

基于图论的改进遗传算法在配网重构中的应用

杨建军, 战红

(青岛理工大学机械工程学院, 山东 青岛 266033)

摘要: 针对遗传算法求解配电网重构优化时, 随机编码操作将产生大量不可行解的缺点, 设计了基于图论的改进遗传算法进行重构优化。根据配电网与图论中树结构的相似性, 确定了配电网重构优化实质上是在初步连接图的基础上寻找最优的生成树或某组树, 并引入环路的概念, 基于破圈法和环路的性质进行编码操作, 在产生初始解和变异操作时生成的解均为可行解, 交叉操作时满足树的基本条件, 避免或大大减少了不可行解的产生, 从而提高了算法的计算效率。分别对 IEEE33 和 IEEE69 节点配电系统进行了重构优化, 两个优化算例说明了该方法的有效性。

关键词: 配电网; 网络重构; 图论; 改进遗传算法; 树; 环路

Application of the improved genetic algorithm based on graph theory in distribution network reconfiguration

YANG Jian-jun, ZHAN Hong

(School of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China)

Abstract: When genetic algorithm is used to optimize the distribution network reconfiguration, if coding is operated randomly, large quantities of infeasible solutions will be generated. Aiming at the disadvantage, improved genetic algorithm based on graph theory is designed to optimize network reconfiguration. Based on the similarity between distribution network and tree structure in the graph theory, the essential of distribution network reconfiguration optimization is determined, that is to search for optimal spanning tree or tree team based on preliminary connection diagram, introduce the concept of loop, code based on circle breaking and loop, make the solutions feasible in the operations of initial solutions creating and mutation, satisfy the essential condition of tree crossover in the operation, thus the number of infeasible solutions is reduced, and the computational efficiency of the method is enhanced. IEEE33 and IEEE69 bus distribution systems are reconstructed and optimized respectively, and the two examples show that the algorithm is efficient.

This work is supported by National Natural Science Foundation of Shandong Province (No.Y2007G48).

Key words: distribution network; network reconfiguration; graph theory; improved genetic algorithm; tree; loop

中图分类号: TM727.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0122-04

0 引言

配电网重构优化问题是一个大规模非线性组合优化问题。目前遗传算法等现代优化方法在求解该问题中已得到较广泛地应用, 求解时正好用二进制编码表示网络中的开关状态, 但在优化过程中如果不根据配电网的特点, 完全依赖随机编码操作, 将产生大量的不可行解, 生成可行解的几率只有千分之几左右^[1], 极大地浪费了计算时间, 影响算法的计算效率。文献[1-2]虽然在遗传编码时考虑了配

电网络的结构特点, 产生初始解时减少了不可行解的产生, 但在交叉、变异操作以及针对复杂配电网时, 仍将有大量的不可行解产生。文献[3]针对简单配电网采用十进制编码遗传算法在基本环路的基础上研究了减少不可行解的方法, 编码方式繁琐。文献[4]根据图论中的生成树特性, 利用基本环路及环和操作, 针对单电源的简单网络实现了生成的初始解均为可行解, 没有涉及操作过程中解的处理方法。

根据配电网与图论中树的结构具有相似性, 可将所有开关闭合时的配电网作为初步连接图, 配电网重构优化即是以此初步连接图为基础, 通

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(Y2007G48)

过改变开关组合状态, 寻找一最优的过所有节点的树状网络。本文针对复杂配电网的结构特点, 在优化过程中对遗传算法产生初始解、交叉和变异等操作过程进行了改进, 避免或大大减少了不可行解的产生, 提高了算法的计算效率。

1 配电网重构优化数学模型

以网损最小为优化目标, 其表达式为^[5]:

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

式中: f' 为目标函数值; N 为配电线路总数量; ΔP_i 、 R_i 、 U_i 、 P_i 、 Q_i 分别为线路 i 的有功损耗、电阻、电压、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, 如果是多电源的情况还应有电源容量约束, 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 的最低要求运行电压值; $I_{i\max}$ 为线路 i 导线对应的最大载流量值; S_j 、 $S_{j\max}$ 分别为电源 j 的负载量和最大供电能力; B 为电源总数量。

