

基于 CRS-LMD 和 SVD 的 MMC-HVDC 线路故障测距方法

贺宇阳, 马千里, 于飞, 刘喜梅

(青岛科技大学自动化与电子工程学院, 山东 青岛 266061)

摘要: 直流输电线路故障行波波速不确定、波头提取困难以及噪声干扰等因素制约了直流电网中故障测距技术的应用。为了降低上述因素对定位准确性的影响, 提出一种基于局部特征有理样条插值均值分解(LMD based on characteristic rational spline, CRS-LMD)和奇异值分解(singular value decomposition, SVD)的故障测距方法。首先, 利用特征尺度选取最优极点系数, 结合有理样条插值调节拟合曲线的松紧程度, 实现对故障电压行波的局部均值分解。其次, 采用奇异值分解对故障行波波头进行准确提取。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了张北±500 kV 柔性直流电网的仿真模型, 模拟各种故障情况并输出故障数据, 利用 Matlab 对故障数据进行处理并验证定位算法。最后, 仿真结果表明, 所提故障测距算法在不同故障距离和故障类型下均能实现故障测距, 且在叠加噪声和过渡电阻的情况下也能保障较高的精确性。

关键词: 串柔性直流电网; 有理样条插值; 局部均值分解; 奇异值分解; 行波提取; 故障测距

Fault location of an MMC-HVDC line based on CRS-LMD and SVD

HE Yuyang, MA Qianli, YU Fei, LIU Ximei

(College of Automation & Electric Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: Uncertainty on the fault traveling wave velocity, the difficulty of wave head extraction, the randomness of noise interference and other factors in DC lines restrict the application of fault location technology in a DC power grid. To reduce the influence of the above factors on positioning accuracy, a fault location method based on characteristic rational spline LMD (CRS-LMD) and singular value decomposition (SVD) is proposed. First, the optimal pole coefficient is selected with the use of the feature scale, and tightness of the fitting curve is adjusted by rational spline interpolation. The local mean decomposition of the fault voltage traveling wave is realized. Secondly, SVD is used to extract the fault travelling wave head accurately. Finally, a simulation model of the Zhangbei ±500 kV flexible DC power grid is built in PSCAD/EMTDC to simulate various fault situations and output fault data. Matlab is used to process the fault data and verify the positioning algorithm. The results show that the proposed algorithm can realize fault location with different fault distances and fault types, and guarantee high accuracy under when there is superimposed noise and transition resistance.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 62103218).

Key words: flexible DC grid; rational spline interpolation; LMD; SVD; traveling wave extraction; fault location

0 引言

随着可再生能源、储能装置和直流负载在电力系统中的快速普及, 发展远距离、大容量、稳定性

高的直流电网是实现优化国家资源配置、适应未来能源发展格局的关键手段^[1-2]。为保证直流电网的可靠运行, 短时间内实现故障清除, 恢复电网正常工作, 快速、准确的故障测距颇为关键^[3-4]。

故障行波包含丰富的故障信息且受系统参数、线路负荷影响较小, 在故障测距领域中应用广泛。随着信号处理技术在行波保护领域的不断拓宽, 许

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(62103218); 山东省自然科学基金项目资助(ZR2020MF081)

多信号处理方法正逐步被引入到行波保护中,包括数学形态学^[5]、小波变换^[6-9]、神经网络^[10-11]、希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)^[12-14]等。小波变换具有良好的时频局部化和多尺度分解的优点,而面对不同信号,小波基函数和分解尺度选取具有很大的主观性,且在噪声干扰下自适应性较差^[6-7]。神经网络对复杂信号具有更高的自适应性,可以通过分析故障距离和波形变化的关联性实现定位^[11]。然而,提高故障定位精度需要更多的训练样本和训练次数,导致工作量大幅增加。HHT 故障行波分解采用经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)^[14]提取固有模态函数,分解过程中直接从信号中换取基函数,充分发挥了 HHT 的自适应性和抗干扰性,但 EMD 自身存在端点效应、模态混叠和过包络、欠包络问题^[13]。

针对经验模态分解存在的问题,国外学者在经验模态分解的基础上提出了局部均值分解(local mean decomposition, LMD)^[15],应用除法迭代过程来代替 EMD 的减法迭代过程,减少迭代次数的同时更好地抑制了 EMD 端点效应问题^[16]。传统的 LMD 算法迭代过程运用了滑动平均法,但平滑产生的相位差和平滑步长的主观选择对分解结果的影响较严重^[17]。鉴于三次样条插值具有良好的收敛性和平滑性,文献[17]引入三次样条插值构建局部均值和包络估计函数。但以极值点为基础拟合上下包络线时,拟合过程中会发生过包络和欠包络的情况。为缓解上述问题,文献[18]引入三次埃尔米特插值拟合原始信号的包络线,改善了过包络和欠包络的问题,但无法根据波形局部特征自适应调整拟合曲线。文献[19]提出一种基于改进局部均值分解和能量相对熵的主动配电网故障定位方法。文献[20]提出 LMD 和 Teager 能量算子(teager energy operator, TEO)结合的 VSC-HVDC 故障定位算法,利用能量算子进行解调避免了 Hilbert 解调失败的情况,但对于噪声较为敏感,鲁棒性较差。在异常工况下,尤其是故障行波信号在受到大气放电噪声、电源等尖峰型噪声的影响时,上述方法很难保证行波波头提取的精确性。

