

DOI: 10.7667/PSPC150810

## 基于模糊逻辑的可控串补线路故障分类

闫旭<sup>1</sup>, 李春明<sup>2</sup>

(1. 内蒙古工业大学电力学院, 内蒙古自治区 呼和浩特 010000;  
2. 内蒙古工业大学信息工程学院, 内蒙古自治区 呼和浩特 010000)

**摘要:** 提出一种基于模糊逻辑的可控串补线路故障分类方法。采集故障后半个周期的三相电流数据, 选取 db4 小波作为小波基, 使用离散小波变换(DWT)分解电流暂态信号, 将小波分解系数划分为三个频带, 计算每个频带的小波奇异熵, 获得能反映不同故障的故障特征量。将特征量作为模糊逻辑的输入, 构建模糊故障分类系统。在 Matlab 环境下建立电力系统模型, 选择 500kV、300 km 超高压输电线路进行故障仿真。仿真结果表明, 不同的 TCSC 触发角下, 该算法不受故障阻抗、故障初始角、故障类型、故障位置的影响, 可以准确检测故障, 完成故障分类。

**关键词:** 可控补偿输电线路; 故障分类; TCSC; DWT; 模糊逻辑

### Fuzzy-logic-based fault classification in a series compensated transmission line

YAN Xu<sup>1</sup>, LI Chunming<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010000, China;  
2. College of Information Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010000, China)

**Abstract:** This paper presents a fuzzy-logic technique for fault classification in a series compensated transmission line. The proposed method uses the samples of three line currents for half cycle duration to accomplish this task. Daubechies wavelet “dB4” is used with single level decomposition. The features of the line currents are extracted using discrete wavelet transform. The wavelet decomposition coefficient are divided into three bands to calculate the wavelet singular entropy of every frequency band to obtain the characteristics of the different failure. The extracted features are applied as inputs to the fuzzy logic for fault classification. To evaluate the feasibility of the proposed technique, it is tested on a 500 kV, 300 km transmission line for all the ten types of fault using Matlab. Simulation result indicates that the proposed approach has a good performance and it won't be affected by fault resistances, fault inception angle, faulty types and fault distances at different TCSC firing angles.

**Key words:** series compensated transmission line; fault classification; TCSC; DWT; fuzzy logic

## 0 引言

可控串补(Thyristor Controlled Series Compensation, TCSC)是柔性交流输电系统(Flexible Alternative Current Transmission Systems, FACTS)的一个典型代表。含有 TCSC 的超高压输电线路(Extra-high-voltage Transmission Line with TCSC, ETLT)的故障分类方法大多是基于故障后的稳态分量, 但随着 FACTS 在超高压输电线路中的广泛应用<sup>[1]</sup>, 基于稳态量的故障分类方法显露出明显不足。相对于稳态分量, 线路故障时的暂态分量更加丰富且含有大量故障信息<sup>[2-7]</sup>。目前基于暂态量的 ETLT 故障分类方法是学者们研究的热点。

文献[8]根据故障相小波能量大于正常相的原则选择故障区域, 判断故障相。文献[9]使用支持向量机方法(SVM)对故障暂态电流信号进行预处理。文献[10]采用 DWT 对故障暂态电流信号进行了 7 层分解, 提取谱能量、平均值、标准差、模极大值、熵值等六种故障特征量, 从中选择最优特征量作为极端学习机的输入。文献[11]采集故障后半个周期的电流数据, 将小波分解第一层的特征量作为 SVM 的输入。文献[12]使用离散小波包变换(WPT)分解故障暂态电流信号。上述方法虽然都可以准确、快速地检测出故障, 判断故障相, 但都对系统频率变化非常敏感, 并且需要大量训练样本和训练时间。

