

求解经济调度问题的改进粒子群算法

刘涌,侯志俭,蒋传文

(上海交通大学电气工程系,上海 200030)

摘要: 提出了一种求解电力系统经济调度问题的改进粒子群算法。该算法考虑了机组的爬坡速率、工作死区等多种约束条件,并计及了网损。该算法以粒子群算法为基础,提出了新的修补策略对违反各种约束条件的粒子进行积极的修正,并与罚函数技术相结合,使粒子尽可能地在可行解区域或尽量接近可行解的区域内寻优。由于大大减少了粒子在非可行解区域内寻优的概率,因而有效地提高了算法的精度和速度。仿真算例的结果表明,该算法具有速度快、精度高和收敛性好的特点。

关键词: 电力系统; 经济调度; 粒子群优化算法; 修补策略; 罚函数

中图分类号: TM732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)20-0024-04

0 引言

电力系统经济负荷分配 ED (Economic Dispatch) 问题是在满足系统供电要求和机组运行技术要求条件下,确定各机组的负荷分配,以达到总发电成本最小的目标。已经有多种方法被应用于该问题的求解中,其中较传统的方法有 - 迭代法、梯度法等^[1]。这些传统方法有个基本假设,就是假定机组的成本微增率曲线具有单调递增的特性,而在工程实际中,这条假设往往是不成立的,如机组存在工作死区、成本曲线非凸等。二次规划法^[2]可以较精确地计及模型的非线性,但一般要求目标函数连续可导,且定义于凸可行域,其结果在一定程度上依赖于初值的选取。动态规划法^[3]对目标函数无严格限制,容易计及约束条件,但存在维数灾的痼疾。近年来,人工智能算法也被用来求解 ED 问题,包括神经网络法^[4]、遗传算法^[5,6]、模拟退火算法^[7]、进化规划算法^[8]等,取得了较好的结果。

粒子群算法 PSO (Particle Swarm Optimization) 是由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年提出的一种新的进化计算方法^[9]。它与遗传算法类似,是一种基于迭代的优化工具。系统初始化为一组随机解,通过迭代搜寻最优值,但是并没有遗传算法用的交叉和变异,而是粒子在解空间追随最优的粒子进行搜索。同遗传算法相比,粒子群算法的优势在于简单、容易实现、且没有许多参数需要调整,非常适用于工程应用,因此很快被广泛应用到多个领域中。文献 [10] 最早将粒子群算法用于 ED 问题的求解,文章仅讨论了有工作死区约束的情况。文献 [11] 则讨

论了多种约束条件,但是其算法要求其粒子的初始值必须全部为可行解,这一点影响了算法的实用性。文献 [12] 则是通过修改粒子群算法,加入变异、扰动和局部搜索策略,来提高算法的精度。文献 [13] 用保留可行解的方法处理等式约束,用自适应罚函数法处理不等式约束,还对不活动的粒子进行了处理以避免算法的“早熟”现象,但其对约束条件的处理仍然存在问题。本文则在标准粒子群算法的基础上,针对 ED 问题的约束条件,提出新的修补策略来产生粒子,以保证其在可行解区域或尽量接近可行解的区域内进行寻优,从而提高算法的精度。仿真实验的结果表明这种算法简单快速,能够得到较好的优化结果。

1 经济调度的数学模型

ED 问题是在满足系统运行约束的条件下优化系统中发电机组的出力以实现总发电成本最小化。其目标函数可以描述为:

$$\min F = \sum_{i=1}^N C_i(P_i) \quad (1)$$

要满足的约束条件有:

1) 系统功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_i = P_D + P_L \quad (2)$$

2) 机组出力上下限约束

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (3)$$

3) 机组爬坡速率约束

$$-DR_i \leq P_i - P_i^0 \leq UR_i \quad (4)$$

4) 机组工作死区约束

$$P_i \begin{cases} P_i^{\min} & P_i & P_i^{l1} \\ P_i^{(j-1)u} & P_i & P_i^{jl} \\ P_i^{m\#} & P_i & P_i^{\max} \end{cases} \quad j = 2, 3, \dots, m_i \quad (5)$$

