

基于智能混合算法的经济调度问题及其参数调整方法*

罗中良¹, 易明珠², 周有平¹, 刘小勇³

(1. 佛山科学技术学院电气工程及其自动化系, 广东 佛山 528000;

2. 中山大学岭南学院, 广东 广州 510275;

3. 西安交通大学自动控制系统, 陕西 西安 710049)

摘要:带阀点效应的经济调度问题, 属非凸集的发电成本最小化问题, 具有不连续、不可微分且易陷入局部最优解。为了获得整体近似最优解, 提出采用蚁群算法, 搜索发电机可运行状态的最优组合, 对蚁群算法的数学模型进行分析, 讨论算法参数的调整方法, 给出具有普遍意义的收敛性定理。在此求解过程中, 以每只蚂蚁来表示符合限制条件的某个可运转状态的发电机组组合并以序列二次规划法来求解传统的经济调度问题。通过三部机组的数值模拟, 验证其正确有效性。

关键词:蚁群算法; 序列二次规划法; 经济调度; 阀点效应

中图分类号: TP392 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2008) 01-0033-05

经济调度问题是在各运转发电机组电力输出上、下限不等式约束及机组电力输出总和与负载需求相等的等式约束前提下, 使发电成本最小化的最优化问题。传统的经济调度问题, 其发电成本函数仅考虑为凸集函数, 使其最优化问题可由以梯度搜索、线性规划法、非线性规划法、动态规划法、序列二次规划法等求解, 但它们或存在难以得到最优解, 或高维问题易陷入维数灾^[1]。但发电机组实际运行时, 其发电成本曲线将出现含涟波形状的阀点效应, 并非凸集的发电成本函数曲线, 其特征为不连续、不可微分, 这以传统方法求解很易陷入局部最优解^[2-4]。新的优化算法如遗传算法、模拟退火算法、混沌优化算法、蚁群算法等^[5], 它们在处理带阀点效应非凸集非线性问题, 取得比较满意的成果。但存在计算复杂、收敛速度低, 易陷入局部最优点, 且只适合离散组合优化而不适合连续变量的优化等个别问题, 使得应用于实际工程领域受到限制。

本文利用蚁群算法全局优化能力, 特别是对离散组合优化问题的良好能力^[5-7], 同时利用序列二次规划法的整体收敛性同时保持局部超一次收敛性^[8-10], 提出混合蚁群算法及序列二次规划法来求解带阀点效应的经济调度问题。即通过模拟真实蚂蚁的觅食行为的蚁群算法找到发电机组可运转状态的最优组合, 再以二次规划法来求解传统特性的

经济调度问题, 同时针对蚁群算法讨论其参数对全局搜索能力与收敛速度的影响, 得到算法参数的调整方法与算法全局最优收敛性定理, 为优化算法的设计提供指导作用。

1 问题描述

带阀点效应的电力系统经济调度问题是求解发电成本的最优化问题, 模型为目标函数^[3,11]:

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^N F_i(P_{g,i}) &= \sum_{i=1}^N F_i(P_{g,i}) = \\ &a_i P_{g,i}^2 + b_i P_{g,i} + c_i + |e_i \sin(f_i(P_{g,i} - P_{g,i}))| \\ \text{s. t. } P_{g,i} &\leq P_{g,i} \leq \overline{P_{g,i}}, i = 1, 2, \dots, N \\ \sum_{i=1}^N F_i(P_{g,i}) &= P_d + P_l \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $F_i(P_{g,i})$ 为机组 i 的非凸集的发电成本函数; $P_{g,i}, P_{g,i}, \overline{P_{g,i}}$ 分别为其电力输出、输出下限值和输出上限值, N 为总机组数; a_i, b_i, c_i 为发电成本特征系数; e_i, f_i 为带阀点效应须增加的发电成本函数的系数; P_d 为负载需求 (即总负荷); P_l 为系统网损, 本文不考虑系统网损, 即 $P_l = 0$ 。

