

# 基于人工免疫算法的小电流接地故障选线

庞清乐<sup>1,2</sup>, 陈生银<sup>3</sup>

(1. 山东工商学院信息与电子工程学院, 山东 烟台 264005; 2. 聊城大学计算机学院, 山东 聊城 252059;  
3. 荆州供电公司, 湖北 荆州 434000)

**摘要:** 小电流接地系统的单相接地故障选线问题一直没有得到很好的解决, 通常采用的单一故障选线方法如小波变换法、五次谐波电流法和零序电流有功分量法等只能对部分故障信息进行处理, 选线可靠性不高, 因此提出了基于人工免疫算法的小电流接地故障选线方法。利用小波包变换和FFT算法提取零序电流的暂态、五次谐波和有功分量故障特征作为免疫系统的抗原, 利用训练样本对该免疫系统训练后得到记忆集, 利用抗原和记忆集的亲合度实现故障选线。ATP仿真结果表明该方法得出的选线结果具有较高的精度和较强的鲁棒性。

**关键词:** 小电流接地系统; 故障选线; 信息融合; 人工免疫算法

## Artificial immune algorithm based faulty line detection method for indirectly grounding power system

PANG Qing-le<sup>1,2</sup>, CHEN Sheng-yin<sup>3</sup>

(1. School of Information and Electronic Engineering, Shandong Institute of Business and Technology, Yantai 264005, China; 2. College of Computer Science, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China;  
3. Jingzhou Electric Power Supply Company, Jingzhou 434000, China)

**Abstract:** The faulty line detection of single-phase-to-earth fault in indirectly grounding power system has not been well solved. The commonly used single faulty line detection methods, such as wavelet transform method, the fifth harmonic current method and zero sequence current active components method, etc, can only process partial fault information, their reliability of faulty line detection is not satisfied, so artificial immune algorithm based faulty line detection method for indirectly grounding power system is proposed. The extracted transient characteristic, fifth harmonic characteristic and active component characteristic of zero sequence current using wavelet packet transform and fast Fourier transform (FFT) method, are looked as antigens. After training the immune system using training samples, the memory set is obtained. Based on affinities between antigens and the memory set, the results of faulty line detection are achieved. Simulation results by ATP show that the faulty line detection result by the proposed method is more precise and possesses stronger robustness.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.60673153) and National Natural Science Foundation of Shandong Province (No.Z2006F05).

**Key words:** indirectly grounding power system; faulty line detection; information fusion; artificial immune algorithm

中图分类号: TM773; TP18 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)24-0027-05

## 0 引言

小电流接地系统的单相接地故障选线问题一直是现场运行中的一大难题<sup>[1]</sup>。人们对此进行了大量的研究, 基于不同原理提出了多种选线方法。但从现场应用情况来看, 这些单一选线方法的效果

并不理想。主要原因是: 发生单相接地故障时有些故障特征比较明显, 有些故障特征则比较模糊; 干扰因素可能对有些故障特征影响较大, 而对其它故障特征影响较小, 因此经常出现误选和漏选的情况。目前, 对于小电流接地系统比较成熟的选线方法有: 小波分析法<sup>[2,3]</sup>、零序电流有功分量法<sup>[4]</sup>和5次谐波法<sup>[5]</sup>。但没有一种选线方法能保证对所有的故障类型都有效, 因此, 出现了基于信息融合技术的故障选线方法<sup>[6-8]</sup>。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(60673153); 山东省自然科学基金资助项目(Z2006F05)

以生物免疫系统为基础的人工免疫系统 (AIS—artificial immune systems)已成为目前国内外计算智能领域一个新的研究热点<sup>[9]</sup>。近年来,人工免疫系统已被广泛应用于模式识别<sup>[10]</sup>、组合优化<sup>[11]</sup>、潮流计算<sup>[12]</sup>、配电网重构<sup>[13]</sup>和负荷预测<sup>[14]</sup>。本文将人工免疫算法应用于小电流接地系统故障选线,将零序电流信号的暂态、五次谐波和有功分量故障特征利用人工免疫算法进行智能融合,得到可靠性较高的故障选线结果。

