

含阀点效应最优潮流问题的改进原始蚁群算法解^{*}

罗中良, 李先祥, 方清城

(佛山科学技术学院电气工程及自动化系, 广东 佛山 528000)

摘要: 基于原始蚁群的猎食行为提出一种新型的算法, 称为改进原始蚁群算法, 用于求解最优潮流问题。新算法只考虑离散变量, 以降低计算时间, 同时使用序列二次规划法求解连续变量。通过运用曲线分段的方法, 使改进算法能处理含大量约束条件的各种目标函数并有效地搜索全局最优解。通过 IEEE-30 节点系统的仿真计算验证了该算法的有效性。

关键词: 最优潮流; 改进式原始蚁群算法; 序列二次规划法; 曲线分段

中图分类号: TM 744 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2006) 06-0031-04

最优潮流问题的解决可提供在等式及不等式约束条件下的最优系统控制与系统运行的相关数据, 成为电力及供配电系统的一项非常重要的环节。最优潮流问题的求解一般有三种途径: 确定性算法, 如割平面法、分支定界法、规划法, 这类算法能保证找到问题的最优解, 但算法效率低, 当变量较大时无法计算^[1-3]; 近似算法, 它通过四舍五入得到离散变量解, 这类方法研究成熟, 计算速度和收敛性能较好, 但不一定是最优解, 甚至是不可行解; 启发式算法, 如模拟进化规划法, 退火法等, 这类算法能找到问题的最优解或次优解, 但计算时间量太大^[4]。解的质量和计算时间是含离散变量规划问题的关键, 文献[3-4]针对这个问题分别提出将现代内点理论及与遗传算法结合, 特别是将离散变量和连续变量分开处理的方法取得了较好的结果。由于 OPF 含有复杂的负载潮流等式及其他约束条件, 因此许多学者常常假设成本函数为简单的二次多项式以简化问题。本文考虑带阀点效应的发电机组的成本曲线, 所以 OPF 的解更接近实际。由于 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^[5-7]。而原始蚁群算法在连续变量空间具有很好的全局寻优能力^[8], 本文通过对原始蚁群算法的改进以优化 OPF 离散变量 (故称之为改进原始蚁群算法), 并利用 SQP 处理 OPF 的连续变量, 以达到算法解的质量和收敛速度, 最后通过对比实验得到算法对于 OPF 具有很好的性能。

1 改进式原始蚁群算法概述

蚂蚁群落是可经由自我组织成一完整的分工系统, 从观察蚂蚁觅食的行为, 发现其似乎总能有效地、快速地搜寻蚁巢与食物间连接路径的各种可能性, 进而以较短路径进行觅食。Dorigo 根据蚂蚁在行进路径上分泌的费洛蒙 (Pheromon) 物质作为信息素的觅食模式研究出蚁群优化算法 (Ant Colony Optimization ACO), 以 ACO 为基础各种改进算法在优化问题上得到广泛研究^[9]。除信息素模式外, N. Moriniche, G. Venturini 和 M. Slimane 三位学者研究一类生存在墨西哥热带丛林靠近瓜地马拉边境处, 名为 *Pachycondyla Apicalis* 的原始蚁群, 观察其觅食行为而发展出新型的蚁群算法^[8], 本文称之为原始蚁群算法, 并成功的应用在连续函数的优化问题上。原始蚁群觅食行为如下: 蚂蚁从蚁巢出发至约 10 m 的范围内建立数个猎食区, 每只蚂蚁约以 2.5 m 为搜寻半径, 建立数个猎食区来寻找食物。若有蚂蚁觅食成功 (表示解有改善), 该蚂蚁便将食物运回蚁巢中存放, 运送过程中该蚂蚁利用沿途的标识来记住这条运送路径, 待食物存放完成后便依原路径回到前次食物最多的猎食区, 并在附近建立数个猎食区来寻找食物。若所有的蚂蚁均暂时无法由目前的猎食区获得食物, 则迁移蚁巢至觅食过程中最有机会获得食物的猎食区 (含 Pheromon 的信息素较多, 即为目前最优目标函数的位置)。此种蚂蚁觅食的方式简单却有效率, 能迅速的搜寻蚁巢涵盖的范围并加以猎食。图 1 说明

* 收稿日期: 2006-01-09

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (020118)

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

上述原始蚁群算法模型: 首先决定蚁巢的初始位置, 即图 1 (a) 接着蚁群便朝猎食区四处觅食, 图 1 (b)、1 (c) 中十字型点即代表猎食区。搜寻次数的增加, 因觅食成功而使蚂蚁记忆中的猎食区位置将有所变动, 从而朝向最有机会获得食物的猎食区的趋势, 如图 1 (c) 所示; 最后重新安排蚁巢位置, 如图 1 (d) 所示, 并重复执行上述步骤。

