

基于免疫算法的配电网故障定位方法研究

郑涛¹, 潘玉美¹, 郭昆亚², 王增平¹, 孙洁¹

(1. 新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京 102206;

2. 沈阳供电公司, 辽宁 沈阳 110811)

摘要: 提出一种基于免疫算法的配电网故障定位新方法。免疫算法依据个体的亲和度对个体进行评价, 根据个体的亲和度和浓度选择进行交叉、变异的个体, 增大了群体多样性, 避免了算法快速陷入局部最优, 同时进化过程建立记忆单元, 保留部分最优解, 以免交叉、变异过程后群体退化, 保证算法终止时得到的结果是历代出现过的最高亲和度的个体。针对多电源开环运行的配电网, 结合区域划分思想, 通过判断变电站变压器低压侧开关的故障信息, 提出一种提高故障定位速度的方法。仿真结果表明该算法可有效实现配电网的故障定位, 并通过与遗传算法相对比, 验证了免疫算法用于配电网故障定位的有效性 & 可靠性。

关键词: 配电网; 故障定位; 区域划分; 免疫算法

Fault location of distribution network based on immune algorithm

ZHENG Tao¹, PAN Yu-mei¹, GUO Kun-ya², WANG Zeng-ping¹, SUN Jie¹

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Shenyang Power Supply Company, Shenyang 110811, China)

Abstract: A new method of fault section location and isolation in distribution networks based on immune algorithm (IA) is presented. Immune algorithm gets individual evaluation from its affinity. Selection of the crossover and mutation individuals is not only based on its affinity but also concentration, which increases colony diversity, avoids partial optimization, and speeds up the rate of evolution. Besides, this method can establish memory units and retain part of the optimal solutions in order to avoid degeneration in the process of crossover and mutation and guarantee the result is the individual of the highest level of affinity when the algorithm is terminated. A method based on the idea of area division and fault alarm of the incoming break is proposed to improve the speed of location for open-loop operational distribution networks. Finally the simulation results show that the immune algorithm can realize the goal of fault location and the comparison results with genetic algorithm testify its validity and reliability.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2012AA050208).

Key words: distribution system; fault location; area division; immune algorithm

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)01-0077-07

0 引言

配网自动化是提高配电网运行智能化和自愈性的重要手段。其中, 馈线自动化是其主要功能之一, 即配电网故障后, 根据馈线终端单元上报的故障信息快速找到故障区段并隔离, 迅速恢复非故障

失电负荷的供电。配电网的故障区段定位是馈线自动化的基础, 对于提高供电可靠性具有重要意义。

目前配电网基于馈线终端单元上报故障信息进行故障定位的方法主要分为两类: 一类是基于健全信息的故障定位方法, 其原理是故障电流判别法, 主要研究成果是矩阵算法^[1-4], 矩阵算法可以迅速实现配电网的故障定位, 但是, 配电终端设备多安装于户外, 运行环境恶劣, 使得故障信息漏报、误报的可能性较高, 因此限制了基于健全信息的矩阵算法的应用; 另一类是基于非健全信息的故障定位方

基金项目: 国家 863 高技术基金项目 (2012AA050208); 国家电网公司科技项目资助 (沈阳供电公司信息化工作办公室 KJ [2013] 1052)

法, 主要研究成果是基于人工智能算法的故障定位方法^[5-9], 及基于人工智能算法的故障恢复方案^[10-11]。文献[12-14]将遗传算法改进并用于配电网故障定位, 该算法能进行全局寻优求解, 具有良好的容错性, 但是遗传算法在执行过程中, 是随机地、没有指导的迭代搜索, 结果容易陷入局部最优。

本文针对遗传算法容易陷入局部最优的缺点, 将免疫算法应用到配电网故障定位。免疫算法和遗传算法都采用群体搜索策略, 算法结构大致相同, 但是遗传算法仅根据亲和度评价、选择个体, 而免疫算法评价、选择个体的时候是根据个体的亲和度和浓度进行的, 这样增加了群体的多样性, 避免算法局部收敛, 而且增加记忆单元, 保留部分最优群体, 避免交叉、变异过程使群体退化。提出通过分析多电源开环运行配电网变电站变压器低压侧开关的故障信息决定是否需要对该变电站的供电区域进行故障定位, 加快了多电源开环运行配电网的故障定位速度。最后, 仿真表明免疫算法可实现配电网的故障定位, 并对比免疫算法和遗传算法的定位性能。

