

# 配电网重构遗传算法的动态“回路”编码与“树形”解码技术

黄彦浩<sup>1</sup>, 李晓明<sup>1,2</sup>, 尹项根<sup>2</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 华中科技大学电气与电子学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 遗传算法实际应用于配电网重构时, 目标电网的拓扑结构可能会发生变化, 静态的编码、解码方案不能适应要求。所以研究了电网拓扑数据的动态处理技术, 在此基础上提出了动态“回路”编码和“树形”解码技术, 有效解决了上述问题。给出了应用算例, 对所提出的技术进行了验算, 其结果证明了这些技术可行, 可以与配电网重构遗传算法有效配合。

**关键词:** 遗传算法; 配电网重构; 动态回路编码; 动态树形解码

**中图分类号:** TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)14-0012-04

## 0 引言

遗传算法是一种优秀的搜索算法, 从理论上讲, 可以得到全局最优解。目前, 已有许多专家学者将其应用于解决城市配电网重构问题, 以达到降低线损、故障隔离与恢复、提高电压质量等目的。

配电网重构遗传算法通常采用静态二进制编码方案<sup>[1,2]</sup>, 即认为电网的拓扑结构一成不变, 染色体的每一位对应于一个开关。该种方案实现简单, 但其存在两个问题, 首先, 在实际应用时, 如果目标电网的拓扑结构发生变化, 其将不能反映实际情况; 其次, 采用该方案时, 描述配电网连接属性的染色体所包含的基因位数(开关数)越多, 计算量就越大, 当基因数目大到一定程度后, 运算速度将慢到不可忍受, 因此, 还要尽量合理地缩短染色体长度。同样, 目前所提出的解码方案通常也是静态的<sup>[3]</sup>, 也不能适应目标电网的拓扑结构变化。

本文从图论理论和计算机技术出发, 研究了对电网拓扑数据进行动态处理的技术, 在此基础上, 提出了动态“回路”编码和“树形”解码技术。其中, 前者虽采用二进制编码, 但可根据配电网的拓扑结构动态生成染色体, 同时将不构成回路的支路(开关)从染色体中剔除, 有效地压缩染色体长度; 后者与配电网潮流计算常用的前推回代法相适应, 可对染色体动态解码, 适应电网变化。这些技术可以较好地与配电网重构遗传算法相结合, 文末的算例证明了它们的有效性。

## 1 基本定义

若配电网中的开关全部闭合, 将形成一个连通图  $G$ , 其中的支路对应着电网中的开关。设  $G$  中节

点集合为  $V$ , 其中任一节点为  $v$ , 记节点  $v$  的度<sup>[4]</sup>为  $deg(v)$ 。这里定义, 若节点  $v$  是  $deg(v) - 2$  的节点, 则  $v$  为特殊节点, 例如图 1 中节点 1、3、4、7、9, 记特殊节点集合为  $V_t$ 。

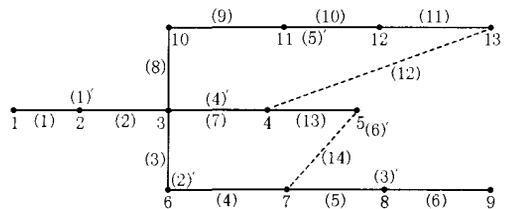


图 1 简化配电网示意图

Fig. 1 Diagram of simplified distribution network

$G$  中在以相邻运算节点为端点、不经过其它运算节点的道路中, 去掉其两端的特殊节点后, 剩余的节点、支路序列称为特殊支, 例如图 1 中特殊支(1)就是节点、支路序列(1)2(2), 记特殊支集合为  $Y_t$ 。  $Y_t$  中包含了  $G$  的全部支路。

## 2 电网拓扑数据的动态处理技术

在实际中, 由供电局的 GIS 系统或其它配网自动化系统, 可以得到当前目标电网开关全部闭合时的节点连接关系, 将其存储于节点邻接链表。由于该链表中仅含有节点信息, 因此不能直接用于编码和解码, 需要进行处理。首先, 为便于编码、解码和数据存储, 要对节点重新编号, 使得同一特殊支内节点编号连续, 同时还要识别支路并编号, 使得同一特殊支内的支路编号也连续; 其次, 要找出特殊支和特殊节点, 并将特殊支中的节点和支路号按顺序存储于单元数组  $E_{\mu k}$  中,  $k$  为特殊支编号; 最后, 要得到  $V_t$  和特殊节点—特殊支完全关联矩阵<sup>[4]</sup>  $A$ 。

