

# 一种基于 ANFIS 的配电网故障分类方法及其适应性分析

张 钧, 何正友, 谭熙静

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 基于自适应神经模糊推理系统, 利用配电网系统故障后产生的丰富的暂态信号, 设计了一种用于谐振接地配电系统故障分类方法。在 PSCAD/EMTDC 中建立了仿真模型, 分别仿真研究了该方法在不同信噪比、电弧故障、不同负荷水平以及不同系统等效阻抗四种工况下的适应性。通过仿真结果得出, 在电弧故障和不同系统等效阻抗两种工况下, 分类方法具有较强的适应性; 而在信噪比较低以及负荷加重工况下, 分类的准确性和过渡电阻的大小相关。提出应增加滤波器环节和增加重负荷工况下的训练样本以提高分类方法的准确性。

**关键词:** 配电网; 故障分类; 自适应神经模糊推理系统; 电弧故障; 适应性

## An ANFIS based fault classification in distribution network and its adaptability analysis

ZHANG Jun, HE Zheng-you, TAN Xi-jing

(School of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Based on Adaptive Neural Fuzzy Inference System (ANFIS), the fault classification technique for neutral resonance grounding distribution network which utilizes abundant transient signals after fault occurs at distribution network is proposed. The simulation model is established in PSCAD/EMTDC environment. Through simulation, the adaptability of proposed technique to noises, arc faults, different load levels and different source equivalent impedances is studied respectively. From the simulation results, it can be concluded that the adaptability of the proposed technique to arc faults and different source equivalent impedances is good; but in the case of low signal noise ratio and heavy load working condition, the accuracy of classification relates with the magnitude of transition resistance. To enhance the accuracy of proposed technique, it is proposed to add filter and train samples in heavy load situation.

This work supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50877068).

**Key words:** distribution network; fault classification; adaptive neural fuzzy inference system; arc fault; adaptability

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)04-0023-07

## 0 引言

当今电力公司对配电网的建设越来越重视, 这表现为配电网信息化、自动化的不断推进, 甚至目前智能配电网的粉墨登场, 另外现代电力用户对电力的可靠连续供应提出了更高的要求。配电网的故障分类为操作员提供故障类型信息, 而且作为故障选线<sup>[1]</sup>、定位<sup>[2]</sup>等故障诊断的基础, 准确的故障分类结果是分析故障、提高供电可靠性的有力手段。故障分类需要能准确、快速地判断出发生故障的类别(AG、BG、CG、ABG、ACG、BCG、ABC/ABCG、AB、AC 和 BC)<sup>[3-4]</sup>。在实际运行中, 复杂的故障工

况以及存在的噪声, 给准确的故障分类造成困难, 尤其是过渡电阻较大时, 要准确的判断出故障类型更为困难<sup>[5]</sup>。文献[5-7]依据不同故障类型下稳态三相电流的序分量的幅值及相位的不同, 建立分类判据, 以此得到故障类型。但是, 文献中基于人工建立隶属度函数的方法无法根据实际系统运行工况自适应地进行调整。文献[8]利用平稳小波变换对所内故障电流/电压信号进行预处理, 提取频带能量, 通过与既定硬阈值之间的比较得出故障相别。但是硬阈值的设定需要依靠专家经验, 易受不同系统不同配置的影响。

目前, 随着配电网自动化的推进以及计算机科学的快速发展, 为配电网故障分类方法研究的提供了新的研究思路。本文利用系统故障后产生的丰富的暂态信号, 设计了一个基于 ANFIS (Adaptive

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50877068); 教育部优秀新世纪人才支持计划项目(NCET-06-0799)

Network-based Fuzzy Inference System, ANFIS) 的谐振接地配电系统故障分类方法, 并对该方法在噪声、电弧、不同负荷水平、不同系统等效阻抗工况下的适应性进行了分析。通过仿真结果表明, 该方法的分类准确性高, 适应性良好。

### 1 ANFIS 的基本原理

自适应模糊神经网络是结合模糊推理系统与神经网络的智能方法, 它融合了两者的优点, 即神经网络的学习机制和模糊系统的推理能力, 弥补单个方法存在的不足, 因此被广泛应用于模式识别和智能控制领域。假定系统为二输入( $x, y$ ), 单输出( $f$ )的系统, 采用一阶 Sugeno 模型, 则有两条 if-then 如下:

规则 1: if  $x$  is  $A_1$  and  $y$  is  $B_1$  then  $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$ ;

规则 2: if  $x$  is  $A_2$  and  $y$  is  $B_2$  then  $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$ ;

其对应的 ANFIS 结构框架如图 1 所示。

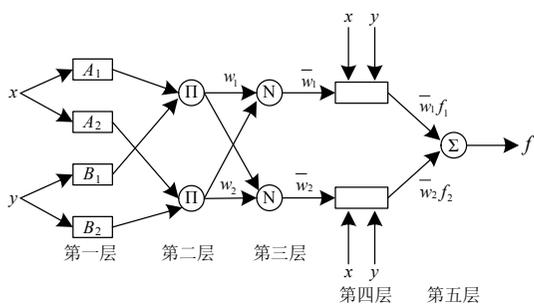


图 1 ANFIS 的结构框架

Fig.1 Structure frame of ANFIS

如图 1 所示, ANFIS 可以分为 5 层:

第一层: 模糊化层, 输出对应模糊集的隶属度:

$$O_{i1} = \begin{cases} \mu_{A_i}(x) & i = 1, 2 \\ \mu_{B_{i-2}}(y) & i = 3, 4 \end{cases} \quad (1)$$

其中  $O_{i1}$  为第 1 层的第  $i$  个节点的输出;  $x$  和  $y$  为节点的输入; 函数  $\mu$  为满足条件的隶属度函数。

第二层: 形成模糊化规则, 输出为相应输入信号的乘积, 图中用  $\Pi$  表示, 输出  $w_1$  表示一条规则的激励强度。

第三层: 归一化计算, 图中用  $N$  来表示。

第四层: 计算对应每条规则产生的输出信号, 其输出为:

$$O_{i4} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

其中:  $O_{i4}$  为第 4 层的第  $i$  个节点的输出, 参数  $p_i$ 、 $q_i$  和  $r_i$  称为后件参数, 由训练 ANFIS 得到。

第五层: 对所有信号求和, 得到系统的输出。

### 2 基于 ANFIS 的故障分类方法

首先提取所内母线三相电压和变压器二次侧出口处的三相电流, 分别计算零序电压量和故障后的三相电流的故障分量, 本文按式 (3) 和 (4)。计算:

$$u_0(t) = u_a(t) + u_b(t) + u_c(t), \quad (3)$$

$$i_p^*(t) = i_p(t) - i_p(t-T). \quad (4)$$

式中,  $u_0(t)$ ,  $i_p^*(t)$  分别为求出的零序电压量和三相电流故障分量;  $i_p(t)$  为故障后第一个工频周期内的三相电流,  $p=a, b, c$ ;  $T$  为工频周期。选择样条小波<sup>[9]</sup>对故障后一个工频周波的  $i_a^*(t)$ ,  $i_b^*(t)$  和  $i_c^*(t)$  分别进行小波变换。由于本文中的信号采样频率为 10 kHz, 因此对电流信号进行 3 层小波分解后, 重构 2, 3 层的小波细节系数, 可以得知, 重构得到的信号的频率范围为 625~2.5 kHz。显然将重构后的信号直接输入 ANFIS 是不现实的, 因为这会使 ANFIS 的输入达到 200 个。由于统计量能充分表征重构信号的波形和能量, 笔者通过对 12 个常用统计量<sup>[10]</sup>的分析和比较, 最后选取每两相之间的相关系数  $\rho_{a,b}$ 、 $\rho_{a,c}$ 、 $\rho_{b,c}$  和每相的标么化标准差  $s_a^*$ 、 $s_b^*$ 、 $s_c^*$  为 ANFIS 的输入, 公式如(5)~(10)所示。

$$s_p = \left( \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (i_p^*(n) - E(i_p^*)) \right)^2 \quad (5)$$

