

基于 GA 的环网方向保护配合最小断点集的计算

乐全明, 顾永朋, 吕飞鹏

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 利用复杂环网方向保护最优整定配合中最小断点集(MBPS)的启发知识, 将 MBPS 的计算归结为解不等式——欠定方程组, 进而等价于 0—1 整数二次规划问题, 基于基因遗传优化计算原理, 首次提出了 MBPS 问题的基因遗传计算方法, 降低了问题的计算复杂性。

关键词: 方向保护整定计算; 基因遗传优化计算; 整数规划; 图论

中图分类号: TM77 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2002)08-0023-04

1 引言

继电保护整定计算的计算机辅助设计(CAD)是现代电力系统运行、设计及实现自动化的一项重要研究课题。为适应现代电网保护整定过程自动化的需要, 近年来国内外许多学者基于图论方法, 对复杂环网方向电流保护和距离保护最优整定配合问题进行了研究, 提出了一系列算法^[1~6], 其中作为整定配合起始点, 且具有最少基数的保护集合——最小断点集(MBPS, 即 Minimum break point set)的计算是整个算法的核心, 也是计算量最大的部分。MBPS 问题是一典型的 NP 完全问题, 现有的计算方法有采用启发式方法^[4]或构造 S 函数^[3], 用布尔法或试探法求解, 其算法是指数复杂性的。

利用最小断点集 MBPS 的启发性知识, 本文首先将 MBPS 的计算归结为解不等式, 即欠定方程组, 进而等价于 0—1 整数二次规划问题, 然后基于遗传进化计算原理, 首次提出了 MBPS 问题的遗传算法, 最后通过仿真研究证实了该方法的有效性。

2 MBPS 问题 GA 模型的描述和规约

2.1 MBPS 问题的描述和规约

所谓断点集 BPS(Break point set)是这样的保护继电器集合: 若将集中继电器所保护的线路在安装该继电器的母线节点处一一断开, 则环网的所有有向回路都变成开路, 环网解环成辐射网络。MBPS 是具有最少基数的 BPS。显然, 最小断点集的求解可归结为图论中 S 问题(Satisfiability Problem)的最小反馈边集合问题(Minimum Feedback Arc Set Problem), 即给定有向图 Gd, 找出一个边的集合 E, 从 Gd 中去掉 E 中的边, 将破坏 Gd 的所有有向回路。最小反馈边集合问题是一个典型的 NP 完全问题(NP-

Complete Problem)。

将环网方向继电器用有向边代表, 形成可表示所有方向继电器的有向图 Gd^[1,2,3,5], 设 Gd 的所有有向简单回路矩阵 L 为

$$L = C_i [l_{ij}^j]_{M \times N}$$

列 C_i 代表有向图 Gd 的第 i 个简单回路; 行 r_j 代表有向图 Gd 的有向边, 即环网中的方向继电器。若 r_j 包含在回路 C_i 中, 则 $l_{ij} = 1$, 否则 $l_{ij} = 0$ 。有向边的集合 E 称为 Gd 的最小反馈边集, 若 L 中的每个简单回路至少有一条有向边属于 E, 且 E 中元素个数最少。

显然, 边集 E 为 L 的最小覆盖(Minimum Cover), 也即为环网中方向继电器的最小断点集。

设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \in \{0, 1\}$, 若保护 $r_j \in E$, 则 $x_j = 1$, 否则 $x_j = 0$, 则问题可归结为解下面的不等式(欠定方程组):

$$\begin{cases} x_j = |\text{MBPS}| \\ L_{ij}x_j = 1, \quad i = 1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (1)$$

式(1)的求解可等价于解下面的 0—1 整数二次规划问题:

$$\begin{cases} \min \left| \left(\sum_{j=1}^N x_j - |\text{MBPS}| \right) \right| \\ \text{s. t. } L_{ij}x_j = 1, \quad i = 1, 2, \dots, M \end{cases} \quad (2)$$

2.2 GA 模型描述

遗传算法是一种基于自然选择和群体遗传机理的搜索寻优算法, 它模拟了自然选择和自然遗传过程中发生的繁殖、杂交和突变现象, 根据“生存竞争”和“优胜劣汰”的原则, 借助复制、交换、突变等操作,

使要解决的问题从初始解一步步地逼近最优解。该算法特别适于解决其它科学技术无法解决或难以解决的复杂问题,如结构优化、非线性优化、机器学习等,是继专家系统、人工神经网络之后又一受人青睐的新学科。

