

# 发电机组组合的混合蚁群优化算法

王 剑, 刘天琪

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 电力系统中的机组组合作为一个非确定型多项式困难问题, 一直难以获得其理论最优解。针对算法的精度和速度这一矛盾, 提出了一种结合启发式算法和蚁群算法的混合优化算法。用优先级排序法获得次优解, 并在附近形成一个搜索邻域; 采用蚁群算法在此邻域内寻优, 减小了蚁群算法的空间复杂度。同时, 在蚁群算法中引入了人工鱼群算法的拥挤度概念。拥挤度阈值在迭代过程中是自适应变化的, 从而增强了算法的遍历寻优能力, 也保持了较快的收敛速度。经济负荷分配采用简化梯度法。对一个10机系统算例仿真计算, 验证了所提算法对解决机组组合问题具有很强的搜索能力和快速收敛性。

**关键词:** 电力系统; 机组组合; 优先级排序; 混合蚁群算法; 人工鱼群算法; 经济负荷分配

## Hybrid ant colony optimization algorithm for generation unit commitment problem

WANG Jian, LIU Tian-qi

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** As a hard nondeterministic polynomial (NP) problem in power system, the unit commitment problem is difficult to find its optimal solution theoretically. This paper presents a hybrid algorithm based on heuristic method and ant colony optimization (ACO) for the contradiction between precision and speed of the optimization algorithm. Firstly, this paper attains the sub-optimal solution by priority list (PL) method, and forms a local area for search. Then, it completes the optimization process in the local area by ant colony algorithm, which reduces the space complexity of the ant colony optimization. Meanwhile, a swarm degree in the artificial fish school algorithm (AFSA) is used in the ant colony optimization. The threshold of a swarm degree varies self-adaptively in the process of iteration, so it enhances the searching ability of the algorithm, and also insures the algorithm to have a quick convergence rate. The simplified gradient method is used for the economical load dispatch problem. Simulation results of 10-units system prove that the algorithm proposed has good search capability and quick convergence rate to solve the unit commitment problem.

**Key words:** power system; unit commitment; priority list; hybrid ant colony optimization; artificial fish school algorithm; economic dispatch

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0085-05

## 0 引言

电力系统机组组合 (unit commitment, UC) 问题是指在一个周期内满足各种约束条件下动态地决策机组的启停和安排机组出力, 使得机组总耗量最小。近年来, 国家提出节能调度政策, 合理安排机组发电可以降低能耗。UC 问题一直受到普遍关注, 是一个高维数、非凸性、离散性、非线性优化问题, 几十年来, 学者们提出了许多解决方法<sup>[1]</sup>。

在实际系统中使用最多的是优先顺序法<sup>[2]</sup>、动态规划法、拉格朗日松弛法<sup>[3]</sup>和混合整数规划法等经典算法。目前, 随机启发式方法逐步被应用到电

力系统机组优化组合问题中, 如遗传算法<sup>[4]</sup>、模拟退火算法、禁忌搜索算法<sup>[5]</sup>、社会演化算法<sup>[6]</sup>、粒子群算法<sup>[7]</sup>、蚁群算法<sup>[8-11]</sup>等, 智能搜索算法因处理约束方便、全局搜索能力强而倍受关注。其中, 已初步应用于电力系统的群体智能搜索法有粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO)、蚁群优化 (ant colony optimization, ACO) 等, 这两种方法各有优缺点, 于是有了两种算法相结合的混合优化算法<sup>[11-12]</sup>解决机组组合问题。

文献[8-9]用蚁群算法对组合优化寻优, 对各时段的机组组合状态进行编码, 可以很好地处理机组启停的约束条件。文献[10]提出了一种操作编码表

达机组组合解,使蚁群算法可以求解大规模机组组合问题。文献[12-13]提出了一种邻域搜索方法,具有较快的收敛特性,符合实际系统对快速性的要求。为使蚁群算法能够寻找到组合最优解的同时,又能提高计算速度,针对机组组合特定问题,本文提出邻域搜索法与时段编码的蚁群算法混合优化方法。用优先级表法<sup>[2]</sup>形成问题的次优解,在次优解的附近形成搜索邻域,再利用蚁群算法在此邻域内寻优,将人工鱼群算法<sup>[14]</sup>(artificial fish school algorithm, AFSA)的拥挤度概念引入到蚁群算法中,提高了算法搜索能力和收敛速度。

