

# 基于离散小波变换的输电线路故障精准定位

李策<sup>1</sup>, 王肖<sup>2</sup>

(1. 国网山西省电力公司晋中供电公司, 山西 晋中 030600;

2. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 太原 030000)

**摘要:** 为了提高架空线路和地下电缆组合输电线路发生故障时的定位精度, 提出了一种基于离散小波变换 (DWT) 的输电线路故障定位新方法; 通过 DWT 对输电线路单端测得的瞬态信号进行多分辨率分析 (MRA), 在低故障起始角情况下, 利用线模电流和零模电流检测故障, 结合小波模量极大值 (WMM) 求解从故障点到变电站的行波到达时间, 从而对输电线路故障进行精准定位; 采用半正弦电压响应的方法克服了采样频率有限和故障起始角低的缺点, 运用 100 kHz 半正弦信号的发送时间与接收导数信号的时间之差计算故障距离; 在考虑谐波畸变和故障电阻、接地电阻、故障位置和起始角变化的情况下对所提方法进行测试, 结果表明: 对于 100 km 的输电线路, 即使在故障靠近总线 (<2%) 且故障起始角较低的情况下, 所提出的方法得到的故障定位误差仅为 0.14 km。

**关键词:** 输电线路; 故障定位; 离散小波变换; 多分辨率分析; 半正弦法

## Accurate Fault Location of Transmission Lines Based on Discrete Wavelet Transform

LI Ce<sup>1</sup>, WANG Xiao<sup>2</sup>

(1. State Grid Shanxi electric power company Jinzhong Power Supply Company, Jinzhong 030600, China;

2. School of electrical and power engineering, Taiyuan University of technology, Taiyuan 030000, China)

**Abstract:** In order to improve the fault location accuracy of combined transmission line between overhead line and underground cable, a new method of transmission line fault location based on discrete wavelet transform (DWT) is proposed. Multi resolution analysis (MRA) is carried out on the transient signals measured at single end of the transmission line through DWT. Under the condition of low fault starting angle, the line mode current and zero mode current are used to detect the fault, and the traveling wave arrival time from the fault point to the substation is solved in combination with wavelet modulus maximum (WMM), so as to accurately locate the transmission line fault. The method of half sine voltage response overcomes the shortcomings of limited sampling frequency and low fault starting angle. The fault distance is calculated by using the difference between the sending time of 100 kHz half sine signal and the time of receiving the derivative signal. In view of the harmonic distortion and the changes of fault resistance, grounding resistance, fault location and starting angle, the test results show that for the transmission line distance of 100.0 km, even if the fault location is close to the bus distance of less than 2% under the condition of low fault starting angle, the fault location error of the proposed method is only 0.14 km.

**Keywords:** transmission line; fault location; discrete wavelet transform; multiresolution analysis; half sine method

## 0 引言

随着经济和基础设施的快速发展, 导致用电需求不断增加, 更多的输电线路将变电站的不同部分连接到终端用户<sup>[1]</sup>。为了改善城市的景观, 减少架空线路的堆叠, 在高密度住宅区或旅游区已采用地下电缆配电技术<sup>[2]</sup>。因此, 配电网的拓扑结构正在从原始的架空输电线路转变为架空输电线路和地下电缆的组合。然而, 架空线路和地下电缆之间的参数差异很大, 这可能会导致传统用电保护系统出错, 并给配电网的可靠性问题带来风险<sup>[3]</sup>。因此, 需要开

发一种能够检测和分类混合输电线路下故障类型的算法。电力系统的大部分故障发生在输电线路中, 输电线路保护对电力系统安全至关重要。常用的输电线路故障检测算法是通过计算电流和电压波形的基频来确定故障阻抗, 虽然具有计算简单、可靠性高的特点, 但耗时较长<sup>[4]</sup>。发生故障的输电线路由工作人员进行维修, 精确的故障定位可最大限度地缩短维修时间, 并有助于提高供电系统的可靠性。

基于阻抗法的故障定位精度受故障电阻、互耦效应和模糊线路参数的影响<sup>[5]</sup>。因此, 无参数故障定位算法可提

收稿日期: 2022-06-05; 修回日期: 2022-07-06。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51907138); 国网山西省电力公司科技项目(520510180021)。

作者简介: 李策(1973-), 男, 山西晋中人, 大学本科, 高级工程师, 主要从事智能电网技术方向的研究。

王肖(1974-), 男, 山西太原人, 博士, 副教授, 主要从事智能电网技术方向的研究。

引用格式: 李策, 王肖. 基于离散小波变换的输电线路故障精准定位[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(1): 8-14.

