

## 配电网重构的蜜蜂进化型遗传算法

王韶<sup>1</sup>, 马晶晶<sup>1</sup>, 周鑫<sup>1</sup>, 李德华<sup>2</sup>

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学电气工程学院), 重庆 400044;  
2. 惠州蓄能水电厂, 广东 惠州 516100)

**摘要:** 针对普通遗传算法在解决配电网重构问题时容易出现过早收敛和产生无效解现象, 提出一种配电网重构的蜜蜂进化型遗传算法。该算法利用种群的蜂王与雄蜂个体分别进行交叉操作, 并在每代进化过程中引入一个随机种群防止过早收敛。在编码方法上, 提出一种简化配电网的染色体两阶段编解码策略, 以 prim 算法寻找简化网络的连支作为要断开的支路组, 再选择其中具体断开支路, 算法的整个计算过程中没有无效解产生。对 IEEE 16 节点和 69 节点两个标准算例进行了仿真计算, 并与其他方法进行比较, 结果表明所提算不仅有较高的搜索效率, 而且具有良好的稳定性。

**关键词:** 配电系统; 网络重构; 蜜蜂进化型遗传算法; 简化网络; 两阶段编解码策略

### Bee evolutionary genetic algorithm for distribution network reconfiguration

WANG Shao<sup>1</sup>, MA Jing-jing<sup>1</sup>, ZHOU Xin<sup>1</sup>, LI De-hua<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipments & System Security and New Technology,  
College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
2. Huizhou Pumped Storage Power Station, Huizhou 516100, China)

**Abstract:** Conventional genetic algorithms for distribution network reconfiguration are unsatisfactory because they are easy to fall into premature convergence and result in infeasible solutions. To remedy such a situation, a novel algorithm for distribution network reconfiguration is proposed based on bee evolutionary genetic algorithm (BEGA). In this algorithm, the queen-bee in population crossovers with each drone and a random population is introduced to avoid premature convergence. In addition, a two-stage coding and decoding method based on network simplification is proposed. Firstly, the simplified network's links considered as the opened branch-groups are searched via the minimum spanning tree algorithm-Prim algorithm. Secondly, the opened branches in the branch-groups that have been selected in the first step are determined. Throughout the entire algorithm process, no infeasible solution comes out. IEEE 16-bus and IEEE 69-bus sample systems are simulated and the calculation results are compared with other methods. The results show that the proposed algorithm possesses not only high search efficiency but also better stability.

**Key words:** distribution system; network reconfiguration; bee evolutionary genetic algorithm; network simplification; two-stage coding and decoding strategy

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)16-0062-06

## 0 引言

配电系统直接和用户相连, 网络中装有大量分段开关和少量联络开关, 一般采用闭环设计、开环运行方式。配电网重构是配电网优化的有效手段之一, 主要是通过操作分段开关和联络开关的开合来改变网络拓扑结构, 从而达到降低网损、平衡系统负荷、提高系统可靠性和电压水平等目的。

从数学角度讲, 配电网重构是一个NP难的非线

性组合优化问题, 目前求解该方法主要有以下几类: 1) 传统的数学优化算法<sup>[1]</sup>, 包括分支定界法和整数规划法等。该类方法计算负担重, 不适合大规模配电系统。2) 启发式方法<sup>[2-3]</sup>, 主要有支路交换法和最优流模式法。此类方法计算速度快, 容易满足实时运行的要求, 但往往只能得到局部最优解。3) 人工智能方法<sup>[4-12]</sup>, 包括模拟退火算法、遗传算法、禁忌搜索、粒子群算法、蚁群算法和模拟植物生长算法等。该类方法适于寻找全局最优解, 但计算速度稍慢一些, 如果能结合配电网的特点提高算法的计算速度, 将会有较好的应用前景。

由于遗传算法简单、有很强的全局搜索能力,

**基金项目:** 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007DA10512709212); 国家“111”计划项目(B08036)

因此在配电网重构中得到应用。但是配电网重构的普通遗传算法存在早熟收敛、收敛速度慢和遗传操作过程中会产生无效解等缺陷。所谓无效解是指通过解码还原出的网络结构不满足拓扑约束条件<sup>[8]</sup>。为提高算法的收敛性,文献[5]采用模糊遗传算法进行配电网重构,对交叉率和变异率进行模糊控制。为避免产生无效解,文献[6]将最小生成树编码的遗传算法用于配电网供电恢复。针对上述问题,本文进行了一些探索性研究,提出两个方面的改进:①将蜜蜂进化型遗传算法<sup>[13]</sup>应用于配电网重构,以改善算法的收敛性能。②提出一种简化配电网的两阶段编码解码方法,用于避免产生无效解。

