



基于免疫模型与改进免疫算法的岛礁分布式供电系统故障定位方法

李维波 张茂杰 徐成虎 张浩 方华亮

Fault location method for island and reef distributed power supply system based on immune model and improved immune algorithm

LI Weibo, ZHANG Maojie, XU Chenghu, ZHANG Hao, FANG Hualiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03598>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于改进灰狼优化算法的舰船电力系统故障重构](#)

Fault reconfiguration of ship power system based on improved grey wolf optimization algorithm

中国舰船研究. 2023, 18(2): 251–259 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02714>

[基于改进SHADE算法的船舶电力系统推力分配](#)

Thrust distribution of marine power system based on improved SHADE algorithm

中国舰船研究. 2020, 15(4): 173–182 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01586>

[基于改进模拟退火算法的船舶照明三相平衡优化设计](#)

Three-phase balance optimal design of power distribution for ship lightning system based on the improved simulated annealing algorithm

中国舰船研究. 2020, 15(6): 55–59, 65 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.01837>

[基于分布式网络的水面舰艇编队一体化导航方法](#)

Distributed network-based integrated navigation method for surface ship formation

中国舰船研究. 2024, 19(2): 233–244 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03159>

[基于边缘计算的船舶大型主动隔振系统分布式控制架构](#)

Edge computing-based distributed control architecture for large-scale active vibration isolation system in ships

中国舰船研究. 2024, 19(2): 207–214 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.03231>

[基于卷积神经网络的蒸汽动力系统故障诊断](#)

Fault diagnosis of steam power system based on convolutional neural network

中国舰船研究. 2022, 17(6): 96–102 <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.02616>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

本文网址: <http://www.ship-research.com/cn/article/doi/10.19693/j.issn.1673-3185.03598>

期刊网址: www.ship-research.com

引用格式: 李维波, 张茂杰, 徐成虎, 等. 基于免疫模型与改进免疫算法的岛礁分布式供电系统故障定位方法 [J]. 中国舰船研究, 2025, 20(2): 89–98.

LI W B, ZHANG M J, XU C H, et al. Fault location method for island and reef distributed power supply system based on immune model and improved immune algorithm[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2025, 20(2): 89–98 (in Chinese).

基于免疫模型与改进免疫算法的岛礁 分布式供电系统故障定位方法



扫码阅读全文

李维波^{*1,2}, 张茂杰¹, 徐成虎¹, 张浩¹, 方华亮³

1 武汉理工大学 自动化学院, 湖北 武汉 430070

2 西北民族大学 电气工程学院, 甘肃 兰州 730124

3 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072

摘要: [目的] 对于由多个分布式电源构成的岛礁电力系统, 为了提高其故障定位的快速性和准确性, 提出一种基于免疫模型与改进免疫算法的岛礁电力系统故障定位方法。[方法] 首先, 利用免疫模型将岛礁供电系统区段划分为包含监测点的若干个小区段, 根据监测的故障电流信号来确定故障点所在的小区段, 从而最大限度地缩小故障判定范围; 然后, 针对该小区段故障点进行编码, 并借助改进免疫算法生成抗体种群, 进而对故障区段快速地进行二次精确定位, 同时大幅降低计算量。[结果] 根据典型岛礁供电系统的 Matlab 仿真验证结果, 免疫模型与改进免疫相结合的算法可以实现岛礁电力系统在不同故障工况下的快速故障定位, 具有定位精度高、计算量小、求解速度快等优势。[结论] 研究成果可为岛礁电力系统设计提供参考。

关键词: 电力系统; 分布式电源; 岛礁供电; 故障分析; 免疫算法

中图分类号: U665.14

文献标志码: A

DOI: <10.19693/j.issn.1673-3185.03598>

0 引言

我国海岛的数量众多, 海岛电力保障是实现岛屿日常生活、要塞战略防卫的关键条件, 然而, 当前以太阳能、风能和柴油发电机为主的岛礁电力系统存在工作环境恶劣、分布式电源数量众多、拓扑结构灵活等特点^[1-2], 明显有别于陆地配电网。当分布式电源占比较高的岛礁电力系统发生故障时, 需对故障点进行快速、精准的定位, 以便作业人员进行故障排查、维修和电力接续供应, 从而最大限度地降低停电损失。为提高岛礁电力系统中各分布式电源的利用率和电网的稳定性, 需要不断完善岛礁配电网的故障定位技术^[3-5]。

目前, 配电网故障定位方法是通过馈线监测终端(feed terminal unit, FTU)对电力系统中出现的故障过电流信号进行采集, 并上传至信息处理中心(information processing center, IPC)进行故障

区段的准确定位^[6-8]。传统的电力系统主要采用2种基于FTU的故障定位方法: 1)以矩阵算法为主, 基于配电网结构建立网络描述矩阵, 并结合FTU上传信息所构建的故障信息矩阵而得到故障判断矩阵, 从而实现故障区段的快速定位^[9-10]; 2)以遗传算法、免疫算法等优化算法为主, 基于假定的故障编码转换得到各开关的期望状态函数, 并以接近实际检测的故障电流编码为目标, 建立0-1求解模型, 并利用优化算法进行计算定位^[11-13]。

近年来, 国内外大量学者针对配电网的故障定位方法开展了大量研究工作, 梅飞等^[14]针对矩阵算法容错性差的问题, 在矩阵算法实现初步定位的基础上, 利用开关函数与灰狼算法对定位结果进行校验, 提高了矩阵算法的定位准确性。徐彪等^[15]分析了电力系统中线路区段与故障电流信号之间的关联并为其建立了矩阵描述, 提出了一种

收稿日期: 2023-10-17 修回日期: 2023-12-29 网络首发时间: 2024-06-14 13:34

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1506802); 国家自然科学基金面上项目(51977164)

作者简介: 李维波, 男, 1973年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 电力电子技术在能源系统中的应用。

