

考虑停电损失的配电网网架规划的免疫算法

牛雪媛¹, 陈根永¹, 谢志棠², 刘向实³

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 香港理工大学电机系, 中国 香港;

3. 驻马店市电业局规划部, 河南 驻马店 463000)

摘要: 基于人工免疫算法借鉴生物免疫系统中抗体多样性的保持机制和基于抗体浓度的调节机制, 同时又具有一般进化算法的随机全局搜索能力, 适合求解多目标问题的特点, 综合考虑配电网供电可靠性对用户侧的经济影响, 提出了应用免疫算法求解考虑用户侧停电损失的配电网网架规划问题的优化方法。针对配电网辐射性的要求, 根据图论知识, 采用将新增加负荷节点作为染色体基因座的编码方法, 保证了生成解的可行性, 避免了辐射性检查, 提高了计算速度。最后通过实际算例说明了这种方法的有效性。

关键词: 配电网网架规划; 可靠性; 人工免疫算法; 缺电成本; 编码策略

中图分类号: TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)07-0010-05

0 引言

由于配电网的多辐射、弱环网结构特点, 使得网络运行的可靠性对元件故障比较敏感, 因此提高配电系统可靠性, 改善供电质量有着十分重要的意义。但是, 当供电可靠性达到一定水平后, 为进一步改善供电可靠性而增加的费用将急剧增加, 甚至超过可靠性提高所带来的经济效益, 所以, 综合考虑各相关因素, 寻求总体费用最小点, 是配电网网架规划问题研究的关键^[1]。

常规的数学优化方法(除少数线性规划模型外)很难在合理的时间内得到问题的最优解或常常陷入局部最优。现代启发式算法, 如遗传算法虽然有可能求得全局最优解, 但其耗时较长。为此许多学者提出了一些改进算法, 引入了动态策略和自适应策略以改善遗传算法, 如分层遗传算法、混合遗传算法等^[2]。

人工免疫算法模拟人体免疫系统, 在遗传算法的基础上引入了记忆细胞及抗体间亲和性的计算, 前者使计算从一个较高的起点开始, 提高了搜索速度; 后者保证了抗体的多样性, 从而保证了解的全局最优性。本文应用人工免疫算法实现综合考虑用户侧停电损失、投资及运行费用的配电网网架规划。针对配电网的辐射特点, 应用图论知识, 采取以新增节点为染色体的基因座的编码方法, 避免了辐射性检查, 提高了进化速度。

基金项目: 河南省科技攻关项目资助(0324250075)

1 网架规划的数学模型

本文以用户侧停电损失与新增线路投资的年等值费用及运行费用之和最小为目标函数; 以线路不过负荷为约束条件建模; 在计算停电损失时, 由于配电网的辐射性, 各个负荷点的可靠性计算考虑了系统单元件故障; 不考虑联络线及联络开关等的作用。

目标函数:

$$\min Z = [\sum_{k \in M} C_k X_k + \sum_{k \in M} C_L r_k P_k^2] + C \quad (1)$$

其中: M 为规划小区可行路径(支路)集合; X_k 为 0-1 变量, 当规划中存在支路 k 时为 1, 否则为 0; C_k 为在支路 k 上建 1 回新线的费用(折合成到年费用); r_k 为支路 k 上建 1 回新线后的电阻; P_k 为支路 k 上建 1 回新线后的潮流^[3]; C_L 为单位功率损耗的年运行费用; C 指由可靠性问题而造成的用户停电损失与供电企业由于少卖电而造成的损失之和, 停电损失可表述为^[4]:

$$C = \sum_{i \in N} \sum_{j \in S} C_j EENS_{ij} \quad (2)$$

$$EENS_{ij} = 8760(1 - R_i) Load_{ij} \quad (3)$$

其中: N 为规划小区内所有节点; S 为所有负荷类型; C_j 为 j 类负荷的单位缺电成本与单位电价之和, 单位为元/kWh, 与停电时间及停电频率有关; $EENS_{ij}$ 为节点 i 的第 j 类负荷由于配电网故障造成的电力不足的期望值, 单位为 kWh。8760 为年小时数; R_i 是负荷点的可靠率; $Load_{ij}$ 为节点的第 j 类负荷大小, 单位为 kW。

2 配电网网架规划中的免疫算法

2.1 免疫算法概述

免疫是生物体对外来大分子的一种反应,是生物体辨识外来原生质与自身原生质,对病菌等有害异物产生抗体的系统,免疫系统具有自我学习和记忆特性,对同一抗原入侵的抵抗反应具有增强的正反馈特性^[5]。

