

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2313040

基于特征融合与 ELM 的小电流接地选线新方法<sup>\*</sup>高文利<sup>1</sup> 席东民<sup>1</sup> 王 晗<sup>2</sup> 贾雅君<sup>2</sup> 郑李南<sup>3</sup>(1. 内蒙古工业大学电力学院 呼和浩特 010000; 2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240;  
3. 国网西藏电力公司本部 拉萨 850000)

**摘要:** 目前已有的利用单一故障特征选线办法受过渡电阻、故障合闸角及故障位置等因素的影响, 普遍存在抗噪性差、准确度不高等问题。鉴于此, 提出一种融合暂态高频能量与波形相关性故障特征的极限学习机(ELM)小电流接地选线新方法, 采用变分模态分解和希尔伯特变换提取零序电流中的暂态高频能量, 通过对零序电流相关性分析提取暂态波形综合相关系数, 两者共同构成故障特征向量, 输入免阈值设定的 ELM 模型, 实现故障选线。通过大量仿真对所提方法的有效性进行验证, 结果表明该方法抗噪性好且基本不受过渡电阻、故障合闸角及故障位置等因素的影响。经文中变电站接地故障数据实例对该方法进行验证, 结果表明该方法选线准确率可达 100%。

**关键词:** 小电流接地选线; 变分模态分解; 希尔伯特变换; 相关系数; 极限学习机

**中图分类号:** TM771 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

New method of small current grounding line selection based on  
feature fusion and extreme learning machineGao Wenli<sup>1</sup> Xi Dongmin<sup>1</sup> Wang Han<sup>2</sup> Jia Yajun<sup>2</sup> Zheng Linan<sup>3</sup>(1. School of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010000, China;  
2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;  
3. State Grid Tibet Electric Power Co., Ltd., Lhasa 850000, China)

**Abstract:** At present, the existing line selection method using single fault feature is affected by the transition resistance, fault closing angle and fault location, which generally has the problems of poor noise resistance and low accuracy. In view of this, a new small current grounding line selection method of extreme learning machines (ELM) is proposed, which integrates transient high frequency energy and waveform correlation fault characteristics. The transient high frequency energy in zero sequence current is extracted by using variable mode decomposition and hilbert transform. Through zero-sequence current correlation analysis, the comprehensive correlation coefficient of transient waveform is extracted, and the fault feature vector is formed by the two. The threshold free ELM model is input to realize fault line selection. The effectiveness of the proposed method is verified by extensive simulations, which show that the method is noise-resistant and largely unaffected by factors such as transition resistance, fault closure angle and fault location. The method is verified by the example of substation ground fault data in the paper, and the results show that the method has an accuracy of 100% in line selection.

**Keywords:** low current grounding line selection; variational mode decomposition; Hilbert transform; correlation coefficient; extreme learning machine

## 0 引 言

随着城镇化与工业化的发展, 配电网负荷日益增加, 对其安全可靠运行也提出了愈来愈高的要求。配电网 80% 以上的故障为单相接地故障<sup>[1]</sup>, 由于我国配电网为小电流

接地系统(中性点不接地或经消弧线圈接地), 发生单相接地时故障电流较小, 导致故障选线困难, 系统带故障运行容易导致故障发展为两点接地甚至多点接地, 其中弧光接地<sup>[2]</sup>, 还会产生系统过电压, 这些问题直接威胁到配网安全稳定运行。国网技术规程<sup>[3]</sup>要求: 带接地故障运行两小时

收稿日期: 2023-03-09

<sup>\*</sup> 基金项目: 国网江西省电力公司科技项目(5218A022000H)资助

已经不适用于配电网安全稳定运行的要求,应就近快速隔离故障。因此,单相接地故障的准确选线技术对配电网的安全稳定运行至关重要。

学者专家针对小电流接地系统的故障选线方法开展了大量研究,目前方法原理上主要分为两类:基于稳态量选线和基于暂态量选线。基于稳态量选线方法主要有零序电流比幅比相法、零序电流有功分量法、谐波法与注入法<sup>[4]</sup>,其对经消弧线圈接地的系统适用性较差。基于暂态量选线方法主要有暂态零序能量法<sup>[5]</sup>、暂态零序相位法<sup>[6]</sup>、暂态波形相关法等。基于暂态量的选线方法因其不受接地方式影响,已成为选线研究的主流。韩笑等<sup>[7]</sup>提出利用小波变换提取故障后各馈线零序电流最大时频脊线,对其进行距离比较实现选线,但小波变换需要选择合适的小波基,且容易受到干扰信号的影响,从而导致误选线;孙蓉等<sup>[8-10]</sup>提出采用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)对零序电流进行分解,通过提取其特征实现选线,但 EMD 存在端点效应,且在分解复杂频率信号时容易发生模态混叠,在弧光接地故障时选线准确率较差;翟二杰等<sup>[11-12]</sup>提出利用变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)将零序电流分解为高频电容电流、直流电感电流及工频电流,根据三者之间的差异实现选线,但由于其 DC 参数的设置,很难将衰减的直流分量与工频分量准确分解出<sup>[13]</sup>,导致选线准确率下降;刘柱揆等<sup>[14-16]</sup>提出利用零序电流的暂态波形相似度差异进行故障选线的方法,但受接地故障类型影响,难以设置合理的阈值,因此无法适应不同类型接地故障,容易导致误选线;为了提高选线准确性,宁波等<sup>[17-18]</sup>提出多故障特征融合的选线方法,但融合的特征较多时,在实际工程应用时,会存在数据处理压力较大的问题。