## 1 配电网重构的数学模型

本文以有功损耗最小为目标,数学模型<sup>[8]</sup>如下:

$$\min f = \sum_{b=1}^B k_b r_b \frac{P_b^2 + Q_b^2}{U_b^2} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{A} \mathbf{I}_B = \mathbf{I}_N \quad (2)$$

$$U_{n,\min} \leq U_n \leq U_{n,\max} \quad (3)$$

$$I_b \leq I_{b,\max} \quad (4)$$

$$\mathbf{g}_i \in G \quad (5)$$

式中:  $B$  为配电网支路总数;  $k_b$  为支路  $b$  的开关状态变量, 0 表示打开, 1 表示闭合;  $r_b$  为支路  $b$  的电阻;  $P_b$ 、 $Q_b$  分别为支路  $b$  末端流过的有功功率和无功功率;  $U_b$  为支路  $b$  末端的节点电压。  $\mathbf{A}$  为节点-支路关联矩阵;  $\mathbf{I}_B$  为所有支路的复电流向量;  $\mathbf{I}_N$  为所有节点复电流注入向量;  $N$  为节点总数。  $U_n$ 、 $U_{n,\max}$  和  $U_{n,\min}$  分别为节点  $n$  的电压值及上限、下限值。  $I_b$  和  $I_{b,\max}$  分别为支路  $b$  的电流值和电流容许上限值。  $\mathbf{g}_i$  为重构后第  $i$  个网络结构;  $G$  为所有可行的辐射状网络结构集合。式(1)为目标函数,式(2)~式(5)分别为潮流约束、电压约束、支路容量约束和网络辐射状约束。本文潮流计算采用电流型前推回代法。

## 2 蜜蜂进化型遗传算法

### 2.1 算法的特征

蜜蜂进化型遗传算法 (BEGA) <sup>[13]</sup>是在遗传算法基础上引入蜜蜂繁殖进化机制形成的。它借鉴自然界中蜂王在繁殖季节与雄蜂交尾,在繁殖进化中发挥主导作用的特点实现有效改进遗传算法性能。

与普通遗传算法相比, BEGA 进行了两点改进:

1) 在每代交叉操作中始终以蜂王作为一个父代个体,使子代都能继承父代的优良基因,种群向

最优解进化的可能性变大,加强了算法的开采能力。

2) 在每代进化过程中均引入一个随机种群,使遗传算法能搜索新的空间,提高了算法的勘测能力。

这两点改进使 BEGA 比普通遗传算法能够更快地接近最优解,同时能防止过早收敛。

### 2.2 算法的计算步骤

BEGA 算法的计算步骤如下:

1) 初始化算法的各种参数,置进化代数  $t=0$ 。

2) 随机生成初始种群  $A(t)$ ,将适应度值最优的个体作为蜂王 Queen,其余作为雄蜂。

3)  $t=t+1$ ,在种群  $A(t-1)$ 中用选择操作选出一部分雄蜂与随机生成的另一部分雄蜂组成种群  $A_1(t)$ 。

4) 把种群  $A_1(t)$ 的雄蜂分别与蜂王 Queen 进行交叉操作得到子代种群  $B(t)$ 。

5) 对  $B(t)$ 执行变异操作得到子代种群  $C(t)$ ,并将种群  $C(t)$ 适应度值最大个体记为 Queen\_new。

6) 如果 Queen\_new 的适应度值大于 Queen 的适应度值,令 Queen=Queen\_new,  $C(t)$ 为种群  $A(t)$ ;否则用 Queen 替代  $C(t)$ 中最差个体得到种群  $A(t)$ 。

7) 检查是否满足停止准则,若满足,算法输出结果并停止运算;否则,转步骤 3)。

## 3 配电网的简化

实际配电网的节点和支路数量多,作为优化变量的开关数量很大,导致智能进化算法的编码较长,算法求解效率下降。因此需要对配电网做一定的简化处理。简化配电网的原则可为<sup>[8]</sup>:①与电源点相连的开关和不在任何环路内的开关必须闭合,编码时不考虑这些支路;②把那些解环效果一样的支路称为解环等效支路,可合并为一个支路组。