文献[13]利用改进的卡尔曼滤波方法对 ETLT

进行故障区域检测,该方法没有考虑故障阻抗对算法的影响。文献[14]认为在 ETLT 的故障回路中,直流分量第一个过零点要比其他回路较快出现,因此可以提取故障分量中的直流分量进行故障区域检测,但该方法会受到故障类型和故障初始角的影响。文献[15]设计了一种基于小波熵的故障区域检测和故障分类算法,成功应用于含有 SSSC 和 UPFC 的输电线路,但没有验证算法是否适合于含有 TCSC 的输电线路。针对现有方法的不足,论文旨在结合 ETLT 故障特征对现有方法进行改进,实现有效的故障分类。

本文算法的基本思路是:利用 DWT 对故障后半周期的三相电流信号进行小波分解,将小波分解系数分为三个频带,计算每个频带的小波奇异熵以获得能反映不同故障的故障特征量。根据提取到的特征量在不同故障条件和故障类型下的特点,构建模糊故障分类系统。将分类判据作为模糊逻辑的输入,输出为分类结果。为了检验其准确性,使用 Matlab 搭建了 500 kV 双端供电系统,对算法进行仿真试验。仿真结果表明,该算法有很强的鲁棒性,可以快速、准确地识别故障相。

### 1 基于小波变换的故障信号特征提取

小波变换是一种建立在傅里叶变换基础上的时频分析方法。小波变换的有效性很大程度上会受到小波基函数的影响,这里选择 db4 小波提取故障暂态特征量<sup>[16]</sup>。文献[17]指出输电线路发生故障后,高频暂态分量基本上都集中在故障相信号中,而非故障相信号的能量主要分布在工频带附近,为了更加有效地提取特征量,本文取采样频率为 20 kHz,对暂态信号进行 8 层小波分解,将小波分解系数分成三个频带<sup>[18-19]</sup>,近似系数  $ca_8$  为基频带,其频率范围为 0~78.125 Hz;含高次谐波分量的细节系数  $cd_7$ 、 $cd_8$  组成谐波带,其频率范围为 78.125~312.5Hz;细节系数  $cd_1$ 、 $cd_2$ 、 $cd_3$ 、 $cd_4$ 、 $cd_5$ 、 $cd_6$  组成暂态频带,包含故障暂态特征,其频率范围为 625~20 000 Hz。

根据信息熵的概念,分别计算小波分解细节系数  $d_1 \sim d_8$  和小波系数  $a_8$  的小波奇异熵,定义暂态频带小波奇异熵为  $W_{sez}$ ,谐波带小波奇异熵为  $W_{sex}$ ,

基频带小波奇异熵为  $W_{sej}$ ,其中  $W_{sez} = \sum_{i=1}^6 p_i$  ( $p_i$  为第  $i$  层细节系数的小波奇异熵),  $W_{sex} = \sum_{i=7}^8 q_i$  ( $q_i$  为第  $i$  层细节系数的小波奇异熵),  $W_{sej} =$

$\sum_{i=1}^2 - \left( \lambda_i / \sum_{j=1}^2 \lambda_j \right) \log \left( \lambda_i / \sum_{j=1}^2 \lambda_j \right)$  ( $\lambda_i$  为  $a_8$  系数转化成矩阵之后的奇异特征值)。为了反映故障相与非故障相之间的相对差异,做以下预处理,处理结果记为  $m$  和  $n$ 。

$$\begin{cases} m = W_{sez} / W_{sej} \\ n = W_{sex} / W_{sex} \end{cases}$$

$a_m$ 、 $b_m$ 、 $c_m$ 、 $a_n$ 、 $b_n$ 、 $c_n$  分别为 a、b、c 三相的  $m$  值和  $n$  值。设接地电流  $I_g = I_a + I_b + I_c$ ,定义接地电流第一级分解系数  $cd_1$  的奇异值和为  $W_1$ ,通过仿真分析发现  $W_1$  在故障相接地时和故障相不接地时的数值差异很大,可以用来检验故障是否接地,这里将  $a_m$ 、 $b_m$ 、 $c_m$  和  $W_1$  作为故障选相的判据。

