

# 用于降低网损的配电网优化重构方法的研究

王秀云<sup>1</sup>, 任志强<sup>2</sup>, 楚冬青<sup>1</sup>

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 浙江电力教育培训中心浙西分中心, 浙江 建德 311600)

**摘要:** 配电网优化重构是降低配电网线损的有效措施, 综述了配电网优化重构中常见的算法及问题。为了提高重构优化速度, 提出了利用混合潮流算法快速计算网损的方法。提出了基于度的拓扑方法来判定在遗传算法优化过程中造成的不可行解, 并列出了对不可行解的判断准则。本拓扑方法同样可以为前推回代法提供拓扑分析。为缩小搜索空间, 对遗传算法采取了在基因操作过程中如产生不可行解采用返回重新操作的改进, 使算法运算过程中不产生不可行解。同时为避免欺骗现象提出较差个体单独成群策略。实例证明, 该算法应用于配电网重构是有效的。

**关键词:** 配电网; 混合潮流; 遗传算法; 重构; 网络拓扑

## Study of algorithm on distribution network optimum reconfiguration for reducing line loss

WANG Xiu-yun<sup>1</sup>, REN Zhi-qiang<sup>2</sup>, CHU Dong-qing<sup>1</sup>

(1. Northeast Dianli University, Jilin 132012, China; 2. Western Zhejiang Center of Zhejiang Electricity Education and Training Center, Jiande 31160, China)

**Abstract:** Distribution network optimum reconfiguration is an available measure for reducing line loss. Algorithms and problems of distribution network optimum reconfiguration are discussed in the paper. For improving speed of distribution network optimum reconfiguration, quickly computing power loss using hybrid power flow calculation method is put forward. This paper puts forward topology method based on degree to judge the unfeasible solution and offers topology analysis for forward and backward substitution method. If unfeasible solution is produced during gene operation process, operation should be reoperated to minimize search space and make none unfeasible solution generate in algorithm. Using bad body as colony strategy to avoid cheating phenomenon. Example proves that the algorithm applying in distribution network reconfiguration is valid.

**Key words:** distribution network; hybrid power flow; genetic algorithm; reconfiguration; network topology

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)12-0021-04

## 0 引言

据相关资料, 配电网网损占总网损的40%以上, 可见要提高配电网经济效益, 必须重视配电网节能降损措施的研究。早在1975年, Merlin和Back就指出配电网重构是降低配电网线损的有效途径<sup>[1]</sup>。随着近年来配电网自动化技术和负荷预测技术的发展, 已使得配电网重构成为可能。配电网优化重构的意义有: 1) 降低网损, 提高系统经济性。2) 平衡负载、消除过载, 提高电能质量。因此, 研究配电网重构具有重要的理论和实际意义。

### 1 配网优化重构研究方法现状

目前, 人们提出的配电网的重构算法, 基本

上可以分为以下几类: 一是数学优化理论算法; 二是最优流模式算法; 三是开关交换法; 四是人工智能算法。下面对几个典型的算法评析:

#### (1) 数学优化理论算法

数学优化理论算法是直接利用现有的数学优化原理进行配电网重构的方法包括线性规划、非线性规划、整数规划等。

一般认为, 利用数学优化理论可以得到不依赖配电网初始结构的全局最优解, 但已证明, 数学优化技术属于“贪婪”搜索算法, 计算时间非常长。

#### (2) 最优流模式算法

最优流模式算法是由D.Shirmohammadi等人于1989年提出的一种启发式方法。

该方法把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; 确定一个开关可能需要进行多次配电网潮流计算。

(3) 支路交换法

支路交换法是由 S.Civanlar 等人最先提出的, 是在配电网中应用较为广泛的一种启发式算法。

该方法有如下的特点: ①可以快速的确定降低配电网线损的配电网结构; ②通过启发式规则减少需要考虑的开关组合; ③可以利用公式估算开关操作带来的网损变化。不足之处是: ①每次只能考虑一对开关的操作; ②该算法不能保证全局最优; ③给出的配电网结构与配电网的初始结构有关。