本文以文献 [2] 的研究对象为例, 图 1 为文献 [2] 中三部机组中第 1 部机组的发电成本曲线。求解开始时先找到整条曲线在不连续处的分界

* 收稿日期: 2007-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60605009)

作者简介: 罗中良 (1968年生), 男, 副教授; E-mail: hk3333@163.com

点, 而每个分界点之间即为该机组的一个状态。经分析后, 图 1 有 7 个分界点 (精确到小数点后四位), 所以有 6 个状态, 左边的分界点即该状态电力输出的下限值, 而右边的分界点有该状态电力输出的上限值。三部机组分界点所对应的状态其电力输出上、下限值如表 1 所示。

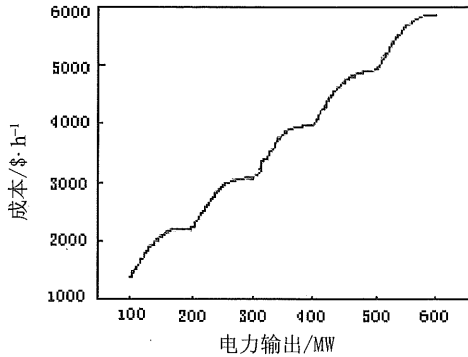


图 1 带阀点效应的发电机组成本曲线

Fig. 1 Cost-curve of the generator with valve-point effect
机组 1 (100 ≤ P₁ ≤ 600MW)

表 1 三部机组各状态下电力输出上、下限值(MW)

Tab. 1 Max-min Power Outputs of the three generators

S1	199.7331/100	174.7998/100	99.8666/50
S2	299.4662/199.7331	249.5997/174.7998	149.7331/99.8666
S3	399.1993/299.4662	324.3995/249.5997	199.5997/149.7331
S4	498.9324/399.1993	399.1993/324.3995	200/199.5997
S5	598.6655/498.9324	400/399.1993	
S6	600/598.6655		

根据表 1, 以 2 只蚂蚁为例来说明从机组 1 至机组 3 其可能的状态选择过程, 如图 2 所示。其中蚂蚁 1 其对应于机组 1、机组 2 及机组 3 的可能运转状态组合 {s2, s4, s3}, 而蚂蚁 2 的状态组合则为 {s6, s2, s1}。本文每个状态之组合须先筛选以确认是否满足约束条件。若满足才可能成为可运转状态, 也才可由 SQP 求得一组调度解。

2 问题求解方法

本文以混合蚁群算法及序列二次规划法求解上述经济调度问题。求解过程中, 以每只人工蚂蚁来表示符合约束条件的某个可运转状态的发电机组组合并以序列二次规划法来求解传统特性的经济调度问题。

2.1 蚁群算法

蚁群算法源自昆虫群体智慧的模拟智能理论, 已成功的应用在 TSP 问题、二次分配问题等。同时也获得专家、学者的青睐, 纷纷应用于各自的领

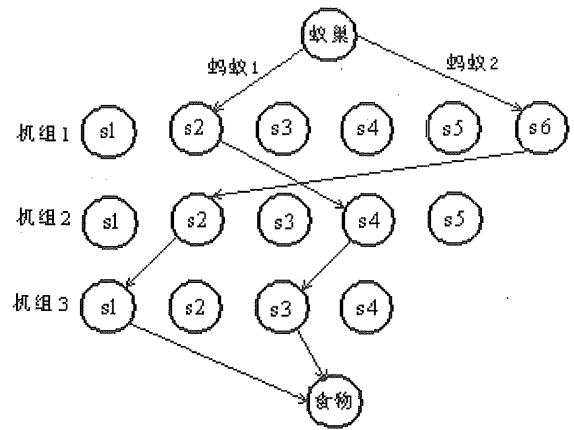


图 2 蚂蚁可能选择状态过程

Fig. 2 Schematic diagram of ants selecting the states of generators

域上^[5-7]。蚁群算法是模仿蚂蚁在觅食, 寻找最短路径的行为, 而发展出来的启发式方法。动物行为专家发现几乎全盲的蚂蚁, 透过一种称 Pheromone 的分泌物作为信息素来进行群体间接通讯, 具有正反馈的信息素轨迹的增强使得所有蚂蚁最后都能选择最短路径。蚁群算法能够成功搜索整体近似最优解, 主要在于概率选择技巧、局部与整体信息素更新机制三部分。

