

采用改进免疫算法的多目标配电网重构

李樊, 刘天琪, 江东林

(四川大学 电气信息学院, 四川省 成都市 610065)

Distribution Network Reconfiguration With Multi-Objective Based on Improved Immune Algorithm

LI Fan, LIU Tianqi, JIANG Donglin

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: Taking least network loss, minimum load balancing degree and maximum margin of static voltage stability as objectives, an optimal multi-objective reconfiguration model of distribution network is built. Solving the proposed model by immune algorithm while the interlace operation is omitted, the individual affinity and the comprehensive affinity of antibody are determined by the sequencing of feasible solutions and the mutation rate of feasible solutions is adaptively adjusted according to the comprehensive affinity. Utilizing adaptive mutation and the operation of vaccine inoculation the diversity of antibody can be ensured, thus the proportion of feasible solution is increased to ensure that the algorithm converges towards global optimal solution. Results of case calculation show that the proposed method is effective.

KEY WORDS: distribution network reconfiguration; immune algorithm; comprehensive affinity; mutation

摘要: 建立了网损最小、负荷均衡度最小及静态电压稳定裕度最大的多目标配电网重构优化模型。应用免疫算法进行模型求解, 略去了交叉操作, 利用可行解排序确定抗体综合亲和度, 并根据综合亲和度自适应调整可行解变异率, 利用自适应变异及疫苗接种操作保证了抗体的多样性, 提高了可行解比例, 保证了算法向全局最优解收敛。算例结果验证了该方法的有效性。

关键词: 配电网重构; 免疫算法; 综合亲和度; 变异

0 引言

配电网重构为配电网优化分析的重要内容之一, 也是配电管理系统的重要应用功能, 其在满足系统约束条件的前提下, 通过改变网络中分段/联络开关的开闭状态确定符合某种特定运行要求的拓扑结构。

目前配电网重构方法可分为 3 类: 1) 数学优化方法, 如分支定界法^[1]; 2) 启发式方法, 如支路

交换法^[2]和功率矩法^[3]等; 3) 人工智能算法, 如神经网络法^[4]、粒子群算法^[5-6]、蚁群算法^[7-9]、遗传算法^[10-12]和免疫算法^[13-14]等。现有文献大多均针对配电网的某一指标或与其他多个指标有间接联系的某一特定指标进行单目标优化, 通过重构仅能提高系统运行的单一性能。文献[15]采用区间算法对配电网的网损、停电频率、停电持续时间等指标进行多目标优化以提高配电网的可靠性, 但该方法建模需要大量详细的配电网数据, 实际操作中不易获取该类数据。文献[16]优化过程中将网损和负荷均衡度 2 个指标转化为加权和, 利用单目标优化技术仅得出唯一最优解, 其在 2 个指标之间的权值分配缺乏理论依据, 且会使优化过程朝某一特定方向进行, 降低了解的多样性。

本文在考虑配电网稳定性、经济性的基础上, 将建立配电网网损最小、负荷均衡度最小、系统静态电压稳定裕度最大的多目标配电网重构模型, 并提出多目标函数综合亲和度的确定方法, 应用免疫算法求解该模型, 通过可行解排序评价抗体综合亲和度, 并引入自适应变异、疫苗接种环节, 以提高算法收敛性的同时保证解的多样性。