人工免疫算法模拟了人体免疫系统淋巴细胞的免疫过程,在一般遗传算法的基础之上增加了抗体间亲和性的计算,保证了抗体的多样性,从而保证了算法的全局最优性。抗体间的亲和性是指抗体间的相似程度,相似程度越大其亲和性也越大。本文以抗体的适应度的接近程度作为抗体相似程度的判据,抗体适应度越接近其亲和性也越大;免疫算法还在遗传算法的基础之上增加了抗原记忆识别功能,再次计算同一问题时,计算以记忆细胞为基础,在前次计算的结果上进行,提高了搜索速度。记忆细胞是指系统在完成1个问题的求解后,所保留下来的求解过程中产生的较优抗体。记忆细胞存储在记忆细胞库中^[6]。

2.2 配电网网架规划的免疫算法

在考虑停电损失的配电网网架规划的免疫算法中,抗原对应于目标函数和约束条件,抗体对应于目标函数的可能解,抗体对抗原的适应度取由式(1)计算出的综合费用与由于违反约束条件而增加的惩罚费用之和的倒数。计算流程如下:

1) 初始化。输入目标函数和约束条件作为免疫算法的抗原,并将下列参数初始化,最大进化次数 $Maxgen$, 变异率 PM , 交叉率 PC , 交叉变异抗体数量 N , 随机产生抗体数量 P , 记忆细胞库中的记忆细胞数为 Mem , 浓度阈值 等;

2) 产生初始抗体。初始抗体的个数同交叉变异产生的抗体个数为 N 。根据问题的参数特征(节点数、回路数、初始可行网络), 识别有无相应的记忆细胞信息, 若有, 则刺激相应记忆细胞, 产生初始抗体, 不足部分的抗体由系统随机产生; 如果没有相应的记忆细胞信息, 则由系统随机产生 N 个初始抗体;

3) 抗体识别抗原。计算抗体对抗原的适应度;

4) 出口条件判断。本文以限定迭代次数或在连续几次迭代中的最好解都不能改善作为评价条件; 若满足条件则输出最终优化结果, 否则转向 5);

5) $N + P$ 个新抗体的产生。本文通过下面 2 个途径产生新的抗体, 第 1 个途径基于遗传操作, 对随机产生的交叉点进行多点交叉, 对随机产生的变

异位进行基本位变异产生规模为 N 的新抗体群体; 第 2 是随机产生 P 个新抗体, 目的在于保持进化过程中抗体的多样性, 提高解的全局搜索能力;

6) 基于浓度的群体更新。假设 D 为抗体的浓度, $1, 2$ 为 01 间的可调参数, $N + P$ 为抗体总数, $Maxfitness$ 为抗体的最大适应度, $Fitness(i)$ 为第 i 个抗体的适应度, T 为较优抗体的阈值, $Sgn(x)$ 为符号函数, T 为满足约束条件 $1 \cdot MaxFitness - Fitness(i) > T \cdot MaxFitness$ 的抗体的个数, 则有:

$$D = \frac{T}{N + P} \quad (4)$$

$$Fitness(i) = Fitness(i) + (1 - D) [1 + Sgn(-D)$$

$$\frac{Fitness(i)}{MaxFitness} - Fitness(i)] \quad (5)$$

在进化过程中, 为了保持抗体的多样性, 避免陷入局部最优, 体现各抗体间的相互促进和抑制作用, 采用式(4)来调整抗体的浓度 D , 修正各抗体的适应度, 并根据调整后的抗体适应度交叉、变异产生下一代 N 个个体, 实现抗体的更新。

7) 记忆细胞库的更新。在求解过程中, 每一代抗体群体更新时, 将适应度最好的个抗体选入记忆细胞库中, 每选入记忆抗体时, 若记忆细胞库已满额, 则替换掉适应度最差的抗体, 同时应保证记忆细胞库的多样性。

3 自动产生可行方案的编码策略

在产生初始抗体的过程中, 常规的二进制编码策略都是将新建线路的投运与否作为优化变量, 线路投运为 1, 否则为 0, 随机产生初始解, 但其解可行性可能不足千分之一^[7]; 其它基于图论的知识产生生成树的算法也存在计算量过大的问题。本文采用一种基于图论的自动生成可行方案的编码方法。

根据辐射型网络中, 每一个节点都只有 1 个父节点, 即只有 1 个供电节点的特性, 进行抗体编码。在配电网网架规划中, 从电源点到负荷点对应于树的根节点和子节点, 并采用广度优先的搜索策略, 将网络分层。