以 IEEE 69 节点系统为例,其简化示意图如图 1 所示。需要指出的是,文献[8]将简化后的 IEEE 69 节点系统分成 13 个支路组。其实可以将支路 3-4 并入 3-69 支路组,这样简化后网络就只有 12 个支路组。可见,网络的节点数由 69 减少为 8,支路数由 73 减少为 12,大大降低了网络的规模。

## 4 配电网重构的蜜蜂进化型遗传算法

### 4.1 简化配电网辐射状结构的充要条件

以往配电网重构的智能优化算法在初始化和迭代过程中会产生大量不满足拓扑约束的无效解。无效解的存在会增大算法的搜索空间,降低搜索效率,因此应该尽量避免产生无效解。

文献[8]总结了配电网重构时保持网络辐射状的必要条件:若配电网中存在  $n$  个环,则当且仅

当断开属于  $n$  个不同支路组的  $n$  条支路，该网络才可能形成不含环的连通网络。

上述必要条件不能保证没有无效解产生。例如，图 1 中有 5 个环，在断开 5 个不同支路组 4-48、4-9、4-66、9-48、9-11 的 5 条支路后，网络中含有 1 个孤立节点和 2 个环，即存在无效解。

本文在选择断开支路时按照以下规则进行：

1) 定义简化配电网的一棵生成树为树基，树余为等效连支支路组，等效连支支路组必须断开。

2) 每个等效连支支路组中只能断开一条支路。

以如图 1 的 69 节点配电网为例说明这个规则。定义一个简化网络支路广义邻接矩阵  $A$  和一个过渡矩阵  $C$ ，如式 (6) 所示。

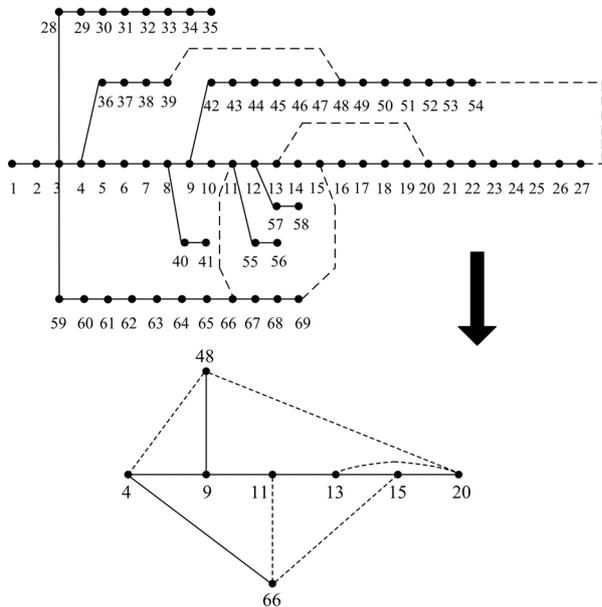


图 1 69 节点配电网简化示意图

Fig.1 Simplified sketch map of 69-bus distribution

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 9 \\ 2 & 4 & 48 \\ 3 & 4 & 66 \\ 4 & 9 & 11 \\ 5 & 9 & 48 \\ 6 & 11 & 13 \\ 7 & 11 & 66 \\ 8 & 13 & 15 \\ 9 & 13 & 20 \\ 10 & 15 & 20 \\ 11 & 15 & 66 \\ 12 & 20 & 48 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 6 & 8 & 9 & 10 & 11 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 5 & 64 & 65 & 66 & 67 & 68 & 69 & 70 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7 & 45 & 46 & 47 & 48 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 13 & 15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 14 & 50 & 51 & 52 & 53 & 54 & 55 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 16 & 19 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 21 & 23 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 22 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 24 & 26 & 27 & 28 & 29 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 25 & 73 & 72 & 71 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 56 & 57 & 58 & 59 & 60 & 61 & 37 & 36 & 35 & 34 & 33 & 32 & 31 & 30 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中：矩阵  $A$  第一列元素表示简化网络支路编号，第二列和第三列表示其节点之间的连接关系。矩阵  $C$  各行元素与矩阵  $A$  各行之间依次对应，表示各简化支路组中包含的原始网络支路编号，0 表示空缺。