1 配电网重构数学模型

1.1 配电网重构目标函数

1.1.1 网损最小目标函数

降低网络损耗可以节约成本, 因而本文选取网损最小为配电网重构的优化目标, 其目标函数为

$$\min F = \sum_{l=1}^N k_l R_l \frac{P_l^2 + Q_l^2}{U_l^2} \quad (1)$$

式中: F 为系统网损; N 为系统支路总数; l 为支路编号; k_l 为支路 l 开关的状态变量, 0 代表打开, 1

代表闭合； R_l 为支路 l 的电阻； P_l 、 Q_l 分别为支路 l 的末端有功功率和无功率； U_l 为支路 l 的末端节点电压。

1.1.2 负荷均衡度目标函数

负荷越均衡配电网稳定裕度越高，因而本文选取负荷均衡度为配电网重构的优化目标，其目标函数为

$$\min T = \sum_{l=1}^N \left| \frac{S_l}{S_{l\max}} \right|^2 \quad (2)$$

式中： T 为系统负荷均衡度； S_l 和 $S_{l\max}$ 分别为支路 l 的视在功率和容量。负荷均衡度越小，负荷均衡化程度越高，电网越稳定。

1.1.3 静态电压稳定裕度目标函数

电压越稳定配电网越安全，因而本文选取静态电压稳定裕度为配电网重构的优化目标。

配电网中支路 l 的电压稳定指标为

$$L_l = 4[(P_l X_l - Q_l R_l)^2 + (P_l R_l + Q_l X_l)U_l^2] / U_l^4 \quad (3)$$

式中 X_l 为支路 l 的电抗。配电网电压稳定性指标为各支路电压稳定性指标的最大值，即

$$L = \max \{L_1, L_2, \dots, L_N\} \quad (4)$$

配电网的电压稳定裕度为

$$K = 1 - L \quad (5)$$

求解静态电压稳定裕度最大的目标函数即等价于求解配电网电压稳定指标的最小值，即

$$\min L \quad (6)$$

1.2 约束条件

配电网重构过程中，还必须满足以下约束：

1) 等式约束。 P_i 、 Q_i 分别为节点 i 的有功功率和无功率， U_i 为节点 i 的电压， P_i 、 Q_i 、 U_i 必须满足潮流方程的等式约束，即

$$f(P_i, Q_i, U_i) = 0 \quad (7)$$

2) 不等式约束。包括电压约束和支路过载约束，即

$$U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max} \quad (8)$$

$$S_l \leq S_{l\max} \quad (9)$$

式中 $U_{i\min}$ 、 $U_{i\max}$ 分别为节点 i 电压的下限和上限。

3) 辐射型网络约束。配电网内应无闭环和孤岛。

2 改进免疫算法

2.1 综合亲和度的确定

目前大多数免疫算法在配电网重构中只针对一个目标进行优化，亲和度直接采用该目标函数

值，而没有提出多目标配电网重构亲和度的确定方法^[17-18]。为此，本文针对多目标配电网重构提出了综合亲和度的确定方法。

根据目标函数值的优劣确定目标函数可行解的排序，如表 1 所示^[19]。表 1 中，目标函数 1、2、3 依次代表网络损耗、负荷均衡度、静态电压稳定裕度目标函数，抗体 Y_j 为多目标函数可行解种群的第 j 个可行解， $Y_j = [Y_{1j} Y_{2j} Y_{3j}]$ ， Y_{1j} 、 Y_{2j} 、 Y_{3j} 分别为 Y_j 中目标函数 1、2、3 的可行解， M 为各目标函数可行解数量， Y'_i 为目标函数 i 的各可行解根据目标函数值优劣进行排序得到的序列向量。

表 1 可行解排序序列

Tab. 1 The sorting matrix created by the objective function performance

目标函数 i	可行解				可行解排序序列
$i=1$	Y_{11} ,	Y_{12} ,	\dots ,	Y_{1M}	Y'_1
$i=2$	Y_{21} ,	Y_{22} ,	\dots ,	Y_{2M}	Y'_2
$i=3$	Y_{31} ,	Y_{32} ,	\dots ,	Y_{3M}	Y'_3

令 $E_i(Y_{ij})$ 为目标函数 i 的第 j 个可行解的亲和度， $E(Y_j)$ 为 Y_j 的综合亲和度，即

$$E_i(Y_{ij}) = \begin{cases} [M - C_i(Y_{ij})]^2, & C_i(Y_{ij}) > 1 \\ kM^2, & C_i(Y_{ij}) = 1 \end{cases} \quad (10)$$

$$E(Y_j) = \sum_{i=1}^3 w_i E_i(Y_{ij}), \quad j=1, \dots, M \quad (11)$$

式中： $C_i(Y_{ij})$ 为 Y_{ij} 在目标函数 i 可行解中的排序序号； k 为常数，取值区间为(1,2)，用于进一步加大目标函数 i 中表现最优的抗体的亲和度； w_i 为 $E_i(Y_{ij})$ 在综合亲和度中所占权重。

本文采用权重和方法将多目标问题转化为单一目标问题，转化过程的关键在于各目标函数的可行解亲和度权重的选取。为使免疫算法具有任意搜索方向，本文采用随机权重分配方法确定权重，可使免疫算法在整个 Pareto 前沿面上进行均匀采样，避免了固定权重法使免疫算法向判断空间的某固定点所在区域进行采样的趋势，从而保证了 Pareto 解的多样性。本文目标函数的可行解亲和度权重为

$$w_i = \frac{D_i}{\sum_{i=1}^3 D_i}, \quad i=1, 2, 3 \quad (12)$$

式中 D_i 为随机生成数。

本文将式(11)作为抗体 Y_j 亲和度评估函数，抗体(解)的亲和度越大，表明抗体(解)越优。

2.2 抗体编码方式

本文选择二进制编码方式，为提高可行解在解

空间中所占比例，可限定断开开关的数目。为减小抗体长度，文献[20]给出了简化规则，但应考虑：1) 不在任何环路内的开关必须闭合；2) 在网架结构合理的情况下，与电源相连的开关一般也应闭合。

