文章编号：1000－582x(2000)01-0056-04

15
56-59

基于遗传算法的潮流多根求解方法*

TM744

张金奎，林荫宇，杨传忠，甘兴国，谢长科
（重庆市杨家坪供电局，重庆 400050）

TM712

摘 要：在计及功率平衡和电压幅值约束的基础上提出约束遗传算法（CGALF），该算法采用动态群法、优化加速技术、节点排序技术，提高了算法的鲁棒性，选取了轻重载情况下的KK－11节点系统进行测试，验证了算法的有效性和可行性。

关键词：遗传算法；病态潮流；静态顶值点
中图分类号：TM 744 **文献标识码**：A

CGALF 电力系统

电力系统潮流方程为一组非线性方程。由于非线性系统固有的特性，往往使潮流问题存在多个解，而现有潮流计算方法都没有考虑收敛到的解是否为合理的稳定的解，这对电力系统来说是非常危险的。近年来随着国际上几次大停电事故的发生，引起高度重视的电压崩溃问题就与潮流解的稳定性有关[1]，潮流多解的算法是电压崩溃分析中所作研究较少的一个课题，目前广泛采用的是数学规划原理和牛顿潮流法相结合——带最优乘子的牛顿潮流算法[2]，这种方法虽然能求得一对近似解，但通常情况下并不能求出所有的解，而且该方法仍然是基于牛顿——拉夫逊潮流法（NR-LF），当系统运行于静态顶值点或接近于静态等值点时，雅可比矩阵为奇异阵，该方法不能求出潮流解。

文献[3]提出用遗传算法求解潮流问题，但没有采取措施处理潮流问题中的功率平衡约束，对连续变量的电压值采用二进制编码，所求解的精度并不高，解的重复性很差。

基于以上考虑，笔者在文献[3]的简单遗传算法的基础上采用浮点编码，计及功率平衡方程和电压幅值约束并结合GA潮流法提出CGALF法，新的算法采用动态群法和节点顺序编号法，提高了鲁棒性，加快了收敛性，能够在较大程度上求出满意的潮流解。

1 目标函数

直角坐标形式下的PQ节点有功无功平衡方程和PV节点的有功电压方程为：

$$P_i = \sum_{j=1}^{n}[e_i(G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i(G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)] \quad (1)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^{n}[f_i(G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_i(G_{ij}f_j + B_{ij}e_j)] \quad (2)$$

$$|V_i|^2 = e_i^2 + f_i^2 \quad (3)$$

在方程(1)、(2)中，PQ、PV节点的有功，PQ节点的无功，以及PV节点的电压幅值为给定量，分别设为P_i^{sp}、Q_i^{sp}、V_i^{sp}，则其偏移量分别为：

$$\Delta P_i = |P_i^{sp} - P_i| \quad (4)$$

$$\Delta Q_i = |Q_i^{sp} - Q_i| \quad (5)$$

$$\Delta V_i = |V_i^{sp} - V_i| \quad (6)$$

PV节点的电压幅值V_i还可表示为：

$$V_i = \sqrt{e_i^2 + f_i^2} \quad (7)$$

其中e_i和f_i分别为V_i的实部和虚部。

又：作辅助函数

$$H = \sum_{i \in N_{PQ}+N_{PV}} |P_i^{sp} - P_i|^2 + \sum_{i \in N_{PQ}} |Q_i^{sp} - Q_i|^2 + \sum_{i \in N_{PV}} |V_i^{sp} - V_i|^2 \quad (8)$$

于是潮流求解问题转化为函数H极小值为零时相应的求极小点的问题。(8)式中N_{PQ}和N_{PV}分别指PQ节点和PV节点的总数。

2 简单遗传算法对潮流问题求解

遗传算法是模似生物通过自然选择进化的一种搜

* 收稿日期：1998-04-30
作者简介：张金奎(1970-)，男，四川资阳人，重庆大学硕士，现在重庆市杨家坪供电局工作，从事电力系统运行与控制研究。

索技术。在其计算过程中，借助于复制、交叉、变异技术将随机产生的候选解演变为最优解，同牛顿－拉夫逊法比较起来，该方法与初始值无关，也不依靠雅可比矩阵之类的梯度向量作为寻优指导，是一种优于牛顿－拉夫逊法的全局寻优方法，其具体构成为：

1）染色体

节点电压的实部和虚部采用浮点编码作为染色体的一个基因，采用这种编码方法，不会引入离散误差，其示意图为：

e_1	e_2	…	f_1	f_2	…

图1　浮点编码示意图

2）适应度函数

笔者定义适应度函数为：

$$F = M/(10^{-5} + H) \tag{9}$$

其中，M是使适应度函数放大的而设置的一个常数，为避免 H 趋于零出现计算上的困难，将 H 放大了 10^{-5}，本文中 F 不仅适用于正常解，亦适用于非正常解。