供更精确的结果<sup>[6]</sup>。当故障发生时, 故障瞬变产生的信息包含在向输电线路两端传播的行波中。因此, 基于行波的方法可以在较短的时间内提供准确的故障定位<sup>[7]</sup>。利用小波变换 (WT)<sup>[8]</sup>可有效分析频域和时域内与故障相关的电压<sup>[9]</sup>和电流信号<sup>[10]</sup>, 从而准确地获取行波的到达时间。WT 与人工神经网络 (ANN)<sup>[11]</sup>、最小二乘法 (LSM)<sup>[12]</sup>和支持向量机 (SVM)<sup>[13]</sup>等混合方法可用于输电线路故障定位。其中, WT 用于检测和分类输电线路中的故障时, 将输入电流信号进行 WT, 利用最大小波奇异值 (MWSV)<sup>[14]</sup>用于故障检测和分类。这种类型的故障分类取决于 MWSV 的欧几里德范数, 具体故障位置由其他方法的系数和设置值进行识别<sup>[15]</sup>。文献 [16] 通过引入基于时间和频率的功率谱密度 (PSD) 方法来检测和分类输电线路中的故障。PSD 指数 (时间) 用于故障检测, PSD 指数 (频率) 用于分类<sup>[17]</sup>。因此, 可以在短时间内检测到故障, 并使用海林格距离完成分类<sup>[18]</sup>。母小波在 WT 中至关重要, 因为如果选择合适的母小波, 可以获得直观的结果。文献 [19] 利用母小波分析了混合输电线路故障的分类。文献 [20] 指出 Daubechies (db) 母小波比任何其他母小波具有更好的精度, 并完全满足故障分类。

通过将 WT 方法与人工智能 (AI) 方法相结合, 可提高电气系统故障分类的准确性<sup>[21]</sup>。离散小波变换 (DWT) 结果被输入到人工神经网络 (ANN) 中, 通过分解故障信号可以检测和分类输电线路中的故障。文献 [22] 提出了一种输电线路保护区内部和外部故障分类技术, 该技术通过 WT 对故障信号进行分解, 并将高频分量和频谱能量输入 SVM 来分别检测故障和分类。然而, 当故障初始角较低时, 则无法成功定位故障<sup>[23]</sup>。线模电流作为线路间发生故障后产生的故障分量, 对于具有低故障起始角的不对称接地故障, 线模系数具有较低的值<sup>[24]</sup>。零模电流作为小电流接地故障产生的故障分量, 文献 [25] 提出了基于零模系数电流的故障检测和定位方法, 但对故障检测的精度较低 (约 5%)。此外, 由于电流采样频率的限制, WT 方法无法定位继电器位置附近发生的故障。文献 [26] 提出了基于脉冲注入响应的定位方法, 利用脉冲信号到故障点的回波计算故障距离。文献 [27] 通过计算输入阻抗矩阵来定位架空输电线路的高阻抗故障, 但对于单相接地故障无法精确定位。

针对架空线路和地下电缆的组合输电线路, 为了能够在故障起始角较小时准确进行故障定位, 本文提出了一种基于 DWT 的输电线路故障定位方法, 采用线模电流并结合零模电流来提高故障检测精度。利用 DWT 进行故障定位, 当检测到故障时, 将 100 kHz 半正弦电压波形注入输电线路的每个相位, 并测量故障点响应, 运用半正弦注入时刻和响应导数最大值之间经过的时间可以精确计算出故障距离。

## 1 离散小波变换 (DWT) 与多分辨率分析 (MRA)

离散小波变换 (DWT) 将  $t$  时刻的采样信号  $f(t)$  分解

为一组小波  $\psi$ :

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \sum_k \sum_j DW_k^j \cdot \psi(2^{-j} \cdot t - k) \quad (1)$$

其中:  $\psi$  和  $j$  分别为平移因子和膨胀因子,  $DW_k^j$  为小波基中的 DWT 系数。

多分辨率分析 (MRA) 在每个分析级别可提供不同的时间和频率分辨率。MRA 使用标度函数  $\varphi(t)$  和小波函数  $\psi(t)$  使得采样信号  $f(t)$  可以扩展为:

$$f(t) = \sum_k A_k^j \varphi_k^j(t) + \sum_{j=j_0}^j \sum_k D_k^j \psi_k^j(t) \quad (2)$$

其中:  $A_k^j$  为近似系数,  $D_k^j$  为细节系数。根据尺度和小波基计算为:

$$A_k^j(t) = \sum_k f_k \cdot \varphi_k^j(t) = \sum_n h(n-2k) \cdot A_k^{j+1}(t) \quad (3)$$

$$D_k^j(t) = \sum_k f_k \cdot \psi_k^j(t) = \sum_n g(n-2k) \cdot A_k^{j+1}(t) \quad (4)$$

MRA 构建的小波分解树, 如图 1 所示。

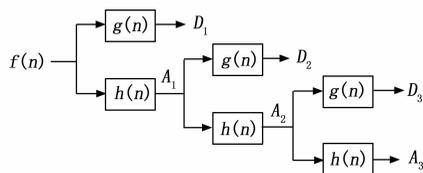


图 1 多分辨率分析 (MRA) 分解为 3 个尺度

在每个分析级别中, 通过应用连续的低通 ( $h(n)$ ) 和高通 ( $g(n)$ ) 滤波器对信号进行分解。在每次过滤后能够消除一半样本, 并在末端行实现分解, 最终可得到细节系数  $D_1, D_2, D_3$  和近似系数  $A_3$ , 从而同时提取时间信息和频率信息。因此, 较低的频率可以实现较高的时间分辨率。当电流故障瞬变分解为其模态分量时, 采样信号  $f(t)$  的 MRA 可以得到用于检测故障的线模电流和零模电流的 DWT 系数。对于接地不对称故障, 采用零模电流 ( $i_0$ ); 在其他情况下, 采用线模电流 ( $i_\alpha, i_\beta$ )。

