值比较接近最优值, 分布也比较合理, 表明发电成本和污染气体排放量 2 个目标整体平衡效果好。

c. 若决策者综合考虑发电成本和污染气体排放量, 并且对单目标有主观偏好要求, 根据决策者对单目标满意度下限值  $\mu_1$ 、 $\mu_2$  的不同要求, 分别进行仿真计算, 得到的优化结果如表 6 所示。其中, 负荷均取 700 MW。

表 6 很好地说明了发电成本与污染气体排放量 2 个目标相互影响、相互制约的关系。当  $\mu_1$  从 0.85 增大到 0.90 时, 优化结果中  $\mu_1$  从 0.852 6 增大到 0.904 7,  $\mu_2$  从 0.603 1 减小至 0.529 9, 对应的发电成本减小, 污染气体排放量增大, 表明经济效益的增大是以牺牲部分环境保护效益为代价的; 当  $\mu_2$  从 0.85 增大到

表 5 EED 问题的最优折中解

Tab.5 Optimal compromise solution of EED problem

| 负荷/MW | 算法      | 发电成本/¥ | 排放量/kg | 有功损耗/MW | $P_1$ /MW | $P_2$ /MW | $P_3$ /MW | $P_4$ /MW | $P_5$ /MW | $P_6$ /MW | 总出力/MW | $\mu_1$ | $\mu_2$ |
|-------|---------|--------|--------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|---------|---------|
| 500   | NSGA-II | 28 291 | 284.33 | 20.51   | 54.05     | 34.25     | 54.50     | 80.41     | 161.87    | 135.43    | 520.51 | —       | —       |
|       | 本文      | 28 244 | 281.87 | 18.02   | 57.76     | 35.52     | 54.68     | 80.38     | 158.71    | 130.98    | 518.02 | 0.8109  | 0.8112  |
| 700   | NSGA-II | 38 672 | 484.93 | 36.23   | 86.29     | 60.29     | 73.06     | 109.04    | 223.45    | 184.11    | 736.23 | —       | —       |
|       | 本文      | 38 519 | 479.73 | 32.62   | 89.61     | 56.60     | 74.74     | 105.48    | 218.59    | 187.59    | 732.62 | 0.7502  | 0.7648  |
| 900   | NSGA-II | 50 126 | 784.70 | 57.41   | 120.06    | 85.20     | 89.57     | 140.28    | 288.61    | 233.69    | 957.40 | —       | —       |
|       | 本文      | 49 781 | 776.20 | 48.74   | 124.35    | 80.74     | 81.91     | 144.81    | 283.49    | 233.45    | 948.74 | 0.7364  | 0.7335  |

表 6 同时考虑发电成本与污染气体排放量的优化结果

Tab.6 Results of combined optimization of power generation cost and pollution gas emission

| $\mu_1$ | $\mu_2$ | 发电成本/¥    | 排放量/kg | 有功损耗/MW | $P_1$ /MW | $P_2$ /MW | $P_3$ /MW | $P_4$ /MW | $P_5$ /MW | $P_6$ /MW | 总出力/MW | $\mu_1$ | $\mu_2$ |
|---------|---------|-----------|--------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|---------|---------|
| 0.85    | 0.60    | 38 391.88 | 491.30 | 32.53   | 84.66     | 52.28     | 65.27     | 117.30    | 230.58    | 182.44    | 732.53 | 0.8526  | 0.6031  |
| 0.60    | 0.85    | 38 676.80 | 473.54 | 32.53   | 94.56     | 60.54     | 80.91     | 105.50    | 216.97    | 174.06    | 732.53 | 0.6237  | 0.8515  |
| 0.90    | 0.50    | 38 327.08 | 496.52 | 31.68   | 83.09     | 52.74     | 64.86     | 107.33    | 238.89    | 184.76    | 731.68 | 0.9047  | 0.5299  |
| 0.50    | 0.90    | 38 800.55 | 469.33 | 33.19   | 96.41     | 64.43     | 79.41     | 107.06    | 201.21    | 184.68    | 733.19 | 0.5243  | 0.9104  |

0.90 时,优化结果中  $\mu_2$  从 0.8515 增大到 0.9104, $\mu_1$  从 0.6237 减小至 0.5243,对应的污染气体排放量减小,发电成本增大,表明增大环境保护效益,一定程度上会损害经济效益。分别改变单目标满意度下限值  $\mu_1$ 、 $\mu_2$ ,将得到不同的优化结果。

6 结论

a. 环境经济发电调度模型兼顾了发电成本、环境保护 2 个目标,决策者可以根据某一特定调度准则对发电成本和污染气体排放量的具体要求,通过设定各单目标满意度下限值,制订更加灵活的调度方案。

b. 算例仿真结果表明,基于总体协调度评价函数的交互式多目标处理方法结合改进 PSO 算法在求解环境经济发电调度方面具有明显的优越性,可快速获得决策者要求的满意解。

c. 在环境经济发电调度的基础上,对兼顾系统有功损耗尽量低的综合节能环保经济发电优化调度问题是下一步需要深入研究的内容。

参考文献:

[1] 陈功贵. 基于局部随机搜索粒子群优化算法的电站短期发电优化调度[J]. 电力自动化设备,2008,28(5):52-55.  
CHEN Gonggui. Power station short-term generation optimal dispatch based on local random search PSO algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(5):52-55.

[2] 蒋秀洁,熊信良,吴耀武. 基于改进 PSO 算法的短期发电计划研究[J]. 电力自动化设备,2005,25(3):34-40.  
JIANG Xiujie,XIONG Xingen,WU Yaowu. Improved PSO algorithm and its application in short-term generation scheduling[J]. Electric Power Automation Equipment,2005,25(3):34-40.