3）交叉操作

为保持群的多样性，本文中采用两点交叉。

4）变异操作

随机选择染色体的一个基因，其电压值被电压限内任意选择的另一电压值所替代。

3　潮流计算中约束式的处理

用以上方法并不能保证满足方程(4)～(6)的功率偏差和电压偏差的等式约束，也就是说，能使 H 的值最小，但不能产生一个极小值为零或近于零的 H 值。本文中采取如下的处理技术。

3.1　修正候选节点最压约束满足技术

为了满足等式约束，在交叉或变异中所产生的新染色体，其相应的节点电压，本文中将予以修正，这样，修正后的染色体，其潮流解将有一个零的 H 值或比原始值更小的 H 值，具体措施为：

(a) 设一给定网络中的PQ节点 i，其有功和无功功率可通过修正同一网络中的另一PQ节点D的电压而满足。假定所有的节点均为PQ节点，即 $i = 2, 3, \cdots, N$，其中 N 为网络中的节点总数，那么总存在这样的节点D，其修正后的节点电压为功率偏差和下降最快的电压，节点1为平衡节点。具体方法见3.2.

(b) 对于任意PV节点，修正其电压的实部和虚部以满足电压幅值约束和有功率约束。具体方法见3.3.

3.2　PQ节点约束的处理

本文中提出：对于任何一个PQ节点 i，其约束方程可通过修正一个PQ节点D的节点电压而满足，设节点电压D的实部和虚部分别为 E_{id} 和 F_{id}，在方程(4)和(5)中分别令 ΔP_i 和 ΔQ_i 等于零，$d \neq i$，解方程(1)、(2)、(4)、(5)可得

$$E_{id} = \frac{(E_iG_{id} + F_iB_{id})P_i^{sp} + (F_iG_{id} - E_iB_{id})Q_i^{sp}}{(G_{id}^2 + B_{id}^2)(E_i^2 + F_i^2)} - \frac{X_{id}G_{id} + Z_{id}B_{id})}{G_{id}^2 + B_{id}^2} \tag{10}$$

$$F_{id} = \frac{(F_iG_{id} - E_iB_{id})P_i^{sp} - (E_iG_{id} + F_iB_{id})Q_i^{sp}}{(G_{id}^2 + B_{id}^2)(E_i^2 + F_i^2)} - \frac{X_{id}G_{id} - Z_{id}B_{id})}{G_{id}^2 + B_{id}^2} \tag{11}$$

其中

$$\left.\begin{aligned} X_{id} &= \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}} (G_{ij}E_j - B_{ij}F_j) \\ Z_{id} &= \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}} (G_{ij}F_j - B_{ij}E_j) \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

若 $d = i$，则PQ节点D的功率约束自身得到满足，将 E_{id} 和 F_{id} 的下标 i 换作 d 重新推导方程(1)、(2)、(4)、(5)，由于其结果的表达式得冗长，为简化起见，此外不再给出。

修正后的 E_{id} 和 F_{id} 若使H值最小，则替换染色体中相应的 E_{id} 和 F_{id}，否则原始解予以保留。

3.3　PV节点约束的处理

本文中提出，对于任何一个满足电压幅值约束的PV节点D，其约束方程可通过迭代自身电压得以满足。设PV节点电压D的实部和虚部分别为 E_{dd} 和 F_{dd}，令方程(4)和方程(6)中 ΔP_d 和 ΔV_d 等于零，解方程(1)、(4)、(6)、(7)可得：

$$E_{dd} = \frac{X_{dd}(P_d^{sp} - V_d^{sp2}G_{dd}) \pm Z_{dd}\sqrt{V_d^{sp2}(X_{dd}^2 + Z_{dd}^2) - (P_d^{sp} - V_d^{sp2}G_{dd})^2}}{X_{dd}^2 + Z_{dd}^2} \tag{13}$$

$$F_{dd} = \frac{Z_{dd}(P_d^{sp} - V_d^{sp2}G_{dd}) \mp X_{dd}\sqrt{V_d^{sp2}(X_{dd}^2 + Z_{dd}^2) - (P_d^{sp} - V_d^{sp2}G_{dd})^2}}{X_{dd}^2 + Z_{dd}^2} \tag{14}$$

其中

$$\left.\begin{aligned} X_{dd} &= \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq d}} (G_{dj}E_j - B_{dj}F_j) \\ Z_{dd} &= \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq d}} (G_{dj}F_j + B_{dj}F_j) \end{aligned}\right\} \tag{15}$$