1 基于免疫算法的配电网故障定位

1.1 概述

为了增强配电网故障定位的容错能力, 文献[12]提出根据 FTU 上送的过流信息将配电网的故障定位问题转化为 0-1 整数规划问题, 本文提出采用免疫算法求解该 0-1 整数规划问题。基于免疫优化算法的故障定位是由编码、抗体评价、免疫操作和译码等部分组成。

1.2 抗体编码

配电网故障定位中, 馈线区段状态为待求量, 因此, 免疫算法中, 基因对应单一馈线区段的状态, 抗体由基因构成, 即配电网中所有馈线区段的状态形成的向量。本文采用二进制编码形式, 抗体的长度由馈线区段数决定, 抗体的每一位基因对应馈线区段的状态, 1 表示该馈线区段故障, 0 表示没有故障。最终, 抗体的表现形式为[0 1 0 ... 0 0]。

1.3 抗体评价

对抗体的评价包括两部分: 一是计算抗体和抗原的亲和度来描述抗体的优良; 二是计算抗体与抗体的亲和度来描述抗体之间的相似度, 从而求解抗体的浓度来描述抗体的多样性。根据抗体与抗原的亲和度以及抗体的浓度构造期望繁殖率, 据此选择父代个体。

1.3.1 抗体与抗原的亲和度

抗体与抗原亲和度计算的关键在于评价函数的

构造, 评价函数是基于通过馈线区段状态确定的馈线开关的状态与 FTU 实际上传的电流越限信息的差别最小来构造的。本文采用文献[13]提出的评价函数, 如式 (1)。

$$F_{it}(\mathbf{S}_B) = \sum_{j=1}^{N_1} |I_j - I_j^*(\mathbf{S}_B)| + \omega \sum_{i=1}^{N_2} |S_B(i)| \quad (1)$$

式中: $F_{it}(\mathbf{S}_B)$ 为抗体群中每个抗体所对应的适应度, 即评价函数对可行解的评价值; \mathbf{S}_B 为单个抗体, 即所有馈线区段状态组成的解向量, $S_B(i)$ 表示抗体的每一位基因, 对应着配电网中各馈线区段的状态, 取值为 1 表示故障状态, 取值为 0 表示正常状态; N_1 为配电网中馈线开关的总数; N_2 为配电网中馈线区段的总数; I_j 为配电网中各馈线开关处的电流越限信息 (有电流越限时为 1, 否则为 0); $I_j^*(\mathbf{S}_B)$ 则为配网中由馈线区段状态确定的馈线开关的状态, 它是开关下游的各馈线区段状态的或函数, 比如开关 S_1 下游有馈线区段 a 和馈线区段 b, 则 $I_j^*(S_1) = a \parallel b$, 馈线区段 a、b 的状态有一个为 1, 则 $I_j^*(S_1)$ 为 1; ω 是取值小于 1 的正的权系数, 本文中权系数取为 0.5; $\omega \sum_{i=1}^{N_2} |S_B(i)|$ 表示权系数乘以故障馈线段数的和。

抗体和抗原之间的亲和度, 可表示为

$$A_v = 1 / F_{it}(\mathbf{S}_B) \quad (2)$$

其中: $F_{it}(\mathbf{S}_B)$ 表示最小优化问题的目标函数; A_v 用来表示抗体与抗原之间的匹配程度, 即初始解群或者迭代过程中产生的可行解的优良, A_v 越大, 该可行解越好, A_v 越小, 该可行解越差。

1.3.2 抗体与抗体的亲和度及抗体浓度

抗体与抗体之间的亲和度反映可行解与可行解之间的相似程度。此处借鉴 Forrest 等提出的 R 位连续计算抗体与抗体之间的亲和度^[15-16]。两种抗体有超过 R 位或者连续 R 位编码相同, 则表示两种抗体近似“相同”, 否则表示两种抗体不同, 即

$$S_{v,s} = \frac{k_{v,s}}{L} \quad (3)$$

其中: $k_{v,s}$ 是抗体 v 和抗体 s 中处在相同基因位置且基因相同的位数; L 为抗体的长度。 $S_{v,s}$ 越大, 则两个抗体越相似; 反之, 越不相似。例如, 两个抗体为 [1 0 0 1 0 0 0 1]、[1 1 0 0 0 1 0 1], 经比较有 5 个基因符合条件, 此时可以计算它们的亲和度 $S_{v,s}$ 为 0.625。

