

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240217

基于SAO-VMD-S的双端柔性直流输电故障测距方案

王思华^{1,2}, 王羚佰¹

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省轨道交通电气自动化工程实验室
(兰州交通大学), 甘肃 兰州 730070)

摘要: 针对柔性直流输电线路故障定位过程中信号易受噪声干扰、耐过渡电阻能力差的问题, 提出了采用小波变换(wavelet transform, WT)进行消噪处理、并结合变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)的柔性直流输电线路故障定位方案。首先利用基于 Logistic 函数的循环位移小波阈值去噪对故障信号进行处理。然后采用雪消融优化器(snow ablation optimizer, SAO)结合 VMD 对信号进行有效分解。最后对分解后的高频分量进行 S 变换(S-transform, ST), 选取对应频率下的幅值曲线进行波头标定。此外, 提出了一种不依赖波速的测距算法。在 PSCAD/EMTDC 平台中搭建双端柔性直流系统并进行仿真验证。结果表明, 所提方案不仅对采样率要求低, 且能耐受 300 Ω 的过渡电阻和 30 dB 的噪声, 在不同故障距离下均能准确进行测距。

关键词: 柔性直流输电; 小波去噪; 雪消融优化器; 变分模态分解; S 变换; 故障测距

Fault location scheme for dual-terminal flexible DC transmission based on SAO-VMD-S

WANG Sihua^{1,2}, WANG Lingbai¹

(1. College of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Rail Transit Electrical Automation Engineering Laboratory of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: A flexible DC transmission line fault location scheme is proposed to address the problem of signal susceptibility to noise interference and poor transient resistance capability in the fault location process, in which wavelet transform (WT) for noise cancellation and variational mode decomposition (VMD) are used. First, the fault signal is denoised using a Logistic function-based cycling displacement wavelet threshold. Then a snow ablation optimizer (SAO) and VMD are used to effectively decompose the signal. Finally, S-transform (ST) is conducted on the decomposed high-frequency components, and the amplitude curves at the corresponding frequencies are selected for wavehead calibration. In addition, a distance measurement algorithm independent of wave speed is proposed. Simulation verification is performed by building a double-ended flexible DC system in the PSCAD/EMTDC platform. The results show that the proposed scheme not only requires low sampling rate but also has the ability to withstand 300 Ω transient resistance and 30 dB noise, so it is able to accurately measure distances at different fault locations.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51767014 and No. 51867013).

Key words: flexible DC transmission; wavelet denoising; snow melting optimizer; variational mode decomposition; S transformation; fault distance measurement

0 引言

在国家双碳政策的背景下, 新能源发电日益增多, 并逐步在整个电力系统中占据主导地位^[1]。基

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51767014, 51867013); 中国铁路总公司科技研究开发计划项目资助(2017010-C)

于模块化多电平换流器的高压直流(modular multilevel converter based high voltage direct current, MMC-HVDC)输电技术具有输送距离远、输电容量大、经济性好等优势, 已广泛应用于“西电东送”等远距离大容量传输、跨区域电网互联、海上风电送出、孤岛送电等领域^[2]。柔性直流输电已然成为全球电网发展的重要趋势。

直流输电包括电缆输电和架空线输电两种模

式。电缆输电的优点是可靠性高，不受周围环境和污染的影响，但是不适合远距离和大容量电能传输，且成本较高。架空线路由于适合长距离传输电能且成本低廉，近年来在直流输电工程中得到了广泛的应用，逐渐成为未来直流输电的主要趋势。由于架空线路较长且导体处于外界环境之中，更易受到气候和地形影响，增加了故障发生的风险^[3]。因此迅速而准确地定位输电线路的故障位置对于保障电力系统安全运行和提高系统稳定性至关重要。

目前许多学者对直流电网故障测距进行了广泛研究，主要分为以下 5 类。

1) 行波测距法通过对故障行波进行标定确定故障位置。文献[4]采用二分递推奇异值分解，解决了小波变换中不同小波基引起突变位置偏移的问题。文献[5]提出了基于局部特征有理样条插值均值分解实现对故障电压行波的局部均值分解。文献[6]利用 teager 能量算子解调得到的能量谱对行波波速进行拟合，解决了行波传输过程中波速不确定的影响。

2) 固有频率法通过检测行波中的固有主频率确定故障位置。文献[7]利用 MUSIC 算法对电流行波检测固有主频率。文献[8]提出利用第二固有频率进行测距，以解决第一固有频率过小不易检测的问题。文献[9]提出利用双端频差比进行测距，该方案不受边界的影响。

3) 主动脉冲法在行波法的基础上提出主动向故障点注入脉冲测距。文献[10]探讨了适合主动注入的脉冲陡度和持续时间。而文献[11]进一步探讨了脉冲的频率。文献[12]则提出了通过开断固态断路器主动注入脉冲的新方式。

4) 智能算法通过对神经网络进行训练实现故障定位。文献[13]将不同小波尺度下的小波模极大值作为网络输入。文献[14]提出了一种支持向量回归模型同 Bat 算法相结合的故障测距方法。文献[15]则使用小波能量谱向量作为输入，应用于门控循环单元模型中。

5) 故障分析法通过化简模型得到故障点处的电气量进行故障测距。文献[16]利用故障点处的计算电阻变化率最小这一特征进行故障定位。

在上述各种测距方法中，行波测距因其坚实的理论基础和较高的精度被广泛应用于现有的直流工程中。其中，大部分采用双端行波测距法来进行故障定位。然而现有的双端行波测距方案面临一些挑战，包括：抗噪声干扰能力差，容易引起波头标定的混乱；所需采样率过高，超出了现有设备的能力；

波速难以准确确定，传输距离的增加会因色散现象导致波速衰减；如果测量过程中任何一端波头信息丢失，都会使得测距失败。为了解决上述问题，本文基于行波理论，提出了一种新型双端行波测距方案。

本文在分析直流输电线路故障特征背景下，先通过循环位移的改进小波阈值去噪(cycle spinning wavelet thresholding denoising, CSWTD)方法和雪消融优化器(snow ablation optimizer, SAO)优化的变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)算法对故障信号进行有效预处理。再应用 ST 对包含有故障行波波头的信号进行准确标定。研究还提出了一种新的双端测距算法，该算法不依赖于波速，增强了测距的准确性。在 PSCAD 搭建的双端柔性直流电网的测试中，所提方案表现出较高的准确性和良好的鲁棒性，适用于实际应用场景。

1 故障暂态特性分析

1.1 故障网络等效模型

当线路发生故障后，故障电流急剧增大，在 6 ms 内可抬升至额定电流的两倍^[17]，故障点电压瞬间跌落，可以等效为在故障点处叠加了一个幅值相反的附加电源，故可将故障网络分解为正常网络和故障附加网络。以金属性正极接地故障为例，其网络如图 1 所示。

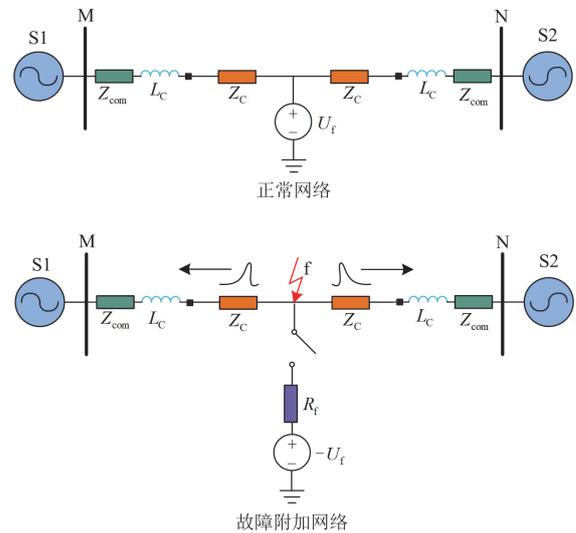


图 1 直流线路故障网络

Fig. 1 DC line fault network

图 1 中： L_C 代表限流电抗器； Z_C 代表线路波阻抗； U_r 代表故障前故障点处的电压； R_f 代表过渡电阻； Z_{com} 代表换流器闭锁前的复阻抗。

