

基于无向图所有生成树的网络重构遗传算法

张 剑

(江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏 南京 210003)

摘 要: 网络重构对于配电网安全、经济运行具有重要的理论研究与实际应用价值。本文提出了一种基于配电网简化图所有生成树的网络重构遗传算法。该方法首先搜索出配电网简化图的所有生成树, 简化图减去生成树得到连支, 连支的每条边上有且仅有一个开关打开; 提出了以连支每条边的开关数量为基向量、打开开关在边上的编号为优化变量的十进制编码方法, 大大缩短了编码长度; 每棵生成树对应一个子种群, 并行计算子种群中的遗传操作, 得到的子代个体自动满足配电网辐射状、无孤岛运行的约束条件, 避免了传统网络重构遗传算法产生大量不可行解, 搜索效率低的弊端; 算例表明, 本文提出的方法具有计算速度快、性能好的特点。

关键词: 网络重构; 遗传算法; 并行计算; 无向图所有生成树; 十进制编码; 配电网

0 引言

为了提高供电可靠性, 城市配电网一般设计为环网结构, 为了减小短路电流与便于继电保护的整定, 一般采用开环运行方式。配电线路中包含大量常闭的分段开关及少量常开的联络开关。配电网网络重构通过调整开关状态能够达到降低网损、隔离故障、均衡负荷、提高电压等目的。目前, 配网自动化示范工程在全国各大中城市全面铺开, 配网自动化系统能够人工、交互或者自动地调整开关状态, 为网络重构的实际工程应用奠定了良好基础。

配电网网络重构是一种大规模、非线性组合优化问题, 主要有支路交换法^[1-3]、最优流法^[4]、遗传算法^[5-14]、启发式方法^[15-18]、混合方法^[19]等。由于遗传算法不依赖于初值、鲁棒性好、能得到全局最优解等优点, 得到了众多学者的关注。

在最初的基于遗传算法的配电网网络重构中, 通常采用二进制编码方法, 每个开关对应染色体中的一个基因位, 基因为 0 表示开关打开, 为 1 表示开关闭合。这种编码方式容易理解、实现简单。但是大量不能打开的开关也参与了编码, 导致染色体较长, 在交叉、变异过程中会产生大量不可行解, 程序搜索效率十分低下。

文献[7]提出了一种只对环路中的开关进行二进制编码, 对交叉、变异后产生的不可行解进行改良操作的网络重构遗传算法, 该方法减小了染色体长度, 但初始种群中含有大量不可行解, 改良过程需要耗费大量时间。文献[8]提出了构成同一环路的开

关将在同一基因块内、相邻开关在染色体中相邻的二进制编码策略, 交叉操作为单个基因块内开关的交换, 变异操作只能针对单个开关, 而且变异过程产生不可行解, 修正操作耗费时间, 效率较低。文献[9]提出了基于环路的十进制编码方法, 缩短了编码长度, 在有开关处于多个环路时仍然会产生大量不可行解。

本文提出了一种基于无向图所有生成树的配电网网络重构遗传算法, 该方法首先将配电网拓扑结构图中不在环路中的支路去掉、度为 2 的相邻节点所在的支路合并为一条边, 得到配电网拓扑简化无向图, 然后搜索出简化无向图的所有生成树。简化无向图减去生成树得到连支, 连支的每条边上有且仅有一个开关打开, 其余开关闭合, 具体打开哪个开关将由遗传算法搜索得出。提出了以连支的边上开关数量为基向量、开关在边上的编号为优化变量的十进制编码方法, 大大缩短了编码长度; 每棵生成树对应一个子种群, 选择、交叉、变异、重插入等遗传操作都在子种群中进行, 得到的子代个体自动满足配电网辐射状、无孤岛的运行约束条件, 不需要进行任何附加的改良操作, 避免了传统遗传算法产生大量不可行解的弊端, 提高了搜索效率; 并行计算各个子种群的遗传操作, 大大提高了计算速度; 根据指定的进化代数, 目标函数值最小的染色体对应的打开开关即为问题的全局最优解。

1 网络重构的数学模型

本算法的目标是网络重构后网损最小, 且满足

配电网运行必要的约束条件。目标函数为:

$$\min f = \sum_{i=1}^n \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} r_i k_i \quad (1)$$

式中, P_i 、 Q_i 分别为支路 i 末端流过的有功、无功功率; U_i 为支路 i 末端的节点电压; n 为支路数; r_i 为支路 i 的电阻; k_i 为支路 i 上的开关状态, 是 0~1 离散变量, 0 表示打开, 1 表示闭合。 f 为网络有功损耗, 可以通过潮流计算得到。

