

# 基于改进算法的粗糙集理论故障选线装置研究

张凯, 袁兆强, 范李平

(三峡大学电气信息学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 针对 KA 系列模糊智能选线装置中小波包多频带选线算法所出现的误选问题, 提出了基于粗糙集理论的小波包多频带的选线算法。该算法主要是应用粗糙集理论对故障样本的数据挖掘能力来确定低频衰减信号的增强比例, 并在此基础上进一步利用粗糙集理论的信息融合功能对单相接地故障电流信号中所蕴藏的各种暂态及稳态信息进行融合。动模仿真实验结果表明基于粗糙集理论的选线算法能更有效地解决小波包选线算法所出现的误选问题, 且较模糊选线算法精度更高、抗干扰能力更强、运行更稳定。

**关键词:** 模糊理论; 粗糙集理论; 故障选线; 信息融合; 小波包分析

## Research on improving algorithm of the fault line selection device based on the rough set theory

ZHANG Kai, YUAN Zhao-qiang, FAN Li-ping

(College of Electrical Engineering & Information Technology, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** Aiming at the error selection issue of multi-band wavelet packet algorithm, which appears in view of the KA series of intelligent fuzzy line selection device, this paper puts forward a wavelet packet fault line selection algorithm based on the rough set theory, which uses rough set theory to conduct the data mining and knowledge discovery of fault sample set to determine the enhanced ratio of low-frequency attenuation signal. On the basis of that, it furtherly introduces the information fusion function of rough set theory to make full use of all the steady-state and transient-state information of single-phase-to-earth fault current. Dynamic simulation shows that the intelligent line selection algorithm based on the rough set theory, are not only more effective to solve the issue of the wavelet packet algorithm, but also much better than fuzzy theory in precision, anti-interference ability, and stable and reliable operation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of Hubei Province(No. 2006ABA202).

**Key words:** fuzzy sets theory; rough set theory; fault line selection; information fusion; wavelet packet analysis

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)04-0015-06

## 0 引言

小电流接地系统单相接地故障选线问题一直没有得到彻底解决。国内外学者对此做了大量研究工作, 提出了诸多选线方法: 例如文献[1-3]提出了基于稳态信号的故障选线方法, 文献[4-5]提出了基于小波包的暂态信号故障选线方法, 文献[6-10]提出了基于智能化算法的故障选线方法。其中基于暂态信号的故障选线方法, 因其灵敏度高且不受消弧线圈影响而受到普遍关注。近几年又研究出了基于模糊理论的KA系列智能选置, 利用各种算法的互补性, 扩大了正确

选线的故障范围。但经挂机运行发现随着故障苛刻程度的加剧, 在复杂的故障条件下, 特别是在长线路末端相电压过零点处发生高阻接地时, 很容易出现误选和漏选等现象。

为了克服 KA 智能装置选线算法的局限性, 本文先利用粗糙集理论对小波包“误选”的信号加强, 再在其基础上利用粗糙集理论对稳态和暂态的各种算法进行智能融合, 动模实验验证了选线的准确性。

## 1 KA 系列小电流单相接地选线装置

### 1.1 KA 系列选线装置原理

KA 系列选线装置采用了先进的工控机架构、ISA 总线, 最大可接入 4 段母线互压互感器 PT1~PT4 信号和 26 条线路电流互感器 CT1~CT26 信号,

**基金项目:** 湖北省自然科学基金项目 (D200513009);  
湖北省自然科学基金项目 (2006ABA202)

其电气原理如图 1 所示。

KA 系列装置原理是将模糊理论应用到故障线路中，对各种稳态和暂态故障选线方法、故障信息进行综合处理。其隶属度函数表示各故障选线方法输出的模糊性，然后利用加权求和进行运算，实现各种算法的互补性和多种故障选线方法在馈线保护中就地融合。其中所有故障选线算法集中储存在硬件装置的工控机主板当中<sup>[6]</sup>。

