

克隆遗传算法与模拟退火算法相结合的配电网重构

周辉¹, 王击¹, 罗安^{1,2}, 李茂军³

(1. 中南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南大学电气与信息学院, 湖南 长沙 410082;
3. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410076)

摘要: 配电网重构可以提高配电网运行的安全性、经济性和供电质量, 对于当前国内配电自动化系统建设和应用具有重要意义。将克隆遗传算法(CGA)与退火算法(SA)结合起来, 把退火算法中的Metropolis抽样准则融入到克隆遗传算法中, 形成克隆遗传退火算法(CGSA)。以网损最小为目标函数, 以配电网电压降的限制、线路电流的限制等为约束条件, 在考虑配电网自身特点的基础上, 以IEEE33节点为算例, 利用克隆遗传退火算法求解。结果证明该优化算法具有较好的全局收敛性和收敛速度。

关键词: 克隆遗传算法; 模拟退火算法; Metropolis抽样准则; 配电网重构; 目标函数

Distribution network reconstruction based on the combination of CGA and SA

ZHOU Hui¹, WANG Ji¹, LUO An^{1,2}, LI Mao-jun³

(1. College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. College of Electrical & Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. College of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: Distribution network reconstruction can improve security and quality of network operation as well as minimize the power loss, and it is of great importance for construction and application of distribution automation system at present in China. Clonal Genetic Simulated Annealing Algorithm(CGSA), which combines CGA(Clonal Genetic Algorithm) and SA(Simulated Annealing Algorithm), and puts the Metropolis sample rule of the SA into the CGA, is proposed for distribution network reconfiguration. An optimization model of distribution network reconfiguration is established, in which the minimum network loss is taken as objective function, the restrictions to the decline of voltage and current are taken as constraint conditions. Based on the features of distribution network, the CGSA is used in the IEEE 33 bus system for network reconstruction. Reconfiguration results show that the algorithm is efficient and practical, and has good global convergence and can accelerate the speed of convergence.

Key words: CGA; SA; Metropolis sample rule; distribution network reconstruction; objective function

中图分类号: TM715

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)07-0041-05

0 引言

配电网重构^[1]是配电自动化的重要内容。配电网具有环状结构、开环运行的特点。配电网中包含了大量的常合刀闸及少量的常开刀闸。配电网重构就是在保证配网呈辐射状、满足馈线热容、电压降落要求和变压器容量等的前提下, 改变分段开关、联络开关的组合状态, 使配网某些指标(如: 配电网线损、负荷均衡或供电电压质量等)为最佳的配电网运行方式。从数学角度来看, 配电网重构是一个典型的多目标非线性整数组合优化的问题, 也是一个NP难的组合优化问题。配电网中开关数量巨大, 单一采用穷举法容易产生组合爆炸的问题。自提出配电网重构这一概念以来, 人们采用了启发式算法、

人工智能算法以及随机优化等算法对配电网重构进行了广泛深入的研究, 取得了很大成果^[2~4]。

本文提出的克隆遗传退火算法, 是在总结以往学者的研究基础上, 针对配电网重构的特点, 提出的一种新的重构算法。该算法结合了新兴的克隆遗传算法以及传统的模拟退火算法各自的优点, 弥补了单一算法在重构中所带来的不足。在进行配电网重构研究中, 该算法简单实用, 能迅速收敛, 快速准确地找到全局最优解。

1 克隆遗传退火算法

模拟退火法^[5] SA (Simulation Annealing) 是模拟晶体退火过程所得到的一种算法, 它的主要思想是: 在搜索区间(二维平面中)随机游走(即随

机选择点),再以Metropolis抽样准则,使随机游走逐渐收敛于局部最优解。而温度即是Metropolis算法中的一个重要控制参数,可以认为这个参数的大小控制了随时过程向局部或全局最优解移动的快慢。

Metropolis算法是一种有效的重点抽样法,其算法为:系统能量从一个状态变化到另一个状态时,相应的能量从 E_1 变化到 E_2 。如果 $E_2 < E_1$,系统接收此状态,否则,以一个随机的概率接收或丢弃此状态。这样经过一定次数的迭代,系统会逐渐趋于一种稳定的分布状态。

模拟退火算法与初始值无关,算法求得的解与初始解状态无关;模拟退火算法具有渐近收敛性,已在理论上被证明是一种以概率1收敛于全局最优解的全局优化算法;并且模拟退火算法具有并行性。

