

文章编号: 1005 - 6548(2005)02 - 0112 - 04

蚁群算法在电力系统机组优化组合中的应用研究^{*}

王 琨¹, 刘青松²

(1. 山西大学工程学院, 山西 太原 030013; 2. 嘉兴学院电气工程系, 浙江 嘉兴 314001)

A Study On the Application of Colony Algorithm to Optimal Generating Unit Commitment of Power System

WANG Kun¹, LIU Qing-song²

(1. Engineering College of Shanxi University, Taiyuan 030013, China; 2. Dept. Electrical Engineering, Jiaxing University, Jiaxing 314001, China)

摘 要: 采用模拟进化优化算法——蚁群优化算法来求解机组最优启停问题。引入了状态、决策、路径等概念,把机组最优启停问题设计成蚁群算法模式,通过附加惩罚项来处理各种约束,用 tabu 表限制不满足约束的状态,使得蚂蚁的搜索总在可行域内进行,对算法的搜索进程起到了有效的引导作用。仿真证明利用蚁群优化算法求解机组最优启停问题是可行的、有效的。

关键词: 电力系统优化运行;机组最优启停;蚁群优化算法

中图分类号: TM761⁺.2 **文献标识码:** A

Abstract: The optimal unit commitment is solved via the Ant Colony Optimization algorithm in this paper. Concepts of a state and a decision are introduced, and the definition of a path is proposed. Thereby, the unit commitment problem is designed with a simulation to ACO. the methods of an additive penalty item are developed to deal with all kinds of constrains of UC. First, the tabu list is used to restrict states which don't satisfy the constrains. Numerical results demonstrate the feasibility and availability of the algorithm.

Key Words: optimal operation of power systems; unit commitment; ant colony optimization

发电机组优化组合是电力系统短期运行调度的 1 项任务。它是在满足系统和机组各种不同约束的条件下,合理安排机组的启停,使整个系统在未来周期(24 h,甚至 168 h)内发电机组的运行费用最小。机组最优组合、启停问题是 1 个高维数、非凸的、离散的、非线性的优化问题,很难找出理论上的最优解,但因它能带来显著的经济效益,国内外很多学者一直在积极研究,提出各种方法来解决这个问题,如优先顺序法、动态规划法、整数规划和混合整数规划法、分支定界法、拉格朗日松弛法等。其中,优先顺序法简单实用,易于进行人工调整,但因是逐次优化,可能会错过一些更好的方案。动态规划法根据选取变量的方法不同可以构成几种不同的算法,如 并列机组经济组合的动态规划算法,该方法可给出各种负荷下的最优运行状态和运行耗量,但不便考虑启动耗量和时间段的关联;多时段动态规划算法可考虑时变的启动耗量,但由于状态和可选的路径较多,使得该算法难以实用,为此很多学者提出各种措施对问题进行简化;拉格

* 收稿日期: 2005 - 03 - 11 修回日期: 2005 - 03 - 18

作者简介: 王 琨(1965 -),男,山西芮城人,讲师,电力系统自动化教学与研究;
刘青松(1965 -),男,山西汾阳人,副教授,电力系统自动化教学与研究。

朗日松弛法,随着机组数量的增加,计算量线性增长。近年来,已有一些研究者将神经网络法、模拟退火法、遗传算法、专家系统等应用于发电机组的优化问题,并取得了一些成果。

蚁群优化算法(ACO)是最近几年才提出来的1种新型的模拟进化优化算法。本文在研究ACO算法的基础上,提出了1种适合于发电机组优化组合的改进蚁群优化算法。该算法可以灵活地处理各种约束,为这一优化问题的有效解决提供了1种有效的途径。计算表明,该方法是可行的、有效的。

1 发电机优化组合及最优启停问题的描述

发电机组优化组合的目标是使整个系统在计划周期内的总费用为最小,其目标函数可描述成

$$\min F = \sum_{t=1}^H \sum_{i=1}^n [F_i(P_{i,t})] u_{i,t} + F_{si}(t) u_{i,t} (1 - u_{i,t}) \quad (1)$$

式中: H 为时段总数; n 为发电机组总数; $F_i(P_{i,t})$ 为第 i 台机组的发电费用; $F_{si}(t)$ 为机组启动费用; t 为机组的停运时间; $u_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的状态, $u_{i,t} = 1$ 表示运行状态, $u_{i,t} = 0$ 表示停机状态; $P_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的有功功率。