2.1.1 概率选择技巧 参考文 [4, 6, 7], 本算法设第 t 次迭代时人工蚂蚁 k 在机组 x 的第 i 个运转状态, 其选择下一个机组 y 的第 j 个运转状态的概率为:

$$kp_{i \rightarrow j}^{x \rightarrow y}(t) = \frac{(\tau_{i \rightarrow j}^{x \rightarrow y}(t))^\alpha}{\sum_{j \in y} (\tau_{i \rightarrow j}^{x \rightarrow y}(t))^\alpha} \quad (2)$$

$\tau_{i \rightarrow j}^{x \rightarrow y}(t)$ 为路径 $i \rightarrow j$ 上的信息素总量, 本文表示所有机组其全部可运转状态之信息素矩阵。 α 为信息启发因子, 它代表信息素在选择概率上的作用。由上式可知信息素决定概率的计算, 且对于算法具有正反馈的功能。使得越短越多蚂蚁行走过的路径会积累更多的信息素, 解的性能也将持续改善。本文先挑出式 (2) 的向量元素中排列最大值的前两个状态, 再从当中随机任选其一作为下一部机组的状态。

信息素更新机制本文采用局部和整体更新机制, 一方面在路径上蒸发掉部分的信息素 (局部更新机制); 另一方面则要在较短的路径上积累较高的信息素 (整体更新机制)。

2.1.2 局部信息素更新机制 本文中, 当某只蚂蚁在每次迭代建立一个完整解之后, 其走过的路径上 (机组运转的状态组合) 的信息量, 依据局部信息素更新机制进行更新。其数学式如下:

$$\tau_{i \rightarrow j}^{x \rightarrow y}(t+1) = (1 - \rho)\tau_{i \rightarrow j}^{x \rightarrow y}(t) + \tau_{i \rightarrow j}^{x \rightarrow y}(0) \quad (3)$$

其中, $\rho \in (0, 1]$ 为信息素挥发系数。 $\tau_{i \rightarrow j}^{x \rightarrow y}(0)$ 为初始信息素, 一般为一小正数。更新机制目的是为了随后的众多蚂蚁能找到更多不同的解, 是搜索到更多不同机组可运转状态的组合, 以此找到更优解。

2.1.3 整体信息素更新机制 当所有蚂蚁在每次迭代分别建立一个完整解之后, 则对于其中最优解的那只蚂蚁其所走过的路径 (即某个可运转状态的发电机组), 再一次更新信息素, 其公式为:

$$\tau_{i \rightarrow j}^{x \rightarrow y}(t+1) = \tau_{i \rightarrow j}^{x \rightarrow y}(t) + \frac{q}{\min\{F_k, k \in m\}} \quad (4)$$

其中, q 为一正系数, m 为蚂蚁数量, $\min F_k$ 为所有蚂蚁在第 t 次迭代时的可运行状态发电机的最优组合。在此基础上经 SQP 求解其传统的经济调度之发电成本。

2.1.4 算法参数调整方法及收敛定理 目前蚁群算法的效果一般以应用实例来验证, 其收敛性很有人加以讨论, 本文为了分析蚁群算法的收敛性, 先分析算法是非齐次的马氏链, 然后给出其收敛性定理, 根据收敛性定理很容易选择蚁群算法的参数, 这为算法的设计提供一定的理论依据。

(1) 信息素挥发系数 ρ 的调整。

从信息素挥发和更新机制可看出, 挥发系数大, 寻找解的能力越强, 有利于全局寻优; 挥发系数小, 则收敛速度快, 但容易陷入局部最优。显然, 通过调整挥发系数的适当变化可以兼顾解的质量和收敛速度。本文调整方法是迭代初始阶段, 信息素挥发系数较大, 这样有利于避免局部最优情况, 随着迭代次数的增加, 在前期全局寻优的基础上使挥发系数变小, 这样有利于提高收敛速度, 从而保证算法能够达到全局优化和收敛速度的提高。

