

AGC 机组调配经济性的混沌遗传算法研究

李媛媛, 宋永华, 魏少岩

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: AGC 问题是互联电力系统经济有效运行的核心问题。以 AGC 机组的能耗费用最低为目标函数, 提出了一种新的优化调配方法——混沌遗传算法。在遗传进化的过程中, 引入混沌变量, 维持群体中染色体的多样性, 以克服遗传算法中的早熟问题, 改善全局收敛性, 提高计算速度。通过对某地区几个电厂的机组进行仿真计算, 将结果与遗传算法得到的结果进行比较, 表明混沌遗传算法应用于 AGC 机组的优化调度是合理可行的。

关键词: 混沌优化; AGC 机组; 优化调度; 混沌遗传算法

Research of chaos genetic algorithm on AGC units dispatchment

LI Yuan-yuan, SONG Yong-hua, WEI Shao-yan

(Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: AGC has become the core issues of economical and effective operation of the interconnected power system. The objective function in this paper is the lowest energy cost of AGC units. A novel method of allotment optimization is presented in this paper—chaos genetic algorithm. A new operator called chaos variables is introduced to the evolution process of GA to keep the diversity of chromosome. The algorithm solves the problem of prematurity in GA, ensures global convergence and improves the speed of computation and convergence. A simulation is performed on some units in several power plants. Compared with the results of GA, it shows the chaos genetic algorithm is reasonable and feasible.

Key words: chaos optimization; AGC units; allotment optimization; chaos genetic algorithm

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)14-0017-05

0 引言

电力市场的建立给 AGC 机组的运行调配提出了新的要求, 在电力市场环境下, 互联电力系统的 AGC 已经从纯粹的控制领域发展到控制和经济相结合的领域。在研究中, AGC 机组的组合模型多数以在满足多种约束条件下, 使 AGC 机组的使用费用最低为目标函数^[1]。也有学者考虑到机组提供的 AGC 辅助服务的费用, 将购电费用作为机组组合的目标函数^[2]。目前为达到经济运行, 对 AGC 机组进行最优组合所采用的算法主要有启发式算法、动态规划法、整数规划法, 遗传算法等。启发式算法主要依靠直观判断或实际调度的经验寻找最优解, 计算量小但不能保证获得最优解^[3]。动态规划法可以计及机组的启停费用, 但对于机组较多的电力系统, 组合的状态数很多, 必须对其进行简化^[4]。整数规划法是建立在机组一旦参调就以最大调节容量进行调节的假设基础上的, 当调节容量不是固定值时,

所得到的解可能不是最优的。文献[1]采用遗传算法求解 AGC 机组的优化调配问题, 但遗传算法存在计算量大、过早收敛和在优化点附近收敛慢等问题。

本文将混沌优化引入到遗传算法中, 用混沌遗传算法对 AGC 机组的调配问题进行求解, 利用混沌搜索全局最优解, 使得优化调度问题的收敛速度和效率与常规的遗传算法相比, 有了显著的提高。

1 AGC 机组调配的数学模型

1.1 机组调配的目标函数

对于机组调配问题, 可以根据不同的需要建立不同的数学模型。实行电力市场后, 系统调度员应以系统各发电机组的开停状态和出力变化为控制变量, 在满足系统负荷备用要求、线路潮流限制及机组爬坡速率、最小开停机时间、燃料总量等约束条件下, 使开停机费用和运行费用之和最小。设 n 为待参调的 AGC 机组数量, 则在某一时刻机组调配的目标函数可以表示为:

$$\min \sum_{i=1}^n (C_i(p_{Gi}) + C_{STCi} + C_{SDUi}) \quad (1)$$

式中: p_{Gi} 是指 AGC 机组 i 的调节容量, 为某一实数闭区域内的连续变量; $C_i(p_{Gi})$ 为当第 i 台机组的调节容量为 p_{Gi} 时, 其单位时间所需的能源耗量费; C_{STCi} 和 C_{SDUi} 为开停机成本, 可为常数。