在机组优化组合中必须满足以下约束条件:

a. 电力平衡约束

$$\sum_{i=1}^n u_{i,t} P_{i,t} - C_t - P_{Lt} = 0 \quad (2)$$

式中: C_t 为时段 t 系统总负荷; P_{Lt} 为时段 t 系统的网损。

b. 热备用约束

$$\sum_{i=1}^n P_{imax} u_{i,t} - (C_t + P_{Rt} + P_{Lt}) \geq 0, \quad t = 1, 2, 3, \dots, H \quad (3)$$

式中: P_{Rt} 为时段 t 系统所需功率储备。

c. 机组发电功率约束

$$P_{imin} \leq P_{i,t} \leq P_{imax} \quad (4)$$

d. 最小开机时间和最小停机时间的约束

$$(i_{i,t} - T_{iKmin})(u_{i,t} - u_{i,t-1}) \geq 0, \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, n, \quad t = 1, 2, \dots, H;$$

$$(i_{i,t} - T_{iTmin})(u_{i,t} - u_{i,t-1}) \geq 0, \quad (6)$$

$$i = 1, 2, \dots, n, \quad t = 1, 2, \dots, H。$$

式中: $i_{i,t}$ 为发电机组 i 在时段 t 已连续开机的时间; T_{iKmin} 和 T_{iTmin} 为发电机组 i 的最小开机时间和最小停机时间。

e. 发电机组输出功率速度约束。

$$r_{id} \quad t \leq (P_{i,t} - P_{i,t-1}) \leq r_{iu} \quad t, \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, n, \quad t = 1, 2, \dots, H。$$

式中: r_{id} 和 r_{iu} 为发电机组每分钟输出功率所允许的最大下降和上升速度; t 为每一时段所延续的时间,如 $t = 60 \text{ min}$ 。

f. 线路 N 安全性约束

$$P_L \leq P_{Lmax} \quad (8)$$

式中: P_L 线路有功功率; P_{Lmax} 线路传输功率极限。

本文中发电机组的发电费用采用发电功率的二次函数表示,即

$$F_i(P_{i,t}) = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i \quad (9)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 为常数。

费用特性有2种模型:

a. 机组从冷却状态启动,启动费用表示为

$$F(t) = F_0(1 - e^{-t/a}) + F_t \quad (10)$$

式中: F_0 为锅炉冷却启动费用; F_t 为启动费用常数; a 为机炉的热时间常数; t 为机组停役小时数。

b. 机组从“压火”状态启动,其启动费用表示为

$$F(t) = F_0 t + F_t \quad (11)$$

式中: F_0 为压火 1 h 所需的启动费用。

2 蚁群优化算法及其改进

ACO 算法由意大利学者 M Dorigo 等人提出,众多研究已经证明 ACO 算法是 1 种新的全局优化搜索算法,以其简单、高效搜索、强鲁棒性和适用于并行处理等优点而得到广泛应用。

ACO 算法是模拟自然界中真实蚁群的觅食行为而形成的 1 种模拟进化算法。它采用有记忆的人工蚂蚁,通过个体间的信息交流与相互协作来找到从蚁穴到食物源的最短路径。ACO 算法也是 1 种迭代算法,但它并不是简单的迭代,当前的迭代总是利用以前迭代的信息,即模拟了信息正反馈原理。正是正反馈原理和启发式算法相互作用,使得 ACO 算法有较强的全局收敛性。其步骤为:

a. 确定蚁群算法模型;

b. 设定初始状态、搜索策略、路径长度;

c. 根据策略选择下一状态;

d. 如果满足停止搜索判据,则迭代停止,输出问题的最优解,否则,转向 e.;

e. 更新路径信息量、累加路径长度,继续迭代转向 b.。

ACO 算法具有很强的发现较好解的能力,但也存在一定的缺陷,如搜索时间较长,易出现停滞现象,即搜索到一定程度后,所有个体发现的解完全

一致,不能对解空间进一步进行搜索,容易陷于局部最优解。为此,本文从随机优化的角度出发对基本 ACO 算法进行了如下改进,从而可有效地缓解停滞现象,获得全局最优解。