$$s_{\max} = \max(s_p) \quad p = a, b, c \quad (6)$$

$$s_p^* = \frac{s_p}{s_{\max}} \quad (7)$$

$$\rho_{a,b} = \left| \frac{E(i_a^* i_b^*) - E(i_a^*) E(i_b^*)}{\sqrt{E(i_a^*)^2 - E^2(i_a^*)} \sqrt{E(i_b^*)^2 - E^2(i_b^*)}} \right| \quad (8)$$

$$\rho_{a,c} = \left| \frac{E(i_a^* i_c^*) - E(i_a^*) E(i_c^*)}{\sqrt{E(i_a^*)^2 - E^2(i_a^*)} \sqrt{E(i_c^*)^2 - E^2(i_c^*)}} \right| \quad (9)$$

$$\rho_{b,c} = \left| \frac{E(i_b^* i_c^*) - E(i_b^*) E(i_c^*)}{\sqrt{E(i_b^*)^2 - E^2(i_b^*)} \sqrt{E(i_c^*)^2 - E^2(i_c^*)}} \right| \quad (10)$$

式中:  $n=200$  为一个工频周期的采样点数;  $E(x)$  为求变量  $x$  的数学期望;  $p$  为相别  $a, b, c$ 。

对计算得到的  $u_0(t)$  只进行 FFT 变换, 提取 50 Hz 分量的幅值  $U_0$  作为判别是否发生接地故障的特征。

由上述 7 个特征量构造三个 ANFIS 输入特征向

量如式 (11) 和 (12) 所示。

$$C_1 = [s_a^* \ s_b^* \ s_c^* \ U_0], \quad (11)$$

$$C_2 = C_3 = [\rho_{a,b} \ \rho_{a,c} \ \rho_{b,c} \ s_a^* \ s_b^* \ s_c^*]. \quad (12)$$

故障分类有三个 ANFIS 分类器实现各不相同的功能, 如图 2 所示。

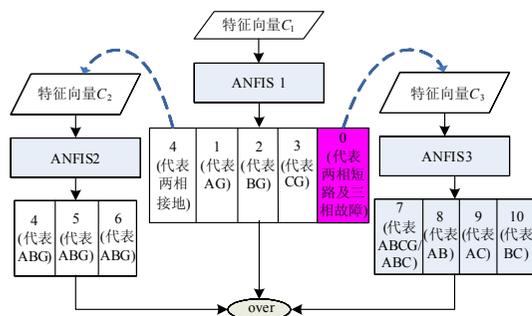


图 2 故障分类示意图

Fig.2 Sketch of fault classification

ANFIS1 有 4 个输入, 16 条规则, 每个输入均有两个隶属度函数, 类型为高斯函数; ANFIS2 和 ANFIS3 均具有 6 个输入, 64 条规则, 每个输入均有两个隶属度函数, 类型为高斯函数。

### 3 仿真分析

#### 3.1 仿真模型

本文的仿真模型建立在 IEEE34 节点测试模型<sup>[11]</sup>基础上, 对其做了适当修改, 以变为小电流接地系统, 拓扑如图 3 所示。

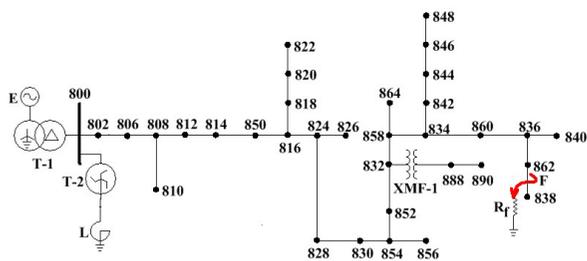


图 3 仿真模型示意图

Fig.3 Sketch of simulation model

图中 E 为电源, 等效阻抗  $Z_s=2.3+j18.4 \ \Omega$ , T-1 为变电所变压器, T-2 为 Zig-Zag 变压器, 变压器均采用文献[12]中的高频模型。L=7.8H 为补偿电抗, 过补偿 10%。F 为故障点,  $R_f$  表示过渡电阻。馈线的零序阻抗:  $z_0=0.52+j1.5 \ \Omega/\text{km}$ ; 正/负序阻抗:  $z_1=z_2=0.26+j0.37 \ \Omega/\text{km}$ ; 零序电纳:  $b_0=j0.15 \times 10^{-5} \ \text{s/km}$ ; 正/负序电纳:  $b_1=b_2=j0.31 \times 10^{-5} \ \text{s/km}$ , 线路长度与标准测试模型<sup>[11]</sup>一致。