由于原始蚁群算法是针对连续变量问题, 本文借鉴这种算法的思想, 并融合过去研究随机搜索算法的经验, 提出对原始蚁群算法的改进, 以解决含有离散变量的 OPF 问题, 称之为改进原始蚁群算法。

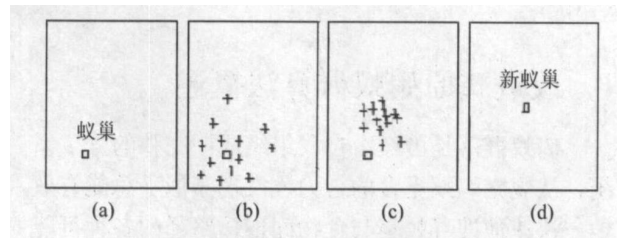


图 1 原始蚁群算法示意图

Fig. 1 The schematic diagram of primitive ant colony algorithm

2 最优潮流问题的改进原始蚁群解法

2.1 研究问题描述

本文以 IEEE-30 节点系统为研究对象^[10]。为验证本文提出的解决最优潮流问题能有效的适应各种成本函数, 将带负荷节点效应机组位于汇流排 1 和 8, 含禁止操作区机组位于汇流排 2 和 11, 二次分段近似机组位于汇流排 5 和 13, 变压器则位于四个分支上, 并联电容器位于汇流排 10, 12, 15, 17, 20, 21, 23, 24, 29 上, 最优潮流问题表示如下:

$$\min F(x)$$

$$s. t. \quad g_i(x) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, m_e$$

$$g_i(x) \geq 0 \quad i = m_e + 1, m_e + 2, \dots, m_e + m_{ie}$$

其中 $F(x)$ 为目标函数, x 为状态变量, $g_i(x)$ 为约束条件, m_e 为等式约束式个数, m_{ie} 为不等式约束式个数。 $F(x)$ 和 $g_i(x)$ 也可表示为: $F(x) = F(x, u)$ 与 $g_i(x) = g_i(x, u)$, u 为离散控制变量。本文研究在发电成本最小化问题来验证所提出算法在最优潮流问题上的求解能力, 所以目标函数为: $F = \sum_{i=1}^m$, m 为系统种发电机组的数目, F 为系统总发电成本; $F_i(P_{gi})$ 为系统中第 i 个机组的成本函数, 在某个分段区间 ($P_{gi} \leq P_{gi} \leq P_{gi}$) 其方程式如下:

$$F_i(P_{gi}) = c_{0i} + c_{1i} P_{gi} + c_{2i} P_{gi}^2 + |c_{3i} \times \sin(c_{4i} \times P_{gi} - P_{gi \min})|$$

(2) 分段近似或含禁止操作区机组成本函数

$$F_i(P_{gi}) = a_i + c_{1i} P_{gi} + c_{2i} P_{gi}^2$$

其中 i 为第 i 部发电机, P_{gi} 为第 i 部发电机组经调度后的输出功率, $P_{gi \max}$ 为第 i 部发电机组整体最大输出功率, $P_{gi \min}$ 为第 i 部发电机组整体最小输出功率, $P_{gi} \leq P_{gi} \leq P_{gi}$ 分别为第 i 部发电机组的局部 (区段) 最小和最大输出功率, c_{0i} , c_{1i} , c_{2i} , c_{3i} , c_{4i} 为第 i 部发电机成本系数。本文根据机组的成本函数类型, 将借鉴文献 [10] 的方法将成本函数分段, 再将每个区段以十进制编码的方法进行处理。

2.2 改进原始蚁群算法流程

参考文献 [8-10], 本文改进原始蚁群算法分 5 步:

Step1: 产生初始族群 P^1 并计算其目标函数。

本文将解的表示方式设置为: 设第 g 代族群的第 i 个解可表示为: u_i^g , $i = 1, 2, \dots, PS$, 其中 $u_i^g = [u_{1i}^g, u_{2i}^g, \dots, u_{ni}^g]$ 分别为 g 代的第 i 个解的离散控制变量 (共 n 个), 因此一个解的基因有 n 个, PS 则为族群大小 (Population Size)。现以矩阵表示解释编码方式, 例如某一个解的形式为: $[I_1, I_2, \dots, I_3]$ 共有 6 个离散变量 (即 6 个基因), 基因中的值以整数表示。其中整数 I 表示机组成本函数的段数编码 ($1, 2, \dots, I$), I 对应该机组成本函数的最大段数编号, 下标表示所在的汇流排。初始族群 ($g=1$) 以下列方式随机产生 PS 个解: $u_i^1 = [u_{1i}^1, u_{2i}^1, \dots, u_{ni}^1]$ $i = 1, 2, \dots, PS$, $u_{ki}^1 = \underline{u_{ki}} + \text{round}(\text{rand}(\underline{u_{ki}} - \underline{u_{ki}}))$, $k = 1, 2, \dots, n$, round 为取整函数, rand 为 $[0, 1]$ 的随机数, $\underline{u_{ki}} - \underline{u_{ki}}$ 分别为第 k 个解的离散变量的第 i 个基因的上限和下限。当每个解产生后, 再计算目标函数。

