

基于改进粒子群算法的火电系统节能环保 多目标优化调度模型

陈碧云¹, 程鹏飞¹, 陶松梅¹, 黄海林²

(1. 广西大学 电气工程学院, 南宁 530004; 2. 广深沙角 B 电力有限公司, 广东 深圳 523937)

摘要: 针对火电系统生产过程中的环境污染问题, 提出以火电系统节能环保为重点研究对象的多目标优化调度模型, 并以改进的粒子群算法进行求解。结合灰色系统理论中有关灰色关联度的概念对粒子群算法多目标求解机制进行改进, 对煤耗量、污染气体和烟尘排放等的多目标火电系统优化求解, 引入压缩因子改善粒子群算法的性能, 增强其全局收敛能力。通过 IEEE 14 节点系统算例证明本算法的有效性。

关键词: 节能减排; 多目标优化; 电压质量; 灰色理论; 改进粒子群算法

作者简介: 陈碧云(1978-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力规划与可靠性。

中图分类号: TM621.8; F407.61 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-9529(2012)03-0355-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(50767001); 广西自然科学基金项目(2011jjA60017)

Multi-objective Optimization Scheduling Model for Thermal Power System Energy Saving and Environmental Protection by Based on Improved PSO Algorithm

CHEN Bi-yun¹, CHENG Peng-fei¹, TAO Song-mei¹, HUANG Hai-lin²

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

2. Guangshen Shajiao B Electric Power Co., Ltd., Shenzhen 523937, China)

Abstract: In order to solve the environmental pollution problem in the thermal power generation process, this paper presents a multi-objective optimization scheduling model with a focus on energy saving and environmental protection, and draws on improved particle swarm optimization(PSO) algorithm for the solutions. The PSO multi-objective solution mechanism is improved in combination with the concept of grey relation in grey theory; thereby the optimized solutions are achieved for the multiple objectives of thermal power system, including coal consumption, gaseous pollutants, dust emissions; compressibility factor is introduced to enhance PSO algorithm performance and its global convergence. Finally, the calculation example of IEEE 14 bus system verifies the validity of the proposed algorithm.

Key words: energy saving and emission reduction; multi-objective optimization; voltage quality; grey theory; improved particle swarm optimization(PSO) algorithm

Foundation items: The National Natural Science Foundation of China(50767001)

我国火电机组大部分是燃煤机组, SO₂、CO₂等污染气体及火电排放烟尘未得到有效控制。粒子群算法(PSO)^[1-3]所需参数少、结构简单明快、程序操作简单, 经过改进后具有良好的寻找全局最优解, 有效避免陷入局部最优解的性能。本文将灰色系统理论和粒子群算法相结合并引入压缩因子改善算法的学习因子来提高算法的整体性能。

1 火电系统多目标优化模型

电力系统多目标优化调度的目的是在满足电力系统负荷要求和各个电厂运行安全的情况下,

通过设定各种目标使得电力系统整体运行在一个比较理想的状态。对火电系统而言, 多目标优化的结果要使得火电厂的煤耗量最少以节约不可再生资源, 排放的污染气体最小以减少周围环境的破坏, 其固体废弃物最少以达到减少占用耕地、防止固体废弃物中的有毒物质造成的危害等。

1.1 火电系统优化调度模型的目标函数

(1) 煤耗量最小

$$\min f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^R (a_i + b_i P_i(t) + c_i P_i^2(t)) \quad (1)$$

式中 a_i 、 b_i 、 c_i ——火电机组 i 的煤耗系数;

T ——调度周期;

R ——火电系统中火电机组数。

本文假设所有机组在优化调度过程中都处于开机状态。

(2) 污染气体排放量最小

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^R (\alpha_i + \beta_i P_i(t) + \gamma_i P_i^2(t) + \eta_i \exp(\delta_i P_i(t))) \quad (2)$$

式中 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \eta_i, \delta_i$ ——火电机组 i 的污染气体排放特性系数;

T ——调度周期;

R ——火电系统中火电机组数目。

(3) 烟尘固体排放量最小

$$\min f_3 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{R_T} (1000 \cdot C_i^t \cdot \rho_{ash}(i, t) \cdot dfh(i, t) \cdot (1 - \eta_i^t) \cdot (1 - cfh_i^t)) \quad (3)$$

式中 C_i^t ——火电机组 i 在 t 时段煤耗量;

$\rho_{ash}(i, t)$ ——燃煤中的灰分含量;

dfh_i^t ——灰分中的烟尘含量;

η_i^t ——除尘系统的除尘效率;

cfh_i^t ——烟尘中可燃物的含量。

(4) 网络有功损耗最小化

$$\min f_4 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n U_i U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (4)$$