针对传统信号处理方法自适应性缺乏、鲁棒性差的问题,本文提出了一种基于局部特征有理样条插值均值分解(LMD based on characteristic rational spline, CRS-LMD)和奇异值分解(singular value decomposition, SVD)的故障测距方法。提出了特征有理样条插值(characteristic rational spline, CRS)^[21],引入极点参数 P 调整拟合曲线松紧程度,并通过特征尺度选取迭代过程中的最优 P 值,缓解了三次样

条插值和三次埃尔米特插值的适应性差、分解信号准确度不够高的问题。将 CRS-LMD 所得乘积函数分量(product function, PF)进行重构,运用对奇异值具有高敏感性的二分递推奇异值分解^[22],实现行波波头的精确定位。本文以张北±500 kV 柔性直流电网示范工程为背景,根据工程实际参数在 PSCAD/EMTDC 中搭建模型,模拟各种特殊状态的故障情况。基于提取的故障数据,在 Matlab 中对所提出的故障测距方法进行了仿真验证,结果表明本文所提算法的自适应性高、准确性好。

1 基于 CRS-LMD 和 SVD 的行波波头提取方法

传统 LMD 的流程包括提取极值点,采用滑动平均计算局部包络估计和均值函数,迭代求取 PF 分量,按不同频段分解特征信息等步骤^[23]。具体的迭代过程本文不再赘述。本文所提出的行波波头提取方法由两部分组成:(1) CRS-LMD,其是由局部特征有理样条插值和局部均值分解组成的,可以实现对故障特征分量的精确提取;(2) SVD,其运用二分递推 SVD 分解故障特征分量,可以实现行波波头的准确标定。

1.1 局部特征有理样条插值

1.1.1 有理样条插值

为克服传统 LMD 模态混叠和三次埃尔米特插值 LMD 自适应性差的问题,引入自适应性更好的有理样条插值,计算局部均值函数和包络估计函数,并拟合信号的上下包络线。文献[21]初步提出了有理样条插值的概念,有理样条可以用函数表示。

$$s_k(x) = A_k u + B_k t + \frac{C_k u^3}{(1+Pt)} + \frac{D_k t^3}{(1+Pu)} \quad (1)$$

式中: $t = \frac{(x-x_k)}{h_k} = \frac{(x-x_k)}{x_{k+1}-x_k}$, x_k 为给定信号的局

部极值点 ($k=1,2,\dots,n-1$); $u=1-t$; P 为极点参数,且 $P \geq -1$,能够控制拟合曲线 $s_k(x)$ 的松紧程度,缓解过包络和欠包络的现象; A_k 、 B_k 、 C_k 、 D_k 为赋予 $s_k(x)$ 连续 1、2 阶导数的系数。

由式(1)可知,调节 P 值可以控制拟合曲线 $s_k(x)$ 的紧缩程度,调整拟合曲线的形状。当 $P=-1$ 时,三次项的分母分别变为 u 和 t ,且相应变量的次数降为二次。有理样条将变为二次样条插值函数,相比三次时,波动较大。当 $P=0$ 时, $s_k(x)$ 正好与三次样条函数相同;随着 P 的逐渐增大,三次项的值相应减小,当 $P \rightarrow \infty$ 时, $s_k(x)$ 变为分段线性插值函数。

由图 1 所示的不同极点参数 P 下拟合的包络曲线可以看出, 当 P 值逐渐增大时, 拟合曲线不断拉紧, 缓解了过包络和欠包络现象, 但逐步失去了平滑性的优点。所以, 应用有理样条插值的关键在于找到最佳极点参数 P 。

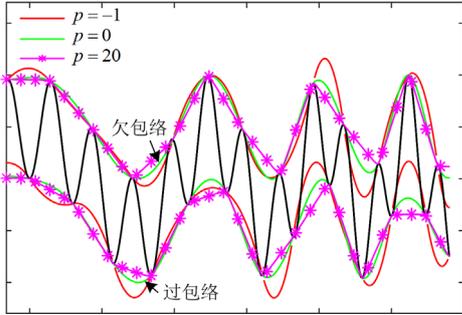


图 1 不同极点参数 P 下拟合的包络曲线

Fig. 1 Envelope curves fitted under different pole parameters P

1.1.2 基于极值点判据选择最优 P 值

不同 P 值拟合而成的曲线平滑性和收敛性差距较大, 致使异常工况下提取行波信号的准确性显著下降。采用最优 P 值, 可以使局部均值分解的各信号分量更接近于理想分量。

单分量信号如图 2 所示。为缓解端点效应的影响, 对原始信号 $x(t)$ 的局部极小值和极大值进行镜像对称延拓, 实现信号的边界扩展, 得到新的极值点序列 $x_{\max}(t)$ 和 $x_{\min}(t)$ 。通过遍历新的极值点序列, 计算最优极点系数 P 。

$$\begin{cases} M'_k = T_k \\ M^x_k = \frac{A_k + X_k}{2} \end{cases} \quad (2)$$