1) 编码方式

就免疫算法而言, 染色体(抗体)是遗传物质的主要载体, 由多个基因组成。基因座是遗传基因在染色体(抗体)中所占据的位置; 同一基因座可能有的全部基因称为等位基因。

在配电网网架规划中, 利用其辐射网络的特性,

定义所有新增的负荷节点作为染色体的基因座,定义与该节点直接相连的可行新增支路的另一个节点的节点编号的集合作为等位基因,采用整数编码的方式。

2) 保证方案可行性的算法

简化图生成:规划网络中新增线路可分为 2 类,一类是辐射线路,另一类是与其他线路构成回路的线路。与辐射边相连的节点只有唯一 1 个确定的父节点,因此,在计算过程中这些节点不再参与优化规划,可以将其从图中删除以简化计算,经过删除简化后的图称为简化图。简化图中的负荷节点组设为节点组 A ,设 A 包含 L 个节点,将 A 作为抗体的基因座,抗体长度为 L 。简化图的生成减少了抗体的长度,简化了计算。

建立 1 个数据结构:定义节点 A 组中的每一个节点 i 所对应的相邻节点组 $Node_i$ 、相邻线路组 $Line_i$ 、是否有源、相邻节点个数 $Leng_i$ 作为该数据结构的数据项,并要求相邻节点组要与相邻线路组一一对应;初始化过程中设所有新增负荷节点均无源,所有现有节点及新增源点均为有源节点。

产生初始可行解:从 1 到 L 对每一个节点 i 产生 1 个随机数 $j(j \in [0, Leng_i - 1])$,根据 j 找到 $Node_i[j]$;判断 $Node_i[j]$ 是否有源, $Node_i[j]$ 如果有源,则将节点 i 设为有源节点;重复以上步骤,直至所有节点均有源,由此产生 1 个可行解;重复以上步骤直至初始解的个数达到预定个数 N 为止。

对计算过程中产生的不可行解的修正:在进行交叉、变异的过程中,可能产生的不可行解有 2 种形式,一种是产生回路,另一种是产生两节点互为父节点的情况。对于前者,设回路 L_1 中有 N_1 个节点, N_1 条线路;而 L_1 中的 N_1 个节点必然都是节点组 A 中的节点,因此,如果从 L_1 中任取 1 个节点改变其父节点,使其成为有源节点,则 L_1 中的 N_1 所有节点都变为有源节点,消除了回路,使其成为可行解。对于后者,线路 L_2 中包含 N_2 个节点和 $N_2 - 1$ 条线路,如果从 2 个互为父节点的节点中任取 1 个,使之成为有源节点,即可保证解的可行性。

4 算例及结论

4.1 算例

本文采用文献[8]中的算例,该算例为 1 个具有 50 个节点、81 条可行路径的新建小区的 10 kV 配电网的规划。可行路径、节点及文献[8]的优化结果如图 1 所示;各支路和节点数据略。

本文在计算中,最大进化次数 $Maxgen$ 取 200,变异率 PM 取 0.03,交叉率 PC 取 0.4,交叉变异抗体数量 N 取 100,随机产生抗体数量 P 取 30,记忆细胞数 Mem 取 50,浓度阈值取 0.6。停电损失可根据优化结果按照连接关系求出各个节点的父节点,采用递归的方法求出各个负荷点的可靠性 R_i ,根据负荷预测的结果,利用式(3)求出其电力不足的期望值 $EENS_{ij}$;然后依据该地区各类负荷的每度电所创造的经济效益求出其停电损失 C ,优化结果如图 2 所示。

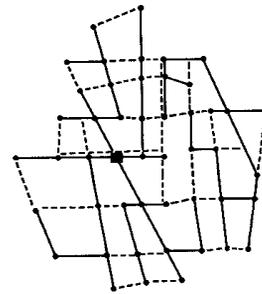


图 1 文献[8]的网络规划结果

Fig. 1 Optimum planing of the network mentioned in Ref. [8]

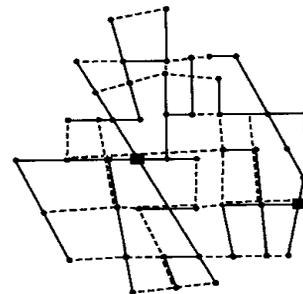


图 2 免疫算法的网络规划结果

Fig. 2 Optimum planing of the network with immune algorithm

与文献[8]的规划结果相比,应用免疫算法求解考虑停电损失的配电网网架规划结果在结构上更加合理,整个系统的可靠性为 99.861%,提高了 0.13 个百分点。由于缩小了搜索空间,使计算比采用同样模型和参数但编码方式不同的算法的计算时间减少了近 1/2,更适合求解大规模配电网网架规划问题。