式中 G_{ij}, B_{ij} ——分别为节点 i 和节点 j 的互电导和互电纳;

V_j, θ_j ——分别为支路 j 的电压幅值和相角;

θ_{ij} ——节点 i 和节点 j 之间的相角差;

n ——网络节点数。

(5) 电压偏移量最小

$$\min f_5 = \sum_{j=1}^n (u_j - u_0) \quad (5)$$

式中 u_j ——电网中节点 j 的实际运行电压;

u_0 ——电网中节点 j 的额定电压;

n ——网络节点数。

1.2 约束条件

(1) 电力系统功率平衡约束

$$P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (6)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (7)$$

式中 $P_{Gi}, Q_{Gi}, P_{Di}, Q_{Di}, V_i, \theta_i$ ——分别为节点 i 注入功率有功和无功功率、有功和无功负荷、电压幅值和相角;

G_{ij}, B_{ij} ——分别为节点 i 和节点 j 的互电导和互电纳;

V_j, θ_j ——分别为支路 j 的电压幅值和相角;

θ_{ij} ——节点 i 和节点 j 之间的相角差。

(2) 火电机组有功出力约束

$$P_{imin} \leq P_i \leq P_{imax} \quad (8)$$

式中 P_{imax}, P_{imin} ——分别为火电机组 i 有功输出的上下限约束值。

(3) 火电机组无功出力上下限

$$Q_{imin} \leq Q_i \leq Q_{imax} \quad (9)$$

式中 Q_{imax}, Q_{imin} ——分别为火电机组 i 无功输出的上下限约束值。

(4) 节点电压幅值上下限

$$V_{imin} \leq V_i \leq V_{imax} \quad (10)$$

式中 V_{imax}, V_{imin} ——分别为节点 i 电压上下限。

(5) 电网中各条线路有功功率传输约束

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

式中 $P_{ij}^{max}, P_{ij}^{min}$ ——线路 ij 传输的有功功率上下限。

(6) 火电机组爬坡约束

$$R_{imin} \leq P_i(t+1) - P_i(t) \leq R_{imax} \quad (12)$$

式中 P_{imax}, P_{imin} ——分别为火电机组 i 出力所允许的最大变化率和最小变化率。

2 改进粒子群算法

2.1 粒子群算法的改进

粒子群算法是一种智能算法,由 Eberhart 博士和 Kennedy 博士首先提出。该算法模拟鸟群扑食的行为,通过鸟之间的集体协作达到最优,具有原理简单,依赖参数少等特点。在数学上,粒子位置和速度一般表示为:

$$V_{ij}^t = \omega V_{ij}^{t-1} + C_1 r_1 (P_{best,ij}^{t-1} - X_{ij}^{t-1}) + C_2 r_2 (G_{best}^{t-1} - X_{ij}^{t-1}) \quad (13)$$

$$X_{ij}^t = X_{ij}^{t-1} + V_{ij}^t \quad (14)$$

式中 ω ——惯性权因子;

$i = 1, 2, \dots, N_D, N_D$ 为粒子维数;

$j = 1, 2, \dots, N_{par}, N_{par}$ 为粒子数量;

V_{ij}^t, V_{ij}^{t-1} ——分别为第 j 粒子在第 i 维 t 和 $t-1$ 时段的速度;

X_{ij}^t, X_{ij}^{t-1} ——分别为第 j 粒子 t 和 $t-1$ 时段的位置;

$P_{best,ij}^{t-1}, G_{best}^{t-1}$ ——分别为第 j 单个和全部粒子 $t-1$ 时段的最佳位置;

C_1, C_2 ——分别为学习因子;

$r_k (k = 1, 2, \dots, N_p)$ —— N_p 维空间的随机数, $r_k \in [0, 1]$ 。

由于粒子群算法和其他智能性算法相比,更容易陷入局部最优解。为了避免出现这个问题,需要在计算过程中一直保持粒子的多样性。学习因子 C_1 和 C_2 决定了粒子之间信息的交换和粒子本身信息的继承,使得粒子能够在局部最优解附近改变运动的轨迹。因此本文引入压缩因子 ϕ 来改善学习因子 C_1 和 C_2 的性能,则粒子群算法的速度和位置表达式更新为:

$$V_{ij}^t = \phi [\omega^t V_{ij}^{t-1} + C_1 r_1 (P_{best\ ij}^{t-1} - X_{ij}^{t-1}) + C_2 r_2 (G_{best\ j}^{t-1} - X_{ij}^{t-1})] \quad (15)$$

$$X_{ij}^t = X_{ij}^{t-1} + V_{ij}^t \quad (16)$$

式中

$$\phi = \frac{2}{|2 - C - \sqrt{C^2 - 4C}|} \quad (17)$$

$$C = C_1 + C_2 \quad (18)$$

2.2 引入灰色系统理论求解火电系统多目标模型

对于复杂系统而言,由于其内部变量多、变量之间关联多,因此本文取反应系统重要特征的参数,用这些参数组成的序列表征系统的状态。因此本文应用灰色理论中的灰色关联度思想与粒子群优化算法相结合提出适用于多目标计算的粒子群算法(DPSO)进行电力系统多目标优化调度计算。