选取三个连续极值点, 将幅值和时间分别定义为 (T_{k-1}, X_{k-1}) 、 (T_k, X_k) 、 (T_{k+1}, X_{k+1}) , $k=2,3,\dots,n$ 。连续极值点中点的时间为 T_k , 幅值为 $\frac{A_k + X_k}{2}$, 定义该点为最优极点的判据点。

$$A_k = X_{k-1} + \frac{(T_k - T_{k-1})(X_{k+1} - X_{k-1})}{T_{k+1} - T_{k-1}} \quad (3)$$

对图 2 所示信号应用该判据时, 随机选取波形中连续两个极大值点, 定义其中点为 A 点, 并虚线连接至极小值点 B , 可以发现 A 点到时间轴的距离 d_1 与 B 点到时间轴的距离 d_2 相等。此时, 连续两个极大值之间只有一个模态, 不存在模态重叠问题, 便于信号的分析处理。综上所述, 两侧极值点拟合而成的有理样条曲线与 A 点的距离可以作为最优极点系数 P 的判断标准。

基于上述方法, 提出一种筛选 P 值的极点判据。

为缓解端点效应的影响, 将原始信号进行边界延拓得到新的极值点序列, 如图 3 所示。选取其中满足极值判据的部分, 比较末端极值点时间的大小, 以时间点的较大值规定遍历长度。

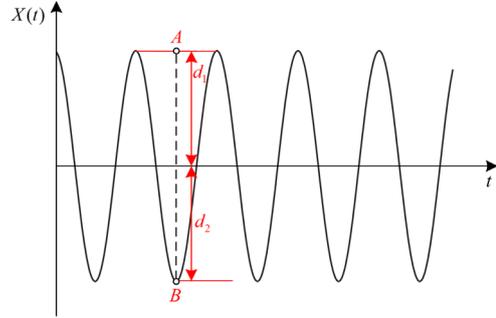


图 2 单分量信号

Fig. 2 Single component signal

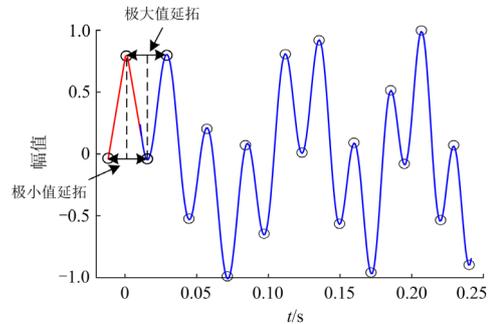


图 3 新的极值点序列(镜像延拓)

Fig. 3 New extreme point sequence (mirror extension)

当首末极值点均为极小值点时, 将极小值首端点定义为式(2)中的 (T_{k-1}, X_{k-1}) 点, 并将如图 2 中 B 点所示位置相对应的极大值点定义为中点的对称点。以此类推, 应用式(3)遍历整个极值点序列来求解极值点判据。

由图 4 所示的最优 P 值下曲线收敛变化可以看出, 随着收紧程度的变化, 可能存在极小值点和极大值点个数不相等的情况。此时应以个数较小的极值点序列长度作为新的时间序列。

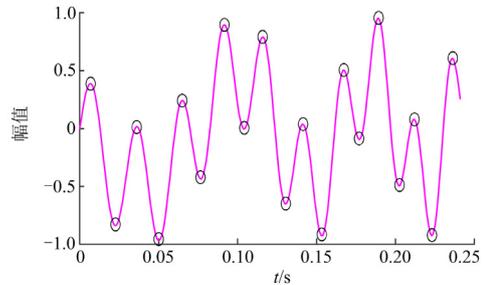


图 4 最优 P 值下曲线收敛变化

Fig. 4 Curve convergent change under optimal P -value

$$t = n - (n_{11} - n_{12}) - 1 \quad (4)$$

式中： n 为原极值判据所定义时间序列的长度； n_{11} 和 n_{12} 分别代表极大值点和极小值点的时间序列。

当首端极值点为极小值点、末端极值点为极大值点时，仅须判断极大值点和极小值点的序列长度，选择长度较短值作为判据时间序列的长度。当极大值点为首端极值点时，其方法跟上面所述的方法类似，仅须将连续两个极大值点的中点作为图 2 中的 A 点，相对应极小值作为 B 点，此处不再予以说明。实际最优 P 值筛选过程，如图 5 所示。