用 GA 来求解 MBPS 问题的实质就是通过基因、染色体和适应度三个算子来分别映射环网中保护安装处继电器的状态(断开,闭合)、整个环网继电器组的状态以及 BPS 的大小,并且借助编码、复制、杂交以及突变操作,利用遗传算法的搜索寻优特性得出最优解(MBPS)。

2.2.1 遗传算子——基因

基因 x_j 代表环网中保护安装处继电器的状态,若某继电器断开,就用 1 表示,反之,若该继电器闭合,则用 0 表示。

2.2.2 染色体

即一组具有特定物理意义的 0、1 字符串集合。染色体 A 代表环网中所有保护安装处继电器的状态集合, A_i 则表示该环网中继电器组的第 i 种状态。如: $A_5 = (1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0)$, 表示环网中第 1, 4, 9 和 12 保护安装处的继电器是断开的,其余为闭合状态。其中 A_i 要满足欠定方程组(2),即 A_i 要符合断点集的条件(不一定是 MBPS),其核心就是要通过 GA 的寻优搜索从 BPS 中求出最优的 MBPS。

2.2.3 适应度函数(Fitness)

适应度函数即遗传算法的目标函数,它是指导 GA 寻优搜索的依据。

令:适应度 $f_i = 14 - \sum_{j=1}^{14} a_{ij}$, 其表示在满足方程组(2)的条件下环网中继电器断开点的总和,理论上其数值越小则越优。

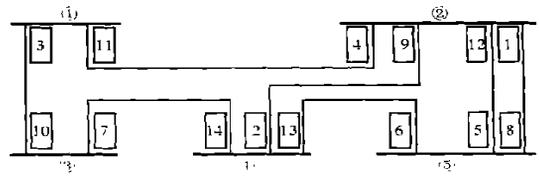
因为在图 1 的环网中,最多只有 14 组保护继电器被断开(其实是不可能的),欲使 BPS 最小,即 $\sum_{j=1}^{14} a_{ij}$ 最小,也就是在满足方程组(2)的条件下,断开的保护最少,为了分析求解的需要,转化为求解 $f_i = 14 - \sum_{j=1}^{14} a_{ij}$ 的最大值。

3 MBPS 整数二次规划遗传算法

3.1 编码

首先对图 1^[5]所示的某一电力系统接线图进行编码,即生成原始染色体。该接线图具有 5 个节点

和 7 条连支路。在满足欠定方程组(2)的条件下,随机生成 100 条具有 14 个基因的染色体组,用矩阵 $A_{100 \times 14}$ 表示该染色体组。其中每个基因用 0 或 1 表示,若为 0 则说明该方向保护投入,反之,若该基因为 1 则表示该点断开。



(1)母线编号, □方向保护

母线编号, □方向保护

图 1 某电力系统接线图

3.2 计算适应度

定义: 适应度 $f_i = 14 - \sum_{j=1}^{14} a_{ij}$, 其中 a_{ij} 表示第 i 条染色体的第 j 个基因,为 0 或 1; f_i 表示第 i 条染色体的适应度值。由最小断点集的定义知 f_i 越大则该染色体越优。

3.3 根据遗传概率,利用下述操作产生新群体

3.3.1 选择复制(Reproduction)

复制是 GA 的基本算子,个体染色体被复制的依据是根据其适应度的大小,适应度大者被复制,小的被淘汰,但新群体中的个体总数不变,即始终为 100 条。选择复制是指从群体中选择优良个体进行复制,并淘汰劣质个体的操作。将父代群体中的每一个染色体进行适应度评估,适应度越大,表示品种越优良,被选中且被复制的概率也越大。目前在遗传算法中最基本也是最常用的选择复制方法是轮盘赌方法(roulette wheel model),又称为适应度比例法。其求解过程如下:

- (1) 依次累计群体内各个体的适应度,得相应的累计值 $S_i = \sum_{i=1}^i f_i$, 最后一个累计值为 $S_{100} = \sum_{i=1}^{100} f_i$ 。
- (2) 在 $[0, S_{100}]$ 内产生均匀分布的随机数 R ;
- (3) 依次用 S_i 与 R 比较,第一个出现 S_i 大于或等于 R 的个体 i 被选为复制对象;
- (4) 重复(2)、(3),直到满足所需要的个体总数 100 为止。