抗体浓度 C_v 即抗体群中相似抗体所占的比例, 反应了抗体群的多样性, 计算公式为

$$C_v = \frac{\sum_{v,s \in N} H_{v,s}}{N} \quad (4)$$

$$H_{v,s} = \begin{cases} 1, & S_{v,s} > e \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

其中: e 为抗体相似度评价参数; $S_{v,s}$ 表示抗体 v,s 之间的亲和度; $H_{v,s}$ 表示两个抗体是否相似, 是, 取 1, 否, 取 0; N 为抗体总数。

1.3.3 抗体的期望繁殖度

在抗体群中, 每个抗体的期望繁殖概率由抗体与抗原之间的亲和度和抗体浓度两部分共同决定, 这是与遗传算法的主要区别, 即

$$P_v = A_v / C_v \quad (6)$$

式中: A_v 表示抗体和抗原之间的亲和度; C_v 为抗体浓度。

由式 (6) 可见, 抗体与抗原亲和度 A_v 越大, 则期望繁殖率 P_v 越大, 被选择作为交叉、变异个体的可能性越大; 抗体浓度 C_v 越大, 则期望繁殖率 P_v 越小, 被选择作为交叉、变异个体的可能性越小。这样既促进了与抗原亲和度高的抗体, 同时也抑制了浓度高的抗体, 从而确保了抗体的多样性。

免疫算法在抑制高浓度抗体时, 与抗原亲和度较高的抗体可能会因为其浓度高而受到抑制, 从而导致已求得的最优解丢失, 因此采用优秀个体保留策略, 增加记忆库, 在每次更新记忆库时, 将抗原亲和度最高的若干个体存入记忆库。同时记忆库的创建也避免了交叉、变异过程使群体退化的发生。

1.4 免疫操作

免疫操作过程和遗传算法的类似, 包括选择、交叉和变异操作过程。选择操作按照轮盘赌选择机制^[13]进行选择操作, 个体被选择的概率与式 (6) 计算出的期望繁殖概率 P_v 正相关。选用单点交叉法进行交叉操作, 交叉概率 P_c 取 0.8。随机选择变异位进行变异, 变异概率 P_m 取 0.05, 变异为新解的产生提供机会, 将 0 变为 1 或者将 1 变为 0。

1.5 免疫算法实现配电网故障定位的步骤

(1) 参数设置。根据配电网的规模设定种群规模 N_0 ; 记忆细胞数量 N_m , 即每次迭代后保留最优抗体的数目; 最大迭代次数 M ; 根据配电网的拓扑结构确定抗体编码长度 L ; 交叉概率 P_c ; 变异概率 P_m ; 抗体相似度评价参数 e ; 迭代寻优代数计数 $T=1$ 。