线路波阻抗表达式为

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (1)$$

式中: R 、 L 、 G 和 C 分别为单位长度线路的电阻、电感、电导和电容; ω 为角频率。

换流器闭锁前的复阻抗表达式为

$$Z_{\text{com}} = \frac{2L_{\text{arm}}}{3} + \frac{2R_{\text{arm}}}{3} + \frac{N_{\text{arm}}}{6C_M} \quad (2)$$

式中: L_{arm} 、 R_{arm} 和 C_M 分别为桥臂电感、桥臂电阻和 MMC 子模块电容; N_{arm} 为上下桥臂共投入子模块个数。

由图 1 可以看出, 故障行波仅存在于故障附加网络中。故障附加网络的故障边界条件为

$$\begin{cases} U_{\text{fp}} = I_{\text{fp}} R_f - U_f \\ I_{\text{fn}} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: U_{fp} 为正极故障电压; I_{fp} 和 I_{fn} 分别为正极故障电流和负极故障电流。

对故障附加网络进行相模变换^[18]可得到地模故障附加网络和线模故障附加网络, 从而可以得到模量下的故障边界条件为

$$\begin{cases} U_{\text{f1}} + U_{\text{f0}} = 2I_{\text{f1}} R_f - \sqrt{2}U_f \\ I_{\text{f1}} = I_{\text{f0}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: U_{f1} 和 U_{f0} 分别为线模故障电压和地模故障电压; I_{f1} 和 I_{f0} 分别为线模故障电流和地模故障电流。

式(4)表明, 故障的复合等效网络由线模网络和地模网络串联而成^[19], 其模域复合等效网络如图 2 所示。在图 2 中, Z_{com1} 和 Z_{com0} 分别为换流器闭锁前的线模和地模复阻抗; Z_{LC1} 和 Z_{LC0} 分别为限流电抗器的线模和地模电抗; Z_{C1} 和 Z_{C0} 分别为线路的线模波阻抗和地模波阻抗。

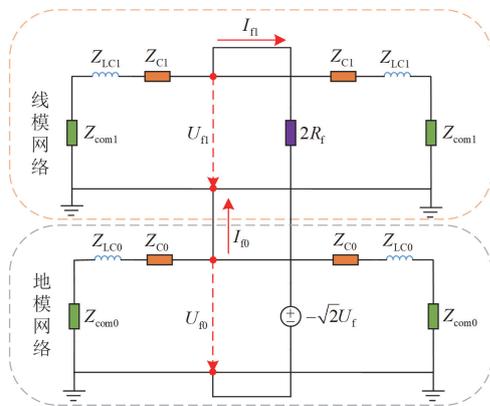


图 2 故障模域复合等效网络

Fig. 2 Fault domain composite equivalent network

1.2 故障行波传播特性

线路发生故障后, 故障行波近似等效为阶跃波向线路两端传播^[20]。根据图 2 的模域复合等效网络可以得到线路发生正极接地故障时的故障电压首行波表达式, 其线模分量和地模分量如式(5)所示。

$$\begin{cases} U_{\text{f1}} = \frac{-\sqrt{2}Z_{\text{C1}} \cdot U_f}{Z_{\text{C0}} + Z_{\text{C1}} + 4R_f} \\ U_{\text{f0}} = \frac{-\sqrt{2}Z_{\text{C0}} \cdot U_f}{Z_{\text{C0}} + Z_{\text{C1}} + 4R_f} \end{cases} \quad (5)$$

同理可得到线路发生负极接地故障时的故障电压首行波表达式, 其线模分量和地模分量为

$$\begin{cases} U_{\text{f1}} = \frac{-\sqrt{2}Z_{\text{C1}} \cdot U_f}{Z_{\text{C0}} + Z_{\text{C1}} + 4R_f} \\ U_{\text{f0}} = \frac{\sqrt{2}Z_{\text{C0}} \cdot U_f}{Z_{\text{C0}} + Z_{\text{C1}} + 4R_f} \end{cases} \quad (6)$$

线路发生双极故障时, 由于没有接地回路, 仅存在线模分量, 其线模分量表达式如式(7)所示。

$$U_{\text{f1}} = \frac{-\sqrt{2}Z_{\text{C1}} \cdot U_f}{Z_{\text{C1}} + R_f} \quad (7)$$

在线路边界和故障点处, 故障行波会发生折射和反射现象。通过图 2 的模域复合等效网络, 结合彼得逊法则, 可以计算出线模故障电压行波在线路边界和故障点处的折射系数和反射系数分别为

$$\beta_M = \beta_N = \frac{Z_{\text{com1}} + Z_{\text{LC1}} - Z_{\text{C1}}}{Z_{\text{com1}} + Z_{\text{LC1}} + Z_{\text{C1}}} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \alpha_f = \frac{Z_{\text{C0}} + 4R_f}{Z_{\text{C1}} + Z_{\text{C0}} + 4R_f} \\ \beta_f = -\frac{Z_{\text{C1}}}{Z_{\text{C1}} + Z_{\text{C0}} + 4R_f} \end{cases} \quad (9)$$

式中: β_M 和 β_N 分别为线路边界 M 和 N 的反射系数; α_f 和 β_f 分别为故障点处的折射系数和反射系数。

线模故障电压行波的传输路径如图 3 所示。其中: L_{MN} 代表线路总长; x 代表故障点到线路边界 M 的距离; t_{M0} 和 t_{N0} 代表故障行波首次到达两端行波检测处的时刻; t_{M1} 和 t_{N1} 代表故障点反射行波首次到达两端行波检测处的时刻; t_{Mf1} 和 t_{Nf1} 代表对端母线反射行波首次到达两端行波检测处的时刻。

在非理想线路中, 行波的幅值和相位随行波的传播不断发生变化, 其传播常数 γ_i ($i=0,1$) 的表达式为

$$\gamma_i = \sqrt{(R_i + j\omega L_i)(G_i + j\omega C_i)} = \alpha_i + j\beta_i \quad (10)$$

式中: $i=0$ 代表地模, $i=1$ 代表线模; R_i 、 L_i 、 G_i

和 C_i 分别代表对应模量下单位长度线路的电阻、电感、电导和电容； α_i 和 β_i 分别代表对应模量下的衰减常数和相位常数。

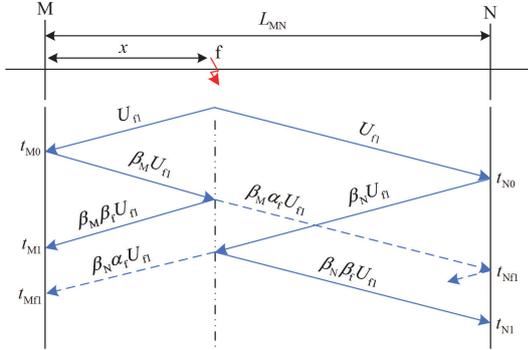


图3 线模故障电压行波传输路径

Fig. 3 Line mode fault voltage traveling wave transmission path

线模故障电压首行波到达线路边界 M 处的端口电压变化量 ΔU_1 如式(11)所示。

$$\Delta U_1 = (1 + \beta_M) e^{-\gamma_1 x} U_f \quad (11)$$

若故障点 f 位于线路前半段, 则端口 M 检测到的第二次电压变化量 ΔU_2 如式(12)所示。

$$\Delta U_2 = (1 + \beta_M) \beta_M \beta_f e^{-\gamma_1 3x} U_f \quad (12)$$

若故障点 f 位于线路后半段, 则端口检测到的第二次电压变化量 $\Delta U'_2$ 如式(13)所示。

$$\Delta U'_2 = (1 + \beta_M) \beta_N \alpha_f e^{-\gamma_1 (2L_{MN} - x)} U_f \quad (13)$$

