

基于遗传和禁忌搜索混合算法的配电网重构

王林川, 梁栋, 于冬皓, 潘文明, 李庆新

(东北电力大学, 吉林 吉林 132012)

摘要: 根据遗传和禁忌搜索算法的特点, 提出了适用于配电网重构的混合算法。根据电力系统配电网重构的特点就混合算法的具体步骤进行了详细的描述, 并提出了混合算法中早熟识别的具体方法、对按环编码变异进行了改进。该算法用于 IEEE69 节点系统的计算结果表明, 混合算法用于配电网重构是可行的、有效的。

关键词: 配电网重构; 交叉; 变异; 早熟; 禁忌搜索

Distribution network reconfiguration based on genetic/tabu search hybrid algorithm

WANG Lin-chuan, LIANG Dong, YU Dong-hao, PAN Wen-ming, LI Qing-xin

(Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

Abstract: Based on the characteristics of genetic algorithm and tabu search algorithm, a hybrid algorithm for distribution network reconfiguration is formed. According to the feature that in the distribution network reconfiguration, the paper describes the procedure of the hybrid optimization algorithm in detail. Furthermore, a new method to recognize the precocious solution is proposed, and the method of mutation which based on the circle is improved. The algorithm has been successfully applied to IEEE 69 bus system, and the results demonstrate the feasibility and efficiency of this method.

Key words: distribution network reconfiguration; crossover; mutation; prematurity; tabu search

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)06-0027-05

0 引言

早在 1975 年, Merlin 和 Back 就指出配电网重构是降低配电网网损的有效方法之一。因为配电网一般具有闭环设计开环运行的特点并且网路结构上设有分段开关和联络开关, 在正常运行条件下可根据不同的负荷情况改变这些开关的开合状态, 通过改变线路开关的状态来变换网络结构, 以平衡各个馈线的负荷、消除过载、降低网损, 从而优化配电系统的运行。网络重构是一个复杂的大规模非线性整数组合优化问题。20 世纪 80 年代以来人们对网络重构进行了广泛的研究, 大致提出了以下几种方法: (1) 数学优化方法^[1]。该算法直接利用现有的数学优化原理进行配网重构。包括线性规划、非线性规划、整数规划等。一般认为这样可以得到不依赖配电网初始结构的全局最优解, 但证明该方法属于“贪婪”搜索算法, 计算时间过长。(2) 最优流算法^[2], 该方法将开关组合问题转化为优化潮流的计算问题, 简化了问题。缺点是初始时闭合所有开关使网络中同时存在多个环, 求最优流模式时各环之

间电流互相影响, 打开顺序对结果有较大影响; 计算一次开关由合至关需要计算一次潮流, 计算量较大。(3) 支路交换算法^[3]。该方法优点是可以快速确定降低网损的配网结构, 通过启发式规则减少考虑的开关组合, 可利用公式估算开关操作带来的网损变化, 缺点是每次只能考虑一对开关的操作, 不能保证全局最优, 给出的配电网结果与初始结构有关。

(4) 人工智能算法^[4]。如神经网络算法、遗传算法和禁忌搜索算法等。其中神经网络算法的缺点是约束条件的确定比较困难, 且无法保证最后所得的解是全局最优解。遗传算法在操作中易产生不可行解且由于局部搜索能力较差易于发生早熟现象。禁忌搜索算法收敛速度较快, 局部搜索能力强, 但其收敛性与初值的选择有很大关系。

基于以上算法的特点遗传禁忌混合寻优策略被提了出来, 本文在此基础上, 结合配电网重构的实际问题, 提出了基于遗传和禁忌混合算法的配电网重构方法。对 IEEE69 节点系统进行了重构, 通过和禁忌搜索以及遗传算法的比较, 证明该方法是可行的, 有效的。

1 配电网重构问题的数学描述

配电网重构的目标函数有很多, 本文以网损最小为目标函数, 数学描述如下:

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^{L_l} r_i (P_i^2 + Q_i^2) / V_i^2 \quad (1)$$

式中: L_l 为线路总数, r_i 、 P_i 、 Q_i 、 V_i 分别为支路电阻、有功功率、无功功率、以及各节点的电压幅值。同时, 配电网重构还应满足如下的约束条件:

(1) 电压约束:

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad (2)$$

式中: V_{\max} 和 V_{\min} 分别为节点 i 电压有效值的上下限。

(2) 支路功率约束: $S_j \leq S_{j\max}$ (3)