针对以上问题,文中提出一种融合暂态高频能量与波形相关性的极限学习机(extreme learning machines, ELM)故障选线新方法。首先,采用抗模态混叠效应的 VMD 算法提取零序电流中高频成分,经希尔伯特变换(Hilbert transform, HT)得到高频成分的能量;同时,对零序电流进行相关性分析提取暂态波形综合相关系数;其次,将高频成分能量和暂态波形综合相关系数构成 2 维的故障特征向量,输入至免阈值设定的 ELM 模型,利用仿真故障数据对 ELM 进行训练,得到基于 ELM 的故障选线模型实现接地故障选线;最后,通过仿真不同类型的接地故障以及真实变电站接地故障数据对所提选线方法的准确性进行了验证。

## 1 单相接地故障选线原理

### 1.1 单相接地故障暂态特性分析

图 1 为典型 10 kV 配网发生单相接地故障后各馈线的零序电流分布示意图。当线路  $L_1$  单相接地后,所有非故障线路对地电容支路与消弧线圈电感支路并联后与故障线路串联共同构成回路。

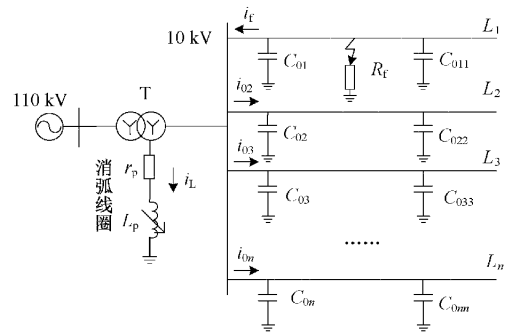


图 1 单相接地零序电流分布示意图

图 2 为故障线路暂态等值电路,其中  $u_0$  为接地点处等效零序电源,  $L_p$  为 3 倍消弧线圈电感,  $r_p$  为消弧线圈等效电阻,  $L_0$  为系统等效电感,  $C_\Sigma$  为系统非故障线路对地电容之和,  $R_0$  为系统等效电阻与 3 倍过渡电阻  $R_f$  之和。

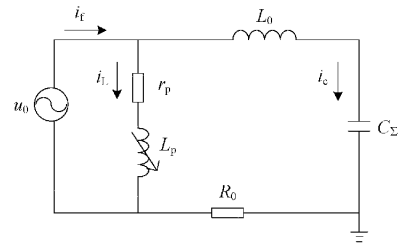


图 2 故障线路暂态等值电路

故障电流  $i_f$  由非故障线路对地电容电流之和  $i_c$  和消弧线圈电感电流  $i_L$  组成。即  $i_f = i_c + i_L$ , 根据电路理论求解,可得到:

$$i_c = i_{c,os} + i_{c,st} = I_{CM} \left\{ \begin{array}{l} \left[ \frac{\omega_f}{\omega} \sin\varphi \sin(\omega t) - \right] e^{-\delta t} \\ \cos\varphi \cos(\omega_f t) \\ + \cos(\omega t + \varphi) \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$i_L = i_{L,dc} + i_{L,st} = I_{LM} \left[ e^{-\frac{t}{\tau_L}} \cos\varphi - \cos(\omega t + \varphi) \right] \quad (2)$$

式中:  $i_{c,os}$  为暂态高频振荡的电容电流,  $i_{L,dc}$  为暂态直流衰减的电感电流,  $i_{c,st}$ 、 $i_{L,st}$  分别为电容和电感稳态工频电流。  $\omega_f$  为电容电流振荡频率,  $\delta$  为衰减系数,  $\delta = R_0/2L_0$ ,  $\tau_L$  为时间常数,  $\varphi$  为故障时的电压相位角,也称故障合闸角;  $I_{CM}$  与  $I_{LM}$  分别为电容和电感稳态工频电流峰值。

式(1)中  $I_{CM} = \omega C_\Sigma U_{0M}$  其值为非故障线路对地电容电流之和,因此故障线路暂态电流中高频电容电流  $i_{c,os}$  远远大于非故障线路。而  $i_{c,os}$  受过渡电阻  $R_f$  的影响很大,  $R_f$  增大导致衰减系数  $\delta$  增大,  $i_{c,os}$  衰减很快,此时故障合闸角  $\varphi$  对  $i_{c,os}$  的影响很小,可以忽略<sup>[19]</sup>。因此高阻接地时,  $i_{c,os}$  很小。但由于式(2)中消弧线圈电感电流  $i_L$  仅在故障线路中存在,高阻接地时故障线路暂态零序电流波形与非故障线路仍存在极性相反的特征,其波形仍存在差异。

在 Matlab 中搭建如图 1 所示 4 条架空线的配网模型,

过补偿度为 8%，线路长度分别为 15、16、18、12 km。在线路 L<sub>1</sub> 距母线 1.5 km 处发生 A 相接地，故障合闸角 φ=0° 时，进行接地故障模拟。