(2) 初始化。生成规模为 N_0+N_m 的初始抗体群。因为最初记忆细胞为空, 需随机产生, 所以初始抗体群中包括记忆细胞。

(3) 对上述群体的各个抗体进行评价。计算抗体 v 与抗原之间的亲和度 A_v , 抗体 v 与抗体 s 之间的亲

和度 $S_{v,s}$, 进而计算抗体浓度 C_v 和期望繁殖率 P_v 。

(4) 向记忆细胞分化。将与抗原亲和度最好的 N_m 个抗体加入记忆细胞。

(5) 形成父代群体。将抗体群按照抗体的期望繁殖率进行降序排序, 并取前 N_0 个抗体形成父代群体。

(6) 判断是否满足结束条件, 是则结束, 输出最优抗体, 定位发生故障的区段; 否则继续下一步操作。

(7) 群体更新。基于步骤 (5) 产生的父代抗体群进行选择、交叉和变异操作得到新群体, 再从记忆库中取的记忆抗体, 共同构成新一代抗体群。

(8) 转到步骤 (3), 且 $T=T+1$ 。

2 闭环设计开环运行的配电网的故障定位

2.1 基于区域划分的多电源开环运行配电网的故障定位

文献[12-14]中阐述了单电源辐射状配电网和多电源并列运行配电网的故障定位方法。对于多电源开环运行的配电网, 文献[17]提出采用区域划分的思想, 其具体方法为: 以配电网中各联络开关为界限, 以变电站变压器低压侧开关(母线进线开关)为一个独立配电区域的标志, 将配电网划为多个单电源辐射型的配电区域, 然后要分别对划分后的每个配电区域进行故障定位, 对未发生故障的区域进行定位无疑降低了故障搜索速度。所以本文提出根据变电站变压器低压侧开关是否上报故障信息来判断是否对该区域进行故障定位, 提高了算法搜索效率。

例如图 1 所示的多电源开环运行的配电网, 包含两个独立的配电区域: Sub1 供电区及 Sub2 供电区, 其中 S1、S2 分别为变电站 Sub1、Sub2 的变压器低压侧开关, A、B、E、F 为馈线分段开关、C 为馈线联络开关, D1、D2、D3、D4、D5、D6 表示不同的馈线区段。该开环运行的配电网故障定位评价函数可表示为: $F_{it}(S_B) = K_{S1}F_{S1}(S_B) + K_{S2}F_{S2}(S_B)$, 其中 $F_{S1}(S_B)$, $F_{S2}(S_B)$ 为独立配电区域 Sub1 供电区、Sub2 供电区的评价函数, 由 2.3.1 节得到; K_{S1} , K_{S2} 的值由变电站低压侧开关的故障信息决定, 当开关 S1 上报故障信息时, $K_{S1}=1$, 否则 $K_{S1}=0$; 当开关 S2 上报故障信息时, $K_{S2}=1$, 否则 $K_{S2}=0$ 。

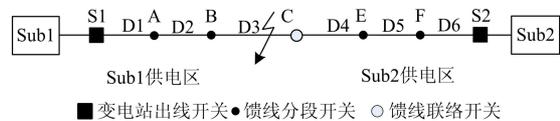


图 1 双电源开环运行的配电网

Fig. 1 An open-loop operating distribution network with double power sources

多源、单一故障：当馈线区段 D3 发生故障时，首先由主站根据收到的变压器低压侧开关 S1、S2 上报的故障信息判断是否要对该配电区域应用定位算法进行故障定位，只有开关 S1 上报故障信息， $K_{S1}=1$ ，开环运行网络故障定位的评价函数为： $F_{it}(S_B)=F_{S1}(S_B)$ ，因此，只需要对 Sub1 供电的配电区域应用定位算法进行故障定位，提高了故障定位效率。

多源、多重故障：当馈线区段 D3、D5 发生多重故障时，首先由主站根据收到的变压器低压侧开关 S1、S2 上报的故障信息判断是否要对该配电区域应用定位算法进行故障定位，开关 S1、S2 同时上报故障信息， $K_{S1}=K_{S2}=1$ ，该开环运行网络故障定位的评价函数为： $F_{it}(S_B)=F_{S1}(S_B)+F_{S2}(S_B)$ ，同时对两个供电区域应用定位算法进行故障定位。

无疑，这种基于区域划分的配电网故障定位方法降低了 m 个独立配电区域发生 n 重故障时的故障处理速度 ($n < m$)。

2.2 变电站低压侧开关信息畸变时故障处理过程

通常情况下，变电站低压侧开关故障信息漏报、误报的可能性较小，若由于偶然因素在故障发生时该开关的故障信息发生漏报、误报现象，则在架空线路重合闸过程中或者架空线路及电缆线路故障恢复过程中再次发生漏报、误报的可能性很小，除非是信息采集设备发生故障，而这样的故障在检修时很容易检测出来并可得到及时维修，因此可以利用架空线路重合闸过程中或者架空线路及电缆线路故障恢复过程中的故障信息进行再次故障定位实现变电站低压侧开关信息畸变时的容错故障定位^[18]。