#### 3.2 ANFIS 的训练与测试

训练样本为 3600 个, 故障工况为 802、810、814、822、826、856、864、844、838、840 节点发生 10 种故障, 故障初相角分别为  $0^\circ$ 、 $18^\circ$ 、 $36^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $126^\circ$ 、 $162^\circ$  (A 相为参考), 过渡电阻分别为  $0 \ \Omega$ 、 $50 \ \Omega$ 、 $100 \ \Omega$ 、 $200 \ \Omega$ 、 $500 \ \Omega$ 、 $1 \ \text{k}\Omega$ 。得到的仿真数据对 3 个 ANFIS 进行训练, 训练结束的条件为均方根误差小于 0.0003 或训练次数达到 10 000。得到训练完后各个 ANFIS 的收敛曲线如图 4 所示。

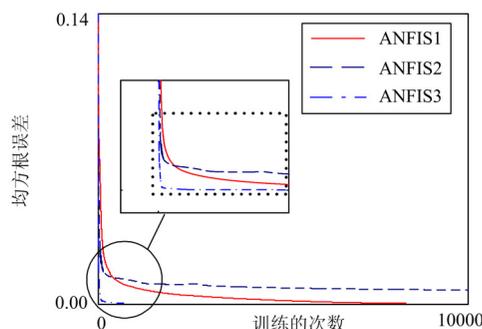


图 4 训练结束后的误差曲线

Fig.4 Error curves after train completed

经考察, ANFIS1 和 ANFIS3 分别在 8328 步和 703 步时达到收敛误差条件 0.0003, 训练停止。而 ANFIS2 在训练步数达到最大时停止, 最后的均方根误差约为 0.0067。

#### 3.3 ANFIS 的测试

3 600 个测试样本的故障工况与训练样本的均不相同, 详细情况如表 1 所列。

限于篇幅, 不能将所有测试样本的分类结果列出。因此对分类结果进行统计, 得到的正确率如表 2 所列。

表 1 测试样本

Tab.1 Test cases

故障点位置	过渡电阻/ $\Omega$	故障初相角/ $^\circ$	样本个数
806,816,818,830	0,5,10,25,40,50	0,18,54,72,108,144	1440
812	0,50,100,200,500,1 000	0,18,36,90,126,162	360
832,834	20,70,150,300,600,1 200	18,54,72,90,108,144	720
848,860,862	20,70,150,300,1 200,1 500	18,54,72,90,108,144	1 080
合计			3 600

可以看出, 分类结果的准确率较高, 而且经过考察, 当过渡电阻达到  $1 200 \ \Omega$  和  $1 500 \ \Omega$  时, 分类结果仍然正确。

表 2 测试样本分类的统计结果

Tab.2 Statistic results of test cases

分类器	输出 (故障类型)	样本个数	正确率/%
ANFIS1	1 (AG)	360	100
	2 (BG)	360	100
	3 (CG)	360	99.4
	4 (两相接地)	1080	99.8
	0 (非接地故障)	1440	100
ANFIS2	4 (ABG)	360	99.4
	5 (ACG)	360	100
	6 (BCG)	360	99.7
ANFIS3	7 (ABC/ABCG)	360	100
	8 (AB)	360	100
	9 (AC)	360	100
	10 (BC)	360	100

## 4 适应性分析

### 4.1 噪声的干扰

实际的录波数据存在或多或少的噪声, 研究分类方法在存在噪声情况下的适应性非常必要。本文对表 1 中的测试样本分别加入不同信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)的高斯白噪声, 考察分类方法的准确性, 所得到的统计结果如表 3~5 所示。

表 3 SNR=60 dB 时测试样本的统计结果

Tab.3 Statistic results of test cases with SNR=60 dB

分类器	故障类型	样本个数	正确率/%
ANFIS1	1 (AG)	360	100
	2 (BG)	360	100
	3 (CG)	360	99.4
	4 (两相接地)	1080	99.9
	0 (非接地故障)	1440	100
ANFIS2	4 (ABG)	360	99.7
	5 (ACG)	360	100
	6 (BCG)	360	99.7
ANFIS3	7 (ABC/ABCG)	360	100
	8 (AB)	360	100
	9 (AC)	360	100
	10 (BC)	360	100