模拟低阻接地：过渡电阻 R<sub>f</sub> 取 5 Ω，各馈线零序电流如图 3 所示。

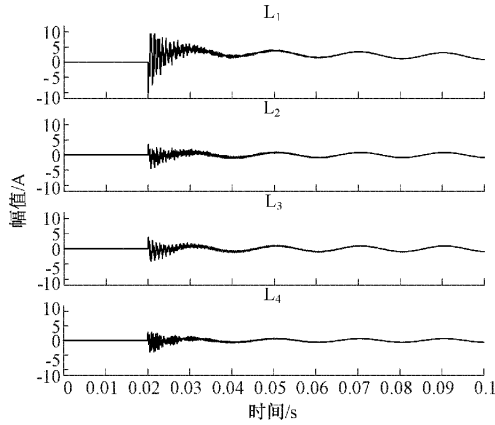


图 3 低阻接地各馈线零序电流

由图 3 可知，低阻接地时：各馈线振荡的高频电容电流  $i_{c,os}$  较为明显，且故障线路的  $i_{c,os}$  远大于非故障线路。

模拟高阻接地：R<sub>f</sub> 修改为 5 000 Ω 时，各馈线零序电流如图 4 所示。

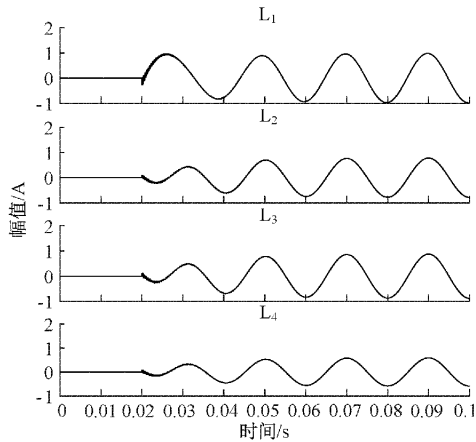


图 4 高阻接地各馈线零序电流

由图 4 可知，高阻接地时：各馈线振荡的高频电容电流  $i_{c,os}$  很小，但故障线路的暂态零序电流波形与非故障线路极性相反的特征仍明显。

由上述分析可得到单相接地故障系统的故障特性如下：

- 1) 单相接地时线路零序电流的暂态过程随着过渡电阻的增大而加快。
- 2) 低阻接地时故障线路零序电流中的高频分量远大于非故障线路。
- 3) 故障线路暂态零序电流与非故障线路极性相反，波形存在差异。

### 1.2 单相接地故障选线原理

文中选择暂态电流高频能量  $E_{hi}$  和暂态电流综合相关系数  $\rho_i$  两种故障特征进行融合选线，通过构成 2 维的故障特征向量来保障不同过渡电阻时故障选线的准确性。

1) 暂态电流高频能量  $E_{hi}$ 。由于低阻接地时故障线路暂态电流中的高频分量远大于非故障线路，可计算各馈线暂态电流中的高频能量  $E_{hi}$ ，通过比较高频能量大小实现故障选线，其中  $E_{hi}$  最大的为故障线路<sup>[5]</sup>。

VMD 是一种自适应、完全非递归的模式变分和信号处理方法<sup>[20]</sup>，可用于对故障零序电流中的高频分量进行提取。VMD 可将信号  $f(t)$  分解成  $K$  个中心频率为  $\omega_k$  的本征模态函数 (intrinsic mode function, IMF)  $u_k$ ，通过预设分解层数  $K$ ，将原始信号分解为  $K$  个 IMF，约束各个 IMF 之和为原信号，使各个分量带宽之和最小，构造变分问题，迭代搜索  $u_k, \omega_k$  最优值。VMD 能有效克服 EMD 分解过程中出现的端点效应与模态混叠现象，对噪声具鲁棒性。

VMD 的数学模型为：

$$\begin{cases} s.t. \sum_{k=1}^K u_k = f(t) \\ \min_{\{u_k, \omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[ \delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right] \cdot u_k(t) \right\| e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\{u_k\} = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$  为原信号分解出的各模态分量， $\{\omega_k\} = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k\}$  为各模态分量对应的中心频率， $\delta(t)$  为脉冲函数。

参考文献[21]，设置  $K=4$ ，IMF 中心频率从低到高排列，对 1.1 节中 L<sub>1</sub> 低阻接地时故障零序电流进行分解，如图 5 所示；同时采用文献<sup>[11]</sup>中设置  $K=3$  进行对比，分解效果如图 6 所示。

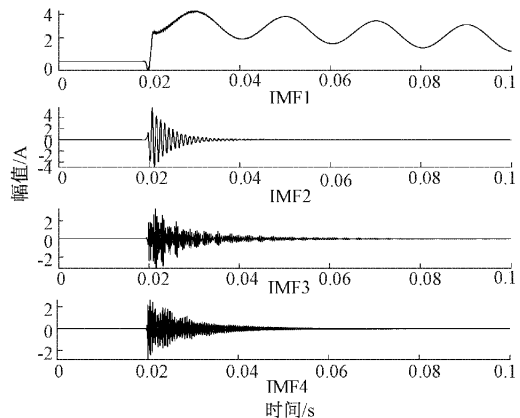
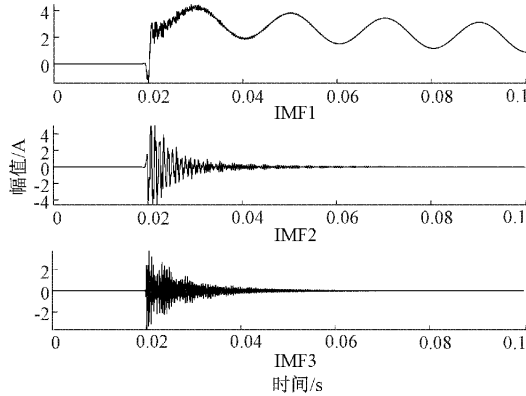


图 5 K=4 时 VMD 对故障零序电流分解效果

由图 5 可以看出，故障零序电流能够可靠分解为：IMF1 工频交流分量和衰减直流分量的叠加，IMF2~IMF4 暂态高频电容电流分量。由于 VMD 中 DC 参数的限制，其直流分量并不能有效直观的从 IMF1 中分解出来<sup>[13]</sup>，但并