电网拓扑数据的动态处理以图的深度优先遍历

算法<sup>[5]</sup>为基础,流程如图 2 所示,其中,  $t$  为特殊节点数,  $k$  为特殊支数,  $i$  和  $j$  为节点号,  $v_{(i-1)}$  表示遍历到  $v_i$  前所经过的节点。在处理过程中,每次遍历必终止于一个特殊节点,虚线框中为相应的处理过程。

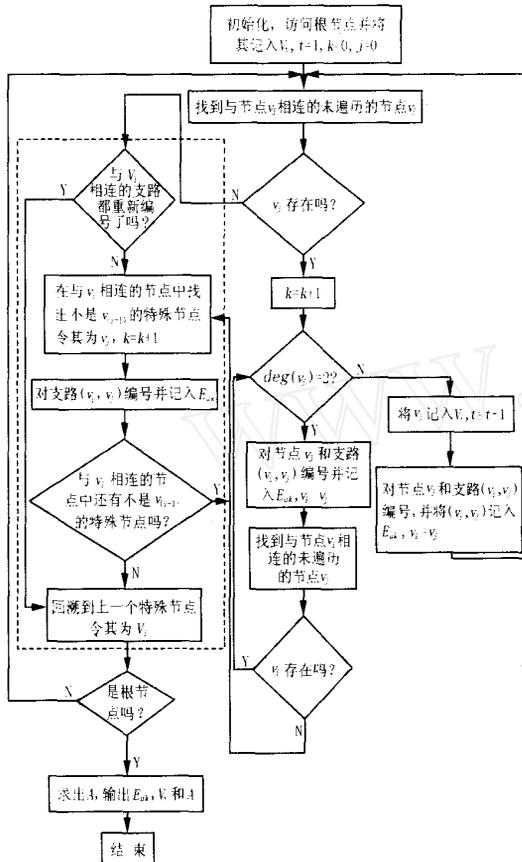


图 2 电网拓扑数据动态处理流程图

Fig. 2 Flow chart of the dynamic processing of the network topology data

### 3 动态“回路”编码

#### 3.1 编码原则

图 G 中的任意支路  $e_j$ , 可以分为两类, 一类是存在于一个或多个回路中, 这时  $e_j$  上的开关可以断开或闭合; 另一类是不存在于任何回路中, 这时  $e_j$  上的开关不能断开, 不应参与重构, 因为对其上节点供电的路径是唯一的, 若断开开关, 将无法对一部分节点供电。因此, 仅 G 中第一类支路可以参加网络重构, 应当只对它们进行编码, 其余支路可在解码时再计入。设计入染色体的支路集合为  $R$ 。

这样编码可以有效缩短染色体长度, 例如对于图 1 配电网, 若计入全部开关, 则染色体长度为 14 位, 若按上述原则编码, 则染色体长度减为 10 位, 搜

索空间仅为前者的 6.25 %。

#### 3.2 实现方法

根据特殊支的定义, 对任意特殊支  $\mu$ , 包含了其的回路也必含有该特殊支中的支路, 反之亦然。因此, 可由  $A$  和  $E_{\mu}$  得到  $R$ 。若 G 中有  $n_t$  个特殊节点、 $k$  个特殊支, 则  $A$  为  $n_t \times k$  矩阵, 对应于图 1,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

若 G 中存在自环<sup>[4]</sup>, 则对应于自环,  $A$  中会有全 0 元素列, 但不影响最终结果。

由配网自动化系统得到当前运行方式下有开关断开的特殊支, 亦即连支, 再由  $A$  得到特殊节点—特殊支关联矩阵<sup>[4]</sup>  $A$ , 则特殊支基本回路矩阵<sup>[4]</sup>  $F_B$  为,

$$F_B = [I \dots M_{11}^T (M_{12}^T)^{-1}] \quad (1)$$

其中:  $M_{11}$  和  $M_{12}$  都是  $A$  的子阵,  $M_{11}$  含有  $A$  中作为连枝的特殊支对应的各列,  $M_{12}$  含有  $A$  中作为树枝的特殊支对应的各列,  $I$  为  $k - n_t + 1$  阶单位阵, 式 (1) 采用模 2 运算。为便于处理, 可对  $F_B$  进行调整, 使其列顺序与  $A$  一致。对应于图 1 有:

$$F_B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由于 G 中各回路由基本回路组成, 所以不包含在任何基本回路内的特殊支必不包含在任何回路中。这样, 由  $F_B$  可求得需编码的特殊支, 再结合单元数组  $E_{\mu}$ , 就可以求得  $R$ 。