## 2 半正弦法

通过求解控制信号传输的微分方程得到输电系统对扰动的瞬态响应:

$$\frac{d}{dx}[V(t)] = [R][i(t)] + [L] \frac{d}{dt}[i(t)] \quad (5)$$

$$\frac{d}{dx}[i(t)] = [G][V(t)] + [C] \frac{d}{dt}[i(t)] \quad (6)$$

其中: 列向量  $V(t)$  和  $i(t)$  分别为沿输电线路的电压和电流,  $[R]$ 、 $[L]$ 、 $[G]$  和  $[C]$  分别为输电线路每单位长度的电阻、电感、电导和电容。微分方程的解是入射波和反射波的总和。在时域分析中, 响应波  $R(t)$  为入射波  $V_{in}(t)$  与脉冲响应  $h(t)$  的卷积, 可以用矩阵表示为:

$$[R(t)] = [h(t)] \cdot [V_{in}(t)] \quad (7)$$

其中:  $R(t)$  和  $V_{in}(t)$  为  $n$  个样本组成的两个序列,  $h(t)$  为  $n \times n$  的循环卷积矩阵。

在故障发生前, 向输电线路的每个相位注入半正弦电

压波形。半正弦  $H_s$  定义为：

$$H_s(t) = \sin(2\pi ft) \cdot [u(t-t_0) - u(t-t_1)] \quad (8)$$

其中： $u(t)$  为单位阶跃函数， $f$  为频率，取 100 kHz。

在故障发生后，注入新的半正弦 ( $V_{in}(t)$ ) 沿着线路传输，直到到达故障点并在故障点返回。在正常条件 ( $H_{sn}$ ) 和故障条件 ( $H_{sf}$ ) 下注入半正弦时测得的信号差值为：

$$\Delta H_s = H_{sn}(t) - H_{sf}(t) \quad (9)$$

将注入半正弦的瞬间作为时间参考，利用到故障点的行程时间 ( $\Delta t$ ) 和传输速度 ( $v$ ) 能够计算故障距离 ( $d$ )。为了注入半正弦，本文使用 PLC (电力线通信) 连接的耦合电容器设计半正弦注入系统，如图 2 所示。其中，注入是通过 Hs 继电器故障定位装置完成。为了保持带宽尽可能宽，并减少传输过程中的能量损耗，所使用的电容通常在 1 到 50 nF 之间。

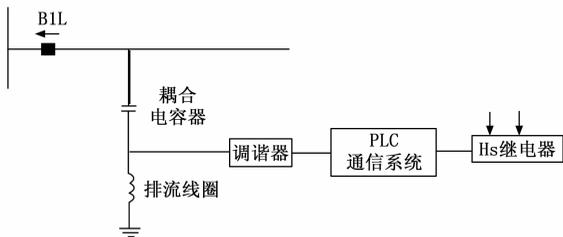


图 2 半正弦注入系统

### 3 模拟电力系统

本文使用 132 kV 输电线路的电力系统进行模拟，采用单回路单导体模型对架空线路和地下电缆的输电线路进行建模。输电线路结构布局，如图 3 所示。

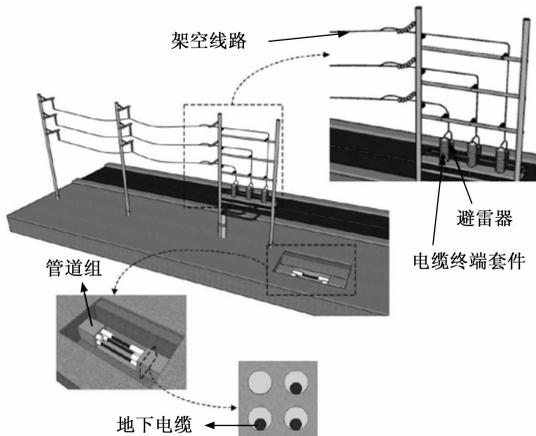


图 3 输电线路结构布局

132 kV 输电线路分为三部分：架空线路、立杆和地下电缆。架空输电线路架设在 22 米的混凝土电线杆上，地下电缆安装在距地面 1.5 米的管道组中。架空输电线路和地下电缆之间的连接点是立杆。采用 EMTP/ATPDraw 软件进行仿真，模拟系统包括连接在两个变电站之间的 220 km

输电线路。连接点位于输电线路 TL1 和输电线路 TL2 之间。其中，输电线路 TL1 为架空线路，输电线路 TL2 为地下电缆。地下电缆由尺寸为 800 mm<sup>2</sup> 的铜导线制成。导线的直径为 34.00 mm，电缆的总直径为 89.00 mm。架空线路由 400 mm<sup>2</sup> 的全铝导线 (AAC) 制成，其总直径为 26.00 mm，导线直径为 2.89 mm。安装的输电线路的规格和结构基于 PEA 标准。

132 kV 的电力系统建模，如图 4 所示。该系统在 PSCAD/EMTDC 中建模。本文中所分析的 Hs 继电器安装在总线 G1 的线路位置 B1L 处。架空输电线路 TL1 的长度为 100 km，地下电缆输电线路 TL2 的长度为 120 km。采用频率相关的相位模型，并考虑了电压波形中的谐波畸变：在正常运行时，预期电压波形 THD (THDV) 低于 2.5%；对于持续不到 1 h 的条件时，该值超过 50%。因此，THDV 的值设置为 3.75%。