(4) 遗传算法

遗传算法(GA)是建立在自然选择和自然遗传学机理基础上的迭代自适应概率性搜索算法。最早有美国秘执安大学的 J.H.Holland 提出。

GA 的特点: ①GA 操作的是参数的编码而不是参数本身; ②GA 从一群点搜索, 而不是从一点开始搜索, 能够快速全局收敛; ③GA 使用概率变迁规则而不是确定性规则指导搜索, 能处理病态、离散型的优化问题; ④GA 具有内在并行计算的特性。当然 GA 面临许多问题, 如计算速度慢、选取不同的初始基因串会有不同的优化结果。

2 配电网优化重构的数学模型

2.1 配电网优化重构的目标函数

本文以网损最小为目标函数, 表达式为:

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

式中:  $r_i$  为支路  $i$  的电阻;  $P_i, Q_i$  为支路  $i$  末端各个时间段内流过的有功功率和无功功率;  $V_i$  为支路  $i$  末端的节点电压;  $b$  为支路数;  $k_i$  为开关  $i$  的状态变量, 是 0~1 离散量, 0 代表打开, 1 代表闭合;  $f$  为网损函数。

2.2 配电网优化重构的约束条件

在配电网重构过程中, 要考虑的约束条件如下:

(1) 潮流方程约束

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Di} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{Gi} - Q_{Di} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

(2) 支路电流和节点电压约束

$$\begin{cases} I_i \leq I_{i,max} \\ U_{j,min} \leq U_j \leq U_{j,max} \end{cases} \quad (i=1,2,\dots;n)(j=1,2,\dots;l) \quad (3)$$

其中:  $U_{i,min}$  和  $U_{i,max}$  分别为节点  $i$  电压有效值的上、下限。  $I_{i,min}$  为第  $i$  条支路电流上线。

(3) 其它约束

供电约束: 配电网必须满足负荷的要求, 而且不能有孤立节点或孤岛。

网络拓扑约束: 配电网一般为闭环设计、开环运行, 这就要求重构后的配电网必须为辐射状。

3 配电网潮流计算

牛顿算法是基于微分学思想的, 处在初值选择问题。由图 1 看出, 如果初始值选择不恰当, 牛顿法可能多次迭代才能收敛, 甚至不收敛。文献[2]提出了利用前推回代法和牛顿法结合的方法, 利用前推回代一次后得到节点电压值作为牛顿法的初始值。但是常规的前推回代法不能处理配网中含有多 PV 节点或环网的情况。

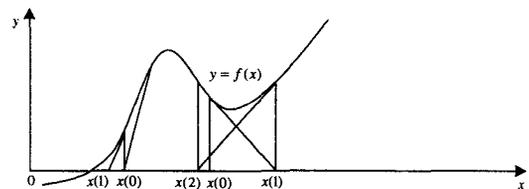


图 1 牛顿算法的几何解释

Fig.1 Geometric explanation of N-R method

实际配电网存在可能带环网运行的情况, 本文提出利用文献[3]的改进前推回代法和牛顿法结合的方法, 把改进前推回代对初始值不敏感和牛顿法收敛速度快的特点相结合, 把改进前推回代迭代几次后得到的电压值作为牛顿算法的初始值。

利用这种混合潮流方法可以处理及配电网存在环网时的潮流计算。

4 用于配电网优化重构的改进遗传算法

4.1 染色体编码

对于图 2 所示的配电系统, 一共有 16 条支路, 一般认为每条支路均有开关。按传统的编码方法, 染色体长度为 16, GA 空间将有  $2^{16}=65536$  个个体, GA 表现型个体仅为 190 个, 有效解占候选解的比例为 0.2899%, 所以减少不可行解是提高遗传算法效率的一个重要途径。

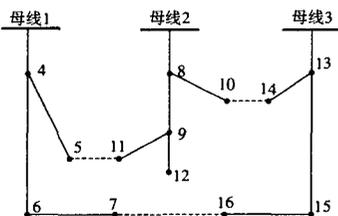


图2 IEEE典型3馈线系统

Fig.2 A typical three-feeder distribution system in IEEE system

文献[4]提出对每一个环给出一个编号的方法来缩短染色体长度, 提高可行解比例, 编码见表1。

表1 开关编码

Tab.1 Switches coding

环号	1	2	3	4	5
1	5-11	4-5	11-9	9-8	
2	10-14	8-10	14-13		
3	7-16	4-6	6-7	16-15	15-13

这样, 初始个体为 (1, 1, 1), 即网络的初始状态, 然后1号环对应的基因可以在1~4之间变化, 2号环, 3号环依次类推。这样产生的初始种群的不可行解大幅度降低。

