

计及阀点效应负荷经济分配的杂交粒子群算法

蒋秀洁^{1,2}, 徐满清³, 龚学会³, 陈林³

(1. 成都信息工程学院控制工程学院, 四川 成都 610225; 2. 三峡大学电气信息学院, 湖北 宜昌 443002;
3. 宜昌供电公司, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 提出了一种用于求解复杂的非凸、非线性具有阀点效应的火电有功负荷经济分配问题的杂交粒子群算法(HPSO)。HPSO通过粒子追随自己找到的最优解和整个群的最优解来完成优化,并在此基础上将遗传算法的杂交思想引入到PSO算法当中,使其避免局部最优。算例的仿真结果表明:本文的算法有效、可行,可望应用于更广泛的优化问题。

关键词: 杂交粒子群优化算法; 经济负荷分配; 电力系统; 阀点效应

Hybrid particle swarm optimization for economic dispatch with valve-point effect

JIANG Xiu-jie^{1,2}, XU Man-qing³, GONG Xue-hui³, CHEN Lin³

(1. Control Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. College of Electrical Engineering & Information Technology, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
3. Yichang Power Supply Company, Yichang 443002, China)

Abstract: This paper introduces a new versatile optimization called hybrid particle swarm optimization algorithm (HPSO). The algorithm can be used to solve the discontinuous, nonconvex, nonlinear constrained economic load dispatch (ELD) with valve-point effect optimization problems. The algorithm completes the optimization through following the personal best solution of each particle and the global best value of whole swarm. To avoid trapping to local excellent result, this paper presents putting hybrid idea of GA into PSO algorithm. The results show that the HPSO for ELD problem is versatile and efficient. It has been successfully applied in many areas.

Key words: hybrid particle swarm optimization algorithm; economic dispatch; electric power system; valve-point effect

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)08-0010-04

0 引言

在实际工程优化问题中存在许多不连续,不可微,非线性,离散且约束条件众多的目标函数,约束条件将问题的可行解限制在一个很小的区域内,使得问题的求解变得非常困难,因此传统的非线性规划技术已经不再适用。近年来,用进化算法求解约束优化问题取得了较好的效果,但其值精度低于确定的非线性规划技术。

粒子群优化算法 PSO (Particle Swarm Optimization) 最早是由美国的 J.Kennedy 博士和 R.C.Eberhart 博士于 1995 年提出的一种新的全局优化进化算法,它源于对鸟类捕食行为的模拟^[1]。该算法模拟社会的群体行为,在多维空间中构造被称为“粒子群(Particles)”的系统进行寻优。每个粒子通过统计迭代过程中自身和群体发现的最优值修正自己的前进方向和速度。和早期的基于进化的算

法相比,PSO 算法在计算速度和消耗内存上有较大的优势,因此它的实现只需要简单的数学运算和较少的程序代码。与多数进化算法相比,PSO 算法的优势是通过个体间的协作而非适者生存来搜寻最优解,算法中的个体都有记忆。

负荷经济分配 ED (Economic Dispatch)^[2]是电力系统规划和运行调度中的一类型典型的优化问题,其目的是在满足负荷和运行约束的条件下,最小化发电成本,对于提高系统的经济性和可靠性都具有重要的意义。电厂乃至电力系统的优化运行已成为该行业节能降耗的重要手段。由于电力生产的特点,随着系统负荷的变化,发电机组不可能始终保持在经济负荷下运行。如何在机组间进行负荷分配将会对整个系统的经济性产生很大的影响。发电厂传统的负荷最优分配依据是等微增率准则^[2]和动态规划法^[3]。但等微增率法假设机组的增量负荷特性曲线是单调上升和分段线性的,在实际系统中,

机组的非线性特性限制了它的应用。动态规划方法的维数灾问题也限制了它的应用。因此许多现代优化算法被应用于求解 ED 问题, 文献[4]采用 PSO 算法对机组避开振动区域的负荷经济分配进行了研究, 算例仿真结果证明了该算法的有效性和可行性。

本文采用杂交粒子群算法 (HPSO) 对火电机组负荷进行经济分配, 该算法的特点是: 考虑实际电力系统中机组的阀点效应; 以粒子群算法为基础, 在此基础上将遗传算法的杂交思想引入到 PSO 算法当中, 使其避免局部最优; 借鉴混沌算法的可行化调整机制, 用自罚应函数法处理等式约束; 线性地改变惯性权重; 重新初始化不合格粒子。

1 负荷经济分配的数学模型

1.1 目标函数

经济负荷分配问题就是合理地安排各发电厂(机)的有功出力, 使得在满足一定约束条件下, 系统总发电耗量达到最小, 即最小化发电成本, 其目标函数为

$$\min F = \min \left\{ \sum_{i=1}^{N_g} F_i(P_{Gi}) \right\} \quad (1)$$

式中: F 为系统总发电量; N_g 为系统内发电机总数; P_{Gi} 为第 i 台发电机有功功率; $F_i(P_{Gi})$ 为第 i 台发电机耗量特性。

对于 $F_i(P_{Gi})$, 一般用二次函数近似表示为

$$F_i(P_{Gi}) = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i \quad (2)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 为参数。