图 6  $K=3$  时 VMD 对故障零序电流分解效果

不影响提取暂态高频电容电流分量;由图 6 可以看出,文献<sup>[11]</sup>中的参数设置无将直流分量与工频交流分量可靠的分离出,因此文中设置  $K=4$  用于提取高频分量成分。

2) 暂态电流综合相关系数  $\rho_i$ 。由于高阻接地时零序电流高频成分较少,但故障线路与非故障线路的暂态电流极性相反,波形存在差异,此时通过增加波形相关系数保证选线准确性,即相关系数最小的为故障线路<sup>[22]</sup>。

出线  $i$  与出线  $j$  暂态零序电流互相关系数  $\rho_{ij}$  为:

$$\rho_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^N i_{0i}(n) i_{0j}(n)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N i_{0i}^2(n) \sum_{n=1}^N i_{0j}^2(n)}} \quad (4)$$

式中:  $i_{0i}(n)$  和  $i_{0j}(n)$  分别代表出线  $i$  与出线  $j$  的采样电流,  $N$  为信号总采样点。

$\rho_{ij}$  的取值范围为  $[-1, 1]$ , 值越接近于 1, 越正相关, 波形越相似; 值越接近于 -1, 越负相关, 波形越不相似。

对变电站  $m$  回馈线的暂态电流进行相关性分析, 可得相关系数矩阵为:

$$\rho = \begin{pmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1m} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \cdots & \rho_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{m1} & \rho_{m2} & \cdots & \rho_{mm} \end{pmatrix} \quad (5)$$

则第  $i$  条馈线暂态电流综合相关系数为:

$$\rho_i = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1, j \neq i}^m \rho_{ij} \quad (6)$$

由于故障线路的暂态电流波形与非故障线路差异最大, 所以计算得出的综合相关系数  $\rho_i$  最小。

## 2 基于高频能量与相关性的 ELM 选线

### 2.1 故障特征提取

按照 1.2 节所述方法, 利用 VMD 对馈线零序电流进行 4 层分解, 根据得到的 IMF 分量求解馈线暂态电流高频能量。

对得到的 IMF 分量进行 HT:

$$H(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u_k(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (7)$$

式中:  $H(t)$  表示 Hilbert 时频谱,  $P$  为柯西主值;

式(7)可构成解析信号  $Z(t)$ 。

$$Z(t) = u_k(t) + jH(t) = A(t)e^{j\theta(t)} \quad (8)$$

式中:  $A(t)$  表示幅值,  $\theta(t)$  表示相位;

Hilbert 能量的离散表达式为:

$$E = \sum_{n=1}^N A(t) = \sum_{n=1}^N \sqrt{u_k^2(n) + H^2(n)} \quad (9)$$

其中,  $N$  为信号总采样点。

对 IMF2~IMF4 能量值求和、归一化后, 可求解每条馈线的暂态电流高频能量  $E_{hi}$ 。

按照 1.2 节所述方法计算每条馈线的暂态电流综合相关系数  $\rho_i$ , 与高频能量  $E_{hi}$  共同构成线路的故障特征。

考虑线路  $L_1$  距母线 1.5 km 处发生 A 相接地时, 合闸角为  $0^\circ, 90^\circ$ , 过渡电阻为  $5 \Omega, 5000 \Omega$ , 进行故障特征提取, 各馈线的故障特征向量如表 1 所示。

由表 1 可知: 故障线路的暂态电流高频能量  $E_{hi}$  最大, 综合相关系数  $\rho_i$  最小。

但由于接地故障类型的不同, 难以设定一个准确的阈值, 因此, 文中采用智能算法 ELM, 可避免阈值设定。

### 2.2 ELM 选线模型构造

ELM 是一种改进的单隐层前馈神经网络<sup>[23]</sup>, 训练

表 1  $L_1$  接地故障时各出线故障特征向量

$\varphi/R_f$	故障特征	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$
$0^\circ/5 \Omega$	$E_{hi}$	<b>0.437 3</b>	0.220 7	0.173 1	0.168 9
	$\rho_i$	<b>0.065 1</b>	0.451 3	0.481 2	0.382 9
$0^\circ/5000 \Omega$	$E_{hi}$	<b>0.549 0</b>	0.181 8	0.159 8	0.109 4
	$\rho_i$	<b>0.874 3</b>	0.957 9	0.958 0	0.957 9
$90^\circ/5 \Omega$	$E_{hi}$	<b>0.476 8</b>	0.271 9	0.042 4	0.208 9
	$\rho_i$	<b>-0.601 0</b>	-0.082 5	-0.057 4	-0.135 5
$90^\circ/5000 \Omega$	$E_{hi}$	<b>0.549 6</b>	0.181 1	0.159 1	0.110 2
	$\rho_i$	<b>0.831 2</b>	0.938 5	0.939 8	0.938 5

时输入层权重和隐含层阈值随机产生,在测试时无需再进行调整,只需要设置隐含层神经元个数即可,其输出层权重通过正则化法则求解矩阵方程得到,相较于传统的神经网络,ELM 具有参数设置少,计算简单无需迭代学习,训练速度快,泛化能力强,正确率高的优点。ELM 的模型结构如图 7 所示。

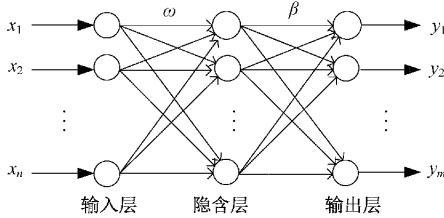


图 7 ELM 模型结构

其中： $\omega$ 、 $\beta$  分别为输入、输出层权重。

系统发生单相接地后提取各馈线零序电流的故障特征构成特征向量  $(E_{hi}, \rho_i)$  作为输入变量  $x$ , 隐含层神经元设置为 30 个节点, 激活函数采用 sigmoid 函数, 文中搭建配网模型为 4 条馈线, 因此输出变量为 4 个分类标签。