## 1 机组组合的数学模型

### 1.1 目标函数

数学模型的目标函数为全系统机组发电煤耗和启动煤耗的总和最小。

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N [u_{it} C_i(P_{it}) + u_{it}(1-u_{i,t-1})S_i(t)] \quad (1)$$

式中:  $F$  为总耗量;  $T$  为总时段数;  $N$  为机组总台数;  $u_{it}$  为机组  $i$  在时段  $t$  的状态; 1 表示开机; 0 表示停机;  $P_{it}$  为机组  $i$  在  $t$  时段的有功;  $C_i$  为机组  $i$  的发电能耗函数;  $S_i(t)$  为机组  $i$  在  $t$  时刻的启动能耗。  $C_i$  和  $S_i$  一般可表示为:

$$C_i(P_{it}) = a_i P_{it}^2 + b_i P_{it} + c_i \quad (2)$$

$$S_i(t) = S_{0,i} + S_{1,i}(1 - e^{-T_{it}^{\text{off}}/\tau_i}) \quad (3)$$

式中:  $a_i$ 、 $b_i$  和  $c_i$  为机组  $i$  的运行耗量参数;  $S_{0,i}$ 、 $S_{1,i}$  和  $\tau_i$  为机组  $i$  的启动耗量参数;  $T_{it}^{\text{off}}$  为机组  $i$  在  $t$  时刻已停机时间。

### 1.2 机组约束条件

机组约束条件包括机组输出功率限制、爬坡速率限制和启停时间限制。

$$P_{i\min} \leq P_{it} \leq P_{i\max} \quad (4)$$

$$-r_d \leq P_{it} - P_{i,t-1} \leq r_u \quad (5)$$

$$T_{it}^{\text{on}} \geq T_{i\min}^{\text{on}}, T_{it}^{\text{off}} \geq T_{i\min}^{\text{off}} \quad (6)$$

式中:  $P_{i\min}$  和  $P_{i\max}$  分别为机组出力上下限;  $r_d$  和  $r_u$  分别为机组速率变化上下限;  $T_{i\min}^{\text{on}}$  和  $T_{i\min}^{\text{off}}$  分别为机组必须保持的开、停机时间。

### 1.3 系统约束条件

系统约束条件包括负荷平衡和旋转备用约束。

$$\sum_{i=1}^N u_{it} P_{it} = P_{\text{LD}t} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^N u_{it} P_{i\max} \geq P_{\text{LD}t} + P_{\text{Re}t} \quad (8)$$

式中,  $P_{\text{LD}t}$  和  $P_{\text{Re}t}$  分别为  $t$  时段系统所需的负荷和旋转备用。

## 2 混合蚁群与鱼群算法

### 2.1 基本蚁群算法和人工鱼群算法

蚁群算法(ACO)是由 Dorigo 等人提出的模拟蚂蚁群体行为的优化算法。ACO 利用信息素(pheromone)正反馈机制寻得最优路径,蚂蚁根据当前路径信息素浓度高低按照一定概率选择路径,并进一步改变路径上的信息素浓度。信息素浓度越高的路径被蚂蚁选中的概率越大,最终所有蚂蚁都聚集到信息素浓度最高的路径上,从而寻得最优路径。ACO 本质上是一种基于群体的多代理算法,运用了正反馈、分布式计算和贪婪启发式搜索。