### 2 模糊逻辑

模糊逻辑推理系统一般包括三个功能块:模糊化、模糊推理、去模糊化。如图 1 所示。

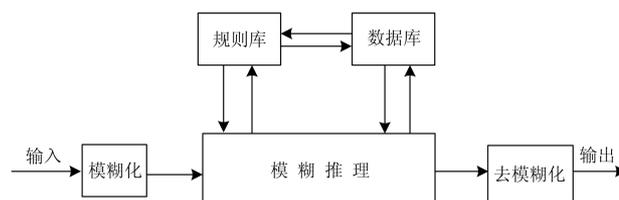


图 1 模糊推理系统

Fig. 1 Fuzzy inference system

(1)模糊化。 $a_m$ 、 $b_m$ 、 $c_m$  和  $W_1$  作为模糊推理的输入,结合输入值的特点,将  $a_m$  变量的数值分成三个等级:低(L)、中(M)、高(H)。取低或者高,说明小波奇异熵值差别大;取中等,说明差别较小。用同样的方法将  $b_m$ 、 $c_m$  模糊化。考虑到  $W_1$  值的特殊性(不接地时很小,基本维持在 0.3 左右,接地时数值增大明显,甚至高达 1 000 多),为了便于观测以及运算,只设有低级,大于 1 的全部假设为高。

(2)模糊推理。本文采用 Mamdani 型模糊推理系统(模糊蕴含运算为 Mamdani 法)。 $a_m$ 、 $b_m$ 、 $c_m$  的隶属度函数都选择梯形函数,如图 2 所示。输入值  $W_1$  的变化幅度较大,常用的三角形、梯形、高斯、钟形隶属度函数都无法满足  $W_1$  的变化,经过多次测试比较最终选择 Z 型函数,如图 3 所示。本文总共设有 13 个规则,如表 1 所示。

(3)去模糊化。经模糊推理得到的结果是模糊值,必须对其进行去模糊化处理,这里去模糊化方法采用最大隶属度的平均值法。输出变量对应关系为:Ag-1、Bg-2、Cg-3、AB-4、BC-5、AC-6、ABg-7、BCg-8、ACg-9、ABC-10。

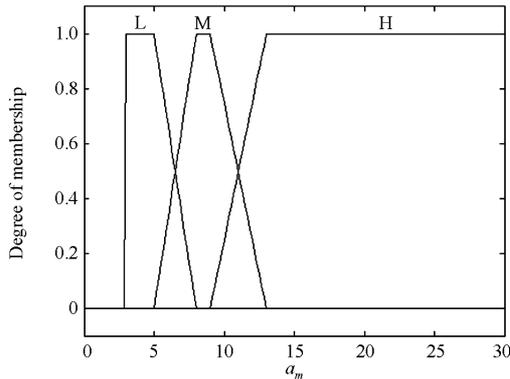


图 2  $a_m$  的隶属度函数

Fig. 2 Membership functions of  $a_m$

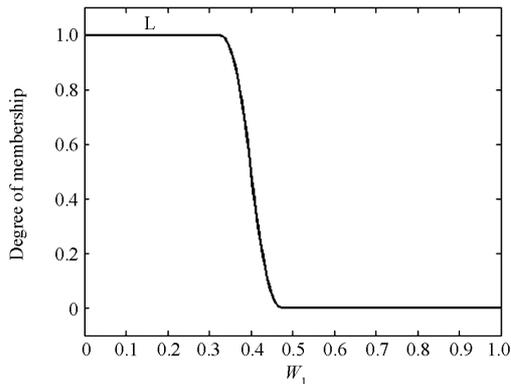


图 3  $W_1$  的隶属度函数

Fig. 3 Membership functions of  $W_1$

表 1 模糊规则

Table 1 Fuzzy rule

故障类型	规则	输出
Ag(1)	If am is H and bm is not H and cm is not H and $W_1$ is not L then output1 is Ag.	1
Bg(2)	If am is not H and bm is H and cm is not H and $W_1$ is not L then output1 is Bg. If am is L and bm is M and cm is L and $W_1$ is not L then output1 is Bg.	2
BCg(2)	If am is M and bm is H and cm is H and $W_1$ is not L then output1 is BCg. If am is L and bm is M and cm is M and $W_1$ is not L then output1 is BCg.	8
Acg(1)	If am is H and bm is not H and cm is H and $W_1$ is not L then output1 is ACg.	9
ABC(1)	If am is H and bm is H and cm is H and $W_1$ is L then output1 is ABC.	10