发电机耗量曲线常用发电机有功功率的二次函数近似表示, 即

$$C_i(p_{Gi}) = a_i p_{Gi}^2 + b_i p_{Gi} + c_i \quad (2)$$

式中: a_i, b_i, c_i 为常数, b_i 为 AGC 机组 j 对应于基点出力的当日各点发电报价的平均值(元/(MW·h))。一般常数 a_i 的数量级较小, 而 b_i 的数值较大, 故含有 a_i 的二次项 $a_i p_{Gi}^2$ 和常数项 c_i 相对于一次项 $b_i p_{Gi}$ 来讲可以忽略不计。故为简化计算, 将参调机组的能耗函数取为机组出力的一次函数, 且进一步忽略开停机费用对目标函数极值的影响, 故将机组调配的目标函数简化为:

$$\min \sum_{i=1}^n S_i b_i p_{Gi} \quad (3)$$

式中: S_i 是指 AGC 机组 i 的参调状态变量, 为整数 0 或 1, 0 表示停运, 1 表示运行。

1.2 约束条件

1) 负荷约束

$$\sum_{i=1}^n S_i p_{Gi} \geq P_D \quad (4)$$

式中: P_D 是某一时刻系统所要求的目标容量; p_{Gi} 是第 i 台机组的调节容量。

2) 响应速度约束

$$\sum_{i=1}^n V_i S_i \geq V_R \quad (5)$$

式中: V_R 为某一时刻系统要求的机组响应速率; V_i 是第 i 台机组的响应速率。

3) 发电能力约束

$$P_{iMin} \leq p_{Gi} \leq P_{iMax} \quad (6)$$

式中: P_{iMin} 和 P_{iMax} 是指第 i 台机组的调节容量上下限(MW)。

2 混沌遗传算法

2.1 遗传算法在机组调配中的应用

由于在系统调峰调频的过程中, AGC 机组的调节容量是可变的, 故采用整数规划法等方法不易得出最优解。这种情况下, 可将 AGC 机组的调配问题描述为: 如何确定参调机组和参调机组的调节容量, 使选中的机组既能满足系统调节速率和调节容量的要求, 又能实现调节费用最小的目标。从以上描述中可以看出这是一个非线性的整数规划问题, 而遗传算法在解决非线性问题上有很多优势。

遗传算法是由美国 Michigan 大学的 Holland 教授提出的, 是一种模拟自然界遗传选择和适者生存的生物进化过程的随机搜索算法。遗传算法采用多路径搜索, 可以方便地处理离散变量, 用目标函数本身建立寻优方向, 无需求导和求逆等复杂的数学操作。目前, 许多学者已经将遗传算法成功地应用到 AGC 机组的优化调配研究中。

但是, 遗传算法是一类随机搜索型算法, 其计算效率比较低, 收敛速度比较慢, 而且容易导致过早收敛。基于遗传算法存在的上述缺点, 本文在遗传进化过程中引入混沌优化算子, 以维持群体中染色体的多样性, 有效地克服了算法的早熟现象。

2.2 混沌优化与遗传算法的结合

所谓混沌是指由确定性方程得到的具有随机性的运动状态。由于混沌同时具有随机性和规律性, 所以它具有丰富的时空状态。最重要的是, 混沌的遍历性特点可以作为搜索过程中避免陷入局部最优的一种优化机制。另外, 混沌对初值变化具有强烈的敏感性。利用上述两点, 人们提出了一些混沌优化算法, 这些算法易跳出局部解, 计算效率高, 弥补了遗传算法的缺陷。混沌优化算法是一种新型搜索算法, 其基本思想是把变量从混沌空间变换到解空间, 然后利用混沌变量具有遍历性、随机性和规律性的特点进行搜索。

我们将混沌优化与遗传算法结合起来, 主要采取以下两点措施:

(1) 初始种群的混沌生成。标准遗传算法中, 随机生成的初始种群有相当大一部分的个体是远离最优解的, 这样就限制了算法的求解效率。利用混沌的遍历性进行粗粒度全局搜索, 往往会获得比随机搜索更好的效果, 以此来提高初始种群个体的质量和计算效率。

(2) 优秀个体的混沌优化。利用混沌进行细粒度局部搜索, 提高解的精度。选取遗传操作后种群中适应度较高的部分个体(一般取 10%左右), 对这部分优秀个体进行微小混沌扰动并随着搜索过程的进行自适应地调整扰动幅度, 以此进一步优化优秀个体的品质, 引导种群快速进化。