文献[4]提出判断不可行解的准则为: 如果公共开关被打开两次或两次以上即为不可行解, 并指出同样适用于第三类环网。

但这种表述并不确切, 不是对所有第三类环网均适用, 以图3所示的第三类环网为例。

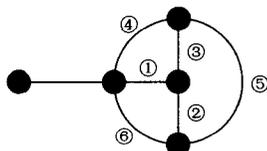


图3 一种第三类环网

Fig.3 A kind of the third category loop

文献[4]未对第三类环网的公共边的确定给予具体说明, 如图3其两两公共边为①②③, 三个环的公共边不存在。

认为初始打开开关为④⑤⑥, 那么如果认为公共开关为②③①, 则打开③①⑥时, 即公共开关打开两次时得到的仍然是辐射状网络。如果认为没有公共开关, 那么当打开②③①时却得到了孤岛和环网。所以文献[8]提出的判断不可行解的方法对第三类环网不确切。

#### 4.2 基于度的线路首末节点无序编号的配电网拓扑方法

为了能够分析第三类环网甚至更复杂的环网, 本文提出了一种新的拓扑方法。定义节点相连的边

数为该节点的度数。

通常的拓扑分析, 其线路首末节点的录入是按潮流的流向录入的, 这样其判断各层节点是依据, ①只有父节点而没有子节点的节点为最末层。②删除已经分析过的支路和节点。这样剩下的节点重复①②, 直至删除的支路数等于线路支路数, 剩余节点为根节点。

这种分析方法中, 线路的首末节点的输入需要按照潮流的顺序录入。但是在网络重构分析过程中, 部分线路的潮流流向是要改变的, 所以通常的拓扑分析方法无法适应于网络重构。

本文提出的拓扑方法中线路首末端点不必按潮流顺序录入。本方法的主要思路如下: ①如果度为1并且不是根节点, 那么一定是最底层节点。②对分析完毕的节点和支路删除。重复进行直到除根节点外所有节点已经删除, 完成分析。

孤岛的判断依据为: ①网络中存在度为0的节点。②当前末层节点中在未访问过的线路中存在找不到连接线路的节点。

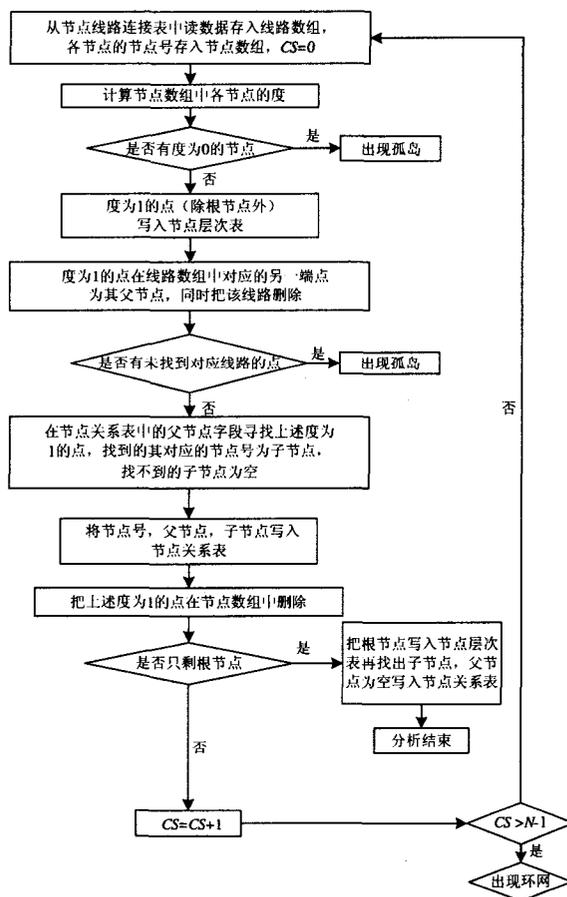


图4 算法流程图

Fig.4 Flow chart of algorithm

环网的判定依据:按照本算法,最多需要  $N-1$  ( $N$  为节点数目) 次循环,即可完成网络的拓扑,如果网络中存在环网,那么环网的各节点的度始终不会为 1,就无法删除这些节点,那么程序就不会满足终止条件(除根节点外所有节点已经删除),所以依据程序循环次数是否大于  $N-1$  来判定即可。