最终端口的电压变化是由多次故障行波到达端口造成, 其总变化量 ΔU 如式(14)所示。

$$\Delta U = \Delta U_1 \varepsilon(t - \tau_1) + \Delta U_2 \varepsilon(t - \tau_2) + \dots + \Delta U_{n-1} \varepsilon(t - \tau_{n-1}) + \Delta U_n \varepsilon(t - \tau_n) \quad (14)$$

式中: $\varepsilon(\cdot)$ 表示阶跃响应; $\tau_k (k=1, 2, \dots, n)$ 表示线模故障电压行波第 k 次到达线路边界处所需要的时间; ΔU_n 表示端口检测到的第 n 次电压变化量。

2 线路故障测距方案

2.1 基于 Logistic 函数的循环位移小波阈值去噪

在实际电力系统中, 由于系统自身及外部干扰的影响, 设备所采集到的故障行波数据通常会受到噪声的污染^[21]。为了确保高频故障信息的有效提取及故障波头的准确标定, 本文采用小波阈值去噪方法处理线模故障电压数据。

小波阈值去噪在电力系统信号处理中被广泛应用, 能够有效处理非平稳信号。去噪性能主要取决于阈值函数的选择, 主要有软阈值函数和硬阈值函数两种。软阈值处理会在重构信号与原始信号之间

引入稳定的差值, 这可能导致远端高阻故障时的波头无法标定。而硬阈值函数的不连续会导致重构后的信号出现 Gibbs 现象, 引入额外的奇异值点, 容易导致故障测距中的波头错误标定。鉴于小波阈值去噪在处理线模故障电压中所体现的特点, 需要设计一个适用于测距的阈值函数。

Logistic 函数^[22]的特性介于软阈值函数和硬阈值函数之间。它是用于测距的理想阈值函数, 通过适当变形可以得到 Logistic 阈值函数为

$$\hat{\omega}_{i,j} = \text{sgn}(\omega_{i,j}) \frac{|\omega_{i,j}|}{1 + e^{-\rho(|\omega_{i,j}| - r)}} \quad (15)$$

式中: $\hat{\omega}_{i,j}$ 为阈值处理后的小波系数; $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; $\omega_{i,j}$ 为小波分解系数; r 为小波阈值; ρ 为转折系数, 通过调节 ρ 的值来调节阈值函数在转折点处的快慢。

为了进一步抑制 Gibbs 现象, 本文在小波阈值去噪方法的基础上引入循环位移机制。具体实现步骤如下。

1) 对时域信号 $x(t)$ 进行 m 个单位的正向循环位移。

$$H_m(x_i) = x(t + m) \quad (16)$$

式中: x_i 为原始时域信号 $x(t)$; $H_m(x_i)$ 为正向循环位移后的信号。

2) 对位移后的信号进行离散小波变换, 并进行阈值去噪。

$$D(t) = T(H_m(x_i)) \quad (17)$$

式中: $T(\cdot)$ 代表进行小波阈值去噪; $D(t)$ 代表去噪后的信号。

3) 对去噪后的信号进行 m 个单位的反向循环位移。

$$\hat{x}(t) = H_{-m}(D(t)) \quad (18)$$

式中: $H_{-m}(\cdot)$ 代表反向循环位移处理; $\hat{x}(t)$ 代表反向循环位移处理后的信号。

4) 重复上述步骤, 并对多组循环位移去噪信号进行平均处理, 得到最终的去噪信号 $X(t)$ 。

$$X(t) = \frac{\sum_{i=1}^m \hat{x}(t)}{2m+1} \quad (19)$$

通过不同单位的位移可降低奇异点的振荡, 使去噪后的信号更加接近真实信号。此机制能有效处理包含多个奇异点的线模故障电压信号, 为后续的故障定位提供了保障。

对故障信号添加信噪比(signal to noise ratio, SNR)为 20 dB、30 dB 和 40 dB 的高斯白噪声信号,

然后进行软阈值去噪、硬阈值去噪和基于 Logistic 函数的循环位移小波阈值去噪。最后计算去噪后信号的信噪比和均方根误差(root mean square error, RMSE), 得到的去噪性能评价如表 1 所示。

表 1 去噪性能评价

Table 1 Noise reduction performance evaluation

未去噪	软阈值去噪		硬阈值去噪		基于 Logistic 函数的循环位移小波阈值去噪	
	SNR/dB	RMSE	SNR/dB	RMSE	SNR/dB	RMSE
20	27.413	32.700	26.185	37.667	28.354	29.342
30	35.100	13.496	35.863	12.360	36.992	10.854
40	35.769	12.495	39.104	8.5116	43.612	5.0648

分析表 1 中的数据, 可得相较于传统的软、硬阈值小波去噪, 基于 Logistic 函数的循环位移小波阈值去噪效果更佳, 去噪后的信号具有更高的信噪比和更低的均方根误差。

2.2 基于 SAO-VMD 的信号分解方法

VMD 通过迭代搜索带约束的变分问题的最优解, 将信号分解为多个具有独立带宽和中心频率的固有模态分量^[23], 其变分问题的约束条件为

$$\begin{cases} \min \sum_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|^2 \\ \text{s.t. } \sum_k u_k(t) = f(t) \end{cases} \quad (20)$$

式中: $u_k(t)$ 为第 k 个模态分量的时域表示; ω_k 为第 k 个模态分量的中心频率; $\{u_k\}$ 和 $\{\omega_k\}$ 分别为一组固有模态分量和该组模态分量对应的中心频率; ∂_t 为偏微分算子; $\delta(t)$ 为狄拉克函数; $f(t)$ 为原始信号。

为了将式(20)的约束变分问题转化为无约束变分问题, 引入二次惩罚因子 α 和拉格朗日乘法算子 $\lambda(t)$, 增广的拉格朗日表达式如式(21)所示。

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda(t)) =$$

$$\begin{aligned} & \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|^2 + \\ & \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle \end{aligned} \quad (21)$$

通过交替方向乘法(alternate direction method of multipliers, ADMM)得到无约束模型的鞍点, 即该约束问题的最优解, 其固有模态分量 $\{u_k\}$ 及对应的中心频率 $\{\omega_k\}$ 的表达式如式(22)所示。

$$\begin{cases} \hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \hat{\lambda}(\omega)/2}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \\ \omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $\hat{f}(\omega)$ 、 $\hat{\lambda}(\omega)$ 和 $\hat{u}_k(\omega)$ 分别为 $f(t)$ 、 $\lambda(t)$ 和 $u_k(t)$ 的频域表示形式; $\hat{u}_k(\omega)$ 为其他模态的频域表示形式; $\hat{u}_k^{n+1}(\omega)$ 为频域下的模态更新; ω_k^{n+1} 为中心频率更新。