节点电压与支路功率应满足以下约束条件。

1) 节点电压约束

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max}$$

式中, $U_{i\min}$ 、 $U_{i\max}$ 分别为节点 i 电压有效值的上、下限。

2) 支路功率约束

$$S_i \leq S_{i\max}$$

式中, S_i 、 $S_{i\max}$ 分别为支路 i 上流过功率的计算值、允许的最大值。

当电压及支路功率出现越限时, 计算越限比例并将其计入罚函数中, 越限越多, 罚函数越大, 然后将罚函数计入目标函数中。

2 简化图的所有生成树及相关概念

2.1 简化图的生成树与连支

城市配电网拓扑结构图是以配变或线路为支路、负荷母线为节点的有环、无向、连通图。将不在环路中的支路去掉、度为 2 的相邻节点所在的支路合并成一条边, 由此构成一个简化图 G 。 G 的生成树是 G 的一个子图, 其中任意两个节点之间有且仅有一条简单路径。生成树包含 G 的所有节点, 但不包含 G 的所有边, 不同的生成树由不同的边组成。 G 减去生成树剩下的边组成的集合称为连支, 一个连支包含的边数等于环数, 采用无向图所有生成树的搜索算法^[20-21]可以搜索出简化图的所有生成树及其连支, 本文采用文献[20]的方法。

图 1 为 IEEE 典型的三馈线试验系统, 虚线为联

络开关所在支路, 将图 1 中的母线 1、2、3 联接起来、去掉不在环路中的支路、将度为 2 的相邻节点所在的支路合并为一条边, 可以简化为图 2 所示的形式。由图 2 可以清晰地看出, 边(1)、(3)、(4)、(5)构成配电网简化图的一棵生成树, 边(2)、(6)、(7)为该生成树的连支。边(1)、(2)、(4)、(5)构成另一棵生成树, 边(3)、(6)、(7)为该生成树的连支。图 2 的所有生成树及其对应的连支分别如表 1 的第 2、3 列所示。

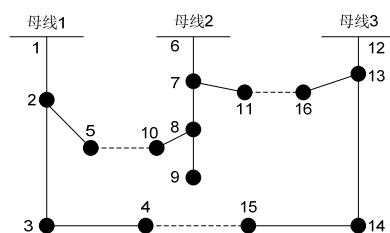


图 1 IEEE 典型的三馈线试验系统

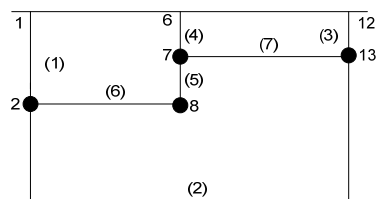


图 2 简化系统

2.2 连支的基向量

连支的基向量为以连支中每条边上的开关数量组成的向量。如表 1 第 2 行所示, 连支 1 由边(1)、(2)、(4)组成, 边(1)上的开关数量为 1, 边(2)上的开关数量为 5, 边(4)上的开关数量为 1, 因此连支 1 的基向量为(1 5 1)。图 2 的所有连支对应的基向量如表 1 第 4 列所示。

2.3 候选解

配电网任意满足辐射状、无孤岛约束条件的打开开关组合对应网络重构的一个可行解, 这个可行解即为候选解。最优解只能从候选解中产生。当且仅当从连支的每条边中选择一个开关打开, 产生一个候选解。将连支基向量的每个分量作乘积运算即可得到连支对应的候选解数目。将每个连支对应的候选解数量累加即可得到整个配电网网络重构总的候选解数目。如表 1 第 2 行第 5 列所示, 生成树 1 的候选解数目为 $1 \times 5 \times 1 = 5$ 。即在连支 1 上能够打开的满足辐射状、无孤岛约束条件的开关组合共有 5 种。如表 1 第 26 行第 5 列所示, IEEE 典型的三馈线