2.3 混沌遗传算法应用设计

本文应用混沌遗传算法进行 AGC 机组优化调配的具体流程图如图 1 所示, 下面将对各部分模块的设计加以详细地阐述。

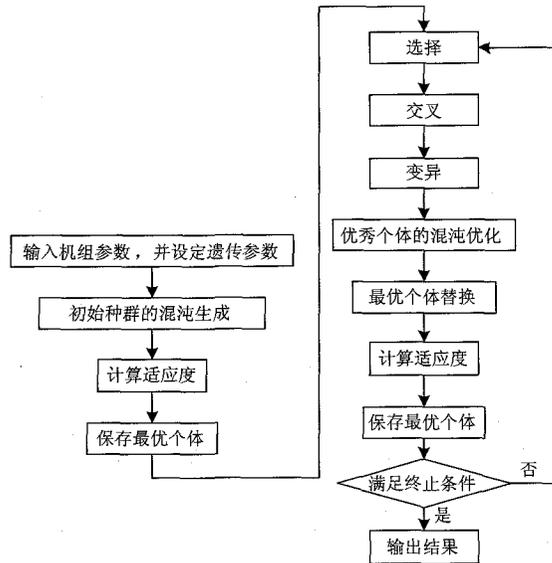


图 1 混沌遗传算法应用于 AGC 机组优化调配的流程图

Fig.1 Flow chart of chaos genetic algorithm applied to AGC units dispatchment

(1) 编码设计

由于 AGC 机组的优化调度问题中, 决策变量既有整型, 又有实型, 为提高搜索效率, 故采用混合编码法。对所有整形变量, 即 AGC 机组出力的状态位, 用二进制编码; 而对所有实型变量, 即 AGC 机组出力的容量位, 采用实数直接编码。

(2) 适应度函数设计

本课题在适应度函数的设计中引入了罚函数, 从而把约束条件下的优化问题转化为非约束问题。罚函数的设计如下:

$$b(x) = \begin{cases} \text{const_value} & \text{其他} \\ 0 & \sum_{i=1}^n V_i S_i \geq V_R \quad \sum_{i=1}^n S_i P_{Gi} \geq P_D \end{cases} \quad (7)$$

式中: const_value 是当染色体的状态码全为 1, 容量全为满发时所需支付的 AGC 机组调节费用。

(3) 初始种群的混沌生成

常用的混沌模型是“虫口模型”, 即一维 Logistic 映射。其数学模型如下:

$$x_{k+1} = \mu x_k (1 - x_k) \quad (8)$$

式中: μ 为控制参数, 当 $\mu = 4$ 时, 该系统没有稳定解, 是 $[0, 1]$ 区间的满映射, 呈现出完全混沌的状态。

对式 (8) 中的 x_k 分别赋予 m (m 为所有竞价参调机组的数目) 个不同的初值, 产生 m 个不同轨迹的混沌变量。并将混沌变量分别映射到二进制编码和机组出力的取值范围内。对混沌变量构成的每一个可行解计算其适应度, 选择适应度较高的 N 个 (N 为种群规模) 个体组成新的种群参加下一代进化。在初始种群的混沌生成过程中, 为了保证混沌变量能充分地遍历, 混沌序列应取足够的迭代次数, 一般取 400 左右较合适。

(4) 交叉算子设计

由于采用混合编码方法, 每一染色体分为两个基因段。一个基因段对应 AGC 机组出力的状态位, 所有码值均为二进制字符; 另一个基因段对应 AGC 机组出力的容量位, 所有码值均为实数。在搜索过程中, 整型变量的变化是离散的, 而实型变量的变化是连续的。故对每个染色体的整型段和实型段以不同的交叉概率 P_{c1} 、 P_{c2} 分别作交叉运算。

(5) 变异算子的设计

由于采用混合编码, 故变异也应该分开进行。两部分变异率的取值也有所不同。二进制编码采用基本位变异操作, 变异率 P_{m1} 一般取值为 0.001~0.1。对实数编码, 采用改进的高斯变异法, 其变异率 P_{m2} 的取值较大, 一般为 0.2~0.5。

(6) 优秀个体的混沌优化

在混沌优化的过程中, 只对优秀个体的容量位进行扰动, 状态位则保持不变。优化过程中的混沌变量采用文献[5]提供的一类在有限区域范围内折叠次数无限的一维迭代混沌自映射:

$$t_{n+1} = \sin(2/t_n) \quad n = 0, 1, \dots \quad (9)$$

式中: $t_n \in [-1, 1]$ 且 $t_n \neq 0$ 。

设 $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ 为进化过程中某代群体中的一个优秀个体, 对其每一分量按照下式进行混沌扰动。

$$x_{k,j}^* = x_j + \alpha \times t_{k,j} \quad 1 \leq j \leq m \quad (10)$$

式中: k 为混沌迭代次数, α 为与迭代次数 k 有关的比例系数, $\alpha = 1 - \left| \frac{k-1}{k} \right|^m$, m 为一正整数, 依目标函数而定。

对于固定的 k , $x_k^* = [x_{k,1}^*, x_{k,2}^*, \dots, x_{k,m}^*]$ 都可以

构成一个可行解。对每一个可行解计算其适应度，若新个体适应值大于原个体，则替换原个体，否则保持原个体不变。

3 算例分析

为了说明本算法的优越性，分别用标准遗传算法（SGA）以及混沌遗传算法（CGA）对东北局几个电厂的机组进行了优化调配计算。算例中机组的调节参数和报价如表 1 所示。