在实际系统中, 汽轮机进气阀突然开启时出现的拔丝现象会使机组耗量特性产生阀点效应。单台发电机耗量特性可通过在机组热运行测试段 P_G , F 采样得到, 通常可表示成二次函数形式。但在汽轮机进汽阀突然开启时出现的拔丝现象会在机组的耗量特性曲线上叠加一个脉动效果, 即产生阀点效应, 忽略它会使得求解精度受到明显影响。对考虑阀点效应的耗量特性为:

$$F_i(P_{Gi}) = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i + E_i \quad (3)$$

$$E_i = \left| g_i \sin(h_i (P_{Gi} - P_{Gi}^{\min})) \right| \quad (4)$$

式中: E_i 为阀点效应引起的耗量特性变化; g_i 、 h_i 为参数; P_{Gi}^{\min} 为第 i 台发电机有功功率下限。

1.2 约束条件

系统运行时要满足电力平衡约束和发电机组运

行约束。电力平衡约束是指发电机有功功率之和等于系统总网损和系统总负荷。网损是发电机有功功率, 传输线参数和网络拓扑结构的函数, 一般采用潮流计算或 B 系数法求得。

1) 电力平衡约束为:

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{Gi} = P_D + P_L \quad (5)$$

式中: P_L 为系统总网损; P_D 为系统总负荷。

2) 网损一般采用潮流计算得到, 还可计及以下约束条件:

(a) 线路容量约束为

$$|Lf_j| \leq Lf_j^{\max} \quad j=1, 2, \dots, N_L \quad (6)$$

式中: Lf_j 为第 j 条线路潮流; Lf_j^{\max} 为第 j 条线路容量上限; N_L 为线路数。

(b) 系统稳定性约束为

$$|\delta_i - \delta_j| \leq \delta_{ij}^{\max} \quad i, j=1, 2, \dots, N_D \text{ 且 } i \neq j \quad (7)$$

式中: i 、 j 为有线路相连的节点; δ_i 、 δ_j 为节点 i 、 j 的相角; δ_{ij}^{\max} 为 i 、 j 相角差上限; N_D 为系统节点数。

当电力系统网络覆盖密集时可以忽略网损, 本文在计算中考虑到实际的情况忽略了网损, 因此电力平衡约束简化为

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{Gi} = P_D \quad (8)$$

3) 发电机的运行约束为:

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (9)$$

式中: P_{Gi}^{\min} 、 P_{Gi}^{\max} 为第 i 台发电机有功功率上下限。

2 杂交粒子群算法及其应用

在 PSO 算法中, 每个优化问题的潜在解都是搜索空间中的一个“粒子”, 粒子追随当前的最优粒子在解空间中搜索。在每次迭代中粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己: 一个是粒子本身找到的最优解, 另一个是整个种群目前找到的最优解。在一个 D 维的目标搜索空间中, 由 m 个粒子组成一个群落, 其中第 i 个粒子表示为一个 D 维的向量 $X_i=(x_1, x_2, \dots, x_D)$, ($i=1, 2, \dots, m$), 即第 i 个粒子在 D 维空间的位置。第 i 个粒子迄今为止搜索到的最优位置 ($Pbest$) 为, $Pbest_i=(pbest_{i1}, pbest_{i2}, \dots, pbest_{iD})$, 整个粒子群迄今为止搜索到的最优位置 ($Pgbest$) 为 $Pgbest=(pgbest_1, pgbest_2, \dots, pgbest_D)$ 。

粒子在找到上述两个极值后, 就根据下面两个公式来更新自己的速度和位置。粒子 i 的信息可以用 D 维向量表示, 位置表示为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$, 速度为 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$, 其他向量类似。则速度和位置更新方程为

$$v_{id}^{k+1} = v_{id}^k + c_1 \text{rand}_1 (pbest_{id}^k - x_{id}^k) + c_2 \text{rand}_2 (gbest_d^k - x_{id}^k) \quad (10)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (11)$$

式中: v_{id}^k 是粒子 i 在第 k 次迭代中第 d 维的速度; c_1 、 c_2 是加速系数 (或称学习因子), $pbest_{id}$ 是粒子 i 在第 d 维的个体极值点的位置 (即坐标); $gbest_d$ 是整个群在第 d 维的全局极值点的位置。

PSO 算法是一种模拟社会行为的随机全局优化算法, 有如下特征^[5]:

- ① 用随机种群初始化算法;
- ② 通过种群进化搜索最优解;
- ③ 基于历史种群信息进行种群进化。

用 PSO 算法求解工程优化问题时, 由于该方法为随机算法, 因此它很难处理等式约束条件, 当可行域很小时很难找到最优解。为了能够用 PSO 算法求解 ED 问题, 本文采用了以下策略:

1) 为加快粒子的收敛速度, 引入惯性权重的方法, 把权重进行改变, 使其随着迭代的进行不断变化使其在初期具有较强的全局搜索能力, 在末期具有较强的局部搜索能力。

2) 在平衡约束中, 如果用硬约束条件将很难达到要求, 借鉴混沌算法的可行化调整机制, 用自罚应函数法处理等式约束, 使粒子间相互进行比较, 离最优解较远的粒子将自动被淘汰掉。

3) 将遗传算法的杂交思想^[6]引入到 PSO 算法当中, 通过杂交就有可能使陷入局部最优的粒子跳出来, 从而使其有可能找到最优解。该方法是对按概率 p_i 选出的粒子进行如下式:

$$child_1(X_i) = p_i \text{parent}_1(X_i) + (1.0 - p_i) \text{parent}_2(X_i) \quad (12)$$

$$child_2(X_i) = p_i \text{parent}_2(X_i) + (1.0 - p_i) \text{parent}_1(X_i) \quad (13)$$

$$child_1(V_i) = \frac{\text{parent}_1(V_i) + \text{parent}_2(V_i)}{|\text{parent}_1(V_i) + \text{parent}_2(V_i)|} \bullet |\text{parent}_1(V_i)| \quad (14)$$

$$child_2(V_i) = \frac{\text{parent}_1(V_i) + \text{parent}_2(V_i)}{|\text{parent}_1(V_i) + \text{parent}_2(V_i)|} \bullet |\text{parent}_2(V_i)| \quad (15)$$

算法实现步骤如下:

(1) 为参数赋初值;

(2) 在满足负荷平衡约束的条件下初始化粒子群的速度和位置, 并根据适应值初始化粒子的个体极值 $pbest$ 和全局极值 $gbest$;

(3) 按式 (10), (11) 更新种群中粒子的速度和位置;

(4) 计算每个粒子的适应值, 更新粒子的 $pbest$ 和种群的 $gbest$;

(5) 将所得粒子按式 (12) ~ (15) 进行杂交, 得出杂交粒子, 并根据其适应度函数求出杂交粒子的全局最优粒子 (用 $pgbest$ 表示);

(6) 将 $pgbest$ 与 $gbest$ 的适应度值进行比较, 取较小者;

(7) 收敛判断; 若不满足转步骤 (3) 进行下一代进化计算。

3 算例分析

算例以 10 台并行发电机系统为例, 发电机承担的总负荷 $P_D=2\ 500$ MW。各发电机的耗量特性常数及有功功率极限见表 1。粒子群优化方法中各参数取值为: 粒子群规模 $N=30$, 迭代总次数 $itermax=500$ (程序中用 T 表示), 最大最小惯性权重 $\omega_{max}=0.9$ 、 $\omega_{min}=0.4$, 学习因子 $c_1=c_2=2$, 惩罚因子 $\lambda=100$, 杂交概率取 $p_c=0.2$ 。

表 1 机组参数

Tab. 1 Data of the 10-unit system

unit	a_i	b_i	c_i	g_i	h_i	P_i^{\min}	P_i^{\max}
1	0.003 6	1.653 8	22.734	600	0.053 0	72	500
2	0.004 2	1.551 9	23.150	650	0.062 0	70	200
3	0.002 5	1.672 8	21.680	450	0.004 8	64	300
4	0.008 9	1.369 0	17.797	800	0.120 0	61	150
5	0.006 5	1.440 9	21.150	700	0.090 0	72	200
6	0.003 3	1.629 0	22.490	400	0.050 0	71	220
7	0.002 2	1.561 5	24.670	250	0.044 0	73	320
8	0.002 2	1.561 5	24.670	250	0.044 0	73	320
9	0.002 3	1.541 9	42.384	280	0.046 0	143	600
10	0.002 6	1.380 7	46.881	300	0.049 0	143	600

表 2 5 次仿真结果

Tab.2 Five simulation results

可行解	1次	2次	3次	4次	5次
P_1	360.16	300.23	390.03	193.34	463.17
P_2	114.00	156.04	133.58	169.71	168.05
P_3	297.886	118.06	129.98	267.75	300.00
P_4	139.29	137.69	61.00	74.28	128.40
P_5	178.30	190.62	200.00	132.21	140.62
P_6	196.663	203.10	134.98	201.93	187.56
P_7	143.06	88.37	211.08	253.19	205.13
P_8	205.94	201.82	287.00	156.74	217.55
P_9	481.46	542.26	475.11	571.46	352.62
P_{10}	383.32	561.97	474.35	479.66	336.86
Σp	2 500.1	2	2	2	2
Cost/\$	8 601.5	8	8	7	7