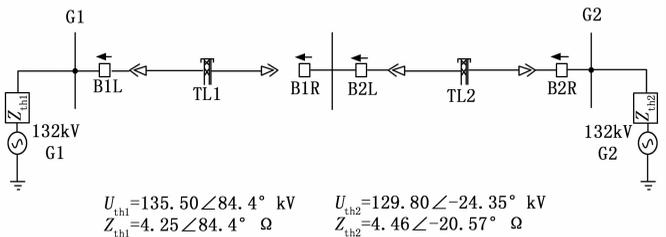


图 4 132 kV 的电力系统建模

连接到总线 G1 和 G2 的配电网由各自的戴维南等效电压和阻抗表示。线模电流和零模电流的传输速度分别为：

$$v_a = v_b = \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1}} \quad (10)$$

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 \cdot C_0}} \quad (11)$$

其中： $L_1$  和  $C_1$  为正序电感和正序电容， $L_0$  和  $C_0$  为零序电感和正序电容。因此，正序和零序参数，如表 1 所示。

表 1 正序和零序参数

三相顺序	阻抗(Ω/km)	电感(mH/km)	电容(nF/km)
正序	$R_1 = 0.197$	$L_1 = 1.392$	$C_1 = 8.289$
零序	$R_0 = 0.214$	$L_0 = 2.326$	$C_0 = 4.994$

### 4 故障检测与定位算法

#### 4.1 故障检测

故障起始导致电流模式的变化，当故障起始角接近零时，检测到的故障信号较弱，进而容易被噪声所掩盖。因此，本文通过零模电流改进故障检测，零模电流提供了更多的相关信息和接近过零区域故障起始角的可感知幅度。

将电流故障暂态分解为模态分量，并利用线模电流和零模电流进行故障检测来提高故障检测能力。检测不同故障类型的电流模式，如表 2 所示。其中，3L/3LG 为三相故障，LL 为线对线，LLG 为双线接地故障，SLG 为单相接

地故障, A, B 和 C 为线路的 3 个相位。

表 2 检测不同故障类型的电流模式

故障类型		电流模式		
		$i_a$	$i_b$	$i_c$
三相故障	3L, 3LG	是	是	否
双向故障	LL	是	是	否
	LLG	是	是	是
单相接地故障 (SLG)	A-G, B-G	是	否	是
	C-G	否	是	是

## 4.2 小波分析

模态变换可以将三相耦合线路分解为 3 个独立的传输模式。本文采用 Clarke 变换计算电流的模态分量:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_a \\ i_b \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & \sqrt{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中:  $i_0$  为零模电流,  $i_a$  和  $i_b$  为线模电流。

电流信号的 MRA 提供 DWT 系数, 使用小波模量极大值 (WMM) 求解系数的绝对局部最大值和发生瞬间 (即从故障点到变电站的行波到达时间)。本文对具有不同消失矩的 Haar、Daubechies (db)、Symlets、Coiflets、双正交、反向双正交和离散 Meyer 小波族进行测试, 从而选择最合适的母小波。根据计算结果, 并考虑到 Daubechies 族在故障测距中的应用特性及其较低的计算量, 本文选择 db3 小波作为母小波。应用 WMM 可准确识别波峰, 因此, 故障距离计算为:

$$d_{dwt} = v \frac{t_2 - t_1}{2} \quad (13)$$

其中:  $t_2 - t_1$  为 DWT 系数的两个连续最大值之间的时间差,  $v$  为通过线路或地面的传输速度。通过等式 (10) 从正序参数计算线模电流的传播速度。对于起始角较低的 SLG 故障, 采用半正弦  $H'_s$  法进行计算。

## 4.3 故障定位

在故障定位器注入半正弦  $H_s$  信号, 并在正常情况下记录配电网响应, 从而使故障定位器检测到输电线路中的任何异常。

当检测到故障时, 在输电线路的每个相注入  $H_s$  并记录。因此, 通过公式 (9) 计算信号  $\Delta H_s$ 。将注入  $H_s$  的瞬间为时间基准,  $\Delta H_s$  的最大值可以用来确定故障发生时, 从注入  $H_s$  信号的瞬间到接收反射信号的时刻 ( $\Delta t_{HSF}$ ) 所经过的时间可得到故障距离为:

$$d_{HSF} = v \frac{\Delta t_{HSF}}{2} \quad (14)$$

在  $H_s$  方法中, 最大值的优选替代方法是考虑  $\Delta H_s$  的时间导数, 该时间导数可以表示为故障时半正弦  $H_s$  信号与系统脉冲响应 ( $\Delta_{sF}$ ) 变化的卷积:

$$\Delta H'_s(t) = \frac{d\Delta H_s}{dt} = \sum_{t'=0}^{n-1} H'_s(t') \cdot \Delta_{sF}(t-t') \quad (15)$$

其中:

$$H'_s(t) = 2\pi f \cdot \cos(2\pi f t) \cdot [u(t-t_0) - u(t-t_1)] \quad (16)$$

其中:  $H'_s$  从最大值开始使其更容易得到定位的故障距离 ( $d_{HSF}$ )。

## 5 实验分析

### 5.1 实验设置

虽然 DWT 方法具有较高的故障定位精度, 但由于采样频率的限制, 无法定位靠近变电站的故障。为了确保准确的故障定位, DWT 系数的两个连续峰值之间的时间差为 DWT 周期的两倍。因此, 当电流信号采样频率为 1.7 MHz 时, 故障定位器的阈值距离  $B_d$  为 2 km, DWT 可以在该阈值距离范围内进行准确的故障定位, 但在该阈值距离范围内存在盲区。因此, 本文提出的算法在单相接地故障和故障起始角较小情况下, 运用半正弦注入时刻和响应导数最大值之间经过的时间可以精确计算出故障距离。