VMD 分解相较于传统 EMD 分解解决了模态混叠现象和端点效应, 同时由于分解过程中的迭代求解进一步增强了鲁棒性。但其参数对于分解效果影响重大, 尤其是二次惩罚因子 α 和分解层数 K , 当 K 值过大会造成虚假模态, 当 K 值过小会造成模态混叠。

为了解决参数设置问题, 在分解过程中利用优化算法寻找最佳参数组合。SAO 作为一种基于物理的优化方法, 受自然界中雪的升华和融化行为启发, 提出了其特有的双种群机制, 将整个种群随机分成两个亚种群进行探索和开发, 有效地平衡了全局搜索和局部寻优。在局部寻优阶段, 利用交叉项进行位置更新, 有助于发现高质量解决方案, 从而加速收敛并得到优异的优化结果^[24]。

在线模电压中, 故障分量会引起信号的变化和波动, 而正常分量则相对稳定。将最小包络熵作为适应度函数, 它能有效反映其动态变化特性。在达到其最大迭代次数时, 选用包络熵最小的组合作为 VMD 的分解参数。包络熵 E_p 的数学表达式为

$$\begin{cases} E_p = -\sum_{i=1}^K p_i \lg p_i \\ p_i = a(t) / \sum_{i=1}^m a(t) \\ a(t) = \sqrt{[x(t)]^2 + \{H[x(t)]\}^2} \end{cases} \quad (23)$$

式中: $H[x(t)]$ 表示信号的 Hilbert 变换; $a(t)$ 为信号通过 Hilbert 变换后的包络信号; p_i 为 $a(t)$ 的归一化形式。

故障信号中的能量主要分布在低频段, 而进行故障波头标定所需的却是高频信号, 其能量相对较小。为了防止后续标定过程中因对端反射波头能量过小引起的波头标定失败, 若分解得到 IMF 信号数量超过 5 时, 选择频率最高的两个 IMF 信号进行重构。

2.3 故障行波的波头标定

波头检测的准确性直接影响测距精度, 本方案利用 S 变换进行波头识别。S 变换是一种继承和发

展了连续小波变换和短时傅里叶变换局部化思想的加时窗傅氏变换时频可逆分析方法,它克服了短时傅里叶变换窗长固定的缺点,同时在高频分析上比连续小波变换更加细致^[25]。信号 $x(t)$ 的一维连续 S 变换表达式为

$$\begin{cases} S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)w(\tau - t, f)e^{-j2\pi ft} dt \\ w(\tau - t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2}} \end{cases} \quad (24)$$

式中: $w(\tau - t, f)$ 代表 Gaussian 窗口函数; f 代表频率; τ 代表位置参数。

对于长度为 $2N$ 的数据,经 S 变换后得到的 S 矩阵如式(25)所示。

$$S = \begin{bmatrix} s_{1,1} & s_{1,2} & \cdots & s_{1,2N-1} & s_{1,2N} \\ s_{2,1} & s_{2,2} & \cdots & s_{2,2N-1} & s_{2,2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ s_{N,1} & s_{N,2} & \cdots & s_{N,2N-1} & s_{N,2N} \\ s_{N+1,1} & s_{N+1,2} & \cdots & s_{N+1,2N-1} & s_{N+1,2N} \end{bmatrix}_{(N+1) \times 2N} \quad (25)$$

式(25)中的每一行对应一个频率,每一列对应一个采样时间点。当采样频率为 f_s 时,第 n 行对应的实际频率 f_n 如式(26)所示。

$$f_n = n \cdot \frac{f_s}{N} \quad (26)$$

S 矩阵中,不同的行对应着不同频率下的幅值曲线。在这些曲线中,极值点对应着信号的突变处,即行波波头。在最高频率下的幅值曲线可以有效识别故障的首行波波头,但是此频率下的故障点反射行波幅值相对较小,可能使其无法检测。因此,可以根据 S 变换后的时频图判定故障点反射行波对应的大致频率,并选择对应频率下的幅值曲线进行识别。

3 测距公式

故障行波在非理想线路中传输时,由于色散现象的存在,其线模波速受到传输路径长度的影响。为了消除波速变化对测距的影响,本方案提出一种新的双端测距公式。

以图 3 所示的 f 处故障为例,假设 t_0 时刻线路发生故障,则由图 3 可知故障点 f 距换流站 M、N 的距离 x 、 L_{MN} 分别为

$$\begin{cases} x = (t_{M0} - t_0)v_c \\ L_{MN} - x = (t_{N0} - t_0)v_c \end{cases} \quad (27)$$

式中, v_c 代表故障线模电压行波的波速。

对式(27)进行化简,得到波速与首行波到达时

间的关系式为

$$v_c = \frac{2x - L_{MN}}{t_{M0} - t_{N0}} \quad (28)$$

通过 M 端和 N 端测距公式算出的故障距离 x_M 和 x_N 如式(29)所示。

$$\begin{cases} x_M = \frac{(t_{M1} - t_{M0})v_c}{2} \\ x_N = L_{MN} - \frac{(t_{N1} - t_{N0})v_c}{2} \end{cases} \quad (29)$$

结合式(28)和式(29)可得到不依赖波速的两个测距公式如式(30)所示。

$$\begin{cases} x' = \frac{t_{M1} - t_{M0}}{(t_{M1} - t_{M0}) + (t_{N0} - t_{M0})} \frac{L_{MN}}{2} \\ x'' = \frac{(t_{N1} - t_{N0}) + 2(t_{M0} - t_{N0})}{(t_{N1} - t_{N0}) + (t_{M0} - t_{N0})} \frac{L_{MN}}{2} \end{cases} \quad (30)$$

式中: x' 使用了 M 端的故障反射行波到达时刻 t_{M1} , 对于近 M 端故障有着更好的测距效果; x'' 使用了 N 端的故障反射行波到达时刻 t_{N1} , 对于近 N 端故障有着更好的测距效果。

结合式(30)得到最终的测距公式为

$$x = \frac{x' + x''}{2} \quad (31)$$

式(31)不仅消除了波速不确定带来的影响,而且利用均值减小了波头标定过程中的误差,提高了测距的准确性。同时由于是双端测距,离故障点较远的一端发生故障点反射波头丢失后仍可利用式(30)中离故障点较近的一端的故障点反射波头进行测距。

整体测距方案流程如图 4 所示。针对故障点反射行波波头不易标定的问题,可利用式(27)采取理想情况下的波速确定故障大致距离,再利用该距离大致确定故障点反射行波到达两端的时间点,最后寻找离该时间点最接近的波头即可精确标定故障点反射行波波头。

4 仿真实验

4.1 仿真模型

在 PSCAD/EMTDC 中搭建 ± 500 kV 真双极接线的双端柔直输电模型,如图 5 所示。换流站采用半桥型模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)。考虑到半桥型结构换流器的故障穿越能力不足,出口处配置了平波电抗器来限制故障电流的上升。输电线路全长为 400 km,换流站额定容量为 3000 MVA,更多具体参数如表 2 所示。