对已有的多组历史接地故障数据进行处理, 提取各馈线暂态电流的高频能量和综合相关系数作为故障特征样本, 对 ELM 模型进行训练学习, 得到适用于不同接地故障的 ELM 选线模型。在发生接地故障时, 计算本次故障线路的暂态高频能量和综合相关系数, 输入至 ELM 选线模型, 可快速识别出故障线路。

### 2.3 选线方法实现流程

文中所提选线方法步骤如下:

#### 1) 选线启动

当监测到母线零序电压  $U_0$  大于设定阈值  $0.15U_N$  时, 启动选线装置, 同时记录各馈线故障前后零序电流。

#### 2) 暂态零序电流高频能量提取

VMD 设置  $K=4$ , 对各馈线零序电流分解, 对分解得到的各 IMF 分量进行 HT, 得到其能量值; 进一步对 IMF2-IMF4 能量求和后归一化处理, 得到各馈线暂态电流的高频能量  $E_{hi}$ 。

#### 3) 暂态零序电流波形相关性分析

对各馈线暂态零序电流两两相关性分析, 形成相关系数矩阵, 最后计算每条馈线暂态电流的综合相关系数  $\rho_i$ 。

#### 4) 构成故障特征向量

将各馈线暂态电流的高频能量和综合相关系数构成每条馈线的 2 维故障特征向量  $(E_{hi}, \rho_i)$ 。

#### 5) 故障特征向量输入 ELM 选线模型

将馈线故障特征向量输入至提前训练好的 ELM 模型, 得到故障馈线的编号, 实现故障选线。

选线流程如图 8 所示。

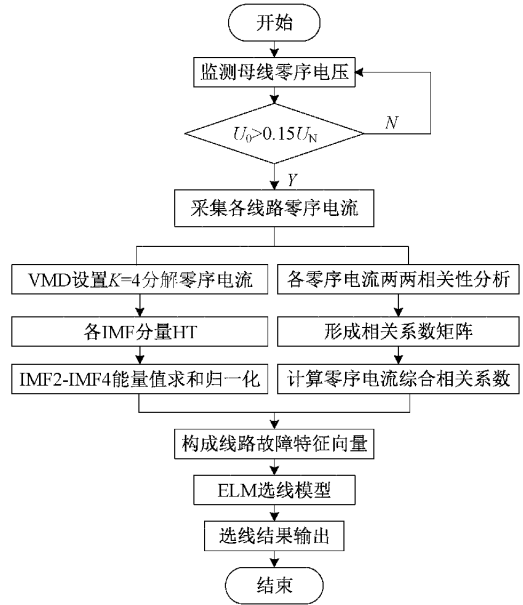


图 8 选线流程

## 3 仿真实验分析

### 3.1 样本建立与 ELM 训练及故障识别

搭建的配网仿真模型如图 9 所示, 其中参数为: 110 kV 系统采用无穷大电源, 变压器变比为 110 kV/10.5 kV, 其中 10 kV 侧中性点经消弧线圈接地, 采用过补偿, 过补偿度取 8%, 得其电感值  $L_p=6.579$  H, 消弧线圈电阻约为感抗的 1.5%~2%, 在此取 2%, 经计算  $r_p=41.316 \Omega$ , 线路负载为  $(1000+j400)k \cdot VA$ , 由于配网线路相较于输电线路较短, 采用  $\pi$  型等值电路, 其阻抗参数如表 2 所示。仿真中设置故障发生在第 2 个工频周期, 仿真时长为 0.1 s。

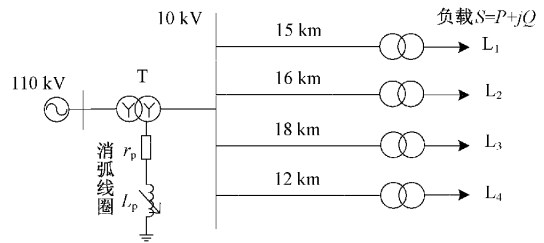


图 9 配网仿真模型

表 2 线路阻抗参数

电阻( $\Omega/km$ )		电感( $mH/km$ )		电容( $\mu F/km$ )	
正序	零序	正序	零序	正序	零序
0.012 7	0.386 4	0.933 7	4.126 4	0.012 7	0.007 8

对 4 条出线分别设置不同类型的单相接地故障, 包括 3 种不同位置、5 种不同合闸角、5 种不同过渡电阻的组合, 共 300 组接地故障数据。具体如表 3 所示。



表 3 故障设置参数

接地位置/%	合闸角/(°)	过渡电阻/ $\Omega$
10	0	5
	30	100
50	45	500
	60	1 000
90	90	1 500

提取 300 组不同类型单相接地故障的特征建立故障特征样本,每条出线随机选取 55 组,共 220 组用于 ELM 选线模型训练学习,剩下 80 组用作训练后 ELM 故障识别效果的测试。

训练过程中,模型训练误差与迭代次数关系如图 10 所示。

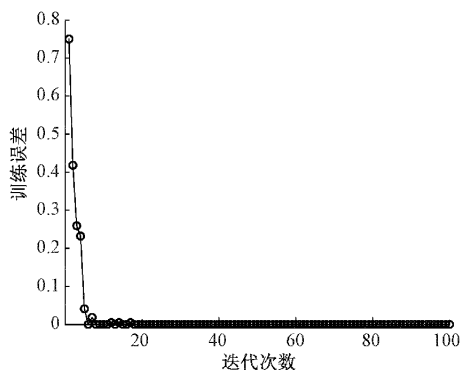


图 10 训练误差与迭代次数关系曲线

由图 10 可以看出,ELM 模型训练误差随着迭代次数的增加最后变为 0,分析样本数据可知,文中所提选线方法提取的故障特征样本维度低、特征明显,在 ELM 模型训练过程中很快即收敛。