假设系统已经达到理想优化状态,则其对应的系统状态序列设为基准序列,而目前系统状态对应的序列设为目标序列,则用数学模型表示为:

$\hat{X}^{(0)}(k)$ 为基准矢量序列, $X^{(0)}(k)$ 为目标矢量序列。序列 $\hat{X}^{(0)}(k)$ 和 $X^{(0)}(k)$ 表示为:

$$\hat{X}^{(0)}(k) = [\hat{X}^{(0)}(1), \hat{X}^{(0)}(2), \dots, \hat{X}^{(0)}(n)] \quad (19)$$

$$X^{(0)}(k) = [X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)] \quad (20)$$

对于序列 $\hat{X}^{(0)}(k)$ 和 $X^{(0)}(k)$, 则关联系数可以定义如下:

$$\eta(k) = \frac{\eta_{\min}(k) + \rho \eta_{\max}(k)}{\hat{X}^{(0)}(k) - X^{(0)}(k) + \rho \eta_{\max}(k)} \quad (21)$$

式中 $\hat{X}^{(0)}(k) - X^{(0)}(k)$ ——第 k 个点 $\hat{X}^{(0)}(k)$ 和 $X^{(0)}(k)$ 的绝对值差;

ρ ——分辨率 $0 < \rho < 1$, 一般取 $\rho = 0.5$;

$\eta_{\min}(k)$ 、 $\eta_{\max}(k)$ ——分别为两级最小差、最大差。

$$\eta_{\min}(k) = \min \min | \hat{X}^{(0)}(k) - X^{(0)}(k) | \quad (22)$$

$$\eta_{\max}(k) = \max \max | \hat{X}^{(0)}(k) - X^{(0)}(k) | \quad (23)$$

$X^{(0)}(k)$ 和 $\hat{X}^{(0)}(k)$ 的关联度定义为 n 个关联系数平均值:

$$r = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \eta(k) \quad (24)$$

引入灰色系统理论求解火电系统多目标优化模型的 DPSO 算法的计算步骤如下。

(1) 在搜索空间随机生成一组粒子,在满足约束条件的情况下对粒子赋予初始位置和速度。

(2) 设定基准矢量序列。

(3) 以种群中的粒子为基础,使用牛顿拉法进行潮流计算,并将各个目标函数的计算结果组成目标矢量序列。

(4) 计算各个粒子所对应目标序列与基准序列的关联度,并将这个关联度作为粒子群优化算法的适应函数。

(5) 利用式(15)、式(16)对粒子的位置和速度进行更新。

(6) 重复上述步骤,直到满足适应函数所要求的条件。

3 实例计算与分析

为验证本文所提算法对计算火电系统节能环保多目标优化调度模型的有效性,将计算结果与罚函数法求解多目标问题的粒子群算法(FPSO)作对比,将5台火电机组放置于IEEE 14节点系统进行计算与分析,其火电机组和网络参数如表1~表4所示。

采用 DPSO 算法求解火电系统优化调度模型在各个时段的目标函数计算结果如表5所示。

采用 DPSO 算法和 FPSO 算法对本文所提火电系统多目标优化模型进行求解,各个时段各个目标函数求解结果总和如表6所示。从计算结果可以看出,DPSO 算法中除了目标函数的网络各节点电压偏移总量稍大于 FPSO 计算结果外,其余4个目标函数煤耗量、污染气体排放量、烟尘固体排放量、网络有功损耗的计算结果均小于 FPSO 相应目标函数的计算结果。

表 1 火电机组相关参数

电厂	电厂 1	电厂 2	电厂 3	电厂 4	电厂 5
P_{\max}/MW	200	140	100	100	100
P_{\min}/MW	0	0	0	0	0
$a/\text{kg} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-2}$	-0.231 3	-0.241	-0.193 3	-0.238 7	-0.178 3
$b/\text{kg} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}$	370.13	385.6	309.33	381.87	438.59
c/kg	40 000	30 000	20 000	35 000	28 000

表 3 火电厂烟尘排放参数 %

火电厂	Hf	dfh	cfh	η
电厂 1	0.25	0.20	0.28	0.833
电厂 2	0.27	0.23	0.30	0.856
电厂 3	0.30	0.18	0.32	0.825
电厂 4	0.33	0.25	0.45	0.98
电厂 5	0.45	0.27	0.50	1.12