E-mail: liweibo@whut.edu.cn

张茂杰, 男, 2001年生, 硕士生。研究方向: 电气工程。E-mail: 1441816217@qq.com

*通信作者: 李维波

矩阵算法与优化算法相结合的电力系统故障定位方法,从而提高了算法的容错性。许博文等^[16]将多种群优化方法引入遗传算法进行改进,通过对遗传算法的种群初始化过程进行优化,实现了较准确的配电网故障定位。张颖等^[17]提出了一种将蚁群算法和模拟退火算法相结合的配电网故障定位方法,通过优化蚁群信息素更新机制,实现了相间故障和大电流接地系统的故障定位,并提高了定位的准确性和可靠性。张莲等^[18]提出了一种自适应遗传粒子群混成算法,并构建了新的开关函数和评价函数,实现了较强的全局搜索能力和较高的定位准确度。杨鑫等^[19]针对配电网的故障区段定位问题,提出了一种免疫二进制萤火虫算法,通过引入记忆池与免疫算法,提升了萤火虫算法的求解能力,研究结果表明,该方法具备定位精度高、收敛速度快、抗干扰能力强等优点。虽然矩阵算法及矩阵改进算法具有运算速度快、原理简单等优势,但其容错率较低,尤其对于自然环境恶劣的岛礁而言,FTU 往往容易上传畸变信息,从而导致误判、错判或漏判;遗传算法虽然具有较强的适应性和鲁棒性,但其存在复杂度高、运算量较大等缺点;此外,免疫算法虽然具有搜索能力强、搜索速度快等优点,但其依赖于初始抗体群体,所以存在抗体退化、收敛速度慢、易陷入局部最优解等缺陷。

为此,本文拟针对传统免疫算法进行改进,通过蚁群算法并行计算,引入细胞分化机制,并与免疫模型相结合,以提高算法的容错能力和定位速度,从而避免局部最优问题;在此基础上,将对某岛礁新能源分布式供电系统开展建模与仿真分析,进一步验证该改进免疫算法在岛礁供电系统故障快速定位应用中的合理性与有效性。

1 免疫算法模型的基本原理

免疫算法(immune algorithm, IA)是一种基于生物免疫机理的优化算法,其依赖于抗体和记忆细胞的免疫机制,可以快速且有效地寻找全局最优解,适用于配电网故障的定位模型。

1.1 抗体与故障电流的编码赋值说明

抗体(故障区段编码)与抗原(实际故障电流)的编码均使用二进制编码,其中抗体的编码长度等于电力系统的区段总数。如果出现故障,编码为 1;如果运行正常,则编码为 0。即抗体 i 的表达形式为 $[L_{i1}, L_{i2}, \dots, L_{ip}]$, 其中 p 为区段总数。

在种类繁杂、数量众多且环境恶劣的岛礁分

布式供电系统中进行故障定位时,参照文献 [20] 将岛礁供电系统中电源流向负载的方向规定为正方向,安装于第 j 个开关的监测终端(FTU)监测上传的真实节点状态为 I_j ,即开关内部 FTU 检测的故障过电流信号, $j=1, 2, \dots, D$, 其中 D 为配电网的节点总数。当第 j 个开关的 FTU 所监测的过电流方向与既定正方向一致时,故障电流编码对应位置的 $I_j=1$, 反之则 $I_j=-1$;如果第 j 个开关的 FTU 未监测到过电流,则 $I_j=0$ 。

1.2 开关函数

开关函数是抗体编码与故障电流状态编码之间的转换工具。在故障定位过程中,无法直接依靠收到的故障电流信号确定故障区段的具体位置,需要借助开关函数将所预测的故障点编码转换为对应的故障电流状态编码,再与实际故障电流信号进行比对^[21]。

在岛礁电力系统中,由于存在许多拓扑结构较复杂的分布式电源,通过开关的电流与上游、下游的供电电源均存在关联,因此,需要采用式(1)的开关函数进行转换^[22]。

$$\begin{cases} I_j^* = I_{ju}^* - I_{jd}^* \\ I_{ju}^* = \prod_{u=1}^{M_1} \left[K_u \left(1 - \prod_{j,s_u} S_{j,s_u} \right) \right] \times \prod_{j,d}^{N'} S_{j,d} \\ I_{jd}^* = \prod_{d=1}^{N_1} \left[K_d \left(1 - \prod_{j,s_d} S_{j,s_d} \right) \right] \times \prod_{j,u}^{M'} S_{j,u} \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_j^* 为第 j 个开关的开关函数; I_{ju}^* , I_{jd}^* 分别为以第 j 个开关为间断点而划分出来的上游(upstream)开关函数与下游(downstream)开关函数,每个开关的上游区段数与下游有所差不同,最小取值范围为 0,最大可为区段总数 p ; $u=1, 2, \dots, M_1$,而 $d=1, 2, \dots, N_1$, 分别表示开关 j 上游、下游的电源序号; \prod 为逻辑或运算; K_u , K_d 分别为第 j 个开关上游、下游的电源系数,电源接入则为 1,电源退出则为 0; S_{j,s_u} , S_{j,s_d} 分别为从开关 j 到上游电源 s_u 、下游电源 s_d 之间各节点的状态; M' , N' 分别为开关 j 上游、下游所有区段的数量; $S_{j,u}$, $S_{j,d}$ 分别表示第 j 个开关的上游区段、下游区段的各节点状态。

1.3 抗体评价

在免疫算法中,抗体评价是指对生成的抗体进行适应度评价的过程,需根据问题的具体需求来设计适应度函数,以判断抗体的质量,进而影响抗体的选择、克隆和变异等免疫操作^[23]。

1.3.1 抗体与抗原之间的亲和度

当开关函数将区段状态转换为期望节点状态之后, 需对期望节点状态和FTU监测的真实节点状态进行适应度评价函数计算。在利用免疫算法求解分布式电源的故障定位问题时, 为避免故障数量对适应度函数造成影响而出现多解的情况, 宜采用“最小集”理论进行故障诊断, 即从所有可能的结果中选择设备故障最少的解。本文采用了文献[24]中适应度的计算表达式, 即

$$F(S_i) = \sum_{j=1}^D |I_j - I_j^*(S_i)| + \omega \sum_{j=1}^D |S_i(j)| \quad (2)$$

式中: $F(S_i)$ 为第 i 个抗体的适应度, $i=1, 2, \dots, N$, 其中 N 为抗体总数; $I_j^*(S_i)$ 为寻优过程中第 i 个抗体的第 j 个区段的期望节点状态; ω 为权系数, 为防止特殊情况的误判, 宜取 $[0, 1]$ 之间的实数, 本文取值为 $\omega=0.5$; $S_i(j)$ 为第 i 个抗体中第 j 个区段的故障状态。