## 1 基于人工免疫算法的故障选线原理

### 1.1 系统的结构框图

基于人工免疫算法的故障选线系统的框图如图1所示。分别通过小波包变换(WPT)和快速傅立叶变换(FFT)从零序电流信号中提取暂态分量、五次谐波分量和有功分量故障特征<sup>[6,7]</sup>。每次单相接地故障时每各线路零序电流的三种故障特征组成一个抗原,随机产生 $N$ 个抗体组成抗体集合,利用免疫操作获取记忆细胞集合;然后采用常规的聚类方法,对记忆细胞集合做聚类分析,得到故障选线模型。将线路零序电流的故障特征输入到该模型,即可得到故障选线结果。

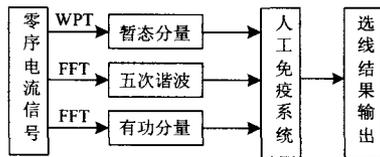


图1 故障选线系统框图

Fig.1 Frame of faulty line detection system

### 1.2 基于人工免疫算法的故障选线方法

AIS作为一种由理论生物学启发而来的计算范式,借鉴了一些生物免疫系统的功能、原理和模型,使用学习、记忆和关联检索来完成识别与分类任务,具有强大的信息处理能力,是一种有效的数据聚类分析方法。AIS将待分析的数据作为抗原,通过抗体对抗原的学习、记忆过程来识别、分类不同的数据,并从中找出数据间的相关性能<sup>[11]</sup>。

将配电网中各条线路的零序电流故障特征作为输入数据集,假设 $Q$ 个输入数据集构成抗原 $Ag$ ,聚类分析的目的就是要通过免疫学习,寻找记忆数据集 $M$ 作为输入数据的聚类。

为描述算法的方便,定义如下变量:

$Ag$ : 抗原集合,即待聚类的各线路零序电流故障特征集合,或故障选线问题的论域:

$$\begin{cases} Ag = [Ag_1, Ag_2, \dots, Ag_Q]^T \\ Ag_j = [Ag_{j1}, Ag_{j2}, Ag_{j3}] \in R^3 \\ j = 1, 2, \dots, Q \end{cases} \quad (1)$$

$$Ag_1 = \varepsilon_k / \varepsilon_\Sigma \quad (2)$$

其中: $\varepsilon_k$ 表示线路 $k$ 的零序电流在能量集中频段的能量; $\varepsilon_\Sigma$ 表示电网中所有线路的零序电流在各自能量集中频段的能量总和。

$$Ag_2 = P_k / P_\Sigma \quad (3)$$

其中: $P_k$ 表示线路 $k$ 的零序电流有功功率, $P_\Sigma$ 表示电网中所有线路的零序电流有功功率总和。

$$Ag_3 = S_{5k} / S_{5\Sigma} \quad (4)$$

其中: $S_{5k}$ 表示线路 $k$ 的零序电流五次谐波分量的视在功率, $S_{5\Sigma}$ 表示电网中所有线路的零序电流五次谐波分量的视在功率总和。

$Ab$ : 抗体集合,即 $N$ 个初始网络细胞:

$$\begin{cases} Ab = [Ab_1, Ab_2, \dots, Ab_N]^T \\ Ab_i = [Ab_{i1}, Ab_{i2}, Ab_{i3}] \in R^3 \\ i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (5)$$

$M$ : 记忆数据集,即 $nt$ 个网络记忆细胞:

$$\begin{cases} M = [m_1, m_2, \dots, m_m]^T \\ m_k = [m_{k1}, m_{k2}, m_{k3}] \in R^3 \\ k = 1, 2, \dots, nt, nt \ll Q \end{cases} \quad (6)$$

$D_j \in R_+^N, AF_j \in R_+^N$ : 所有抗体与抗原 $Ag_j$ 的距离度量矢量和亲和力矢量。

$S \in R_+^m$ 为 $M$ 中抗体的相似度矢量;