设 $\tau(t)$ 为迭代 t 次后各路径上的信息素总称, $\hat{s}(t)$ 为迭代后搜索到的最优运行机组状态组合 (称为最优路径), 对应的目标函数值为 $\hat{f}(t)$ 。定义随机过程 $X(t) = \{\tau(t), \hat{s}(t), \hat{f}(t)\}$, ($t = 1, 2, \dots$)。从蚁群算法的搜索过程, 每只蚂蚁构造 $s(t)$ 解的过程是根据式 (2) 的概率选择的, 这仅仅依赖于 $\tau(t-1)$, 由 $s(t)$ 确定 $\hat{s}(t)$ 和 $\hat{f}(t)$, 再由 $s(t), \hat{s}(t)$ 以及 $\tau(t-1)$ 根据信息素更新规则确定 $\tau(t)$ 。由此可知, 随机过程 $X(t)$ 仅依赖于新的状态和当前状态, 但转移概率依赖于 t 。因此, $X(t)$ 是非齐次马氏链。注意 $\{\tau(t)\}$ 并不是马氏链, 因为 $\tau(t)$ 并不仅仅依赖于 $\tau(t-1)$ 。根据 $X(t)$ 是非齐次马氏链, 限于篇幅, 本文不加证明的直接给出

算法的收敛性定理。

定理 对于任意的 $t \geq N, N \in Z^+$, 如果存在 $\tau_{\min}(t) > 0$ 使得 $\tau_{i \rightarrow j}(t) \geq \tau_{\min}(t) > 0$, 且 $\sum_{l=1}^{\infty} \rho_l = \infty$, 则上述非齐次马氏链当在 $t \rightarrow \infty$ 时, 以概率 1 逼近最优状态 $(\tau_{k \rightarrow l}[s^*], s^*, f^*)$, 其中 s^* 为最优发电机组运转状态组合, f^* 为目标函数最优值, $\tau_{k \rightarrow l}[s^*] = \begin{cases} \tau_{\max}, & \text{if } (k, l) \in s^* \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$

定理表明在满足给定约束条件的信息素挥发系数情况下, 算法能以概率 1 逼近最优状态 (最优路径), 即找到最优解, 且各路径上的信息素分布呈现最优路径上的信息素达到最大值, 其它路径趋于零。其中信息素挥发系数可以根据算法的需要在全局优化和收敛速度之间折衷而进行变化, 于是定理可适应蚁群算法的各种信息素挥发系数的情况, 即上述定理对蚁群算法的收敛性具有普遍意义。

(2) 蚂蚁数量 m 的选择。

单个蚂蚁在一次循环中所经过的路径表现为问题可行解中的一个解, m 只蚂蚁的路径表现为一个可行解子集。显然子集越大 (即蚂蚁数量越大) 可以提高算法的全局搜索能力, 但 m 过大使大量曾被搜索过的解 (即经过的路径) 上的信息素变化比较平均, 信息正反馈作用不明显, 搜索的随机性虽然加强了, 但收敛速度下降了。反之 m 越小, 则收敛速度加快, 但全局搜索能力降低, 易出现过早停滞现象, 因此, 具体选择 m 大小要在全局搜索能力和收敛速度之间折中。作者实践表明当问题模不大时可相对模大小适当增加蚂蚁的数量, 反之则相对模大小适当减小蚂蚁数。

(3) 信息启发因子 α 的选择与调整。

α 反映路径上残留信息素对蚂蚁在搜索路径过程中指导的重要性, 其值越大反映了蚁群在路径选择中选择以往走过路径的可能性越大, 随机性减弱, 易使蚁群的搜索过程过早陷入局部最优, 全局搜索能力下降, 在具体选择时也要适当在上述两性能之间进行合理折中。