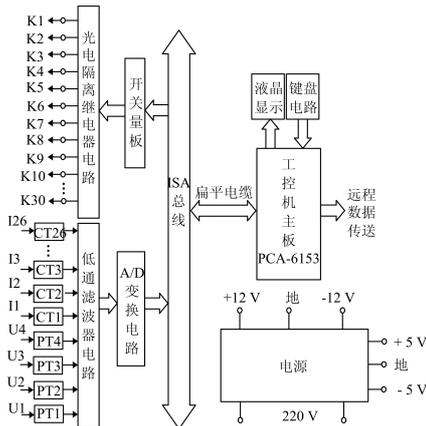


图 1 KA-2000 型小电流接地单相故障选线装置电气原理

Fig.1 The electrical principle of the KA-2000 device for the single-phase-fault line detection

### 1.2 其软件算法存在的问题

经现场挂机运行发现，装置中基于暂态的小波包多频带相关分析的选线方法基本上不受故障条件影响，能够正确选出故障线路。但随着故障苛刻程度的加剧，故障线路和非故障线路的相关特性变得越发模糊而给判定增加了难度，而且实际采集的暂态零序电流信号，由于采样频率的限制，有些故障信息可能丢失，致使故障线路的特征不明显，经常造成“误选”，影响了融合选线精度，所以下面首先针对小波包多频带相关分析选线方法存在的问题进行分析。

#### 1.2.1 基于小波包多频带相关分析选线算法

根据文献[7]提出的基于小波包多频带相关分析选线算法原理，首先利用小波包对暂态故障电流进行适当频带宽度的分解，自适应地选出各条线路上能量最大的特征频段，按式(1)确定能量对应的最大频段即为该线路暂态电容电流分布最集中的频段，然后按式(2)对各线路特征频段所对应的小波包分解系数波形进行两两相关分析，获得相关矩阵如式(3)，接着根据相关矩阵求出各线路与其他线路的相关系数如式(4)，最后根据排序策略获得按接地故障发生可能性大小排列的选线结果，综合相

关系数为负，且绝对值越大的线路发生接地故障的可能性越大，综合相关系数为正，且绝对值越大的线路发生接地故障的可能性越小。

$$\varepsilon_{j,k} = \sum_n [\omega_{j,k}^f(n)]^2 \quad (1)$$

式中： $\omega_{j,k}^f(n)$  为小波包分解后第  $(j,k)$  节点对应频段下的系数。

$$\rho_{xy} = \sum_{i=1}^{N-1} x(n)y(n) / \sqrt{\sum_{i=1}^{N-1} x(n)^2 \sum_{i=1}^{N-1} y(n)^2} \quad (2)$$

式(2)表明了信号  $x(t)$ 、 $y(t)$  波形在一定数据窗内同步相关关系，相关系数  $\rho_{xy}$  表征了数据窗内两路信号在相同时刻的相似程度，综合反映了两信号中每一频率分量的综合相位关系及幅值信息，而非单一频率的简单相位关系，其中  $x(n)$ 、 $y(n)$  分别是信号  $x(t)$ 、 $y(t)$  的采样离散化数据序列。

$$M_p = \begin{pmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \dots & \rho_{1N} \\ \vdots & \rho_{2m} & \ddots & \vdots \\ \rho_{N1} & \rho_{N2} & \dots & \rho_{NN} \end{pmatrix} \quad (3)$$

此处采用将矩阵每列元素求和后再作平均的方法可得各线路综合相关系数，用行向量表示为：

$$A_{\times N} = [\rho_1 \quad \rho_2 \quad \dots \quad \rho_l \quad \dots \quad \rho_N] \quad (4)$$

$$\rho_l = \frac{\sum_{m=1}^N \rho_{lm}}{N}$$

式中： $l=1, 2, 3, \dots, N$ ， $\rho_l$  为第  $l$  行元素的平均值。

#### 1.2.2 现场动模仿真验证

由于架空线及电缆线路暂态电容电流自由振荡的频率分别为 300~1 500 Hz 及 1 500~3 000 Hz，本文仿真分别采用低频 10 kHz 和高频 100 kHz 进行采样，利用 db8 小波包的频率二分特性，分解层数为 4 层共 16 个频段，即经低频和高频采样后故障一

