

# 基于反捕食粒子群算法的电力系统经济调度方法

吴杰康<sup>1</sup>, 韩军锋<sup>1</sup>, 刘蔚<sup>2</sup>, 吴智华<sup>1</sup>

- (1. 广西大学 电气工程学院, 广西壮族自治区 南宁市 530004;
2. 广西电力试验研究院有限公司, 广西壮族自治区 南宁市 530023)

## Economic Dispatching of Power System Based on Anti-Predatory Particle Swarm Algorithm

WU Jie-kang<sup>1</sup>, HAN Jun-feng<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>2</sup>, WU Zhi-hua<sup>1</sup>

- (1. Department of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China;
2. Guangxi Electric Power Test & Research Institute Co., Ltd., Nanning 530023, Guangxi Zhuang Autonomous Region, China)

**ABSTRACT:** An economic dispatching model, in which the constraints such as system power balance, output limit of generating units, ramp rate limit and dead zone of unit are taken into account, is built and solved by anti-predatory particle swarm optimization (APSO) algorithm. During the solving process, in adaptive value penalty function the penalty factors are added to related constraints and the particles that violate constraints are actively modified by repair strategy to make particles locating in area of feasible solution or to search in the area close to feasible solution area as possible. The effectiveness of the proposed algorithm is verified by calculation example.

**KEY WORDS:** power system economic dispatching; anti-predatory particle swarm optimization (APSO); repair strategy; adaptive penalty function

**摘要:** 建立了考虑系统功率平衡约束、发电机组出力极限约束、机组爬坡约束、机组工作死区约束的经济调度模型,应用反捕食粒子群优化算法求解该模型。求解过程中,在自适应值罚函数中对相关约束条件加入惩罚因子,应用修补策略对违反各种约束条件的粒子进行积极修正,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。算例结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** 电力系统经济调度; 反捕食粒子群优化; 修补策略; 适应值罚函数法

**基金项目:** 国家 863 高技术基金项目(2007AA04Z197); 国家自然科学基金项目(50767001); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20094501110002); 广西高校百名中青年学科带头人资助计划项目(RC20060808002); 广西壮族自治区教育厅科技计划项目(200808-MS150); 广西壮族自治区研究生教育创新计划项目。

Project Supported by National High Technology Research and Development of China 863 Program(2007AA04Z197); National Natural Science Foundation of China(50767001); Special Scientific and Research Funds for Doctoral Speciality of Institution of Higher Learning (20094501110002).

## 0 引言

电力系统经济调度(economic dispatch, ED)在电力系统运行与控制中扮演着重要角色,是电力系统优化运行的重要课题,其目的在于在满足负荷用电需求等约束条件下使发电机组运行总费用最小<sup>[1]</sup>。ED 问题的研究有利于减少发电成本,减少能源消耗,对提高电力系统运行的经济性和可靠性及建立节约型社会均有重大意义。

因存在机组阀点效应<sup>[2]</sup>、系统运行约束、系统稳定性等约束条件,传统运行模式下的经济调度问题在数学角度上是一个高维数、非线性、多约束的优化问题,解决这一问题的传统方法有 Lambda 叠代法、梯度法、牛顿法、动态规划法<sup>[3]</sup>等。近年来,人工智能算法(包括神经网络<sup>[4]</sup>、遗传算法<sup>[5]</sup>、模拟退火算法<sup>[6]</sup>、进化规划算法<sup>[7]</sup>、混沌优化法<sup>[8]</sup>等)也被用来求解 ED 问题,并已取得较为理想的结果。反捕食粒子群算法(anti-predatory particle swarm optimization, APSO)是基于粒子群(particle swarm optimization, PSO)算法发展起来的新兴智能优化算法。文献[9]中 A. El-Gallad 等率先将粒子机组的工作死区约束计入所建粒子群模型。文献[10]在对 ED 模型进行分析时考虑了多种约束条件,但该算法要求粒子初始值全为可行解,此条件限制了该方法的实用推广。文献[11]在 PSO 算法中加入了变异,设置了扰动,提高了算法精度。文献[12]将 PSO 算法用于求解无功优化问题,并与禁忌搜索算法和枚举法进行比较,结果表明 PSO 在计算效率和收敛性方面均具有优越性。文献[13]应用 PSO 算法求解时,通过罚函数法处理不等式约束,并保