测试效果如图 11 所示。

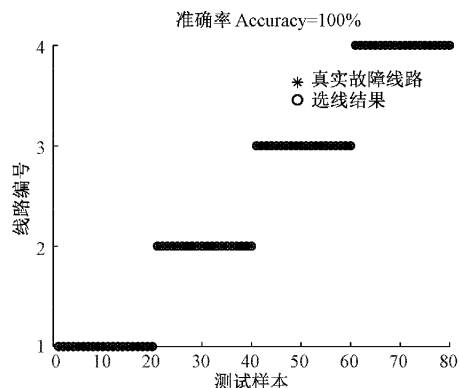


图 11 测试集故障选线结果

由图 11 可以看出 ELM 选线模型经过 220 组故障特征样本的训练与学习后,能够对剩下 80 组故障数据实现 100% 准确选线。

衡量该模型故障识别效果的性能指标主要如下:

### 1) 混淆矩阵

测试集故障识别效果的混淆矩阵如图 12 所示。

		混淆矩阵				
		1	2	3	4	100%
输出类别	1	20 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	2	0 0.0%	20 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	3	0 0.0%	0 0.0%	20 25.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	20 25.0%	100% 0.0%
	100%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%
		目标类别				
		1	2	3	4	

图 12 测试集故障识别效果混淆矩阵

由图 12 可以看出经过训练后的 ELM 模型,对于测试集样本中每条线路的 20 组故障数据均可实现 100% 准确可靠选线。

### 2) 准确率

准确率是深度学习中衡量模型分类识别效果的一个重要指标,准确率 = 预测正确的样本数/总样本数。由图 11 与 12 可以看出该模型在测试集样本中故障识别准确率:Accuracy=100%。

### 3.2 高阻接地测试

当发生高阻接地时,系统故障暂态特征较弱,容易造成选线误判。为验证文中所提选线方法在高阻接地时依然能够实现准确选线,对每条出线分别设置接地故障:2 000  $\Omega$ /0°、3 000  $\Omega$ /30°、4 000  $\Omega$ /60°、5 000  $\Omega$ /90°,位置设置在线路首段与末端,即距母线 10%、90% 处;即每条出线 8 组高阻接地故障数据,共 32 组数据。将故障特征输入至 3.1 节中训练好的 ELM 选线模型中,选线效果如图 13 所示。

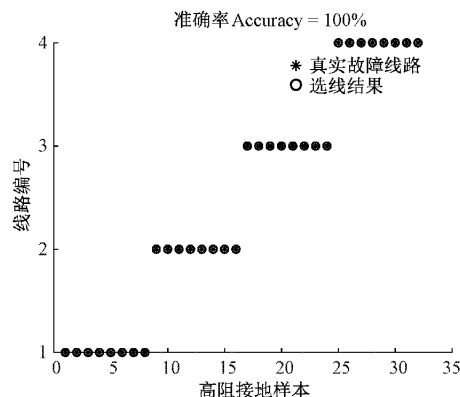


图 13 高阻接地故障选线结果

由图 13 可知,高阻接地测试选线准确率可达 100%。因此,在发生高阻接地,暂态特征量较弱时,文中所提选线方法依然能够实现可靠准确选线。

### 3.3 噪声干扰测试

在实际工程中,变电站的电力设备会产生噪声数据,影响到零序电流的分布,增加选线难度。为了验证在噪声干扰时该选线方法的可靠性,在每条出线上设置合闸角为 60°,过渡电阻分别为 100 Ω、3 000 Ω,位置设置与 3.2 节一致,在零序电流中分别加入信噪比为 10、20、30 dB 的高斯白噪声,即每条出线 12 组噪声干扰下的故障数据,共 48 组数据。将故障特征输入 3.1 节中训练好的 ELM 选线模型中,选线效果如图 14 所示。

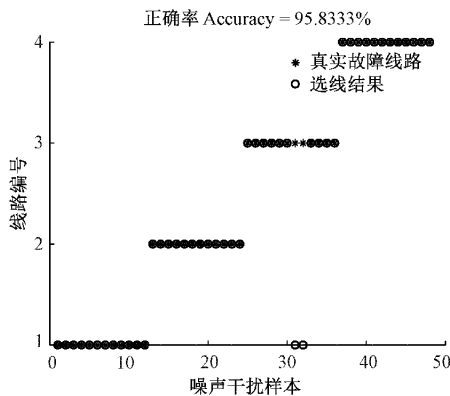


图 14 噪声干扰下故障选线结果

由图 14 可知,文中所提选线方法,在采集到的故障零序电流存在噪声干扰的情况下,选线准确率达到 95.833 3%;对误选线的数据进行分析,发现主要出现在强噪声 10 dB 干扰下的 3 000 Ω 高阻接地情况。

系统发生高阻接地时,由于故障零序电流幅值较小,在受到强噪声干扰时,文中所提出的选线方法出现误选线。因此,考虑可将受到强噪声干扰下的高阻接地故障零序电流进行滤波处理,巴特沃斯低通滤波器由于在通频带内有着优良的频率响应特性,因此常用于对高阻接地的故障零序电流进行滤波处理,以滤除高频部分的噪声干扰<sup>[24]</sup>。