### 5.2 信号衰减

在输电线路中, 信号在传输时会损失能量。单位长度的衰减随频率增加而增加, 但也受地面电阻 ( $\rho$ ) 的影响<sup>[28]</sup>。在有接地回路的架空输电线路中传播时, 单位长度的串联阻抗是将地面作为理想导体的串联阻抗与接地阻抗积分的总和, 通过在 PSCAD 中直接数值积分进行评估。接地阻抗积分可以通过解析近似法估算<sup>[29]</sup>。如果接地是理想导体 ( $\rho \approx 0 \Omega \cdot m$ ), 则衰减可以忽略。对于较低的  $\rho$  ( $< 100 \Omega \cdot m$ ), 衰减随着  $\rho$  的增加而迅速增加, 从  $\rho = 100 \Omega \cdot m$  开始, 衰减保持不变, 如图 5 所示。随着直线长度的增加, 地面回波影响注入的半正弦。

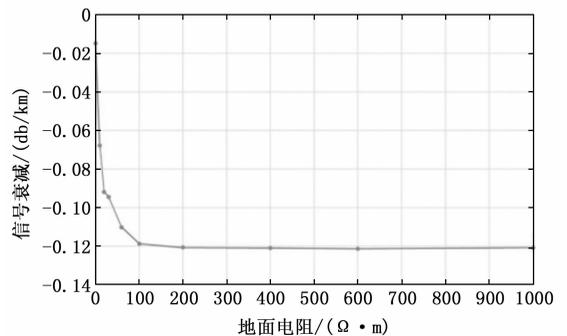


图 5 衰减随地面电阻的变化

### 5.3 故障定位

在图 4 所示的电力系统中, 通过改变故障电阻、位置和故障类型可以评估算法性能。在地面电阻率为  $\rho = 200 \Omega \cdot m$  且极低起始角 ( $0^\circ$ ) 情况下, 当故障电阻  $R_f$  分别为  $0 \Omega$  和  $150 \Omega$  时, 不同故障类型在不同故障位置的定位误差分别为图 6 和图 7 所示。

由图 6 和图 7 可见, 无论故障电阻  $R_f$  分别为  $0 \Omega$  和  $150 \Omega$  时, 故障电阻对 LL 故障、3L 故障和 LLG 故障的定位误差影响并不大, 而对 SLG 故障的定位误差由较大影响。这是由于 SLG 故障 (单相接地故障) 发生时故障相的电压降到零, 非故障相的电压升高到线电压。Hs 继电器启动,

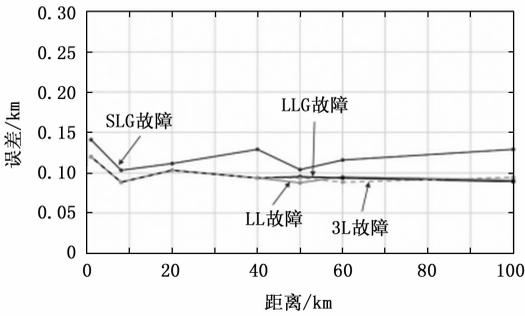


图 6 当  $R_f=0$  时, 不同故障位置的定位误差

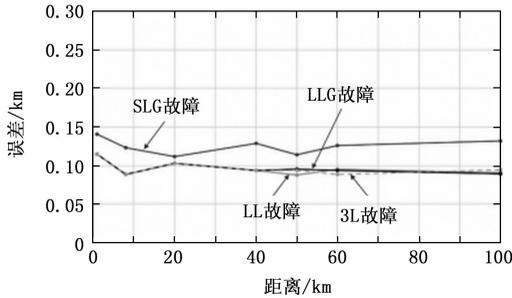


图 7 当  $R_f=150 \Omega$  时, 不同故障位置的定位误差

发出接地信号微弱。同时伴随着工况条件复杂为故障定位检测中的 DWT 分析带来了难度。

当发生 SLG 故障且故障电阻  $R_f$  介于 0 和 150  $\Omega$  之间时, 不同故障位置的定位误差, 如图 8 所示。

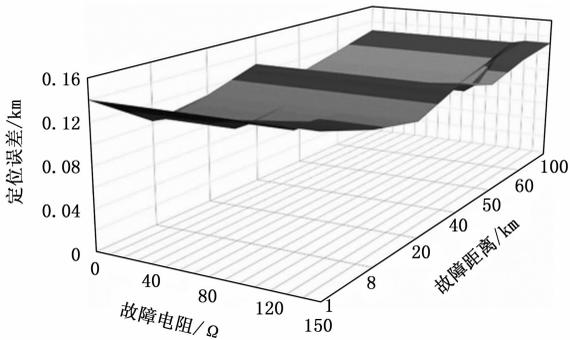


图 8 当  $R_f$  为 0 至 150  $\Omega$  时, SLG 故障的定位误差

对于架空输电线路 TL1 长度为 100 km 且靠近总线的 SLG 故障, 在小于阈值距离  $B_d$  范围内, 在地面电阻为  $\rho = 200 \Omega \cdot m$  且故障电阻  $R_f$  为 150  $\Omega$  时, 不同故障位置的定位误差, 如表 3 所示。

表 3 不同故障位置的定位误差

故障位置/m	定位的故障距离/m	误差/m
1 500	1 627.64	127.64
750	876.84	126.84
500	632.79	132.79
200	317.18	117.18
100	233.84	133.84