表 4 SNR=50 dB 时测试样本的统计结果

Tab.4 Statistic results of test cases with SNR=50 dB

分类器	故障类型	样本个数	正确率/%
ANFIS1	1 (AG)	360	98.3
	2 (BG)	360	98.1
	3 (CG)	360	93.1
	4 (两相接地)	1080	99.7
	0 (非接地故障)	1440	100
ANFIS2	4 (ABG)	360	99.4
	5 (ACG)	360	100
	6 (BCG)	360	99.7
ANFIS3	7 (ABC/ABCG)	360	100
	8 (AB)	360	100
	9 (AC)	360	100
	10 (BC)	360	100

表 5 SNR=40 dB 时测试样本的统计结果

Tab.5 Statistic results of test cases with SNR=40 dB

分类器	故障类型	样本个数	正确率/%
ANFIS1	1 (AG)	360	78.7
	2 (BG)	360	83.6
	3 (CG)	360	80.3
	4 (两相接地)	1080	93.4
	0 (非接地故障)	1440	100
ANFIS2	4 (ABG)	360	95
	5 (ACG)	360	93.3
	6 (BCG)	360	91.4
ANFIS3	7 (ABC/ABCG)	360	100
	8 (AB)	360	100
	9 (AC)	360	100
	10 (BC)	360	100

由表 3~5 可以看出, 随着 SNR 减小, 分类的准确性下降。当 SNR=40 dB, 对接地故障分类的准确性大大下降。考察 848 节点发生 A 相接地故障, SNR=40 dB, 过渡电阻 1 200 Ω, 故障初相角 18° 时, 未加噪声和加入噪声情况下三相电流暂态信号的波形如图 5 所示。

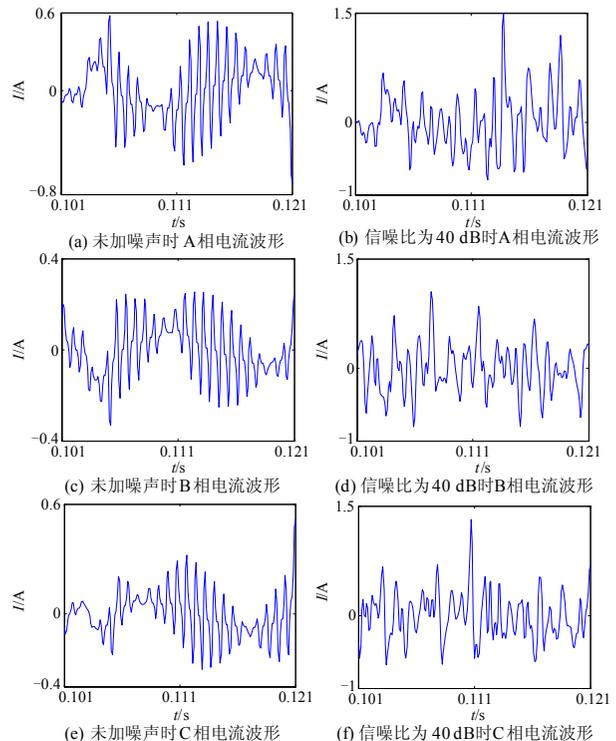


图 5 加噪声和未加噪声三相电流暂态信号对比

Fig.5 Comparison of three phase currents signal transient with and without noise

可以看出, 在该工况下原始波形的幅值本身较小, 加入噪声 SNR=40 dB 后, 信号波形几乎完全淹

没在噪声中, 致使分类器无法分辨。经过研究, 在相同的信噪比情况下, 过渡电阻的大小对分类的准确性影响最大。以测试样本中的 848 节点故障加入 SNR=40 dB 噪声为例, 分类方法对 20  $\Omega$ , 70  $\Omega$ , 150  $\Omega$  和 300  $\Omega$  过渡电阻单相接地故障分类的正确率为 98.6%, 两相接地故障分类的正确率为 100%; 而对 1200  $\Omega$  和 1500  $\Omega$  的过渡电阻单相接地故障分类的正确率仅为 5.6%, 两相接地故障分类的正确率仅为 61%, 因此在实际应用时可以加入滤波器以提高分类方法的准确性。

