

# 基于粒子群优化算法的 AGC 机组调配研究

王亚军, 房大中

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 电力市场下 AGC 机组的调配问题是辅助服务领域中的一个重要研究内容。提出了一种基于粒子群优化算法的 AGC 机组调配方案。该方法基于 AGC 机组调配的数学模型, 考虑了机组调节容量, 调节速率等约束条件。介绍了算法的基本原理, 并分析了参数的不同取值对算法收敛性的影响。实际系统的算例表明, 利用粒子群优化算法, 不仅可以克服整数规划法可能得不到最优解的缺点, 而且与遗传算法比较具有收敛性好, 收敛速度快的优点, 从而为 AGC 机组的调配问题提供了一种新的有效算法。

**关键词:** 电力市场; 自动发电控制; 粒子群优化算法; 机组调配

## Research on AGC unit dispatch based on particle swarm optimization algorithm

WANG Ya-jun, FANG Da-zhong

(School of Electrical and Automation Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The problem of AGC unit dispatch is an important research aspect in auxiliary service of power market. A new AGC unit dispatch method is developed using the particle swarm optimization (PSO) algorithm. Constraints of the AGC unit regulating capacity and regulating speed are considered in the AGC dispatch model. The principle of PSO is introduced and the influence of parameter setting on its convergence speed is analyzed. The PSO algorithm could overcome the shortcoming in using the integer programming method. Compared with the genetic algorithm, the PSO algorithm has good convergence and high convergence speed. Case studies on a realistic system show that the PSO is effective in solving the problem of AGC unit dispatch.

**Key words:** electricity market; automatic generation control(AGC); particle swarm optimization algorithm; unit dispatch

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)17-0058-04

## 0 引言

自动发电控制 (AGC) 是电力市场辅助服务的一个重要组成部分, 对电力系统的安全稳定运行至关重要<sup>[1,2]</sup>。AGC 的主要任务是在电力系统的负荷随机变化时调整发电出力, 从而实现以下功能: ①维持电力系统的频率在允许范围内; ②维持和控制联络线上的交换功率在一定的范围内; ③分配发电出力, 使每台机组合理地带负荷。在市场化以前, 由于具备 AGC 能力的机组不多, 为了保证电网的安全稳定运行, 几乎让所有具备 AGC 能力的机组都无偿参与调节, 并按机组装机容量分摊全网 AGC 调节容量。随着开放电力市场, 引入竞争机制, 具备 AGC 能力机组的增加, AGC 作为一种重要的辅助服务, 也要参与市场竞争。为此, 如何根据实际运行条件

选择合理的 AGC 机组成为交易计划制定的一项重要内容。

电力市场下, 对 AGC 机组的调配问题, 传统的优先顺序法对 AGC 机组选择时更多的考虑了调节速率等性能指标, 而忽略了容量报价因素, 结果可能导致报价较高的机组成为边际机组, 抬高了市场清算价格, 增加了容量购置费用。文献[3]对优先顺序法进行了改进, 对市场中的 AGC 机组按其性能价格比确定优先权顺序, 然后依次选取机组参与电网 AGC, 直至 AGC 容量满足系统需求。文献[4]考虑了容量在实时市场中被调用的概率, 提出了一种新的概率因子  $x$  的确定方法, 然后根据报价  $P_{it} + x_i P_{di}$  进行排序, 选择 AGC 机组。文献[5]针对利用整数规划法选择 AGC 机组所得到的结果可能不是最优解, 提出了采用遗传算法对 AGC 机组进行调配的方案, 但是当 AGC 机组数目较大时, 算法耗时较大。

粒子群优化算法 (PSO) 是近年来刚刚发展起来的一种新的智能优化算法。PSO 最初是由 Kennedy

基金项目: 教育部博士点基金支持项目 (06D0006)

和 Eberhart 博士于 1995 年受人工生命研究结果启发, 在模拟鸟群觅食过程中的迁徙和群集行为时提出的一种基于群体智能的演化计算技术<sup>[6~8]</sup>。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”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。PSO 算法一经提出, 立刻受到了进化计算研究者的广泛关注, 并在函数优化、聚类、模式识别、预测理论中获得了广泛应用。在电力系统中, PSO 算法已成功应用于求解机组组合、无功优化、电网扩展规划以及负荷经济分配等研究领域。本文将 PSO 算法引入电力市场下 AGC 机组的优化组合中, 并将结果与传统的整数规划法进行了比较。算例表明, 该方法可以找到全局最优解, 而且同遗传算法相比较既避免了复杂的参数设置, 又具有较快的收敛速度。