由表 3 可见, 无论 SLG 故障发生在任何位置, 定位误差均小于 133.84 m, 即误差率小于 0.14%。发生 SLG 故障后, 故障相对地电压降低, 非故障两相的相电压升高, 但线电压却依然对称。根据线路故障监测终端半正弦注入系统发出的信号可快速锁定故障范围, 查到故障点。因此, SLG 故障定位误差与起始角、故障电阻或接地电阻率无关。

当发生 SLG 故障且起始角介于  $0^\circ$  和  $270^\circ$  之间时, 不同故障位置的定位误差, 如图 9 所示。

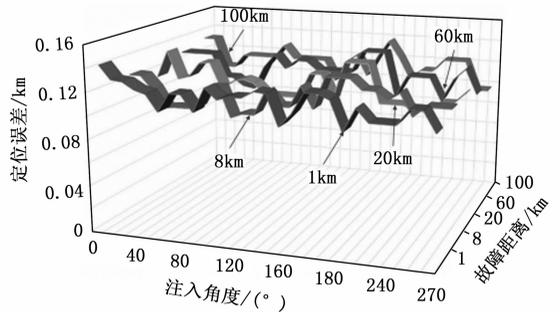


图 9 当起始角为  $0^\circ$  至  $270^\circ$  时, SLG 故障的定位误差

由图 9 可见, SLG 故障不同故障位置的定位误差不受起始角的影响。这是由于零模电流结合 WMM 可以求解从故障点到变电站的行波到达时间, 在故障起始角变化过程中, 通过 MRA 可提供更多的相关信息和接近过零区域的可感知幅度。

此外, 当发生 SLG 故障且地面电阻介于 0 和 1 000  $\Omega \cdot m$  之间时, 不同故障位置的定位误差, 如图 10 所示。

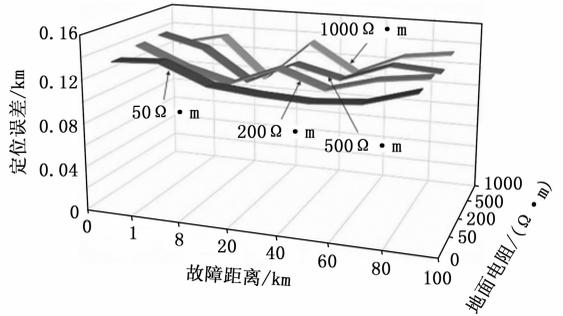


图 10 地面电阻变化对 SLG 故障的定位误差

由图 10 可见, 不同故障位置的定位误差不受地面电阻的影响, 且地面电阻仅影响波形衰减, 这是由于在 PLC 连接的耦合电容器设计半正弦注入系统中, 从注入半正弦的瞬间作为时间基准, 相对于 100 kHz 的半正弦信号频率, 地面电阻对故障定位影响可以忽略不计。

### 5.4 方法比较

对于图 4 所示的电力系统, 将本文方法与其他故障定位方法进行性能比较, 本文选取文献 [30] 提出的离散快速傅里叶变换 (DFFT) 方法、文献 [31] 提出的 DFFT 方法与改进视在阻抗 (JCF) 混合方法、文献 [32] 提出的基于决策树 (DT) 的故障定位方法和文献 [33] 使用的传统

DWT 方法。不同故障定位方法的比较结果, 如表 4 所示。

表 4 不同故障定位方法比较

定位方法	定位距离 (长度%)	最大误差	故障角度	故障电阻	地面电阻
DFFT 方法	<2%	—	—	0 至 75 Ω	100 Ω·m
	10~40%	64 km			
	40~90%	59 km			
	90~100%	100 km			
DFFT+JCF 方法	<2%	—	30°和 60°	0 至 75 Ω	100 Ω·m
	10~40%	1.13 km			
	40~90%	2.84 km			
	90~100%	2.37 km			
DT 方法	<2%	—	30°和 60°	0 和 30Ω	—
	10~40%	0.37 km			
	40~90%	0.21 km			
	90~100%	0.33 km			
DWT 方法	<2%	—	0°至 90°	0 至 80 Ω	100 Ω·m
	10~40%	0.40 km			
	40~90%	0.75 km			
	90~100%	0.19 km			
本文方法	<2%	0.14 km	0°至 270°	0 至 150 Ω	50~ 1 000 Ω·m
	10~40%	0.13 km			
	40~90%	0.14 km			
	90~100%	0.13 km			

由表 4 可见, 与传统 DWT 方法和 DFFT 方法相比, 本文方法具有更高的故障定位精度, 即使故障位置靠近总线 (<2%) 且故障起始角较低的情况下, 也能得到最高的故障定位精度, 且与地面电阻值无关。这是由于本文提出的 Hs 继电器故障定位装置中, 通过测量发送 100 kHz 半正弦信号的时间与接收导数响应的时间之间的差来计算故障距离, 相比传统的 DWT 方法, 增加了 MRA 可以得到用于检测故障的线模电流和零模电流的 DWT 系数, 从而提高了故障定位精度。

## 6 结束语

架空线路和地下电缆的组合配电网拓扑结构, 导致参数差异给输电线路故障定位带来了新的难度。为此, 本文提出了一种基于单端测量的输电线路故障精确定位方法。通过对电流瞬变进行小波多分辨率分析来检测故障。当故障起始角接近零时, 采用线模电流并结合零模电流来提高故障检测。通过测量发送 100 kHz 半正弦信号与接收导数响应之间的时间差来计算故障距离。综合考虑谐波畸变、故障电阻、接地电阻、位置和起始角变化等因素对所提出的方法进行了验证。在未来的研究中, 将致力于提高远程接收信号的响应速度, 从而进一步压缩故障定位所需的时间。

### 参考文献:

[1] 赵 平, 邓如玉, 李志飞, 等. 基于改进 DEMATEL 的输电线路跨越施工安全影响因素研究 [J]. 安全与环境学报,

2022, 22 (1): 36-43.