2.1 自适应调整路径信息

由于迭代过程中,路径上的信息量不断更新,因此在最初的几次迭代中,为使较好路径上信息量的作用更明显,设定了 1 个调整因子,初始几次迭代中,取值应较大些,以提高算法的收敛性;同时,为防止算法早熟,使其值在迭代过程中逐渐衰减。本文采用指数下降法确定:

$$= e^{b/K}, \quad K = 1, 2, \dots, M, \quad b > 0;$$

$$ij = [ij] \quad (12)$$

式中: ij 为原路径上的信息量; ij 为调整后的路径上信息量; K 为当前迭代次数; M 为最大迭代次数; b 为尺度因子。由式(12)可知,随着迭代次数的增大, ij 的值最终趋近于 1,而系数 b 的大小决定了曲线趋近于 1 的快慢程度。

2.2 转移策略动态定标

在基本 ACO 算法中如果放到某条路径上的信息素越多且路径越短,则该路径的转移概率越大,那么该路径被蚂蚁选中的概率就越大,蚂蚁从 1 个状态出发,按照状态转移规则选择下 1 个状态,类似于遗传算法中的“轮盘赌”法。鉴于这样 1 层物理含义,本文设计如下转移策略并动态定标:即对于未成熟收敛现象,可降低转移系数;对于随机漫游现象,可通过提高转移系数,提高收敛速度。

$$C_{ij}(k) = \begin{cases} [ij(k)] & ij, j \notin \text{tabu}(k); \\ 0. & \end{cases}$$

否则 $C_{ij}(k) = AC_{ij}(k) + B$ 。

式中: $C_{ij}(k)$ 为原转移系数; $C_{ij}(k)$ 为定标后的转移系数; A 、 B 定标系数。

tabu 表的作用是记录蚂蚁走过的城市,蚂蚁在后面的搜索中不能再选择这些已记录在 tabu 表中的城市,因此 tabu 表的作用实际上是限制蚂蚁的转移路径。考虑到这一点,本文也相应的用 tabu 表来限制不满足某些约束的状态。

3 蚁群优化算法确定机组组合

ACO 算法中,每个优化方案是由 1 只蚂蚁走过的路径表示的。对于机组最优启停问题,可把机组投入运行而另 1 些机组不投入运行所形成的机组

组合构成 1 个状态;从某时段(h)机组组合的某状态到下一时段机组组合的另 1 状态形成 1 个决策;从时段 1 到时段 T 的所有时段中,每 1 时段任取 1 种机组组合状态,这样组成的 1 个决策集合称为 1 条路径。这样就可以把机组最优启停问题设计成 ACO 算法的模式,相应的机组最优启停问题的目标函数问题转化为下列模式,即

$$\min \left(\sum_{i=1}^{n-1} tc(S_{(i)}, S_{(i+1)}) + tc(S_{(n)}, S_{(1)}) \right)。$$

式中: $tc(S_i, S_j)$ 表示从状态 i 到状态 j 的转移费用(包括机组的启动费用及惩罚费用); (i) 表示第 i 时段所有可选状态集合,由于机组的启动费用是机组停机时间的函数,因此路径及其长度在计算过程中是动态变化的。机组优化是有约束的最小化问题,可通过惩罚方法将该问题转化为非约束问题:

$$\min F + \sum_k R_k。$$

式中: k 为第 k 个约束的惩罚系数; R_k 为第 k 个约束形式

$$R_k = \begin{cases} |g_k(x)| & \text{当 } g_k(x) \text{ 为等式约束时;} \\ \max(0, g_k(x)) & \text{当 } g_k(x) \text{ 为不等式约束时。} \end{cases}$$

式中包括了各种约束关系,操作如下:

a. 进行功率平衡时,采用直流潮流 B 系数法计算网损,利用协调方程式法进行调度,以满足功率平衡约束。

b. 对于满足旋转备用和机组最小允许开、停机时间约束的状态,在 tabu 表中将其置 1,否则置 0。利用 tabu 表一方面可有效地限制状态及转移路径数,另一方面使得搜索总是在可行解中进行,对蚂蚁的有效搜索起到了一定的引导作用,避免了不可行解的产生。

c. 机组出力上下限约束、机组爬坡速率约束。进行经济调度时,当一台机组出力越限时,将其出力定在限值处,然后对剩余机组重新调度直到所有机组均满足出力上下限约束并保持功率平衡。