抗体与抗原之间的亲和度计算公式为

$$A_i = 1/F(S_i) \quad (3)$$

式中: A_i 为抗体 i 与抗原的亲和度; $F(S_i)$ 为第 i 个抗体的适应度。

1.3.2 抗体与抗体之间的相似度

为保持故障定位过程中抗体之间的多样性, 且在迭代过程中尽量令不同抗体之间存在一定差异性, 从而提高算法的准确率和定位速度, 还需计算抗体与抗体之间的相似度 $S'_{i,h}$, 即

$$S'_{i,h} = \frac{k'_{i,h}}{Q} \quad (4)$$

式中: $k'_{i,h}$ 为抗体 i 与抗体 h 之间相同位置、相同编码的数量; Q 为抗体长度。

C_i 为抗体 i 的浓度, 用于表示相似抗体所占的比例, 即

$$C_i = \frac{\sum_{i,h \in N} H_{i,h}}{N} \quad (5)$$

式中, $H_{i,h}$ 为抗体的相似真值, 表示 2 个抗体是否相似, 若相似则取值为 1, 反之取值为 0^[25], 即

$$H_{i,h} = \begin{cases} 1 & (S'_{i,h} > e) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (6)$$

式中, e 为抗体相似度的评价参数, 其值不宜过大, 否则会影响算法的求解速度与收敛性。

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度主要由两部分决定, 一部分是通过抗体与抗原之间的亲

和度 A_i 计算而得, 另一部分则由抗体与抗体之间的相似度决定, 既要选择相似度高的抗体, 又要保持种群的多样性。抗体 i 的期望繁殖度 θ_i 为^[26]

$$\theta_i = a \frac{A_i}{\sum A_i} + (1-a) \frac{C_i}{\sum C_i} \quad (7)$$

式中, $a < 1$, 为抗体期望繁殖度的多样性评估系数。

2 传统免疫算法的改进

在岛礁电力配电网络中, 分布式电源的数量和种类较多, 监测设备的工作环境恶劣, 易造成信号畸变; 同时, 传统免疫算法在免疫寻优后期难以维持整体种群的多样性并跳出局部最优, 其无法满足由多个分布式电源、多路供电分支和长供电支路组成的岛礁电力配电网的故障定位速度和准确度的需求。为此, 本节将对免疫算法进行改进, 通过引入蚁群算法并行计算来改善初始种群并更新记忆库, 且增加记忆细胞的分化机制, 同时将改进免疫算法与免疫模型相结合, 从而提高算法的容错性及获得最优解的效率。

2.1 蚁群算法

蚁群算法是一种鲁棒性强的模拟进化算法, 当故障信息出现畸变时, 其仍然可以准确地进行故障定位。每次迭代之后, 信息素浓度都会更新, 最终得到的是各区段的最优解集合, 在岛礁电力系统的故障定位中, 蚁群算法的转移概率、信息素浓度更新方式^[27-28]如下:

在 t 时刻, 蚂蚁 k 由元素 v 转移到元素 w 的选择概率 $P_{vw}^k(t)$ 为

$$P_{vw}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{vw}(t)]^\alpha \times [\eta_{vw}(t)]^\beta}{\sum_{x \in l_k} [\tau_{vx}(t)]^\alpha \times [\eta_{vx}(t)]^\beta}, & w \in l_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\tau_{vw}(t)$, $\tau_{vx}(t)$ 分别为 t 时刻路径 (v, w) 与路径 (v, x) 的信息素浓度; $\eta_{vw}(t)$, $\eta_{vx}(t)$ 均为启发函数; α 为信息素强度影响因子, 一般取值为 1; β 为能见度因子, 一般取值为 1; l_k ($k=1, 2, \dots, D$) 为所有未经过的节点集合。

在 $t+T$ 时刻, 路径 (v, w) 的信息素浓度 $\tau_{vw}(t+T)$ 可以表示为

$$\tau_{vw}(t+T) = (1-\rho)\tau_{vw}(t) + \Delta\tau_{vw}(t) \quad (9)$$

其中,

$$\Delta\tau_{vw}(t) = \frac{\zeta}{F(S)}$$

$$\zeta = \begin{cases} 0.10, & N'' \leq 10 \\ 0.16, & 10 < N'' \leq 20 \\ 0.22, & N'' > 20 \end{cases}$$

以上式中: ρ 为信息素的挥发系数, 一般取值为 0.5, $1-\rho$ 为信息素的持久系数; $\Delta\tau_{vw}(t)$ 为蚂蚁 k 在本次迭代边 (v, w) 上的信息素增量; ζ 为信息素强度; $F(S)$ 为蚂蚁 k 在本次循环中的适应度函数值; N'' 为迭代次数。

2.2 记忆细胞的信息分化机制

图 1 所示为单电源有支路的传统配电网节点, 其中: S 为电源; $L_1 \sim L_{11}$ 为区段, 其中 L_3 为设定的故障区段; $R_1 \sim R_{11}$ 为监测点。对于电网故障定位而言, 传统免疫算法在 2 种典型情况下可能会陷入局部最优。

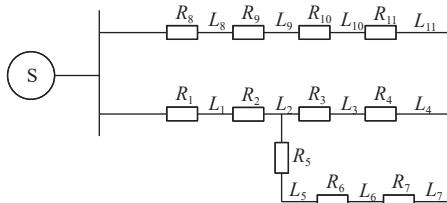


图 1 单电源有支路的传统配电网节点

Fig. 1 Single power supply with branch distribution network

1) 典型情况一: 在故障定位时, 除了确定故障区段为 L_3 以外, 还可能判定为 L_1 或 L_5 , 虽然额外的故障点对于整体适应度的影响较小, 但将导致免疫算法难以摆脱局部最优状态;

2) 典型情况二: 如果出现多点故障, 可能出现某几个错误的故障点编码与正确的故障点编码, 在适应度相差很小的情况下, 通过交叉变异无法改变陷入局部最优的状态。

因此, 针对上述 2 种典型情况, 为了改进传统免疫算法, 本文拟引入一种记忆细胞信息分化机制^[29], 其基本思路为: 当算法在进行迭代计算而陷入局部最优时, 将记忆库中记忆细胞的各个可疑故障点单独转换为抗体编码, 进而参与后续的免疫操作。假设在图 1 所示的电网中, 陷入局部最优的抗体编码为 $(1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, \dots)$, 当信息分化机制参与工作之后, 将该抗体编码分化为如下若干个抗体并参与后续的免疫操作:

$$(1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \dots), (0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, \dots)$$

$$(0, 0, 0, 0, 1, 0, \dots), (1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, \dots)$$

$$(1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, \dots), (0, 0, 0, 1, 0, 1, 0, \dots)$$