2.3 变异

基本免疫算法求解配电网重构问题时存在以下问题：1) 抗体经过交叉和变异操作后会生成大量的不可行解；2) 不合适的变异率可能使算法陷入局部最优。本文在基本免疫算法的基础上针对配电网运行要求放弃易产生不可行解的交叉操作，并在变异操作中加入限制条件以减少不可行解的生成，利用自适应思想根据亲和度动态调整可行解的变异率，以保证算法向全局最优解收敛。

抗体变异过程中，根据联络开关数目限定打开开关数量。在限定网络打开开关数量的基础上，应用基于最小生成树原理的网络全连通判定方法可完成对可行解的判定。

根据可行解抗体的综合亲和度，采用自适应方法调整可行解的变异率。

$$P_m = \begin{cases} \frac{E_{\max} - E}{E_{\max} - E_{\text{ave}}} k_1, & E \geq E_{\text{ave}} \\ k_2, & E < E_{\text{ave}} \end{cases} \quad (13)$$

式中： P_m 为可行解变异率； E_{\max} 为抗体综合亲和度最大值； E 为需要变异抗体的综合亲和度； E_{ave} 为抗体综合亲和度的平均值； k_1 、 k_2 为随机生成数。

采用自适应方法调整可行解变异率可使综合亲和度高的抗体变异率更低，以便保留该抗体，而对于综合亲和度低的抗体则相应采用高变异率，以便更快生成全局最优解。变异方式为随机选择一对基因值分别为0和1的基因位，将其值互换，这样可使变异后抗体保持断开开关数为 m ，减少了不可行解的产生。

对每次循环生成的不可行解，进行全频率变异操作。全频率变异操作仍限定网络断开开关数目为 m ，根据断开开关数 m 将不可行解分为 m 份，然后随机选择1~ m 对基因值不相等的基因，并互换其基因值。对于固定基因对数的变异而言，以上操作能够更好地保证抗体群的多样性。

2.4 抗体记忆库与亲和度记忆库更新

在首次循环中，将可行解中亲和度最大的前 b 个抗体及其对应的亲和度分别赋值给抗体记忆库与亲和度记忆库。之后每次循环结束时，将该次循环可行解中各抗体的亲和度与亲和度记忆库中的

抗体亲和度进行比较，若该次循环抗体亲和度更高，则令其取代记忆库中比其低的亲和度，并用与之对应的抗体取代抗体记忆库中的抗体，以上操作可保证记忆库中的抗体总是亲和度最高的前 b 个抗体。

2.5 疫苗接种

将抗体记忆库中的抗体作为疫苗，对变异后的不可行解中的一部分进行疫苗接种，使每次循环开始前产生的抗体群均朝着亲和度更高的方向发展，使算法能更快地向全局最优解收敛。

2.6 算法步骤

基于改进免疫算法的多目标配电网重构步骤如下：

- 1) 生成规模为 N_0 的初始种群。
- 2) 利用基于最小生成树原理的网络全连通判定方法进行可行解判定。
- 3) 利用前推回代法对可行解进行配电网潮流计算，计算各目标函数值。
- 4) 根据可行解排序求出抗体综合亲和度。
- 5) 将每次循环得到的抗体综合亲和度与记忆库中的亲和度进行比较，若当前循环得到的抗体综合亲和度高，则取代记忆库中的亲和度，并用与之对应的抗体取代抗体记忆库中的抗体。
- 6) 对可行解进行自适应变异，对不可行解进行分组全频率变异。
- 7) 将抗体记忆库中的抗体作为疫苗随机接种在变异后的新抗体群中。
- 8) 判断是否收敛到全局最优解或者进化代数 T 是否到达设定值 N_{gen} ，若是，则输出记忆库中的抗体、抗体对应的综合亲和度以及各目标函数值，算法停止，否则置 $T=T+1$ ，并转步骤2)。

3 算例分析

本文以文献[21]中69节点测试系统为例验证本文方法的有效性，该系统共有4条馈线、69个节点、11个联络开关，基准电压为11 kV，实线代表分段开关，虚线代表联络开关。抗体长度为76，抗体记忆库和抗体亲和度记忆库规模为20，种群规模为200，种群进化代数为300。重构前系统网损、负荷均衡度、电压稳定性指标分别为0.280 6 MW、5.548 7、0.011 3，本文算法得到的最优解集分布情况如图1所示。