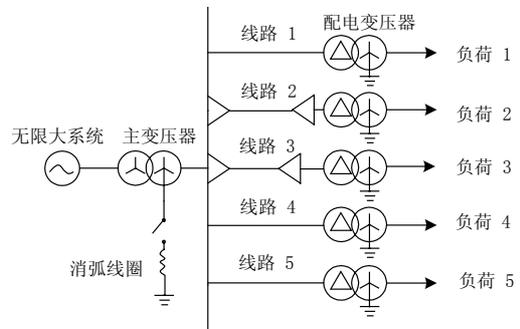


图 2 动模试验仿真结构图

Fig.2 The figure of simulation structure for dynamic test

个周波的采样点数分别为 200 点和 2 000 个点, 线路模型如图 2 所示: 其中线路 1、线路 4、线路 5 为架空线路; 线路 2 为电缆线路; 线路 3 为架空线及电缆混合线路。

案例: 线路 5 末端 B 相在相电压过零时发生高阻接地, 接地电阻为 2 000  $\Omega$ 。仿真起始时间为 0.0 s, 结束时间为 0.036 67 s, 接地故障发生在 0.016 67 s 时刻。

通过仿真求得在高频和低频采样下线路 1 至线路 5 按能量最大原则确定的特征频段都为 (4, 3) 频段, 高频和低频综合相关系数序列矩阵分别如下所示。

$$M_{\rho_{\text{低频}}} = \begin{pmatrix} 1.000 0 & -0.249 5 & -0.370 7 & -0.280 2 & -0.826 7 \\ -0.249 5 & 1.000 0 & -0.226 2 & 0.033 5 & 0.037 9 \\ -0.370 7 & -0.226 2 & 1.000 0 & 0.147 7 & 0.108 1 \\ -0.280 2 & 0.033 5 & 0.147 7 & 1.000 0 & -0.199 7 \\ -0.826 7 & 0.037 9 & 0.108 1 & -0.199 7 & 1.000 0 \end{pmatrix}$$

$$M_{\rho_{\text{高频}}} = \begin{pmatrix} 1.000 0 & -0.054 3 & -0.109 6 & 0.026 2 & -0.615 8 \\ -0.054 3 & 1.000 0 & 0.012 2 & 0.026 9 & -0.362 2 \\ -0.109 6 & 0.012 2 & 1.000 0 & -0.086 0 & -0.202 2 \\ 0.026 2 & 0.026 9 & -0.086 0 & 1.000 0 & -0.627 5 \\ -0.615 8 & -0.362 2 & -0.202 2 & -0.627 5 & 1.000 0 \end{pmatrix}$$

通过相关系数矩阵可求得低频和高频时特征频段 (4, 3) 对应于线路 1 至线路 5 的综合相关系数序列分别为: (-0.145 4, 0.119 1, 0.131 8, 0.140 2, 0.023 9), (0.049 3, 0.124 5, 0.122 9, 0.067 9, -0.161 6), 由选线序列结果可知在低频时出现误选为线路 1 为故障线路, 而在高频时故障选线正确。从仿真结果可以看出随着故障苛刻程度的加剧, 故障线路与非故障线路的暂态零序电流间的区别变得越发模糊, 从而导致“误判”。