人工鱼群算法<sup>[14]</sup>(AFSA)是由李晓磊等人提出的组合优化方法。构造人工鱼个体的状态可以表示为向量  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ ,  $x_i (i=1, 2, \dots, n)$  为需要寻优的变量。人工鱼游动方向除了决定于状态  $\mathbf{X}$  的最优值外,还决定于拥挤度值,用  $q_k$  表示位置  $k$  的拥挤度,设置拥挤度阈值为  $\delta$ ,若满足  $q_k > \delta$ ,则认为该位置过于拥挤,即使该区域具有较优的  $X$  值,人工鱼也会在邻域内随机选择一个方向游动。AFSA 通过迭代搜寻最优解,在每次迭代过程中,人工鱼都通过觅食、聚群及追尾等行为来更新自己。

### 2.2 混合蚁群算法

蚁群算法中信息素浓度与启发信息起指导作用,最终会使所有蚂蚁集中到一条最优路径上来,但蚁群算法易陷入局部最优。AFSA 中由于拥挤度因子  $\delta$  的作用,可以防止算法陷入局部最优。但由于整个过程中拥挤度一直起作用,个体最终不能全部集结到最优值周围,使得算法收敛速度缓慢。即拥挤度在寻优初期可改善算法的寻优性能,在寻优后期则对算法的收敛性以及收敛速度造成负面影响。

结合蚁群与鱼群算法两者优点,提出一种混合蚁群方法,即在蚁群算法中引入自适应变化的拥挤度因子。每迭代一次,拥挤度阈值按式(9)更新一次。

$$\delta(NC) = 1 - e^{-c \times NC} \quad (9)$$

式中:  $NC$  为迭代次数;  $c$  为阈值变化系数。阈值按指数规律由 0 接近于 1,算法初期,阈值较小,大多数蚂蚁可以自主随机地选择路线,避免蚂蚁过

早陷入局部极小, 增强算法遍历寻优能力; 随着迭代次数增加, 阈值逐步增大, 减弱了拥挤度对寻优的指导作用, 信息素浓度在指导蚂蚁选择路径的作用逐渐增强, 蚂蚁更容易选择信息素浓度高且距离短的路径, 保证了算法能够快速收敛到最优解。

### 2.3 混合蚁群算法的算例

通过旅行商问题<sup>[14]</sup> (TSP) 来验证混合蚁群算法的有效性。以中国 31 省会城市为例, 分别用 ACO 算法和 HACO 算法求解该问题, 得到如图 1 的收敛曲线。

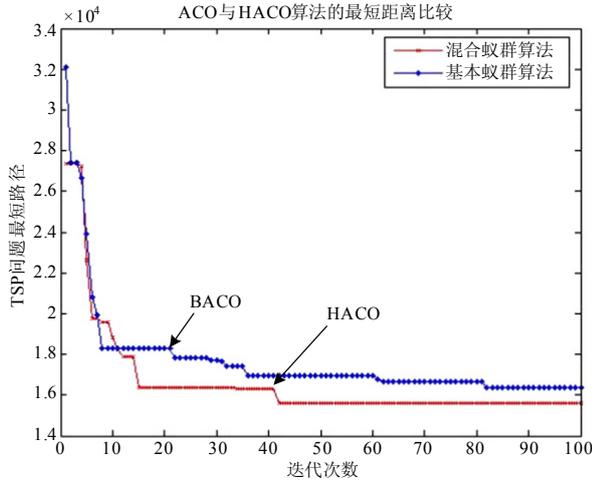


图 1 两种算法下的收敛特性比较

Fig.1 Comparison of the convergence for two algorithms

从图 1 可以看出, HACO 算法比 ACO 算法收敛速度快, 前者最短路径为 15 626, 后者为 16 347, HACO 算法优化效果更好, 说明 HACO 算法有更强的遍历搜索能力, 避免了过早收敛, 提高了全局寻优能力。