留等式约束的可行解，以避免算法出现“早熟”现象，但该方法对不同约束条件的协调处理与计入方法上仍存在一些问题。本文将建立同时考虑各种约束条件的经济调度模型，应用 APSO 算法进行求解，搜索过程中粒子能够记忆好经验与坏经验，寻优效率大大提高。

## 1 经济调度数学模型

ED 问题是在满足负载用电需求、系统网络损耗、各发电机组有功功率极限等约束条件基础上，优化系统中各个发电机组的有功出力，使系统总发电成本最小<sup>[14]</sup>，其目标函数为

$$\min F = \sum_{i=1}^m F_i(P_i), \quad i=1,2,\dots,m \quad (1)$$

式中： $F$  为系统总发电成本； $P_i$  为机组  $i$  的有功发电功率； $F_i(P_i)$  为机组  $i$  的发电成本； $m$  为系统机组总数。 $F_i(P_i)$  可表示为  $P_i$  的二次函数：

$$F_i(P_i) = a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 \quad (2)$$

式中  $a_i$ 、 $b_i$ 、 $c_i$  分别为第  $i$  个发电机组的燃料费用相关系数。

电力系统中，各发电机组出力之和应等于负载总需求功率与网络损耗之和，则系统功率平衡约束为

$$\sum_{i=1}^m P_i = P_D + P_L \quad (3)$$

式中： $P_D$  为系统负荷； $P_L$  为系统网损。通常采用 Kron 损耗方程<sup>[15]</sup>来计算系统网损：

$$P_L = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (P_i B_{ij} P_j) + \sum_{i=1}^m (B_{0i} P_i) + B_{00} \quad (4)$$

式中  $B_{ij}$ 、 $B_{0i}$ 、 $B_{00}$  为损耗参数。

每个机组的发电功率应介于其最小输出功率和最大输出功率之间<sup>[16]</sup>，则机组出力上下限约束为

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (5)$$

机组爬坡速率约束为

$$\Delta P_{i\min} \leq P_i^t - P_i^{t-1} \leq \Delta P_{i\max} \quad (6)$$

式中  $\Delta P_{i\max}$  和  $\Delta P_{i\min}$  分别为机组  $i$  的功率向上爬坡速率的上限值和功率向下爬坡速率的下限值。

由于发电机的物理特性，机组功率需满足机组工作死区约束，即

$$P_i \in \begin{cases} P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\text{ld}} \\ P_i^{(j-1)\text{d}} \leq P_i \leq P_i^{\text{jd}}, & j=2,3,\dots,n \\ P_i^{\text{ju}} \leq P_i \leq P_i^{\max}, & j=2,3,\dots,n \end{cases} \quad (7)$$

式中： $P_i^{\min}$  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； $P_i^{\text{jd}}$  为机组  $i$  的第  $j$  个工作死区的下边界； $P_i^{\text{ju}}$  为机组  $i$  的第  $j$  个工作死区的上边界； $n$  为机组  $i$  的工作死区个数。

## 2 APSO 算法

PSO 算法是由 Kennedy 和 Eberhart 最先在 1995 年提出的<sup>[17]</sup>，随后研究者引入了惯性权重  $\omega$  来控制粒子的开发与探索性能，达到了更好的寻优效果，形成了目前的粒子群标准版本。相对于遗传算法 (genetic algorithm, GA)，PSO 算法具有记忆性，易于实现和工程应用，不需要梯度信息，因此很快被广泛应用于多个领域。

PSO 算法通过模拟鸟群的觅食行为来求解问题，将每个粒子看作  $n$  维搜索空间中具有重量和体积、以一定速度飞行的粒子，并根据个体飞行经验和群体飞行经验来动态调整自身的飞行速度。

PSO 算法中的速度更新方程为

$$V_{ij}^t = \omega V_{ij}^{t-1} + C_1 r_1 (P_{\text{best},ij}^{t-1} - X_{ij}^{t-1}) + C_2 r_2 (G_{\text{best},i}^{t-1} - X_{ij}^{t-1}), \quad i=1,2,\dots,N_D; \quad j=1,2,\dots,N_{\text{par}} \quad (8)$$