#### 4.2 电弧接地

电弧接地与金属性接地及固定电阻接地不同, 电弧形成的接地电阻是非线性的, 而且电阻值受外界风速、温度等因素的影响, 随时间不断地变化。笔者在 PSCAD/EMTDC 中建立了电弧模型, 模型采用被广泛使用的 Mustafa Kizilcay 所建立的模型<sup>[13]</sup>, 该模型基于弧柱内能量平衡的观点, 通过电弧电导的微分方程来描述电弧, 如式 (13) 所示。

$$dg/dt = 1/\tau \times (G - g) \quad (13)$$

式中:  $\tau$  为电弧时间常数,  $g$  为瞬时电弧电导;  $G$  为稳态电弧电纳。根据文献[13]中给出的 10 kV 配电网电弧参数的平均值得到所建电弧的伏安特性如图 6 所示。

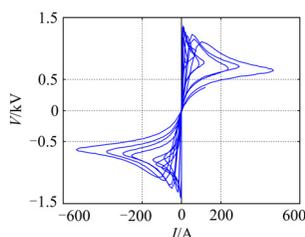


图 6 电弧的伏安特性

Fig.6 V-I character of arc

另外, 给出电弧的熄弧条件为<sup>[13]</sup>:

$$g_{\min} = 50 \mu\text{s}\cdot\text{m} \quad (14)$$

$$dr/dt|_{\min} = 20 \text{ M}\Omega/(\text{s}\cdot\text{m}) \quad (15)$$

式中:  $g_{\min}$  为单位长度的最小电弧电导;  $r$  为单位长度的电弧电阻。

因为文献[13]中只给出了单相接地故障下电弧模型的拟合参数, 因此本文对分类方法分类单相电弧接地的能力进行测试, 所得结果如表 6 所列。

表 6 电弧故障测试样本的统计结果

Tab.6 Statistic results of test cases with arc fault

分类器	故障类型	样本个数	正确率
ANFIS1	1 (AG)	360	98.6
	2 (BG)	360	98.3
	3 (CG)	360	100

将表 6 与表 2 对比可以看出, 电弧故障并没有单纯使准确率下降, 因为 CG 的判别准确率反而提高。总体准确率稍有下降, 但仍在可接受范围内, 因此, 电弧形成的非线性电阻对该分类方法的影响很小。

#### 4.3 负荷变化

实际配电系统的负荷水平是不断变化的, 假设系统的负荷水平分别为正常负荷水平的 1/2 和 1 倍情况下, 对分类方法的适应性进行考察, 得到测试样本的统计结果如表 7 和 8 所列。

由表 7 和 8 可以看出, 负荷水平的下降对分类准确性影响很小, 而负荷水平的升高将导致分类准确率的下降。因此, 在训练 ANFIS 时应增加加重负荷工况下的训练样本, 以提高分类方法的正确率。

表 7 负荷水平为正常的 1/2 时测试样本的统计结果

Tab.7 Statistic results of test cases with half normal loads

分类器	故障类型	样本个数	正确率/%
ANFIS1	1 (AG)	360	100
	2 (BG)	360	100
	3 (CG)	360	100
	4 (两相接地)	1080	99.7
	0 (非接地故障)	1440	100
ANFIS2	4 (ABG)	360	99.2
	5 (ACG)	360	100
	6 (BCG)	360	99.7
ANFIS3	7 (ABC/ABCG)	360	100
	8 (AB)	360	100
	9 (AC)	360	100
	10 (BC)	360	100

表 8 负荷水平为正常的 1 倍时测试样本的统计结果

Tab.8 Statistic results of test cases with double normal loads

分类器	故障类型	样本个数	正确率/%
ANFIS1	1 (AG)	360	89.2
	2 (BG)	360	88.9
	3 (CG)	360	83.3
	4 (两相接地)	1080	99.3
	0 (非接地故障)	1440	100
ANFIS2	4 (ABG)	360	99.7
	5 (ACG)	360	100
	6 (BCG)	360	99.7
ANFIS3	7 (ABC/ABCG)	360	100
	8 (AB)	360	100
	9 (AC)	360	100
	10 (BC)	360	100