## 3 混合蚁群算法在机组组合中的应用

### 3.1 搜索邻域的形成

#### 3.1.1 获得机组组合次优解

按机组节能指标进行排序<sup>[2]</sup>, 本文取排序指标  $\lambda = \text{机组最小比耗量} / \text{机组最大出力}$ <sup>[12-13]</sup>。按此指标由小到大顺序, 根据各时段负荷增大或减小来投入或退出机组发电。考虑系统约束条件 (7) 和 (8), 得到次优解前  $k$  台机组状态为“1”, 其余状态为“0”。

#### 3.1.2 构造搜索邻域

以 3.1.1 节获得的机组组合次优解为中心, 按优先级顺序向前、后各自扩大一定范围, 形成一个带状区域, 如图 2 所示即为次优解的邻域<sup>[12-13]</sup>。

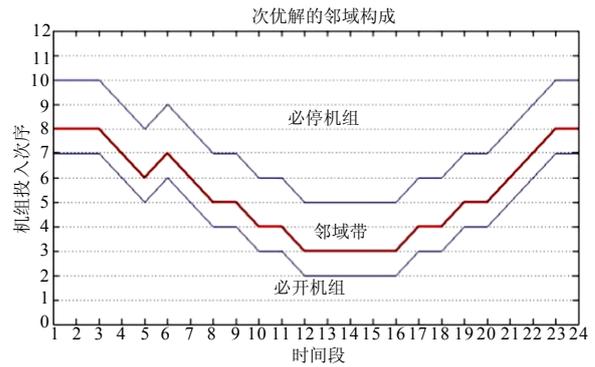


图 2 由次优解构造邻域

Fig.2 Structure of the sub-optimal solution's neighborhood

### 3.2 混合蚁群算法用于机组优化组合

混合蚁群算法对每个时段状态进行编码<sup>[8-11]</sup>, 优化过程即是从一个状态转移到下一个状态的决策过程, 从 1 到  $T$  时段所有的状态构成一条路径, 在一个周期内的优化方案即是一只蚂蚁走过的路径。将机组组合问题的目标函数转化为:

$$\min Z = [\sum_{t=1}^{N-1} tf(S_{\varphi(t)}, S_{\varphi(t+1)}) + tf(S_{\varphi(N)}, S_{\varphi(1)})] \quad (10)$$

式中:  $tf(S_{\varphi(t)}, S_{\varphi(t+1)})$  表示从状态  $\varphi(t)$  转移到状态  $\varphi(t+1)$  的转移费用 (启动费用);  $\varphi(t)$  表示在  $t$  时段可选状态集合。每只蚂蚁按概率选择下一时段的可行状态, 从状态  $g$  到状态  $h$  的转移概率为:

$$P_{gh}(t) = \begin{cases} \tau_{gh}^{\alpha}(t)\eta_{gh}^{\beta} / \sum_{s \notin Tabu} \tau_{gs}^{\alpha}(t)\eta_{gs}^{\beta}, & Tabu(g) = 0 \\ 0, & Tabu(g) \neq 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\tau$  为信息素浓度;  $\eta$  为启发信息;  $\alpha$ 、 $\beta$  为常数;  $Tabu(g)$  表示从状态  $g$  转移到下一时段的可行状态集合表; “0”表示可行; “1”表示禁忌。蚂蚁按概率选择下一时段状态后, 按 2.2 节中人工鱼群算法的拥挤度概念, 计算该决策路径的拥挤度:

$$q_{gh} = 2\tau_{gh} / \sum_{s \notin Tabu} \tau_{gs} \quad (12)$$

式中:  $q_{gh}$  表示所选择路径的拥挤度, 与式 (9) 的阈值比较, 若  $q_{gh} < \delta(NC)$ , 则表示路径不太拥挤, 蚂蚁选择该路径从状态  $g$  转移到状态  $h$ 。否则, 表示该路径过于拥挤, 蚂蚁则在  $Tabu$  表之外的可行邻域内重新随机选择一种状态进行转移。每只蚂蚁走完一个调度周期后, 对信息素浓度的更新规约为:

$$\tau_{gh} = (1 - \rho)\tau_{gh} + \rho \sum_{k=1}^m \frac{Q}{Z_k} \quad (13)$$

式中:  $\rho$  为信息素蒸发度系数;  $Q$  为比例系数;  $Z_k$  为本次循环中全局最优 (机组总耗量最小) 路径。

### 3.3 排序和混合蚁群优化算法

排序法与混合蚁群算法相结合解决机组组合问题，先按 3.1 节的排序规则和邻域构成方法形成机组组合初始可行解，缩小蚁群算法搜索范围。再采用 3.2 节所提出的混合蚁群算法在可行邻域内寻优。算法的流程图如图 3 所示。