3 算例分析

3.1 信息完备情况下单一故障定位分析

为便于读者更好地理解基于免疫算法的配电网故障定位过程，本节以图 2 所示的配电网馈线区段 4 发生故障为例，详细阐述免疫算法定位故障区段的过程。

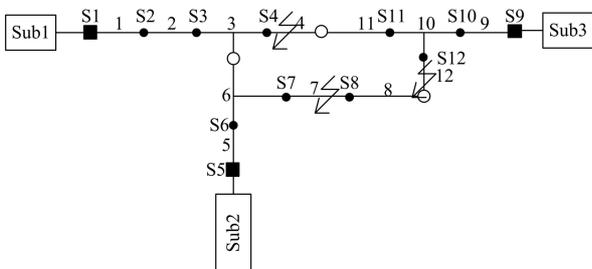


图 2 三电源开环运行的配电网

Fig. 2 An open-loop operating distribution network with three power sources

如图 2 所示的闭环设计、开环运行的配电网中，S1、S5、S9 为变电站变压器低压侧开关，S2、S3、S4、S6、S7、S8、S10、S11、S12 为馈线分段开关，数字 1-12 代表馈线区段，方块代表断路器，实心圆圈代表负荷开关，空心圆圈代表联络开关。

图 2 所示配电网区段 4 故障后，各开关上报故障信息序列按照开关顺序 S1~S12 排列为 [1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0]。

首先馈线自动化系统根据变电站变压器低压侧开关 S1、S5、S9 的故障信息，判断故障发生在 Sub1 的供电区域内，然后仅调用 Sub1 区域的故障定位程序。

因为 Sub1 的供电区域内仅有四段馈线区段，所以初始抗体编码共四位。免疫算法参数设置为：种群规模 $N_0=10$ ，记忆细胞数量 $N_m=2$ ，交叉概率： $P_c=0.8$ ，变异概率： $P_m=0.05$ ，抗体相似度评价参数： $e=0.9$ ，最大进化代数不设置，将每次迭代的结果都给出，发现经交叉变异一次后，最优抗体出现，故障区段定位结果完成。

随机形成的初始抗体编码，抗体与抗原的亲合度 A_v ，抗体浓度 C_v ，及其个体繁殖率 F_v 见表 1。

表 1 初始抗体及其参数

Table 1 The initial antibodies and their parameters

抗体数目 (N_m+N_0)	初始抗体(S_B)	$F_{it}(S_B)$	A_v	C_v	F_v
1	0 0 1 1	1	1	0.167	6
2	1 0 1 0	2	0.5	0.250	2
3	1 0 1 1	1.5	0.667	0.083	8
4	1 0 1 0	2	0.5	0.250	2
5	0 0 1 1	1	1	0.167	6
6	1 1 1 1	2	0.5	0.167	3
7	1 1 1 1	2	0.5	0.167	3
8	1 1 0 0	3	0.333	0.083	4
9	0 1 0 0	2.5	0.4	0.083	4.8
10	1 0 1 0	2	0.5	0.250	2
11	1 1 1 0	2.5	0.4	0.083	4.8
12	1 1 0 1	1.5	0.667	0.083	8

在初始抗体群中选择抗体与抗原亲合度最高的两个抗体，加入记忆细胞。然后，在初始抗体群中按照轮盘赌的方法选择 10 个抗体形成父代群体，经交叉、变异后得到第二代抗体的前十个抗体；然后将记忆细胞中的抗体加入第二代抗体。

第二代抗体编码，抗体与抗原的亲合度 A_v ，抗体浓度 C_v 及其个体繁殖率 F_v 见表 2。第二代抗体群中出现最优抗体，即抗体 10，故障区段定位完成，

解码给出该变电站供电区域的故障区段定位结果[0 0 0 1], 变电站 2、3 供电区域内无故障, 整个配电网的故障区段定位结果是[0 0 0 1 0 0 0 0 0 0]。

表 2 第二代抗体及其参数

Table 2 The second generation antibodies and their parameters

抗体数目 (N_m+N_0)	第二代抗体(S_B)	$F_{ii}(S_B)$	A_v	C_v	F_v
1	1 1 1 1	2	0.5	0.167	3
2	1 0 1 1	1.5	0.667	0.167	4
3	1 1 0 1	1.5	0.667	0.167	4
4	1 1 0 1	1.5	0.667	0.167	4
5	1 1 1 1	2	0.5	0.167	3
6	0 0 1 1	1	1	0.25	4
7	1 0 0 0	3.5	0.286	0.083	3.43
8	0 1 1 0	2	0.5	0.083	6
9	1 0 1 1	1.5	0.667	0.167	4
10	0 0 0 1	0.5	2	0.083	24
11	0 0 1 1	1	1	0.25	4
12	0 0 1 1	1	1	0.25	4