选择复制个体时是依据相邻两个适应度累计值的差值 $S_i: S_i = S_i - S_{i-1} = f_i$, 适应度 f_i 越大, S_i 越大,随机数落在这个区间的可能性越大,第 i 个个体被选中的机会也越多。

每代群体中,被复制的个体数目由复制概率 P_i

控制,该算法中 P_r 取 0.2,即群体中 20%的个体被复制,相应也有 20%的个体被淘汰,以保持群体大小。被选中的个体按复制概率 P_r 进行复制和相应地淘汰后形成新的群体被放入配对库中,随机地进行配对,以进行下面的交换操作。

3.3.2 交换(Crossover)

在 GA 中,交换是产生新个体的主要手段,它依照生物学中杂交的原理,将两个个体(染色体)的部分字符(基因)互相交换。交换是指把两个父代个体的部分结构加以替换重组而生成新个体的操作,交换的目的是为了能够在下一代产生新的个体。通过交换操作,遗传算法的搜索能力得以飞跃性的提高。交换是 GA 获取优良个体的最重要手段。最简单的交换方法是一点交换(One-point crossover),又称为简单交换。具体操作是:在个体串中随机地选定一个交换点,两个个体在该点前或后进行部分互换,以产生新的个体(见表 1)。

表 1 两个个体在交换点前后的情况对比

序号	交换前	交换后
1	亲代 1:1111 11	子代 1:1111 00
2	亲代 2:0000 00	子代 2:0000 11
3	亲代 1:1011 101	子代 1:101 100
4	亲代 2:001 100	子代 2:001 101

从表 1 可见执行交换的个体是随机选择的。其过程如下:

(1) 先确定交换概率 P_c , $P_c = 0.5 \sim 0.8$, 即 50% ~ 80% 的个体要执行交换。为了最大限度地满足择优性,该算法取 $P_c = 0.8$, 即 80 条染色体要参与交换过程。

(2) 其次用轮盘选择的方法,按适应度大小选择被交换的个体,依次两两进行交换。

(3) 最后,交换点的选择也是随机的,若字符串长为 L ,则在 $[0, L]$ 内随机产生整数,该整数便是交换点的位置,该点不能取在左数第一位,因此可供选择的交换点为 $(L - 1)$ 个。

交换点的数目不同:有一点和多点,本算法取一点交换。

3.3.3 突变(Mutation)

突变是 GA 产生新个体的另一种方法,它是将某一个体的某一位字符(基因)进行补运算,使 0 变 1,或 1 变 0。突变个体的选择及突变位置的确定,都是采用随机方法产生。

(1) 确定突变概率 P_m ,约为 0.001 ~ 0.01 的个

体要参与突变。本算法取 $P_m = 0.01$,也就是一条染色体参与突变。

(2) 针对该染色体的每个字符在 $[0, 1]$ 之间产生三位有效数字的均匀分布随机数,凡是随机数小于 0.01 所对应的字符将实行突变。

3.4 终止条件

GA 是一种反复迭代的搜索方法,它通过多次优化逐渐逼近最优解而不是恰好等于最优解,因此需要确定终止条件。

最常用的方法是规定遗传迭代的次数。刚开始时,迭代次数小一些,然后视情况逐渐增加次数,直到以概率 1 收敛于最优解。在该算法中,由图论定理知最小断点集的量 4,在满足方程(2)的条件下即可终止循环。

3.5 循环

反复执行(3.2)、(3.3)后,一旦达到终止条件,选择最优个体作为运算结果,即找出 MBPS。

4 软件仿真

环网方向保护实际整定计算中,常常需要指定某一保护 r_j 为整定起始点,即指定 r_j 为断点集的成员,为满足此需要,只需在 L 中增广一行

$$La = [0 \quad 1 \quad 0] \quad (3)$$

然后按增广后得到的 Ld 求解。若需指定多个断点,则同上,在 Ld 中增广多行(多个回路)。应用面向对象的系统分析方法和建模技术,可通过网络对象类(节点、支路、保护继电器对象类等)来组织网络拓扑联接信息以及保护继电器的描述性知识。首先由网络对象直接形成系统主/后备函数依赖集 FDS^[3]。图 1 示例网络的 FDS 如下:

$$\begin{aligned} f_1: (5, 6) \quad 1, & \quad f_2: (1, 4, 12) \quad 2, \\ f_3: (7) \quad 3, & \quad f_4: (3) \quad 4 \\ f_5: (1, 4, 9) \quad 5, & \quad f_6: (2, 14) \quad 6, \\ f_7: (2, 13) \quad 7, & \quad f_8: (4, 9, 12) \quad 8 \\ f_9: (13, 14) \quad 9, & \quad f_{10}: (11) \quad 10 \\ f_{11}: (1, 9, 12) \quad 11, & \quad f_{12}: (6, 8) \quad 12 \\ f_{13}: (5, 8) \quad 13, & \quad f_{14}: (10) \quad 14 \end{aligned}$$

