

基于遗传算法并避免不可行解的配电网重构优化

杨建军¹, 战红¹, 陈宪国²

(1. 青岛理工大学机械工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 山东香驰粮油有限公司计算机中心, 山东 博兴 256500)

摘要: 以网损最小为目标函数, 电压降、电源容量和闭环等限制为约束条件, 建立了配电网重构优化数学模型。根据配电网的特点, 在遗传算法产生初始解、交叉、变异操作时, 设计了基于环路的方法, 避免了不可行解的产生。针对遗传算法的局限性, 对操作过程进行了改进, 调整了适应函数, 结合了模拟退火算法, 给出了交叉率和变异率的自适应计算方法, 提高了算法的计算效率和优化性能。重构算例说明, 该优化方法有效、实用。

关键词: 配电网; 网络重构; 环路; 优化; 遗传算法

Optimization of distribution network reconfiguration of avoiding infeasible solutions based on genetic algorithm

YANG Jian-jun¹, ZHAN Hong¹, CHEN Xian-guo²

(1. School of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China;

2. Computer Center, Shandong Xiangchi Food and Oil Co., Ltd, Boxing 256500, China)

Abstract: An optimization mathematical model of distribution network reconfiguration is established, in which the minimum network loss is taken as objective function, the restrictions to the voltage, the capacity of power source and closed loop are taken as constraint conditions. Based on the features of distribution network, in the operations of genetic algorithm, such as generating initial solutions, crossing and mutation, methods are designed based on loop circuit, so the infeasible solutions are avoided. Aiming at the limitation of genetic algorithm, the operational process of genetic algorithm is improved, the fitness function is adjusted, simulated annealing algorithm is combined with, adaptive computing methods of cross probability and mutation probability are given, which can improve the computational efficiency and optimum performance. Reconfiguration example shows that the algorithm is efficient and practical.

Key words: distribution network; network reconfiguration; loop circuit; optimization; genetic algorithm

中图分类号: TM727.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)17-0043-04

0 引言

配电网采用闭环设计、开环运行的方式, 这样可以调整网络中分段开关和联络开关的组合状态, 实现配电网重构, 以达到降低网损、平衡负荷、提高供电电压质量的目的。

配电网重构问题是一个大规模非线性组合优化问题。目前关于该问题的研究方法较多, 其中遗传算法(GA)、模拟退火算法(SA)等智能优化方法也得到了较好的应用。应用智能优化方法时, 网络中的开关状态正好用二进制编码来表示, 简洁明了, 但这些方法的一个共同缺点是, 在操作过程中将产生大量的不可行解。例如, 遗传算法在产生初

始解时效率非常低, 产生可行解的几率只有千分之几左右^[1,2], 再经过交叉、变异等操作过程可行解剩余几率尚不足千分之一^[3]。大量不可行解的存在, 严重影响了算法的计算效率。本文针对配电网的结构特点, 在遗传算法的操作过程中, 采用基于环路的方法避免不可行解的产生, 从而提高算法的计算效率。

1 优化数学模型的建立

以系统网损 f' 最小为目标函数, 配电网重构优化的数学模型为

$$\min f' = \sum_{i=1}^N \Delta P_i = \sum_{i=1}^N R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \quad (1)$$

基金项目: 青岛理工大学博士科研基金(C2007-016)

式中: N 为配电线路总数量, ΔP_i 、 R_i 、 U_i 分别为线路 i 的有功损耗、电阻、电压值, P_i 、 Q_i 分别为线路 i 上流过的有功功率、无功功率。

不等式约束包括电压降约束、线路电流值约束和电源容量约束, 即

$$U_i \geq U_{i \min} \quad i = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$I_i \leq I_{i \max} \quad i = 1, \dots, N \quad (3)$$

$$S_j \leq S_{j \max} \quad j = 1, \dots, B \quad (4)$$

式中: $U_{i \min}$ 为线路 i 要求的最低工作电压值, $I_{i \max}$ 为线路 i 的导线型号对应的载流量值, S_j 、 $S_{j \max}$ 分别为变电所 j 的负载量、供电能力, B 为变电所总数量。

此外, 还应保持网络的放射性, 即不形成闭环, 以及不出现孤岛的情况, 即每次循环遍历的负荷节点个数等于网络中总的负荷节点个数。

利用外部惩罚函数法将式 (1) ~ (4) 转化为无约束问题, 则扩展后的目标函数为:

$$\min f = f' + MP \quad (5)$$

$$P = \sum_{i=1}^N \left\{ \left[\min(0, U_i - U_{i \min}) \right]^2 + \left[\min(0, I_{i \max} - I_i) \right]^2 \right\} + \sum_{j=1}^B \left[\min(0, S_{j \max} - S_j) \right]^2 \quad (6)$$