位置更新方程为

$$X_{ij}^t = X_{ij}^{t-1} + V_{ij}^t \quad (9)$$

式中： $X_{ij}^t$  表示第  $i$  个粒子在第  $t$  次迭代时初始对象 (机组)  $j$  所对应的粒子位置； $V_{ij}^t$  表示第  $i$  个粒子在第  $t$  次迭代时初始对象  $j$  所对应的速度分量； $N_D$  表示粒子维数； $N_{\text{par}}$  表示种群中粒子个数； $C_1$ 、 $C_2$  为加速因子； $r_1$ 、 $r_2$  为在  $[0, 1]$  区间均匀分布的随机数； $P_{\text{best}}$  为粒子寻优后得到的局部最好位置； $G_{\text{best}}$  表示粒子群寻优得到的全局最好位置。

粒子通过更新自身位置来搜索全局最优值，由式(8)~(9)可知，通过速度可求得下次位置与本次位置的差值，速度的变化依赖于本次位置与整个种群最优位置的差，故粒子进化依赖粒子的先前经验(粒子先前的位置与速度)、粒子的自身认知能力(粒子自身的最优位置)、粒子的社会认知(整个粒子群的最优位置)这 3 个部分。正是通过群体信息的共享和自身经验的总结，粒子可在整个搜索空间内进化，并最终寻求到最优解。

APSO 算法是由 Selvakumar 等学者于 2007 年提出的，在 PSO 算法基础上加入了反捕食机制，是应用于电力系统领域的智能优化算法<sup>[18]</sup>。

在鸟群捕食过程中，认知和社会行为可帮助鸟群在捕食过程中定位食物(最优解)。鸟群不仅有捕

食行为,同时也存在反捕食行为,也就是说鸟群在捕食的同时也要尽力躲避它们的天敌。APSO 算法将捕食者位置作为最差位置引入到 PSO 模型中。PSO 算法的认知部分被分割成 2 部分:好经验和坏经验,前者是粒子对自身经历的最好位置的记忆,后者是粒子对自身经历的最差位置(捕食者的位置)的记忆。同样,APSO 算法将 PSO 算法的社会行为部分也分割成全局最好经验和全局最差经验 2 个部分。APSO 算法对速度进行如下更新:

$$V_{ij}^t = \omega^t V_{ij}^{t-1} + C_{1g} r_1 (P_{best,ij}^{t-1} - X_{ij}^{t-1}) + C_{1b} r_2 (X_{ij}^{t-1} - P_{best,ij}^{t-1}) + C_{2g} r_3 (G_{best,i}^{t-1} - X_{ij}^{t-1}) + C_{2b} r_4 (X_{ij}^{t-1} - G_{worst,i}^{t-1}), \quad i=1,2,\dots,N_D; \quad j=1,2,\dots,N_{par} \quad (10)$$

式中:  $C_{1g}$  表示粒子飞向自身最优位置的加速度系数;  $C_{2g}$  表示粒子飞向全局最优位置的加速度系数;  $C_{1b}$  表示粒子飞离自身最差位置的加速度系数;  $C_{2b}$  表示粒子飞离全局最差位置的加速度系数;  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$  是介于[0, 1]之间的随机数。位置更新方程仍然采用式(9),粒子行为中加入了坏经验,整个粒子群体增添了额外的搜索能力。根据坏经验,粒子能够躲过先前的最差位置,进而获得更好位置。

### 3 应用 APSO 算法求解经济调度问题

#### 3.1 自适应值罚函数和约束条件修补策略

在功率平衡约束条件中加入罚函数,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,搜索到的解就越接近最优解。加入罚函数后的系统总发电成本  $F_T$  可表示为

$$F_T = \sum_{i=1}^m F_i(P_i) + \sigma \left| \sum_{i=1}^m P_i - P_D - P_L \right| \quad (11)$$

式中  $\sigma$  表示罚函数的惩罚因子(正常数)。

反捕食粒子群算法中,除所有新的局部最好位置  $P_{best}$  之外的最好位置当做全局最好位置  $G_{best}$ ; 同样除所有新的局部最差位置  $P_{worst}$  之外的最差位置当做全局最差位置  $G_{worst}$ 。最好位置与最差位置的更新采用如下方法:

$$P_{best,j}^t = \begin{cases} X_j^{t-1} + V_j^t, & F_{Tj}^t < F_{Tj}^{t-1} \\ P_{best,j}^{t-1}, & F_{Tj}^t \geq F_{Tj}^{t-1} \end{cases} \quad (12)$$

$$P_{worst,j}^t = \begin{cases} X_j^{t-1} + V_j^t, & F_{Tj}^t > F_{Tj}^{t-1} \\ P_{best,j}^{t-1}, & F_{Tj}^t \leq F_{Tj}^{t-1} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $F_{Tj}^t$  是带有自适应值罚函数的总目标函数的第  $j$  个粒子  $t$  次迭代后的数值。本文编码过程中,每个粒子由一组实数列向量构成,而实数列向量就