$N_c$ 为激发细胞产生的克隆细胞数量;

$C_j$ 为激发细胞产生的克隆细胞群体,亲和力成熟后变为 $C$ 。

基于免疫网络理论和克隆选择原理的人工免疫聚类算法由如下步骤构成:

Step 1 随机初始化 $N$ 个抗体组成抗原集合 $Ab$ ,作为初始网络细胞。

Step 2 设定循环控制参数。

Step 3 输入待聚类数据作为抗原,对抗原 $Ag_j$ ( $j=1, 2, \dots, Q$ )进行如下操作:

Step 3.1 计算距离度量矢量 $D_j$ 和亲和力矢量 $AF_j$ 。抗原与抗体之间的距离用欧几里德距离定义:

$$d_{ji} = \|Ab_i - Ag_j\|_2 = \left( \sum_{k=1}^3 (Ab_{ik} - Ag_{jk})^2 \right)^{1/2} \quad (7)$$

抗原与抗体之间的亲和力采用式(8)定义:

$$af_{ji} = (1 + d_{ji})^{-1} \quad (8)$$

于是

$$D_j = [d_{j1}, d_{j2}, \dots, d_{jn}]^T \quad (9)$$

$$AF_j = [af_{j1}, af_{j2}, \dots, af_{jn}]^T \quad (10)$$

**Step 3.2** 按照 *opR*(optimal selecting Rate)的比率从  $Ab$  中选择  $n$  个与  $Ag$  具有最高亲和力的抗体进行克隆扩增, 产生对应的克隆细胞集合  $C_j$ 。根据克隆选择原理, 抗体与抗原的亲和力越大, 抗体产生的克隆细胞数量越多, 对  $n$  个选择细胞按亲和力从小到大的顺序排序, 克隆细胞的数量按下式计算:

$$N_c = \sum_{i=1}^n \text{int}(\alpha \cdot N / i), \quad n = \text{opR} \times N \quad (11)$$

式中:  $N_c$  为  $n$  个抗体产生的克隆细胞总数;  $\alpha$  为乘数因子, 用于控制克隆群体的规模;  $\text{Int}(\cdot)$  为取整函数。

**Step 3.3** 应用式(12)对克隆的抗体进行随机变异操作, 实现亲和力的成熟, 产生具有更高亲和力的抗体细胞  $C$ :

$$\begin{cases} C = \text{rand}(C_R, N_R) \\ C_R = C_j - \mu(C_j - Ag_j) \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\text{rand}(C_R, N_R)$  为随机函数, 表示从  $C_R$  中随机抽取  $N_R$  个变量,  $\mu$  为抗体的变异率。子代中与抗原具有较大亲和力的抗体具有较小的变异率。因此, 抗体的变异率按式(13)确定:

$$\mu = k \times \exp(-AF_v / \eta) \quad (13)$$

式中:  $AF_v$  为抗体亲和力的标称值,  $k$  为比例因子,  $\eta$  为衰减控制系数。  $k$  与  $\eta$  的合理取值可以保证变异个体在其允许的域值范围[0,1]之内。

**Step 3.4** 计算  $C$  的抗体细胞与抗原  $Ag_j$  的亲和力矢量  $AF_{c_j}$ 。

**Step 3.5** 按照 *rsR*(re-selecting Rate)的比率, 选择  $C$  中若干个与抗原  $Ag_j$  具有最高亲和力的抗体, 作为部分记忆细胞  $M_p$ 。

**Step 3.6** 去掉  $M_p$  中相似度  $s_{ij}$  小于域值  $\sigma_d$  的抗体, 产生新的记忆集  $M_k$ , 实现免疫系统克隆抑制的

效果。抗体的相似度  $s_{ij}$  用抗体间的欧几里德距离描述, 即

$$s_{ij} = \|Ab_i - Ab_j\|_2 = \left( \sum_{k=1}^p (Ab_{ik} - Ab_{jk})^2 \right)^{1/2} \quad (14)$$