分别计算染色体所对应的修正解，进而计算 H 的值，选取使 H 值较小的解作为研究对象。由以上所提出的约束满足技术和GALF算法在交叉和变异步骤相结合，称为CGALF法。

4 约束遗传潮流法的改进

4.1 动态群法

保持群的多样性可以使 CGALF 法能够逃离局部极小点、这里所指的多样性,为有用的多样性,即群中的一些个体分别代表解空间不同的局部最优所在区域,笔者提出使用动态群法,即当迭代到一定次数,若目标函数 H 的值相同,则现存群中的较差的几个染色体被随机产生的几个染色体所替代,在整个求解过程中不断有新的染色体引入。实践表明,在某些负荷条件下潮流问题不可解,约束遗传潮流算法中采用动态群法求解象 H 类的平方和为最小的极小化问题尤为有效

4.2 解加速技术

动态群法是使 CGALF 法跳离局部极小点的方法,解加速技术则是整个计算加速的方法。该技术的思路是:在求解过程中不断修正群中的约束候选解,这样使得修正后的染色体更接近于已知的适应力最强的染色体 具体方法如下:对于任一节点 K,设其节点电压矢量为 $\mathbf{V}_k$, $\mathbf{V}_{kbest}$ 为已知的适应力最强染色体所对应的节点电压矢量,记:$\Delta \mathbf{V}_k = \mathbf{V}_{kbest} - \mathbf{V}_k$,则修正后的节点电压

$$\mathbf{V}_k = \mathbf{V}_{kbest} + \Delta \mathbf{V} = 2\mathbf{V}_{kbest} - \mathbf{V}_k \tag{16}$$

4.3 节点电压修正顺序

最简单的节点电压修正顺序就是根据给定的节点号码逐个修正,但这不是最有效的方法,本文中采用一个更加有效的方法:

1) 利用方程(13) ~ (15) 以节点代码的顺序修正 PV 节点电压;

2) 对于有最大偏差和的 PQ 节点,首先使用约束满足技术进行修正;

3) 重复步骤 2) 直到所有 PQ 节点被处理。

5 KK-11 节点系统的仿真研究

为验证 CGALF 法的有效性,笔者运用 C 语言在奔腾-90PC 机上编制了程序。实际计算中,对适应度函数,取 $M=100$,交叉概率为 0.9;变异概率为 0.01;群体规模取为 100;初始候选解的染色体在标么值为 0.0 ~1.2 的电压范围内随机产生;电压相角在 0~180°之间;若连续五次迭代 H 值保持不变,则在动态群技术的实施过程中,群中 50%的染色体将被新染色体所替代。

5.1 轻载条件的潮流求解

轻载条件下 KK-11 节点系统有一个正常解和多个非正常解[4](已被证明该网络有 52 个解),经过 100 次计算,CGALF 法求得 41 个解,图 2 为求取正常解的最佳和最差的收敛曲线图,横轴为迭代次数 G。可以看出,两种结果均有平方偏差和 $H=0$,最好一次在迭代 7 次后求得,最差一次在迭代 9 次后求得,每次迭代时间为 1.7 s.而文献[4]所求得的结果 $H=4.503\ 509$,这表明 CGALF 的计算结果是非常精确的。

利用文献[4]法求出了 4 个非正常解、采用本文中的 CGALF 法则能求出 40 个非正常解,图 3 给出了求取其中一个非正常解的最佳和最差一次收敛特性、可以看出两种情况下均有 $H=0$,文献[4]的结果 $H=0.117\ 677$,这表明 CGALF 法求解非正常解的有效性。

5.2 重载条件的潮流求解

重载时利用文献[4]法求出了两个非常近似的正常解,两解在小数点后第 3 或第 4 位才开始出现差异,其平方偏差和分别为 0.058 745 和 0.058 730,如果仍取基准功率为 100 MVA,精度为 0.001,则各节点的有功无功偏差已超出精度范围,所以这两解并非有效,基于同样的网络和负荷条件、同样的基准功率和精度,用 NRLF 法迭代 20 次后发散,出现这种情况的原因有二:其一是所给负荷条件下潮流方程本身无解,其二是所给负荷条件为系统的静态顶值点或接近静态等值点即分权鞍点,此时雅可比矩阵为奇异阵或近似奇异阵。

基于同样的网络和负荷条件、用本文所提出的 CGALF 法求解,平方偏差和 $H=0.000\ 131$,又由于该法在计算中始终保持电压幅值约束,若问题可解,则收敛时 PV 节点 5 和 9 的电压差相量应为零,而结果相反,这说明该问题无解,进一步说明文献[4]的解无效。