式中: M 为惩罚因子, MP 为惩罚项。

2 环路的基本概念^[4]

所谓环路是指配电网的开关全部闭合时, 在网络中形成的闭环回路, 有 2 种形式: (1) 从配电网的一个电源节点出发, 每个节点只经过一次, 到达另一个电源节点的环为第一类环; (2) 从配电网的某一个节点出发, 每个节点只经过一次, 又回到这个节点的环称为第二类环^[4]。

图 1 所示为一简单配电网, 包括 2 个电源节点和 12 个中间节点, 每条线路上均有开关, 且节点 4 和节点 10 之间有联络开关, 共 15 个开关。按照环路的定义, 共有 7 个环路, 分别为: (1) 13-1-2-3-4-5-6-7-14; (2) 13-1-2-3-4-10-9-8-7-14; (3) 13-1-12-11-10-9-8-7-14; (4) 13-1-12-11-10-4-5-6-7-14; (5) 1-2-3-4-10-11-12-1; (6) 4-5-6-7-8-9-10-4; (7) 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-1。其中前 4 个环路属于第一类环, 后 3 个环路属于第二类环。S₁~S₁₅ 分别为各线路上的开关。

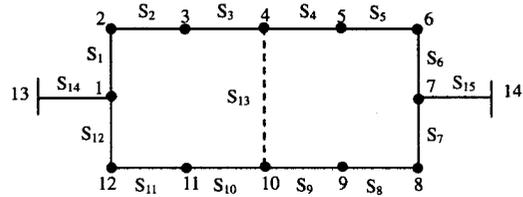


图 1 配电网简图

Fig.1 Skeleton diagram of distribution network

3 基于环路的遗传算法操作

3.1 编码^[4]

染色体编码采用常用的二进制编码方式, 将网络中的开关状态用 0 或 1 来表示, 分别对应断开或闭合。考虑到配电网的特点, 为缩短染色体长度, 提高计算效率, 编码时不再考虑以下 2 类线路上的开关: (1) 网络中的树状支路, 其上的开关必须闭合, 如果断开, 则会形成孤岛; (2) 当变电所只有一条出线时, 该线路上的开关虽然属于某些环路, 但在优化时也一定处于闭合状态, 因为, 如果该线路上的开关断开, 则表示该变电所停止供电, 这样其他变电所的平均供电半径、系统网损和末端电压降都将增大, 该方案一定不是最优解。这样, 对系统中剩余开关进行编码, 每个开关占据染色体的一位, 各开关状态组合在一起形成一条染色体。例如如图 1 中的配电网, 只需对开关 S₁~S₁₃ 进行编码。

3.2 产生初始种群

随机产生 ps 个长度为 L (L 为进行编码的开关数量总和) 的二进制编码, 作为初始种群。为了让初始种群遍及整个解空间, 尽量反映搜索空间的性态, ps 不能取太小, 且随节点数的增多而变大, 不过太大会使运算时间增加。 ps 取染色体长度的一个线性倍数是实际应用时经常采用的方法, 如可取为 L 和 $2L$ 之间的一个确定数。

在产生初始解前要对配电网进行基环变换操作^[4], 以便搜索得到网络中的所有环路。

基于环路的初始解产生方法为: (1) 令所有基因值均为 1; (2) 按顺序判断各环路中是否有断开的开关, 如果没有, 则随机断开该环路中任一个开关, 这样可以保证不形成闭环; 如果已经存在, 不论几个, 都不再操作, 因为当一个环路与其它环路有公共开关时, 可能出现一个环路中断开多个开关的情况, 但不会形成孤岛。该方法产生的初始解均是可行解。

例如对应图 1 的某一初始解为 {1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1}, 表示断开的开关为 {S₃, S₅, S₉}, 产生的方法可能是在处理第 1 个环路时断

开开关 S_3 , 第 2 个环路不操作, 第 3 个环路断开开关 S_9 , 第 4 个环路断开开关 S_5 , 第 5、6、7 个环路不操作。这样在环路 1、环路 2、环路 6 中均有 2 个开关断开, 而环路 7 中有 3 个开关断开, 但并不出现孤岛情况。而认为每个环路中只能断开一个开关的方法^[5], 仅适用于各环路间没有公共开关的简单配电网。

3.3 确定初温及退温操作

初温的确定选择 $t_0 = K\delta$ 的形式, 其中, K 为充分大的数, δ 为初始种群中最大与最小目标函数值的差值。退温函数选用常用的 $t_{n+1} = \alpha_n$ 形式, 其中 $0 < \alpha < 1$ 。