3.2 计及信息缺失及多重故障的故障定位结果

3.1 节详细阐述了图 2 所示配电网馈线区段 4 发生单一故障, 故障信息完备时基于免疫算法的故障定位过程, 本节将针对信息畸变、多重故障等情况进一步作故障定位仿真测试, 求出免疫算法实现故障定位所需平均迭代次数, 分析免疫算法用于配电网容错故障定位的可行性。

对图 2 针对以下故障情况进行仿真, 连续运行程序 20 次, 计算免疫算法实现故障定位所需平均迭代次数。平均迭代次数可通过下述方法计算: 每次程序运行后, 记录最优结果首次出现时免疫算法已迭代的次数 M , 然后将 20 次的记录结果求平均值, 即可得到免疫算法实现故障定位所需平均迭代次数。

单一故障, 故障信息完备: 区段 4 发生故障, 故障信息完备, 馈线终端上报的故障信息为: [1 1 1 1 0 0 0 0 0 0];

单一故障, 故障信息漏报: 区段 4 发生故障, 馈线开关 S2 漏报, 馈线终端上报的故障信息为: [1 0 1 1 0 0 0 0 0 0];

多重故障仿真, 故障信息完备: 区段 7、12 发生故障, 故障信息完备, 馈线终端上报的故障信息为: [0 0 0 0 1 1 1 0 1 1 1];

多重故障仿真, 故障信息误报: 区段 7、12 发生故障, 馈线开关 S3 误报, 馈线终端上报的故障

信息为: [0 0 1 0 1 1 1 0 1 1 1]。

测试结果如表 3 所示, 仿真结果表明免疫算法经平均少于六次迭代即可给出正确的故障区段, 快速实现了配电网的容错故障定位。

表 3 免疫算法有效性仿真结果

Table 3 Simulation result for immune algorithm effectiveness

故障区段	馈线终端 上报信息	信息 畸变	馈线区段 状态	平均迭 代次数
4	1 1 1 1 0 0 0 0 0 0	无	0 0 0 1 0 0 0 0	3.10
	0 0		0 0 0 0	
4	1 0 1 1 0 0 0 0 0 0	S2	0 0 0 1 0 0 0 0	3.85
	0 0	漏报	0 0 0 0	
7、12	0 0 0 0 1 1 1 0 1 1	无	0 0 0 0 0 0 1 0	5.20
	1 1		0 0 0 1	
7、12	0 0 1 0 1 1 1 0 1 1	S3	0 0 0 0 0 0 1 0	4.50
	1 1	误报	0 0 0 1	

3.3 免疫算法与遗传算法性能对比

为了验证免疫算法的优越性, 将免疫算法与应用较多的遗传算法比较, 用 Matlab 编制了基于免疫算法和遗传算法的配电网故障区段定位程序, 在相同的算法参数设置下, 对图 2 所示的配电网, 按表 4 中的故障情况及收敛条件设置, 应用免疫算法和遗传算法进行仿真实现故障定位。

表 4 免疫、遗传算法性能仿真对比

Table 4 Comparison of simulation result between immune algorithm and genetic algorithm

故障区段	信息畸变	收敛条件	正确次数 (共运行 20 次)	
			免疫算法	遗传算法
4	无	迭代次数 10	19	15
		迭代次数 10 或 3 次最优解无更改	19	9
		迭代次数 10	18	17
4	有 (S2)	迭代次数 10 或 3 次最优解无更改	17	7
		迭代次数 10	18	4
		迭代次数 10 或 3 次最优解无更改	16	1
7、12	无	迭代次数 10	17	5
		迭代次数 10 或 3 次最优解无更改	16	2
		迭代次数 10	17	5
7、12	有 (S3)	迭代次数 10 或 3 次最优解无更改	16	2

免疫算法参数设置: 种群规模 $N_0=10$, 记忆细胞数量 $N_m=2$, 最大进化代数 $M=10$, 交叉概率: $P_c=0.8$, 变异概率: $P_m=0.05$, 抗体相似度评价参数: $e=0.9$ 。