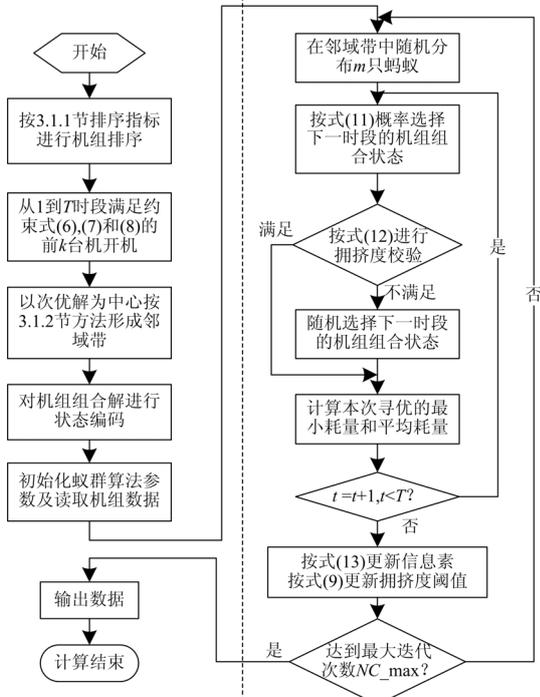


图 3 排序和混合蚁群算法流程图

Fig.3 Flow chart of the PL & HACO algorithm

## 4 算例仿真与结果分析

### 4.1 仿真参数

为验证算法有效性，在 PC 机上用 Matlab-7.0 编制算法程序。取文献[3]中 10 台机 24 时段系统进行仿真分析，机组参数、负荷需求等数据参考文献[3]。算法参数取：蚂蚁个数  $m=20$ ， $\alpha, \beta=1$ ， $\rho=0.3$ ， $Q=100$ ，拥挤度阈值变化系数  $c=0.02$ ，最大迭代次数为 150，初始信息素浓度  $\tau_0=1$ 。经济负荷分配采用文献[15]中的简化梯度法。

### 4.2 10 机系统算例

对 10 机系统用本文提出的算法进行仿真计算，将得到的结果与参考文献中提到的各种算法进行比较，结果见表 1。

表 1 各种算法下的 10 台机总耗量

Tab.1 Total consumption of 10-units by each algorithm

算法	LR <sup>[3]</sup>	HPSO <sup>[12]</sup>	GA	Hopfield-SA	SOE	本文
耗量	81 245.5	81 118.3	79 807	79 114	79 035	78 993

注：GA 为遗传算法；SA 为神经网络算法；SOE 为系统进化算法。

从表 1 可以看出，本文算法与其他几种算法相比，效果较好。文献[10-11]均提出了一种混合蚁群粒子群算法，其中文献[10]寻得最优解为 78 938.2 t，文献[11]为 79 010.1 t，较本文算法略好，但上述算法采用整个时段状态编码，蚁群搜索范围大。本文算法去掉排序和邻域环节，再次计算，需要大约 350 次迭代寻到最优解 79 031 t，耗时 372.14 s，比原算法速度慢。ACO-PSO<sup>[10-11]</sup>采用粒子群算法进行负荷分配，每次迭代比梯度法耗时大，整个寻优迭代过程需反复计算负荷分配，总体计算速度比本文算法慢。机组功率分配结果如表 2 所示。