是各个机组出力的分配值,搜索空间为满足各个约束条件下的所有可能的决策空间。

应用 PSO 算法求解有约束条件的优化问题时,其处理各种约束条件的方法各有不同<sup>[19]</sup>。本文算法在初始化和更新粒子时只保留满足约束条件的粒子,并对不满足约束条件的粒子采取相对积极的方式进行修正,使其尽量满足约束条件。

在粒子每次迭代更新后,如果各机组出力超越了出力上下限,则将其限制在相应的边界值上,即

$$X_{ji}^k = \begin{cases} P_i^{\min}, & X_{ji}^k < P_i^{\min} \\ P_i^{\max}, & X_{ji}^k > P_i^{\max} \end{cases} \quad (14)$$

如果违反了机组爬坡速率约束条件<sup>[20]</sup>,则按照下式进行调整:

$$X_{ji}^k = \begin{cases} P_i^0 - \Delta P_{i\min}, & X_{ji}^k < P_i^0 - \Delta P_{i\min} \\ P_i^0 + \Delta P_{i\max}, & X_{ji}^k > P_i^0 + \Delta P_{i\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中  $P_i^0$  为机组  $i$  实际出力的初始值。

如果机组出力违反了工作死区约束条件,则将其限制在最近的边界值上:

$$X_{ji}^k = \begin{cases} P_i^{jd}, & 0 < X_{ji}^k - P_i^{jd} \leq (P_i^{ju} - P_i^{jd})/2 \\ P_i^{ju}, & 0 < X_{ji}^k - P_i^{jd} \leq (P_i^{ju} - P_i^{jd})/2 \end{cases} \quad (16)$$

综上所述,每次迭代后,都需要对粒子位置进行检验,如果违反了机组出力上下限、爬坡速率和工作死区等约束条件,则将其位置设置在邻近的边界值上<sup>[21]</sup>。罚函数是对迭代寻优过程的必要补充,可以将粒子吸引到可行解区域中来。同时非可行解的适应值较大,在进行粒子选优时被选为极值的可能性就较小<sup>[22]</sup>。

#### 3.2 算法步骤

本文算法具体步骤如下:

1) 随机产生初始种群  $X$ , 设置粒子群大小  $M$  和迭代总次数  $T$ , 随机产生每个粒子的初始位置和初始速度,输入系统参数及机组参数并初始化所有相关参数。

2) 根据约束条件修补策略,输入各个约束条件,并检查这些粒子的初始位置和初始速度是否满足各项约束条件,若不满足,则将相应的变量限制在其上、下限的边界值上,以使每个粒子的初始值都为可行解。

3) 采用 B 系数法计算系统网损,并将其代入系统参数的约束条件中。检查迭代后的出力和备用出力是否违反机组出力上下限、爬坡速率和工作死区等约束,并根据式(14)~(16)进行修正。

4) 根据粒子当前位置计算适应值函数, 并保留个体最优位置  $P_{best}$  和个体最差位置  $P_{worst}$ , 根据各粒子的  $P_{best}$  和  $P_{worst}$ , 找出全局最优位置  $G_{best}$  和全局最差位置  $G_{worst}$ 。

5) 根据当前迭代次数和最大迭代次数, 计算权重系数  $\omega$  的合理取值, 并根据式(9)~(10)更新每个粒子当前的位置  $X_i$  和速度  $V_i$ 。

6) 计算各个粒子的适应值, 更新个体最优位置、个体最差位置、全局最优位置、全局最差位置, 并比较各适应值大小。若当前粒子的适应值小于  $P_{best}$ , 则将该粒子的当前位置保存为  $P_{best}$ ; 若该粒子的适应值还小于  $G_{best}$ , 则还应将该粒子的当前位置保存为全局最优位置。

7) 如果粒子个数  $j < M$ , 则  $j = j + 1$ ,  $i = i + 1$ , 转步骤 5); 否则说明本次迭代中所有粒子都已经生成完毕, 执行步骤 8)。