#### 4.4 系统侧等效阻抗的变化

考虑到实际中配电网电源侧的等效阻抗常会发生变化。当等效阻抗如表 9 变化时, 对分类方法的分类能力进行考察, 所得结果如表 10 和表 11 所列。

由于表 9 中工况 No.3、4、5 的统计结果和表 11 一致，文中不再重列。

从表 10 和表 11 可以看出，系统侧等效阻抗的变化不会降低该方法的分类准确性。

表 9 系统侧等效阻抗的变化工况

Tab.9 Variance conditions of source equivalent resistance

No.	系统侧的等效阻抗
1	幅值降低 70%
2	幅值降低 50%
3	阻抗角变为 20°
4	阻抗角变为 50°
5	幅值升高 100%

表 10 No.1 工况下测试样本的统计结果

Tab.10 Statistic results of test cases under No.1 condition

分类器	故障类型	样本个数	正确率/%
ANFIS1	1 (AG)	360	100
	2 (BG)	360	100
	3 (CG)	360	100
	4 (两相接地)	1080	99.9
	0 (非接地故障)	1440	100
ANFIS2	4 (ABG)	360	100
	5 (ACG)	360	100
	6 (BCG)	360	99.7
ANFIS3	7 (ABC/ABCG)	360	100
	8 (AB)	360	100
	9 (AC)	360	100
	10 (BC)	360	100

表 11 No.2 工况下测试样本的统计结果

Tab.11 Statistic results of test cases under No.2 condition

分类器	故障类型	样本个数	正确率/%
ANFIS1	1 (AG)	360	100
	2 (BG)	360	100
	3 (CG)	360	99.7
	4 (两相接地)	1080	99.7
	0 (非接地故障)	1440	100
ANFIS2	4 (ABG)	360	100
	5 (ACG)	360	100
	6 (BCG)	360	99.4
ANFIS3	7 (ABC/ABCG)	360	100
	8 (AB)	360	100
	9 (AC)	360	100
	10 (BC)	360	100

## 5 结论

本文对 ANFIS 的基本原理进行了研究，并设计了一个基于 ANFIS 的故障分类方法，将其应用于谐振接地配电网系统中，对该方法的适应性进行研究，通过大量仿真得到以下结论：

1) 基于 ANFIS 的故障分类方法在应用于谐振接地配电网系统时，正确率高，可以达到 99%。

2) 随着信噪比的降低，分类方法的准确率下降。在信噪比大于 50dB 时，适应性较强，但当信噪比低至 40dB 时，对接地故障的分类准确率下降。另外，相同信噪比下，分类准确率和过渡电阻的大小紧密相关，随着接地电阻值的升高，分类准确率下降。在应用与实际时，可加入滤波器提高分类方法的正确率。

3) 负荷减轻时，方法的适应性强；但随着负荷的加重，分类方法的准确率下降。因此，在训练 ANFIS 时，应增加重负荷工况下的训练样本。

4) 电弧故障形成的非线性接地电阻以及系统侧等效阻抗的变化不会降低该方法的分类正确率，方法具有良好的适应性。

## 参考文献

- [1] 张保会, 赵慧梅, 张文豪, 等. 基于特征频带内暂态零序电流特点的配电网单相接地故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(13): 5-10.  
ZHANG Bao-hui, ZHAO Hui-mei, ZHANG Wen-hao, et al. Faulty line selection by comparing the amplitudes of transient zero sequence current in the special frequency band for power distribution networks[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(13): 5-10.
- [2] 马士聪, 高厚磊, 徐丙垠, 等. 配电网故障定位技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 120-124.  
MA Shi-cong, GAO Hou-lei, XU Bing-yin, et al. A survey of fault location methods in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 120-124.
- [3] 林湘宁, 刘沛, 高艳. 基于故障暂态和数学形态学的超高速线路方向保护[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 13-18.  
LIN Xiang-ning, LIU Pei, GAO Yan. Ultra-high-speed line directional protection based on transient and mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 13-18.
- [4] 段建东, 张保会, 周艺. 利用电流行波进行超高压输电线路故障类型识别的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 58-63.  
DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui, ZHOU Yi. Study of fault-type identification using current traveling-waves in extra-high-voltage transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 58-63.
- [5] Hou D Q, Fischer N. Deterministic high-impedance fault detection and phase selection on ungrounded distribution systems[C]. //Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and