[2] 王 丹, 钱玉良. STM32 和 LoRa 的地下电缆在线监测系统设计 [J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2021, 21 (1): 88-91.

[3] 林 鹏, 韦宝泉, 赵 宁. 中低压地下电缆线路的行波特性研究 [J]. 工业控制计算机, 2015, 28 (1): 151-152.

[4] 陆玉军, 李 澄, 陈 颖, 等. 一种配电网故障区段定位及隔离方法 [J]. 计算技术与自动化, 2020, 39 (4): 7-12.

[5] 王 静, 李泽滔. 配电网故障定位算法研究综述 [J]. 智能计算机与应用, 2020, 10 (3): 228-231, 235.

[6] 徐明阳, 刘益青, 邢志超, 等. 基于迭代思想的同杆双回线单相接地故障定位方法 [J]. 山东电力技术, 2021, 48 (10): 40-47.

[7] 余泽轩, 帕孜来·马合木提. 基于小波分析的输电线路多端电压行波故障定位 [J]. 现代电子技术, 2021, 44 (20): 117-120.

[8] 郑武略, 张富春, 李伟性, 等. 基于二进小波变换的超高压输电线路单相接地故障定位 [J]. 电子设计工程, 2021, 29 (8): 115-118, 123.

[9] 郭秀才, 刘冰冰, 王力立. 基于小波包和 CS-BP 神经网络的矿用电力电缆故障诊断 [J]. 计算机应用与软件, 2021, 38 (9): 105-110.

[10] 李 默. 基于 MATLAB 的输电线路故障电压波形消噪仿真 [J]. 自动化应用, 2018 (1): 82-84.

[11] 胡红利, 崔晨辉, 员鹏宇, 等. 电流互感器饱和检测以及畸变电流补偿 [J]. 西北大学学报 (自然科学版), 2022, 52 (1): 52-59.

[12] 张俊辉. 基于小波变换的电气化铁路谐波检测 [J]. 电气应用, 2019, 38 (6): 17-21.

[13] 朱晓玲, 李 琨, 张长胜, 等. 基于 Gabor 小波变换和多核支持向量机的电梯导轨故障诊断方法 [J]. 计算机科学, 2020, 47 (12): 258-261.

[14] 闫文康, 闫 毅, 范亚楠, 等. 基于小波变换熵值及高阶累积量联合的卫星信号调制识别算法 [J]. 空间科学学报, 2021, 41 (6): 968-975.

[15] 闫爱云, 赵宇航, 孙向伯, 等. 基于小波变换和 SVDD 的轴承故障诊断算法研究 [J]. 信息系统工程, 2021 (10): 135-136, 140.

[16] 段子敬, 赵冰蕾, 李春波, 等. 基于特征融合方法的微弱认知衰退息态脑电数据自动检测技术研究 [J]. 计算机应用研究, 2022, 39 (4): 1137-1142, 1167.

[17] 李靖超, 应雨龙. 基于功率谱密度的通信辐射源个体识别方法 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021, 19 (4): 596-602.

[18] 董明刚, 姜振龙, 敬 超. 基于海林格距离和 SMOTE 的多类不平衡学习算法 [J]. 计算机科学, 2020, 47 (1): 102-109.

[19] 刘 辉, 李永康, 高 放, 等. 基于小波散射协同 BiLSTM 的输电线路故障诊断 [J]. 国外电子测量技术, 2021, 40 (12): 165-172.

[20] 匡小青, 凌 宇, 万 新. 基于小波多尺度分析的输电线路交互式数据迁移系统设计 [J]. 电子设计工程, 2021, 29

(17): 147 - 151.

[21] 刘经纬, 赵 辉, 周 瑞, 等. 高精度自适应小波神经网络人工智能方法探索 [J]. 计算机科学与探索, 2016, 10 (8): 1122 - 1132.

[22] 张祚洪, 王利恒. 基于小波分析和 GA-SVM 的小电流接地故障选线方法 [J]. 自动化与仪表, 2021, 36 (8): 8 - 12, 23.

[23] 李胜辉, 白 雪, 董鹤楠, 等. 基于小波与栈式稀疏自编码器的电力电缆早期故障定位方法研究 [J]. 国外电子测量技术, 2019, 38 (5): 146 - 151.

[24] NARGES R, NABIOLLAH R, IRAJ A, et al. A hybrid artificial neural network and wavelet packet transform approach for fault location in hybrid transmission lines [J]. Electric Power Systems Research, 2022, 204 (5): 107 - 121.

[25] 刘 畅, 刘爱莲, 李英娜, 等. 多 T 型支接线路配电网系统故障定位方法 [J]. 数据通信, 2022 (2): 23 - 27.