由图论的知识可知，一个图  $G$  连通的充要条件是  $G$  有生成树<sup>[14]</sup>。矩阵  $A$  的每一棵生成树对应着简化配电网唯一的等效连支支路组。因此，用矩阵  $A$  生成简化配电网的一棵生成树后，首先断开其等效连支支路组可保证配电网不会产生环网；然后结合过渡矩阵  $C$ ，断开每个连支支路组内部一条支路可保证配电网不会出现孤岛；最后从原始配电网网络中剔除这些断开支路可得到它的一棵生成树。

综上所述，简化配电网辐射状结构的充要条件为：若配电网中存在  $L_i$  个环路，则当且仅当断开属于  $L_i$  个不同等效连支支路组的  $L_i$  条支路，该网络才能形成不含环网和孤岛的连通网络。

### 4.2 染色体的编码和解码策略

配电网重构算法的染色体编码和解码过程可以在上述充要条件指导下进行，以避免产生无效解。

本文采用两阶段染色体编码方法。染色体长度取为简化网络支路总数  $B_1$  的两倍，即  $2B_1$ 。染色体前  $B_1$  位是重构第一个阶段的变量，用于寻找简化网络的连支支路组。染色体后  $B_1$  位是重构第二个阶段的变量，表示各连支支路组中含有的支路号，用于选择每个断开的连支支路组内部断开的支路。

编码时，对染色体前  $B_1$  位采用浮点数编码。随机给简化网络的每条边赋一个  $[0, 1]$  之间的浮点数值，然后按其值升序排列，序号作为染色体各基因的值，也就是各基因位对应的每条边的权值。在有多个变电站时，任选择一个变电站作为根节点，其他变电站作为普通节点。在各变电站之间增加虚拟的零阻抗的支路。虚拟支路不参与染色体编码，为此对该边赋 0 值。对染色体后  $B_1$  位采用十进制编码，每个基因位取值为正整数，范围为  $[1, B_2]$ ，其中  $B_2$  为基因位对应的连支支路组包含的支路数。

解码时，分两个阶段进行。第一个阶段，寻找简化网络的连支支路组。步骤如下：

1) 根据染色体前  $B_1$  位的基因码，用 Prim 算法<sup>[14]</sup>求每个个体的最小生成树。

2) 用简化配电网的全部支路减去最小生成树支路，得到要断开的等效连支支路组。

第二个阶段，在断开的连支支路组中，根据染色体后  $B_1$  位选择其内部断开的支路。最终得到原始配电网的辐射形网络结构。

### 4.3 遗传操作的实现

1) 蜂王的确定

为简化计算，本文用目标函数值确定蜂王。当新种群中最优个体的目标函数值大于旧蜂王的目标函数值时，就把它作为新蜂王；否则保留蜂王不变。

2) 选择操作和随机种群的引入

根据 BEGA 算法基本原理, 在确定种群的蜂王和雄蜂后, 需要通过选择操作选出  $M\beta/2$  个个体构成新种群的一部分, 其中,  $M$  为种群规模,  $\beta \in [0, 1]$ 。本文选择操作采用轮盘赌方法, 运用文献[15]的方法计算染色体的适应度值。为防止过早收敛, 在每代进化过程中引入一个  $M(1-\beta)/2$  个个体的随机种群。将这两部分种群合并生成  $M/2$  个个体的新种群。

3) 交叉操作

本文采用单点交叉策略, 将  $M/2$  个雄蜂个体分别和蜂王个体随机地选择一个交叉点, 将交叉点右段的基因互相交换, 从而形成  $M$  个个体的新种群。

4) 变异操作

采用均匀变异策略。依次指定染色体的每个基因位为变异点, 然后对每个变异点, 以变异概率从对应基因的取值范围内取一个随机数替代原有值。染色体的前  $B_1$  位基因的变异范围均为  $[1, B_1]$ , 染色体后  $B_1$  位基因的变异范围为  $[1, B_2]$ 。

