

改进遗传算法的编码策略及其在配电网重构中的应用

唐斌, 罗安, 王击

(中南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 提出了相邻开关在染色体中相邻以及构成同一环路的开关在同一基因块内的编码方法。交叉操作只进行对应基因块的交换, 而将变异和逆转操作限制在基因块内。该遗传操作策略克服了现有遗传算法在配电网重构中应用时产生大量不可行解的不足, 通过简化配电网结构, 减少 GA 染色体的长度, 从而进一步提高其计算效率。以网损的倒数作为适应度函数, 比较简洁有效, 给出的算例结果表明该文提出的方法具有较高的搜索效率。

关键词: 遗传算法; 配电网; 编码策略

中图分类号: TM71; TP18

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2004)13-0035-05

0 引言

遗传算法(Genetic Algorithm, GA)是模拟生物进化过程的计算模型, 由于 GA 的整体搜索策略和优化时不依赖梯度信息的特点, 使其得到了广泛的应用, GA 的研究已成为国际学术界跨学科的前沿之一。近几年来, 不少学者将 GA 应用于以网损最低为目标的配电网网络重构中, Koichi Nara 等人^[1]首先将配电网网络重构描述为混合整数规划问题, 然后采用固定交叉率 P_c 和变异率 P_m 的 GA 求解配电网网络重构, 但由于采用固定的 P_c 和 P_m , 影响了 GA 的性能。基于模糊 GA 的配电网网络重构^[2]提出一种通过模糊规则在线地改变 P_c 和 P_m 值的 GA 来求解配电网网络重构的方法, 提供的算例表明: 模糊 GA 改进了 GA 的性能, 提高了收敛速度, 避免了不成熟收敛。但是, 上述算法由于没有采用针对配电网的结构特点进行染色体编码和遗传操作的策略, 在进行交叉和变异等遗传操作中会产生大量不可行解, 严重影响了 GA 的计算效率。本文在介绍改进遗传算法(Improved Genetic Algorithm, IGA)的基础上, 通过对本文提出的配电网的简化、染色体编码策略和改进 GA 的使用, 极大地提高了有效候选解的比例, 从而使 GA 算法的收敛速度大为提高。算例结果表明本文提出的方法具有较高的计算效率。

1 改进遗传算法

基金项目: 国家 863 资助项目(863-511-820-007); 湖南电力科技攻关项目(2001)772; 教育部中南大学信息学院青年骨干教师基金项目(CSU2002 YT028)

本文介绍的改进遗传算法(Improved Genetic Algorithm, IGA), 从理论上证明了 IGA 的全局收敛性, 得出了 IGA 图式定理^[3]的表达式, 以及 IGA 操作简单和计算效率高的结论, 并且有较多文献对 IGA 在各方面的应用作了尝试, 可见 IGA 是 GA 领域的一个新的前沿。改进遗传算法与传统遗传算法(Traditional Genetic Algorithm, TGA)有许多相似和不同之处, IGA 是针对序号编码^[4]和部分非序号编码(如交配池中各个体长短不一的非序号编码问题)对象的组合优化问题的改进, 无论在理论上还是在工程实践上都有许多值得研究之处。IGA 的子染色体不是完全照抄照搬父染色体, 而是主要在对父染色体继承的基础上进行各种遗传操作, 然后在全局收敛性和最优保持操作的保证下可产生全局最优解。

IGA 的遗传算子分为基因重组算子和基因突变算子两大类, 它们的遗传操作功能明显不同。而 IGA 的基因换位、基因移位和基因倒位 3 种基因重组算子是彼此等价的, 或者说这 3 种遗传算子具有相同的遗传操作功能。但是, 不同的基因重组算子对适值计算式的影响是不同的, 在选择基因重组算子时, 应先分析它们在具体问题中对适值计算式的影响, 然后选择计算效率较高的遗传算子。

现在让我们来看看针对配电网网络重构的数学模型及染色体的编码策略, 然后尝试把前沿的 IGA 与配电网网络重构结合起来。

2 配网重构的数学模型

配网重构就是在安全可靠、无网络孤岛和确保配电网为开环运行的前提下, 通过改变网络中开关的状态(即选择不同的供电路径), 达到网损最小

或某种指标最优。通常目标函数为网损最小,故配网重构的目标函数可以表示为:

$$\min f = \sum_{i=1}^{n_b} r_i / I_i / ^2 k_i \quad (1)$$

其中: n_b 为配电网中的支路数; r_i 为第 i 条支路的电阻; I_i 为流过第 i 条支路的负荷电流; k_i 为开关 i 的状态, 0 表示开关打开, 1 表示开关闭合。