3.4 确定适应函数

适应函数值 F_i 是遗传算法指导搜索方向的依据, 目标函数的优化方向应对应适应函数值增加的方向, 同时对适应函数值进行适当的拉伸是必要的。采用如下的变换拉伸方式

$$F_i = \exp[-(f_i - f_{\min})/t_n] \quad (7)$$

式中: f_{\min} 为当前进化群体的最小目标函数值。

3.5 交叉和变异操作

根据 Srinivas^[6]等人提出的自适应遗传算法 (AGA), 并对其改进, 交叉率 P_c 和变异率 P_m 的自适应计算方法为

$$P_c = \begin{cases} k_1 + \frac{k_2(F_{\max} - F_i)}{(F_{\max} - F_{\text{avg}})} & F_i \geq F_{\text{avg}} \\ k_3 & F_i < F_{\text{avg}} \end{cases} \quad (8)$$

$$P_m = \begin{cases} k_4 + \frac{k_5(F_{\max} - F_i)}{(F_{\max} - F_{\text{avg}})} & F_i \geq F_{\text{avg}} \\ k_6 & F_i < F_{\text{avg}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $k_1 \sim k_6$ 为常数, 且 $k_3 = k_1 + k_2$, $k_6 = k_4 + k_5$, F_{\max} 、 F_{avg} 分别为当前进化群体的最大和平均适应函数值, F_i 为两个交叉个体中较大的适应函数值。

为了减少不可行解的产生, 本文设计了基于环路的交叉方法, 即交换两个染色体中某一环路包含的所有开关对应的基因值, 有以下 3 种情况: (1) 当该环路与其它环路没有公共开关时, 交叉后两个染色体仍为可行解; (2) 当该环路与其他环路有公共开关, 但参加交叉的两个染色体中该环路断开的开关数量相等时, 交叉后也是可行解; (3) 当该环路与其他环路有公共开关, 且参加交叉的两个染色

体中该环路断开的开关数量不相等, 交叉后将产生不可行解, 需进行修复。如对应图 1 的两个染色体编码为 {1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1}、{1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0}, 设随机选取第 3 个环路进行交叉操作, 互换两个染色体的第 7、8、9、10、11、12 位基因, 属于第 (2) 种情况, 生成的子染色体 {1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1}、{1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0} 均为可行解。如果随机选取了第 4 个环路进行交叉操作, 则互换两个染色体的第 12、11、10、13、4、5、6 位基因, 属于第 (3) 种情况, 生成的子染色体 {1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0}、{1, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1} 分别存在孤岛 (节点 4) 和闭环 (环路 2 和 5) 的情况。对于产生的不可行解, 进行以下操作即可修复成可行解: 对于闭环的情况, 随机打开存在闭环的环路中任一开关; 对于出现孤岛的情况, 则闭合连接孤岛节点的任意一个开关即可。

令两个父染色体交叉位置左侧为 0 的位数相等的交叉方法^[7], 也不能完全避免不可行解的产生, 如上述两个父染色体的交叉位置为 8, 左侧均有 2 个 0, 交叉后产生的子染色体为 {1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0}、{1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1}, 第一个子染色体存在闭环 (环路 3) 和孤岛 (节点 4、5), 第二个子染色体也存在闭环 (环路 5) 和孤岛 (节点 8、9)。该方法只是随机对各开关进行编码, 对不可行解的修复要比本文基于环路的方法困难的多。

变异操作时, 如果采用普通的单点变异, 则一定会造成配电网出现闭环或“孤岛”的情况, 因此, 变异操作时其它基因位需作相应变化。本文变异操作时也同样基于环路, 首先随机选择染色体的一个 0 基因位将其变为 1, 然后对包含该开关的所有环路进行检查, 如果某环路出现闭环, 则随机把此环路中某基因值由 1 变为 0, 如果某环路不出现闭环 (因某些环路中可能存在多个断开的开关), 则不必操作, 这样操作均产生可行解。而简单的把与该变异位相邻的编码为 1 的基因位变为 0^[7], 则不能保证解的可行性。

3.6 改进的选择复制操作

运用遗传算法中常用的轮盘赌选择法和模拟退火算法中基于 Metropolis 判别准则的复制策略相结合的方法进行群体选择, 产生下一代群体。即首先应用轮盘赌法选择一个染色体 i , 然后在染色体 i 的邻域内随机产生一个新个体 j , i 和 j 竞争进入下一代群体的准则采用 Metropolis 判别准则: 令