在最终形成染色体时, 可以先将每一特殊支内的支路编为基因块, 再将基因块组成染色体, 对应于图 1, 初始染色体为图 3 所示。

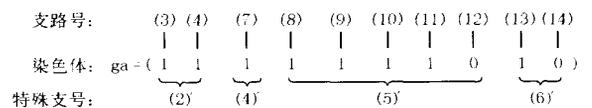


图 3 图 1 所示配电网初始染色体编码示意图

Fig. 3 Coding of the original chromosome in Fig. 1

上述方法较之直接由 G 的完全关联矩阵  $A$  求取  $R$  还可以有效地减少计算量, 对应于图 1, 由对一个  $13 \times 14$  矩阵, 变成对一个  $5 \times 6$  矩阵应用式 (1) 计算。

### 4 动态“树形”解码

#### 4.1 存储结构

在获得  $A$ 、 $E_{\mu}$  和  $V_t$  后, 可将特殊支和特殊节点

存储,其中特殊节点存储于特殊节点结构数组,数组每一个单元的值域中存储有对应节点上的功率和电压值,若  $G$  中节点的度最大为  $D$ ,则在每个单元中还含有  $D$  个指针域。

特殊支按特殊支号存储在特殊支邻接链表。邻接链表的顶点中存储着特殊支编号。任一特殊支的单链表中,每个单元都对应着该特殊支上的一个节点  $v_i$  或一条支路  $e_j$ ,其值域中分别存储着该节点上的功率和电压值,或者该支路的阻抗,每个单元有两个指针域,分别指向其前后的单元,第一个单元指向前的指针指向顶点,最后一个单元指向后的指针为空。

#### 4.2 解码方法

解码时,可以先由染色体得到各个特殊支的状态,再根据特殊支的状态和矩阵  $A$  进行解码。图 4 所示的特殊支  $(n)$ ,其连接的两个特殊节点分别为  $a、b, D=3$ 。

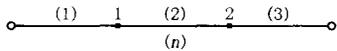


图 4 某一开关全闭合的特殊支  $(n)$

Fig. 4 A special branch  $(n)$  with all switches closed

如果  $(n)$  上开关全部闭合,则进行“拼接”,如图 5。

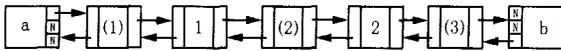


图 5 对特殊支  $(n)$  解码后的结果

Fig. 5 Result of decoding special branch  $(n)$

如果特殊支上有开关断开,则找到断开的开关,在单链表中将该开关所在支路对应的单元“取出”,放入临时表中,然后再将两部分支路分别“挂”到两个特殊节点上,假设  $(n)$  中支路  $(2)$  上的开关断开,则如图 6。

对于没有计入染色体的特殊支,在解码时将它们连入,方法同上。通过解码操作,最终形成类似于图 7 的树形结构。其中,节点  $A、B、C$  为特殊节点。

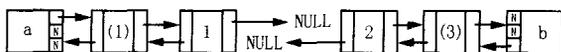


图 6 对特殊支  $(n)$  解码后的结果

Fig. 6 Result of decoding special branch  $(n)$

在计算潮流时,按照前推回代潮流计算方法,先对解码得到的树形结构,以电源节点作为根节点进行后序遍历,在遍历过程中计算各个节点的功率,相当于回代计算,然后再进行前序遍历,并计算各个节

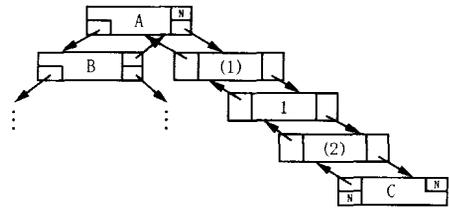


图 7 解码操作最终形成的树形结构示意图

Fig. 7 Tree-structure got by decoding operation

点的电压,相当于前推计算,如此迭代直至满足收敛条件。

### 5 特殊处理

对于有  $n$  个电源节点的配电网,正常运行时各电源节点一般不连通,其拓扑结构是由  $n$  棵树组成的森林,每一棵树都以一个电源节点作为根节点,电网中所有的节点都包含在相应的树中。若以虚拟支路连接这些电源节点,并闭合全部开关,将形成连通图  $G$ ,配电网的拓扑结构将是  $G$  的一棵生成树(包括虚拟支路),其根节点可以是任意一个电源节点。虚拟支路使  $G$  和  $G$  可以采用同样的数据结构和处理方法,但是其本身不能断开,阻抗为 0,不计入染色体。同时,在最终形成染色体时,由于与各个电源节点直接相连的支路一般都不能断开,所以各个电源节点所在的特殊支也都不计入染色体。