## 2 基于粗糙集理论的故障选线算法改进

### 2.1 选线算法原理

本文提出的选线原理分为两步: 第一步首先针对基于暂态的小波包多频带相关分析故障选线算法出现的“误选问题”, 应用粗糙集理论的挖掘能力, 对零序电流信号进行增强处理, 然后再用小波包对增强后的信号进行分析, 实现故障选线的目的; 第二步是利用粗糙集信息融合技术对单相接地故障电流信号中所蕴藏的各种暂态及稳态特征进行融合, 即利用信号增强后的暂态小波包多频带相关分析法和稳态基波幅值特征、稳态 5 次谐波法和稳态有功分量法进行多判据融合选线。

### 2.2 基于粗糙集理论的信号增强选线原则

利用高速采集电路对零序电流信号进行高频采样, 采样后的信号接近实际信号。高频采样信号的最大值和低速采样信号的最大值的差值越大, 说明信号衰减越严重, 信号需要增强的比例就越大。鉴于此本文根据文献[8-9]所提出的粗糙集理论对低频采样信号做增强处理, 如式 (5)。

$$i'_{\text{ch}} = (1 + M \cdot \frac{i_{\text{max}}^h - i'_{\text{max}}}{i'_{\text{max}}}) \cdot i'_s \quad (5)$$

其中:  $i'_{\text{ch}}$  表示增强后低频采样零序电流信号的瞬时值;  $i_{\text{max}}^h$  表示高频采样信号的最大值;  $i'_{\text{max}}$  表示低频采样信号的最大值;  $i'_s$  表示增强前低频采样信号的瞬时值;  $M$  表示信号增强的比例系数。

为了利用粗糙集理论实现信号的增强, 现定义以下属性集规则:

给定信号增强信息系统  $K=(U,A)$ ,  $A=C \cup D$ , 条件属性集定义为  $C=\{a,b,c\}$ , 其中  $a$  表示暂态零序电流采样前后最大幅值的衰减比例如式 (6);  $b$  表示暂态零序电流信号第一个波头的极性;  $c$  表示暂态零序电流的有效值; 决策属性集定义为  $D=\{M\}$ ; 其中  $M$  表示零序电流信号需要增强的比例系数<sup>[10]</sup>。

$$a = \frac{i_{\text{max}}^h - i'_{\text{max}}}{i'_{\text{max}}} \quad (6)$$

由于没有已有的规则确定信号增强的比例系数  $M$ , 所以本文采用具有数据挖掘能力的粗糙集理论确定信号增强比例系数  $M$  的规则, 通过对样本的各种故障特征进行离散化处理, 对冗余信息进行知识约简, 获得故障特征信息与信号增强比例系数  $M$  之间的决策规则。

### 2.3 基于粗糙集的暂态和稳态融合选线原则

对于基于粗糙集的稳态和稳态融合系统定义以下规则:  $K=(U,A)$ ,  $A=C \cup D$ , 定义条件属性集

定义为  $C=\{d,e,f,g,h,i,j\}$ , 其中属性  $d-j$  分别对应着零序电流中基波幅值含量、信号增强的暂态分量、小波包分析法判据、五次谐波含量、五次谐波法选线判据以及有功分量的分量, 有功功率法选线判据。其中选线判据并不是直接作出选线判断, 而是根据各方法判断出的故障可能性, 定义  $D=\{N\}$ ,  $D$  表示线路的故障状态组成的集合。

暂态小波包故障判据是线路  $i$  中最大频段能量  $\varepsilon_{\text{max}}$  与各条线路最大频段绝对值之和  $\varepsilon_{\Sigma}$  的比值即公式 (7) 所示; 稳态五次谐波法、有功法分别都是