本文的模糊逻辑方法基于 Matlab 的 FUZZY LOGIC 工具箱。图 4 为故障类型识别的流程图。

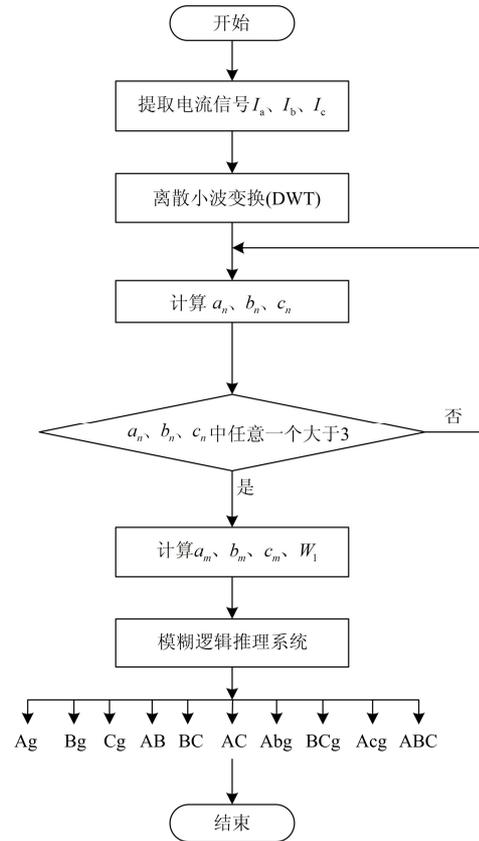


图 4 故障分类算法流程图

Fig. 4 Flow chart of fault classification

### 3 仿真分析

我国主要将 TCSC 安装在 500 kV 线路上, 本文应用 Matlab PSB 搭建了一个简化的 500 kV 双端供电系统, 线路总长 MN 为 300 km, 输电线路模型采用分布参数模型, 线路参数为:  $R_0=0.2046884 \Omega/\text{km}$ ,  $R_1=0.029551923 \Omega/\text{km}$ ;  $L_0=0.002083014 \text{ H}/\text{km}$ ,  $L_1=0.000885485 \text{ H}/\text{km}$ ;  $C_0=0.00908166346 \mu\text{F}/\text{km}$ ,  $C_1=0.01319818 \mu\text{F}/\text{km}$ 。TCSC 设置在线路中央, 参数为:  $\omega=2.7432$ ,  $C=127 \mu\text{F}$ ,  $L=10.6 \text{ mH}$ , 谐振角为  $146.67^\circ$ 。提供的补偿为 30%~50%。频率为  $f=50 \text{ Hz}$ , 采样率为 20 kHz, 提取的原始信号为故障后半周期的电流数据(200 个样本)。

分别在输电线路 10%、20%、40%、60%、80%、90%处仿真了 10 种短路故障。同时考虑变化的系统参数:

(1) TCSC 的触发角:  $150^\circ, 155^\circ, 160^\circ, 180^\circ$ ;

(2) 故障阻抗:  $0 \Omega, 25 \Omega, 50 \Omega, 100 \Omega, 150 \Omega$ ;

(3) 故障初始角:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ 。

这样故障总数为 3 600 个( $6 \times 4 \times 5 \times 3 \times 10$ ), 也就是说用 3 600 个数据对该算法进行测试。由于  $W_1$  值在接地和不接地两种情况下差值较大, 将大于 1 的值全部取 1, 仿真结果如下。

图 5 是触发角为  $180^\circ$ 、故障阻抗为  $0 \Omega$ 、在线路 60% 处发生 BC 两相短路故障的模糊系统故障分类结果, 如图 6 所示,  $a_m = 5$ 、 $b_m = 5.6$ 、 $c_m = 5.5$ , 输出结果为 5, 对应于模糊规则的 BC。