系统网损 f 可以通过潮流计算得到, 本文采用快速分解算法。对于线路 R/X 比值较大的配电网, 快速分解算法可能无法收敛, 此时应用收敛特性与线路及 R/X 比值无关的基于支路电流的潮流计算^[5]方法。

一般还要求式(1)满足电压约束、支路过载约束和变压器过载约束等, 即:

$$U_{i, \min} \leq U_i \leq U_{i, \max} \quad (2)$$

$$S_i \leq S_{i, \max} \quad (3)$$

$$S_t \leq S_{t, \max} \quad (4)$$

其中, $U_{i, \min}$ 和 $U_{i, \max}$ 分别为第 i 个节点电压的允许上限和允许下限值; S_i 和 $S_{i, \max}$ 分别为流过第 i 条支路的实际功率及其最大容许值; S_t 和 $S_{t, \max}$ 分别为变压器供出的实际功率及其最大容许值。

上述不等式约束可以通过越界罚函数^[6]加入到目标函数中。

本文以网损最小为目标函数的 GA 适值函数为:

$$F = \frac{1}{f} \quad (5)$$

3 染色体的编码策略

现有的 GA 在电力系统中的应用, 基本上都是简单地套用基本的 GA 而忽略了优化问题的特殊性及相应的建模与求解技巧^[7]。研究并优化与电力系统相关的遗传编码及遗传操作策略具有重要意义。

3.1 现有的染色体编码方法

对于图 1(a) 中的配电系统, 一共有 16 条支路, 一般认为每条支路上均有开关, 按传统编码方法, 染色体长度为 16, 该配电系统 GA 空间将有 $2^{16} = 65536$ 个个体。由组合数学可知图 1(a) 中的配电系统 GA 表现型个体为 190 个, 有效候选解只占 $190/65536 = 0.2899\%$ 。这表明: 按现有的编码方法, 只能产生非常少的可行解, 即在配电网重构中直接用 GA, 其搜索效率是非常低的。

3.2 缩短染色体长度

在一个配电系统中, 为保证所有负荷都能得到供电, 显然应遵循以下 2 个规则。

规则 1: 在网架结构合理的情况下, 若以网损最小为目标函数, 则与电源点相连的开关应闭合。

规则 2: 不在任何环路的支路开关必须闭合。

基于上述规则, 开关 $SS_{1,2}, SS_{6,7}, SS_{8,9}$ 和 $SS_{11,12}$ 在染色体中的对应位可消除, 节点 9 的负荷加到节点 8 上, 则图 1(a) 可简化为图 1(b)。

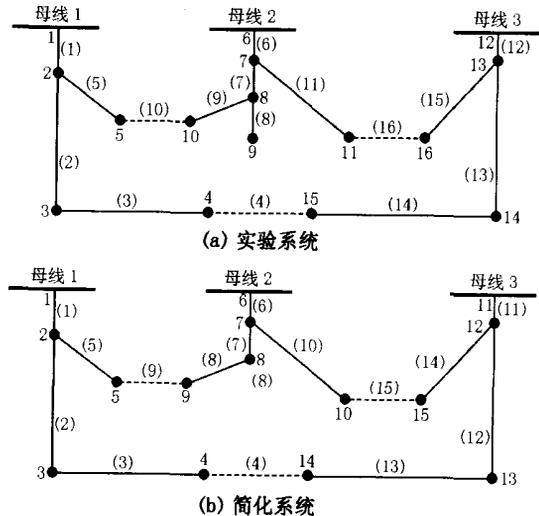


图 1 IEEE 典型三馈线系统

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

经过上述简化处理, 染色体长度可以缩短到 12 位。GA 空间将下降到 $2^{12} = 4096$; GA 表现型个体减少为 60 个, 有效候选解占 1.465%。可见, 利用规则 1、规则 2 可以大大缩短染色体的长度, 并使搜索空间中可行解所占的比例提高 5 倍多。尽管如此, 可行解所占的比例仍然很小, 因此需要进一步研究编码操作的策略。