第  $i$  条线路含量  $I_{05(i)}$ 、 $p_i$  与所有线路绝对值含量  $I_{05\Sigma}$ 、 $p_\Sigma$  总和的比值即如式 (8)、(9)。

$$x_E = \frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_\Sigma} \quad (7)$$

$$x_{05} = \frac{I_{05(i)}}{I_{05\Sigma}} \quad (8)$$

$$x_p = \frac{p_i}{p_\Sigma} \quad (9)$$

### 3 动模仿真验证

利用图 2 的仿真模型, 分别在每条线路的 10%、50% 和 90% 处和电压相位为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  时通过  $5\ \Omega$ 、 $50\ \Omega$ 、 $500\ \Omega$ 、 $2\ \text{k}\Omega$  的过渡电阻接地, 经动模仿真实验后, 根据属性  $a$  到属性  $j$  所提取稳态和暂态故障特征, 记录每一次仿真实验的各项数据, 并在所有数据中随机取出 200 个数据作为训练样本, 构成原始数据表, 其选线流程如图 3 所示。

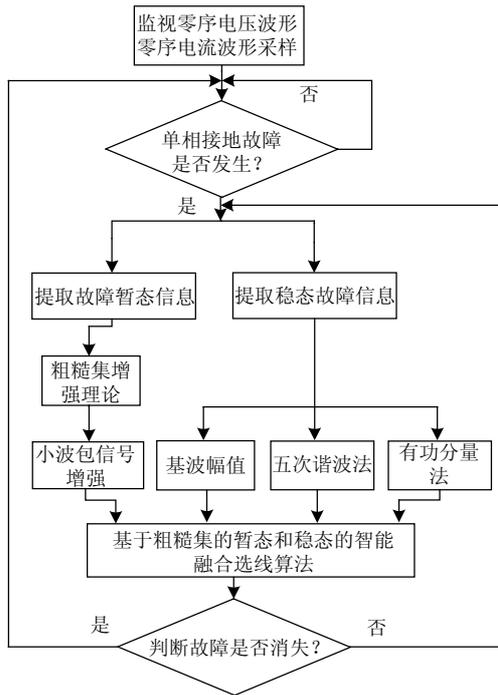


图 3 选线流程图

Fig.3 Flowchart of line selection

#### 3.1 基于粗糙集理论的信号增强的仿真实证

(1) 根据等频率划分的离散化方法, 将各条件属性和决策属性按以下方式进行编码。 $a$  属性值表示范围: 1 表示  $0\sim 10\%$ , 2 表示  $10\sim 20\%$ , 3 表示  $20\sim 100\%$ ;  $b$  属性值表示范围: 1 表示极性相

反, 0 表示极性相同;  $c$  属性值表示范围: 1 表示小于 0.1, 2 表示大于 0.1 且小于 0.2, 3 表示大于 0.3;  $M$  属性值表示范围: 1 表示 1, 2 表示 2, 3 表示 3, 4 表示 4。(2) 由原始数据表得到知识系统  $K=(U, A)$  的决策表, 合并决策表中的重复信息, 然后分别进行属性简约和值, 得到最小决策算法如式(10), 其中式(10)中下标表示每个属性值所对应的值。(3) 根据增强规则分别得到属性  $a$  和  $b$  的属性值, 再利用最小决策算法(10)可得到决策属性值, 即采样后零序电流信号的增强比例系数  $M$ , 最后根据公式(6)对低频采样信号进行增强处理。

$$\begin{cases} a_1b_0 \vee a_2b_0 \rightarrow M_1 \\ a_3b_0 \vee a_1b_1 \rightarrow M_2 \\ a_2b_1 \rightarrow M_3 \\ a_3b_1 \rightarrow M_4 \end{cases} \quad (10)$$