表3 PSO与HPSO的成本比较(10机组)

Tab.3 Comparison between HPSO method and PSO method when total load=2500MW

Cost/\$	1	2	3	4	5	平均值
HPSO	8 601	8 625	8 508	7 737	7 742	8 243
PSO	8 639	8 754	9 625	8 508	8 167	8 737

从表2中可看出5次运行结果中, HPSO最好解发电成本7 737 \$, 最差解发电成本8 625.6 \$, 平均成本 $F_{avr}=8 243$ \$, 均方差 $\sigma=\sqrt{\frac{1}{5}\left(\sum_{i=1}^5(F_{avr}-F_i)^2\right)}=412.63$, PSO算法最好解8 167 \$, 最差解9 625 \$, 平均成本 $F_{avr}=8 737$ \$, 均方差 $\sigma=\sqrt{\frac{1}{5}\left(\sum_{i=1}^5(F_{avr}-F_i)^2\right)}=484.93$, HPSO算法相对PSO算法发电成本, 对于最好解, 节约430 \$, 占5.6%, 对于最差解, 节约1 024 \$, 占11.9%, 平均成本节约494 \$, 占6.0%。

结果分析: 将两种算法得到的结果进行比较, 通过所得的平均值可看出本文所用的杂交粒子群算法(HPSO)比基本的粒子群算法(PSO)所得到的结果要更好一些。

通过改变迭代次数($itermax=50, 70, 90, 100, 150, 180, 200$), 发现HPSO比基本PSO能更快地收敛, 从而减少了计算时间。从这一现象我们可以看出, 当线性改变了粒子的惯性权重后, 可以加快粒子的收敛速度。

通过表3看出用基本PSO算法得到的结果中, 其最值在8 000~9 500 \$ (只比较最高位)之间, 而用HPSO算法得出来的结果, 其最高值在7 700~8600 \$之间; 由此我们可分析出, 仅用基本PSO算法有可能使其陷入局部最优, 只能得到一些不太理想的次优解; HPSO算法中, 将得到的粒子通过特定的杂交概率进行了杂交, 从而使其有可能跳出局部最优, 找到更优解。

4 总结

本文提出了一种求解计及汽轮机组阀点效应的ELD问题的杂交粒子群算法(HPSO)。针对这一类高维, 非凸, 多约束的优化问题求解中难以得到可行解的难题, 基于不可行解违反等式约束的程度, 提出了一种简单快速的可行化调整方法—自罚应函数来满足等式约束; 同时利用惯性权重的线性变化来加快粒子的收敛速度, 并且使得算法趋于收敛后

缩小粒子群搜索域至最优解附近进行精细搜索, 以确保最优解的高精度。为了防止其粒子陷入局部最优而得到次优解, 引入遗传算法(GA)的杂交思想, 将得到的粒子记忆后再进行杂交, 防止粒子陷入局部最优。通过实例研究进一步验证了本文提出的杂交粒子群算法能够较好地解决ELD问题, 表明了该算法的有效性和可行性。

参考文献

- [1] Kennedy J, Eberhart R C. Particle Swarm Optimization[A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks[C]. Perth(Australia): 1995.1942-1948.
- [2] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1985.
- [3] 马玲, 王爽心, 刘如九, 等. 基于改进动态规划法的火电厂负荷经济调度[J]. 北京交通大学学报, 2005, 29(4): 100-103.
MA Ling, WANG Shuang-xin, LIU Ru-jiu, et al. Load Economic Dispatching of Thermal Power Station Based on Improved Dynamic Programming Method[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2005, 29(4): 100-103.
- [4] El-Gallad A, El-Hawary M, Sallam A, et al. Particle Swarm Optimizer for Constrained Dispatch with Prohibited Operating Zones[A]. In: Proceedings of the 2002 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering[C]. 2002.78-81.
- [5] 王金华, 尹泽勇. 一个约束离散优化问题的粒子群算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(3): 1-4.
WANG Jin-hua, YIN Ze-yong. Solving Constrained Discrete Optimization Problem with Particle Swarm Optimizer[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(3): 1-4.
- [6] 陈文霞, 郑君里, 张宇. 优劣复取舍遗传算法[J]. 清华大学学报, 2000, 40(7): 77-80.
CHEN Wen-xia, ZHENG Jun-li, ZHANG Yu. Genetic Algorithm Based on Better-worse Re-selection[J]. Journal of Tsinghua University, 2000, 40(7): 77-80.

收稿日期: 2008-06-06; 修回日期: 2008-07-14

作者简介:

蒋秀洁(1972-), 女, 讲师, 研究方向为电力系统规划方法、配电网自动化及其应用研究; E-mail: jxiujie@ctgu.edu.cn