## 1 电力市场下 AGC 机组调配的数学模型

随着社会主义市场经济的发展, 我国的电力工业体制也孕育着一场深刻的变革, 正逐步由计划经济体制下的独家垄断经营转变为市场经济下的商业化运营。电力工业体制改革之前, 具有 AGC 调节能力的电厂归属各省网电力调度局统一调度。在实时电力系统的运行中, 当频率或联络线交换功率在控制范围内波动时, 调度人员直接命令所属 AGC 电厂投入, 进行快速调节。在这种情况下, 不存在 AGC 机组的选择问题。然而当前正在进行的电力工业体制改革, 是要引入市场竞争, 打破电力系统发电、输电、配电垂直一体化的垄断格局。发电公司已成为独立的经济实体, 发电公司向电力调度交易中心提供的各种辅助服务也由以前的无偿提供变为有偿提供。

电力市场建立后, 电网 AGC 的目标也发生了相应的改变, 从参与电网 AGC 的发电机组发电成本最低, 转变为在保证安全、可靠、及时地调节频率(或区域控制偏差 ACE)的前提下, 使得电力调度交易中心 (ISO) 向电厂支付的 AGC 辅助服务费用达到最小<sup>[9,10]</sup>。

在选择合理的 AGC 机组问题上, 电力调度交易中心应本着公平、公开、公正的市场经济原则, 对各发电公司的每份投标进行认真评价和确认, 按市场需求选择合理的 AGC 机组, 形成一个既透明又有效的竞争环境, 一方面促进发电公司积极参与 AGC 辅助服务市场的竞争, 另一方面通过市场竞争, 最优化配置发电资源, 更好的保证电力系统运行的安全性。

### 1.1 目标函数

对于 AGC 机组的调配问题, 其目标函数如下:

$$\min \sum_{j=1}^n C_j S_j X_j \quad (1)$$

式中:  $C_j$  为 AGC 机组  $j$  对应于基点出力的当日 48 点发电报价的平均值 (元/MW·h);  $S_j$  为 AGC 机组  $j$  的 AGC 调节容量 (MW);  $X_j$  为整数 (其值为 0 或 1, 0 表示未被指定参与 AGC 调节, 1 表示被指定参与 AGC 调节)。

### 1.2 约束条件

AGC 机组调节容量约束:

$$\sum_{j=1}^n S_j X_j \geq S_{AGCmax} \quad (2)$$

式中:  $S_{AGCmax}$  为系统所需的 AGC 调节容量 (MW)。AGC 机组调节速率约束:

$$\sum_{j=1}^n V_j X_j \geq V_{AGCmax} \quad (3)$$

式中:  $V_j$  为 AGC 机组  $j$  的调节速率 (MW/min);  $V_{AGCmax}$  为系统所需的 AGC 调节速率 (MW/min)。

每台 AGC 机组调节容量上下限约束:

$$S_{jmax} \geq S_j \geq S_{jmin} \quad (4)$$

其中:  $S_{jmax}$  和  $S_{jmin}$  分别为 AGC 机组  $j$  的调节容量的上、下限 (MW)。

上述数学模型中: 式(1)表示被选定 AGC 机组的调节费用最低; 式(2)表示所有被选定 AGC 机组的调节容量之和大于需求值; 式(3)表示所有被选定 AGC 机组的调节速率之和大于需求值; 式(4)表示 AGC 机组的调节区间限制。

## 2 粒子群优化算法的实现

### 2.1 算法原理

PSO 算法是一种现代启发式算法<sup>[11,12]</sup>, 它是通过模拟简单的社会现象发展起来的。和早期的基于群体进化的算法相比, PSO 算法在计算速度和消耗内存上有较大优势, 因为它的实现只需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。PSO 算法作为一种模拟社会行为的随机全局优化算法, 具有如下特征: 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。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的位置, 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。

令  $D$  表示搜索空间的维数,  $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}]^T$  表示粒子  $i$  当前的位置,  $p_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}]^T$  表示粒子  $i$  曾经达到的最好位置, 种群中最优粒子的序号用  $g$  表示,  $v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}]^T$  表示粒子  $i$  的速度, 则每个粒子根据式 (5) 来更新自己的速度和位置:

$$\begin{cases} v_{id}^{k+1} = \omega v_{id}^k + c_1 r_1 (p_{id}^{\text{best}} - x_{id}^k) + c_2 r_2 (g_d^{\text{best}} - x_{id}^k) \\ x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \end{cases} \quad (5)$$