其中: N 为机组数; F 为总的发电成本; P_i 为机组 i 的出力值; $C_i(P_i)$ 为机组 i 的发电费用,通常用二次函数表示, $C_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2$,式中 a_i 、 b_i 、 c_i 分别为机组 i 的燃料费用系数; P_D 为系统负荷; P_L 为系统网损,其计算一般采用 B 系数法,即 $P_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^N B_{0i} P_i + B_{00}$; P_i^{\min} 为机组 i 的最小技术出力; P_i^{\max} 为机组 i 的最大技术出力; DR_i 为机组 i 的向下爬坡速率值; UR_i 为机组 i 的向上爬坡速率值; P_i^{jl} 为机组 i 的第 j 个工作死区的下边界; $P_i^{j\#}$ 为机组 i 的第 j 个工作死区的上边界; m_i 为机组 i 的工作死区个数。

2 粒子群优化算法

粒子群优化算法 (PSO)是最近兴起的一种进化计算方法,起源于对鸟群捕食行为的研究。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全局极值和个体极值来更新自己。

粒子群优化算法的数学描述如下:

$$v_j^{k+1} = w v_j^k + c_1 r_1 (pbest_j^k - x_j^k) + c_2 r_2 (gbest^k - x_j^k) \quad (6)$$

$$x_j^{k+1} = x_j^k + v_j^{k+1} \quad (7)$$

其中: v_j^k 为粒子 j 在第 k 次迭代时的速度,一般有 $v_j^{\min} < v_j^k < v_j^{\max}$; w 为惯性系数,一般设为从 0.9到 0.4 按照 $w = w^{\max} - \frac{w^{\max} - w^{\min}}{l} \times l$ 线性递减^[14],这里 l 为迭代次数, l^{\max} 为最大迭代次数; c_1 、 c_2 为加速常数,一般取 2; r_1 、 r_2 为在 0~1之间均匀分布的随机数; x_j^k 为粒子 j 在第 k 次迭代时的位置; $pbest_j^k$ 为粒子 j 本身所找到的最优解,即个体极值; $gbest^k$ 为整个种群找到的最优解,即全局极值。

3 基于 PSO 的经济调度求解算法

本文在粒子群算法的基础上,采取新的修补策略来产生粒子,以保证所有粒子在可行解区域内或尽量接近可行解的区域进行寻优,从而提高了算法的精度和速度。

3.1 编码表示

每个粒子由一组实数组成,这组实数就表示各机组的出力分配值(如图 1所示)。

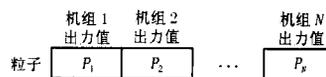


图 1 机组状态的编码表示

Fig 1 Representation of the particle

粒子的速度与位置的更新公式也相应改写为

$$v_{ji}^{k+1} = w v_{ji}^k + c_1 r_1 (pbest_{ji}^k - x_{ji}^k) + c_2 r_2 (gbest_{ji}^k - x_{ji}^k) \quad (8)$$

$$x_{ji}^{k+1} = x_{ji}^k + v_{ji}^{k+1} \quad (9)$$

其中: v_{ji}^k 表示第 j 个粒子在第 k 次迭代时机组 i 所对应的速度分量, x_{ji}^k 表示第 j 个粒子在第 k 次迭代时机组 i 所对应的粒子位置,即为机组 i 的出力值 P_i 。

3.2 适应值函数

粒子的适应值函数取

$$f = F + \left| \sum_{i=1}^N P_i - P_D - P_L \right| \quad (10)$$

式中: λ 为惩罚因子。当总发电费用越小且功率平衡误差越小时,粒子的适应值就越低,所找到的解就越接近最优解。之所以只对功率平衡约束条件加入罚函数,是因为后面提出的修补策略可以调整粒子的位置以满足其他约束条件。

3.3 修补策略

对于将 PSO 应用于此类有约束的优化问题的求解时如何处理各种约束条件,有以下几种处理方式^[15]:一种是将优化问题转化为无约束的优化问题,然后用 PSO 求解,但对于比较复杂的有约束的优化问题,要将其转化为等价的无约束优化问题,本身就非常困难;一种是将多目标优化问题求解中的帕累托图的概念引入进来,采用多级信息共享策略,算法比较复杂;还有一种比较简便的方法,即在初始化和更新粒子时只保留满足约束条件的粒子。本文采用了第三种方法的改进方式,不是消极地只保留满足约束条件的粒子,对不满足约束条件的粒子则放弃或重新更新,而是采取相对积极的方式对不满足约束条件的粒子进行修正,使其尽量满足约束条件。

在粒子每次迭代更新后,如果各机组的出力值超越了出力上下限,则将其限制在相应的边界值上,用公式表示为:

$$x_{j i}^k = \begin{cases} P_i^{\min} & \text{if } x_{j i}^k < P_i^{\min} \\ P_i^{\max} & \text{if } x_{j i}^k > P_i^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