对于机组优化的过程如下:

a. ACO 的初始化: $NC = 1$, $ij = 0$; $ij = 0$; $length_k = 0$ 。

b. 进入下一时段 $t = t + 1$,判断是否为最终时段 T ;若是转到 d.,否则转到 c.。

c. 形成各蚂蚁的当前时段的 tabu 表,并计算相应的启动费用作为 ACO 中的路径长度。按状态转移规则选择下一状态,将蚂蚁 k 移至 j 。进行经济

调度,计算此状态下各机组的出力及发电费用。

d. 记录得到的最短路径,并按全局信息更新规则来更新路径信息。

e. 如果 $NC < NC_{\max}$, 并且未出现停滞现象, 则令 $t = 0$, 转到 b., 进行下一次迭代, 否则停止。

其中 k 为蚂蚁编号, 蚂蚁总数为 m ; $length_k$ 记录蚂蚁 k 当前走过的路径长度; NC 为迭代次数; NC_{\max} 为最大迭代次数。

4 实例计算

按本文提出的改进 ACO 算法,利用 C/C++ 语言编制开发出机组组合程序,以文献[3]和[4]所

提的实际系统进行了机组优化组合。

文献[4]给出的系统未给出网络数据,故计算时未考虑网损;利用本程序计算 24 个时段的总费用为 \$79425. 460,其中发电费用 \$7707. 242,启动费用 \$2351. 218。与文献中的结果基本相同。

表 1 列出利用本文方法计算文献[3]给出的 4 个系统的计算结果,其中,D 为我国黑龙江省东部电网。E 为文献[11]给出的某实际系统,该系统有 61 台机组,其中 18 台可周期性开停,假设规划周期为 24 h,时间间隔为 1 h,最小连续停机、最小连续运行时间都取 2 h,旋转备用 180 MW。

表 1 计算结果一览表

系统序号		A	B	C	D	E *
机组台数		11	10	18	18	61
文献 [3] 结果	运行耗量	83 454. 68	78 834. 96	19 864. 76	4 297. 54	27 252. 312
	启停耗量	156. 428	357. 71	218. 429	42. 84	91. 84
	总耗量	83 611. 108	79 192. 67	20 083. 189	4 340. 38	27 344. 152
蚁群 算法 结果	运行耗量	83 456. 703	78 837. 52	19 872. 05	4 298. 58	27 252. 403
	启停耗量	153. 692	354. 67	198. 36	42. 69	91. 647
	总耗量	83 610. 395	79 192. 19	20 070. 41	4 341. 27	27 344. 05

5 结论

a. 本文引入状态、决策等概念,提出路径的概念,并利用上述概念把机组最优启停问题设计成蚁群算法模式,从而可方便地利用蚁群优化算法来求解机组最优启停问题。

b. 由于蚁群优化算法处理的是无约束优化问题,对于机组最优启停这一约束优化问题,本文通过附加惩罚项来处理各种约束。用 tabu 表限制不满足旋转备用约束和机组最小启、停时间约束的状态,这样使得蚂蚁的搜索总在可行域内进行,对算法的搜索进程起到了有效的引导作用。

c. 数值仿真证明利用蚁群优化算法求解机组最优启停问题是可行的、有效的。

参考文献:

[1] Marco Dorigo. Vittorio Maniezzo. Alberto Colorni. Ant system optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transactions on system .1996. 26(1) ,29 ~ 41.

[2] 李文沅 . 电力系统安全经济运行—模型与方法[M]. 重庆:重庆大学出版社,1989.

[3] 王剑奇,张伯明,赵子臣 . 动态比较法确定机组的最优组合[J]. 中国电机工程学报,1996,16(4) .

[4] A K Ayoub. A. D. Patton. Optimal Thermal Generating Unit Commitment. IEEE Transactions on Power Apparatus and System,1970 ,PAS - 89(2) .

[5] Allen J. Wood. Bruce f. Wollenberg. Power System Operation and Control [M]. Power Technologies. Inc. Schenectady. New York. 1984.

[6] Chuan Ping Cheng. Chuan Wen Liu. Chuan Chang Liu. Unit Commitment by Lagrangian Relaxation and Genetic Algorithm. IEEE Transaction on power system 1995 ,15 (2) .

[7] 赵宏伟,任 震 . 计及线路安全约束的机组最优投入[J]. 电力系统自动化,1997 ,21(5) .

[8] Kir Keun Yu. C S Chou. Y H Song. Applcation of the ant Colony search algorithm to short - term generation scheduling Problem of the rmal units[J]. Power System Technology , 1998(1) .

[9] 张纪会,徐心和 . 带遗忘因子的蚁群算法[J]. 系统仿真学报,2000(2) .

[10] 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,1997 ,3(4)

[11] 刘青松 . 改进遗传算法确定发电机组的优化组合[J]. 电网技术,1998 ,22(12) .

[责任编辑:薛太林]