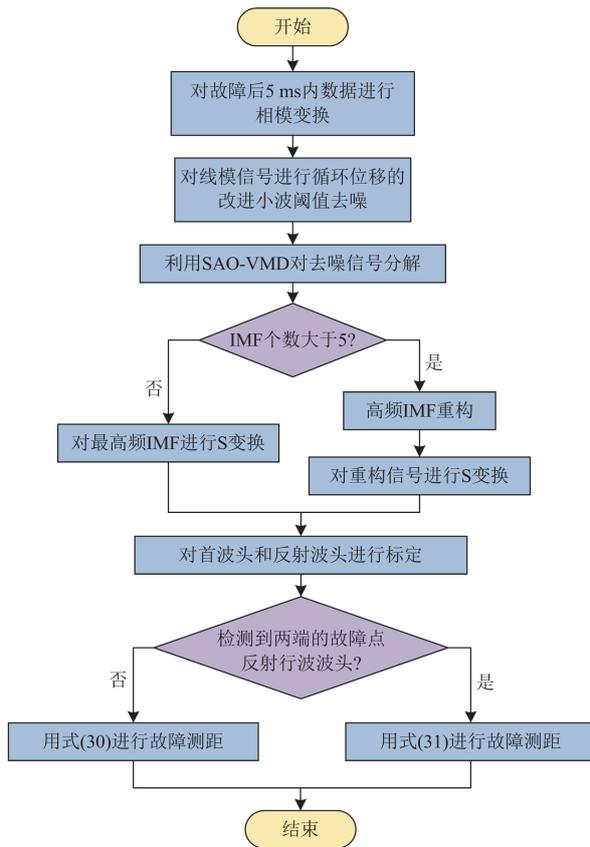


图 4 测距方案整体流程图

Fig. 4 Overall flowchart of fault localization scheme

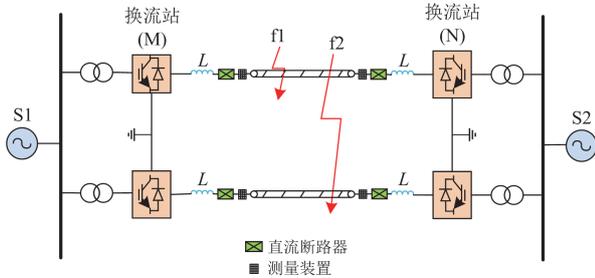


图 5 双端柔直输电模型

Fig. 5 Two-terminal flexible DC transmission model

表 2 双端柔性直流电网参数

Table 2 Parameters of the dual-end flexible DC grid

系统参数	数值
桥臂电抗/mH	32
桥臂子模块数量	228
子模块额定电压/kV	2.2
子模块电容值/mF	19
平波电抗器大小/mH	200

图 5 中 f1 和 f2 分别对应正极故障和双极故障。由于直流输电线路故障率最高的故障类型为单极故

障, 因此将重点对单极故障展开分析。

4.2 仿真结果及分析

分别对故障类型 f1 设置不同的故障距离和过渡电阻, 并选取其中一种情况进行分析。以距离 M 端 150 km 处发生金属性正极接地故障为例, 采样率设置为 200 kHz, 为了模拟实际输电系统的噪声干扰, 对故障后 5 ms 所监测到的电压信号添加 SNR 为 40 dB 的高斯白噪声进行仿真验证。

图 6 为故障后 M 端口的电压波形及其线模电压波形。从端口电压波形图可以看出, 当故障行波首次到达线路端口时, 正极电压(红线)发生明显的跌落, 同时由于线路间的耦合作用, 负极电压(蓝线)则出现一定程度的骤升。通过相模变换得到的线模电压波形有着更为明显的故障特征。

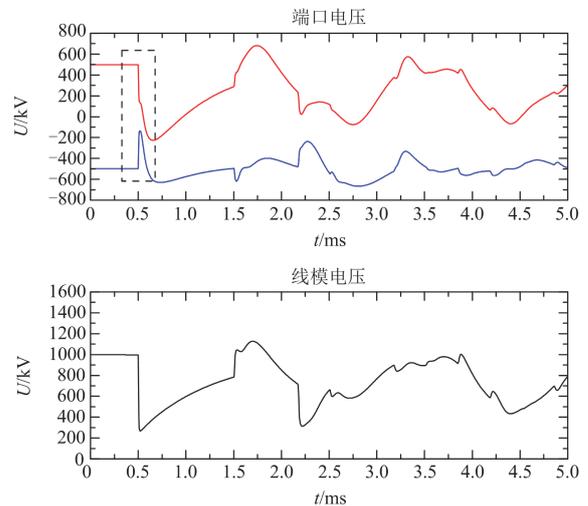


图 6 M 端的端口电压和线模电压波形

Fig. 6 Voltage waveform at port M and the line-mode voltage waveform

使用 db3 小波进行 5 层小波分解阈值去噪, 加噪线模电压波形及小波阈值去噪后的电压波形对比如图 7 所示。

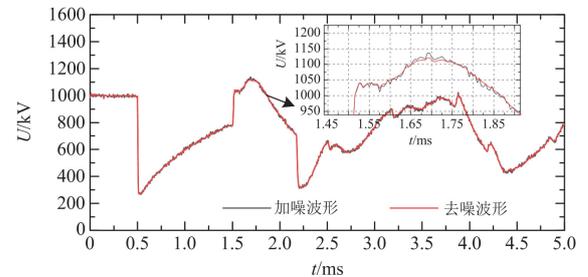


图 7 加噪线模电压波形和去噪后的波形

Fig. 7 Line-mode voltage waveform with added noise and the denoised waveform

从图 7 中可以看出,小波阈值去噪去除了绝大部分噪声,特别是携带着故障信息的高频部分中的噪声。去噪后的波形整体更加平缓,更有利于后续 VMD 分解及波头标定。

对去噪后的电压波形利用 SAO 算法进行 VMD 分解,SAO 的适应度曲线和分解后的各 IMF 分量如图 8 所示。

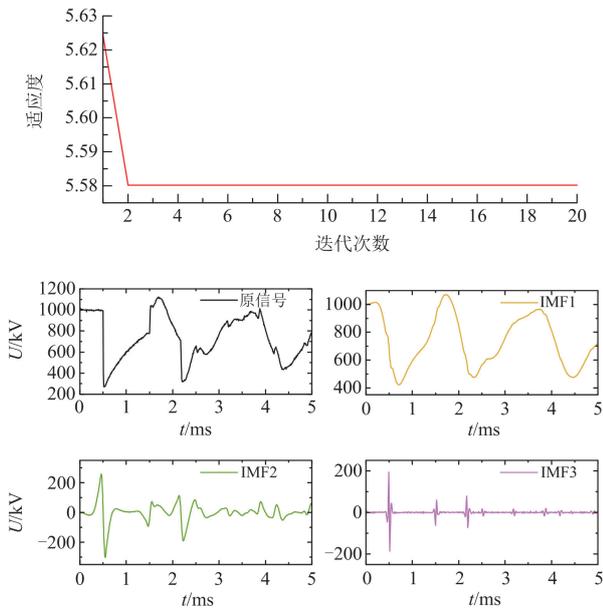


图 8 SAO 的适应度曲线和 VMD 分解结果

Fig. 8 SAO fitness curve and VMD decomposition results

根据 VMD 分解结果可以看出,低频分量 IMF1 显示了原信号的整体特征,而高频分量 IMF3 则展现了原信号的细节特征,且分解的信号个数小于 5,故障点反射行波的幅值较为明显,无需对分解后的信号进行重构。

对得到的高频故障信号进行 S 变换, S 变换后的时频图如图 9 所示。图中 3 条较为明显的竖线为故障行波到达边界处的信号,其中第 2 条竖线对应的故障点反射行波对应的最大频率大致为 80 kHz,最高频率和该频率下的幅值曲线如图 10 所示。