要求出满足给定负荷的潮流解,一个方法就是松驰 PV 节点 5 和 9 的电压约束,这在节点顺序编号的步骤 2)能轻易实现,节点 5 和 9 的电压能使该系统运行于静态顶值点以内。同理,若各 PQ 节点的负荷平均减少 0.04%,亦将使系统运行于静态顶值点或其内,受精度限制,该解为唯一解,且在 12 次迭代后求得,费时 55 s,偏差平方和 $H=0.000\ 004\ 8$,其收敛性如图 4 所示。修正负荷后用 NRLF 法计算,发散;若负荷减少 0.005%,NRLF 法成功地求出一解,而 CGALF 法则求出两解,其中一解和 NRLF 法相同,因篇幅所限,这两解的情况尚未给出。

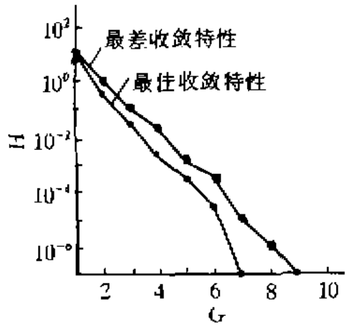

图 2　CGALF 法求取轻载情况下正常解的收敛特性曲线

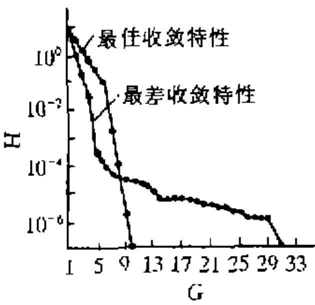

图 3　CGALF 法求取轻载情况下非正常解的收敛特性曲线

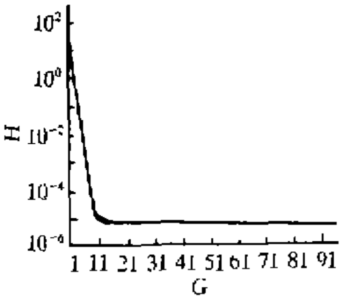

图 4　重载情况下负荷减少 0.04% CGALF 法的收敛特性

6　结论

笔者将潮流问题转化为极小化问题，设计了约束潮流遗传算法求解潮流问题，该法基于遗传算法思想，以及满足给定的 PQ 节点功率限制，PV 节点电压幅值限制等约束处理技术，并同理采用动态群法，解加速技术和节点顺序编号等技术，提高了算法的性能和计算速度，选取了轻重载情况下的 KK-11 节点系统验证 CGALF 法的有效性，并给出了相应结果，结果表明 CGALF 法有非常好的收敛性，能够求出满意潮流解，而且能够并求出运行于静态顶值点的潮流解。若潮流方程本身无解，则该法能以 PV 节点电压幅值越限形式给以说明，并同时采用松驰 PV 节点电压或减少 PQ 节点负荷（两者均在精度范围内）的方法，则在不牺牲 PV 节点电压水平的基础上，使潮流方程获得可解性。

参 考 文 献

[1] 王梅义，吴竞昌，蒙定中．大电网系统技术[M]．北京：水利电力出版社，1991．356～360．

[2] IBA K. A method for finding a pair of multiple load flow solutions in bulk power system[J]. IEEE Trans Power Syst, 1990, 5(2): 582～591.

[3] YIN. Investigations on solving the load-flow problem by genetic algorithms[J]. Electr Power Syst Res, 1991, 22: 151～163.

[4] KLOS A, KERNER A. The non-uniqueness of load-flow solution[A]. Proceeding of power system computation conference[C]. New York: Academic Press, 1975.

Multiple Load Flow Solutions in Electric Power Systems Based on Genetic Algorithm

ZHANG Jin-kui, LIN Yin-yu, YANG Chuan-zhong, GAN Xing-guo, XIE Chang-ke

(Chongqing Yangjiaping Power Supply Bureau, Chongqing 400050, China)

ABSTRACT: Methods for satisfying the power balance requirement and the voltage magnitude costraint are developed and incorporated into the genetic-algorithm method to form a constrained genetic-algorithm for solving the load-flow problem. The robustness of the load-flow algorithm is enhanced by the dynamic population. the technique for accelerating the convergence of the optimisation process and the network node sequencing procedure described in the paper. The efficiency and feasibility of the developed CGALF algorithm have been tested using KK-11-node system under light-load and heavy-load conditions.

KEYWORDS: genetic algorithm; load flow in ill-condition; steady-state celling point

（责任编辑　李胜春）