一旦陷入局部最优, 如果为单点故障时, 则可以对该故障点进行调整。例如, 局部最优解为 $(0, 0, 1, 0, 0, 0, \dots)$ 时, 将会调整为 $(0, 1, 0, 0, 0, 0, \dots)$

和 $(0, 0, 0, 1, 0, 0, \dots)$ 这 2 种抗体来进行后续免疫操作。

采用改进免疫算法进行故障定位的步骤如下:

- 1) 参数初始化, 包括种群个体数目、记忆细胞数量、交叉变异概率、评价函数等;
- 2) 首先将随机生成 $N+N_0$ 个个体 (其中 N 为免疫算法的种群个体数目, 也被称为抗体总数目, N_0 为记忆细胞数量), 再将 N 个个体进行复制, 一组参与免疫算法的迭代运算, 另一组则参与蚁群算法的计算;
- 3) 同时进行蚁群算法运算和免疫操作, 不断迭代更新, 并将种群中的最优个体导入免疫记忆库;
- 4) 如果种群个体多次未更新, 则需进行信息分化, 再参与下一次免疫操作; 如果无法满足分化条件, 则继续进行迭代计算;
- 5) 当达到设定的最大迭代次数时, 计算过程结束, 如果未满足结束条件, 则转到步骤 3 循环执行。

2.3 免疫模型与改进免疫算法结合

本文改进的免疫算法主要采用了蚁群算法与免疫算法并行计算, 从而构成混成算法以提高算法的容错能力, 并针对易陷入局部最优的问题进行了改进, 有利于提高免疫算法的准确性和抗体的多样性。然而, 在岛礁电力供电系统中, 分布式电源的种类复杂、数量众多, 且支路较长, 导致了算法的整体计算量较大; 即使 2 种算法并行计算, 计算量也会有所增加。因此, 本文拟将免疫模型的思想引入岛礁微电网的故障定位中, 从而减小计算量, 以提高算法的定位速度。

免疫模型的具体实现步骤为: 在岛礁配电网中, 各支路可能含有电源 (有源支路), 也可能不含电源 (无源支路), 电源产生的故障电流将影响有源支路, 而不影响无源支路。当故障定位时, 可在有源支路上选取相当数量的 FTU 作为异常状态监测点, 每个异常状态监测点将实时监测上游区段, 并将岛礁配电网划分为多个被监测区域 (异常状态监测点至该有源支路分布式电源的区域) 和公共区域 (各异常状态监测点之间的区域及无源支路)。当出现故障信息时, 会优先将异常状态监测点收集的信息上传至 IPC 进行数据处理, 以确定故障所在的区域, 再利用改进免疫算法进行二次准确定位。将复杂的传统分布式配电网划分为 r 个子区域和 r' 个公共区域, 并经过数据处理定位为 q 个子区域发生故障 ($q < r$), 从而大幅减少计算量, 以提高算法的寻优与收敛速度。

图 2 所示为传统的分布式配电网。如果采用传统的免疫算法进行故障定位, 需搜索和分析整个配电网, 其中包含了非故障区域, 所以整体

搜索效率较低。图2中: DG_1, DG_2, DG_3 表示分布式电源; R_j 表示第 j 个开关监测终端(FTU), 此处 $j=1, 2, \dots, 12$ 。

选择异常状态监测点的位置与数量时, 可以

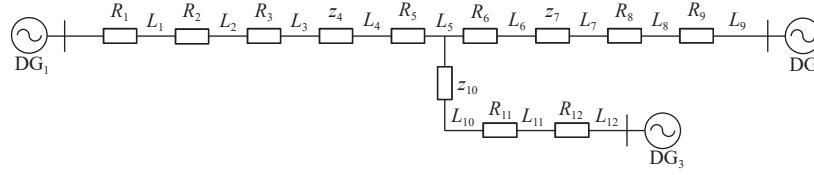


图2 传统的分布式配电网

Fig. 2 Traditional distributed distribution network

$$\begin{cases} Y_1 = \{L_1, L_2, L_3\} \\ Y_2 = \{L_7, L_8, L_9\} \\ Y_3 = \{L_{10}, L_{11}, L_{12}\} \\ Y_\phi = \{L_4, L_5, L_6\} \end{cases} \quad (10)$$

式中, L_j 为区段编号, 其中 $j=1, 2, \dots, 12$ 。

则适应度 $F(S)$ 可以表示为

$$F(S) = \sum_{j=1}^D (1 - K_{Yj}) F_{Yj}(S) + F_{Y\phi}(S) \quad (11)$$

式中: K_{Yj} 为由各异常监测点决定的状态系数; $F_{Yj}(S)$ 为在各个监测点区域的评价函数; $F_{Y\phi}(S)$ 为公共区域的评价函数。

在电网中发生故障时, 即对监测的数据信号进行处理, 假设:

1) 当异常监测点的故障过电流与假定正方向(距离 FTU 监测点最近的电源输出电流的方向)一致时, 状态系数 $K_{Yj}=1$; 反之, 当故障过电流与假定正方向不一致时, 状态系数 $K_{Yj}=0$ 。

2) 当未监测到故障过电流时, 状态系数 $K_{Yj}=1$ 。

当区段 L_4 和 L_{11} 发生故障时, 流过异常监测点 z_{10} 的故障电流与假定正方向相反, 而流过异常监测点 z_4 和 z_7 的故障电流与假定正方向相同, 因此取状态系数 $K_{Y1}=1, K_{Y2}=1, K_{Y3}=0$, 故需取故障区段 Y_3 和 Y_ϕ 进行免疫算法故障定位。

此时适应度 $F(S)$ 为

$$F(S) = F_{Y3}(S) + F_{Y\phi}(S) \quad (12)$$

当区段 L_5 发生故障时, 流过异常监测点 z_4, z_7, z_{10} 的过电流均为正, 此时被监测的各区域 $\{Y_1, Y_2, Y_3\}$ 所对应的状态系数分别为 $K_{Y1}=1, K_{Y2}=1, K_{Y3}=1$, 所以仅需对区段 Y_ϕ 进行故障定位, 此时的适应度 $F(S)$ 为

$$F(S) = F_{Y\phi}(S) \quad (13)$$

图3所示为基于改进免疫算法的故障定位

根据电力系统的实际拓扑结构进行改变。在图2的有源支路中选取3个异常状态监测点 z_4, z_7, z_{10} , 从而将电力网划分为3个被监测区域 $\{Y_1, Y_2, Y_3\}$ 和1个公共区域 $\{Y_\phi\}$ 。