同时, 必须保持配电网的放射性和不出现孤岛, 即保证所有节点均能供电且不出现闭环。在遗传算法操作过程中, 通过基于环路的方法, 及对少量不可行解的舍弃或修复, 使该约束条件得到满足。

利用罚函数法将原目标函数和剩余不等式约束转化为无约束优化问题, 并做统一化处理, 可得:

$$f = f' + M \left[\sum_{i=1}^N \max(0, 1 - U_i / U_{i\min}) + \sum_j^N \max(0, 1 - I_j / I_{j\max}) + \sum_k^B \max(0, 1 - S_k / S_{k\max}) \right] \quad (5)$$

式中, M 为惩罚因子。

2 基于图论的改进遗传算法

2.1 编码

染色体编码采用常用的二进制编码方式, 即将网络中的开关状态用 0 或 1 来表示, 0 表示断开, 1 表示闭合。

运行时的配电网应保持放射性, 即具有图论

中树的性质。根据图论的理论可知, 在一棵树中边的数量等于节点数量减一。对于单电源的情况, 其运行配电网是初步连接图的一棵生成树, 即网络中包含所有节点且连接状态的线路数量等于总节点数量减一; 而对于含有 B 个电源的情况, 则对应 B 棵树, 而非生成树 (否则将形成由一个电源连接另一个电源的闭环), 即形成 B 个独立的树状网络, 总连接状态线路数量等于总节点数量减 B 。因此, 配电网重构优化实质上就是在初步连接图的基础上寻找最优的生成树 (单电源) 或某组树 (多电源)。

根据图论中圈的概念, 本文在配电网中引入环路^[6]的概念, 所谓环路是指配电网的所有开关均处于闭合状态时的初步连接图中可形成的闭环回路。从配电网的某一个节点出发, 每个节点、线路只经过一次, 又回到该节点的环路称为第一类环路; 对于多电源的情况还存在第二类环路, 即从一个电源节点出发, 每个节点、线路只经过一次, 到达另一个电源节点的环路为第二类环路。

如图 1 所示的简单配电网初步连接图, 包括 2 个电源节点 (节点 1 和 2) 和 7 个中间节点 (节点 3 到 9), 认为每条线路上均有开关, 共 10 个开关 (T_1 到 T_{10})。按照环路的定义, 共有 7 个环路, 各环路中的开关集合分别为: $\{T_1, T_2, T_5\}$ 、 $\{T_2, T_7, T_8, T_6, T_3, T_4, T_1\}$ 、 $\{T_3, T_4, T_5, T_7, T_8, T_6\}$ 、 $\{T_{10}, T_3, T_4, T_1\}$ 、 $\{T_{10}, T_3, T_4, T_5, T_2\}$ 、 $\{T_{10}, T_6, T_8, T_7, T_5, T_1\}$ 、 $\{T_{10}, T_6, T_8, T_7, T_2\}$ 。前 3 个属于第一类环路, 后 4 个属于第二类环路。

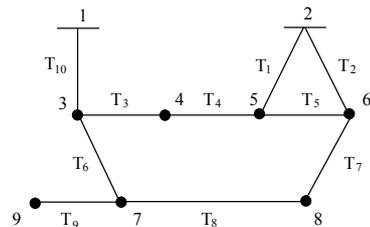


图 1 配电网示例

Fig.1 Example of distribution network

根据图论中的破圈法^[7], 树状配电网的生成方法为: 逐次断开网络初步连接图中任一环路中的任一开关, 直到图中不存在环路。

根据配电网的运行特点, 网络中不在任何环路中的树状支路, 实际运行中这些支路上的开关如果断开, 则会形成孤岛, 因此必须闭合, 如图 1 中的开关 T_9 ; 另外当电源只有一条出线时, 该线路上的开关必须闭合, 因为, 如果系统是单电源情况, 所有节点将无法供电, 而如果是多电源情况, 虽然负荷节点能够供电, 但断开该线路上的开关, 则表示

该电源停止供电, 将使其他电源的平均供电半径、系统网损和末端压降增大, 该方案一定不是最优解, 如图 1 中的开关 T_{10} 。因此编码时只需考虑除上述情况的其他开关, 这样可以缩短染色体长度, 并减少无用操作。如图 1 中的配电网, 仅需对开关 $T_1 \sim T_8$ 进行编码。