对于多电源供电的配电网,解码后,可对  $G$  的整个生成树计算网损,由于虚拟支路的阻抗为 0,因此对计算结果的正确性没有影响。

### 6 算例

文献[6]中的 1 馈线,69 个节点,73 条支路,5 联络开关系统,如图 8。其中,联络开关为 11-66、13-20、15-69、27-54、39-48,节点 1 为电源节点。本文采用文献[1]介绍的遗传算法和上述动态编码、解码技术对其进行了试算,目标是使网络经重构后网损

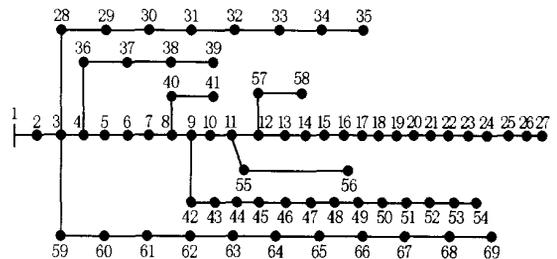


图 8 69 节点配电网图

Fig. 8 Diagram of 69-node power distribution network

最小。采用动态“回路”编码技术,染色体为 57 位,比全部开关都计入的方案可缩短染色体 16 位,大大减小了 GA 的搜索空间。

重构前网损为 225.431 kW,重构后开断的开关为 11-66、13-20、14-15、44-45 (45-46、46-47、47-48)、50-51,网损为 99.468 kW,出现多个最佳结果是因为节点 45、46、47 都没有负荷,打开开关 44-45、45-46、46-47、47-48 的效果相同。

## 7 结论

电网拓扑数据的动态处理技术可以有效地获取目标电网的有用信息,反映其变化。在此基础上,动态“回路”编码技术可以根据目标电网的实际情况,以较少的计算量对其进行编码,并有效压缩染色体长度,而动态“树形”解码技术也同样可以适应目标电网的变化,高效地进行解码。动态“回路”编码和动态“树形”解码技术可以直接或者经少量改动后,与各种配电网重构遗传算法相结合,它们对配电网重构遗传算法的实用化和提高其求解效率具有实际价值。

## 参考文献:

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

- [2] 刘莉,陈学允(LIU Li, CHEN Xue-yun). 基于模糊遗传算法的配电网重构(Reconfiguration of Distribution Networks Based on Fuzzy Genetic Algorithms) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2000, 20(2): 66-69.
- [3] 刘莉,姚玉斌,陈学允,等(LIU Li, YAO Yu-bin, CHEN Xue-yun, et al). 10 kV 配电网拓扑结构的识别及实用潮流计算(Topology Structure Identification and Flow Calculation of 10kV Distribution Network) [M]. 继电器(Relay), 2000, 28(2): 17-19.
- [4] 王朝瑞(WANG Chao-ru). 图论(Graph Theory) [M]. 北京: 北京工业学院出版社(Beijing: Beijing Industry College Publishing Company), 1987.
- [5] Sartaj Sahni. 数据结构、算法与应用: C++ 语言描述(Data Structures, Algorithms, and Applications in C++) [M]. 汪诗林, 孙晓东, 译(WANG Shi-lin, SUN Xiaodong, Trans). 北京: 机械工业出版社(Beijing: China Machine Press), 2000.
- [6] Baran M E, Wu F F. Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution Systems [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 725-732.

收稿日期: 2003-11-03

作者简介:

黄彦浩(1978 - ), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: mig8788@sina.com

李晓明(1955 - ), 男, 教授, 从事电力系统及其自动化专业的科研和教学工作;

尹项根(1954 - ), 男, 教授, 从事电力系统及其自动化专业的科研和教学工作。

## Dynamic loop encoding and tree decoding techniques of genetic algorithm for power distribution networks reconfiguration

HUANG Yan-hao<sup>1</sup>, LI Xiao-ming<sup>1,2</sup>, YIN Xiang-gen<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Electrical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** When genetic algorithm (GA) is practically used to solve the problems of power distribution networks reconfiguration, the topological structure of the objective electric power network may be changed, and the the static encoding and decoding schemes couldnt fit the requirements. A dynamic processing technique for the data of electric power network topological structure is studied, based on which the dynamic loop encoding and tree decoding techniques are proposed, which solve the problem effectively. Finally, a test computation is presented, it proves these techniques are efficient and practicable, and can be well coordinated with genetic algorithm for power distribution networks reconfiguration.

**Key words:** genetic algorithm; power distribution networks reconfiguration; dynamic loop encoding; dynamic tree decoding