[3] 温步瀛,陈冲,邓嵘. 火电机组启停机经济调度新算法[J]. 电力自动化设备,2003,23(2):1-4.  
WEN Buying,CHEN Chong,DENG Rong. Hybrid algorithm for unit commitment of thermal power plant[J]. Electric Power Auto-

mation Equipment,2003,23(2):1-4.

[4] ZWE-LEE G. Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints[J]. IEEE Trans on Power Systems,2003,18(3):1187-1195.

[5] TALAQ J H,EL-HAWARY F,EL-HAWARY M E. A summary of environmental economic dispatch algorithms[J]. IEEE Trans on Power Systems,1994,9(3):1508-1516.

[6] RAMANATHAN R. Emission constrained economic dispatch[J]. IEEE Trans on Power Systems,1994,9(4):1994-2000.

[7] VENKATESH P,GNANADASS R,PADHY N P. Comparison and application of evolutionary programming techniques to combined economic emission dispatch with line flow constraints[J]. IEEE Trans on Power Systems,2003,18(2):688-697.

[8] KULKARNI P S,KOTHARI A G,KOTHARI D P. Combined economic and emission dispatch using improved back propagation neural network[J]. Electric Machines and Power Systems,2000,28(1):31-44.

[9] 陈功贵,陈金富,段献忠. 考虑备用约束和阀点效应的电力系统环境经济优化调度[J]. 电力自动化设备,2009,29(8):18-22.  
CHEN Gonggui,CHEN Jinfu,DUAN Xianzhong. Environmental and economic dispatch with reserve constraints and valve-point effect [J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(8):18-22.

[10] 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 plan[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(19):86-92.

[11] 王峤,李渝曾,张少华. 一种求解环境经济负荷调度问题的人工神经网络新方法[J]. 电力系统自动化,2002,26(21):45-48.  
WANG Xian,LI Yuzeng,ZHANG Shaohua. A new artificial neural network approach to economic emission load dispatch [J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(21):45-48.

[12] DHILLON J S,PARTI S C,KOTHARI D P. Fuzzy decision-making in stochastic multi-objective short-term hydrothermal scheduling[J]. IEEE Proceedings-Generation,Transmission and Distribution,2002,149(2):191-200.

[13] BASU M. An interactive fuzzy satisfying method based on evolutionary programming technique for multi-objective short-term hydrothermal scheduling[J]. Electric Power Systems Research,

- 2004,69(2-3):277-285.
- [14] ABIDO M A. Multi-objective particle swarm optimization for environmental/economic dispatch problem[J]. Electric Power Systems Research,2009,79(7):1105-1113.
- [15] 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 Jing,LUO Xianjue. Environmental economic dispatching adopting multi-objective random black-hole particle swarm optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(34):105-111.
- [16] RUGHOOPTH H C S,AH K R T F. Environmental/economic dispatch of thermal units using an elitist multi-objective evolutionary algorithm[C]//2003 IEEE International Conference on Industrial Technology. Maribor,Slovenia:[s.n.],2003:48-53.
- [17] 张欣莉. 基于目标满意度的交互式多目标决策改进方法[J]. 系统工程,2004,22(9):10-13.
- ZHANG Xinli. An improved method of interactive multi-objective decision-making based on objective satisfaction degree[J]. System Engineering,2004,22(9):10-13.
- [18] 徐泽水. 一种交互式多目标决策新方法[J]. 系统工程理论与实践,2002,22(2):104-108.
- XU Zeshui. A new interactive method for multi-objective decision-making problems [J]. Systems Engineering-Theory & Practice,2002,22(2):104-108.
- [19] COATH G,HALGAMUGE S K. A comparison of constraint-handling methods for the application of particle swarm optimization to constrained nonlinear optimization problems[C]//The 2003 Congress on Evolutionary Computation,2003. CEC'2003. Canberra,Australia:IEEE Service Center,2003:2419-2425.
- [20] 赵鹏军,刘三阳,李超. 基于吸引排斥机制的粒子群优化算法[J]. 计算机应用,2009,29(2):552-554.
- ZHAO Pengjun,LIU Sanyang,LI Chao. Attraction-repulsion mechanism-based particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Computer Applications,2009,29(2):552-554.

#### 作者简介:

龙 军(1956-),男,广西融安人,教授,主要研究方向为电力系统检测与控制、电力市场;

郑 斌(1986-),男,湖南永州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行与分析(E-mail:zhengbin0771@163.com);

郭小璇(1986-),女,广西桂林人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与分析;

李 赢(1984-),男,浙江衢州人,硕士,主要从事电力系统运行与调度方面的工作。

## Interactive multi-objective optimization of environmental and economic power generation scheduling

LONG Jun<sup>1</sup>,ZHENG Bin<sup>1</sup>,GUO Xiaoxuan<sup>1</sup>,LI Ying<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering,Guangxi University,Nanning 530004,China;

2. Zhejiang Zhoushan Power Bureau,Zhoushan 316021,China)

**Abstract:** A way to solve the environmental and economic scheduling problem of power generation is proposed,which combines the evaluation-function-based interactive multi-objective optimization method and the improved particle swarm optimization method. The established evaluation function of comprehensive coordination degree can more effectively balance two optimization objectives;energy conservation and emission reduction,while the decision-maker can flexibly adjust the satisfaction degree of each objective. It avoids the difficult determination of weight coefficients during the conversion from multi-objective to single-objective and enhances the interaction during the process of decision-making. The results of simulative analysis for a 6-generator test system show its feasibility and effectiveness.

**Key words:** environmental and economic scheduling; evaluation function; interaction; optimization; satisfaction degree; models; electric power generation