[26] LUCAS G, MATEUS L, LUIZ F, et al. Analysis of typical PLC pulses for sensing high-impedance faults based on time-domain reflectometry [J]. International Journal of Electrical

Power & Energy Systems, 2022, 135 (2): 157 - 168

[27] 张 豪, 詹红霞, 张 曦, 等. 基于多端故障电流匹配的配电网故障定位方法 [J]. 智慧电力, 2020, 48 (4): 97 - 103.

[28] 戴 锋, 刘贞瑶, 陈 轩. 考虑故障暂态信号衰减特性的分布式行波测距 [J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36 (6): 77 - 84.

[29] 王 乐, 杜凤瑾. 基于小波变换的改进双端行波法故障定位研究 [J]. 电工技术, 2022 (3): 34 - 37.

[30] EDWIN C, PATRICK S, HIEN D, et al. Series arc fault location algorithm based on impedance parameters and fault map trace generation [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 130 (9): 106 - 121.

[31] 陈 希, 李朝辉. 基于小波频谱细化的直流输电故障测距 [J]. 信息技术与信息化, 2022 (2): 147 - 150.

[32] 潘 磊, 赵忠盖, 刘 飞. 基于 PCA-RFR 的传感器故障定位方法 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (4): 32 - 35, 40.

[33] 豆文政, 冯 杰, 孟春旅, 等. 配电网小电流单相接地故障选线方法研究 [J]. 微型电脑应用, 2022, 38 (1): 91 - 95.

(上接第 7 页)

件设计方法, 测控终端软件通过配置数据库的方式可以快速更新修改, 通用性好. 平台软件具有自动化测试能力, 可自定义指令发送序列及发送要求, 自动监测遥测状态, 平台软件还可自主判读测控入境帧、包、遥测接收正确性, 可减少测试人员重复劳动, 有助于及早发现问题, 同时可提高测试可靠性.

该地面测试平台经过的某型号研制、试验等过程的验证, 结果表明具有良好的使用效果, 可为其它卫星地面测控测试系统提供参考.

参考文献:

[1] 戴洞峰, 陈逢田, 李培华, 等. 我国小卫星综合测试技术发展展望 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (6): 145 - 152.

[2] 高 扩, 刘 磊, 杨杰峰, 等. 适用于多星并行测试的通用测控地面测试平台设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (1): 1 - 12.

[3] 李文霁, 曾 鸿, 任光杰, 等. 卫星并行测试中测控前端通用化设计 [J]. 航天器工程, 24 (6): 129 - 133.

[4] 杨杰峰, 刘 洋. 量子科学实验卫星通用化可配置地面测试平台的设计与实现 [J]. 信息通信, 2017, (2): 82 - 83.

[5] 程 城, 仇梦宇. 面向批产化的卫星自动化测试系统设计研究 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (2): 5 - 8.

[6] 王建军, 陈逢田, 李培华. 卫星星座综合测试系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (1): 7 - 11.

[7] 李 腾, 王礼亮, 杨 勇, 等. 卫星导航终端批量测试系统设计 [J]. 导航定位学报, 4 (2): 75 - 80.

[8] 马贤颖, 刘文红, 夏 焯. 航天测控系统遥控软件自动化测试仿真平台研究 [J]. 系统仿真学报, 2014, 26 (4): 823 - 829.

[9] 付伟达, 张士峰, 张 锐, 等. 小卫星测控的模块化自动测试系统构建 [J]. 航天器工程, 2013, 22 (2): 104 - 107.

[10] 冯志强, 何 涛, 封家鹏. 卫星测控系统多通道地面测试平台设计 [J]. 飞行器控制学报, 2017, 36 (4): 253 - 258.

[11] 李常青, 许 利, 罗 霞. 扩频测控系统中非相干测速技术的实现 [J]. 无线电工程, 2021, 51 (1): 38 - 43.

[12] 秦玉峰, 聂少军, 赵 鸿, 等. 基于高级在轨系统的测控数传一体化方案 [J]. 飞行器测控学报, 2016, 35 (5): 409 - 414.

[13] 杨同智, 周汝志, 盛开明. 一种集成化的卫星 PCM 测控与时间同步性能测试系统设计 [J]. 宇航计测技术, 2019, 39 (4): 62 - 66.

[14] 刘晓敏, 闫金栋, 刘 鹤. 一种卫星直扩跳频测控系统自动化测试方法 [J]. 航天器工程, 2018, 27 (3): 119 - 126.

[15] 李利群, 庞建国, 孙海晶, 等. 小卫星快速一体化测试软件的设计与实现 [J]. 测控技术, 2021, 40 (6): 14 - 17, 26.

[16] 赵瑞峰, 董 房, 陆 洋, 等. 卫星通用自动化测试系统体系结构研究 [J]. 信息技术, 2011, 35 (4): 65 - 68.

[17] 安 然, 任家峪, 张 卓, 等. 基于 USB 的卫星通用化地面测试软件的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (12): 133 - 136.

[18] 刘 洋, 李家琦, 李宗德. 基于数据格式库的卫星通用测试软件设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (8): 2680 - 2683.

[19] 陈 靖. 天巡一号微小卫星正样星结构设计与力学环境试验研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.

[20] 汪 静, 贾 旭. 资源一号 02B 卫星分系统间抗电磁干扰的措施 [J]. 航天器工程, 2008, 17 (6): 54 - 58.

[21] 潘增富, 李国强, 胡金刚. 卫星分舱热真空试验方法 [J]. 中国空间科学技术, 2005, 25 (3): 40 - 45, 65.