Step2: 以族群 P 为基础衍生族群 O' 和 O'' 族群, 这样每只蚂蚁会有三个猎食区, 分别放置在 P 、 O' 和 O'' 中, 最后会停留在三个猎食区中适应函数最优处, 形式新的族群 P' 。检查所有适应函数并更新最优解。衍生族群 O' 和 O'' 族群主要靠突变或交配 (产生随机数, 当其小于 0.5 使用突变, 否则使用交配)。突变方式如下:

$$u_{ki}^{g+1} = u_{ki}^g + \text{round}(\beta(g) \times \text{rand}_1 \times (u_{kr}^g - u_{ki}^g))$$

$$k = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, PS$$

$$u_{ki}^{g+2} = u_{ki}^g + \text{round}(\beta(g) \times \text{rand}_2 \times (u_{kr}^g - u_{ki}^g))$$

$$k = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, PS$$

(1) 含负荷节点效应机组成本函数

$$\beta(g) = B \eta^g$$

交配方式如下：

$$u_{ki}^{g+1} = \begin{cases} u_{ki}^g & \text{if } \alpha(g) \times \text{rand}_3 \leq 0.5 \\ k = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, \text{PS} \\ u_{kr}^g & \text{if } \alpha(g) \times \text{rand}_3 \leq 0.5 \\ k = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, \text{PS} \end{cases}$$
$$u_{ki}^{g+2} = \begin{cases} u_{ki}^g & \text{if } \alpha(g) \times \text{rand}_4 \leq 0.5 \\ k = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, \text{PS} \\ u_{kr}^g & \text{if } \alpha(g) \times \text{rand}_4 \leq 0.5 \\ k = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, \text{PS} \end{cases}$$
$$\alpha(g) = A^{\zeta}$$

上面的 η 和 ζ 为略小于 1 的数， A 、 B 为系数所以 β 和 α 将随代数的增加而下降， rand_1 、 rand_2 、 $\dots$ 、 rand_4 为 $[0, 1]$ 的随机数。

另外，本文利用类似约束条件满足法的思想^[11]，预先判断新解是否为不可行解，以避免浪费计算时间。如 $[I_1, \dots, I_3]$ 基因值超过成本函数的区段上限或下限，则以上限或下限代替。

Step 3. 重复执行步骤 2，形成演化过程，最优解会逐渐改善。

Step 4. 为了避免系统陷入局部最优，最优解持续超过几代而没有得到改善，则将最近几代所有搜寻过的解区分为 2 个集合：与目前解距离最远的集合和最近的集合，并将这 2 个集合分别排序，同时取较优而相异的解联合组成新的族群 P' ，然后重新开始搜索新解。

Step 5. 满足规定的最大代数时结束。

2.3 序列二次规划法

在每次迭代后，利用上述改进原始蚁群对 OPF 模型中离散变量的寻优后，分别用 SQP 求解 OPF 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，具体可参考文献 [7]，本文略。

2.4 算法的 MATLAB 仿真

本文仿真条件和文献 [10] 相同，文献 [10] 采用增强型遗传算法搜索离散变量，再利用快速解耦的负载潮流程序求解适应函数，速度很快。但文中使用快速解耦的负载潮流程序求解适应函数，其精确度无法与一般负载潮流程序相比，因此所获得的解为近似解。由于仿真结果数据太多，表 1 仅为部分仿真结果数据。对于一般遗传算法，如文献 [12] 处理文献 [10] 的问题，到 177 代才收敛，如果问题更复杂，其计算时间太大，这和文献 [1] 的结果是相同的。从作者使用 SQP 的经验，SQP 容易受初始值及上下限影响而改变收敛值，因此本文

针对成本曲线采用分段处理的方法，将所有机组的有功、无功输出、所有机组汇流排电压与角度大小、变压器抽头设定、并联电容器设定全部先以连续变量方式处理，然后用序列二次规划法在所有变量的上下限范围进行搜索，很快就搜索到将所有变量视为连续变量下的最优解。但由于变压器抽头设定和并联电容器等为离散变量，所以最优解可能是不可行解。如将最优解中的变压器抽头设定和并联电容器等离散变量设定的这两类连续变量数值修正为最接近的整数，其余变量作为新的序列二次规划法的初始值，作者发现继续搜索的最优解变化不大，于是表 1 的序列二次规划法的最优解可视为整体最优解或近似整体最优解。