4.4 算法总体流程

配电网重构蜜蜂进化型遗传算法的流程图如图 2 所示。

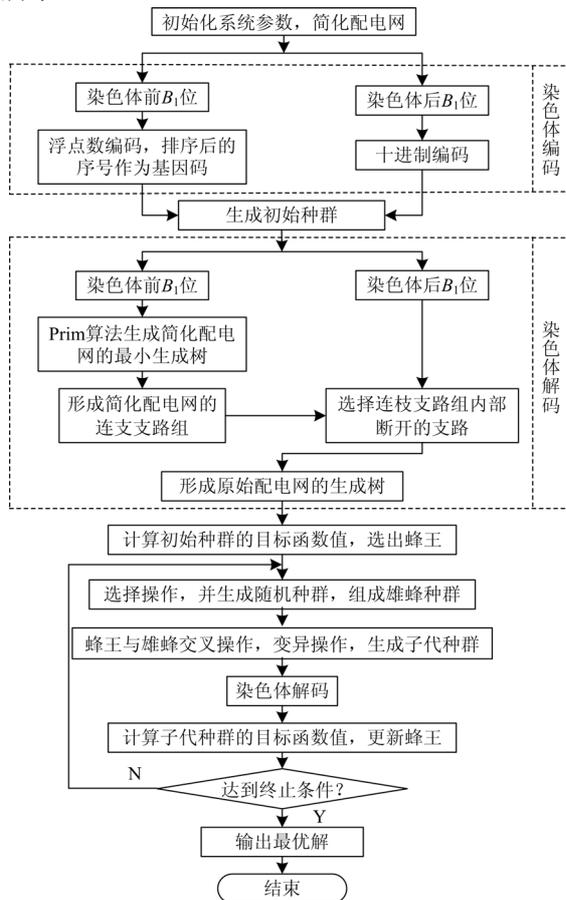


图 2 算法流程图

Fig.2 Flow chart of algorithm

5 算例分析

在 Matlab 7.0 环境下用本文算法对 IEEE16 节点和 IEEE69 节点配电系统<sup>[16-17]</sup>进行仿真计算。

算例 1: IEEE 16 节点是 3 馈线系统。额定电压为 23 kV, 总负荷为 28.7+j17.3 MVA, 包含 16 个节点, 16 条支路, 其中有 3 个联络开关。经简化后为 3 个支路组, 染色体长度为 6 位。种群规模取为 10。

算例 2: IEEE 69 节点配电系统, 如图 1 所示。额定电压为 12.66 kV, 总负荷为 3802.19+j2694.6 kVA, 有 69 个节点, 73 条支路, 其中有 5 个联络开关。经简化后为 12 个支路组, 染色体长度为 24 位。种群规模取为 30。

两个算例的交叉率和变异率分别为 0.85 和 0.08,  $\beta$  为 0.4, 最大迭代次数为 50。重构结果分别如表 1 和表 2 所示。

由表 1 和表 2 可见, 本文算法得到的重构结果分别与文献[16]和文献[12]的计算结果完全一致, 验证了本文算法和程序的正确性。

为说明简化配电网两阶段编码蜜蜂进化型遗传算法 (SBEGA) 的寻优性能, 对两个算例在同等计算条件下与其他文献的算法进行比较。如表 1、表 2 所示。

表 1 16 节点配电系统重构结果

Tab.1 Reconfiguration results of 16-bus distribution system

	重构前	本文算法	文献[16]
打开的开关集合	S <sub>5-11</sub> S <sub>10-14</sub> S <sub>7-16</sub>	S <sub>9-11</sub> S <sub>8-10</sub> S <sub>7-16</sub>	S <sub>9-11</sub> S <sub>8-10</sub> S <sub>7-16</sub>
网损/kW	511.4	466.1	466.1
最低节点电压/pu	0.969 3	0.971 6	0.971 6

表 2 69 节点配电系统重构结果

Tab.2 Reconfiguration results of 69-bus distribution system

	重构前	本文算法	文献[12]
打开的开关集合	S <sub>11-66</sub> S <sub>13-20</sub> S <sub>15-69</sub> S <sub>27-54</sub> S <sub>39-48</sub>	S <sub>11-66</sub> S <sub>13-20</sub> S <sub>14-15</sub> S <sub>50-51</sub> *S <sub>44-45</sub>	S <sub>11-66</sub> S <sub>13-20</sub> S <sub>14-15</sub> S <sub>50-51</sub> *S <sub>44-45</sub>
网损/kW	225.00	99.62	99.62
最低节点电压/pu	0.909 2	0.9427 5	

注: \*S<sub>44-45</sub> 也可以是 S<sub>45-46</sub> 或 S<sub>46-47</sub> 或 S<sub>47-48</sub>。

对文献[6]未简化配电网最小生成树编码的

遗传算法 (GA) 进行编程实现, IEEE16 节点和 69 节点系统染色体长度分别为 12 和 57。

在简化配电网两阶段编码遗传算法 (SGA) 的基础上, 加入文献[5]所提出的交叉率  $P_c$  和变异率  $P_m$  的模糊控制规则, 形成简化配电网两阶段编码的模糊遗传算法 (SFGA)。 $\Delta P_c$  的变化范围取为  $[-0.1, 0.1]$ ,  $\Delta P_m$  的变化范围取为  $[-0.01, 0.01]$ 。