表 2 10 机系统机组组合结果

Tab.2 Commitment results of 10-units system

时刻	机组出力 / MW								
	机组 1-3	机组 4	机组 5	机组 6	机组 7	机组 8	机组 9	机组 10	
1	0.0	96.2	148.7	171.7	202.0	411.8	486.8	482.7	
2	0.0	106.8	0.0	187.2	215.9	439.0	518.5	512.6	
3	0.0	103.5	0.0	182.4	211.6	430.5	508.7	503.3	
4	0.0	100.2	0.0	177.6	207.3	422.1	498.8	494.0	
5	0.0	95.3	0.0	170.4	200.8	409.4	484.0	480.1	
6	0.0	97.8	0.0	173.9	204.0	415.7	491.4	487.0	
7	0.0	0.0	0.0	180.2	209.6	426.7	504.2	499.1	
8	0.0	0.0	0.0	164.5	195.5	399.1	472.0	468.8	
9	0.0	0.0	0.0	139.7	173.0	355.3	421.0	420.8	
10	0.0	0.0	0.0	126.6	161.2	332.2	394.1	395.5	
11	0.0	0.0	0.0	0.0	166.2	342.0	405.4	406.2	
12	0.0	0.0	0.0	0.0	149.9	310.2	368.4	371.3	
13	0.0	0.0	0.0	0.0	149.9	310.2	368.4	371.3	
14	0.0	0.0	0.0	0.0	144.5	299.6	356.0	359.7	
15	0.0	0.0	0.0	0.0	141.8	294.3	349.9	353.9	
16	0.0	0.0	0.0	0.0	144.5	299.6	356.0	359.7	
17	0.0	0.0	0.0	0.0	158.1	326.1	386.9	388.8	
18	0.0	0.0	0.0	0.0	174.4	357.9	424.0	423.6	
19	0.0	0.0	0.0	0.0	198.8	405.6	479.6	475.9	
20	0.0	0.0	0.0	0.0	218.3	443.7	520.0	517.8	
21	0.0	0.0	150.0	0.0	213.7	434.7	513.5	507.9	
22	0.0	102.7	150.0	0.0	210.6	428.7	506.5	501.2	
23	0.0	107.5	150.0	0.0	216.9	440.9	520.0	514.6	
24	0.0	95.5	147.3	170.6	201.0	409.9	484.6	480.7	

### 4.3 结果分析

为验证人工鱼群算法拥挤度算子的作用，再用基本蚁群算法对该系统计算一次，将两次计算的收敛特性作对比，收敛曲线如图 4 所示。

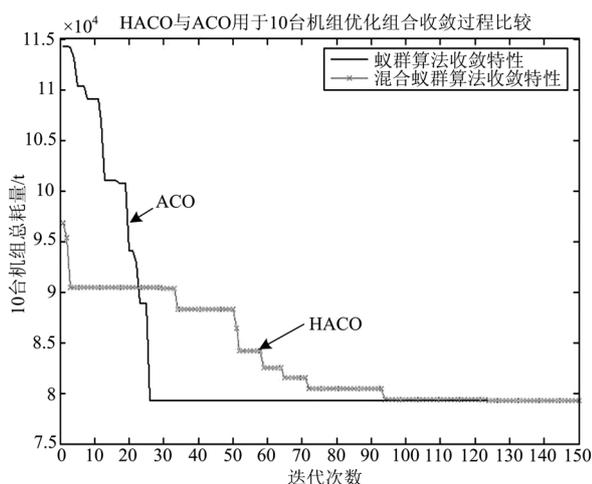


图 4 ACO 与 HACO 算法收敛过程

Fig.4 Convergence of ACO &amp; HACO algorithm

从图 4 可以看出,混合蚁群算法初期由于拥挤度因子的作用,寻优过程中随机决策下一时段的机组状态,而蚁群算法只在信息素浓度的指导下寻优,收敛速度快于前者,但陷入了局部极值点,在大约 35 次左右出现停滞,HACO 算法在大约 80 次左右还能搜寻到更优点,说明拥挤度算子的作用是有效的。ACO 算法寻得最优解为 79 308 t,耗时 71.522 s;HACO 算法寻得最优解为 78 993 t,耗时 84.843 s。后者计算速度略慢,但在可接受范围内。