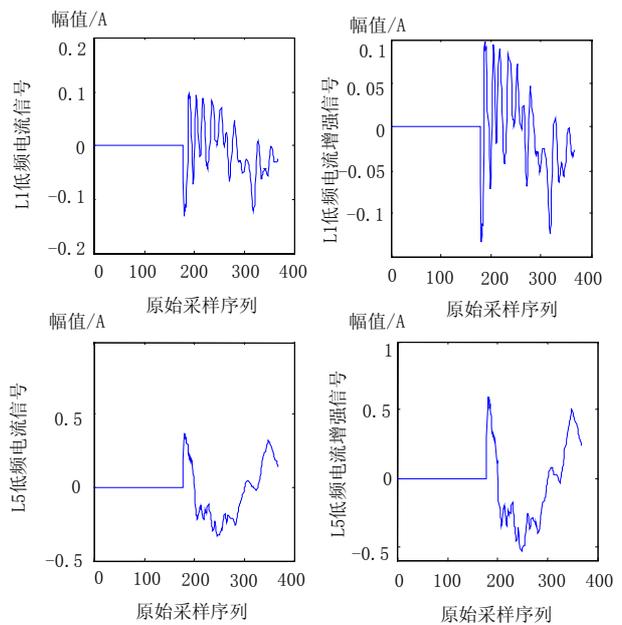


图 4 L1 和 L5 低频增强信号前后的波形

Fig.4 The L1 and L5 signal waveform before and after low-frequency enhancement

针对给出的案例可以分别得到线路 1 到线路 5 在高频和低频采样的零序电流最大值为 (0.097 7, 0.069 2, 0.068 9, 0.162 1, 0.237 9) 和 (0.095 7, 0.066 9, 0.066 6, 0.156 4, 0.306 3), 分别计算出线路 1 到线路 5 的高频采样和低频采样信号最大值的衰减比为: 2.0%, 3.3%, 3.3%, 3.5%, 29%, 将其离散化后, 并根据式 (10) 可获得增强规则为:  $a_1b_0 \rightarrow M_1$ ,  $a_3b_1 \rightarrow M_4$ , 可知线路 1 到线路 5 的零

序低频电流信号需要增强的比例系数分别是 1, 1, 1, 1, 4, 然后根据比例系数  $M$ , 利用公式 (5) 分别对各线路的低频采样信号做增强处理, 最后根据小波包多频带相关分析对增强后的低频信号得到线路 1 至线路 5 的综合相关系数序列分别为(0.090 2, 0.006 2, 0.006 0, 0.015 6, -0.174 2)。由相关系数序列可知, 信号增强后故障选线正确, 图 4 分别对应线路 1 到线路 5 低频采样增强前后的零序暂态电流波形。

### 3.2 基于粗糙集理论的信号增强的暂态和稳态仿真验证

以  $n$  条出线的配电网为例, 给出以下对于各属性的离散化规则化定义:

(1) 属性  $d$  表示零序电流中基波幅值含量, 即表示各线路零序电流基波幅值中的最大值  $I_{ok}$  与该线路在发生母线金属接地时零序电流基波幅值  $I'_{ok}$  的比值范围为: 1 表示 0~40%, 2 表示 40%~80%, 3 表示对应大于 80%。

(2) 属性  $e$  和属性  $g$  分别为粗糙集信号增强的暂态分量、五次谐波含量, 即对应信号增强后的每条线路的最大频段能量  $\varepsilon_{\max}$  和各线路零序电流五次谐波分量中的最大值  $I_{05(i)}$  与该线路零序电流基波幅值  $I_{oi}$  的比值范围均为: 1 表示 0~5%, 2 表示 5%~10%, 3 表示大于 10%。属性  $f$  表示有功功率含量, 即为各线路零序电流有功功率中的最大值  $P_i$  与该线路零序电流无功功率  $Q_i$  的比值范围则为: 1 表示 0~10%, 2 表示 10%~20%, 3 表示大于 20%。

(3) 属性  $f$  为小波包法故障判据、属性  $h$  为次谐波法故障判据、属性  $j$  表示有功分量法故障判据, 即公式(7)~(9)的比值范围都确定为: 1 表示  $-1/n \sim 1/2n$ , 2 表示  $-0.5 \sim -1/n$ , 3 表示  $-1 \sim -0.5$ , 4 表示  $1/2n \sim 2/n$ , 5 表示  $2/n \sim 1$ , 本文  $n$  值取 5。