#### 4.3 基于度的配电网拓扑分析框图

图 4 给出了基于度的配电网拓扑算法流程图。

#### 4.4 产生初始种群

按照 4.1 提出的每个环一个编号的原则产生一组初始种群,并且判断其是否为可行解,不可行解直接删除。当网络中只有第一类,第二类环网时利用文献[8]提出的准则判定,当含有第三类环网时利用基于度的拓扑分析来判定。

#### 4.5 染色体的适应值

适应值<sup>[5]</sup>指导了遗传算法的搜索方向,应保证其不为负,本文网络重构的目的是网损最小,所以用网损的倒数作为适应值。

#### 4.6 较差个体单独成群

为了保证遗传算法能够收敛到全局最优解,防止产生初始种群时,有些个体适应度过高,按比例选择法,最优模式的个体可能由于适应度不高被淘汰。

汰。所以将较差的 10% 个体单独成立一个种群,进行优化。最后选择正常种群与新成立种群优化结果较好者。

#### 4.7 遗传算法的基因操作

包括交叉和变异,本文采用动态的交叉与变异率,交叉或者变异结果为不可行解时,采用返回策略,重新进行操作。以图 2 所示系统为例,交叉是在 1~3 之间产生一个随机数来确定第几位交叉,变异是对选定的位看其是第几位,变化的最大值为其环对应的边数,故第 1 位变化范围是 1~4,其后依次类推。在此过程中采用最优保留策略。

### 5 算例分析

用上述提出的方法对文献[6]的算例进行仿真实验。

图 5 为美国 PG&E 的 69 节点配电系统,有 74 条线路,69 个节点,5 个联络开关: TS<sub>11-66</sub>、TS<sub>13-20</sub>、TS<sub>15-69</sub>、TS<sub>27-54</sub> 和 TS<sub>39-48</sub>。额定电压为 12.66 kV,系统总的负荷为  $P=3802$  kW,  $Q=2649$  kvar。

按文中给出的方法对网络进行编码,编码长度为 5,取初始种群为 30,初始交叉率为 0.7,初始变异率为 0.1。

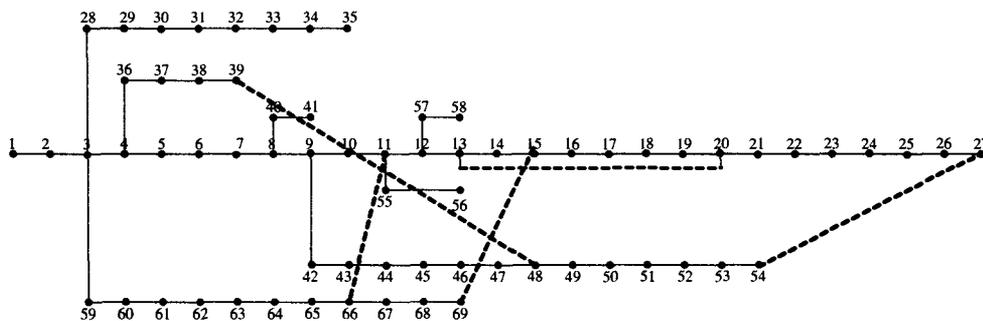


图 5 69 节点配电系统图

Fig.5 Schematic diagram of 69-bus distribution system

表 2 重构前后结果

Tab.2 Results before and after reconfiguration

	重构前	文献[11]方法	本文方法
打开开关集合	TS <sub>11-66</sub>	TS <sub>11-66</sub>	TS <sub>9-10</sub>
	TS <sub>13-20</sub>	TS <sub>13-20</sub>	TS <sub>13-20</sub>
	TS <sub>15-69</sub>	TS <sub>14-15</sub>	TS <sub>59-60</sub>
	TS <sub>27-54</sub>	TS <sub>44-45</sub>	TS <sub>51-52</sub>
	TS <sub>39-48</sub>	TS <sub>50-51</sub>	TS <sub>8-9</sub>
网损/kW	225.003	99.620	93.096
最低节点电压/p.u.	0.909	0.9428	0.9422

按文献[6]的方法,染色体长度为 59,其多在 20-22 代达到收敛。本文的方法,连续运行 50 次,

均在 15 代以内达到收敛,所得结果线损小于文献[11],最低点电压在允许范围内。这表明本方法通过改进编码方式以及通过拓扑判定不可行解,增加了 GA 解空间中有效解的比例,提高了算法效率。