8) 如果  $t=0$ , 则转步骤 4); 如果  $t < T$ , 则  $k=k+1$ ,  $j=1$ ,  $i=1$ , 然后转步骤 5), 开始下一次迭代; 如果  $t > T$ , 则全部迭代过程完毕, 执行步骤 9)。

9) 确认是否达到最大迭代次数  $T$  或是否满足其他停止准则, 如果满足停止准则, 则算法停止, 输出  $G_{best}$  所表示的机组出力和总发电成本  $F_T$ 。

## 4 算例分析

本文采用文献[10]中含有 15 台机组的算例, 机组参数、工作死区约束以及 B 系数矩阵等数据详见文献[10]。设其系统负荷为 2 630 MW, 反捕食粒子群算法采用 Matlab 编制, 粒子个数设为 100 个, 最大迭代次数为 200 次, 并且独立计算该算例 50 次。

表 1 列出了 50 次计算中应用文献[9]算法、PSO 算法和本文算法得到的各机组的最优出力。由表 1 可知, 本文算法得到的总费用和系统网损均最小。

表 1 优化结果比较

Tab. 1 Comparison of optimal results

算法	各机组出力/MW															出力总和/ MW	网损/ MW	总费用/ USD
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			
文献[10]	439.1	408	119.6	130.0	151.0	460.0	425.6	98.6	113.5	101.1	33.9	80.0	25.0	41.4	35.6	2 662.4	32.4	32 858
PSO	455.0	380.0	130.0	130.0	150.0	430.0	430.0	160.0	26.3	160.0	26.8	54.2	25.0	55.0	55.0	2 667.3	37.3	32 881
APSO	455.0	380.0	130.0	130.0	150.0	430.0	430.0	60.0	28.24	160.0	80.0	80.0	85.0	15.0	15.0	2 658.2	28.2	32 814

图 1 比较了标准 PSO 算法与 APSO 算法的收敛性情况。由图 1 可知, 采用 APSO 算法时各次寻优结果更为集中且总费用数值更小, 说明该算法的收敛性更好、寻优结果更理想。

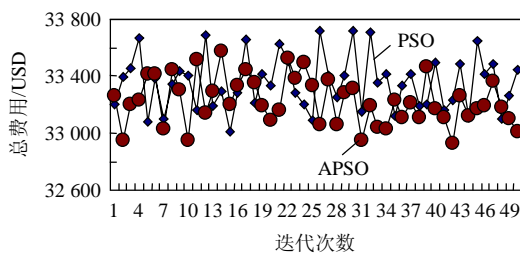


图 1 APSO 算法与 PSO 算法收敛性比较

Fig. 1 Convergence comparison of APSO algorithm and PSO algorithm

## 5 结论

本文提出了基于 APSO 算法的经济调度模型求解方法, 通过罚函数和修补策略修正粒子, 使粒子尽可能地在可行解区域或其附近进行寻优搜索, 算法寻优效果良好。由本文结果可知, APSO 算法在求解大规模、非线性、多约束的经济调度问题上具有显著优势, 且具有广阔的工程应用前景。

## 参考文献

- [1] Yang H T, Yang P C, Huang C L. Evolutionary programming based economic dispatch for units with non-smooth fuel cost functions[J]. IEEE Trans on Power System, 1996, 11(1): 112-118.
- [2] 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.
- [3] Ross D W, Kim S. Dynamic economic dispatch of generation[J]. IEEE Trans on PAS, 1980, 27(99): 2060-2068.
- [4] 毛亚林, 张国忠, 朱斌, 等. 基于混沌模拟退火神经网络模型的电力系统经济负荷分配[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 65-70. Mao Yalin, Zhang Guozhong, Zhu Bin, et al. Economic load dispatch of power systems based on chaotic simulated annealing neural network model[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 65-70(in Chinese).
- [5] 张武军, 叶剑锋, 梁伟杰, 等. 基于改进遗传算法的多目标无功优化[J]. 电网技术, 2004, 28(11): 67-71. Zhang Wujun, Ye Jianfeng, Liang Weijie, et al. Multi-objective reactive power optimization based on improved genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(11): 67-71(in Chinese).
- [6] Wong K P, Fung C C. Simulated annealing based economic dispatch algorithm[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 1993, 140(6): 509-515.
- [7] 刘自发, 张建华. 一种求解电力经济负荷分配问题的改进微分进化算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 100-105. Liu Zifa, Zhang Jianhua. An improved differential evolution algorithm for economic dispatch of power systems[J]. Proceedings of