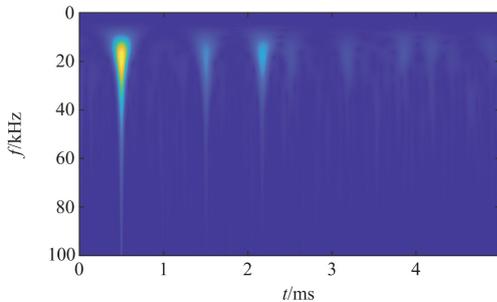


图 9 S 变换后的时频图

Fig. 9 Time-frequency graph after the S transform

通过对时间-幅值曲线的标定可以得到 $t_{M0} = 0.500 \text{ ms}$, $t_{M1} = 1.510 \text{ ms}$, 同理可以得到故障线模行波到达 N 端的时间 $t_{N0} = 0.835 \text{ ms}$, $t_{N1} = 2.520 \text{ ms}$, 代入式(30)和式(31), 可得到 $x' = 150.186 \text{ km}$, $x'' = 150.370 \text{ km}$, 则故障距离 $x = 150.278 \text{ km}$, 误差仅为 278 m, 可满足实际工程需要。

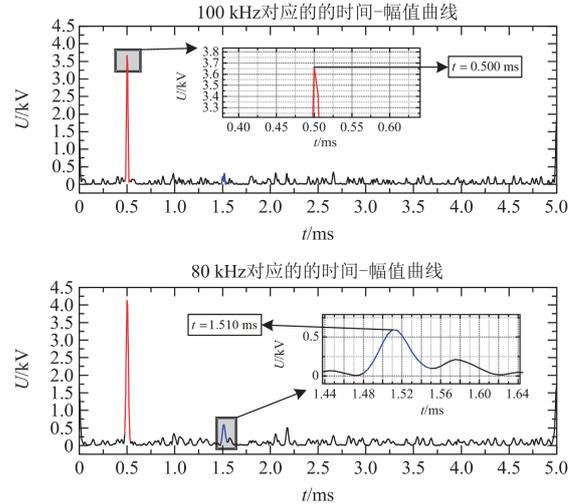


图 10 不同频率下的时间-幅值曲线

Fig. 10 Time-amplitude curve at different frequencies

为验证本方案的有效性,在信噪比为 40 dB, 采样率为 200 kHz 的条件下进行不同故障距离和不同过渡电阻的仿真验证,测距结果如表 3 所示。

表 3 不同工况下的测距结果

Table 3 Ranging results under different operating conditions

故障位置/km	过渡电阻/ Ω	结果/km	误差/m	相对误差/%
50	0.01	50.279	279	0.558
	100	49.719	281	0.562
	200	50.279	279	0.56
100	0.01	99.814	186	0.186
	100	99.496	504	0.504
	200	101.272	1272	1.272
150	0.01	150.278	278	0.185
	100	149.535	465	0.31
	200	150.462	462	0.308
200	0.01	199.255	745	0.37
	100	200.746	746	0.373
	200	200	0	0
250	0.01	250.747	747	0.3
	100	249.538	538	0.215
	200	249.179	821	0.328
300	0.01	300.373	373	0.12
	100	300.186	186	0.062
	200	300.931	931	0.31
350	0.01	349.908	92	0.026
	100	349.170	830	0.237
	200	349.262	738	0.211

由表 3 可知, 即便是远端高阻故障下, 本文所提方案仍能进行故障测距, 同时相对误差控制在 1.3% 以内, 可满足实际需要。

4.3 影响因素分析

4.3.1 故障类型的影响

直流输电系统发生双极故障后, 故障电流的幅值和上升速率都远大于单极接地故障, 对电力系统的危害也更加严重。图 11 为单极故障和双极故障后的线模电压波形图。

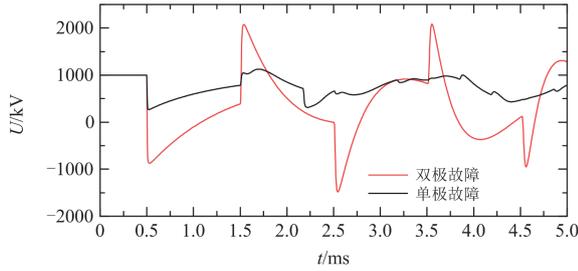


图 11 单极故障和双极故障后的线模电压波形

Fig. 11 Waveforms of line-mode voltage after single-pole faults and double-pole faults

从图 11 中可以看出, 双极故障的线模电压不仅在幅值突变上更大, 其变化速率也更快, 这更有利于行波波头标定。经过多次仿真验证, 即便在高过渡电阻和高噪声的情况下, 双极故障仍能有效进行定位。

4.3.2 过渡电阻的影响

图 12 为不同过渡电阻下的线模电压波形, 随着过渡电阻增大, 线模电压的波形变化逐渐变缓, 且在奇异点处的幅值跃变减小, 但故障点首行波和故障点反射行波到达故障检测处并未发生位移。

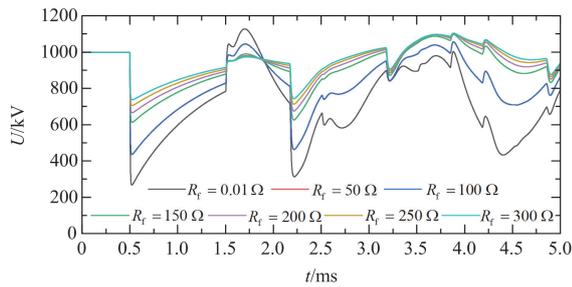


图 12 不同过渡电阻下的线模电压波形

Fig. 12 Line-mode voltage waveforms under different transition resistances

图 13 显示了在距离 M 端 150 km 处发生正极接地故障时, 不同过渡电阻下的仿真测距结果, 包括噪声和非噪声情况。由图 13 可以看出, 在无噪声干扰的情况下, 即使在 300 Ω 的过渡电阻下, 本方案

仍能进行较好的测距, 具有较好的耐过渡电阻能力。在高过渡电阻的情况下加入一定的噪声信号, 可能导致故障点反射行波波头与噪声信号重叠, 从而造成波头标定出现误差, 进而增大测距相对误差。

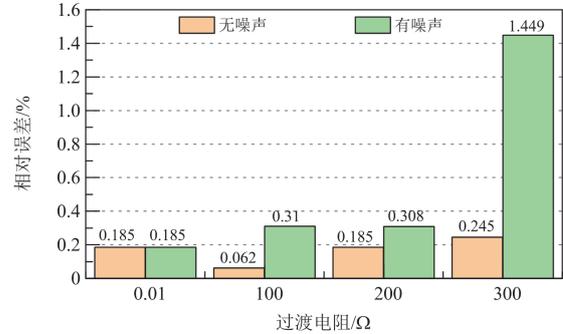


图 13 不同过渡电阻下的测距相对误差

Fig. 13 Relative error of distance measurement under different transition resistances

4.3.3 噪声的影响

在实际工程应用中, 相较于仿真环境, 系统往往会受到不同强度的噪声干扰。为了使仿真更加接近实际情况, 向电压信号中添加不同程度的高斯白噪声, 其信噪比分别设置为 30 dB、40 dB、50 dB 和 60 dB。图 14 显示了测试系统在不同噪声条件下的仿真结果。

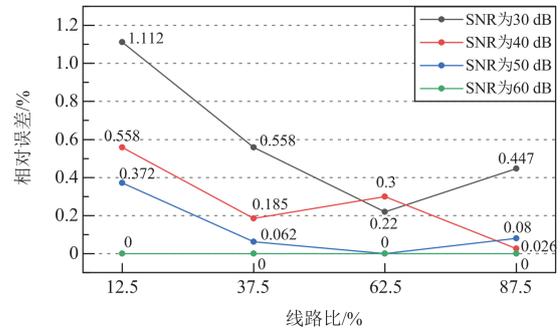


图 14 不同信噪比下的测距相对误差

Fig. 14 Relative error of ranging under different signal-to-noise ratios

由图 14 中可以看出, 在靠近线路两端的区域, 测距相对误差有所增加。这种现象主要是由于距故障点较远端的故障点反射行波受线路衰减影响, 导致行波的幅值减小, 从而造成标定误差的增加。