分析流程。在抗原输入后, 首先, 对异常监测点进行状态识别, 以确定故障所在的子区域, 并仅在该集合区域进行故障定位; 其次, 通过蚁群算法与改进免疫算法并行计算, 将亲和度高的抗体纳入免疫记忆库, 并引入记忆信息分化机制, 以避免迭代过程陷入局部最优; 最后, 进行抗体评价与免疫操作, 当满足输出条件时, 输出定位结果。

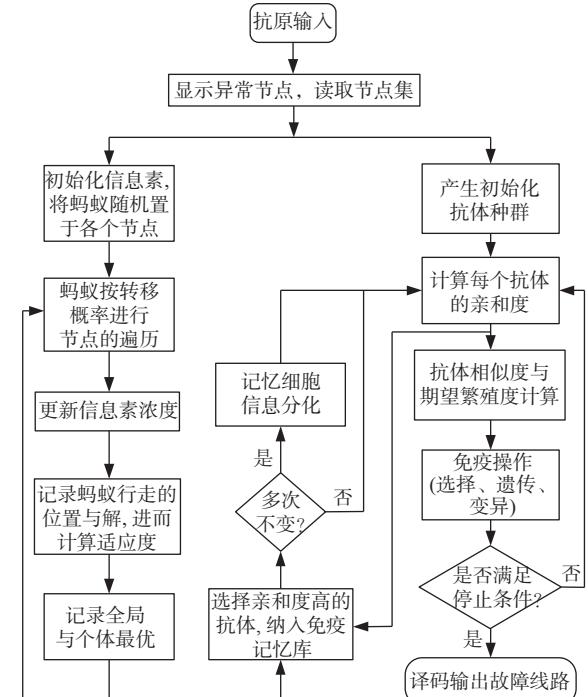


图3 基于改进免疫算法的故障定位分析流程

Fig. 3 Fault location analysis process based on improved immune algorithm

3 算例分析

3.1 改进免疫算法实验参数

以图4所示岛礁分布式电力系统为例, 本节将开展改进免疫算法故障定位的算例分析。仿真软件为 Matlab2020b, 操作系统为 Windows10, 计算机为 i7-8750 H, 2.20 GHz 频率, 16 GB 内存。

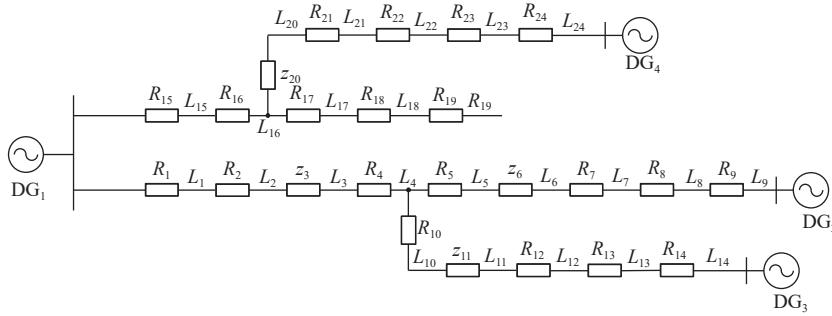


图 4 岛礁电力配电网的拓扑结构

Fig. 4 Topological structure of island and reef power distribution network

图 4 中: DG_1, DG_2, DG_3, DG_4 为接入岛礁电力系统的 4 个分布式电源; $L_1 \sim L_{24}$ 为区段; $R_1 \sim R_{24}$ 为故障检测点; z_3, z_6, z_{11}, z_{20} 为设置的异常监测点, 因此岛礁电力配电网分成了 4 个被监测区域 $\{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4\}$ 以及 2 个公共区域 $\{Y_{\phi 1}, Y_{\phi 2}\}$ 。其中,

$$\left\{ \begin{array}{l} Y_1 = \{L_1, L_2\} \\ Y_2 = \{L_6, L_7, L_8, L_9\} \\ Y_3 = \{L_{11}, L_{12}, L_{13}, L_{14}\} \\ Y_4 = \{L_{20}, L_{21}, L_{22}, L_{23}, L_{24}\} \\ Y_{\phi 1} = \{L_3, L_4, L_5, L_{10}\} \\ Y_{\phi 2} = \{L_{15}, L_{16}, L_{17}, L_{18}, L_{19}\} \end{array} \right. \quad (14)$$

仿真所需关键性参数如表1所示。种群个体数目 N 一般为20~100,本实验取值为40;记忆信息库中的记忆细胞数量 N_0 取值为10;交叉概率一般取值为0.4~0.99,本实验取值为0.8;变异概率一般取值为0.0001~0.1,本实验取值为0.05;抗体相似度评价参数不宜过大,本实验取值为0.9;为了提高亲和度比重,将多样性评估参数取值为0.7。

基于此,即可按照图3的流程进行故障定位分析:首先,设置改进免疫算法的各个参数;然后,分别对图4岛礁电力系统出现“单点故障”“多点故障”和“岛礁配电网发生多点故障且FTU上传信息发生畸变”的3种不同工况进行仿真分析,

其中包括 $L_1 \sim L_{24}$ 共计 24 个区段、 $R_1 \sim R_{24}$ 共计 24 个监测点以及 z_3, z_6, z_{11}, z_{20} 共计 4 个异常监测点, 故障定位仿真结果如表 2 所示。表 2 中: 假定故障为预先设定的故障点; 畸变位为预先设定的信号畸变位置; $K_{Y1}, K_{Y2}, K_{Y3}, K_{Y4}$ 为对应的状态系数; 故障电流状态编码为发生假定故障之后, 监测设备上传至 IPC 的电流信号; 最优解为算法迭代完成后的最优解代码; 故障区段为算法计算得到的结果; 适应度为最优解的适应度值。

由表2可知,在图4的岛礁电力配电网中,当出现单点、多点(2点、3点)故障时,改进免疫算法均能求解出最优适应度值和故障区段的最优解,例如:假定故障为 L_3 时,最优解中第3位为“1”,其余均为“0”,可得故障区段为 L_3 ,适应度值为0.5;假定故障为 L_{11}, L_{18} 时,最优解中第11位与第

表 1 改进免疫算法的关键参数

Table 1 Key parameters for improving immune algorithms

参数	数值
种群个体数目 N	40
记忆细胞数量 N_0	10
交叉概率	0.8
变异概率	0.05
抗体相似度评价参数 e	0.9
多样性评估参数 a	0.7
最大迭代次数	50