**Step 3.7** 把部分记忆细胞  $M_k$  合并到记忆细胞集合  $M$  ( $M \leftarrow [M; M_k]$ )。

**Step 4** 计算  $M$  中各记忆细胞的相似度矢量  $S$ , 去除  $M$  中相似度  $s_{ij}$  低于域值  $\sigma_s$  的抗体, 实现不同克隆集的网络抑制。  $s_{ij}$  按式(14)计算。

**Step 5** 按照 *wSR* (worst selecting Rate) 的比率, 随机产生若干个抗体替换原抗体中亲和力较低的个体, 体现免疫系统的自组织功能。

**Step 6** 变量替换, 返回 **Step 3**, 进行下一代的网络学习, 直到达到要求的学习代数, 或满足设定的聚类迭代要求。

学习过程结束后, 算法的输出  $M$  为聚类数据的记忆数据集。根据待聚类数据与各记忆细胞的距离, 可方便地实现对抗原数据的聚类。

上述聚类算法的核心是保持网络抗体代代克隆、变异及抑制的操作, 最终产生记忆数据集。调节抑制域值  $\sigma_s$  可以控制网络的学习规模和性能, 域值越大, 得到的免疫记忆数据越多, 分类密度越大, 数据的相似性越高。要得到既能充分反映原始数据特征、数据集规模又比较适中的免疫记忆集, 抑制域值的设置是关键, 需要根据具体的分类问题, 合理设置免疫抑制的域值。

## 2 仿真分析

### 2.1 原始数据获取

利用电磁暂态仿真程序(ATP), 采用文献[3]中的仿真模型及参数, 针对不同结构的配电网和不同类型的接地故障做大量的仿真试验, 获得各线路的零序电流信号。暂态信号取为故障前半周期和故障后一个半周期共两个周期的信号, 利用 DB4 小波包对该暂态信号进行 3 层小波包分解, 再根据式(2), 提取暂态故障特征, 得到抗原  $Ag_1$ 。稳态信号取为故障后三个周期后的信号, 利用 FFT 算法, 提取有功分量和五次谐波故障特征, 根据式(3)和式(4), 得到抗原  $Ag_2$  和  $Ag_3$ 。形成的原始数据表如表 1 所示。

### 2.2 人工免疫系统训练

从表 1 的原始数据中随机抽取 600 个数据作为免疫系统的抗原, 应用 1 节中的人工免疫算法进行训练, 得到免疫记忆集  $M$  以及记忆集各抗体之间的相似度矩阵  $S$ , 并用谱系聚类或最小生成树方法对

记忆细胞进行分类；然后根据抗原与各记忆集的亲合度实现小电流接地系统的故障选线。利用其余的原始数据作为测试集，对基于人工免疫算法的故障选线模型进行测试。

表1 原始数据表  
Tab.1 Original data table

线路	暂态分量		有功分量		五次谐波		故障
	$\epsilon_k$	$Ag_1$	$P_k$	$Ag_2$	$S_{5k} \times 10^{-4}$	$Ag_3$	
1	2 182	0.61	514.3	0.8	1094	0.53	是
2	50.11	0.01	11.22	0.02	92	0.04	否
3	127.4	0.04	20.74	0.03	139	0.07	否
4	202.8	0.06	57.44	0.09	183	0.09	否
...	...	...	...	...	...	...	...
2493	1.71	0.07	4.69	0.2	25	0.11	否
2494	3.25	0.12	7.75	0.33	34	0.15	否
2495	4.89	0.19	2.78	0.12	41	0.19	否
2496	15.26	0.58	3.78	0.16	95	0.43	是

算法中的参数设置如下： $N=30$ ， $opR=20\%$ ， $\alpha=1$ ， $rsR=20\%$ ， $wsR=10\%$ ，最大迭代次数  $NC=90$ ； $\sigma_d=0.005$ ， $\sigma_s=0.05$ 。