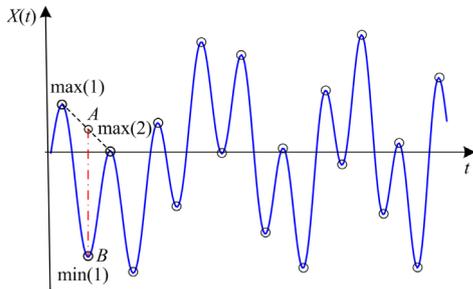


图 5 实际最优 P 值筛选过程

Fig. 5 Actual optimal P -value screening process

实际情况下，并非所有信号的极值点满足图 2 中的分布情况，需要定义一个极点系数判据 A 的判断区间。

$$\begin{cases} mx = \frac{(x_{i-1} - A_i)}{2} & A_i > 0 \\ mx = \frac{(x_{i-1} + A_i)}{2} & A_i \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中， mx 为极值点到判据点 A 距离的中点。当仅含一个模态时， mx 的值应为 0。经过多次实验，将 mx 的数值区间定义为 $[0, 0.001]$ 。

为了发挥判据点 A 对原始信号局部特征的放大作用，CRS 将处于 mx 数值区间内的序列作为极点判据。求取一定区间内多个 P 值拟合的有理样条曲

线与 A 点之间的距离，将距离最短的 P 值作为有理样条插值的极点系数。采用最优极点系数 P ，分别对极大/极小值点进行有理样条插值，得到最优包络线，计算局部均值函数和包络估计函数。经过多次迭代，实现信号的自适应分解。

1.1.3 正交性准则

为使分解的 PF 分量具有物理意义，引入正交性准则 OC，替换原始迭代过程的 PF 选取准则，将原始迭代过程 PF 终止条件式(6)替换为式(7)。

$$1 - \delta \leq a_{1(n+1)}(t) \leq 1 + \delta \quad (6)$$

$$oc = \frac{\left| \sum_{t=0}^T x(t)m_{ij}(t) \right|}{\sum_{t=0}^T [x(t) - m_{ij}(t)]m_{ij}(t)} \quad (7)$$

式中： $x(t)$ 为待分解的信号； $m_{ij}(t)$ 为第 i 个 PF 分量的第 j 次局部均值函数。随着迭代次数 j 的增加， $m_{ij}(t)$ 的波动性将逐渐减弱，理论上 $m_{ij}(t)$ 最终等于 0。将正交性准则 OC 定义为 $oc \leq 1.01$ ，并以此作为迭代结束条件，提高了计算速度和分解的正交性、彻底性。

1.2 故障特征分量提取

直流输电线路故障的暂态信号具有高频、瞬时能量突变的特性。特别是当行波到达母线时，行波中的高频分量会发生较大的幅值和频率波动。CRS-LMD 能够自适应地处理非线性平稳的信号，尤其适用于处理暂态故障行波信号。

如图 6 所示，本文基于表 1 的张北四端的实际工程参数，在 PSCAD/EMTDC 中搭建模型，输电系统采用 bipolar 运行模式，且直流线路两端均装有限流电抗器和直流断路器。

图 6 所示的各换流站分别对应张北四端工程中实际站点，且其中 3 端丰宁站作为调节站。系统正

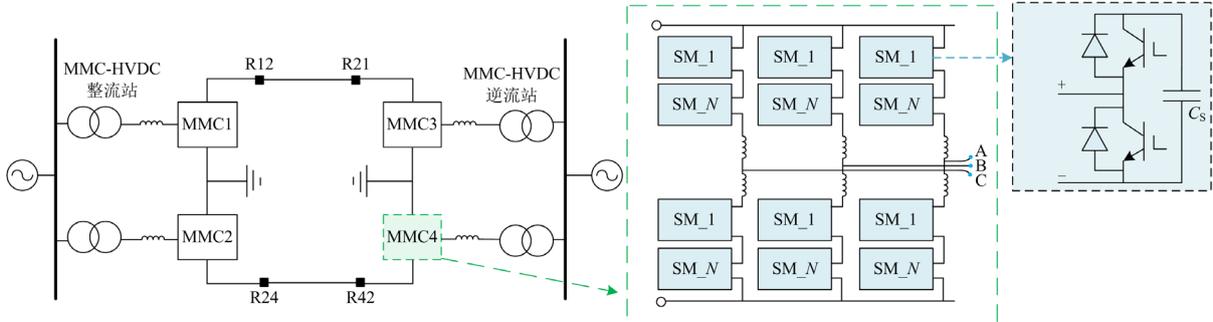


图 6 张北多端柔性直流输电系统

Fig. 6 Zhangbei multi-terminal flexible DC transmission system

常运行时, 站点 1 和站点 2 为定有功功率控制, 换流站容量分别为 1500 和 3000 MW。

站点 3 为定直流电压控制, 站点 4 为定有功功率控制, 换流站容量分别为 1500 和 3000 MW。正负极之间的电磁耦合会影响故障定位精度, 需要通过 Karrenbauer 变换对暂态电压数据进行解耦, 并采取受干扰因素少, 衰减速度慢的 1 模信号来检测行波波头时间。

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_+ \\ U_- \end{bmatrix} \quad (8)$$