在信噪比大于 40 dB 的情况下, 噪声对测距的影响可以忽略不计, 能够将相对误差控制在 0.6% 以内。即便在信噪比为 30 dB 的高噪声条件下, 出现一端故障点反射行波波头丢失, 仍能通过式(30)进行故障测距, 且测距相对误差控制在 1.3% 以内, 表

现出较强的抗噪声能力。

4.3.4 限流电抗器的影响

限流电抗器作为输电线路的边界，其电抗值大小直接决定了故障电流的上升速率，同时也影响着故障行波在边界处的折射系数和反射系数。为准确验证限流电抗器电抗值对本方案测距精度的影响，在仿真系统中分别设置电抗值为 100、150、200、250 和 300 mH 进行实验验证。不同电抗值下的线模电压波形如图 15 所示。

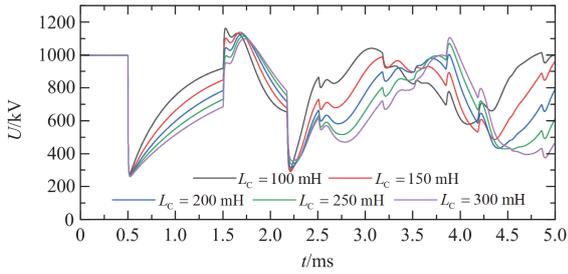


图 15 不同电抗值下的线模电压波形

Fig. 15 Line-mode voltage waveforms at different reactance values

从图 15 可以看出，限流电抗器的电抗值大小并不会影响线模电压在奇异点处的幅值跃变大小，只会影响每两次跃变间电压幅值变化的速率。当限流电抗器的电抗值越大时，电压幅值的变化就会越缓慢。经过多次仿真验证，限流电抗器的电抗值大小对本文所提测距方案的测距精度几乎无影响。

4.3.5 采样率的影响

对测距而言，理论上采样率越高越好，而高采样率使得设备成本较高，工程上往往不会采用超高采样率。不同的采样率会带来不同的采样误差，其对应的测距死区 h 为

$$h = \frac{v_c}{2f_s} \quad (32)$$

图 16 为测试系统在金属性正极接地且没有噪声干扰条件下，针对不同故障位置和采样率进行仿真的结果。可以看出，即便在较低的采样频率下，本方案仍能够获得不错的测距精度。过高的采样率反而会会因为大量数据导致计算量大大增加。本方案所提的双端测距公式在一定程度上减小了采样率所带来的影响。

4.4 多种方案比较

为了验证本文所提故障测距方案的准确性，在信噪比为 30 dB 的条件下，将本方案同多种传统双端测距算法进行对比，测距结果如图 17 所示。

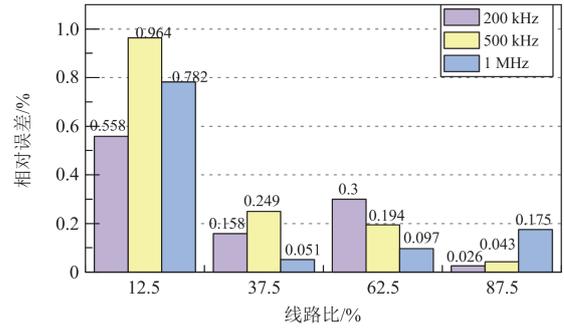


图 16 不同采样率下的测距相对误差

Fig. 16 Relative error of ranging under different sampling rates

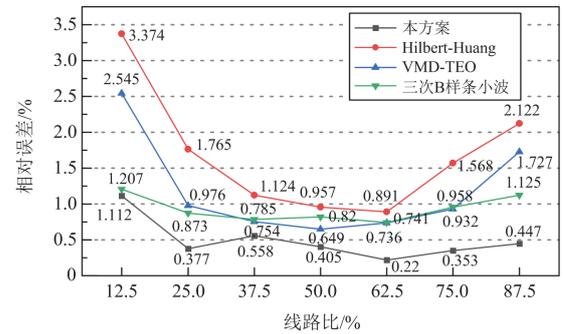


图 17 不同方案测距结果对比

Fig. 17 Comparison of ranging results from different schemes

在图 17 中，Hilbert-Huang、VMD-TEO、三次 B 样条小波 3 种测距算法及本方案的平均测距相对误差分别为 1.686%、1.188%、0.930% 和 0.496%。可以看出相对于 3 种传统双端测距算法，本方案在测距精度上提升了 0.434%~1.19%。

将本方案与文献[26]和文献[27]中的方案进行对比，并最终得到不同方案的测距性能评价(见表 4)。其中，文献[26]和文献[27]分别对应表中的方案一和方案二。

表 4 中的平均相对误差是各篇文献在相应实验条件下得到的金属性单极接地故障测距结果。从表中可以看出，本文方案相对于文献[26]和文献[27]所提出的方案，不仅减少了平均测距相对误差，同时在抗噪性能、所需采样率、耐过渡电阻方面也有所提升。

表 4 不同方案下的性能评价表

Table 4 Performance evaluation under different schemes

	本文方案	方案一	方案二
抗噪性能/dB	30	无	无
所需采样率/kHz	200	10	1000
耐过渡电阻/ Ω	300	300	100
平均测距相对误差/%	0.279	1.27	1.297

5 结论

1) 针对传统双端行波测距方案存在噪声干扰下波头标定精度不高的问题, 本文首先利用改进的小波阈值去噪对信号进行处理, 有助于增强故障信息提取和波头标定, 随后通过 SAO-VMD 对信号进行分解, 其中 VMD 在解决了端点效应和模态混叠现象的同时进一步降低了噪声干扰, 最后利用 S 变换进行波头标定, 不同频率下的时间-幅值曲线实现了对不同波头的精确标定。

2) 针对行波在传输过程中因色散现象带来的波速衰减的问题, 本文提出了一种不依赖波速的测距算法, 有效避免了因行波波速不确定带来的误差。此外, 本测距算法在一端反射波头丢失的情况下仍能进行有效测距, 有效提高了测距精度和成功率。

3) 通过大量验证得出, 本文所提测距方案在较低的采样率和信噪比下, 对不同故障类型、不同故障距离及不同过渡电阻的定位误差均能控制在 1.5% 以内。低采样率要求与实际故障状态相符的特点使得该方案在实际应用中具有较高的可行性。