如果违反了机组爬坡速率约束条件,则按照类似的原则进行调整:

$$x_{j i}^k = \begin{cases} P_i^0 - DR_i & \text{if } x_{j i}^k < P_i^0 - DR_i \\ P_i^0 + UR_i & \text{if } x_{j i}^k > P_i^0 + UR_i \end{cases} \quad (12)$$

如果机组出力值违反了工作死区的约束条件,则将其限制在最近的边界值上,用如下公式表示:

$$x_{j i}^k = \begin{cases} P_i^{\min} & \text{if } 0 < x_{j i}^k - P_i^{\min} < (P_i^{\max} - P_i^{\min}) / 2 \\ P_i^{\max} & \text{if } 0 < P_i^{\max} - x_{j i}^k < (P_i^{\max} - P_i^{\min}) / 2 \end{cases} \quad (13)$$

而当机组出力值违反了功率平衡约束时,首先需要计算偏差值 $P_{err} = \sum_{i=1}^N P_i - P_D - P_L$, 如果其绝对值大于一个很小的正数,则说明各机组的出力分配无法满足功率平衡约束,需要将 $-P_{err}$ 的值再分配到各个机组中去。在进行再分配时还要注意不能违反前面的几种约束条件。其具体步骤如下:

- 1) 求 $P_{err} = \sum_{i=1}^N P_i - P_D - P_L$, 如果 $|P_{err}| < \epsilon$ (ϵ 为一很小的正数), 则转 7)。
- 2) 根据各机组的初始出力值求得对应的微增率, 并将其按一定的顺序排队 (P_{err} 为正则按由大到小的顺序, 为负则按由小到大的顺序)。
- 3) 设 $i=1$, 这里 i 为排队后的机组编号。
- 4) 设 $P_{mp} = P_i$, $P_i = P_i - P_{err}$, 然后根据公式 (11) ~ (13) 调整 P_i 值, 以使其满足各种约束条件。
- 5) 设 $P_{err} = P_{err} + P_i - P_{mp}$, 如果 $|P_{err}| < \epsilon$, 则转 7), 否则转下一步。
- 6) 如果 $i < N$, 则设 $i = i + 1$, 然后转 4), 否则转下一步。
- 7) 结束。

如果对全部机组都完成再分配以后, 仍然不能将偏差值 P_{err} 补偿掉, 则说明粒子本次迭代得到的解并非可行解。由于在定义适应值函数时就加入了功率平衡约束的罚函数, 因此该非可行解的适应值将较大, 在进行粒子选优时被选为极值的可能性就较小。由此可见, 罚函数是对再分配过程的必要的补充, 可以将粒子吸引到可行解的区域中来。另外, 经过再分配调整后的粒子也已经是尽量靠近了可行解区域的。

需要说明的是, 对微增率的计算可以在进行粒子迭代前就预先完成, 这样可以避免每次迭代时都重新计算, 从而节省计算时间。

综上所述, 在每次粒子迭代后, 都需要对粒子的位置进行检验, 如果违反了机组出力上下限、爬坡速率和工作死区等约束, 则将其设置在邻近的边界值上; 如果违反了功率平衡约束, 则需要执行再分配的步骤加以修正。

3.4 算法步骤

经过前面的阐述后, 可以得到整个算法的步骤如下。

- 1) 输入系统及机组参数, 定义粒子群的大小 M 和迭代总次数 T 。
- 2) 设 $k=0, j=1$ 。这里 k 为迭代次数变量, j 为粒子个数变量。
- 3) 设 $i=1$, 这里 i 为机组编号。
- 4) 在 $[v^{\min}, v^{\max}]$ 之间随机生成粒子 j 在机组 i 的初始速度分量 $v_{j i}^0$, 并确定各机组的初始出力值为 $x_{j i}^0 = P_i^0 + v_{j i}^0$, 转 6)。
- 5) 根据公式 (8) 和 (9) 更新粒子的速度和位置。
- 6) 如果迭代后的出力值和备用值违反了机组出力上下限、爬坡速率和工作死区等约束, 则根据公式 (11) ~ (13) 将其修正在邻近的边界值上。
- 7) 如果 $i < N$, 则 $i = i + 1$, 转下一步; 否则转 9)。
- 8) 如果 $k=0$, 则转 4); 否则转 5)。
- 9) 检查迭代后的出力值是否满足功率平衡约束, 如果不满足则执行再分配的步骤加以修正。
- 10) 根据公式 (10) 计算各粒子的适应值。如果 $k=0$, 则设 $pbest_j$ 和 $gbest$ 为本次迭代生成的粒子; 否则进行比较, 若当前粒子的适应值小于 $pbest_j$, 则将当前粒子保存为 $pbest_j$, 若该粒子的适应值还小于 $gbest$, 则还需将其保存为 $gbest$ 。
- 11) 如果 $j < M$, 则 $j = j + 1, i = i + 1$, 转下一步; 否则说明本次迭代中所有粒子都已经生成完毕, 转 13)。
- 12) 如果 $k=0$, 则转 4); 否则转 5)。
- 13) 如果 $k < T$, 则 $k = k + 1, j = 1, i = 1$, 然后转 5) 开始下一次迭代; 否则说明全部迭代过程完毕, 转下一步。
- 14) 输出 $gbest$ 所表示的机组出力值和总发电费用。