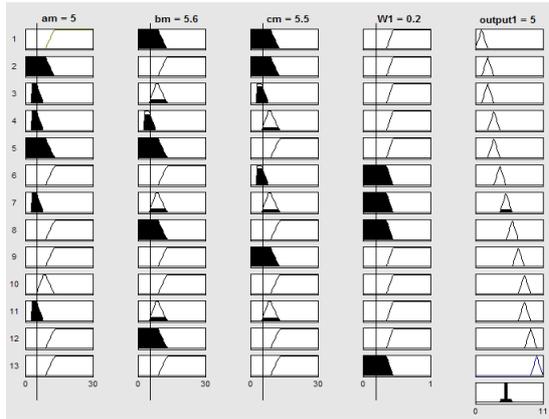


图 5 BC 两相短路输出图  
Fig. 5 BC fault output figure

多数情况下, 分类系统都可以准确识别故障, 但在不同故障初始条件下, 小波分解系数的变化幅度不一定明显, 因此分类系统也会出现识别错误的情况, 比如晶闸管触发角为  $160^\circ$ , 故障位置为线路的 80%, 过渡电阻为  $100 \Omega$ , 发生 AB 两相接地短路故障,  $a_m = 18.9701$ 、 $b_m = 10.2086$ 、 $c_m = 6.2264$ , 输出结果为 Ag, 如图 6 所示。

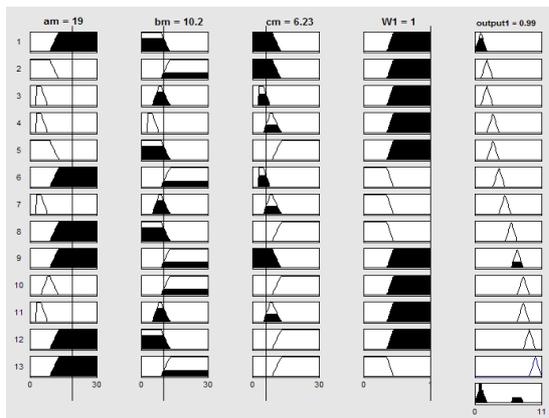


图 6 AB 接地输出图  
Fig. 6 ABg fault output figure

表 2~表 6 分别为不同故障类型、不同故障位置、不同故障阻抗、不同晶闸管触发角、不同故障初始

角下三相电流小波奇异熵比值和选相结果。

表 2 不同故障类型的选相结果

Table 2 Phase selection results of different kinds of fault

故障类型	$a_m$	$b_m$	$c_m$	$W_1$	选相结果
Ag	26.8	10.1	5.8	1	1
Bg	6.5	14.2	5.9	1	2
Cg	5.7	5.3	10.8	1	3
AB	25.7	26.6	5.3	0.3	4
BC	4.7	8.8	8.6	0.2	5
AC	15.1	8.3	13.3	0.3	6
ABg	29.7	21.1	5.1	1	7
BCg	6.5	12.2	11.3	1	8
ACg	23.3	8.2	11.7	1	9
ABCg	28.1	17.0	11.5	0.3	10

表 3 不同故障位置的选相结果

Table 3 Phase selection results of different fault location

故障位置及故障类型	$a_m$	$b_m$	$c_m$	$W_1$	选相结果
60 km, AB 相短路	26.0	26.6	5.3	0.3	4
60 km, A 相接地	27.6	11.3	5.8	1	1
120 km, B 相接地	6.5	14.6	5.9	1	2
180 km, C 相接地	5.3	5.4	10.3	1	3
180 km, AB 相接地	27.8	20.9	6.5	1	7
240 km, AC 相接地	19.9	8.5	13.8	1	9