3.3 提高有效候选解比例的染色体编码策略

在配电网中一个联络开关对应一个环路, 采用构成同一环路的开关在同一染色体内, 相邻开关在染色体中为相邻基因的编码策略, 则图 1(b) 的配电系统编码如表 1 所示。

由组合数学可知, GA 空间为 348, 其中不可行解为 288 个, 有效候选解占 17.241%, 这样又使搜索空间中可行解比例提高了近 12 倍, 为进一步提高, 本文提出了改进 IGA 的基因操作。

4 改进 IGA 的基因操作

由于配电网中各环的开关数量不一, 即交配池中染色体长短不一, 因此针对配电网重构的 GA 算法宜采用 IGA, 经分析可知, 对于配电网重

构的 IGA 基因重组算子宜采用基因移位算子,即采用基因移位和基因突变的 IGA。

表 1 图 1(b)的编码结果

环路	开关	染色体
1	SS _{2,3}	1
	SS _{3,4}	1
	TS _{4,14}	0
	SS _{13,14}	1
2	SS _{12,13}	1
	SS _{7,10}	1
	TS _{10,15}	0
3	SS _{12,15}	1
	SS _{7,8}	1
	SS _{8,9}	1
	TS _{5,9}	0
	SS _{2,5}	1

4.1 改进 IGA 基因移位操作

IGA 基因移位操作是按一定的概率 p_s 把一条染色体中的一个(些)子串中的基因依次后移,并把该子串的最后—个基因移到最前面的位置,在一条染色体中进行基因移位的子串及其长度是随机的,针对配电网重构的具体对象可进行修正以提高收敛速度,即采用单点移位和令子串为整个染色体的 IGA 基因移位操作,表 2 给出了当以概率 p_s 选中环路 1 和 2 时的情形。

表 2 IGA 基因移位操作

环路	开关	父染色体	子染色体
1	SS _{2,3}	1	1
	SS _{3,4}	1	1
	TS _{4,14}	0	1
	SS _{13,14}	1	0
2	SS _{12,13}	1	1
	SS _{7,10}	1	0
	TS _{10,15}	1	1
3	SS _{12,15}	0	1
	SS _{7,8}	1	1
	SS _{8,9}	1	1
	TS _{5,9}	0	0
	SS _{2,5}	1	1

4.2 改进 IGA 基因突变操作

对于二值编码的 IGA 基因突变操作的实质是把某些基因位上的基因值取反^[5],即首先选定—染色体,然后在确定的染色体中随机选定—位基因将其值取反。进行突变后会产生两个 0 或全为 1 的解,从物理意义上看显然是不可行的,即产生了不可行解,需要将产生的不可行解消除。对 IGA 基因突

变进行修正的步骤为:若突变操作将 1 变为 0,则将染色体内突变前为 0 的一个位置变为 1;若突变操作将 0 变为 1,则将其后—位基因变为 0,从而保证突变操作没有不可行解产生。如表 3 所示。

表 3 改进 IGA 基因突变操作

环路	开关	父染色体	变异	修正
1	SS _{2,3}	1	1	1
	SS _{3,4}	1	1	1
	TS _{4,14}	0	0	1
	SS _{13,14}	1	0	0
2	SS _{12,13}	1	1	1
	SS _{7,10}	1	1	1
	TS _{10,15}	0	1	1
3	SS _{12,15}	1	1	0
	SS _{7,8}	1	1	0
	SS _{8,9}	1	1	1
	SS _{5,9}	1	1	1
	TS _{2,5}	0	1	1

IGA 经过上述修正后可使有效侯选解由 17.241% 提高到 100%,从而极大地提高了收敛速度。

当然,复杂的配电系统环路间经常会存在公共开关的可能,故各环路对应染色体可能重叠。如重叠基因位于进行基因操作的染色体时可能产生不可行解,因此需要将不可行解修正为可行解。在配电系统中,环路间的公共开关数目与开关总数的比例较小,经过修正^[8],并不影响上述讨论的结果。