表 5 由 DPSO 算法计算各时段各目标优化结果

时段	f_1/kg	f_2/kg	f_3/kg	f_4/MW	$f_5/\text{p. u.}$
1	2.473×10^5	2.638×10^2	3.285×10^6	1.257	0.798
2	2.377×10^5	2.652×10^2	3.169×10^6	2.325	0.591
3	2.435×10^5	3.155×10^2	3.217×10^6	2.897	0.738
4	2.585×10^5	2.840×10^2	3.420×10^6	2.866	0.653
5	2.542×10^5	1.925×10^2	3.334×10^6	2.910	0.687
6	2.618×10^5	3.189×10^2	3.490×10^6	3.324	0.561
7	2.602×10^5	3.095×10^2	3.456×10^6	3.962	0.632
8	2.521×10^5	3.307×10^2	3.376×10^6	1.059	0.736
9	2.439×10^5	4.204×10^2	3.207×10^6	3.961	0.527
10	2.460×10^5	2.354×10^2	3.251×10^6	1.873	0.724
11	2.432×10^5	3.433×10^2	3.209×10^6	2.196	0.917
12	2.313×10^5	1.945×10^2	3.031×10^6	2.899	0.740

表 6 各时段各目标函数求解结果

算法	f_1/kg	f_2/kg	f_3/kg	f_4/MW	$f_5/\text{p. u.}$
DPSO	0.298×10^7	3.473×10^3	3.945×10^7	31.53	8.304
FPSO	0.327×10^7	3.653×10^3	4.182×10^7	33.05	8.242

这表明与 FPSO 算法相比,DPSO 由于结合了灰色理论的灰色关联度的概念来计算电力系统多目标优化模型,有效地回避了各目标函数之间的权重关系,减少了主观因素对权重设置的不利影响,提高了各个目标之间关系的客观性,计算方法简单实用且计算结果相对于 FPSO 而言更加可靠。

表 2 火电机组污染气体排放参数

火电厂	$\alpha_i/\text{lb} \cdot \text{h}^{-1}$	$\beta_i/\text{lb} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}$	$\gamma_i/\text{lb} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-2}$	$\eta_i/\text{lb} \cdot \text{h}^{-1}$	$\delta_i/\text{lb} \cdot (\text{MW} \cdot \text{h})^{-1}$
电厂 1	60	-1.355	0.010 5	0.496 8	0.0192 5
电厂 2	45	-0.600	0.008 0	0.486 0	0.0169 4
电厂 3	30	-0.555	0.012 0	0.503 5	0.0147 8
电厂 4	25	-0.560	0.014 5	0.505 5	0.0163 0
电厂 5	35	-0.575	0.015 6	0.508 8	0.0172 0

表 4 调度周期各时段系统负荷情况表

时段/h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
负荷/MW	259	244.8	251	274.8	284	293	294.8	278.7	253.8	244.8	242	227

4 结语

本文所提出的火电系统多目标优化调度模型兼顾了火电生产的经济性、环保性和安全性因素,以煤耗最小、污染物排放最小、电压偏移量最小等为目标函数,能较好地适应新时期我国火力发电生产的新要求。在计算方法上采用与灰色系统理论相结合的改进粒子群算法(DPSO)来求解火电系统多目标优化模型,从而有效回避了各个目标之间的权重设置问题,减少主观因素的影响,增强计算结果的客观性和可靠性。通过算例与罚函数法求解多目标问题的粒子群算法(FPSO)比较,可以看出 DPSO 算法比 FPSO 算法更加可行和有效。

如何进一步改善粒子群算法的学习因子和权重的性能使得计算更有效率且更容易收敛到全局最优解还需要做进一步的研究。

参考文献:

[1] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, 1995, 4: 1942-1948.

[2] 侯云鹤, 鲁丽娟, 熊信良, 等. 广义蚁群与粒子群结合算法在电力系统经济负荷分配中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 34-38.

HOU Yun-he, LU Li-juan, XIONG Xin-yin, et al. Application of generalized ant colony optimization algorithm integrated with particle swarm optimization algorithm in economic dispatch of power systems [J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 34-38.

[3] 杨波, 赵遵廉, 陈允平, 等. 一种求解最优潮流问题的改进粒子群优化算法[J]. 电网技术, 2006, 30(11): 6-10.

YANG Bo, ZHAO Zun-lian, CHEN Yun-ping, et al. An improved particle swarm optimization algorithm for optimal power flow problem [J]. Power System Technology, 2006, 30(11): 6-10.

收稿日期:2011-10-28

本文编辑:郑文彬