表 4 不同故障阻抗的选相结果

Table 4 Phase selection results of different fault impedance

故障阻抗及故障类型	$a_m$	$b_m$	$c_m$	$W_1$	选相结果
50 $\Omega$ , A 相接地	13.5	8.6	5.4	1	1
50 $\Omega$ , AB 相接地	27.9	23.9	4.6	1	7
100 $\Omega$ , B 相接地	5.1	10.2	4.7	1	2
100 $\Omega$ , BC 相接地	5.2	9.4	8.4	1	8
150 $\Omega$ , C 相接地	3.7	3.6	7.5	1	3
150 $\Omega$ , AC 相接地	16.1	8.6	12.7	1	9

表 5 不同触发角的选相结果

Table 5 Phase selection results of different triggering angle

晶闸管触发角及故障类型	$a_m$	$b_m$	$c_m$	$W_1$	选相结果
150°, A 相接地	18.6	8.1	7.3	1	1
150°, AB 相短路	15.1	14.2	5.3	0.2	4
160°, B 相接地	5.3	8.7	5.3	1	2
160°, BC 相接地	6.1	7.5	8.1	1	8
180°, AC 相短路	15.6	8.3	11.5	0.2	6
180°, AC 相接地	21.5	7.4	18.2	1	9

表 6 不同故障初始角的选相结果

Table 6 Phase selection results of different triggering angle

故障初始角 及故障类型	$a_m$	$b_m$	$c_m$	$W_1$	选相 结果
0°, A 相接地	25.2	7.7	5.75	1	1
45°, C 相接地	6.7	5.4	17.1	1	3
45°, BC 相短路	6.9	24.2	27.9	0.2	5
135°, A 相接地	20	7.6	5.1	1	1
135°, AB 相接地	19.1	10.9	5.0	1	7

仿真结果表明, 本文基于模糊逻辑的 ETLT 故障分类方法不受故障阻抗、故障类型、故障初始角和 TCSC 晶闸管触发角的影响, 可在故障发生后快速、准确地判断出发生在 TCSC 前后端的故障相, 并可以检测出高阻故障, 正确率在 99% 以上, 表 7 为 10 种短路故障下, 该方法的平均正确率。

表 7 故障类型检测正确率

Table 7 Accuracy of fault type detection

故障类型	测试数据量	平均正确率/%
Ag	360	99.44
Bg	360	99.16
Cg	360	99.16
AB	360	98.88
BC	360	99.16
AC	360	98.88
ABg	360	99.44
BCg	360	99.72
ACg	360	99.72
ABCg	360	99.16
平均		99.27

### 4 结论

本文提出一种基于模糊逻辑的可控串补线路故障分类方法。该方法选取 db4 作为小波基函数, 采集故障后半个周期的电流数据, 计算小波奇异熵作为故障选相判据, 根据故障特征量的特点设计了模糊故障分类系统。相比其他方法, 该方法经过小波奇异熵处理后的数据量较小, 突出了故障特征, 与模糊逻辑的结合, 避免了训练时间长、计算复杂等问题。但如何将工程实际问题与本文提出的算法更好地结合是进一步需要讨论的技术问题。

### 参考文献

[1] 索南加乐, 吴双惠, 侯卓, 等. 串补线路故障特征分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 38-42.  
SUONAN Jiale, WU Shuanghui, HOU Zhuo, et al. Fault

characteristics analysis for series compensated line[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 38-42.

[2] 符玲, 何正友, 钱清泉. 超高压输电线路的故障暂态特征提取及故障类型判断[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 100-106.  
FU Ling, HE Zhengyou, QIAN Qingquan. Feature extraction of fault transient and fault type determination for EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 100-106.

[3] 陈亚, 李梦诗. 基于瞬时能量比的输电线路故障选相方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 56-64.  
CHEN Ya, LI Mengshi. A faulted phase selection scheme for transmission lines based on instantaneous energy ratio [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 56-64.

[4] 田书, 刘芳芳, 任晓明. 基于暂态量的同塔双回线路故障选相研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 50-54.  
TIAN Shu, LIU Fangfang, REN Xiaoming. Research on transient-based faulty phase selection for double-circuit lines on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 50-54.