式中: $S_{j\max}$ 为第 j 条支路上允许传输功率最大值。

(3) 重构后网络必须保证辐射状。

(4) 重构后网络中不能存在孤岛。

2 混合算法的原理

2.1 遗传算法

遗传算法由 Holland 于 1975 年提出已经成功应用于很多复杂函数的优化问题。它的主要特点是对参数编码进行操作, 而不是参数本身, 同时对多个点的编码进行搜索, 采用随机转换规则, 而非确定性规则。缺点是进行局部搜索能力差, 易于早熟。这是因为算法的变异概率太小, 引入新染色体的机会少, 如果变异概率取得大一些, 会导致算法随机性过大, 使搜索过程过于盲目^[5]。

2.2 禁忌搜索算法

该算法是局部邻域搜索算法的推广, 它的特点是在搜索过程中可以接受劣解, 所以具有较强的“爬山能力”; 新解不是在当前解的邻域中随机产生的, 而是从中选取最好解, 即最好解的产生概率远远大于其它解。缺点是对初始解有较强的依赖性, 另外迭代搜索过程是把一个解移动到另一个解, 降低了得到全局最优解的概率。

2.3 遗传禁忌混合算法 (GATS)

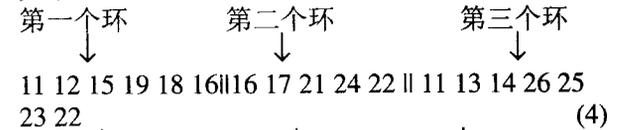
为了使两者的缺点得到削弱优点得到保持遗传禁忌混合算法被提出来。最早引入这种思想的是 Muhlenbein, 他从一个很宽广的范围对遗传算法和禁忌搜索算法进行了分析和比较, 指出了二者进行混合的可能性以及理论基础, 但并未提出具体混合方法。Reeves 把 Tabu 算法的思想引入到 GA 算法

的交叉和变异中, 并受到了很好的效果^[6]。而后, GATS 混合算法得到了广泛的应用。在 GATS 混合算法中由于 GA 算法的广域搜索能力较强一般是用 GA 进行全局搜索, 使群体中的个体分布在解空间的大部分区域, 由于 TS 算法的局部搜索能力较强, 再从群体中每个个体开始用 TS 算法进行局部搜索, 改善群体的质量。混合算法有效结合了 GA 并行的大范围搜索能力和 TS 的局部搜索能力, 但主要的问题是普通的遗传禁忌混合算法常常面临着禁忌算法调用过多, 算法搜索效率不高的问题。

文献[7]对此进行了改进, 该文认为两种算法的结合的关键是在遗传算法出现早熟现象时通过禁忌算法跳出这种局部最优状态, 但该方法在何时遗传算法趋向于早熟并调用禁忌算法的判断上过于简单, 只是简单地定义遗传算法迭代 10 次时调用 1 次禁忌算法, 这样会很盲目。本文提出用适应度的样本方差来进行判断早熟即: $fsd < FSD/n$; fsd 为进行选择 and 交叉操作后的样本适应度的方差值, FSD 为初代种群或调用禁忌算法后形成的种群的样本方差值。之所以用方差作为判断依据是因为方差的定义是描述随机变量和数学期望的偏离程度。而当遗传算法趋向于早熟时种群的染色体的适应度必将会趋向于局部最优点的适应度值的邻域内, 此时的样本方差将会变小, 所以我们就以适应度方差变小的程度来判断是否达到早熟。对于 n 的取值要根据实际网络来定, 针对本文实验所用的网络经过多次计算得到当 $fsd < FSD/5$ 时该网络趋向于早熟, 即 n 值取为 5。通过这种方法来判断早熟可以减少调用禁忌搜索算法的次数, 有效地提高了混合算法的效率。另外, 本文针对配电网重构问题对 GATS 进行了一些处理:

(1) 编码的处理

在配电网重构中, 通常采用开关作为变量集合。在解向量中, 元素取值 0 和 1 分别表示对应的开关是处在“打开”和“闭合”状态。这种方式简单明了, 容易理解。本文也选用这种 2 进制编码方法, 并采用按环进行编码的原则即把同一环路的开关放在一起。以下为对图 1 中的三馈线系统进行的编码, 如下:



$$110111 \parallel 1101110111 \quad (5)$$

以上式 (5) 为算法中染色体的具体编码形式, 式(4)是染色体中每位上的 0 或 1 所表示的开关号,

在实际算法中并不使用, 此处是做解释使用。

(2) 选择

本文的选择操作依旧采用数学轮盘赌的方法按每个染色体的适应度进行。这种方法不但简单易行而且确保了染色体被选择的概率与其适应度成正比。

(3) 交叉

若采用简单的一点或多点交叉策略必然极大的概率产生不可行解, 因此本文采用文献[8]提出在交叉时选择交叉位一侧 0 位的个数相同的方法进行交叉操作。

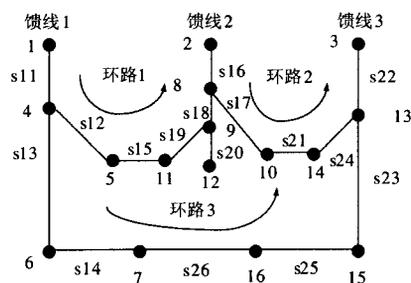


图 1 IEEE 典型三馈线系统

Fig.1 A typical three feeder distribution system in IEEE system

(4) 变异

根据配电网的辐射状要求文献[9]提出基于环路的变异方法, 本文对其进行了相应的改进。在选中染色体某一位进行变异时, 变异操作如果是将 0 变为 1, 文献[9]的处理是在该位后一个基因位由 1 变为 0, 考虑到要使搜索的范围变大本文改为在该环内其它基因位上随机地选取一位基因由 1 变为 0; 如变异操作是将 1 变为 0, 文献[9]中是把变异的基因位前的为 0 的一个位置变为 1, 本文考虑如果这个变异的基因位前的为 0 的基因位所表示的开关不在变异位所在的环路中, 此时必将出现变异位所在的环路有两个打开的开关即出现不可行解。所以本文采用将该环内原来为 0 的基因位改为 1。具体步骤如下: 如我们对式(5)所表示的染色体进行变异, 首先随机选择在环路 1 上进行变异, 然后随机选择环路 1 中的某一位发生变异, 我们选择在环路 1 的第 2 个基因位上发生变异, 此时变异是由 1 变为 0, 然后再找到该环路中原为 0 的基因位将其改为 1, 此处环路 1 中原为 0 的是第 3 个基因位, 我们把它改为 1。变异结果如下:

$$1011111111011011110111 \quad (6)$$

上文式(6)即为式(5)变异后的染色体。

(5) 适应度函数

对于混合算法是一种在给定的解空间内不受

约束的随机搜索算法, 因此必须构造一个精确的适应度函数知道遗传算法的搜索方向向着最优解逼近。本文中适应度函数由目标函数和惩罚函数组成, 定义如下:

$$\max F = 1/L \quad (7)$$

$$L = f + \beta_1 \max\{0, (I_i - I_{i\max})^2\} + \beta_2 \max\{0, (V_{i\min} - V_i)^2\} + \beta_3 \max\{0, (V_i - V_{i\max})^2\}$$

$$L = f + \beta_4 \quad (9)$$

式中: I_i 、 V_i 、 I_{\max} 、 V_{\max} 、 V_{\min} 分别为各阶层支路电流有效值、电压有效值、电流有效值上限、电压有效上下限。 f 为网损, β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 是惩罚因子, 通常取较大的数以加大惩罚力度。当个体违反电压电流的约束条件时, 由于惩罚因子取得比较大, 其适应度值将非常低, 从而容易在进化工程中被淘汰。式(8)为可行解的适应度求值公式, 式(9)为不可行解的适应度公式。

在遗传操作当中不可能完全避免不可行解出现更不能把不可行解一律删除重新操作, 因为有时会出现不可行解在经过基因操作后变为可行解甚至最佳解的情况。鉴于这种情况本文采用罚函数的方法使不可行解按比较小的几率保留下来, 这样可以使算法在一定程度上接受劣解。对于不可行解的判断本文采用传统的判据即在网络连通的条件下满足闭合支路数等于有效节点数减一这一准则^[10]。

(6) 禁忌移动操作及禁忌终止准则

禁忌搜索到的每一个新状态都是当前点在其邻域的移动操作产生的。因此移动和邻域设计非常关键, 本文采用文献[11]中的方法即邻域解由集中性解和分散解组成的方法, 这种方法即在按环对基因位进行精确的左右移动的同时还在这个基因位所在环随机产生新解, 这个解就是所说的分散解。终止判据采用最优解联系保持不变的最大迭代次数。