其中, f_i 中左边的主保护集合可在相应的后备保护对象 r_i 中用一动态数组来存储。

应用 DFS/BT 技术遍历系统 FDS,可直接形成实际方向保护表示的网络有向图的所有有向基本回路矩阵 Ld ^[3],图 1 示例网络的 Ld 如图 2 所示,由此可计算网络的 MBPS。由文献[1]知:图 1 网络 MBPS

的基数为 4,由此可验证本算法结果的最优性^[6]。

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

图 2 所有有向基本回路矩阵 L_d

在 P 667PC 机上用 VB6.0 进行了软件仿真,每次均以概率 1 求得 MBPS = {1,7,9,12} 和 {1,4,9,12}。

从系列仿真试验可得到以下结论:

(1) 算法能以概率 1 获得全局最优解。由于在计算中采用了复制、交换和突变等手段,使寻优过程大大简化。

(2) 算法中没有运用模拟退火技术以及没有引入罚因子,使仿真得到大大简化,从而减少了计算机内存和提高了计算速度。

若 MBPS = {1,7,9,12},则由 MBPS 和 FDS 可确定全网整定配合关系顺序组 RSG: RSG = {1,7,9,12}, {3,11}, {4,10}, {2,5,8,14}, {6,13}。于是,可得到全网整定配合相关顺序矢量: RSV = [1,7,9,12,3,11,4,10,2,5,8,14,6,13]

5 结论

建立了 MBPS 问题的 0—1 整数二次规划 GA 模型算法,解决了基因遗传算法的全局最优和解的

可行性问题,降低了 MBPS 计算复杂性和遗传算法对初始值的敏感性,能灵活地适应工程应用中人工指定断点和选择适合断点集的实际需要,可用于大规模复杂环网方向保护最优整定配合 CAD 软件。

参考文献:

- [1] Damborg M J, Ramaswami R, Venkata S S et al. Computer Aided Transmission Protection System Design, Part 1: Algorithms[J]. IEE-PAS, 1984, 103(1): 104~114.
- [2] Ramaswami R, Damborg M J, Venkata S S et al. Enhanced Algorithms for Transmission Protection Relay Coordination[J]. IEEE PWRD, 1986, 1(1): 280~287.
- [3] Bapaswara Rao V V, Sankara Rao K. Computer Aided Coordination of Directional Relays: Determination of Breakpoints[J]. IEEE PWRD, 1988, 3(2): 51~59.
- [4] 言昭. 应用图论优化复杂环网继电保护整定配合的简便算法[J]. 电力系统自动化学报, 1989, (1): 80~86.
- [5] 王旭蕊, 陈允平. 继电保护整定计算中的图论方法[J]. 继电器, 1992, (1): 2~12.
- [6] 吕飞鹏. 现代电网保护整定计算 CAD 系统的研究[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1996, 5.
- [7] 云庆夏. 遗传算法和遗传规划——一种寻优技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997.
- [8] [美] Z 米凯利维茨. 遗传算法和数据编码的结合[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

收稿日期: 2002-01-28

作者简介:

乐全明(1974-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统继电保护和电力系统软件工程研究。

顾永朋(1977-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统调度自动化和计算机信息管理研究。

吕飞鹏(1968-), 男, 博士, 副教授, 从事电力系统继电保护和综合信息处理智能系统研究。

GA based determination of minimum break point set for optional coordination of directional protective relay in a multiloop network

YUE Quan-ming, GU Yong-peng, LU Fei-peng
(Sichuan University, Chengdu 610065 China)

Abstract: The determination of MBPS(minimum break point set) for optional coordination of directional relay in a multiloop network is reduced to solving an inequality—indefinite equation group, then reduced further to a 0—1 integer quadratic programming problem. Where the heuristic knowledge of MBPS is facility. On the basis of the principle of Gene Evolution, a new approach to determine MBPS is presented for the first time. And the computational complexity of MBPS problem is decreased.

Key words: coordination and setting of directional relays; gene evolution computation; integer programming graph; theory