## 5 结论

本文将优先级排序与混合蚁群算法用于机组优化组合问题,使蚁群算法搜索范围缩小,但不丢失最优解,充分利用启发式算法计算速度快的优势快速找到问题次优解,再在次优解邻域内用随机寻优方法寻找最优解。同时兼顾了实际系统对算法速度和精度的要求,该算法具有实用性。

将人工鱼群算法拥挤度的概念引入到蚁群算法的搜索过程中,解决了基本蚁群算法易陷入局部极值的问题。混合蚁群算法在迭代初期由于拥挤度算子的作用,随机决策下一时段机组的状态,收敛速度有所减慢,但不至于丢失最优解而陷入搜索停滞;迭代后期由于拥挤度阈值逐步增大而减弱了对算法寻优的指导作用,算法在信息素浓度的指导下快速收敛到全局最优解。

## 参考文献

[1] 陈皓勇,王锡凡. 机组组合问题的优化方法综述[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (4): 51-56.  
CHEN Hao-yong, WANG Xi-fan. A survey of optimization-based methods for unit commitment[J].

Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (4): 51-55.

[2] Senjyu T, Shimabukuro K, Uezato K, et al. A fast technique for unit commitment problem by extended priority list[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (2): 882-888.

[3] 韩学山,柳焯. 考虑发电机组输出功率速率限制的最优机组组合[J]. 电网技术, 1994, 18 (6): 11-16.  
HAN Xue-shan, LIU Zhuo. Optimal unit commitment considering unit's ramp-rate limits[J]. Power System Technology, 1994, 18 (6): 11-16.

[4] Yuan Gui-li, Liu Ji-zhen, Shi Guo-qing. Application of a genetic algorithm in the optimization-based unit commitment of the power plant[C]. //Proceedings of the 6-th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian(China): 2006.

[5] 吴金华,吴耀武,熊信良,等. 机组优化组合问题的随机tabu搜索算法[J]. 电网技术, 2003, 27(10): 35-38.  
WU Jin-hua, WU Yao-wu, XIONG Xin-yin, et al. Random tabu search with simulated annealing approach for the unit commitment problem[J]. Power System Technology, 2003, 27 (10): 35-38.

[6] 王喆,余贻鑫,张弘鹏. 社会演化算法在机组组合中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (4): 12-17.  
WANG Zhe, YU Yi-xin, ZHANG Hong-peng. Social evolutionary programming based unit commitment[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (4): 12-17.

[7] 胡家声,郭创新,曹一家. 一种适合于电力系统机组组合优化问题的混合粒子群优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (4): 24-28.  
HU Jia-sheng, GUO Chuang-xin, CAO Yi-jia. A hybrid particle swarm optimization method for unit commitment problem[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (4): 24-28.

[8] Shi Li-bao, Hao Jin, Zhou Jia-qi, et al. Ant colony optimization algorithm with random perturbation behavior to the problem of optimal unit commitment with probabilistic spinning reserve determination[J]. Electric Power Syst Res, 2004 (69): 295-303.

[9] Simon S P, Padhy N P, Anand R S. An ant colony system approach for unit commitment problem[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2006 (28): 315-323.

[10] Xiao Gang, Li Shou-zhi, Wang Xuan-hong, et al. A solution to unit commitment problem by ACO and PSO hybrid algorithm[C]. //Proceedings of the 6-th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian(China): 2006.

[11] 陈焯,赵国波,刘俊勇,等. 用于机组组合优化的蚁群粒子群混合算法[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 52-56.