经过 90 代训练后，免疫系统将整个数据信息记忆到最终由 22 个数据组成的记忆数据集中，记忆数据集同抗原数据之间具有较大的平均亲和力，免疫记忆数据集的规模适中，是一种较为理想的数据分类结构。为直观起见，将由人工免疫算法得到的记忆数据的网络结构应用最小生成树的概念描述如图 2 所示。由图可知 22 个记忆数据被清晰地分成了 8 类。根据专家经验可知，I~VII 类为故障线路类，VIII 类为非故障线路类。通过采用重心法计算各原始数据与记忆类重心之间的距离进行聚类，从而实现故障选线。

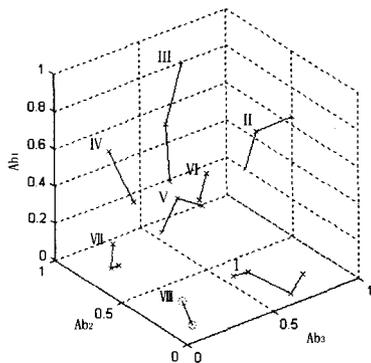


图 2 数据分类结果

Fig.2 Network structure of clustered data

### 2.3 故障选线模型的验证

用除训练数据外的所有 1 896 个原始数据对人

工免疫选线模型进行测试。由测试结果知，选线的正确率为 99.1%，所以该人工免疫选线模型正确、有效。其中，在电压初始相位为  $90^\circ$ ， $L_1$  在 90% 处经过  $5\Omega$  过渡电阻接地时，接地后  $L_1$  和  $L_6$  的零序电流信号如图 3 所示。各条线路的故障特征数据和模型聚类结果如表 2 所示。由表可知， $L_1$  为故障线路；其他线路为非故障线路，选线结果正确。

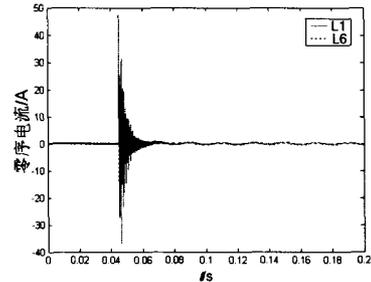


图 3 故障线路和非故障线路的零序电流

Fig.3 Zero sequence current of faulty line and sound line

表 2 各线路的故障特征和模型输出  
Tab.2 Fault characteristics and model output of lines

线路	小波包分析		五次谐波		有功分量		模型输出
	$\epsilon_k$	$Ag_1$	$S_k$	$Ag_3$	$P_k$	$Ag_2$	
1	151.758	0.46	0.010 1	0.46	25.665	0.4	III
2	14.352 7	0.04	0.001 2	0.05	3.731 9	0.06	VIII
3	31.500 2	0.09	0.001 7	0.08	5.615 4	0.09	VIII
4	17.436 6	0.05	0.002 3	0.1	7.497 6	0.12	VIII
5	57.050 4	0.17	0.002 9	0.13	9.390 9	0.15	VIII
6	59.914 9	0.18	0.003 8	0.17	12.584	0.2	VIII

## 4 结论

本文针对小电流接地系统单相接地故障选线困难、单一选线方式难以精确判断的问题，提出了基于人工免疫算法的信息融合故障选线方法。该方法综合了各种故障信息，克服了各种干扰的影响，提高了故障检测的精度和鲁棒性。仿真试验表明该方法准确、有效。

### 参考文献

- [1] 董新洲, 毕见广. 配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 1-6.  
DONG Xin-zhou, BI Jian-guang. Analysis on Transient Traveling Wave and Study on Fault Line Selection for Distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 1-6.
- [2] 庞清乐, 孙同景, 孙波, 等. 基于小波包分析的配电网故障选线新方法[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(4):