遗传算法参数设置：种群规模 $N_0=10$ ，最大进化代数 $M=10$ ，交叉概率： $P_c=0.8$ ，变异概率： $P_m=0.05$ 。

由表 4 中免疫算法和遗传算法实现正确定位的次数对比知，相同设置的条件下，免疫算法进行定位收敛的次数均多于遗传算法，所以免疫算法实现正确定位的可靠性高于遗传算法；同时，由表 4 中可以看出，对于同一种故障，在两种收敛条件下，免疫算法定位正确的次数基本一样；而遗传算法在收敛条件设置为迭代次数 10 或 3 次最优解无更改时定位正确的次数明显少于在收敛条件设置为迭代次数 10 时，因此免疫算法在避免算法过早产生局部最优解上的性能要优于遗传算法。

另外，以含有 32 段馈线区段的规模较大配电网为例（见图 3），对免疫算法及遗传算法在相同的参数设置下进行仿真测试对比，测试结果见表 5。

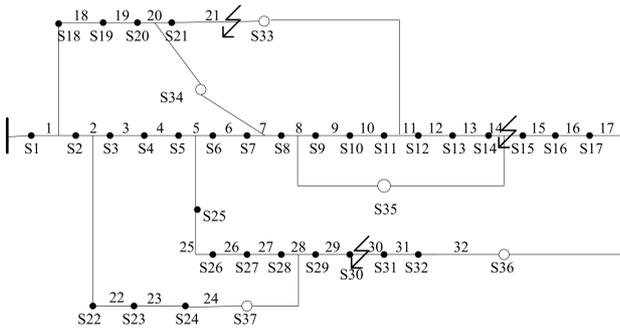


图 3 32 区段配电网

Fig. 3 A distribution system with 32 feeder segments

免疫算法参数设置：种群规模 $N_0=100$ ，记忆细胞数量 $N_m=10$ ，最大进化代数 $M=50$ ，交叉概率： $P_c=0.8$ ，变异概率： $P_m=0.05$ ，抗体相似度评价参数： $e=0.9$ 。

遗传算法参数设置：种群规模 $N_0=100$ ，最大进化代数 $M=50$ ，交叉概率： $P_c=0.8$ ，变异概率： $P_m=0.05$ 。

由表 5 中的数据知，随之配电网规模的增大，

表 5 免疫、遗传算法性能仿真对比

Table 5 Comparison of simulation result between immune algorithm and genetic algorithm

故障 区段	信息 畸变	正确次数（共运行 50 次）	
		免疫算法	遗传算法
21	无	47	0
21	有 (S8)	45	0
14、30	无	47	0
14、30	有 (S3)	43	0

免疫算法的优越性更加明显，遗传算法基本上不能正确定位故障区段，但免疫算法在相同算法设置的情况下，仍可以正确定位故障。

4 结论

本文针对闭环设计开环运行的配电网，结合区域划分思想，提出根据区域内变电站变压器低压侧开关的故障信息判断该配电区域内是否有故障发生，进而应用免疫算法实现配电网的故障定位和隔离，与遗传算法相比免疫算法具有收敛速度快，寻优能力强的优点。免疫算法根据个体的亲和度与浓度选择父代个体的方法避免了算法快速陷入局部最优；而且算法增加记忆功能，避免了交叉、变异过程引起的种群退化，具有良好的应用前景。免疫算法中依据个体的亲和度和浓度选择父代个体的思想可以借鉴到其他人工智能算法中，避免算法快速局部收敛。

参考文献

- [1] 罗梅, 杨洪耕. 配电网故障定位的一种改进通用矩阵算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 33-37. LUO Mei, YANG Hong-geng. Universal matrix algorithm for fault location in distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(5): 33-37.
- [2] 刘健, 倪建立, 杜宇. 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(1): 31-33. LIU Jian, NI Jian-li, DU Yu. A unified matrix algorithm for fault section detection and isolation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(1): 31-33.
- [3] 蒋秀洁, 熊信银, 吴耀武, 等. 改进矩阵算法及其在配电网故障定位中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 60-63. JIANG Xiu-jie, XIONG Xin-yin, WU Yao-wu, et al. Improved matrix algorithm and its application in fault location of distribution network[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 60-63.
- [4] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障定位的一种新算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14): 48-50. WEI Zhi-nong, HE Ye, ZHENG Yu-ping. A new algorithm for fault location in distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(14): 48-50.
- [5] 武娜, 焦彦军. 基于模拟植物生长算法的配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 23-28. WU Na, JIAO Yan-jun. Fault location of distribution