4 仿真实验

本文采用文献 [11] 采用的 15 台机组的算例, 机组参数、工作死区和 B 系数矩阵等详见文献

[11],系统负荷为 2 630 MW。算法采用 C 语言编制,在 Pentium III 800 个人机器上运行通过。粒子个数均设为 20 个,迭代次数为 200 次,并且独立计算了 50 次。表 1 列出了 50 次计算中最优解所得到

的各机组的出力分配。表 2 列出了优化解的性能统计及与文献 [11] 的优化解的对比。从表中可以看出,本算法得到优化解显然更好,且收敛性和速度都有较大的提高。

表 1 本文算法得到的最优值

Tab 1 Best solution obtained by the proposed method

P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{14}	P_{15}	出力和	P_L	总费用 / \$
455	380	130	130	170	460	430	71.69	58.97	160	80	80	25	15	15	2 660.66	30.66	32 704.45

表 2 优化结果性能及比较

Tab 2 The quality and comparison of the solutions

算法	最好解 / \$	最差解 / \$	平均解 / \$	标准偏差 / \$	平均计算时间 / s
本文算法	32 704	32 708	32 705	1.05	0.49
PSO ^[11]	32 858	33 331	33 039	-	26.59

5 结论

本文提出的修补策略对违反各种约束条件的粒子进行了积极的修正,与罚函数技术相结合,使粒子尽可能地在可行解区域或其附近进行寻优搜索,有效地提高了算法的精度和速度。仿真实验的结果也清楚地表明了本算法的有效性和良好的收敛性。

本文对机组的发电成本函数采取的光滑的二次曲线形式,对于不光滑的二次曲线形式,本文的方法依然适用。当成本函数采用较为复杂的形式时,微增率的计算将相应地变得复杂,甚至可能无法求得精确值,此时完全可以用近似方法来求取,对算法的精度影响不大。

参考文献:

[1] Wood A J, Wollenberg B F. Power Generation Operation and Control[M]. New York: John Wiley, 1984.

[2] Fan J Y, Zhang L. Real-time Economic Dispatch with Line Flow and Emission Constrains Using Quadratic Programming[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13 (2): 320-325.

[3] Liang Z X, Glover D. A Zoom Feature for a Dynamic Programming Solution to Economic Dispatch Including Transmission Losses[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(2): 544-550.

[4] Su C T, Chiou G J. A Fast-computation Hopfield Method to Economic Dispatch of Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(4): 1759-1764.

[5] Walters D C, Sheble G B. Genetic Algorithm Solution of Economic Dispatch with Valve Point Loading[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(3): 1325-1332.

[6] Chen P H, Chang H C. Large-scale Economic Dispatch by Genetic Algorithm [J]. IEEE Trans on Power Sys-

tems, 1995, 10(4): 1919-1926

[7] Wong K P, Fung C C. Simulated Annealing Based Economic Dispatch Algorithm [J]. IEE Proceedings on Gener, Transm and Distrib, 1993, 140(6): 509-515.

[8] Sinha N, Chakrabarti R, Chattopadhyay P K. Evolutionary Programming Techniques for Economic Load Dispatch [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2003, 7(1): 83-94.

[9] Kennedy J, Eberhart R. Particle Swarm Optimization [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks Perth (Australia): 1995. 1942-1948.

[10] El-Gallad A, El-Hawary M, Sallam A, et al. Particle Swarm Optimizer for Constrained Economic Dispatch with Prohibited Operating Zones[A]. IEEE Conference on Electrical and Computer Engineering Canada: 2002. 78-81.