线模电压行波经 CRS-LMD 分解得到多组 PF 分量, 选取其中故障特征含量最高的分量, 定义为故障特征分量(fault characteristic component, FC)。在分解含噪声的故障电压行波时, 如果不进行故障特征分量的预处理, 则可能会导致奇异值分解的误差较大。因此, 需要剔除 CRS-LMD 的高频噪声 PF1 分量, 选取剩余分量进行重构。在对多组 PF 分量的故障特征进行比较后, 选取其中含量较高的几组进行叠加, 以获得最终所需要的故障特征分量, 如式(9)所示。

$$FC = \sum_{i=1}^m PF_i \quad (1 \leq m \leq n) \quad (9)$$

式中: FC 分量为含噪故障电压行波的特征分量; m 为选取 PF 分量的个数; n 为剔除 PF1 分量和残差后的 PF 分量的个数。

经过上述处理后的 FC 分量实现了初步去噪, 便于行波波头标定时奇异值分解的准确性。

1.3 行波波头标定

奇异值分解具有检测突变特征的能力, 经 CRS-LMD 所得的 FC 分量, 并可以通过二分递推奇异值分解对奇异值进行精确检测, 实现行波波头标定^[22]。

对故障特征分量进行相空间重构, 得到 H 矩阵, 如式(10)所示。

$$H = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_{n-1} \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

所建立的 H 矩阵经奇异值分解可得

$$H = \lambda_1 u_1 v_1^T + \lambda_2 u_2 v_2^T \quad (11)$$

式中, u_i 和 v_i 为矩阵奇异值分解后的特征向量。

将 $\lambda_1 u_1 v_1^T$ 和 $\lambda_2 u_2 v_2^T$ 定义为 H_1 、 H_2 , 采用定义的 H_1 和 H_2 矩阵求解反映信号主体的 A 分量和细节特征的 D 分量。选取 SVD 的 D 分量来对行波波头进行标定。

2 故障定位

由第 1 节分析可知, CRS-LMD 和 SVD 可以对行波波头时间准确标定。而实现故障距离的精确定位, 还需要将时间代入故障测距公式进行计算。下文根据故障行波的传播情况对两种故障测距公式进行推导。

行波传播过程如图 7 所示。当 F 点发生故障时, 将会产生以电磁波形式沿输电线路向两端传输的行波。行波到达如图 7 所示的信号监测 A 点时, 将会产生反射波, 并在到达 F 点时产生折射波。图 7 中: t_0 代表故障发生时刻; t_1 、 t_2 、 t_3 分别代表故障行波和折反射波到达监测 A 点的时刻; x 代表故障点到整流站的距离; l 代表传输线路的总长度。

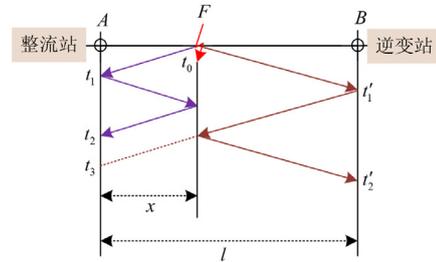


图 7 故障传输过程

Fig. 7 Fault travelling wave transmission process

在实际行波传播过程中, 第一个行波波头是来自故障点的初始行波, t_1 是确定的。由于 t_2 和 t_3 的前后顺序取决于故障在区内的发生位置, 折反射波头顺序的区分会影响本文算法的精确程度。因此, 利用突变点的导数存在正负关系, 判断行波波头的极性。当该波头与首波头具有相同极性时, 故障点反射波在 t_2 时刻到达。反之, 故障点反射波在 t_3 时刻到达。运用差分形式表示导数计算公式。

$$F = \frac{[f(x) - f(x-1)]}{T_s} \quad (12)$$

由图 7 可以看出, 传统故障测距算法需要代入行波波速 v 和 t_1 、 t_2 时刻点。

$$x = \frac{(t_2 - t_1) \cdot v}{2} \quad (13)$$

由式(13)可知, 行波的传输速度是影响故障定位精度的主要因素之一。而波速作为不确定量, 受线路参数的制约, 可能导致故障测距产生较大的误差。因此, 本文采用无须考虑行波波速 v 的测距公式, 避免了行波波速的影响。

当发生正(负)接地故障时, 故障行波的传播过程如图 7 所示。

$$\begin{cases} v \cdot (t_1 - t_0) = x \\ v \cdot (t_2 - t_0) = 3x \\ v \cdot (t_3 - t_0) = 2l - x \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)消去 v , 可以得到单端测距的距离公式(15)。

$$x = \frac{(t_2 - t_1) \cdot l}{t_3 - 2t_1 + t_2} \quad (15)$$

当发生双极短路故障时, 逆变站的反射波无法到达整流站, 即如图 7 中所标注的 t_3 时刻无法监测到。根据图 7 中所描述的传输过程可以得出

$$\begin{cases} v \cdot (t_1 - t_0) = x \\ v \cdot (t_2 - t_0) = 3x \\ v \cdot (t'_1 - t_0) = 2l - x \\ v \cdot (t'_2 - t_0) = 3(l - x) \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)消去 v , 可以得到故障距离 x , 如式(17)所示。

$$x = \frac{(t_2 - t_1) \cdot l}{t_2 - t_1 + t'_2 - t'_1} \quad (17)$$

在不同的故障状态下, 应用式(15)和式(17)中的故障距离计算公式, 只须代入传输线路参数和行波到达监测点的时间, 从而避免了波速不确定性带来的影响。

本文所提故障测距方法主要包括以下两个步骤: 1) 利用 CRS-LMD 对故障电压行波进行分解, 并结合奇异值分解对故障行波波头进行准确提取; 2) 将所提取的故障行波波头代入故障测距公式, 完成故障定位。整体流程如图 8 所示。