表2 故障定位仿真结果

Table 2 Fault location simulation results

18位均为“1”，其余位均为“0”。当FTU上传的故障电流信息出现畸变时，仍可求出最优解，例如：假定故障为 L_4, L_{20} ，故障电流编码状态的第7位和第11位发生了信号畸变时，最优解中第4位与第20位均为“1”，其余位均为“0”，由此验证了该算法具有良好的容错性。

3.2 配电网发生“单点故障”

在图4的岛礁电力配电网中，当区段 L_3 发生故障且无信息畸变时，基于各异常监测点 z_3, z_6, z_{11}, z_{20} 收集的故障信息，根据式(7)即可得到4个被监测区域 $\{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4\}$ 所对应的状态系数分别为： $K_{Y1}=1, K_{Y2}=1, K_{Y3}=1, K_{Y4}=1$ ，进一步可以计算出适应度为 $F(S)=F_{Y_{\phi 1}}(S)+F_{Y_{\phi 2}}(S)$ ，并由评价函数得出最优适应值为0.5。因此，采用改进免疫算法进行求解时，仅需在对应的公共区 $Y_{\phi 1}$ 和 $Y_{\phi 2}$ 进行免疫操作，即生成抗体时，仅在第3~5位、第10位、第15~19位(共计9位)进行操作，其余位置均设为零，从而简化计算；否则，采用传统优化算法则需在24位进行故障定位。

图5所示为对于单点故障工况，分别采用改进免疫算法、传统免疫算法、传统遗传算法的仿真实验对比结果。由图5可知：当改进免疫算法迭代至第7代时，种群中即出现了最优解，适应度值为0.5；而传统免疫算法与传统遗传算法分别需迭代16次和22次，才能得出最优解，适应度值为0.5，即改进免疫算法在求解岛礁电力配电网的故障区段时的收敛速度更快。

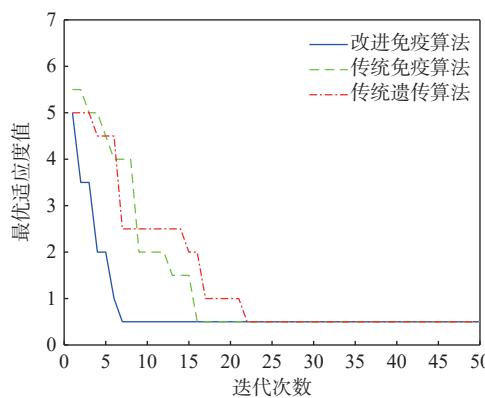


图5 单点故障下的3种算法仿真实验对比

Fig. 5 Comparison of three algorithms for single fault simulation experiments

3.3 配电网发生“多点故障”

对于图4所示的岛礁电力配电网，当 L_{11} 区段和 L_{18} 区段同时发生故障且无信息畸变时，根据各异常监测点 z_3, z_6, z_{11}, z_{20} 的故障信息，采用式(8)即可得出状态系数 $K_{Y1}=1, K_{Y2}=1, K_{Y3}=0, K_{Y4}=1$ ，从

而确定故障发生在公共区段 $Y_{\phi 1}, Y_{\phi 2}$ 以及区段 Y_3 之中；仅对这些区段进行改进免疫算法的运算和定位，即可求得适应度 $F(S)$ 为

$$F(S) = F_{Y_{\phi 1}}(S) + F_{Y_{\phi 2}}(S) + F_{Y_3}(S) \quad (15)$$

基于评价函数的计算结果可知最优适应值为1。当确定故障所属的区域后，在生成抗体种群时，仅对第3~5位、第10位、第11~19位(共计13位)进行操作，进而利用改进免疫算法对故障点进行定位。图6所示为针对多点故障的3种算法仿真对比结果。

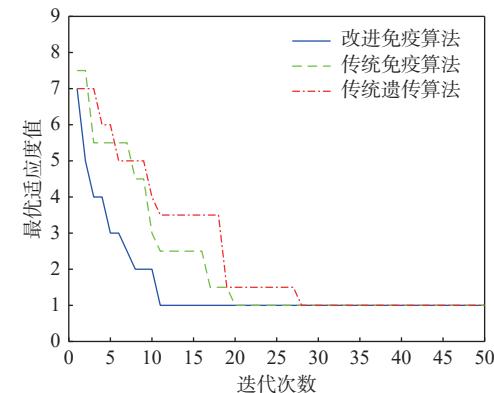


图6 多点故障下的3种算法仿真实验对比

Fig. 6 Comparison of simulation experiments of three algorithms for multiple faults

由图6可知，当改进免疫算法进化到第11代时，种群中出现了最优解，其最优适应度值为1；而传统免疫算法与传统遗传算法分别需迭代20次和27次才能得出最优解，其最优适应度值为1。此外，从图6中也可以明显看出，在多点故障且无信息畸变的条件下，改进免疫算法的求解速度比传统的2种优化算法更快。

3.4 岛礁配电网发生多点故障且FTU信息发生畸变

在图4所示的岛礁电力配电网中，设定 L_4 区段和 L_{20} 区段发生故障，如果因恶劣环境导致通信故障或因设备问题造成残差污染，将可能引起 R_7 和 R_{13} 故障电流信息发生畸变，则FTU上传到IPC的故障电流编码为[1 1 1 1 -1 -1 1 -1 -1 -1 -1 -1 1 -1 1 1 0 0 0 1 -1 -1 -1 -1]；根据监测点所采集的故障信息，可以确定故障发生在公共区段 $Y_{\phi 1}, Y_{\phi 2}$ 以及区段 Y_4 中；生成抗体种群时，仅在第3~5位、第10位、第15~24位(共计14位)进行操作，然后再对这些区域应用改进免疫算法进行故障定位，得出最优适应度值为3。

图7所示为多点故障且信号畸变情况下的3种算法仿真对比图。由图7可知，当FTU上传

信息发生畸变时,改进免疫算法需计算至第 16 代,才会在种群中出现最优解,其最优适应度值为 3;传统免疫算法需要迭代 38 次,才能在种群中得到最优解,其最优适应度 3;而传统遗传算法在迭代 50 次之后,其适应度值仍然不等于 3,未能找到最优解。此外,从图 7 中可以明显看出,在多点故障且存在信息畸变的条件下,改进免疫算法的求解速度比传统的 2 种优化算法更快,并表现出了良好的容错性。