试验系统候选解的数目为 190 个。

表 1 生成树、连支及基向量

序号	生成树	连支	基向量	候选解个数
1	(3) (5) (6) (7)	(1) (2) (4)	(1 5 1)	5
2	(2) (3) (5) (7)	(1) (4) (6)	(1 1 3)	3
3	(1) (3) (5) (7)	(2) (4) (6)	(5 1 3)	15
4	(2) (3) (6) (7)	(1) (4) (5)	(1 1 1)	1
5	(1) (3) (6) (7)	(2) (4) (5)	(5 1 1)	5
6	(2) (3) (5) (6)	(1) (4) (7)	(1 1 3)	3
7	(2) (3) (4) (6)	(1) (5) (7)	(1 1 3)	3
8	(2) (3) (4) (5)	(1) (6) (7)	(1 3 3)	9
9	(3) (4) (5) (6)	(1) (2) (7)	(1 5 3)	15
10	(1) (3) (4) (5)	(2) (6) (7)	(5 3 3)	45
11	(1) (3) (4) (6)	(2) (5) (7)	(5 1 3)	15
12	(1) (3) (5) (6)	(2) (4) (7)	(5 1 3)	15
13	(2) (4) (6) (7)	(1) (3) (5)	(1 1 1)	1
14	(2) (4) (5) (7)	(1) (3) (6)	(1 1 3)	3
15	(4) (5) (6) (7)	(1) (2) (3)	(1 5 1)	5
16	(1) (4) (5) (7)	(2) (3) (6)	(5 1 3)	15
17	(1) (4) (6) (7)	(2) (3) (5)	(5 1 1)	5
18	(2) (4) (5) (6)	(1) (3) (7)	(1 1 3)	3
19	(1) (2) (4) (5)	(3) (6) (7)	(1 3 3)	9
20	(1) (2) (4) (6)	(3) (5) (7)	(1 1 3)	3
21	(1) (5) (6) (7)	(2) (3) (4)	(5 1 1)	5
22	(1) (2) (5) (6)	(3) (4) (7)	(1 1 3)	3
23	(1) (2) (6) (7)	(3) (4) (5)	(1 1 1)	1
24	(1) (2) (5) (7)	(3) (4) (6)	(1 1 3)	3
总计	-	-	-	190

3 编码方案与遗传操作

3.1 编码方案

遗传算法的任务是通过寻优确定连支及该连支每条边上打开开关的编号。本文采用十进制编码方法，子种群与连支一一对应，子种群中染色体的长度等于连支上边的个数，亦等于配电网拓扑结构图的网孔数，相比于传统的二进制编码方法，染色体长度大大减小。染色体每一位的取值等于对应边上打开开关的编号，为小于基向量对应位的非负整数。染色体第 i 位取 $0, 1, 2 \dots N_i - 1$ 中的某一个值，

N_i 为连支第 i 条边上的开关数目。染色体只有属于子种群才有意义，染色体的每一位数值大小相同，但是属于不同的子种群，其含义截然不同。如子种群 1 中的染色体为：(000)，其含义为打开连支 1 的边(1)上的第 0 号开关、边(2)上的第 0 号开关、边(4)上的第 0 号开关。子种群 2 中的染色体为：(000)，其含义为打开连支 2 的边(1)上的第 0 号开关、边(4)上的第 0 号开关、边(6)上的第 0 号开关。

3.2 产生初始种群

子种群的个数等于生成树的个数，子种群中染色体的个数可以根据子种群候选解个数的不同而不同。如子种群 3 的候选解的个数为 15，因此染色体数目可以选取为 2，子种群 10 的候选解的个数为 45，因此可以染色体数目可以选取为 6。对于每个子种群，可以根据候选解个数产生指定数目的染色体。

3.3 染色体的适应度值

对染色体代表的配电网中打开的开关进行解码，采用并行前推回代算法^[22]计算网损值（单位为MVA），对子种群中每个染色体对应的网损值按照从小到大进行排序，对序号从大到小等间隔线性映射为 0~2 中实数，即网损最大的染色体对应的适应度值为 0，网损最小的染色体对应的适应度值为 2，排序后序号相邻的染色体适应度值间隔相等。

3.4 基因操作

基因操作包括选择、交叉、变异、重新插入，都在子种群中进行，子种群的编码策略决定了基因操作不会产生不可行解。在完成了指定的进化代数后，整个种群（不是子种群）中目标函数值最小的个体就是最优解。

1) 选择

对于每个子种群，根据适应度值，采用“赌轮盘”法选择 N (N 为偶数) 个个体，进行遗传操作。

2) 交叉

交叉操作方法为按照指定的概率将双亲染色体对应基因位数值互换。如指定交叉概率为 0.7，表 1 中子种群 10 双亲染色体交叉后可能的结果如表 2 所示。

表 2 交叉操作

双亲			子代		
4	2	1	2	1	1
2	1	2	4	2	2

3) 变异

变异操作为按照指定的变异概率将染色体中一位或多位基因替换为小于基向量对应位的非负整数值。如指定变异率为 0.01，表 1 中子种群 10 的双亲染色体变异后的子代个体一种可能的结果如表 3 所示。