遗传算法^[6] GA (Genetic Algorithm) 是一类借鉴生物界的进化规律(适者生存,优胜劣汰遗传机制)演化而来的随机化搜索方法。它是由美国的J. Holland教授于1975年首先提出。遗传算法将个体的集合——群体作为处理对象,利用遗传操作——交换和突变,使群体不断进化,直到成为满足要求的最优解。该算法从群体出发在整个空间寻优,并进行多极值比较,具备全局最优搜索性。同时该算法用目标函数本身的信息建立寻优方向,而不是用其导数建立寻优方向,因此不需要传统算法在解复杂问题时由于推导复杂而设立的近似假定,当然也不用考虑函数的连续性和可导性。所以遗传算法非常适于解决目标函数或某些约束条件不可微的非线性优化问题。

近年来,不少学者将遗传算法运用到配电网重构的研究中^[7],也有学者将遗传算法和模拟退火算法结合起来用于配电网重构^[8,9]。但是传统的遗传算法存在对复杂问题搜索效率低、易陷入“早熟收敛”等问题。对此,近年来一些学者提出了一种克隆遗传算法CGA (Clonal Genetic Algorithm),也叫单亲遗传算法PGA (Partheno Genetic Algorithm)^[10]。它采用序号编码,不使用传统遗传算法常用的交换算子,所有遗传操作均在一条染色体上进行。即只通过单个个体繁殖后代,它采用全新的遗传算子如基因换位、基因倒位、基因移位、基因突变等,实现传统算子的作用而又解决了序号编码的染色体必须使用PMX、CX 和OX 等特殊交换算子的问题。具有遗传操作简单,计算效率高,不要求初始群体中的个体具有多样性,也不存在“早熟收敛”现象,因此得到迅速发展。目前已经有学者采用克隆遗传算法进行配电网重构的研究^[11]。

但是笔者在对克隆遗传算法进行研究时,发现在克隆遗传算法中,父染色体通过基因移位、基因变异等遗传算子产生下一代染色体时,几乎是全局范围内盲目产生,不能确保下一代染色体的优良。这样就很可能出现一代不如一代,使得花费周期时间长,不能迅速准确全局收敛,得到全局最优值。因此,基于以上考虑,笔者将克隆遗传算法作了改进,将模拟退火算法融合到克隆遗传算法中,使得克隆遗传算法在产生下一代染色体时,趋于优良品种发展,快速收敛。同时又不会陷入到局部最优点。

克隆遗传退火算法就是将模拟退火算法的Metropolis 抽样准则引入到克隆遗传算法中,使得克隆遗传算法中父染色体通过遗传操作(变异、移位等)产生下一代染色体后,再根据 Metropolis 抽样准则来确定新一代的染色体的取舍,这样就保证了下一代染色体的优良性,使得整个种群能够向快速良性发展,迅速收敛。同时,由于是基于克隆遗传算法,这样既可以确保在全局范围内寻找最优点,而不至于落入局部最优点,又可以避免传统遗传算法带来的“早熟收敛”。

2 基于克隆遗传退火算法的配电网重构

2.1 编码策略

遗传算法一般采用固定长度的二进制符号串来表示群体中的个体,其等位基因由二值[0, 1]所组成,每个二进制串叫做一个染色体,遗传算子也是直接对串进行操作。在配电网重构中,我们是通过改变电网中的联络开关的开合来改变配电网的拓扑结构,找到一个最优的开关组合,使配电网的某项指标(如网损最小)或综合指标最优。因此,我们取开关状态为控制变量,将网络中的开关状态用0或1表示(0表示开,1表示合),每个开关占据染色体的一位,各开关状态组合在一起,就形成了一条染色体,染色体的长度为网络中开关的数量总和。针对配电网闭环设计的特点,我们采用染色体分段编码策略,即在一个环内的开关组成一段染色体,那么这一段染色体内有且只有一个0,即一个环内只有一个开关是打开的,这样的话我们就能消除大量不可行解,提高搜索效率。这种方案简洁明了,可节省计算时间。

2.2 初始群体的产生

遗传算法和退火算法都不依赖于初始值,因此可以随机产生 pop_size 个长度为 L (pop_size 为种群大小, L 为配电网中参与重构的开关数量的总和)的二进制编码,作为初始种群。 pop_size 不能取太大