(下转第 95 页 continued on page 95)

## 参考文献

- [1] CAI Zhi-yuan, YU Li, MA Shao-hua. An intelligent breaker with synchronous closing function based on DSP[C]. //The 30<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronic Society. Busan(Korea): 2004: 1536-1539.
- [2] 高婧, 郑建勇. 一种快速滤除衰减直流分量的新型递推傅氏算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(1): 54-57.  
GAO Jing, ZHENG Jian-yong. A new type of recursive Fourier algorithm of fast filtering out decaying DC component[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2003, 15(1): 54-57.
- [3] Wu J K, He B T, Yu Y, et al. A novel method for removal of DC component in non-sinusoidal signals of power systems[C]. //Power Systems Conference and Exposition, IEEE. 2004: 1190-1197.
- [4] Sidhu T S, Zhang X, Albasi F, et al. Discrete-fourier-transform-based technique for removal of decaying DC offset from phasor estimates[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(6): 745-752.
- [5] Balamourougan Vinayagam, Sidhu Tarlochan S. A new filtering technique to eliminate decaying DC and harmonics for power system phasor estimation[C]. //2006 IEEE Power India Conference. 2006: 575-579.
- [6] Guo Yong, KeZunovic M, Chen De-shu. Simplified algorithms for removal of the effect of exponentially decaying dcoffset on the fourier algorithm[J]. IEEE Trans Power Del, 2003, 18(3): 711-717.
- [7] Lee Dong-Gyu, Kang Sang-Hee, Nam Soon-Ryul. New modified fourier algorithm to eliminate the effect of the DC offset on phasor estimation using DFT[C]. //IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition, part 2. 2008: 983-988.
- [8] Cho Yoon-Sung, Lee Chul-kyun, Jang Gilsoo, et al. An innovative decaying DC component estimation algorithm for digital relaying[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 73-78.
- [9] 齐先军, 丁明, 温阳东. 一种完全滤除衰减直流分量的短数据窗改进全波傅氏算法[J]. 继电器, 2005, 33(17): 14-16.  
QI Xian-jun, DING Ming, WEN Yang-dong. An improved short data window full-wave fourier algorithm for completely filtering decaying DC componen[J]. Relay, 2005, 33(17): 14-16.
- [10] Lee Dong-Gyu, Kang Sang-Hee, Zoran Soon-Ryul Nam. New modified fourier algorithm to eliminate the effect of the DC offset on phasor estimation using DFT[C]. //2008 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition, part 2. 2008: 983-988.

收稿日期: 2009-11-04; 修回日期: 2009-12-23

作者简介:

张小鸣(1958-), 男, 博士, 教授, 从事数字继电保护系统研究; E-mail: xm0298@163.com

费雨胜(1982-), 男, 硕士研究生, 从事继电保护研究。

(上接第 89 页 continued from page 89)

- CHEN Ye, ZHAO Guo-bo, LIU Jun-yong, et al. An ant colony optimization and particle swarm optimization hybrid algorithm for unit commitment based on operate coding[J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 52-56.
- [12] 黎静华, 韦化. 基于内点法的机组组合模型[J]. 电网技术, 2007, 31(24): 28-34.  
LI Jing-hua, WEI Hua. A unit commitment model based on interior point method[J]. Power System Technology, 2007, 31(24): 28-34.
- [13] 黎静华, 韦化. 求解机组组合问题的领域搜索法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 33-40.  
LI Jing-hua, WEI Hua. Unit commitment via local search point method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 33-40.
- [14] 张秋亮, 程晓蓉, 等. 人工鱼群算法在配电网重构中的应用研究[J]. 华东电力, 2008, 36(5): 30-33.  
ZHANG Qiu-liang, CHENG Xiao-rong, et al. Application of artificial fish swarm algorithm to power distribution system reconfiguration[J]. East China Electric Power, 2008, 36(5): 30-33.
- [15] Hadi Saadat. 电力系统分析[M]. 二版. 北京: 中国电力出版社, 2008: 161-197.

收稿日期: 2009-11-06; 修回日期: 2009-12-15

作者简介:

王剑(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化运行与控制、优化算法在电力系统中的应用; E-mail: sword\_king@126.com

刘天琪(1962-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化。