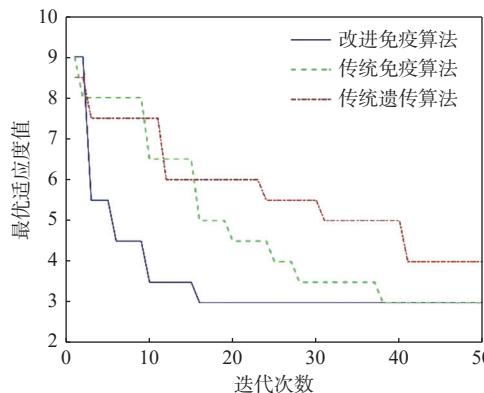


图 7 多点故障且信号畸变下的 3 种算法仿真实验对比

Fig. 7 Comparison of simulation experiments of three algorithms with multiple faults and signal distortion

4 结 语

由于岛礁电力系统中分布式电源的占比较高,且供电环境相对复杂、网络拓扑较为复杂,故其故障定位的难度较大,为此,本文提出了一种将免疫模型与改进免疫算法相结合的方法,以快速准确地定位故障,从而确保该系统的运行稳定性与供电持续性。首先,选取多个 FTU 作为异常状态监测点,在广义上将岛礁电力系统划分为若干个被监测区域和公共区域;然后,根据得到的故障电流信号确定故障点所在的区域;最后,利用改进免疫算法对故障点进行准确定位。分析仿真结果表明,由于融合了免疫模型与改进免疫算法的思路,在岛礁供电系统发生“单点故障”“多点故障”以及“岛礁配电网发生多点故障且 FTU 上传信息发生畸变”的情况下,该方法均可以准确地定位岛礁配电网的故障区段,相较于传统的免疫算法和遗传算法,其不仅具有更强的容错能力,且在收敛速度和寻找全局最优解方面也表现更优。目前,改进免疫算法在岛礁电力系统的故障定位研究仍处于摸索阶段,对于如何将岛礁电力系统的故障恢复、故障重构理论与岛礁电力系统工程建设实践相结合,后续还有许多工作需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 杨欢,赵荣祥,辛焕海,等.海岛电网发展现状与研究动态[J].*电工技术学报*,2013,28(11): 95–105.
YANG H, ZHAO R X, XIN H H, et al. Development and research status of island power systems[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(11): 95–105 (in Chinese).
- [2] 陈厚合,丛前,姜涛,等.多能协同的配电网供电恢复策略[J].*电工技术学报*,2022,37(3): 610–622,685.
CHEN H H, CONG Q, JIANG T, et al. Distribution systems restoration with multi-energy synergy[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(3): 610–622,685 (in Chinese).
- [3] 邱博源.海岛微电网储能技术发展[J].*电工技术*,2022(22): 38–40.
QIU B Y. Development of energy storage technology for island microgrid[J]. *Electric Engineering*, 2022(22): 38–40 (in Chinese).
- [4] 张健磊,高湛军,陈明,等.考虑复故障的有源配电网故障定位方法[J].*电工技术学报*,2021,36(11): 2265–2276.
ZHANG J L, GAO Z J, CHEN M, et al. Fault location method for active distribution networks considering combination faults[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(11): 2265–2276 (in Chinese).
- [5] 翁蓝天,晋建厂.基于负荷停电信息的船用电力系统故障定位方法[J].*中国舰船研究*,2013,8(1): 112–116.
WENG L T, JIN J C. A fault location algorithm for marine electrical power systems based on the power failure information of loads[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2013, 8(1): 112–116 (in Chinese).
- [6] 郭上华,王钢.融合 FTU 和配变告警信息的有源配网故障定位方法[J].*电力系统保护与控制*,2022,50(22): 92–99.
GUO S H, WANG G. An active distribution network fault location method based on FTU and transformer alarm information[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(22): 92–99 (in Chinese).
- [7] 王巍璋,王淳,敖鑫.基于果蝇优化算法的配电网故障定位[J].*电力系统保护与控制*,2019,47(18): 108–114.
WANG W Z, WANG C, AO X. Fault location of power distribution network based on fruit fly optimization algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(18): 108–114 (in Chinese).
- [8] 蒋佳炜,胡以怀,方云虎,等.船舶动力装置智能故障诊断技术的应用与展望[J].*中国舰船研究*,2020,15(1): 56–67.
JIANG J W, HU Y H, FANG Y H, et al. Application and prospects of intelligent fault diagnosis technology for marine power system[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2020, 15(1): 56–67 (in Chinese).

[9] 曾浩然, 杨超. 基于电压幅值纠正的配电网故障定位矩阵算法 [J]. *电力科学与工程*, 2020, 36(7): 41–46.

ZENG H R, YANG C. Distribution network fault location matrix algorithm based on voltage amplitude correction[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2020, 36(7): 41–46.

[10] 梁正卓, 朱琬璐, 朱志宇, 等. 船舶综合电力系统重构技术现状及展望 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(6): 36–47.

LIANG Z Z, ZHU W L, ZHU Z Y, et al. Situation and prospects of shipboard integrated power system reconfiguration technology[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(6): 36–47 (in Chinese).

[11] 孔培, 刘建锋, 周健, 等. 基于整数线性规划的配电网故障定位容错算法 [J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(24): 27–35.

KONG P, LIU J F, ZHOU J, et al. Fault-tolerant algorithm for fault location in distribution network based on integer linear programming[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(24): 27–35 (in Chinese).

[12] 徐岩, 刘婧妍, 张诗杭, 等. 基于遗传算法的直流配电网线路故障定位方法 [J]. *太阳能学报*, 2020, 41(12): 1–8.

XU Y, LIU J Y, ZHANG S H, et al. Fault location method based on genetic algorithm for dc distribution network[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2020, 41(12): 1–8 (in Chinese).

[13] 张馨悦, 肖健梅, 王锡淮. 基于改进灰狼优化算法的船舶电力系统故障重构 [J]. *中国舰船研究*, 2023, 18(2): 251–259.

ZHANG X Y, XIAO J M, WANG X H. Fault reconfiguration of ship power system based on improved grey wolf optimization algorithm[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2023, 18(2): 251–259 (in Chinese).

[14] 梅飞, 陈子平, 裴鑫, 等. 基于矩阵算法的有源配电网故障定位容错方法 [J]. *电力工程技术*, 2022, 41(6): 109–115.