(4) 属性  $N$  表示线路故障状态, 正常对应 0, 故障对应 1。

如案例本文认为单相接地发生 0.2 s 后故障进入稳态, 并启动针对稳态特征的选线算法, 仿真起始时间为 0.0 s, 结束时间为 0.216 67 s, 接地故障发生在 0.016 67 s 时刻, 如图 5 所示为所有线路稳态零序故障电流波形。

从原始故障数据表中提取出故障特征分量: 零序电流的基波含量属性  $d$ 、信号增强的暂态分量属性  $e$ 、有功分量属性  $f$  以及五次谐波含量属性值  $g$ , 计算故障判据并将各信息数据进行离散化处理, 对选线决策表进行约简, 得到选线决策规则如式 (11) 所示, 限于篇幅本文只给出部分故障选线系统的最

小决策:

$$\begin{aligned} & d_5 \vee i_3 j_5 \vee i_2 j_5 \vee e_4 h_5 \vee e_4 j_5 \vee e_4 j_4 \vee \dots \\ & \vee d_3 e_4 g_4 \vee d_3 e_5 h_1 \vee e_3 j_5 \vee f_3 g_3 h_5 \vee \\ & f_3 g_2 h_5 \vee d_3 e_2 h_1 \vee d_2 e_3 h_4 \rightarrow N_1 \\ & e_1 j_1 \vee d_3 e_1 \vee e_2 h_1 \vee \dots \rightarrow N_0 \end{aligned} \quad (11)$$

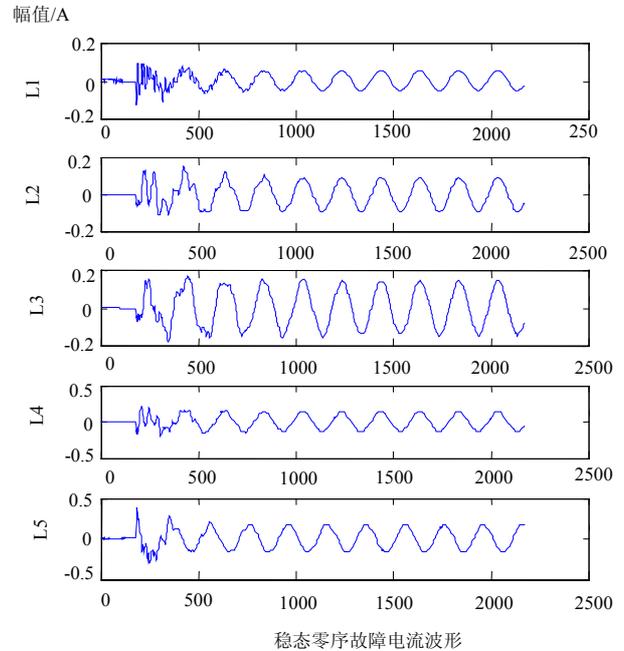


图 5 稳态零序故障电流波形

Fig.5 Waveforms of steady zero-sequence fault currents

提取每条线路的典型的数据样本: 基波幅值信号、增强的暂态含量、小波判据、五次谐波、五次判据、有功功率、有功判据, 分别为: (0.05、0.31、0.04、0.05、0.06、0.01、0.001)、(0.09、0.34、0.07、-0.12、-0.15、0.14、0.007)、(0.14、0.37、0.24、-0.24、-0.32、0.48、0.015)、(0.13、0.42、0.16、0.16、0.21、0.04、0.001)、(0.17、0.46、-0.49、0.23、0.28、26.7、0.987), 将数据样本离散化, 并根据故障选线系统的最小决策式 (11) 进行比较可得故障选线状态为:  $d_3 e_1 f_2 g_1 h_1 i_1 j_1 \rightarrow N_0$ 、 $d_3 e_1 f_2 g_4 h_1 i_2 j_1 \rightarrow N_0$ 、 $d_3 e_2 f_2 g_4 h_1 i_2 j_1 \rightarrow N_0$ 、 $d_3 e_1 f_2 g_1 h_1 i_1 j_1 \rightarrow N_0$ 、 $d_3 e_5 f_2 g_2 h_1 i_3 j_5 \rightarrow N_1$ , 得出正确的选线结果, 可见在本案例故障苛刻情况下, 稳态五次谐波法失效和基波幅值比较接近, 选线结果十分模糊。但通过粗糙集理论对信号增强能够保证暂态小波选线的正确性, 然后再通过粗糙集理论对选线进行融合, 这样远比单纯的故障融合在选线精度和准确率上高得多。