$(i=1, 2, \dots, n; d=1, 2, \dots, D)$

式中,  $k$  表示迭代次数;  $n$  表示粒子群规模;  $c_1$ 、 $c_2$  为权重因子;  $r_1$ 、 $r_2$  是区间  $[0, 1]$  上的随机数;  $\omega$  为惯性权重;  $v_{id}^k$ 、 $x_{id}^k$  表示  $v_{id}$ 、 $x_{id}$  的第  $k$  次迭代值;  $p_{id}^{\text{best}}$  表示粒子  $i$  的个体极值点位置,  $g_d^{\text{best}}$  表示整个群体全局极值点位置。为防止粒子远离搜索空间,  $v_{id}$  要限制在  $[-v_{d\max}, +v_{d\max}]$  之间。每一维都用相同的设置方法。粒子通过不断学习更新, 最终飞至解空间中最优解所在的位置, 搜索过程结束, 最后输出的  $g^{\text{best}}$  就是全局最优解。

## 2.2 PSO参数分析和设置

利用PSO进行AGC机组调配时, 在确定了粒子的表达形式、目标函数以及约束条件后, 为了加快算法的收敛速度, 粒子的参数设置很重要。本文粒子群中粒子个数设为20。惯性权重  $\omega$  对算法的搜索能力和收敛速度影响很大, 因为  $\omega$  能够起到维护全局和局部搜索能力平衡的作用。这样当  $v_{d\max}$  增加时, 可以通过减小  $\omega$  来达到平衡的搜索, 而  $\omega$  的减小也可使得所需的迭代次数变小。对全局搜索, 通常有一个好方法, 即在前期有高效的搜索能力以得到合适的粒子, 而在后期有高效的收敛能力以加快收敛速度。为此可将  $\omega$  设为随迭代次数线性减小, 即

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{g_{\max}} g^k \quad (6)$$

式中,  $\omega_{\max}$  为初始惯性权重;  $\omega_{\min}$  为最后惯性权重;  $g^k$  为当前代数;  $g_{\max}$  为总的迭代次数。经过试验验证取  $\omega_{\max} = 0.9$ ,  $\omega_{\min} = 0.4$ ,  $g_{\max} = 500$ 。 $\omega$  从0.9到0.4线性下降, 使得PSO在开始时探索较大的区域, 较快地定位最优解的大致位置, 随着  $\omega$  逐渐减小, 粒子速度减慢, 开始精细的局部搜索。该方法加快了收敛速度, 提高了PSO算法的性能。

权重因子  $c_1$ 、 $c_2$  对PSO的收敛性也起了重要的作用, 分别代表粒子飞向个体最优解和全局最优解

的加速权重。如果  $c_1 = 0$ , 则就不存在粒子自身飞行经验, 这种情况下收敛速度可能会很快, 但对于复杂问题, 会陷入局部最优的情况; 如果  $c_2 = 0$ , 就不存在群体中其他粒子飞行经验, 这样即便种群规模  $N$  再大, 也只是一些单个的个体行为, 缺乏相互联系, 很难找到最优解。 $c_1$ 、 $c_2$  值的选取是在试验的基础上得出的, 根据一般的经验,  $c_1$ 、 $c_2$  设定为1.5: 2.0。本文取  $c_1 = c_2 = 2.0$ 。

## 2.3 算法的实现步骤

PSO算法的计算流程如下:

(1) 随机初始生成每个粒子的位置  $x_i^0$  和速度  $v_i^0$ , 并将每个粒子的原始位置设置为初始的  $p^{\text{best}}$  和  $g^{\text{best}}$ 。

(2) 根据目标函数, 计算粒子的适应值, 如果优于初始的  $p^{\text{best}}$  和  $g^{\text{best}}$ , 则用该值替换。

(3) 根据式(5)更新每个粒子的速度和位置。判断各变量是否越限。如果高于其上限值, 或低于其下限值, 则用相应的边界值替换。

(4) 检查结束条件, 若达到最大的迭代次数或要求的最优解条件, 则终止迭代; 否则, 转到步骤(2)继续迭代。

## 3 算例分析

以实际某系统为例, 用本文所提方法, 编写了相应的计算程序, 对其进行AGC调配计算。该系统参数如表1所示。

表1 可用AGC机组调节参数和报价

Tab.1 Parameters and bids of available AGC units

机组序号	调节速率/ (MW·min <sup>-1</sup> )	调节容量		标价/ (元·(MWh) <sup>-1</sup> )
		下限/ MW	上限/ MW	
A	5	17.0	34	126.7
B	5	17.0	34	126.7
C	5	17.0	34	126.7
D	6	17.0	34	126.7
E	5	17.0	34	126.7
F	5	17.0	34	126.7
G	4	17.0	34	196.9
H	4	27.5	55	196.9
I	4	27.5	55	127.0
J	2	27.5	55	293.9
K	4	27.5	55	264.8
P	3	28.0	56	210.0
Q	2	28.0	56	127.1
R	3	18.0	36	130.0
S	3	18.0	36	130.0