MEI F, CHEN Z P, PEI X, et al. Fault-tolerant method for fault location of active distribution network based on matrix algorithm[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(6): 109–115 (in Chinese).

[15] 徐彪, 尹项根, 张哲, 等. 矩阵算法和优化算法相结合的配电网故障定位 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(5): 152–158.

XU B, YIN X G, ZHANG Z, et al. Fault location for distribution network based on matrix algorithm and optimization algorithm[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(5): 152–158 (in Chinese).

[16] 许博文, 许晓平, 刘畅, 等. 基于优化遗传算法的配电网故障定位技术 [J]. *化工自动化及仪表*, 2020, 47(5): 416–419,459.

XU B W, XU X P, LIU C, et al. Fault location technology of power distribution network based on optimized genetic algorithm[J]. *Control and Instruments in Chemical Industry*, 2020, 47(5): 416–419,459 (in Chinese).

[17] 张颖, 许欣. 基于蚁群退火算法的配电网故障定位研究 [J]. *电器与能效管理技术*, 2021(9): 85–90,99.

ZHANG Y, XU X. Research on fault location of distribution network based on ant colony annealing algorithm [J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2021(9): 85–90,99 (in Chinese).

[18] 张莲, 宫宇, 杨洪杰, 等. 基于自适应遗传粒子群算法的配电网故障定位 [J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2021, 35(9): 160–168.

ZHANG L, GONG Y, YANG H J, et al. Fault location of distribution network based on adaptive genetic particle swarm optimization algorithm[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2021, 35(9): 160–168 (in Chinese).

[19] 杨鑫, 张家洪, 李英娜, 等. 配电网故障定位的免疫二进制萤火虫算法 [J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(2): 304–310.

YANG X, ZHANG J H, LI Y N, et al. Immune binary firefly algorithm for fault location of distribution network [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(2): 304–310 (in Chinese).

[20] 高峰阳, 李昭君, 袁成, 等. 量子计算和免疫优化算法相结合的有源配电网故障定位 [J]. *高电压技术*, 2021, 47(2): 396–406.

GAO F Y, LI Z J, YUAN C, et al. Fault location for active distribution network based on quantum computing and immune optimization algorithm[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(2): 396–406 (in Chinese).

[21] 颜景斌, 夏赛, 王飞, 等. 基于改进遗传算法的有源配电网故障定位分析 [J]. *电力系统及其自动化学报*, 2019, 31(6): 107–112.

YAN J B, XIA S, WANG F, et al. Analysis of fault location for active distribution network based on improved genetic algorithm[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2019, 31(6): 107–112 (in Chinese).

[22] 苏丽, 王锡淮, 肖健梅. 基于多目标优化算法的船舶微电网重构 [J]. *中国舰船研究*, 2020, 15(3): 169–176.

SU L, WANG X H, XIAO J M. Ship micro-grid reconfiguration based on multiobjective optimization algorithm[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2020, 15(3): 169–176 (in Chinese).

[23] 陈奎, 张云, 王洪寅, 等. 基于免疫算法的含分布式电源配电网的故障定位 [J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(24): 57–62.

CHEN K, ZHANG Y, WANG H Y, et al. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on immune algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(24): 57–62 (in Chinese).

[24] 郑涛, 潘玉美, 郭昆亚, 等. 基于免疫算法的配电网故障定位方法研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(1): 77–83.

ZHENG T, PAN Y M, GUO K Y, et al. Fault location of distribution network based on immune algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(1): 77–83 (in Chinese).

[25] 李明阳, 张沈习, 程浩忠, 等. 含分布式电源的主动配电网分层故障定位方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(8): 79–87.

LI M Y, ZHANG S X, CHENG H Z, et al. Hierarchical fault location method for active distribution network with distributed generations[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(8): 79–87 (in Chinese).

[26] 蔡华润, 常雨芳, 向保林. 基于改进免疫算法的配电网故障定位 [J]. 电子设计工程, 2020, 28(7): 1–5.

CAI H X, CHANG Y F, XIANG B L. Fault location of distribution network based on improved immune algorithm[J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28(7): 1–5 (in Chinese).

[27] 张亚东, 茅东华, 余洋. 基于蚁群算法的分布式配电网局部故障定位方法 [J]. 能源与环保, 2021, 43(11): 182–187.

ZHANG Y D, MAO D H, YU Y. Local fault location method of distributed distribution network based on ant colony algorithm[J]. China Energy and Environmental Protection, 2021, 43(11): 182–187 (in Chinese).

[28] 李霆, 方志坚, 罗义旺, 等. 基于改进蚁群算法的配电网故障定位研究 [J]. *微型电脑应用*, 2020, 36(9): 86–88.

LI T, FANG Z J, LUO Y W, et al. Research on fault location of distribution network based on improved ant colony algorithm[J]. *Microcomputer Applications*, 2020, 36(9): 86–88 (in Chinese).

[29] 李卫彬, 童欣, 黄超, 等. 基于分层定位模型的含 DG 配电网故障定位方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 160–166.

LI W B, TONG X, HUANG C, et al. A fault location method for a distribution network with DG based on a hierarchical location model[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(24): 160–166 (in Chinese).

Fault location method for island and reef distributed power supply system based on immune model and improved immune algorithm

LI Weibo^{*1,2}, ZHANG Maojie¹, XU Chenghu¹, ZHANG Hao¹, FANG Hualiang³

1 School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

2 College of Electrical Engineering, Northwest Minzu University, Lanzhou 730124, China

3 School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: [Objective] In order to improve the rapidity and accuracy of fault location for island and reef power supply systems composed of multiple distributed power sources, a fault location method based on an immune model and improved immune algorithm is proposed. [Methods] First, the immune model is used to divide the island and reef power supply system into several cell sections containing monitoring points. According to the monitored fault current signal, the cell section where the fault point is located is determined in order to minimize the fault determination range. The fault points of the cell section are then coded and the antibody population is generated by the improved immune algorithm, enabling the fault section to be quickly and accurately located for a second time, thus greatly reducing the calculation load. [Results] According to the Matlab simulation results of a typical island and reef power supply system, the immune model and improved immune algorithm combination can realize rapid fault location under various fault conditions, with such advantages as high positioning accuracy, light calculation load and fast solution speed. [Conclusion] The results of this study can provide useful references for the design of island and reef power supply systems.

Key words: electric power systems; distributed power sources; island reef power supply; failure analysis; immune algorithms