$\Delta f = F_i - F_j$, 若 $\Delta f \leq 0$, 则把染色体 j 复制到下一代群体; 否则产生 $[0, 1]$ 之间的随机数 r , 如果 $r < \exp(-\Delta f/t_n)$, 则同样把染色体 j 复制到下一代群体, 否则, 把染色体 i 复制到下一代群体。基于 Metropolis 判别准则的复制策略, 在接受优质解的同时, 有限度的接受劣质解, 保证了群体的多样性。同时为了保证遗传算法的全局收敛性, 实施最优保留策略。

4 实例分析

根据本文算法, 用 C++ 语言编制了优化程序, 并对 69 节点配电系统^[7]进行了重构优化。

69 节点配电网的额定电压为 12.66 kV, 有 69 个节点, 74 条线路, 5 个联络开关, 系统图参见文献^[7]。文献^[7]中取染色体长度为 74, 平均迭代到 300 代时才得到最优解。利用本文算法对支路和连接电源的开关进行编码简化后, 染色体的长度为 57, 运行优化程序 50 次, 平均在 18 代时得到最优解。当不采用基于环路的方法, 仅使用改进遗传算法进行优化时, 在参数选取相同的情况下, 平均在 42 代得到最优解, 但由于操作过程中大量不可行解的存在, 计算时间大大增加。

5 结论

根据配电网的特点, 给出了编码简化方法, 在遗传算法产生初始种群、交叉、变异操作过程中提出了基于环路的方法, 避免了不可行解的产生, 提高了算法的计算效率。对遗传算法的操作过程进行了改进, 使算法具有一定的自适应性和避免陷入局部最优解的能力。

参考文献

- [1] 毕鹏翔, 刘健, 刘春新, 等. 配电网重构的改进遗传算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 57-61.
BI Peng-xiang, LIU Jian, LIU Chun-xin, et al. A Refined

- Genetic Algorithm for Power Distribution Network Reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 57-61.
- [2] 黄彦浩, 李晓明. 配电网重构遗传算法的不可行解问题研究[J]. 电力建设, 2004, 25(3): 23-27.
HUANG Yan-hao, LI Xiao-ming. Study on Infeasible Solution of Distribution Network Reconfiguration Genetic Algorithm[J]. Electric Power Construction, 2004, 25(3): 23-27.
- [3] 王天华, 王平洋, 范明天. 用演化算法求解多阶段配电网规划问题[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 34-38.
WANG Tian-hua, WANG Ping-yang, FAN Ming-tian. Optimal Multi-stage Distribution Planning Using Evolutionary Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(3): 34-38.
- [4] 刘健, 毕鹏翔, 董海鹏. 复杂配电网简化分析与优化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 39-44.
LIU Jian, BI Peng-xiang, DONG Hai-peng. Simplified Analysis and Optimization of Complicated Distribution Networks[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002: 39-44.
- [5] 余健明, 蔡利敏, 杨文字. 基于提高系统可靠性降低网损的配电网重构[J]. 电工技术学报, 2004, 19(10): 70-73.
YU Jian-ming, CAI Li-min, YANG Wen-yu. Distribution Network Reconfiguration for System Reliability Improvement and Power Loss Reduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(10): 70-73.
- [6] Srinivas M, Patnaik L M. Adaptive Probabilities of Crossover and Mutation in Genetic Algorithms[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1994, 24(4): 656-667.
- [7] 刘莉, 陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网重构[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 Genetic Algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 66-69.

收稿日期: 2007-12-11; 修回日期: 2008-01-21

作者简介:

杨建军 (1977-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为智能控制在电力系统中的应用、优化算法。E-mail: yjjdem@163.com

许继超高压保护产品在银川东 750 kV 变电站成功投运

银川东 750 kV 变电站经过数天的系统调试, 8 月 3 日变电站完成了人工接地短路试验, 8 月 4 日完成 24 小时试运行阶段, 顺利移交生产, 国内规模最大的银川东 750 kV 变电站正式投运, 从而使宁夏电网跃升到世界商业运行最高电压等级行列。

银川东 750 kV 变电站是电力工业“十一五”发展规划重点项目, 属国家、省重点工程, 西北网调和宁夏省电力公司对此非常重视。许继公司向该站提供了 750 kV 主变保护及电抗器保护、330 kV 部分的母差保护、330 kV 的线路保护及断路器保护。

银川东 750 kV 变电站是许继 750 kV 保护产品供货的第一站。该站的成功投运, 标志着许继在超高压保护领域又前进一步, 而产品的不断成熟, 也将带动公司在超高压变电站保护及自动化领域的市场开拓。同时通过银川东 750 kV 变的投运, 使许继对高压保护领域的认识更深一步, 为公司今后的发展积累了丰富的经验和宝贵的财富。