3 仿真分析

3.1 仿真模型及参数

本文以张北±500 kV 直流电网示范工程为背景, 在 PSCAD/EMTDC 中建立如图 6 所示的四端 MMC-HVDC 模型, 以康保换流站到丰宁换流站线路为主, 模拟各种故障情况。输电线路为架空线路, 主要参数如表 1 所示。

以多端 MMC-HVDC 中 1、3 两端的逆变站和整流站为研究对象, 模拟了输电线路发生不同类型、不同距离故障时的运行状态。设置故障发生时间为 0.3 s, 故障持续时间为 0.1 s, 将故障发生 2.5 ms 时的线路两端信号监测点的数据导入 Matlab, 来验证算法的准确性。

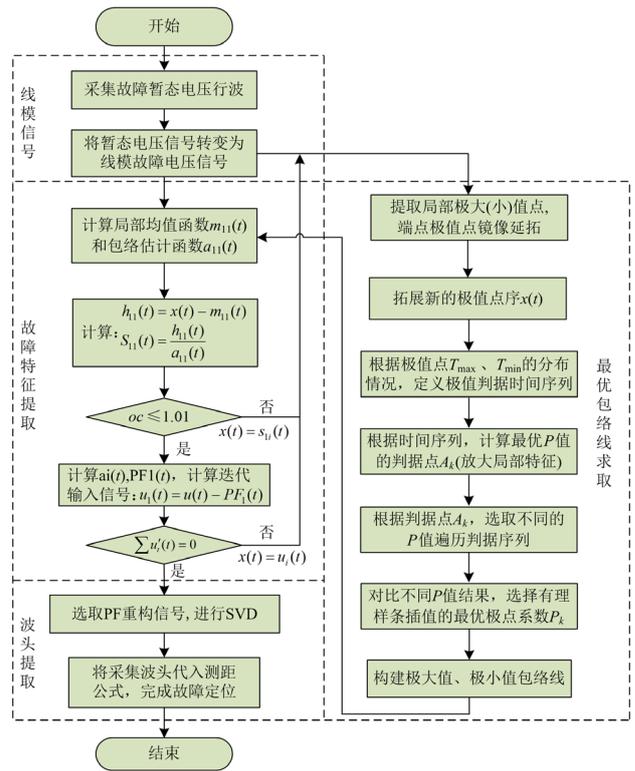


图 8 故障测距方案流程图

Fig. 8 Flowchart of the fault location algorithm

表 1 多端 MMC-HVDC 仿真模型参数

Table 1 Parameters of multi-terminal MMC-HVDC simulation

名称	数值
额定直流电压/kV	±500
线路长度/km	Line1-3: 305.9
	Line1-2: 49.6
	Line3-4: 188.1
	Line2-4: 301.4
线路电容/(μF/km)	0.017
线路电感/(mH/km)	1.26
线路电阻/(Ω/km)	0.2862
桥臂子模块数	233
限流电抗器(极线)/mH	150
子模块电容/mF	MMC1: 7
	MMC2: 15
	MMC3: 7
	MMC4: 15

3.2 故障仿真分析

当 1-3 站点之间发生距整流侧 100 km 的正极接地故障(过渡电阻为 0.1 Ω)时, 故障电压行波如图 9 所示, 故障电压行波经 CRS-LMD 的 FC 分量如图 10 所示, FC 分量经奇异值分解的 3 个波头时间点

如图 11 所示。图中箭头标注的时间按顺序对应图 7 中监测的时间点 t_1, t_2, t_3 。将时间点代入式(15), 可得故障距离为 99.977 km, 误差为 23 m。

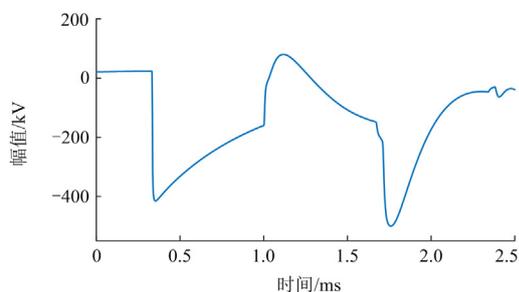


图 9 整流侧 100 km 正极接地故障电压行波

Fig. 9 Voltage traveling wave of 100 km positive ground fault on the rectifier side