当然上述两参数也可以在算法运行中动态调整, 根据其对于算法全局搜索能力与收敛速度的影响并参照信息素挥发系数的调整方法进行, 从作者实践经验得到信息素挥发系数对算法的性能影响最明显, 故此重点讨论其调整方法。

2.2 序列二次规划法

每次迭代后, 对于所有蚂蚁 (每只蚂蚁表示找到符合约束条件的某个可运转状态的发电机组), 分别用 SQP 求解传统的经济调度问题。SQP

在解决具有整体收敛性的同时具有保持局部超一次收敛性, 在解决非线性规划问题具有优越的性能, 得到广泛应用, 具体可参考文 [10]。

2.3 混合算法步骤

根据上面的分析, 混合算法可用下列步骤进行描述。

Step1: 系统初始化, 即读取系统资料及设定相关算法参数。

Step2: 找到所有符合约束条件的可运转状态的发电机组组合, 开始让每只蚂蚁随机选择各发电机某一状态组合, 并通过 SQP 建立完整的初始解。

Step3: 对每只蚂蚁随机任选首部机组的某一状态, 然后依概率选择技巧, 让每只蚂蚁选择下一机组的第 j 个运转状态, 直到所有发电机均选择完毕。

Step4: 重复步骤 3, 直到所有蚂蚁完成各机组其状态的选择。

Step5: 以 SQP 分别对每只蚂蚁求解传统的经济调度问题。

Step6: 执行局部信息素更新机制。

Step7: 执行整体信息素更新机制。

Step8: 判断是否符合终止条件, 否则返回步骤 3。

3 算法有效性验证

以上述混合算法求解文献 [2] 的三部机组带阀点效应的经济调度问题。参数设定为: 蚂蚁数 $m = 6$, $q = 80\ 000$, $\tau_{i \rightarrow j}^{x \rightarrow y}(0) = 0.1$, $\rho_n = 1 - (\frac{n+}{n+5})^{\frac{1}{2}}$, $\alpha = 1$, 显然 $\rho_n \in (0, 1)$, 上述参数设置满足前述收敛性定理要求。经多次运行算法都可以找到最优解为机组 1、机组 2 和机组 3 的可运行状态组合为 $\{s_3, s_5, s_3\}$, 其对应的机组输出 (MW) 为 $\{300.2668, 400, 149.7332\}$, 总发电成本为 $8234.1 \text{ \$}/\text{h}$ 。图 3 所示为总发电成本随迭代次数的曲线。在信息素更新上一次迭代完毕保留最优值, 直到未来的迭代有更优值, 才进行信息素更新; 图 4 为各机组电力输出随迭代次数改变的曲线。

4 结 论

本文通过蚁群算法找到发电机组可运转的最优组合, 以序列二次规划法求解传统的经济调度问题, 并以三部机组的数值模拟, 结果表明算法能 100% 找到文献 [2] 研究对象的最优解, 成功验证算法的正确和有效性。同时作者采用改变算法参