系统对AGC调节容量和调节速率的要求为:

$S_{\text{AGCmax}} = 133 \text{ MW}$ ,  $V_{\text{AGCmax}} = 33 \text{ MW/min}$ , 则利用本文所提方法与采用整数规划法所得到的结果如表2所

示。PSO 算法所得结果是在相同条件下连续计算 10 次所得的最优值。

表 2 AGC 机组调配结果

Tab.2 Results of the AGC service selection

机组序号	PSO 算法		整数规划	
	参调机组调节容量/MW	机组选择结果	参调机组调节容量/MW	机组选择结果
A	20.560	1	34	1
B	17.000	1	34	1
C	17.000	1	34	1
D	17.000	1	34	1
E	17.000	1	34	1
F	17.000	1	34	1
G	0.000	0	0	0
H	0.000	0	0	0
I	27.500	1	0	0
J	0.000	0	0	0
K	0.000	0	0	0
P	0.000	0	0	0
Q	0.000	0	0	0
R	0.000	0	0	0
S	0.000	0	36	1

注: 机组选择结果中, 1 代表参与 AGC 机组调节, 0 代表不参与。

表 3 PSO 算法、遗传算法与整数规划结果比较

Tab.3 Comparison of the results by PSO algorithm, genetic algorithm and integer complex methods

方法	调节容量 总和/MW	调节速率总和/ (MW·min <sup>-1</sup> )	总费用/ (元·h <sup>-1</sup> )
PSO 算法	133.06	35	16 867.0
遗传算法	133.08	35	16 870.2
整数规划	240.00	34	30 526.8

表 3 为三种方法优化结果比较。通过比较数据, 可以发现:

1) 整数规划法所得到的调整容量远大于需求值, 所需费用也最大, 采用 PSO 算法可以避免整数规划所存在的问题, 并且找到最优解。

2) 运用 PSO 算法所得的结果几乎等价于采用遗传算法所得结果, 但在计算时间上却优于遗传算法。而且同遗传算法相比, PSO 算法编程简单, 收敛性强, 可以通过调整控制系数的取值, 实现扩大搜索区间或者加快收敛速度的目的。

#### 4 结论

随着开放电力市场, 引入竞争机制, 选择合理的 AGC 机组对电网的经济运行越来越重要。本文采用粒子群算法对电力市场下 AGC 机组的调配问题进行了探究, 算例结果表明, PSO 算法结构简单, 运行速度快, 易于编程实现, 既克服了传统整数规

划法所存在的弊端, 又避免了遗传算法复杂的参数设置, 是一种有效的求解算法。本文所提方法为电力市场下 AGC 机组的调配问题带来了新的思路。

#### 参考文献

- [1] 于尔铿, 刘广一, 周京阳. 能量管理系统[M]. 北京: 科学出版社, 1998.  
YU Er-keng, LIU Guang-yi, ZHOU Jing-yang. Energy Management System (EMS) [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [2] Jaleeli N, Vansiyk L S, Ewart D, et al. Understanding Automatic Generation Control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(3): 1106-1122.
- [3] 林万菁, 刘尧, 李卫东, 等. 发电侧电力市场下的 AGC 容量确定与机组选择[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(19):17-21.  
LIN Wan-jing, LIU Rao, LI Wei-dong, et al. AGC Requirement Determination and Unit Selection in the Generation Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(19):17-21.
- [4] 肖宝玲, 赵庆波, 童明光, 等. 我国电力 AGC 辅助服务市场的竞价交易模式探讨[J]. 现代电力, 2004, 21(2):81-86.  
XIAO Bao-ling, ZHAO Qing-bo, TONG Ming-guang, et al. Discussion on the Pattern of Competitive Trade in the AGC Ancillary Service Market[J]. Modern Electric Power, 2004, 21(2):81-86.
- [5] 李卫东, 吴海波, 武亚光, 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, WU Ya-guang, 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.
- [6] 袁晓辉, 王乘, 张勇传, 等. 粒子群优化算法在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(19):14-29.  
YUAN Xiao-hui, WANG Cheng, ZHANG Chuan-yong, et al. A Survey on Application to Electric Power System[J]. Power System Technology, 2004, 28(19):14-29.
- [7] Kennedy J, Eberhary R C. Particle Swarm Optimization[A]. In: Proceedings of IEEE Conference on Neural Network[C]. Perth (Australia): 1995. 1942-1948.
- [8] Shi Y, Eberhart R C. Empirical Study of Particle Swarm Optimization[A]. In: Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation[C]. Washington DC (USA): 1999. 1945-1950.
- [9] Bakken B H, Grande O S. Automatic Generation Control in a Deregulated Power System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(4):1401-1406.