表 3 是用上述四种遗传算法在同等初始参数下对两个算例分别进行 20 次测试计算得到的最小进化代数、最大进化代数、收敛的平均进化代数和收敛到全局最优解的次数的计算结果。

表 3 不同算法寻优性能比较

Tab.3 Performance comparison in different algorithms								
算法	算例 1				算例 2			
	最小代数	最大代数	平均代数	最优解次数	最小代数	最大代数	平均代数	最优解次数
GA	1	24	7.9	20	12	48	33.4	13
SGA	1	29	6.4	20	5	47	21.2	18
SFGA	1	22	6.1	20	3	38	16.9	19
SBEGA	1	13	4.2	20	3	31	12.0	20

由表 3 可以看到, 在 20 次计算中, 就收敛的平均进化代数而言, SGA 在算例 1 中为 6.4, 比 GA 的 7.9 低 1.5 代; 在算例 2 中为 21.2, 比 GA 的 33.4 低 12.2 代。由于平均进化代数是反映遗传算法搜索性能的一项重要指标, 平均进化代数越小, 算法的收敛性越好, 因此上述结果表明简化配电网的两阶段编码方法因减少了染色体长度, 所以具有更高的搜索效率, 尤其对于规模较大的网络, 该编码策略更能显示出优势。

在表 3 中, 算例 1 的 SGA 最大进化代数为 29, 比 GA 的 24 大, 这是由于遗传算法的随机性造成的。最大进化代数 29 是 SGA 最差的那次计算。在 20 次计算中, 计算次数和收敛代数如图 3 所示。

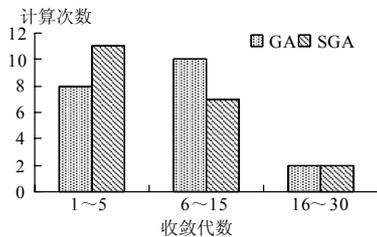


图 3 16 节点配电系统的计算次数和收敛代数

Fig.3 Calculation number of times and convergence generations of 16-bus distribution system in GA and SGA

由图 3 可见, 两种算法收敛代数大于 16 的计算次数均为 2; SGA 收敛代数小于 5 的计算次数比 GA

多 3 次, 这就使得 SGA 的平均进化代数小于 GA 的平均进化代数。

由表 3 还可见, 在采用了简化配电网的两阶段编码方法中, SBEGA 在两个算例的平均进化代数最小, SFGA 次之, SGA 最大。这表明蜜蜂进化和模糊控制均能改善遗传算法的搜索效率, 但前者的效果更好一些。

算例 1 中, 四种遗传算法在 20 次测试计算中每次均找到了全局最优解, 算例 2 中只有 SBEGA 找到全局最优解的次数为 20 次, SFGA 和 SGA 分别为 19 次和 18 次, 有 1 次和 2 次没有找到全局最优解。这也表明蜜蜂进化型遗传算法全局收敛性最好。它不仅能克服普通遗传算法收敛性差和过早收敛的缺陷, 而且其寻优能力还要强于模糊遗传算法。

为了比较四种遗传算法寻找最优解的收敛过程, 图 4 给出了 IEEE 69 节点系统在 20 次测试计算中, 每种算法寻优代数与其平均进化代数最接近的那一次计算的全局最优解收敛曲线。由图 4 可见, SBEGA 的收敛过程最为平稳。

综上所述, 简化配电网的两阶段编码策略和蜜蜂进化型遗传算法均在一定程度上提高了算法寻优能力。更为重要的是, BEGA 原理简单, 编程容易, 不像 FGA 那样需要制定复杂的模糊控制规则, 因此在解决配电网重构问题上具有更好的实用性。

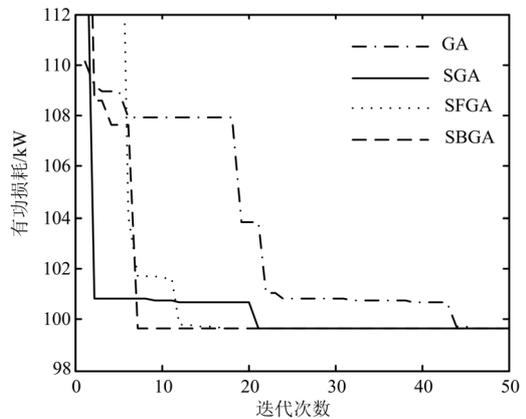


图 4 69 节点配电系统不同算法的全局最优解收敛曲线  
Fig.4 Convergence curve of 69-bus distribution system in different algorithms