表 1 AGC 机组的调节参数及价格表

Tab.1 The adjustment parameters and quote of the AGC units

机组 序号	V_i (MW /min)	P_{iMin} /MW	P_{iMax} /MW	b_i (元/MWh)
1	5	17	34	126.7
2	5	17	34	126.7
3	5	17	34	126.7
4	6	17	34	126.7
5	5	17	34	126.7
6	5	17	34	126.7
7	4	17	34	196.87
8	4	27.5	55	196.945
9	4	27.5	55	278.05
10	2	27.5	55	293.995
11	4	27.5	55	264.82
12	3	28	56	210
13	2	28	56	127.09
14	3	18	36	127.04
15	3	18	36	127.04

电网某时间片的系统响应要求为：

$$P_D = 133 \text{ MW}, V_R = 33 \text{ MW/min}.$$

运行参数设置：标准遗传算法中，种群规模 $M=30$ ，交叉率 $P_c=0.9$ ，变异率 $P_m=0.001$ 。混沌遗传算法中，种群规模 $M=30$ ，交叉率 $P_c=0.9$ ，变异率 $P_m=0.001$ ，生成初始种群时迭代次数为 400，优秀个体混沌优化时的迭代次数为 50。文中对标准遗传算法和混沌遗传算法在收敛效果和收敛速率这两个方面分别进行比较。在收敛效果方面，使两种算法在足够长的遗传代数（200 代）下进化，比较其最终得出的最优解。在收敛速率方面，则比较两种算法在相同的最优个体保留代数（50 代）下的计算时间。考虑到两种算法的随机搜索性，导致每次结果可能不同，因此，本文对两种算法都进行了 20 次计算，取其平均值进行比较分析。表 2 和表 3 分别列出了在相同的遗传代数下（200 代）和相同的最优个体保留代数（50 代）下，标准遗传算法和混沌遗传算法在 AGC 机组优化调配时的优化效果和计算时间。

表 2 标准遗传算法和混沌遗传算法的最优解

Tab.2 The optimal solution of SGA and CGA

算法类型	最优解的平均值 /元	平均计算时间 /s	收敛到最优 解的次数
标准遗传算法	2.656×10^4	19.0219	9
混沌遗传算法	2.3634×10^4	7.0773	17

注：表中“收敛到最优解的次数”指各种方法独立运行 20 次，可以得到最优解（设定费用 $< 2.6 \times 10^4$ 元的解为最优解）的次数。

由表 2 可知，经过足够长的遗传代数（200 代）后，混沌遗传算法得出的最优解明显优于标准遗传算法，收敛到全局最优解的概率提高了 0.89 倍。且在保证更优解的情况下，收敛速度也大大提高。

表 3 标准遗传算法和混沌遗传算法的计算时间

Tab.3 Calculation time of SGA and CGA

算法类型	平均计算时间 /s	最优解的平均 值/元	收敛到最优 解的次数
标准遗传算法	5.007	2.7063×10^4	10
混沌遗传算法	1.9461	2.3817×10^4	17

注：表中“收敛到最优解的次数”指各种方法独立运行 20 次，可以得到最优解（设定费用 $< 2.6 \times 10^4$ 元的解为最优解）的次数。

由表 3 可知，在相同的最优个体保存代数（50 代）下，混沌遗传算法的收敛速度明显高于标准遗传算法，计算速度提高了 1.57 倍。且其得出的最优解更优，收敛概率也大大提高。

对比分析两种算法的计算结果可知，混沌遗传算法在每一代遗传运算时，使种群中适应值最大的那几个个体，特别是最优个体不断变优，来引导种群的进化。这种算法的搜索始终存在前进的动力，更易跳出局部解。并且在当前最优解的区域内很快求得另一更优解。因此，混沌遗传算法具有更快的寻优速度，从而可以提高计算效率，节省计算时间。算例结果验证了混沌遗传算法的实用性和有效性。

4 结论

本文在常规的遗传算法 AGC 机组优化调度中引入了混沌优化，在优化过程中不断缩小优化变量的搜索空间，提高了优化变量的搜索精度，提高了搜索效率和全局寻优能力。文中提出的混沌遗传算法简单易用，编程方便，能够有效地克服遗传算法易陷入局部最优和收敛速度慢的缺点。算例表明该方法具有很强的实用性和有效性。但本文中机组模型较为简单，且没有考虑线路潮流的约束条件，这将是下一步需要研究的重点。