2.2 产生初始种群

为了避免不可行解的产生, 根据破圈法原理, 每个染色体的具体产生方法为: 首先令所有基因值均为 1, 形成配电网的初步连接图, 搜索所有环路; 然后逐个判断各环路是否有断开的开关, 如果没有, 则随机断开该环路中的任一开关, 当一个环路与其他环路有公共开关时, 可能出现一个环路中断开多个开关的情况, 但由于其他环路的连接关系不会出现孤岛的情况。同时产生过程中可随时判断连接状态的线路数量与节点数量的关系, 如果满足相应树的特性, 则终止, 以节省运算时间。该方法产生的初始解均是可行解。

如对应图 1, 经过以下过程可产生一随机初始解: 在处理第 1 个环路时随机选择断开开关 T_1 , 第 2 个环路中随机选择断开开关 T_3 , 第 3 个环路中已有断开的开关不操作, 第 4 个环路中随机选择断开开关 T_7 , 此时连接状态的线路数量与节点数量的关系已满足 2 个电源时对应 2 棵树的要求, 产生过程结束。该随机初始解为 $\{0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1\}$, 表示断开的开关为 $\{1, 3, 7\}$ 。这样在环路 3、4、6 中均有两个开关断开, 环路 2 中有三个开关断开。而每个环路中只能断开一个开关的方法^[2]仅能适用于各环路间没有公共开关的简单配电网。

2.3 交叉操作

如果采用传统的二进制编码交叉方法, 如单点、多点交叉等, 将产生大量的不可行解。本文设计了基于环路的交叉方法来避免或减少不可行解的产生。

先随机选择两个交叉的父个体, 再随机选择一个环路, 且该环路在交叉的两个父个体中断开的开关数量相同但编号不同 (如编号相同则交叉后染色体不变), 然后对比两个染色体中该环路包含开关对应基因位的基因值, 如果不同则交换 (相同时交换没有意义), 这样保证了交叉后连接线路数量与节点数量的关系仍满足相应树状网的基本条件。其中包括 2 种情况: ①两个染色体在该环路中均只有一个断开的开关, 根据破圈法原理, 交叉后生成的两个染色体一定为可行解; ②两个染色体在该环路中断开的开关数量大于 1, 虽然交叉后也有可能产生不可行解, 但由于仍满足相应生成树或一组树中连接

线路数量与节点数量的基本关系, 可以大大增加产生可行解的几率。对于不可行解可以舍弃或修复为可行解。

如对应图 1 的两个染色体编码为 $\{0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1\}$ 、 $\{1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1\}$, 设随机选取第 3 个环路进行交叉, 则互换两个染色体的第 3、4、5、6、7、8 位基因中具有不同基因值的基因位, 两个染色体在该环路中断开的开关数量为 2, 属于第②种情况, 生成的子染色体为 $\{0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1\}$ 、 $\{1, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 1\}$ 均为可行解。

2.4 变异操作

如果采用普通的单点变异, 变异后不满足相应树的基本条件, 一定会产生不可行解。例如当某位基因由 1 变为 0 时, 则会出现孤岛的情况; 当某位基因由 0 变为 1 时, 则会出现闭环的情况。为了避免不可行解的产生, 可以采用以下两种变异方法中的一种: ①在染色体的基因值中随机选择一个 0 将其变为 1, 然后搜索到出现闭环的环路, 根据破圈法, 随机把此环路中其他基因值为 1 的一个基因变为 0; ②在染色体的基因中随机选择一个 1 将其变为 0, 然后搜索到孤岛区域, 并在联系孤岛与连通区域之间的其他断开开关中随机选择一个, 将其基因值变为 1。这样操作后产生的解均为可行解。

3 优化实例

根据本文算法, 分别对 IEEE33 节点配电系统^[2]和 69 节点配电系统^[8]进行了重构优化, 两个配电系统均为单电源, 重构后得到的优化结果与相应文献所得结果相同, 且具有染色体编码长度短, 产生不可行解大大减少的优点。