或太小, 太小不能让初始种群遍及整个解空间, 太大则使运算时间增加。一般根据 L 的大小来确定种群大小。由于配电网具有闭环设计开环运行的特点, 开关状态的组合应保证网络处于开环运行状态, 既要保证配电网中不存在网络孤点, 即每个负荷点都有电, 也要保证整个配电网为树状网。因此在计算过程中应加入判断染色体是否有效的子程序, 将无效的个体剔除掉。

2.3 初温的确定及退温操作^[8]

退火算法中, 一般要求初始温度要充分大, 但是初温太大则会增加计算时间。可以根据初始群体的具体情况来决定初始温度, 令 $t_0 = KD$, 其中: K 为充分大的数, 可以选 $K = 10, 50, 100$ 等试验值; $D = f_{smax} - f_{smin}$, f_{smax} 为初始种群中最大的适应度值, f_{smin} 为初始种群中最小的适应度值。退温函数选用常用的 $t_{i+1} = \alpha t_i$ 形式, 其中 $0 < \alpha < 1$ 。

2.4 适用值函数确定

本文采取以网损最小目标函数。

故配网重构的目标函数可以表示为:

$$\min f = \sum_{i=1}^{n_b} r_i |I_i|^2 k_i \quad (1)$$

其中: n_b 为配网中的支路数; r_i 为第 i 条支路的电阻; I_i 为流过第 i 条支路的负荷电流; k_i 为开关 i 的状态, 0表示开关打开, 1表示开关闭合。

一般还要求式(1)满足电压约束、支路过载约束和变压器过载约束等, 即:

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (2)$$

$$S_i \leq S_{i,\max} \quad (3)$$

$$S_t \leq S_{t,\max} \quad (4)$$

其中:分别 $U_{i,\min}$ 和 $U_{i,\max}$ 为第 i 个节点电压的允许上限和允许下限值; S_i 和 $S_{i,\max}$ 分别为流过第 i 条支路的实际功率及其最大容许值; S_t 和 $S_{t,\max}$ 分别为变压器供出的实际功率及其最大容许值。

网损最小为目标函数的适值函数为:

$$F = \frac{1}{f} \quad (5)$$

2.5 克隆遗传算子^[10]

克隆遗传算法的遗传算子被分为两大类:基因重组算子和基因突变算子。基因重组算子就是通过基因换位、基因移位、基因倒位等算子改变基因在

染色体中的位置。基因突变算子即改变基因的值。它们的遗传操作功能明显不同, 但不同的基因重组算子却具有相同的遗传操作功能, 即它们都是调整序号基因在染色体中的相对位置。同时, 也可分为单点遗传算子和多点遗传算子。多点遗传算子计算复杂, 搜索能力有限, 使用不多, 因此主要采用单点遗传算子。

在配电网重构中, 为了不破坏配电网辐射运行状况以及不形成孤岛, 在进行基因突变操作时, 应成对进行, 即当一条染色体上某个基因由1突变成0时, 那么必然有另一位基因由0突变为1。这样可以避免大量不可行解产生, 提高计算效率。

2.6 Metropolis 判别准则

经过基因重组和基因突变操作后产生的新群体并不作为下一代群体, 而是要经过Metropolis抽样准则后才产生新一代群体。Metropolis抽样准则具体操作如下:

当第 i 代种群中的第 j 条染色体 $\text{pop}(i, j)$ 经过遗传操作产生一个新的染色体 tempchrom , 然后我们根据Metropolis判别准则来决定 tempchrom 是否能进入下一代种群。令 $\Delta F = F(\text{tempchrom}) - F(\text{pop}(i, j))$, 若 $\Delta F \geq 0$, tempchrom 则进入下一代种群, 成为 $\text{pop}(i+1, j)$, 否则产生 $[0, 1]$ 之间的随机数 p , 若 $p < \exp(-\Delta F / t_i)$, 则也让 tempchrom 进入下一代种群, 否则将 $\text{pop}(i, j)$ 复制到下一代种群, 即 $\text{pop}(i+1, j) = \text{pop}(i, j)$ 。

2.7 终止规则

每代群体中适用值最大的染色体即群体中最优良的染色体, 所以我们通过监控每代群体中最大适应值的变化情况来判断算法是否终止。当连续 q 代没有发生变化时, 即可认为算法收敛, 可以停止计算。

2.8 克隆遗传退火算法计算步骤(如图1)