(下转第 64 页 continued on page 64)

$\beta_1=1$ ;  $\alpha_2=1.5$ ;  $\beta_2=0.5$ 。定义相对误差为

$$\frac{|MTBF - \hat{MTBF}|}{MTBF}, \frac{|MTTR - \hat{MTTR}|}{MTTR}, \text{其中 } \hat{MTBF}$$

为 MTBF 的估计值,  $\hat{MTTR}$  为 MTTR 的估计值。则电源 MTBF 和 MTTR 的极大似然估计和贝叶斯估计值及相对误差如表 2 所示。根据大量资料表明, 通信电源的 MTBF 为 10 000 h, MTTR 为 4 h。

表 2 电源的 MTBF 和 MTTR 估计值及误差

Tab.2 MTBF, MTTR estimate value of power supply and error

参数	极大似然方法		贝叶斯方法	
	估计/h	误差/(%)	估计/h	误差/(%)
MTBF	10 945	9.45	10 891	8.91
MTTR	4.7	17.5	3.5	12.5

从表 2 中我们可以看出, 应用贝叶斯估计方法得到的结果比较合理, 而且比极大似然估计方法的结果误差更小。以上例子只是针对通信电源来验证贝叶斯估计方法的正确性, 实际上应用贝叶斯估计方法求解其它部件 MTBF 和 MTTR 的值也实用。

## 5 结论

贝叶斯统计与经典统计学相比, 其优势已经充分显露。本文提出了应用贝叶斯估计对部件的 MTBF 和 MTTR 的求解方法, 详细地论述了求解过程, 并通过具体的实实验证了该方法的正确性, 该方法改变了以往对 MTBF 和 MTTR 的获得主要是从设备厂商得到的局限性, 而是利用贝叶斯估计对 MTBF 和 MTTR 的后验分布的某个特征量进行估

计, 得出现场中具体设备的准确值, 其得到的结果更加真实、科学、可靠。

## 参考文献

- [1] 茆诗松. 贝叶斯统计[M]. 北京:中国统计出版社, 1999. MAO Shi-song. Bayes Statistics[M]. Beijing:China Statistics Press, 1999.
- [2] Sahinoglu M, Libby D L, Das S R. Measuring Availability Indexes with Small Samples for Component and Network Reliability Using the Sahinoglu-Libby Probability Model[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2005, 54(3): 1283-1295.
- [3] 俞钟祺, 马秀兰. 失效率的一种贝叶斯估计[J]. 天津工业大学学报, 2001, (20): 47-48. YU Zhong-qi, MA Xiu-lan. A Kind of Bayes Estimate of Invalid Rates[J]. Journal of Tianjin Institute of Textile Science and Technology, 2001, (20): 47-48.
- [4] 姜红燕, 张帼奋. 失效率为指数函数的模型中使用屏蔽数据的参数估计[J]. 浙江大学学报(理学版), 2006, 33 (2): 125-128. JIANG Hong-yang, ZHANG Guo-fen. Parameter Estimation in Exponential Failure Rate Model Using Masked Data[J]. Journal of Zhejiang University(Science Edition), 2006, 33 (2): 125-128.

收稿日期: 2007-03-14; 修回日期: 2007-05-14

## 作者简介:

高会生 (1963-), 男, 博士研究生, 教授, 研究方向为通信网的管理和安全风险评估, 信息处理;

赵建立 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力通信网有效性评估. E-mail:shacheng227@126.com

(上接第 61 页 continued from page 61)

- [10] 葛炬, 张粒子, 周小兵, 等. AGC 机组参与电力市场辅助服务的探讨[J]. 电网技术, 2002, 26(12): 61-65. GE Ju, ZHANG Li-zi, ZHOU Xiao-bing, et al. Discussion on AGC Units Participating Ancillary Services in Electricity Market[J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 61-65.
- [11] Laskari E C, Parsopoulous K E, Vrahatis M N. Particle Swarm Optimization for Minimax Problems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(6): 1576-1581.

- [12] Clerc M, Kennedy J. The Particle Swarm Explosion, Stability, and Convergence in a Multidimensional Complex Space[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2002, 6(1): 58-73.

收稿日期: 2007-01-28

## 作者简介:

王亚军 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场; E-mail:wangyajun398@126.com

房大中 (1946-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定性分析与控制。