## 6 结论

1) 在简化配电网的基础上, 提出了一种新的编码和解码方法, 既能缩短染色体长度, 又可以避免产生无效解, 缩小了算法的搜索空间。

2) 在配网重构问题上, 蜜蜂进化型遗传算法具有很好的开采能力和勘测能力, 降低了普通遗传算

法容易过早收敛的可能性,提高了算法的搜索效率。

3) 两个标准算例的仿真结果表明,本文提出的配电网重构蜜蜂进化型遗传算法不仅能够较快地收敛到全局最优解,而且还具备良好的收敛稳定性。

### 参考文献

- [1] Sarma N D R, Prakasa Pao K S. A new 0-1 integer programming method of feeder reconfiguration for loss minimization in distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 1995, 33 (2): 125-131.
- [2] Raju G K V, Bijwe P R. An efficient algorithm for minimum loss reconfiguration of distribution system based on sensitivity and heuristics[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2008, 23 (3): 1401-1407.
- [3] Shirmohammadi D, Hong H W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4 (2): 1492-1498.
- [4] Jeon Y J, Kim J O, Kim J O, et al. An efficient simulated annealing algorithm for network reconfiguration in large-scale distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17 (4): 1070-1078.
- [5] 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 algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20 (2): 66-69.
- [6] 沈广, 陈允平, 刘栋. 基于最小生成树编码的配电网恢复遗传算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (14): 81-84.  
SHEN Guang, CHEN Yun-ping, LIU Dong. Distribution network restoration based on the genetic algorithm with minimum spanning tree decoding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (14): 81-84.
- [7] 陈根军, 李繼洸, 唐国庆. 基于Tabu搜索的配电网网络重构算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 28-33.  
CHEN Gen-jun, LI K K, TANG Guo-qing. A Tabu search approach to distribution network reconfiguration for loss reduction[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (10): 28-33.
- [8] 李振坤, 陈星莺, 余昆, 等. 配电网重构的混合粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (31): 35-41.  
LI Zhen-kun, CHEN Xing-ying, YU Kun, et al. Hybrid particle swarm optimization for distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (31): 35-41.
- [9] 卢志刚, 杨国良, 张晓辉, 等. 改进二进制粒子群优化算法在配电网网络重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (7): 30-34.  
LU Zhi-gang, YANG Guo-liang, ZHANG Xiao-hui, et al. Reconfiguration of distribution network based on improved particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (7): 30-34.
- [10] 王超学, 崔杜武, 崔颖安, 等. 使用基于中医思想的蚁群算法求解配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (7): 13-18.  
WANG Chao-xue, CUI Du-wu, CUI Ying-an, et al. Distribution network reconfiguration using a novel ant colony system based on traditional Chinese medicine theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 13-18.
- [11] 麻秀范, 张粒子, 孔令宇. 基于家族优生学的配网重构[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (10): 97-102.  
MA Xiu-fan, ZHANG Li-zi, KONG Ling-yu. Reconfiguration of distribution networks based on family eugenics based evolution algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (10): 97-102.
- [12] 王淳, 程浩忠. 基于模拟植物生长算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (19): 50-55.  
WANG Chun, CHENG Hao-zhong. Reconfiguration of distribution network based on plant growth simulation algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27 (19): 50-55.
- [13] 孟伟, 韩学东, 洪炳镕. 蜜蜂进化型遗传算法[J]. 电子学报, 2006, 34 (7): 1294-1300.  
MENG Wei, HAN Xue-dong, HONG Bing-rong. Bee evolutionary genetic algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34 (7): 1294-1300.
- [14] 谢金星, 邢文训. 网络优化[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [15] 雷英杰, 张善文, 等. MATLAB遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- [16] Su C T, Lee C S. Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18 (3): 1022-1027.
- [17] Baran M E, Wu F F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4 (1): 725-734.

收稿日期: 2009-09-15; 修回日期: 2009-11-28

作者简介:

王韶(1956-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统规划与可靠性;

马晶晶(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制. E-mail: mapf10@163.com