- the CSEE, 2008, 28(10): 100-105(in Chinese).
- [8] 唐巍, 李殿璞. 电力系统经济负荷分配的混沌优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(10): 36-40.  
Tang Wei, Li Dianpu. Chaotic optimization for economic dispatch of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(10): 36-40(in Chinese).
- [9] El Gallad A, El Hawary M, Sallam A, et al. Particle swarm optimizer for constrained economic dispatch with prohibited operating zones [C]. IEEE Conference on Electrical and Computer Engineering, Canada, 2002.
- [10] Gaing Z W. Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3): 1187-1195.
- [11] 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.  
Yang Junjie, Zhou Jianzhong, Wu Wei, et al. Application of improved particle swarm optimization in economic dispatching[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 1-4(in Chinese).
- [12] 余欣梅, 李妍, 熊信良, 等. 基于 PSO 考虑谐波影响的补偿电容优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 26-31.  
Yu Xinmei, Li Yan, Xiong Xinyin, et al. Optimal shunt capacitor placement using particle swarm optimization algorithm with harmonic distortion consideration[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 26-31(in Chinese).
- [13] 金义雄, 程浩忠, 严健勇, 等. 基于并行协同粒子群算法的多阶段电网规划[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 49-53.  
Jin Yixiong, Cheng Haozhong, Yan Jianyong, et al. Parallel cooperative particle swarm optimization based multistage transmission network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 49-53(in Chinese).
- [14] 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 Wenchuan, Qiu Jiayu, Bian Xiaomeng. Artificial immune algorithm integrated with chaotic optimization for economic dispatch of power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 41-44(in Chinese).
- [15] Chen Po Hung, Chang Hong Chan. Large-scale economic dispatch by genetic algorithm[J]. IEEE Trans on Power System, 1995, 10(4): 1919-1926.
- [16] 温步瀛, 陈冲, 程浩忠. 市场竞争条件下的发电机组启停机计划优化[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 67-72.  
Wen Buying, Chen Chong, Cheng Haozhong. Unit commitment optimization under market competition[J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 67-72(in Chinese).
- [17] Kennedy J. Improving particle swarm performance with cluster analysis[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation, San Diego, 2000.
- [18] Selvakumar A I, Thanushkodi K. Anti-predatory particle swarm optimization: solution to nonconvex economic dispatch problems[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(5): 2-10.
- [19] 吴杰康, 朱建全. 求解电力库模式下竞价管理问题的改进粒子群算法[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 56-60.  
Wu Jiekang, Zhu Jianquan. A modified particle swarm optimization algorithm for management in power pool environment[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 56-60(in Chinese).
- [20] 杨梓俊, 丁明, 孙昕. 电力市场下综合考虑可靠性和旋转备用效益的机组组合[J]. 电网技术, 2003, 27(6): 13-18.  
Yang Zijun, Ding Ming, Sun Xin. Unit commitment problem under the condition of electricity market considering system reliability and benefit from spinning reserve[J]. Power System Technology, 2003, 27(6): 13-18(in Chinese).
- [21] 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.  
Hou Yunhe, Lu Lijuan, Xiong Xinyin, et al. Enhanced particle swarm optimization algorithm and its application on economic dispatch of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 95-100(in Chinese).
- [22] 张雪雯, 李艳君. 基于自调节粒子群算法的电力系统经济负荷分配[J]. 电网技术, 2006, 30(18): 8-13.  
Zhang Xuewen, Li Yanjun. Self-adjusted particle swarm optimization algorithm based economic load dispatch of power system[J]. Power System Technology, 2006, 30(18): 8-13(in Chinese).



吴杰康

收稿日期: 2009-09-23.

作者简介:

吴杰康(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与分析、电力系统优化技术、电力市场、电力系统经济与信息化、电力工程管理、电能质量监测与控制、红水河梯级水电站群水电能源利用与调控、电力系统数字信号处理、电力系统智能仪表、配电自动化等, E-mail:

wujiekang@163.com;

韩军锋(1982—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与分析;

刘蔚(1974—), 男, 博士, 研究方向为电力系统自动化;

吴智华(1983—), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为电力系统运行与分析、继电保护技术, 现任职于广西电力试验研究院桂能科技发展有限公司。

(编辑 徐梅)