- 19-22.  
PANG Qing-le, SUN Tong-jing, SUN Bo, et al. Faulty Line Detection Based on Wavelet Packet Analysis for Distribution Network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(4): 19-22.
- [3] 庞清乐, 孙同景, 钟卖英, 等. 基于粗集理论的小电流接地系统故障选线[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 60-64.  
PANG Qing-le, SUN Tong-jing, ZHONG Mai-ying, et al. Fault Line Detection Based on Rough Set Theory in Indirectly Grounding Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 60-64.
- [4] 牟龙华. 零序电流有功分量方向接地选线保护原理[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 60-62.  
MU Long-hua. Principle of Selective Grounding Fault Protection Based on Active Component Direction of Zero Sequence Current[J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 60-62.
- [5] 齐郑, 杨以涵. 中性点非有效接地系统单相接地选线技术分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 1-5.  
QI Zheng, YANG Yi-han. Analysis of Technology of Fault Line Selection for Single Phase to Earth Faults in Neutral Point Non-effectively Grounded System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 1-5.
- [6] 庞清乐, 孙同景, 穆健, 等. 基于神经网络的中性点经消弧线圈接地系统故障选线方法[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 78-81.  
PANG Qing-le, SUN Tong-jing, MU Jian, et al. Neural Network Based faulty Line Detection Method for Power System with Neutral Grounding Via Arc Suppression Coil[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 78-81.
- [7] 庞清乐, 孙同景, 钟卖英. 基于粗糙集理论的配电网故障选线装置研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 37-41.  
PANG Qing-le, SUN Tong-jing, ZHONG Mai-ying. Research on Fault Line Detection Device for Distribution Networks Based on the Rough Set Theory[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 37-41.
- [8] 庞清乐, 孙同景, 孙波, 等. 基于蚁群算法的神经网络配电网故障选线方法[J]. 继电器, 2007, 35(16): 1-6.  
PANG Qing-le, SUN Tong-jing, SUN bo, et al. Ant Colony Algorithm and Neural Network Based Fault Line Detection Method for Distribution Network[J]. Relay, 2007, 35(16): 1-6.
- [9] 焦李成, 杜海峰. 人工免疫系统进展与展望 [J]. 电子学报, 2003, 31 (10): 1540-1547.  
JIAO Li-cheng, DU Hai-feng. Development and Project of the Artificial Immune System[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31 (10): 1540-1547.
- [10] Cater J H. The Immune System as a Model for Pattern Recognition and Classification[J]. Journal of the American Medical Informatics Association, 2000, 7(1): 28-41.
- [11] De Castro L N, Von Zuben F J. Learning and Optimization Using the Clonal Selection Principle[J]. IEEE Trans on Evolution Computation, 2002, 6(3): 239-251.
- [12] 肖力. 基于改进免疫算法的电力系统最优潮流计算[J]. 继电器, 2007, 35(18): 21-24.  
XIAO Li. Based on Improvement Immunity Algorithm Electrical Power System Optimal Power Flow Computation[J]. Relay, 2007, 35(18): 21-24.
- [13] 何友林, 张洪涛, 郭创新, 等. 抗体克隆算法在配电网重构中的应用[J]. 继电器, 2007, 35(16): 22-26, 43.  
HE You-lin, ZHANG Hong-tao, GUO Chuang-xin, et al. Application of Antibody Clone Algorithm for Distribution Network Reconfiguration[J]. Relay, 2007, 35(16): 22-26, 43.
- [14] 卢志刚, 周凌, 杨丽军, 等. 基于人工免疫加权支持向量机的电力负荷预测[J]. 继电器, 2005, 33(24): 42-44, 71.  
LU Zhi-gang, ZHOU Ling, YANG Li-jun, et al. Power Load Forecasting Based on Artificial Immune Algorithm-weighted-SVM Model[J]. Relay, 2005, 33(24): 42-44, 71.

收稿日期: 2008-12-31; 修回日期: 2009-04-08

作者简介:

庞清乐 (1969-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为计算机先进控制及其在配电网故障检测中的应用;  
E-mail: stefam@163.com

陈生银 (1972-), 男, 工程师, 长期从事电力工程技术管理工作。