图1中解1~3分别代表3个较优可行解，解4

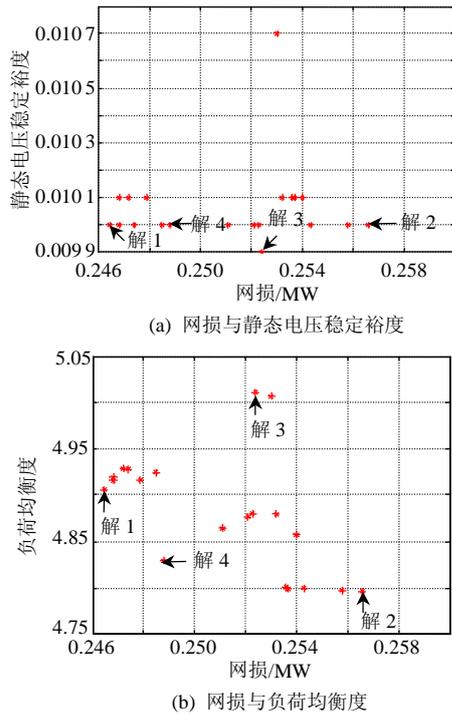


图 1 最优解集

Fig. 1 Optimal solution set

代表综合最优解。解 1~3 中，解 1 的网损最小，但负荷均衡度较差；解 2 的负荷均衡度最好，但网损较大；解 3 的电压稳定性最好，但网损和负荷均衡度均较差。解 4 各方面均较满意。解 1~4 的开关配置方案如表 2 所示。

表 2 重构方案

Tab. 2 Reconfiguration schemes

方案序号	断开开关号	网损/MW	负荷均衡度	电压稳定性裕度
1	14、28、44、45、 51、67、70、72、 73、76、78	0.246 5	4.905 8	0.010 0
2	14、28、44、46、 51、67、70、71、 72、73、76	0.256 6	4.795 7	0.010 0
3	14、28、39、44、 51、61、67、72、 73、76、78	0.252 4	5.010 8	0.009 9
4	14、28、39、45、 67、69、70、71、 72、73、76	0.248 8	4.829 1	0.010 0

由表 2 可知，通过方案 4 进行配电网重构后，系统网损、负荷均衡度、电压稳定性指标分别为 0.248 8 MW、4.829 1、0.010 0，配电网各方面指标均达得到了较好优化。

4 结论

应用本文算法获得的配电网重构方案能够兼顾各种重构目标，调度员可根据网损、网络安全裕度等因素选择合适的重构方案。改进免疫算法中，

抗体变异率根据亲和力动态调整，在保证较优抗体的同时不会降低抗体种群的多样性；略去了抗体的交叉操作过程，且在抗体变异时限定打开开关数目，降低了不可行解的比例；通过免疫记忆机制保留亲和力最低的可行解，通过疫苗接种操作增加了抗体种群中的较优抗体，确保了算法向全局最优解收敛。本文主要考虑了综合亲和度的确定和全局最优解的生成，暂只针对系统的某一断面数据进行优化重构，提高多目标解评估环节的效率及针对某多断面数据的配网多时段重构为下一步待研究内容。

参考文献

- [1] Roytelman I, Melnik V, Lee S S, et al. Multiobjective feeder reconfiguration by distribution management system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 661-667.
- [2] 张栋, 张刘春, 傅正财. 配电网重构的快速支路交换算法[J]. 电网技术, 2005, 29(9): 82-85.
Zhang Dong, Zhang Liuchun, Fu Zhengcai. A quick branch-exchange algorithm for reconfiguration of distribution networks[J]. Power System Technology, 2005, 29(9): 82-85(in Chinese).
- [3] 董家读, 黄庆, 黄彦全, 等. 辐射型配电网重构的功率矩法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 22-25.
Dong Jiadu, Huang Qing, Huang Yanquan, et al. The power moment method for radial distribution network reconfiguration[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 22-25(in Chinese).
- [4] Kim H, Ko Y, Jung K H. Artificial neural-network based feeder reconfiguration for loss reduction in distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(3): 1356-1366.
- [5] 袁晓辉, 王乘, 张勇传, 等. 粒子群优化算法在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 14-19.
Yuan Xiaohui, Wang Cheng, Zhang Yongchuan et al. A survey on application of particle swarm optimization to electric power systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 14-19(in Chinese).
- [6] 靳小凌, 赵建国. 基于改进二进制粒子群优化算法的负荷均衡配电网重构[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 40-43.
Jin Xiaoling, Zhao Jianguo. Distribution network reconfiguration for load balancing based on improved binary particle swarm optimization [J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 40-43(in Chinese).
- [7] 李德华, 王韶, 刘洋, 等. 模糊遗传算法和蚁群算法相结合的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 26-31.
Li Dehua, Wang Shao, Liu Yang, et al. Distribution network reconfiguration based on the combination of fuzzy genetic algorithm and ant colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(17): 26-31(in Chinese).
- [8] 姚李孝, 任艳楠, 费健安. 基于蚁群算法的配电网网络重构[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(6): 35-39.
Yao Lixiao, Ren Yannan, Fei Jianan. Ant colony system algorithm for distribution network reconfiguration[J]. Proceedings fo the CSU-EPSA, 2007, 19(6): 35-39(in Chinese).
- [9] 蔡国伟, 张言滨, 孙铭泽. 基于蚁群最优算法的配电网重构[J]. 东北电力大学学报, 2007, 27(4): 6-11.
Cai Guowei, Zhang Yanbin, Sun Mingze. An ant colony optimization algorithm for reconfiguration of distribution systems[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2007, 27(4): 6-11(in Chinese).