- network based on plant growth simulation algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 23-28.
- [6] 李超文, 何正友, 张海平, 等. 基于二进制粒子群算法的辐射状配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(7): 35-39.
LI Chao-wen, HE Zheng-you, ZHANG Hai-ping, et al. Fault location for radialized distribution networks based on BPSO algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(7): 35-39.
- [7] 周濂, 郑柏林, 廖瑞金, 等. 基于粒子群和差分进化算法的含分布式电源配电网故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 33-37.
ZHOU Quan, ZHENG Bo-lin, LIAO Rui-jin, et al. Fault-section location for distribution networks with DG based on a hybrid algorithm of particle swarm optimization and differential evolution[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 33-37.
- [8] 翁蓝天, 刘开培, 刘晓莉, 等. 复杂配电网故障定位的链表法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 190-196.
WENG Lan-tian, LIU Kai-pei, LIU Xiao-li, et al. Chain table algorithm for fault location of complicated distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 190-196.
- [9] 王英英, 罗毅, 涂光瑜. 基于贝叶斯公式的似然比形式的配电网故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 54-57.
WANG Ying-ying, LUO Yi, TU Guang-yu. Fault location based on bayes probability likelihood ratio for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 54-57.
- [10] 徐玉琴, 张丽, 王增平, 等. 基于多智能体遗传算法并考虑分布式电源的配电网大面积断电供电恢复算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 190-196.
XU Yu-qin, ZHANG Li, WANG Zeng-ping, et al. Algorithm of service restoration for large area blackout in distribution network with distributed generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 190-196.
- [11] 张浩, 和敬涵, 薄志谦, 等. 基于动态规划算法的故障恢复重构[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 162-167.
ZHANG Hao, HE Jing-han, BO Zhi-qian, et al. Service restoration based on dynamic programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 162-167.
- [12] 杜红卫, 孙雅明, 刘宏靖, 等. 基于遗传算法的配电网故障定位与隔离[J]. 电网技术, 2000, 24(5): 52-55.
DU Hong-wei, SUN Ya-ming, LIU Hong-jing, et al. Fault section diagnosis and isolation of distribution networks based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2000, 24(5): 52-55.
- [13] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障区间定位的高级遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 127-130.
WEI Zhi-nong, HE Hua, ZHENG Yu-ping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 127-130.
- [14] 陈碧云, 韦化, 钟志东. 基于遗传算法的配电网故障定位系统[J]. 广西电力, 2002(4): 1-3.
CHEN Bi-yun, WEI Hua, ZHONG Zhi-dong. Fault location system of distribution network based on genetic algorithm[J]. Guangxi Electric Power, 2002(4): 1-3.
- [15] 罗小平. 人工免疫遗传学习算法及其工程应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
LUO Xiao-ping. The research on artificial immune genetic learning algorithm and its application in engineering[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [16] 史峰, 王辉, 郁磊, 等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
SHI Feng, WANG Hui, YU Lei, et al. 30 cases analysis of MATLAB intelligent algorithm[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2011.
- [17] 郭壮志, 陈波, 刘灿萍, 等. 基于遗传算法的配电网故障定位[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 88-92.
GUO Zhuang-zhi, CHEN Bo, LIU Can-ping, et al. Fault location of distribution network based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 88-92.
- [18] 刘健, 董新洲, 陈星莺, 等. 配电网容错故障处理关键技术研究[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 253-257.
LIU Jian, DONG Xin-zhou, CHEN Xing-ying, et al. Robust fault isolation and restoration for distribution systems[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 253-257.

收稿日期: 2013-04-20; 修回日期: 2013-06-28

作者简介:

郑涛(1975-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail:zhengtao_sf@126.com

潘玉美(1989-), 女, 硕士, 研究方向为配电自动化;

郭昆亚(1967-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化。