4.2 结论

本文以计及停电损失的年综合费用最小为目标,进行配电网的规划,体现了经济性与可靠性的结合,使优化结果更为合理;与采用传统编码的算法相比,应用免疫算法和自动产生可行解的编码策略

求解该模型,缩小了搜索空间,提高了计算速度,算例表明了该方法的可行性。

参考文献:

- [1] 郭永基(GUO Yong-ji). 电力系统可靠性原理和应用(The Theory and Application of Reliability in Power System) [M]. 北京:清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press), 1986.
- [2] 王小平,曹立明(WANG Xiao-ping, CAO Li-ming). 遗传算法理论、应用与软件实现(The Theory and Application of Genetic Algorithm and Its Realization by Software) [M]. 西安:西安交通大学出版社(Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press), 2002.
- [3] 孙洪波(SUN Hong-bo). 电力网络规划(Power Network Planning) [M]. 重庆:重庆大学出版社(Chongqing: Chongqing University Press), 1996.
- [4] 曹世光,杨以涵(CAO Shi-guang, YANG Yi-han). 缺电成本及其估计方法(Power Outage Cost and Its Estimation) [J]. 电网技术(Power System Technology), 1996,20(11):72-73.
- [5] de Castr L N, von Zuben F J. An Evolutionary Network for Data Clustering[J]. Proc of IEEE, 2002,(9):84-89.
- [6] 刘克胜,曹先彬,等(LIU Ke-sheng, CAO Xian-bin, et al). 基于免疫算法的 TSP 问题求解(Solving TSP Based on Immune Algorithm) [J]. 计算机工程(Computer Engineering), 2000,26(1):1-2,16.
- [7] 王天华,王平洋,范天明(WANG Tian-hua, WANG Ping-yang, FAN Tian-ming). 用演化算法求解多阶段配电网规划问题(Optional Multi-stage Distribution Planning Using Evolutionary Algorithm) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2000,20(3):34-38.
- [8] 王金凤(WANG Jin-feng). 基于 GIS 的配电网优化规划研究(Study of Distribution Network Optimal Planning Based on GIS, Thesis) [D]. 郑州:郑州大学(Zhengzhou: Zhengzhou University), 2002.

收稿日期: 2003-10-23; 修回日期: 2004-01-12

作者简介:

牛雪媛(1977-),女,硕士研究生,研究方向为配电网可靠性及电力系统规划

陈根永(1964-),男,副教授,主要从事电力系统继电保护和电力规划方面的研究工作;

谢志棠(1952-),男,博士生导师,副教授,主要从事电力系统分析和稳定方面的研究;

Artificial immune algorithm for distribution network structure planning with power outage cost

NIU Xue-yuan¹, CHEN Gen-yong¹, TSE Chi-tong², LIU Xiang-shi³

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

2. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China; 3. Zhumadian Power Bureau, Zhumadian 463000, China)

Abstract: The artificial immune algorithm (AIA) draws into the immune diversity and antibody's density mechanism to maintain the individual's diversity and remains evolution algorithm's global stochastic searching ability, so it's adopted to solve multi-objective problems. Considering the influence of distribution system reliability on economic value on consumer side, a new mathematical model with comprehensive consideration of investment, operation and loss of the consumer caused by power failure is presented in this paper. AIA is applied to distribution network structure planning with such a mathematical model. Also, a novel chromosome coding strategy based on graph theory is proposed to ensure that all the randomly generated chromosomes are feasible. The effectiveness of the model and algorithm is verified with calculations.

This project is supported by Henan Province Technologies R & D Program (No. 0324250075).

Key words: distribution network structure planning; reliability; artificial immune algorithm; power outage cost; coding strategy

2020 年全球能源需求将增长 50 %

日本能源经济研究所研究报告称,由于亚洲经济发展增加了对电力的需求以及中国汽车业发展带来的汽油消费猛增,全球能源消耗到 2020 年将增长 50%,相当于 136 亿吨原油,而目前全球的能源需求仅相当于 91 亿吨。亚洲地区的电力消耗将在 20 年内翻番,对包括汽油在内的油料的需求将增长 84%至每日 3500 万桶。报告称,为了满足能源需求,亚洲能源来源将转向火力发电和天然气。