IEEE33 节点配电系统中有 37 条线路, 其中 5 个为联络开关, 其余线路上都有开关, 简化后运算过程中染色体的长度为 36, 经搜索, 该系统图中共有 22 个环路, 运行优化程序 50 次, 平均在第 10 代得到最优解。文献[2]中染色体长度为 37, 平均迭代到 27 代时得到最优解, 并且文中在交叉、变异操作过程中没有设置相关避免不可行解的方法。

IEEE69 节点配电系统中共有 74 条线路, 5 个联络开关, 每条线路上也均有开关, 简化后染色体的长度为 57, 经搜索, 该系统图共有 22 个环路, 运行优化程序 50 次, 平均在 14 代时得到最优解。而文献[8]中染色体长度为 74, 平均迭代到 300 代时才能得到最优解, 且编码操作完全随机进行。

由于本文算法在产生初始种群、交叉和变异操作时避免或大大减少了不可行解的产生, 使得每代

的计算时间比仅依赖常规遗传算法随机操作的计算时间明显减少。

4 结论

运行配电网络具有图论中树的性质, 网络重构优化的实质是在初步连接图的基础上寻找最优的生成树或某组树。根据该特点, 本文设计了基于图论的改进遗传算法, 采用基于环路和破圈法产生初始种群和进行交叉、变异操作, 在产生初始解和变异操作时避免了不可行解的产生, 在交叉操作时避免或大大减少了不可行解的产生, 从而提高了算法的计算效率。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 周辉, 王击, 罗安, 等. 克隆遗传算法与模拟退火算法相结合的配电网重构[J]. 继电器, 2007, 35 (7): 41-45.
ZHOU Hui, WANG Ji, LUO An, et al. Distribution network reconstruction based on the combination of CGA and SA[J]. Relay, 2007, 35 (7): 41-45.
- [3] 麻秀范, 张粒子. 基于十进制编码的配网重构遗传算法[J]. 电工技术学报, 2004, 19 (10): 65-69.
MA Xiu-fan, ZHANG Li-zi. Distribution network reconfiguration based on genetic algorithm using decimal encoding[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19 (10): 65-69.
- [4] 黄健, 张尧, 李绮雯. 蚁群算法在配电网重构的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19 (4): 59-64.
HUANG Jian, ZHANG Yao, LI Qi-wen. Application of ant colony system in distribution reconfiguration[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19 (4): 59-64.
- [5] 杨建军, 战红, 陈宪国. 基于遗传算法并避免不可行解的配电网重构优化[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (17): 43-46.
YANG Jian-jun, ZHAN Hong, CHEN Xian-guo. Optimization of distribution network reconfiguration of avoiding infeasible solutions based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (17): 43-46.
- [6] 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: 39-40.
LIU Jian, BI Peng-xiang, DONG Hai-peng. Simplified analysis and optimization of complicated distribution networks[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002: 39-40.
- [7] 刘缙武. 应用图论[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2006: 15-17.
LIU Zuan-wu. Applied graph theory[M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2006: 15-17.
- [8] 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.
- [11] Mao W. Modern cryptography: theory and practice[M]. NJ: Prentice-Hall, 2004.
- [12] Shamir A. Identity based cryptosystems and signature schemes. Lecture Notes in Computer Science[M]. New York: Springer-Verlag, 1984: 47-53.
- [13] Boneh D, Franklin M. Identify-based encryption from the weil pairing[J]. SIAM Journal of Computing, 2003, 32 (3): 586-615.
- [14] Chen L, Cheng Z, Smart N P. Identity-based key agreement protocols from pairings[J]. International Journal of Informtion Security, 2007, 6 (4): 213-241.
- [15] Kersting W H. Radial distribution test feeders[C]. //Proceedings of IEEE PES Winter Meeting. Columbus (USA): 2001: 908-912.

收稿日期: 2010-04-30

作者简介:

杨建军 (1977-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为系统工程优化、优化算法; E-mail: yjjdem@163.com

战红 (1978-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为电力系统优化与控制。

收稿日期: 2010-04-06; 修回日期: 2010-09-06

作者简介:

孙中伟 (1970-), 男, 博士, 副教授, 从事电力系统信息安全理论与应用研究; E-mail: zwsun@ncepu.edu.cn

张荣刚 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为网络与信息安全等。

(上接第 121 页 continued from page 121)