### 3.4 不同智能算法故障识别准确度对比

随机森林 (random forest, RF)<sup>[25-26]</sup>、支持向量机 (support vector machine, SVM)<sup>[27-28]</sup> 与 BP (back propagation, BP)神经网络<sup>[29-30]</sup>是电力领域故障诊断与预测常用到的智能算法,文中选择这 3 种算法采用同样的样本进行训练与测试,将故障识别准确率同 ELM 对比,对比结果如表 4 所示。

由表 4 可知,相比较而言 RF 在故障识别时效果最不理想,而 SVM 在高阻接地与噪声干扰时逊色于 ELM, BP 神经网络在噪声干扰下准确率低于 ELM,综合来看,ELM 表现最好,在不同情况下选线准确率最高。

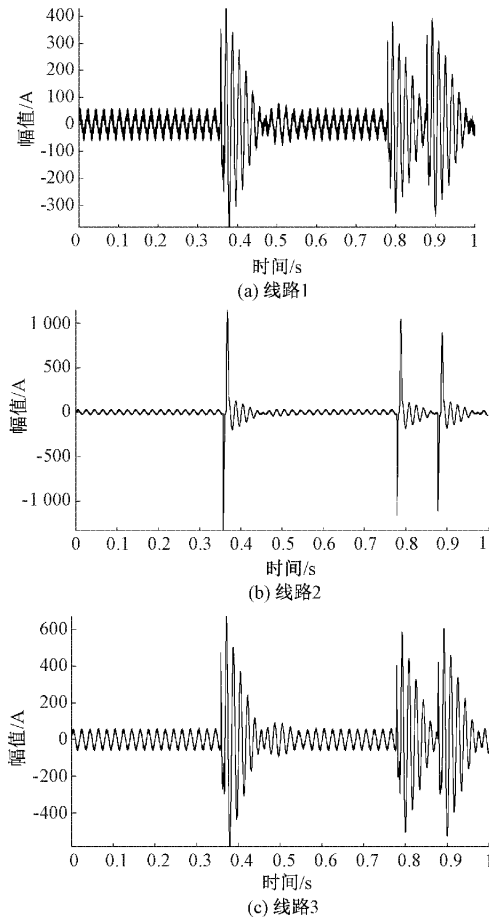
表 4 不同智能算法故障识别准确度 %

智能算法	准确率		
	测试集	高阻接地	噪声干扰
RF	97.5	84.375	87.5
SVM	100	90.625	93.75
BP	100	100	91.666 7
ELM	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>95.833 3</b>

## 4 变电站接地故障数据实例验证

以国内某 35 kV 变电站 10 kV 侧接地故障数据为例对本文提出的方法进行验证。该变电站 10 kV 侧分段母线 I 带 6 条出线,4 条在运行状态,2 条在备用状态。选择近期接地故障数据 40 组,其中 1 号线路 10 组、2 号线路 17 组、3 号线路 6 组、4 号线路 7 组。故障数据采样频率 12.8 kHz,采样时长为 1 s。其中,2 号线路发生接地的频率最高,且以间歇弧光接地居多,限于篇幅,文中仅展示一组间歇弧光接地故障时各馈线零序电流如图 15 所示,各馈线的故障特征向量如表 5 所示。

由表 5 可看出,  $E_{1\omega_2}$  最大,  $\rho_2$  最小,能够判断出故障线路为 2 号线。



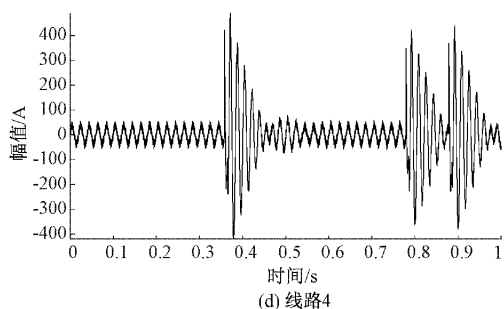


图15 线路2间歇弧光接地各馈线零序电流

表5 2号线间歇弧光接地故障特征向量

线路编号	1	2	3	4
$E_{hi}$	0.110 7	<b>0.734 7</b>	0.125 5	0.029 0
$\rho_i$	0.677 1	<b>0.169 8</b>	0.715 0	0.711 0

对40组故障数据进行故障特征提取,构成故障特征样本,输入3.1节中训练好的ELM选线模型中,选线效果如图16所示。

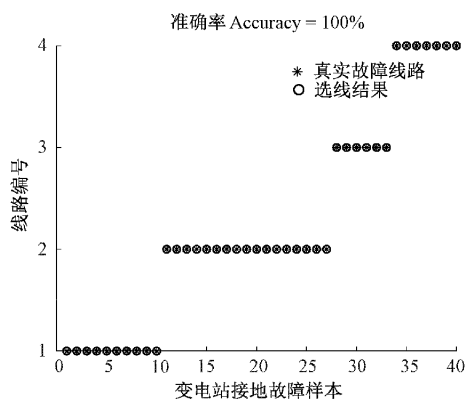


图16 变电站接地故障选线结果

由图16可知,针对实际变电站不同类型接地故障的真实数据,文中所提故障选线方法准确率可达100%,可实现准确可靠选线。

## 5 结 论

文中提出一种融合暂态高频能量与波形相关性的ELM小电流接地选线方法,该方法具有以下优点:

采用VMD提取暂态零序电流中的高频成分,能够有效避免EMD出现的端点效应与模态混叠现象,同时提取暂态电流综合相关系数,所构成的故障特征向量相较于文献<sup>[17-18]</sup>维度低,可减小选线过程中数据处理压力。