4) 重新插入

将每个子种群中选择的 N 个完成了交叉、变异操作的个体重新插入父代，同时淘汰掉子种群父代

中适应度值最小的 N 个个体。由此，既保持了子种群个体数量恒定，又保留了子种群父代的多个适应度最大的个体，即精英保留，实现了“优胜劣汰”。

表 3 变异操作

双亲		子代	
4	2	1	3
2	1	2	2

3.5 并行计算

编码、初始种群的产生、适应度值的计算、遗传操作都是在子种群中进行，子种群之间没有任何计算上的耦合关系，非常适合于并行计算。本文基于 MATLAB/ PARALLEL COMPUTING 工具箱采用并行计算方法，大大提高了算法的计算速度。

3.6 算法的逻辑框图

本文所提出的算法的总体框图如图 3 所示。输出结果时，选择种群中（非子种群）目标函数值最小的个体作为问题的最优解。

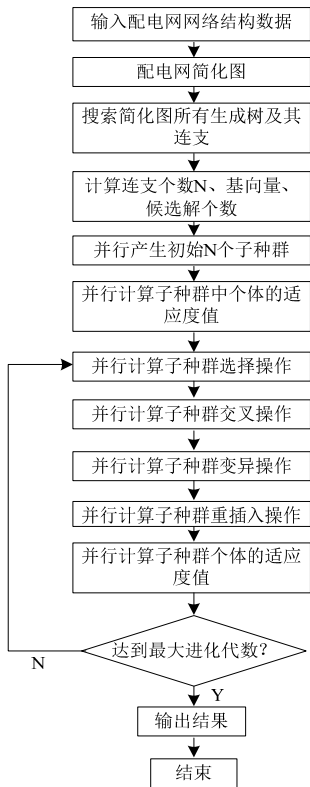


图 3 算法总体逻辑框图

4 算例

本文采用两个算例进行了试算，分别用于验证单电源供电与多电源供电情况下所提出算法的正确性与快速性，为了方便记录数据，在试验中采用前述方法确定最佳解，再以得到的最佳解作为程序终

止的条件。程序采用 MATLAB 编写。

算例 1：以 3 馈线 16 节点 3 网孔系统为例，如图 1 所示，正常情况下，该系统母线没有直接相连，在计算该配电网拓扑图的生成树时，可以将 3 条馈线的母线相连，简化为图 2 的形式，便于生成树的搜索。图 2 的生成树为 24 个，总的候选解为 190 个。子种群为 24 个，染色体长度为 3，由于总的候选解数目较小，在生成初始种群时，每个子种群的染色体与该子种群候选解一一对应，应用穷举法直接找到全局最优解。

算例 2：以美国 PG&E69 节点配电系统为例，如图 4 所示，该系统含有 69 个节点，73 条支路，5 个网孔，其中节点 1 为电源节点，简化图的生成树为 463 个，总的候选解为 377417 个，子种群数为 463 个，候选解最大的 37 个子种群染色体为 4 个，其它子种群染色体数为 2 个，总的染色体数目为

1000 个，染色体长度为 5，交叉率 $p_c = 0.7$ ，变异率

$p_m = 0.01$ ，运算 50 次。

算例 1 和 2 的重构结果和相关统计如表 4、5 所示。

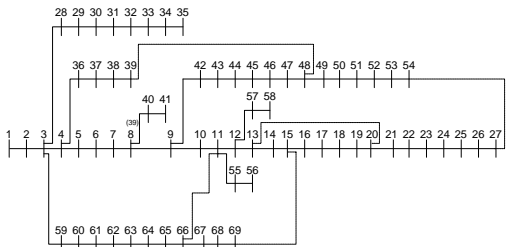


图 4 美国 PG&E69 节点配电系统

对于 16 节点系统，直接找到全局最优解，所需时间为 0.012s。对于 69 节点系统，找到最优解的平均进化代数数为 6.22 次，平均计算时间为 0.534s，远优于文献[8]的结果。本文程序搜索出最佳解的进化代数之所以远小于文献[8]是因为总的染色体数是文献[8]的 10 倍；计算时间远比文献[8]短是因为染色体长度为文献[8]的近 1/12，不产生不可行解，不需要改良操作，采用了并行计算方法；本文结果与文献[8]的优化结果不同是因为节点 45、46、47 上没有负荷，打开 44-45、45-46、46-47、47-48 开关的效果相同。