[5] 陈昶, 胡炎, 郇能灵, 等. 基于电压故障分量的超高压线路故障选相新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 8-14.  
CHEN Yang, HU Yan, TAI Nengling, et al. A new method of fault phase identification for EHV lines based on the fault component of phase voltage[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 8-14.

[6] 何引生, 胡玉生, 商立群. 基于故障相电压功率谱的超高压串补输电线路故障识别[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(8): 48-52.  
HE Yinsheng, HU Yusheng, SHANG Liqun. Fault recognition for EHV transmission line with series capacitors based on power spectrum of fault phase voltage[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(8): 48-52.

[7] 吴浩, 郭辉, 蔡亮. 基于故障分量能量系数和 PNN 的故障选相研究[J]. 高压电器, 2013, 49(8): 35-43.  
WU Hao, GUO Hui, CAI Liang. Research of fault phase selection based on the energy coefficient of current fault component and PNN[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(8): 35-43.

[8] DASH P K, SAMANTRAY S R. Phase selection and fault section identification in thyristor controlled series

- compensated line using discrete wavelet transform[J]. *Electrical Power Energy Systems*, 2004, 26(9): 725-732.
- [9] DASH P K, SAMANTARAY S R, PANDA G. Fault classification and section identification of an advanced series-compensated transmission line using support vector machine[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, 22(1): 67-73.
- [10] RAY P, PANIGRAHI B K, SENROY N. Extreme learning machine based fault classification in a series compensated transmission line[C] // 2012 IEEE International on Power Electronics, Bengaluru, 2012: 1-6.
- [11] VYAS B, MAHESHWARI R P, DAS B. Fault analysis of controllable series compensated transmission line with wavelet transform and support vector machine[C] // 2012 Nirma University International Conference on Engineering (NUICONE), Ahmedabad, 2012: 1-5.
- [12] BHARGAB V, RUDRA P M, BISWARUP D. Investigation for improved artificial intelligence techniques for thyristor-controlled series-compensated transmission line fault classification with discrete wavelet packet entropy measures[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2014, 42(6): 554-566.
- [13] GIRGIS A A, SALLAM A A, ELDIN A K. An adaptive protection scheme for advanced series compensated transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998, 13(2): 414-420.
- [14] MAZNIEWSKI P, IZYKOWSKI J. Identification of faulted section in TCSC transmission line based on DC component measurement[C] // 2009 Proceedings of the 44th International on Universities Power Engineering Conference (UPEC), Glasgow, 2009: 1-5.
- [15] ELZONKOLY A M, DESOUKI H. Wavelet entropy based algorithm for fault detection and classification in FACTS compensated transmission line[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2011, 33(8): 1368-1374.
- [16] COSTA F B, SOBRINHO A H P, ANSALDI M, et al. The effects of the mother wavelet for transmission line fault detection and classification[C] // Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE), Leiria, 2011: 1-6.
- [17] 何正友, 符玲, 麦瑞坤, 等. 小波奇异熵及其在高压输电线路故障选相中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(1): 31-36.
- HE Zhengyou, FU Ling, MAI Ruikun, et al. Study on wavelet singular entropy and its application to faulty phase selection in HV transmission lines[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(1): 31-36.
- [18] HUSEYIN E. Fault diagnosis system for series compensated transmission line based on wavelet transform and adaptive neuro-fuzzy inference system[J]. *Measurement*, 2013, 46(1): 393-401.
- [19] 林圣, 何正友, 钱清泉. 基于人工免疫算法的输电线路故障类型识别新方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(11): 95-100, 137.
- LIN Sheng, HE Zhengyou, QIAN Qingquan. A novel approach of fault type recognition of transmission lines based on artificial immune algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2011, 39(11): 95-100, 137.

收稿日期: 2015-08-13; 修回日期: 2016-01-15

作者简介:

闫旭(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: yanxushuai@126.com

李春明(1964-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事小波分析在电力系统故障分析中的应用、新型继电保护原理等方面的研究工作。

(编辑 魏小丽)