## 4 结论

本文通过分析模糊智能选线装置出现的误选问题,提出了基于粗糙集的智能选线算法。一方面是通过粗糙集理论对小波包暂态信号进行增强,改善了暂态小波包选线算法,另一方面是在其基础上进行基于粗糙集的暂态和稳态判据融合,有效地提高了选线装置在故障苛刻程度下选线的准确率,经现场动模挂机验证其算法准确、可靠。

## 参考文献

- [1] Hanninen E, Lehtonen M. Characteristics of Earth Faults in Electrical Distribution Networks with High Impedance Earthing[J]. Electric Power System Research, 1998 (44): 155-161.
- [2] Thomas Baldwin, Rank Renovich. Fault Locating in Ungrounded and High Resistance Grounded Systems[J]. IEEE Trans on Industry Application, 2001, 37 (4): 1152-1159.
- [3] 邢亚辉, 王海军, 吕艳萍. 基于线路零序频率特性的小电流接地系统故障选线[J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (4): 59-62.  
XING Ya-hui, WANG Hai-jun, Lü Yan-ping. Selecting the Faulty Line in a Non-solid Earthed Network Based on the Zero Sequence Frequency Characteristic of The Transmission Lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26 (4): 59-62.
- [4] 张帆, 潘贞存, 张慧芬, 等. 基于零序电流暂态极大值的小电流接地选线新判据[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 45-48.  
ZHANG Fan, PAN Zhen-cun, ZHANG Hui-fen, et al. New Criterion of Fault Line Selection in Non-solidly Earthed Network based on Zero Sequence Transient Current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (4): 45-48.
- [5] 赵慧梅, 张保会, 段建东, 等. 一种自适应捕捉特征频带配电网单相接地故障选线新方案[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (2): 41-44.  
ZHAO Hui-mei, ZHANG Bao-hui, DUAN Jian-dong, et al. A New Scheme of Faulty Line Selection with Adaptively Capturing the Feature Band for Power Distribution Networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (2): 41-44.
- [6] 陈炯聪, 齐郑, 杨奇逊. 基于模糊理论的小电流单相接地选线装置[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 88-91.  
CHEN Jiong-cong, QI Zheng, YANG Qi-xun. A Fault Line Detection Device for the Non-solidly Grounded System Based on Fuzzy Sets Theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(8): 88-91.
- [7] 戴剑锋, 张艳霞. 基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 44-47.  
DAI Jian-feng, ZHANG Yan-xia. Effective Domain of Faulty Line Detection in Small Current Grounds System Based on Rough Set Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 44-47.
- [8] 庞清乐, 孙同景, 等. 基于粗糙集理论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, 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.
- [9] 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.
- [10] 齐郑, 艾欣, 王炳革, 等. 基于粗糙集理论的小电流接地系统故障选线方法的有效域[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 43-46.  
QI Zheng, AI Xin, WANG Bing-ge, et al. Effective Domain of Faulty Line Detection in Small Current Grounding System based on Rough Set Theory[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 43-46.

收稿日期: 2009-03-20; 修回日期: 2009-04-16

作者简介:

张凯(1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统保护与控制, 人工智能在电力系统中的应用; E-mail: zhangkaictgu@yahoo.com.cn

袁兆强(1957-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事电力系统继电保护和综合自动化方面的教学和研究工作;

范李平(1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护综合自动化。