采用免阈值设定的ELM模型,能够防止在发生不同类型接地故障,因固定阈值而导致的选线错误。

经过大量仿真及实例验证,该方法基本不受故障位置、合闸角及过渡电阻影响,具有良好的抗噪性,在弧光接地时依然选线准确高,具有一定的工程实用价值。

## 参考文献

- [1] 薛永端,张海台,李成刚,等.小电流接地故障暂态选线与定位技术[J].供用电,2015,32(4):32-37,45.
- [2] 李天友,王超,陈敏维,等.典型小电流接地故障实例及暂态选线分析[J].电测与仪表,2019,56(2):116-122.
- [3] 配电网技术导则:Q/GDW 10370—2016[S].国家电网,2017.
- [4] 侯思祖,郭威,丁柱卫,等.基于注入式Duffing振子配电网故障选线[J].科学技术与工程,2019,19(17):194-201.
- [5] 吴乐鹏,黄纯,林达斌,等.基于暂态小波能量的小电流接地故障选线新方法[J].电力自动化设备,2013,33(5):70-75.
- [6] 冯光,管廷龙,王磊,等.利用电流-电压导数线性度关系的小电流接地系统接地故障选线[J].电网技术,2021,45(1):302-311.
- [7] 韩笑,罗维真,王春蕻.基于同步挤压小波变换的配电网单相高阻接地故障选线[J].科学技术与工程,2019,19(15):150-156.
- [8] 徐海燕,吴浩,李栋,等.基于门控循环单元神经网络的配电网故障选线[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(6):89-97.
- [9] 孙蓉,马寿虎,葛乐,等.基于小波能量和EMD小电流接地故障选线[J].中国科技论文,2017,12(11):1247-1251.
- [10] 陈奎,韦晓广,陈景波,等.基于样本数据处理和ADABOOST的小电流接地故障选线[J].中国电机工程学报,2014,34(34):6228-6237.
- [11] 翟二杰,舒征宇,汪俊,等.基于VMD-LSTM的小电流接地系统故障选线方法[J].电工电能新技术,2021,40(1):70-80.
- [12] 李梦涵,赵学文,李建琦,等.基于VMD-SVM的小电流接地系统故障选线方法[J].电网与清洁能源,2021,37(8):1-8.
- [13] 杜政奇,王敬华,张新慧.基于参数优化VMD和能量相似度的配电网故障区段定位方法[J].电子测量技术,2022,45(8):95-101.
- [14] 刘柱揆,曹敏,董涛.基于波形相似度的小电流接地故障选线[J].电力系统保护与控制,2017,45(21):89-95.
- [15] 尤向阳,葛笑寒,吴萍.基于零序电流波形相似度的接地故障定位方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(14):125-130.
- [16] 吴建辉,刘伟,康国庆,等.基于波形相似度的配网小电流接地故障选线技术研究[J].电网与清洁能源,2020,36(8):38-42.
- [17] 宁波,祁鑫,邵鹏,等.基于多信息距离判别分析的谐振接地系统故障选线新方法[J].电瓷避雷器,2020,



- 298(6):75-80.
- [18] 王旭强,杨青,张耀,等.基于多源信息融合的配电网故障选线新方法[J].智慧电力,2019,47(9):97-103.
- [19] 秦丽文,俞小勇,吴丽芳,等.不同过渡电阻下小电流接地故障暂态选线的适用性分析[J].广西电力,2018,41(4):1-7.
- [20] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014,62: 531-544.
- [21] 刘长良,武英杰,甄成刚.基于变分模态分解和模糊 C 均值聚类的滚动轴承故障诊断[J].中国电机工程学报,2015,35(13):3358-3365.
- [22] 郑艳艳,朱永利,刘童童,等.基于零序电流的风电场单相接地故障区段定位[J].系统仿真学报,2019,31(7):1408-1415.
- [23] HUANG G B, ZHOU H, DING X, et al. Extreme learning machine for regression and multiclass classification [J]. IEEE Transactions on Systems, 2012,42:513-529.
- [24] 庄胜斌,缪希仁,江灏,等.基于改进欧氏-动态时间弯曲距离的谐振接地配电网单相高阻接地故障选线方法[J].电网技术,2020,44(1):273-281.
- [25] 曹伟嘉,杨留方,徐天奇,等.基于精英反策略麻雀搜索优化随机森林的变压器故障诊断[J].国外电子测量技术,2022,41(2):138-143.
- [26] 王干军,李锦舒,吴毅江,等.基于随机森林的高压电缆局部放电特征寻优[J].电网技术,2019,43(4):1329-1336.
- [27] 陈奎,陈博博.基于改进暂态相关分析和支持向量机的电弧故障选线研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(24):66-73.
- [28] 冯志亮,肖涵麒,任文凤,等.基于主成分分析的海鸥优化支持向量机变压器故障诊断[J].中国测试,2023,49(2):99-105.
- [29] 江兵,杨春,杨雨亭,等.基于 ACO 优化 BP 神经网络的变压器热点温度预测[J].电子测量与仪器学报,2022,36(10):235-242.
- [30] 马健,滕召胜,邱伟,等.基于 IGA-BP 神经网络的智能电能计量设备退化趋势研究[J].仪器仪表学报,2021,42(11):123-131.

### 作者简介

高文利,硕士研究生,主要研究方向为配电网自动化及接地故障识别与定位。

E-mail:gwl20211800556@163.com

席东民(通信作者),博士,教授,主要研究领域为分布式发电与微电网运行控制、超导材料特性研究等。

E-mail:xidongmin@imut.edu.cn