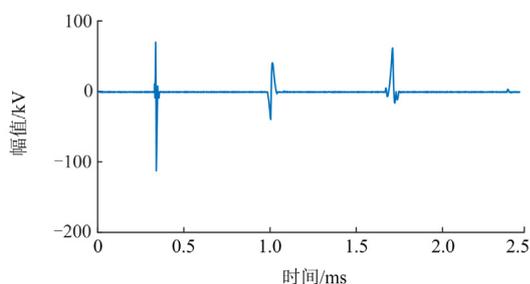


图 10 整流侧 100 km 正极接地故障 FC 分量

Fig. 10 FC component of the 100 km positive ground fault on the rectifier side

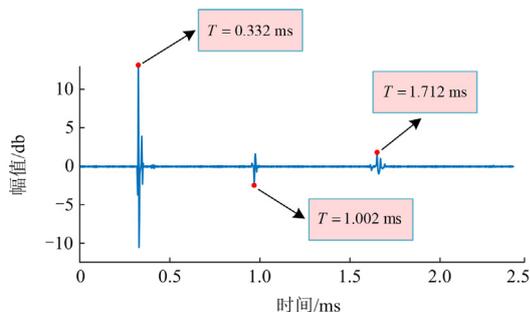


图 11 FC 分量经 SVD 的 3 个波头时间点

Fig. 11 Three wave-head time points of FC component via SVD

当 1-3 站点之间发生距整流侧 100 km 负极接地故障(过渡电阻为 0.1Ω)时, 故障电压行波如图 12 所示, 故障电压行波经 CRS-LMD 的 FC 分量如图 13 所示, FC 分量经奇异值的 3 个波头时间点如图 14 所示。将时间点代入式(15), 可得故障距离为 99.977 km, 误差为 23 m。

当 1-3 站点之间发生距整流侧 100 km 的双极短路故障(过渡电阻为 0.1Ω)时, 故障电压行波如图 15

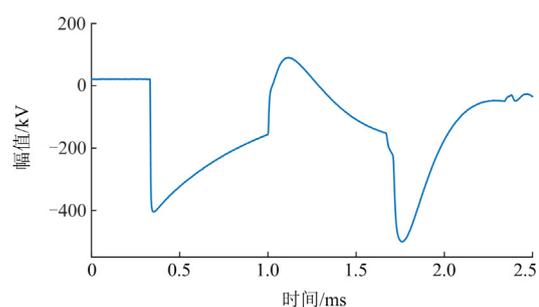


图 12 整流侧 100 km 负极接地故障电压行波

Fig. 12 Voltage traveling wave of 100 km negative ground fault on the rectifier side

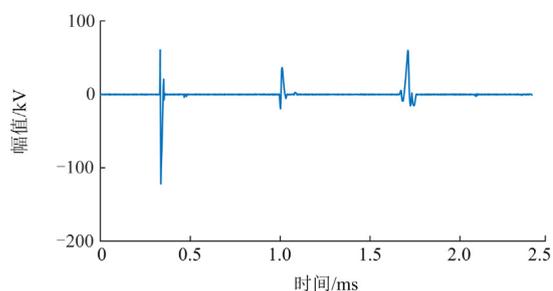


图 13 整流侧 100 km 负极接地故障 FC 分量

Fig. 13 FC component of the 100 km negative ground fault on the rectifier side

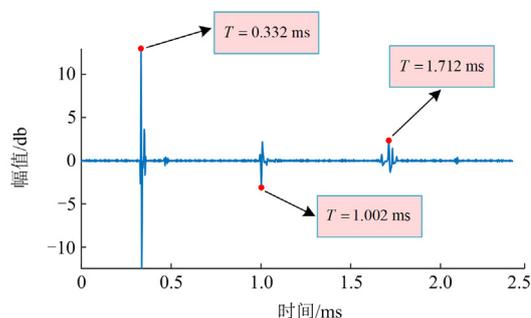


图 14 FC 分量经 SVD 的 3 个波头时间点

Fig. 14 Three wave-head time points of FC component via SVD

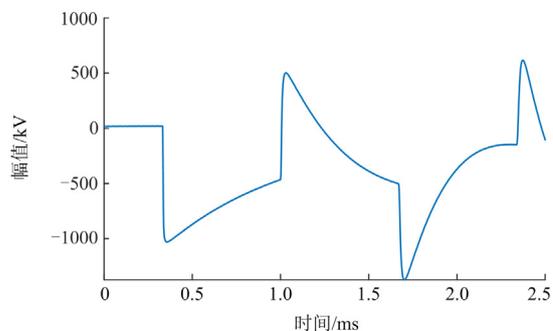


图 15 整流侧 100 km 双极短路故障电压行波

Fig. 15 Voltage traveling wave of 100 km bipolar short-circuit fault on the rectifier side

所示, FC 分量如图 16 所示。FC 分量经奇异值分解的 2 个波头时间点如图 17 和图 18 所示。图 17 中箭头标注的时间按顺序对应图 7 中监测的时间点 t_1, t_2 , 图 18 中箭头标注的时间按顺序对应图 7 中监测的时间点 t'_1, t'_2 。将时间点代入式(17), 可得故障距离为 99.977 km, 误差为 23 m。