- [10] 刘莉, 陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 66-69.
Li Li, Chen Xueyun. Reconfiguration of distribution networks based on fuzzy genetic algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 66-69(in Chinese).
- [11] 王秀云, 任志强, 楚冬青. 基于改进遗传算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 154-157.
Wang Xiuyun, Ren Zhiqiang, Chu Dongqing. Distribution network reconfiguration based on improved genetic arithmetic[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 154-157(in Chinese).
- [12] 王林川, 梁栋, 于冬皓. 基于遗传和禁忌搜索混合算法的配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6): 27-31.
Wang Linchuan, Liang Dong, Yu Donghao. Distribution network reconfiguration based on genetic/tabu search hybrid algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(6): 27-31(in Chinese).
- [13] 廖鹏, 黄民翔, 吴哲. PSO 加速寻优的免疫算法在配电网重构中的应用[J]. 华东电力, 2007, 35(6): 67-69.
Liao Peng, Huang Minxiang, Wu Zhe. Application of immunity clone algorithm with particle swarm optimization to distribution network reconfiguration[J]. East China Electric power, 2007, 35(6): 67-69 (in Chinese).
- [14] 肖力. 基于人工免疫算法的配电网重构[J]. 微计算机信息, 2007, 23(12): 284-285.
Xiao Li. Reconfiguration of distribution networks based on artificial immune algorithm[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(12): 284-285(in Chinese).
- [15] 张鹏, 王守相. 提高系统可靠性的配电网多目标重构区间方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 22-26, 33.
Zhang Peng, Wang Shouxiang. Interval analysis based multi-objective network reconfiguration for distribution system reliability improvement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 22-26, 33(in Chinese).
- [16] 刘莉, 姚玉斌, 陈学允, 等. 进化规划在配电网多目标重构中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, 32(1): 120-122, 126.
Liu Li, Yao Yubin, Chen Xueyun, et al. Application of evolutionary programming to multi-objective reconfiguration in distribution network[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2000, 32(1): 120-122, 126(in Chinese).
- [17] 蒙文川, 邱家驹. 基于免疫算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 25-29.
Meng Wenchuan, Qiu Jiaju. An artificial immune algorithm to distribution network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 26(17): 25-29(in Chinese).
- [18] 余健明, 张凡. 基于改进免疫遗传算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 100-105.
Yu Jianming, Zhang Fan. Distribution network reconfiguration based on improved immune genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 100-105(in Chinese).
- [19] 游进军, 纪昌民, 付湘. 基于遗传算法的多目标问题求解方法[J]. 水力学报, 2003(7): 64-69.
You Jinjun, Ji Changming, Fu Xiang. New method for multi-objective problem based on genetic algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(7): 64-69(in Chinese).
- [20] 毕鹏翔, 刘健, 刘春新, 等. 配电网重构的改进遗传算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 57-61.
Bi Pengxiang, Liu Jian, Liu Chunxin, et al. A refined genetic algorithm for power distribution network reconfiguration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 57-61(in Chinese).
- [21] 田佳. 基于改进蚁群算法的配电网多目标重构问题研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.



李樊

收稿日期: 2011-01-30。

作者简介:

李樊(1987), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制, E-mail: 573286191@qq.com;

刘天琪(1962), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化;

江东林(1986), 男, 硕士研究生, 研究方向为

电力系统稳定与控制。

(编辑 徐梅)