参考文献

- [1] 李卫东, 吴海波, 等. 电力市场下 AGC 机组调配的遗传算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (15): 20-24.
LI Wei-dong, WU Hai-bo, et al. Application of Genetic Algorithm to AGC Service Dispatch in a Deregulated Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (15): 20-24.
- [2] 谢亮. 考虑 AGC 的机组组合问题研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2005.
- [3] Baldwin C J. A Study of the Economic Shutdown of Generation Unit in Daily Dispatch[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1959, 78: 1272-1284.
- [4] Lower P G. Generation Unit Commitment by Dynamic Programming[J]. IEEE Trans on PAS, 1966, 85 (5): 422-430.
- [5] 张建雄, 唐万生. 基于混沌遗传算法的一类非线性两层混合整数规划问题求解[J]. 系统工程理论方法应用, 2005, 14 (5): 429-433.
ZHANG Jian-xiong, TANG Wan-sheng. Chaos Genetic Algorithm Method for a Class of Nonlinear Bilevel Mixed Integer-programming Problem[J]. Systems Engineering-Theory Methodology Applications, 2005, 14 (5): 429-433.
- [6] 张倩茅, 周明, 等. 用于 AGC 容量预测和机组选择的动态统一模型及方法[J]. 电网技术, 2005, 29 (11): 46-50.
ZHANG Qian-mao, ZHOU Ming, et al. Dynamical Unified Model and Approach for AGC Capacity Forecasting and Unit Selection[J]. Power System Technology, 2005, 29 (11): 46-50.
- [7] 蒙文川, 邱家驹, 卞晓猛. 电力系统经济负荷分配的人工免疫混沌优化算法[J]. 电网技术, 2006, 30 (23): 41-44.
MENG Wen-chuan, QIU Jia-ju, BIAN Xiao-meng. Artificial Immune Algorithm Integrated with Chaotic Optimization for Economic Dispatch of Power System[J]. Power System Technology, 2006, 30 (23): 41-44.
- [8] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程设计[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [9] 邹恩, 李祥飞, 陈建国. 混沌控制及其优化应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002.
- [10] 娄素华, 吴耀武, 熊信良. 电力系统无功优化的变尺度混沌优化算法[J]. 电网技术, 2005, 18 (5): 20-24.
LOU Su-hua, WU Yao-wu, XIONG Xin-yin. Mutative Scale Chaos Optimization Algorithm for Reactive Power Optimization of Power System[J]. Power System Technology, 2005, 18 (5): 20-24.
- [11] 蔡兴国, 初壮. 用遗传算法解算机组组合的研究[J]. 电网技术, 2003, 27 (7): 36-39.
CAI Xing-guo, CHU Zhuang. Unit Commitment Based on Genetic Algorithms[J]. Power System Technology, 2003, 27 (7): 36-39.

收稿日期: 2007-11-19; 修回日期: 2008-01-04

作者简介:

李媛媛 (1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力市场、电力系统优化规划等, E-mail: 06121852@bjtu.edu.cn
宋永华 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力市场、电力规划等;
魏少岩 (1977-), 男, 博士后, 研究方向为电力市场、电力规划等。

(上接第 3 页 continued from page 3)

3.2.2 零序过压保护二段

测量电压 $U_j = 3U_0$ 。

零序过压保护二段的过压判据采用传统的判据, 为:

$$\begin{cases} U_{set} = K_k U_{umb} \\ U_j \geq U_{set} \end{cases} \quad (8)$$

式中: U_{umb} 为发电机正常运行时, 发电机出口最大的 3 倍零序电压 (即不平衡电压); K_k 为可靠系数, 取 1.15~1.2。

零序过压保护二段经长延时 (0.5~2 s) 出口发信号。

参考文献

- [1] 李德佳, 毕大强, 王维俭. 大型发电机注入式定子单相接地保护的调试和运行[J]. 继电器, 2004, 32 (16): 54-59.

LI De-jia, BI Da-qiang, WANG Wei-jian. Adjustment and Operation of Injection Voltage Scheme Against the Stator Single-phase-to-ground Fault of Large Generators[J]. Relay, 2004, 32(16): 54-59.

- [2] 华北电力学院. 电力系统故障分析[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1989.

收稿日期:

作者简介:

姚晴林 (1931-), 男, 许继电气公司高级技术顾问, 合肥工业大学离休教授, 从事电力系统继电保护研发工作;
郭宝甫 (1973-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护研发工作;
解波 (1971-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护及自动化运行维护及管理工作。