参考文献

- [1] 饶宏, 周月宾, 李巍巍, 等. 柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 1-11.
RAO Hong, ZHOU Yuebin, LI Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 1-11.
- [2] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲, 等. 混合多端直流输电线路快速保护及自适应重启方法实用化研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(11): 3873-3884.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou, et al. Application research on fast line protection and adaptive restarting methods for multi-terminal hybrid LCC/MMC HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(11): 3873-3884.
- [3] 雷朝煜, 郝良收, 戴甲水, 等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 178-187.
LEI Zhaoyu, HAO Liangshou, DAI Jiashui, et al. A review of fault location methods in HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 178-187.
- [4] 杨冬锋, 王鹤, 刘晓军, 等. 基于 VMD-SVD 的多端柔直电网故障测距方案[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 3084-3095.
YANG Dongfeng, WANG He, LIU Xiaojun, et al. Fault location scheme for multi-terminal MMC-HVDC system based on VMD-SVD[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 3084-3095.
- [5] 贺宇阳, 马千里, 于飞, 等. 基于 CRS-LMD 和 SVD 的 MMC-HVDC 线路故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 121-132.
HE Yuyang, MA Qianli, YU Fei, et al. Fault location of an MMC-HVDC line based on CRS-LMD and SVD[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 121-132.
- [6] 王洪彬, 周念成, 王伟, 等. 基于行波模态分解的特高压直流输电线路双端行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 109-120.
WANG Hongbin, ZHOU Niancheng, WANG Wei, et al. A double-terminal fault location method for UHVDC transmission lines based on traveling wave mode decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 109-120.
- [7] SONG Guobing, CHU Xu, CAI Xinlei, et al. A fault-location method for VSC-HVDC transmission lines based on natural frequency of current[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 63: 347-352.
- [8] HE Jiawei, LI Bin, SUN Qiang, et al. The improved fault location method based on natural frequency in MMC-HVDC grid by combining FFT and MUSIC algorithms[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 137: 107816.
- [9] 束洪春, 杨竞及, 张广斌. 高压直流输电线路的双端行波频差比值故障测距[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6715-6727.
SHU Hongchun, YANG Jingji, ZHANG Guangbin. A novel fault-location method for HVDC transmission lines based on the ratio of two-terminal traveling wave frequency difference[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6715-6727.
- [10] 王帅, 毕天姝, 贾科. 基于主动脉冲的 MMC-HVDC 单极接地故障测距[J]. 电工技术学报, 2017, 32(1): 12-19.
WANG Shuai, BI Tianshu, JIA Ke. Single terminal fault location for MMC-HVDC transmission line using active pulse[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 12-19.
- [11] 宋国兵, 侯俊杰, 郭冰. 基于主动探测式的混合 MMC 直流输电系统单端量故障定位[J]. 电网技术, 2021, 45(2): 730-740.
SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing. Single-ended fault location of hybrid MMC-HVDC system based on active detection[J]. Power System Technology, 2021, 45(2): 730-740.
- [12] 王伟, 帅智康, 李杨, 等. 基于固态断路器主动注入式直流故障测距方法[J/OL]. 电工技术学报: 1-11[2024-04-23]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231576>.
WANG Wei, SHUAI Zhikang, LI Yang, et al. Active injection DC fault location method based on solid state circuit breaker[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society: 1-11[2024-04-23]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231576>.
- [13] 邢超, 高敬业, 毕贵红, 等. 基于集成神经网络的特高压直流输电线路初始电压行波小波变换模板大值比单端测距方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(11): 128-134.
XING Chao, GAO Jingye, BI Guihong, et al. Single-end

- fault location method used ratio between WT modulus maximum values of initial voltage traveling wave for UHVDC transmission line based on integrated neural network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(11): 128-134.
- [14] HAO Yongqi, WANG Qian, LI Yanan, et al. An intelligent algorithm for fault location on VSC-HVDC system[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, 94: 116-123.
- [15] 王雪芹, 张大海, 李猛, 等. 基于小波能量谱和 SSA-GRU 的混合直流输电系统故障测距方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(12): 14-24.
WANG Xueqin, ZHANG Dahai, LI Meng, et al. Fault location method for a hybrid DC transmission system based on wavelet energy spectrum and SSA-GRU[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(12): 14-24.
- [16] 高淑萍, 索南加乐, 宋国兵, 等. 基于分布参数模型的直流输电线路故障测距方法[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(13): 75-80.
GAO Shuping, SUONAN Jiale, SONG Guobing, et al. Fault location method for HVDC transmission lines on the basis of the distributed parameter model[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(13): 75-80.
- [17] XIANG Wang, YANG Saizhao, ADAM G P, et al. DC fault protection algorithms of MMC-HVDC grids: fault analysis, methodologies, experimental validations, and future trends[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(10): 11245-11264.
- [18] 余修勇, 顾菊平, 张新松, 等. 多端柔性直流电网线路故障暂态等值电路及暂态特征分析[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(24): 9546-9556.
YU Xiuyong, GU Juping, ZHANG Xinsong, et al. Study on the transient equivalent circuits and the transient characteristics of multi-terminal flexible DC grids after line faults[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(24): 9546-9556.
- [19] 陈田田, 李银红. 基于电压折射波幅值正负差异的柔性直流电网两段式行波保护[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(3): 129-136.
CHEN Tiantian, LI Yinhong. Two-section traveling wave protection for flexible DC grid based on positive and negative difference of voltage refractive wave amplitude[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(3): 129-136.
- [20] 郭家浩, 樊艳芳, 侯俊杰. 基于电流行波突变特性的多端柔性直流线路纵联保护[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(18): 31-42.
GUO Jiahao, FAN Yanfang, HOU Junjie. Pilot protection method for multi terminal flexible DC lines based on current traveling wave mutation characteristics[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(18): 31-42.
- [21] 高淑萍, 徐振曦, 宋国兵, 等. 基于小波阈值去噪和 CEEMD 的混合三端直流输电线路故障测距[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(3): 29-40.
GAO Shuping, XU Zhenxi, SONG Guobing, et al. Fault location of hybrid three-terminal HVDC transmission lines based on wavelet threshold denoising and CEEMD[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(3): 29-40.
- [22] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲, 等. 利用波前广义 Logistic 函数拟合的直流输电线路快速保护原理[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(11): 3168-3176.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou, et al. Principle of high speed protection for DC transmission line using wave front generalized logistic function fitting[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(11): 3168-3176.
- [23] 杨冬锋, 陈盛开, 刘晓军, 等. 基于自适应 VMD 和时-频分段能量熵特征的过电压信号识别[J]. *电网技术*, 2019, 43(12): 4597-4604.
YANG Dongfeng, CHEN Shengkai, LIU Xiaojun, et al. Research on overvoltage signal recognition based on adaptive VMD and time-frequency segment energy entropy[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(12): 4597-4604.
- [24] DENG Lingyun, LIU Sanyang. Snow ablation optimizer: A novel metaheuristic technique for numerical optimization and engineering design[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 225: 120069.
- [25] 张韵琦, 王聪博, 余越, 等. 基于双端初始电流行波时频矩阵相似度的柔性直流输电线路保护原理[J/OL]. *中国电机工程学报*: 1-13[2024-04-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230308.0917.006.html>.
ZHANG Yunqi, WANG Congbo, YU Yue, et al. VSC-HVDC line protection principle based on the similarity of the double-ended initial current traveling wave time-frequency matrices[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*: 1-13[2024-04-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230308.0917.006.html>.
- [26] 王思华, 赵磊, 王军军, 等. 基于 MMC 的直流输电系统双极短路故障保护策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(11): 9-17.
WANG Sihua, ZHAO Lei, WANG Junjun, et al. Research on protection strategy of a bipolar short circuit fault in an HVDC transmission system based on MMC[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(11): 9-17.
- [27] 张明, 和敬涵, 罗国敏, 等. 基于本地信息的多端柔性直流电网故障定位方法[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(3): 155-161.
ZHANG Ming, HE Jinghan, LUO Guomin, et al. Local information-based fault location method for multi-terminal flexible DC grid[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(3): 155-161.

收稿日期: 2024-02-27; 修回日期: 2024-04-25

作者简介:

王思华(1968—), 男, 硕士, 教授, 研究方向为高电压与绝缘; E-mail: ws_h@163.com

王羚佰(1999—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电。E-mail: 702139498@qq.com

(编辑 周金梅)