由上述算例可知，本文所提出的算法具有十分优越的搜索效率与计算速度。

表 4 两个配电网的重构结果

配网系统	重构前断开的开关		重构后断开的开关	重构前网损/kW	重构后网损/kW	网损下降率
16 节点	5-10, 11-16, 4-15		4-15, 8-10, 7-11	511.4	466.1	8.85%
69 节点	11-66, 15-69, 27-54,	文[8]结果	11-66, 14-15, 50-51, 13-20, 47-48	229.5	102.10	55.5%
	13-20, 39-48	本文结果	11-66, 14-15, 50-51, 13-20, 46-47	229.5	101.01	56.0%

表 5 进化统计

配网系统	得到全局最有结果的最小进化代数/代		得到全局最有结果的最大进化代数/代		得到全局最有结果的平均进化代数/代	平均计算时间/s
16 节点	1		1		1	0.012
69 节点	文[8]结果	21	32		22.40	25.423
	本文结果	1	16		6.22	0.534

5 结论

本文提出的基于无向图所有生成树的配电网网络重构遗传算法，能够精确计算出候选解的总的数目及分布情况，能够为子种群数量、子种群中染色体数量提供参考数据；彻底克服了传统配电网网络重构遗传算法产生大量不可行解的弊端，提高了搜索效率；采用了十进制编码方法，大大缩短了编码长度；采用并行计算方法，大大减小了计算时间；具有十分优越的应用价值。

参考文献：

[1] 何禹清,彭建春,文明,等. 配电网重构的最小可行分析对象及其快速算法[J].中国电机工程学报, 2010, 30(31):50-56.

[2] S.Civanlar,J.J. Grainger, H. Yin, S.S.H. Lee. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(3):1217-1223.

[3] 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, 22(1): 98- 103.

[4] 雷健生,邓佑满,张伯明. 综合潮流模式及其在配电系统网络重构中的应用[J].中国电机工程学报,2001,21(1):57-62.

[5] 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, 北京.

[6] 毕鹏翔, 刘健, 张文元. 配电网重构的研究[J]. 电力系统自动化, 2001, (14) : 54-60.

[7] 李晓明, 黄彦浩, 尹项根. 基于改良策略的配电网重构遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2):49-54.

[8] 毕鹏翔, 刘健, 刘春新, 张文元.配电网重构的改进遗传算法[J]. 电力系统自动化, 2002, (2) : 57- 61.

[9] 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.

[10] Koichi Nara, Atsushi, Shiose, Minoru Kitagawa,Toshihisa Ishihara. Implementation of genetic algorithm for distribution system loss minimum reconfiguration. IEEE

Transactions on Power System, 1992,7(3):1044-1051.

[11] 许奎. 基于改进自适应遗传算法的配电网重构的研究[D]. 广西大学硕士论文, 2008.

[12] 王艳松, 陈国明, 张加胜, 等. 基于小生境遗传算法的配电网开关优化配置[J]. 电工技术学报, 2006, 21(5): 82-86.

[13] 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.

[14] 余贻鑫, 段刚. 基于最短路算法和遗传算法的配电网网络重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 44-49.

[15] 葛少云, 刘自发, 余贻鑫. 基于改进禁忌搜索的配电网重构[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 22-26.

[16] 王守相, 王成山. 一种隐含并行的大规模三相不平衡配电网网络重构新算法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(10): 34-38.

[17] Kubin Taleski, Dragoslav Rajicid. Distribution network reconfiguration for energy loss reduction[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12 (1):398-406.

[18] 陈根军,李继洸,唐国庆. 基于 Tabu 搜索的配电网网络重构算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10):28-33.

[19] 刘蔚, 韩祯祥. 基于最优流法和遗传算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2004, 28(19):29-33.

[20] HAROLD N. Gabow, EUGENE W. Myers. Finding All Spanning Trees of Directed and Undirected Graphs[J]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1978, 7(3):280-287.

[21] 杨元生. 无向图与有向图的全部生成树的计算机算法[J]. 计算机学报, 1983, (2):152-154.

[22] 颜伟, 刘芳, 王官洁,等. 辐射型网络潮流的分层前推回代算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8):76-80.

作者简介：

张 剑（1982-），男，湖北咸宁人，工程师，负荷建模、电力系统暂态稳定分析与控制、新能源及配电网。