表 1 仿真结果

Tab. 1 Result Comparison of three optimal algorithm

P_{g1}	1.7620	1.7565	1.7566
P_{g2}	0.4875	0.4879	0.5000
P_{g5}	0.2144	0.2108	0.2108
P_{g8}	0.2195	0.2130	0.2251
P_{g11}	0.1242	0.1205	0.1130
P_{g13}	0.1202	0.1200	0.1200
总成本 ($\$/\text{h}^{-1}$)	802.06	801.37	801.44
收敛时间 /s	200.00	32.21	36.23

采用本文的改进原始蚁群算法，设族群大小设为 10，初始值选择各成本函数被选出区段的下限。从图 2 可知算法在第 11 代获得收敛，速度比文献 [10] 收敛大大加快。同时作者发现如果将本文算法所得结果中的变压器抽头设定与并联电容器等重新设定为连续变量，其余变量则当成新的序列二次规划法变量得初始值，搜索的最优解连续变量改变量不大。说明此方法是考虑各种成本函数的整体最优解，或非常接近整体的最优解，精确度也比文献 [10] 提高。

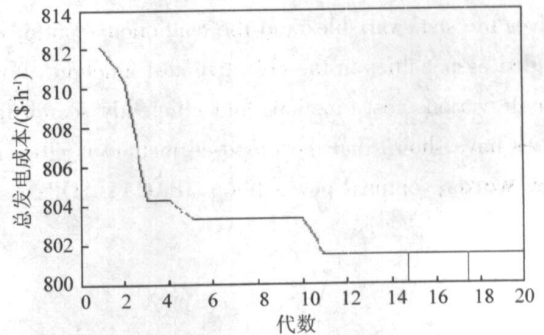


图 2 改进原始蚁群算法收敛过程

Fig. 2 Convergence curve of improved primitive ant colony algorithm

3 结 论

本文在借鉴原始蚁群算法解决连续变量的思想上,改进其算法适应含离散变量的电力系统基本却十分复杂的最优潮流问题,并和序列二次规划法组合构成求解连续变量和离散变量混合优化算法,通过仿真和结果的对比,本文算法是有效和正确的。

参考文献:

- [1] 丁晓莺,王锡凡,陈皓勇,等.一种求解最优潮流的组合算法[J].中国电机工程学报,2002,22(12):11-16
- [2] 韦化,李滨,杭乃善,等.大规模水火电力系统最优潮流的现代内点理论分析[J].中国电机工程学报,2003,23(4):5-8
- [3] 丁晓莺,王锡凡,张显,等.基于内割平面法的混合整数最优潮流算法[J].中国电机工程学报,2004,24(2):1-7
- [4] 陈皓勇,王锡凡.电力系统无功优化的退火选择遗传算法[J].中国电力,1998,31(2):3-6
- [5] PARK P A, KITA H, TANAKA E et al A hybrid EP and SQP for dynamic economic dispatch with nonsmooth fuel cost function[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(2): 411-416
- [6] 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
- [7] 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
- [8] MONMARCHÉ N, VENTURNIG, SLMANCM. On how pachycondyla apicalis ants suggest a new search algorithm[J]. Future Generation Computer Systems, 2000, 16(8): 937-946
- [9] 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
- [10] BAKIRTZIS A G, BISKAS P N, ZOUMAS C E et al Optimal power flow by enhanced genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(2): 229-236
- [11] HUANG Kunyuan, YANG Hangzuo, HUANG Chinglin. A new thermal unit commitment approach using constraint logic programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(3): 936-945
- [12] LN Weinlin. Distribution feeder reconfiguration with refined genetic algorithm[J]. IEEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2002, 147(6): 349-354

Improved Primitive Ant Colony Algorithm for Optimal Power Flow Problem with Valve point Effect

LUO Zhong-liang, LI Xian-xiang, FANG Qing-cheng

(Electrical Engineering & Automation Department, Foshan University, Foshan 528000, China)

Abstract An innovative Improved Primitive Ant Colony Algorithm (IPACA) based on primitive ants foraging behaviors is developed to solve the optimal power flow (OPF) problems with valve point effect. IPACA only models the discrete control variables to reduce the calculation time and use Sequential Quadratic Programming (SQP) to solves the state variables and the continuous control variables. A number of functional operating constraints are included as penalties in the objective cost function. With the idea of segmented curves, this new algorithm can easily handle various cost functions and efficiently search for the global minimum. Numerical simulations on IEEE-30 buses have shown that the proposed method is efficient in solving OPF.

Key words optimal power flow; IPACA; SQP; segmented curves