第一步: 确定算法参数, 包括群体规模 popsize , 染色体长度 L , 退火初始温度 t_0 , 退温系数 α , 终止规则中的 q 。

第二步: 产生初始群体 $\text{pop}(0)$ 。

第三步: 执行克隆遗传操作, 产生临时群体 temppop 。

第四步: 运用Metropolis判别准则对临时群体 temppop 中的染色体进行判别, 决定其是否能进入下一代群体。

第五步: 产生新一代群体 $\text{pop}(i+1)$ 。

第六步: 执行退温操作, $t_{i+1} = \alpha t_i$, 并令 $i = i + 1$ 。

第七步：计算新一代群体中的染色体适应值，找出最大适应值 $F(i)_{\max}$ 。

第八步：判断是否达到终止条件，即判断 $F(i)_{\max}$ 、 $F(i-1)_{\max}$ 、 \dots 、 $F(i-q)_{\max}$ 是否相同，是的话则终止计算，否则返回第三步。

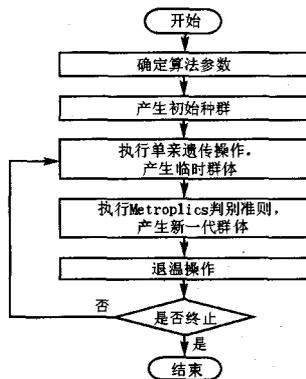


图1 克隆遗传退火算法流程图

Fig.1 Flow chart of CGSA

3 算例仿真

本算例是 IEEE 标准算例 33 节点^[12]单电源的配电系统,其原始网络结构如图 2 所示。

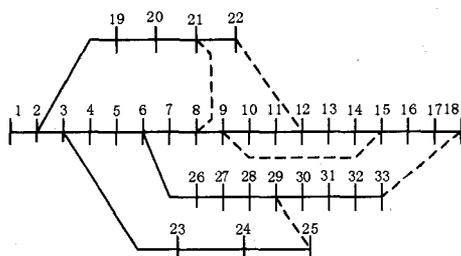


图2 IEEE 标准算例 33 节点系统

Fig.2 IEEE 33 bus system

图中实线为运行支路,虚线为联络支路。初始状态时,联络支路全部打开。网络参数和节点负荷见参考文献[12]。取节点初始电压 $U_0 = 12.66$ kV。分别采用克隆遗传退火算法(CGSA)、克隆遗传算法(CGA)以及文献[9]中的遗传退火算法(GSA),以网损最小为目标函数对其进行重构。重构结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出,无论是采用 CGA, GSA, 还是 CGSA, 重构后网损大大降低,可见网络重构对于提高系统供电质量、降低网损经济运行是大有好处的。对比 CGA, GSA, CGGA 的优化结果,在同样的种群规模、同样的遗传算子下,CGA 对应的网损是 0.143 6 MW, GSA 和 CGSA 对应的网损是 0.141 6 MW,但是 CGSA 只用了 27 代就找到最优解,而在相同的条件下,GSA 却用了 73 代。由此可见,CGSA 无论是在寻优效果还是

在全局收敛性上都比 CGA 和 GSA 好。

表 1 CGA、GSA、CGSA 计算结果

Tab.1 Result of CGA,GSA and CGSA

算法	网损/MW		运算代数	打开开关
	初始值	最终值		
PGA	0.2062	0.1436	100	7-8,11-12,14-15,28-29,32-33
GSA	0.2062	0.1416	73	7-8,9-10,14-15,32-33,25-29
CGSA	0.2062	0.1416	27	7-8,9-10,14-15,32-33,25-29

图 3 表示的是采用 CGSA 进行重构时,平均适应值与最大适应值的变化比较情况。由图 3 可知,程序在第 10 代就已经找到了最优解,但是程序并没有停止,而是继续运行。直到运行到第 27 代,程序已确定找到了最优解,程序终止。