### 6 结束语

本文综述了配电网重构的研究现状,提出了改进混合潮流算法,在网络重构的遗传算法编码中采用每个环一个编码缩短编码长度,提出了基于度的

(下转第 30 页 continued on page 30)

- Electric Power University, 1999, 26 (2): 6-11.
- [5] 焦邵华, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 用模糊集合理论识别电力系统振荡中的短路的研究[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18 (6): 443-448.
- JIAO Shao-hua, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun, et al. Study on the Discrimination Between Faults and Power Swings Based on Fuzzy Set[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18 (6): 443-448.
- [6] 李钢, 隋凤海, 王善祥, 等. 振荡中不对称故障的判别[J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (4): 17-20.
- LI Gang, SUI Feng-hai, WANG Shan-xiang, et al. A Criterion for Unsymmetrical Fault During Power Swing[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21 (4): 17-20.
- [7] 鲍小鹏, 张举. 应用模糊集理论识别电力系统振荡中不对称故障的新方法[J]. 电网技术, 2004, 28 (12): 25-29.
- BAO Xiao-peng, ZHANG Ju. A New Approach to Identify Unsymmetrical Fault Occurred During Power System Oscillation by Use of Fuzzy Set Theory[J]. Power System Technology, 2004, 28 (12): 25-29.
- [8] 陈皓. 小波变换原理识别电力系统故障及振荡中短路的研究[J]. 电力自动化设备, 2000, 20 (5): 18-20.
- CHEN Hao. Study on Discrimination Between Fault and Power Swing Based on Wavelet Transform[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20 (5): 18-20.
- [9] Mallat S, ZHONG Si-fen. Characterization of Signals from Multiscale Edges[J]. IEEE Trans on Patter Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(7): 710-730.
- [10] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.
- GE Yao-zhong. New Typed of Protective Relaying and Fault Location Their Theory and Techniques[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.
- [11] 张保会, 哈恒旭, 吕志来. 利用单端暂态量实现超高压线路全现速动保护新原理的研究(三)——故障选相与尚需解决的问题[J]. 电力自动化设备, 2001, 21 (8): 1-4.
- ZHANG Bao-hui, HA Heng-xu, LU Zhi-lai. Study of Non-unit Transient-based Whole-line High Speed Protection of EHV Transmission Line——Part3: Fault Phase Selection and Problems to Be Studied[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(8): 1-4.

收稿日期: 2007-09-10; 修回日期: 2008-03-18

作者简介:

于辉(1978-), 女, 讲师, 研究方向为微机保护及相关领域. E-mail: carrie\_yu@sie.edu.cn

(上接第 24 页 continued from page 24)

拓扑方法来判断不可行解。为避免欺骗现象, 在遗传操作中采用较差个体单独成群的策略。本算法已经在辽源市供电公司应用, 取得了良好的效果。

实际应用和算例结果表明, 本文提出的配电网重构算法能够有效降低网损, 同时电压仍能保持较高水平, 提高运算效率。

### 参考文献

- [1] Sarma N D R, Prakasa Rao K S. A New 0-1 Integer Programming Method of Feeder Reconfiguration for Loss Minimization in Distribution Systems[J]. Electric Power System Research, 1995, (33): 125-131.
- [2] 林万菁, 等. 一种配电网潮流计算混合算法[J]. 大连理工大学学报, 2002, 43(3): 377-381.
- LIN Wan-qing, et al. A Hybrid Algorithm for Distribution Power System Load Flow Calculation[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2002, 43(3): 377-381.
- [3] 孙健, 等. 基于前推回代的配电网潮流改进算法[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(3): 81-84.
- SUN Jian, et al. Modified Power Flow Algorithm of Distribution Network Based on Forward / Backward Sweep Method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(3): 81-84.
- [4] 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.
- [5] Koichi Nara, Shoise A, Kitagawa M. Implementation of Genetic Algorithms for Distribution Systems Loss Minimum Reconfiguration[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(3): 1044-1051.
- [6] 代卫星. 基于网络重构和电容器投切的降低配网损耗的技术(硕士学位论文)[D]. 成都: 四川大学, 2004. 45-47.

收稿日期: 2007-10-11

作者简介:

王秀云(1977-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动化; Email: w-xiu-y @163.com

任志强(1981-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动化;

楚冬青(1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动化。