5 软件实现

图 2 给出了基于改进 IGA 的配电网重构的软件实现的算法流程图。

6 算例分析

用本文提出的 IGA 在几个配电网进行了仿真实验,并应用于湖南省电力科技攻关项目。为便于比较,下面给出其中一个与文献[2]相同对象的算例结果。

图 3 为 69 节点配电系统,有 73 条支路,69 个节点,9 个联络开关: TS_{11,66}, TS_{13,20}, TS_{15,69}, TS_{27,54}和 TS_{39,48},额定电压为 12.66 kV, $P=3\ 802$ kW, $Q=2\ 694$ kvar。

按本文给出的染色体编码策略,确定基因个数为 57,它们位于 5 条染色体中,取种群数为 5, p_s 为 0.9, p_m 为 0.05。文献[2]中采用模糊 GA 进行求

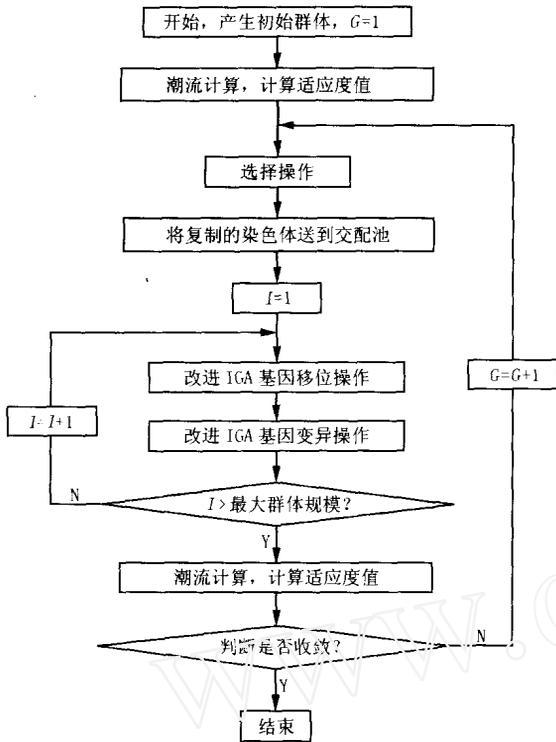


图 2 算法流程图

Fig. 2 Flow chart of algorithm

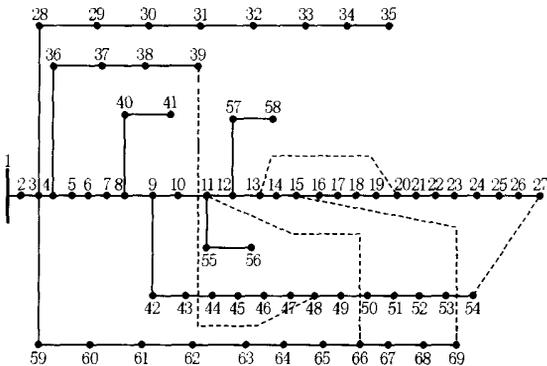


图 3 69 节点配电系统图

Fig. 3 Schematic diagram of 69-bus distribution system

解,染色体长度为 74,种群规模为 100,初始交叉概率为 0.9,初始变异概率为 0.01。表 4 给出了采用本文改进 IGA 基因操作得出的计算结果,对比文献[2]的计算结果可以看出,通过配电网重构,系统网损都大大降低,节点电压质量都得到改善。但本文算法改善了 GA 的性能,极大地提高了收敛速度,按文献[2]模糊 GA 的方法,连续运行优化程序 50 次,最好的一次是进化到第 300 代时才得到表中的结果;而按本文的方法,连续运行优化程序 50 次,其中第 43 次在进化到第 28 代时得到表 4 中的优化结果。

表 4 配电网重构前后结果

Tab. 4 Results before and after reconfiguration

比较项目	重构前	文献[2]的方法	本文的方法
打开开关集合	$TS_{11,66}$	$TS_{11,66}$	$TS_{11,66}$
	$TS_{13,20}$	$TS_{13,20}$	$TS_{13,20}$
	$TS_{15,69}$	$TS_{14,15}$	$TS_{14,15}$
	$TS_{27,54}$	$TS_{44,45}$	$TS_{47,48}$
	$TS_{39,48}$	$TS_{50,51}$	$TS_{25,26}$
网损/kw	225.712	100.810	100.697
最低节点电压/%	0.897	0.933	0.933
得到最好结果的代数		300	28