(7) 禁忌表、释放准则及禁忌算子中的适应度

禁忌表是禁忌算法的关键所在, 禁忌表中允许存在的最大移动数目称禁忌表的规模。本文禁忌表的规模采用传统的 $t = \sqrt{n}$, n 为网络规模, 对禁忌表的更新采用传统的“先进先出”规则。之所以在 TS 算法中出现释放准则是因为 Tabu 表有可能限制一些可以导致最好解的“移动”。本文采用基于适应度的“释放准则”: 如果一个移动作用于当前解后, 可达到一个到目前为止最优的适应值, 则认为该移动满足了“释放准则”。禁忌算子的适应度本文依旧

采用上述式 (7)、(8)、(9)。对于不可行解由于罚因子的存在会很快淘汰掉。

(8) 遗传禁忌混合算法步骤

1) 读入系统的网络节点参数、约束条件等原始数据, 设置遗传算法和禁忌搜索的操作系数。

2) 按环产生一组解即初始种群。

3) 适应度计算, 求出初始种群或禁忌搜索后的种群的适应度的方差值 FSD。

4) 判断是否满足遗传算法终止条件, 即满足要求的迭代次数与否。如果不满足进入步骤 5), 否则进入步骤 7)。

5) 进行选择、交叉这两种基因操作。

6) 计算此时即选择和交叉操作后的种群的适应度方差值 fsd , 如果 $fsd \geq FSD/5$ 则调用变异操作之后回到步骤 3), 如果 $fsd < FSD/5$, 则调用禁忌算法对种群的每个个体进行局部搜索, 改进种群的质量, 处理之后进入步骤 3)。

7) 停止运算, 输出计算结果。

混合算法框图如图 2。

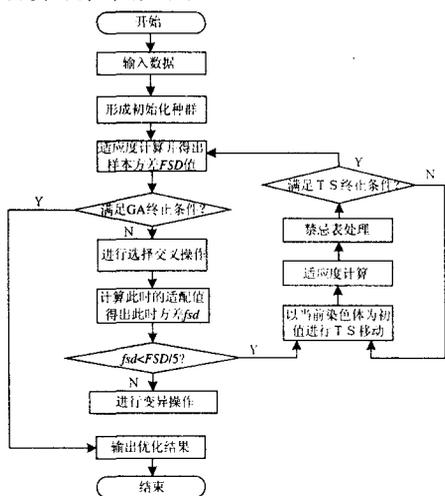


图 2 混合算法流程图

Fig.2 Flow chart of hybrid algorithm

3 计算实例与结果分析

本文对 IEEE69 节点网络进行了重构实验, 因为混合算法和文献中的禁忌搜索算法都受到随机因素的影响, 仅仅一次的运行结果不足以说明算法的优劣, 故对两种算法都进行了多次运行取平均值进行比较。根据经验给出混合算法中参数设置如下:

β_1 、 β_2 、 β_3 均取 200, β_4 取 400, 遗传种群数量为 50, 交叉概率为 0.9, 变异概率为 0.05, 最大进化代数为 100, 禁忌邻域解个数为 10, 候选解个数

取 6, 禁忌长度取 6, 最优保持代数取 10。试验结果如表 1。

表 1 两种算法优化结果的比较

Tab.1 Results comparison of two kinds of algorithm

	重构前网	重构后网损最	重构后网损平
	损/kW	优值/kW	均值/kW
文献[3]	226.31	103.81	104.92
文献[4]	226.31	103.86	104.81
本文	226.31	103.18	104.27

另外本文算法针对 IEEE69 节点进行计算的平均迭代次数是 11 次比文献[12]的 12 次和文献[13]的 15 次在迭代次数上稍优, 主要原因是混合算法结合了两种算法的优点, 对初值限制变小, 也改进了容易早熟的现象。

4 结论

(1) 本文尝试用遗传和禁忌搜索混合算法进行配电网重构, 实验证明该方法是可行的有效的。

(2) 本文在前人研究的基础上提出了改进的基于环路的变异方法, 该方法减少了不可行解的出现。

(3) 本文初步提出了遗传算法的早熟判断方法, 即通过每一代之间种群适应度方差的比较来判断算法是否出现早熟现象。

(4) 通过对 IEEE69 节点的计算和与文献[3, 4] 结果的比较可以看出混合算法在配电网网络重构中的可行性以及寻优性能好的特点, 另外由于本算法是混合算法, 在进行电力系统网络重构时随着系统规模的增大, 其计算时间也会相应地增加, 但随着计算机计算速度的提高, 以上方法将在电力系统中具有更广阔的前景。

参考文献

[1] 车仁飞. 配电网潮流计算及重构算法的研究[D]. 济南: 山东大学, 2003.
 CHE Ren-fei. A Study of Power Flow and Algorithms of Reconfiguration of Distribution Systems[D]. Jinan: Shandong University, 2003.