- Distributed Resources. 2006: 112-122.
- [6] Podvin H. A fuzzy-logic-based fault recognition method using phase angles between current symmetrical components in automatic DFR record analysis[C]. //Power Tech, 2005 IEEE. Russia: 2005:1-6.
- [7] Das B. Fuzzy logic-based fault-type identification in unbalanced radial power distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 278-285.
- [8] Salim R H, de Oliveira K, Filomena A D, et al. Hybrid fault diagnosis scheme implementation for power distribution systems automation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 1846-1856.
- [9] Dong X Z, Shi S X. Identifying single-phase-to-ground fault feeder in neutral noneffectively grounded distribution system using wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 1829-1837.
- [10] Stefanoiu D, Ionescu F. A fuzzy-statistical reasoning model for bearings fault diagnosis[C]. //2002 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2002, 7(6).
- [11] Kersting W H. Radial distribution test feeders[C].// Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE. 2001: 908-912.
- [12] Borghetti A, Bosetti M, Di Silvestro M, et al. Continuous-wavelet transform for fault location in distribution power networks: definition of mother wavelets inferred from fault originated transients[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 380-388.
- [13] Kizilcay M, Seta P. Digital simulation of fault arcs in medium-voltage distribution networks[C]. //15th Power Systems Computation Conference, PSCC. Liege, Belgium: 2005.

收稿日期: 2010-02-07; 修回日期: 2010-06-08

作者简介:

张 钧(1982-), 男, 博士研究生, 研究方向为配电网故障诊断、故障选线、故障定位; E-mail: popo\_zhj@foxmail.com

何正友(1970-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事小波分析在电力系统故障分析中的应用、新型继电保护原理、配网综合自动化等方向的研究工作;

谭熙静(1987-), 女, 硕士研究生, 研究方向为轨道交通综合监控系统可靠性。

(上接第 22 页 continued from page 22)

- LI Xin-ran, HE Ren-mu, ZHANG Jian, et al. Effect of load characteristics on power system steady-state voltage stability and the practical criterion of voltage stability[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19 (4) : 26-30.
- [13] 麻常辉, 薛禹胜, 王小英. 基于静态和动态安全风险的输电规划: (二) 计及注入功率的不确定性[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (14) : 10-13.
- MA Chang-hui, XUE Yu-sheng, WANG Xiao-ying. Optimal transmission planning based on both static and dynamic risks: part two with uncertain injection power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (14) : 10-13.
- [14] 王守相, 赵玮, 王成山. 计及不确定性的预想事故自动选择区间方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (20) : 27-31.
- WANG Shou-xiang, ZHAO Wei, WANG Cheng-shan. Automatic contingency selection based on interval method considering uncertainty of generation and load condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (20) : 27-31.
- [15] 王守相, 武志峰, 王成山. 计及不确定性的电力系统直流潮流的区间算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (5) : 18-23.
- WANG Shou-xiang, WU Zhi-feng, WANG Cheng-shan. Interval algorithm of DC power flow considering uncertainty in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (5) : 18-23.
- [16] 李文沅. 电力系统风险评估[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [17] 熊信良, 吴耀武. 遗传算法及其在电力系统中的应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [18] Lee K Y, Yang F F. Optimal reactive power planning using evolutionary algorithms: a comparative study for evolutionary programming evolutionary strategy, genetic algorithm, and linear programming[J]. IEEE Trans on PS, 1998, 13 (1) : 101-108.
- [19] 张伯明, 陈寿松. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996: 309-313.

收稿日期: 2010-03-03; 修回日期: 2010-05-28

作者简介:

谢开贵(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析与计算、规划与可靠性, 电力市场及人工智能等方面的研究; E-mail: kaiguixie@yahoo.com.cn

肖 畅(1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统无功优化的研究。