7 结论

1) 本文针对以网损最低为目标的配电网重构的特点,提出了缩短染色体长度的方法,提高了有效候选解的比例。

2) 采用构成同一环路的开关在同一染色体内、相邻开关在染色体中位于相邻基因的编码策略,进一步提高了有效候选解的比例。

3) 针对配电网重构的特点本文提出改进 IGA,减少了基因操作中不可行解的生成,极大地提高了有效候选解的比例,从而使 GA 算法的收敛速度大为提高。

4) 算例结果表明本文提出的方法具有较高的计算效率。

参考文献:

[1] Koichi N, Shiose A, Kitagawa M. Implementation of Genetic Algorithms for Distribution Systems Loss Minimum Reconfiguration [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(3): 1044-1051.

[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 Algorithm) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2000, 20(2): 66-69.

[3] 李茂军,童调生 (LI Mao-jun, TONG Tiao-sheng). 单亲遗传算法图式定理的进一步分析 (A Further Result on the Schema Theorem of Partheno Genetic Algorithm) [J]. 控制理论与应用 (Control Theory and Applications), 2001, 18(3): 465-468.

[4] 文劲宇,刘沛,程时杰 (WEN Jin-yu, LIU Pei, CHENG Shi-jie). 遗传算法及其在电力系统中的应用 (The Application of Genetic Algorithm in Power System) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1996, 10(10): 57-65.

[5] 毕鹏翔,刘健,张文元 (BI Peng-xiang, LIU Jian,

- ZHANG Wen-yuan). 配电网潮流支路电流法收敛性研究 (On Convergence of Branch Current Based Distribution Power Flow Calculation) [J]. 西安交通大学学报 (Journal of Xi'an Jiaotong University), 2001, 35(4): 243-246.
- [6] 段刚, 余贻鑫 (DUAN Gang, YU Yi-xin). 电力系统 NP 难问题全局优化算法的研究 (A Study on Global Optimization for NP Hard Problems in Power System) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(5): 14-18.
- [7] 陈国良, 王煦法, 庄镇泉 (CHEN Guo-liang, WANG Xu-fa, ZHUANG Zhen-quan). GA 及其应用 (Genetic Algorithm and Its Application) [M]. 北京: 人民邮电出版社 (Beijing: People's Posts & Telecommunications Publishing House), 1996.
- [8] 李茂军, 童调生 (LI Mao-jun, TONG Tiao-sheng). 用单亲遗传算法求解有序组合优化问题 (A Partheno Genetic Algorithm Solving Serial Combinatorial Optimization) [J]. 系统工程与电子技术 (Systems Engineering and Electronics), 1998, (10): 58-61.

收稿日期: 2003-10-21; 修回日期: 2003-11-18

作者简介:

唐斌 (1980-), 男, 硕士研究生, 从事智能控制及其在电力系统中的应用研究;

E-mail: tangbinfree@yahoo.com.cn

罗安 (1957-), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、现代电力系统控制理论和应用研究。

The improved encoding strategy of genetic algorithm and its application in reconfiguration of distribution networks

TANG Bin, LUO An, WANG Ji

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The paper presents an encoding method of neighboring switches neighboring in the chromosome and switches in the same loop in the same gene. The crossover operation is performed only on the corresponding genes. The mutation and inverse operation is limited within the gene. These strategies greatly reduce the infeasible solutions produced during gene algorithm operations in the application to distribution system reconfiguration. Furthermore, a distribution simplifying method is also proposed to reduce the length of chromosome and enhance the efficiency of the algorithm. The reciprocal value of active power losses is taken to be the fitness function, which will be simple and effective. In particular, the results of several test computations show that the proposed algorithm has higher searching capability.

Key words: genetic algorithm; distribution networks; encoding strategy

(上接第 30 页 continued from page 30)

The practicality calculation of compensating capacity for extra-high voltage and long-distance transmission line

YU Qiu-xia¹, LIAO Chang-chu^{1,2}

(1. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: This paper analyses the operation characteristic of extra-high voltage and long-distance transmission line, introduces the practicality calculation of reactive power compensating capacity, and provides the academic gist for choosing the compensating capacity for extra-high voltage and long-distance transmission line. Choosing the reactive power compensating capacity with this calculation method will take full advantage of the reactive power compensating device and reduce cost.

Key words: long-distance transmission line; reactive power planning; compensating capacity; practicality calculation