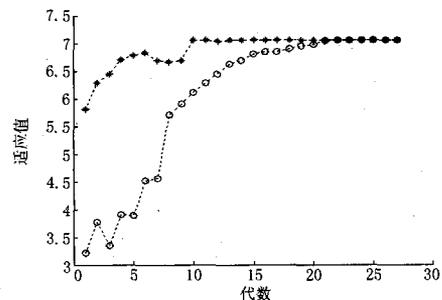


图3 平均适应值和最大适应值

Fig.3 Average fitness and maximal fitness

4 结论

1) 将模拟退火算法中的 Metropolis 抽样准则融入到克隆遗传算法中,很好地改善了克隆遗传算法的寻优能力。

2) 克隆遗传退火算法保留了克隆遗传算法和模拟退火算法各自的优点,克服了传统遗传算法在配电网重构中所带来的不足。

3) 算法简单实用,加快了收敛速度,能快速准确地找到全局最优点,提高了计算效率,可有效地用于配电网重构。

4) 通过对 IEEE33 节点典型系统测试,说明本文提出的基于克隆遗传退火算法的配电网重构技术是成功的。

参考文献

[1] Merlin A, Back H. Search for a Minimal-Loss Operating Spanning Tree for an Urban Power Distribution System[A]. In: Proceedings of Fifth Power System Computation Conference[C]. Cambridge: 1975.2-6.
 [2] 毕鹏翔,刘健,张文元. 配电网重构的改进支路交换法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (8): 98-103.
 BI Peng-xiang, LIU Jian, ZHANG Wen-yuan. A Refined

- Branch-exchange Algorithm for Distribution on Networks Reconfiguration [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 98-103.
- [3] 吴文传, 张伯明. 拟全局最优的配电网实时网络重构法 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (11): 69-73.
WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. A Quasi-global Optimal Method for Real-time Network Reconfiguration of Distribution System [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 69-73.
- [4] 刘自发, 余贻鑫, 葛少云. 一种混合智能算法在配电网网络重构中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (15): 73-78.
LIU Zi-fa, YU Yi-xin, GE Shao-yun. A Hybrid Intelligent Algorithm for Loss Minimum Reconfiguration in Distribution Networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (15): 73-78.
- [5] Victor P, Ferland J A, Miguel A, et al. Optimization of Electrical Distribution Feeders Using Simulated Annealing [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(3): 1135-1141.
- [6] Holland J H. Genetic algorithm [J]. Scientific American, 1992, 9(7): 44-50.
- [7] 刘莉, 陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网网络重构 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20 (2): 66-69.
LIU Li, CHEN Xue-yun. Reconfiguration of Distribution Networks Based on Fuzzy Algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 66-69.
- [8] 刘扬, 杨建军, 魏立新. 改进遗传模拟退火算法在配电网网络重构中的应用 [J]. 电力系统及自动化学报, 2004, 16 (5): 39-42.
LIU Yang, YANG Jian-jun, WEI Li-xin. Application of the Improved Genetic Simulated Annealing Algorithm in Distribution Network Reconfiguration [J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2004, 16(5): 39-42.
- [9] 卢耀川, 廖迎春, 陈星莺, 等. 基于遗传退火法的网络重构技术 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23 (1): 28-31.
LU Yao-chuan, LIAO Ying-chen, CHEN Xing-ying, et al. Distribution Reconfiguration Technology Based on GA and SA [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(1): 28-31.
- [10] 李茂军, 童调生, 罗隆福. 单亲遗传算法及其应用研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 1998, 25 (6): 56-59.
LI Mao-jun, TONG Tiao-shen, LUO Long-fu. Partheno-Genetic Algorithm and Its Application [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 1998, 25(6): 56-59.
- [11] WANG Ji, LUO An, LI Mao-jun. The Improved Clonal Genetic Algorithm & Its Application in Reconfiguration of Distribution Networks [A]. In: IEEE Power Engineering Society. PSCE 2004 - Power Systems Conference and Exposition [C]. New York: 2004. 559-604.
- [12] Goswami S.K, Basu S.K. A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeders for Loss Minimization [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 3(7): 1484-1491.

收稿日期: 2006-09-20; 修回日期: 2006-11-22

作者简介:

周辉 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究领域为电力系统及其自动化; E-mail: zhouhui_jx@163.com

王击 (1968-), 男, 副教授, 主要从事智能控制系统分析和电力控制系统技术方面的研究。

(上接第 23 页 continued from page 23)

- [8] 王小平, 曹立明. 遗传算法 (理论、应用与软件实现) [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.
WANG Xiao-ping, CAO Li-ming. Genetic Algorithm (Theory, Application and Software) [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002.
- [9] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
WANG Xi-fan, FANG Wan-liang, DU Zheng-chun. Modern Power System Analysis [M]. Beijing: Science Press, 2003.

收稿日期: 2006-11-07; 修回日期: 2006-12-19

作者简介:

刘杨名 (1981-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统稳定运行与控制; E-mail: liuyangming@sjtu.edu.cn

严正 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为大规模电力系统优化、程序设计, 电力系统稳定分析, 电力市场。