[11] Gaing ZW. Particle Swarm Optimization to Solving the Economic Dispatch Considering the Generator Constraints [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3): 1187-1195.

[12] 侯云鹤, 鲁丽娟, 熊信良, 等. 改进粒子群算法及其在电力系统经济负荷分配中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 95-100.

[13] 杨俊杰, 周建中, 吴玮, 等. 改进粒子群优化算法在负荷经济分配中的应用 [J]. 电网技术, 2005, 29(2): 1-4.

[14] Shi Y, Eberhart R C. Empirical Study of Particle Swarm Optimization[A]. Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation Piscataway: 1999. 1945-1950.

(下转第 39 页 continued on page 39)

- [11] 吕勇,李友荣,王志刚,等. 基于 OPC技术的设备远程监测与诊断系统[J]. 机械与电子, 2005, 10: 65-67.
L üYong, LI You-rong, WANG Zhi-gang, et al Remote Monitoring and Diagnosis System Based on OPC Technology[J]. Machinery & Electronics, 2005, 10: 65-67.
- [12] Swain N K, Anderson J A, Singh A. Remote Data Acquisition Control and Analysis Using Labview Front Panel and Real Time Engine[A]. Southeast Con 2003 Proceedings IEEE 2003. 1-6
- [13] 郑明慧. 基于 OPC技术的监控系统设计应用[J]. 电脑开发与应用, 2005, 18(10): 40-42.
ZHENG Ming-hui Design and Application of Supervision

and Control System Based on OPC Technology[J]. Computer Development & Applications, 2005, 18(10): 40-42

收稿日期: 2006-05-30; 修回日期: 2006-06-15

作者简介:

黄春光(1976-),男,工程师,从事电力设备监测系统的开发及应用; E-mail: huang_chunguang@sx.zpepc.com.cn
刘锋涛(1979-),男,助理工程师,主要从事电力设备在线监测方面的研究。

Application of the OPC technology in the electric power equipment inspect system

HUANG Chun-guang¹, LIU Feng-tao²

(1. Shaoxing Electric Power Bureau, Shaoxing 312000, China;

2. XJ Electric Company, Xuchang 461000, China)

Abstract: This paper introduces the OPC technical characteristics and its application in the electric power equipment inspect system. Server intelligent device which is used in the on-line monitoring diagnosis based on OLE/COM, the OPC can now be used in many aspects of industry control fields. With the development of OPC, its criterion evolves rapidly. This paper introduces the OPC's principle, instrument and method with the practical works. First, it explains the OPC technology in the control system and analyses its predominance used in empowering inspect system. Then, the way and the process of setting up OPC client / server are expounded to show that the OPC criterion has perfect after modifying. According to CBS2000 system, it points out that using OPC standard design supervisor and control system will improve the software development speed greatly and reduce the software maintenance work. It indicates that the on-line inspect system based on the OPC technology boosts up stability and reliability, even increases opening and compatibility. The OPC technology has a promising applicable future in the field of electric power equipment inspect system.

Key words: OPC; electric power equipment; OPC client / server; on-line inspect; system exploitation

(上接第 27 页 continued from page 27)

- [15] Hu X, Eberhart R C. Solving Constrained Nonlinear Optimization Problems with Particle Swarm Optimization[A]. Proceedings of the 2003 IEEE Conference on Swarm Intelligence Symposium. 2003. 53-57.

收稿日期: 2006-04-24; 修回日期: 2006-08-13

作者简介:

刘涌(1976-),男,博士研究生,研究方向为电力市场分析与智能计算; E-mail: yongliu888@163.com
侯志俭(1942-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力市场分析与电力系统运行;
蒋传文(1966-),男,博士,副教授,研究方向为电力系统优化运行与控制、智能计算。

Economic dispatch by a modified particle swarm optimization algorithm

LIU Yong, HOU Zhi-jian, JIANG Chuan-wen

(Dept of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: A modified particle swarm optimization algorithm is proposed to solve the economic dispatch problems in power systems. Many constraints such as ramp rate limits and prohibited zones are taken into account. The loss is also calculated. Based on PSO algorithm, a new repair strategy is provided to handle the constraints and make sure the particles to satisfy the constraints. Combined with penalty functions, the strategy can guarantee the particles to search in or around the feasible solutions area. The accuracy and speed of the algorithm are improved because the particles will rarely search in the infeasible solutions area. Simulated results show that the algorithm has fast speed, high accuracy and good convergence.

Key words: power system; economic dispatch; particle swarm optimization algorithm; repair strategy; penalty functions