[2] 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.
 LIU Wei, HAN Zhen-xiang. Distribution Network Reconfiguration Based on Optimal Flow Pattern Algorithm and Genetic Algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 29-33.

[3] 阮伟. 用于降低网络损耗的配电网重构方法的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
 RAN Wei. A Study of Reconfiguration of Distribution

- Network Algorithm of Power Loss Reduction[D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [4] 毕鹏翔, 刘健, 张文元. 配电网网络重构的研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14): 54-60.
BI Peng-xiang, LIU Jian, ZHANG Wen-yuan. A Study of Algorithms of Reconfiguration of Distribution Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(14): 54-60.
- [5] 梁勇, 张焰, 侯志俭. 遗传算法在配电网重构中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10(4): 29-34.
LIANG Yong, ZHANG Yan, HOU Zhi-jian. Application of Genetic Algorithm in Power Distribution System Reconfiguration[J]. Proceedings of the EPSA, 1998, 10(4): 29-34.
- [6] 汪定伟. 智能优化方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
WANG Ding-wei. Intelligent Optimization Methods[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [7] 孙艳丰. 基于遗传算法和禁忌搜索算法的混合策略及其应用[J]. 北京工业大学学报, 2006, 32(3): 258-262.
SUN Yan-feng. A Hybrid Strategy Based on Genetic Algorithm and Tabu Search[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2006, 32(3): 258-262.
- [8] 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 Genetic Algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 20(2): 66-69.
- [9] 毕鹏翔, 刘健, 张春新. 配电网网络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, ZHANG Chun-xin. A Refined Genetic Algorithm for Power Distribution Network Reconfiguration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 57-61.
- [10] 何宏杰. 基于二进制粒子群算法的配电网重构研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2006.
HE Hong-jie. A Study of Distribution Network Reconfiguration based on Improved Binary Particle Swarm Optimization Algorithm[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2006.
- [11] 贺一, 刘光远, 邱玉辉. Tabu Search 中集中性和多样性的自适应搜索策略[J]. 计算机研究与发展, 2004, 41(1): 162-166.
HE Yi, LIU Guang-yuan, QIU Yu-hui. A Novel Adaptive Search Strategy of Intensification and Diversification in Tabu Search[J]. Journal of Computer Research and Development, 2004, 41(1): 162-166.
- [12] 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.
GE Shao-yun, LIU Zi-fa, YU Yi-xin. An Improved Tabu Search for Reconfiguration of Distribution Systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(23): 23-27.
- [13] 王毅. 基于改进自适应遗传算法的配电网重构[J]. 电力系统自动化设备, 2005, 25(12): 45-48.
WANG Yi. Refined Adaptive Genetic Algorithm for Distributing Network Reconfiguration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(12): 45-48.

收稿日期: 2008-05-05; 修回日期: 2008-07-14

作者简介:

王林川(1955-), 男, 教授, 现从事配电网方面的研究; E-mail: wanglinc@mail.nedu.cn

梁栋(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网优化运行;

于冬皓(1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网优化运行。

(上接第 26 页 continued from page 26)

- [7] 陈根军, 王磊, 唐国庆. 一种求解环状配电网潮流的有效算法—两阶段法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(5): 5-9.
CHEN Gen-jun, WANG Lei, TANG Guo-qing. An Efficient Two-state Load Flow Method for Meshed Distribution Network[J]. Proceedings of the EPSA, 2001, 13(5): 5-9.
- [8] 孙宏斌, 张伯明, 相年德. 配电网潮流前推回推法的收敛性研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(7): 26-29.
SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, XIANG Nian-de. Study on Convergence of Back/forward Sweep Distribution Power Flow[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(7): 26-29.
- [9] 叶清华, 唐国庆, 王磊, 等. 配电网合环操作环流分析系统的开发和应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 26(22): 66-69.
YE Qing-hua, TANG Guo-qing, WANG Lei, et al. Development and Application of the Analysis System for Closed Loop Operation of Distribution Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 66-69.

收稿日期: 2008-05-11; 修回日期: 2008-06-13

作者简介:

王秀云(1977-), 女, 讲师, 研究方向为电力系统自动化;

杨劲松(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: jin121@163.com

熊谦敏(1981-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化。