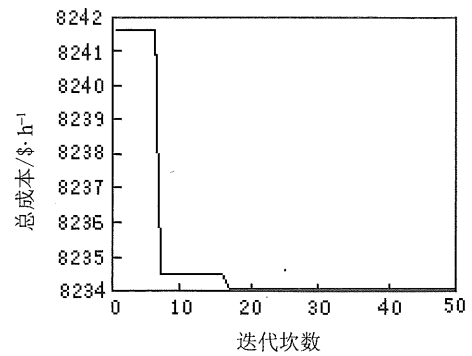


图 3 总发电成本收敛曲线

Fig. 3 Convergence Curve of Total Cost

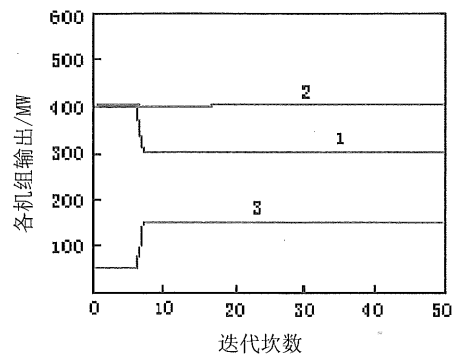


图 4 各机组输出随迭代次数变化曲线

Fig. 4 Dynamic Curves of the Power Output

数也能搜索到最优解, 说明算法具有一定的鲁棒性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] LIN W M, CHENG F S, TSAY M T. An improved tabu search for economic dispatch with multiple minima[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(1): 108-112.
- [3] 袁晓辉, 袁艳斌, 王 乘. 计及阀点效应的电力系统经济运行方法[J]. 电工技术学报, 2005, 20(6): 92-97.
YUAN xiaohui, YUAN Yanbin, WANG Cheng. Method for economic operation Problem in power systems with valve point effect [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(6): 92-97.
- [4] PARK J B, LEE K S, LEE J R. A particle swarm optimization for economic dispatch with nonsmooth cost func-

- tions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 34-42.
- [5] 侯云鹤,熊信良,吴耀武,等. 基于广义蚁群算法的电力系统经济负荷分配[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 59-64.
HOU Yunhe, XIONG Xinyin, WU Yaowu, et al. Economic dispatch of power systems based on generalized ant colony optimization method[J]. Proceedings of the Csee, 2003, 23(3): 59-64.
- [6] 曹浪财,罗键,李天成. 智能蚂蚁算法——蚁群算法的改进[J]. 计算机应用研究, 2003, 0: 62-64.
CAO Langcai, LUO Jian, LI Tiancheng. Intelligent ant system: An improved algorithm over ACS[J]. Application Research of Computers, 2003, 0: 62-64.
- [7] 李士勇. 蚁群算法及其应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
LI Shiyong. Ant colony algorithm and its application[M]. Haerbin: press of Harbin Institute of Technology, 2004.
- [8] 李国庆,赵钮婷,王利猛. 计及统一潮流控制器的可用输电能力的计算[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 44-49.
LI Guoqing, ZHAO Yuting, WANG Liment. Available transfer capability calculation with unified power flow controlled[J]. Proceedings of the Csee, 2004, 24(9): 44-49.
- [9] 毕兆东,王建全,韩帧详. 逐步二次规划法在约束潮流中的运用[J]. 电网技术, 2003, 27(2): 30-33.
BI Zhaodong, WANG Jianquan, HAN Zhenxiang. Constrained load flow calculation by sequential quadratic programming method[J]. Power System Technology, 2003, 27(2): 30-33.
- [10] 刁勤华,默哈莫德·夏班,倪以信. 运用连续二次规划法计算区域间极限传输容量[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(24): 5-8.
DIAO Qinhu, MOHAMED Shaaban, Ni Yixin. Inter-area total transfer capability calculation using sequential quadratic programming method in power market[J]. Automation of Electric Power System, 2000, 24(24): 5-8.
- [11] WALTERS D C, SHEBLE G B. Genetic algorithm solution of economic dispatch with valve point loading[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(3): 1325-1332.

Hybrid AC and SQP Algorithm and Its Parameters Adjustment for Economic Dispatch Problem with Valve-point Effect

LUO Zhong-Liang¹, YU Ming-Zhu², ZHOU You-Ping¹, LIU Xiao-yong³

(1. Department of Electrical Engineering, Foshan University, Foshan 528000, China;

2. Lingnan College, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

3. Automation Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The economic dispatch (ED) problem with valve-point effect is generally formulated as a non-smooth, non-differential and cost-minimizing problem. Due to its non-convex and highly nonlinear properties, the solution entraps in a local minimum easily. For the purpose of discovering the near-globally optimal solution, a hybrid approach of ant colony (AC) algorithm and sequential quadratic programming (SQP) was proposed. An artificial ant is realized as a certain feasible operating set of units and then SQP is utilized to solve the traditional ED. Finally, tests are conducted to show that the proposed approach is very effective in solving the ED problem with valve-point effect.

Key words: ant colony algorithm; sequential quadratic programming; economic dispatch; valve-point effects