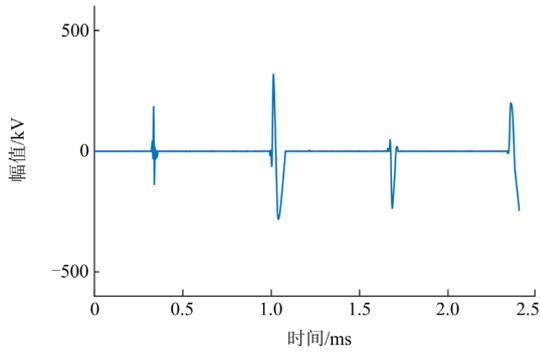


图 16 整流侧 100 km 双极短路故障 FC 分量
Fig. 16 FC component of 100 km bipolar short-circuit fault on the rectifier side

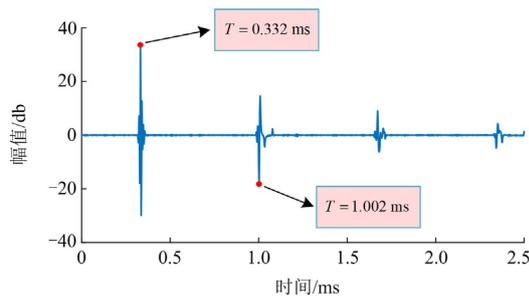


图 17 FC 分量经 SVD 的 2 个波头时间点分解(整流侧)
Fig. 17 Two wave-head time points of FC component SVD (rectifier side)

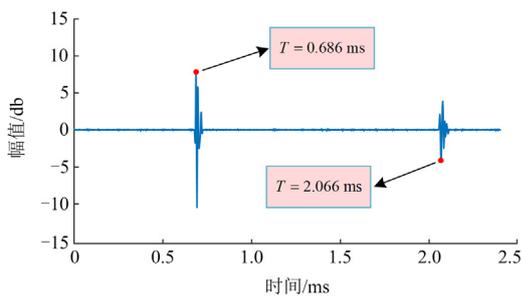


图 18 FC 分量经 SVD 的 2 个波头时间点分解(逆变侧)
Fig. 18 Two wave-head time points of FC component SVD (inverter side)

3.3 特殊故障仿真分析

3.3.1 噪声对行波波头的影响

在实际工程中, 故障行波信号采集过程易受噪

声干扰, 对故障行波波头提取的准确性有很大影响。为检验所提方法的抗噪声能力, 本文选取高斯白噪声作为噪声干扰项叠加在行波信号中, 模拟实际工程中所采集的混杂噪声。在行波信号中叠加 10 db、20 db、30 db 的高斯白噪声后, 故障行波如图 19 所示。

本文取叠加 20 db 噪声的信号验证所提算法的抗噪声能力。含噪声信号经 CRS-LMD, 可以得到包含噪声分量的多组 PF 分量, PF1 分量为高频噪声分量, 如图 20 所示。

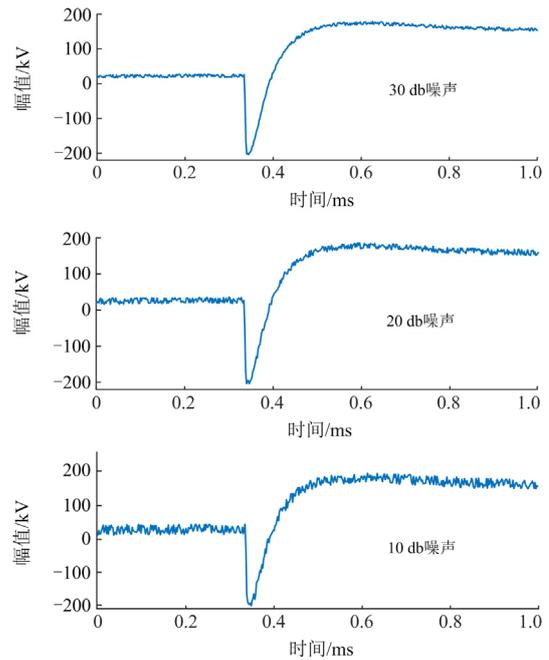


图 19 行波信号叠加不同噪声

Fig. 19 Traveling wave signal superimposed different noise

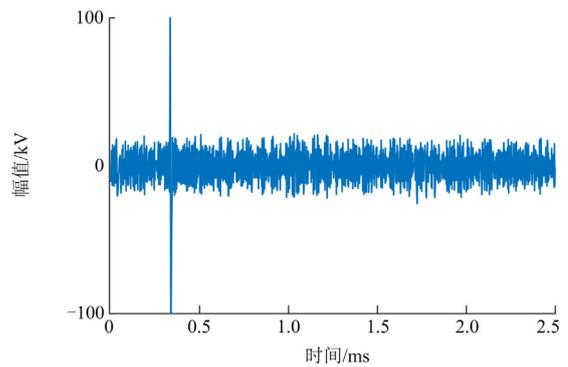


图 20 经 CRS-LMD 的高频噪声信号

Fig. 20 High frequency noise signal decomposed by CRS-LMD

图 21 和图 22 为重构 FC 信号经奇异值分解的 2 个波头时间点。将时间点代入式(17), 可得此时的故障距离为 100.17 km, 误差为 170 m。由此可知, 滤去高频噪声信号后, 重构剩余 PF 分量的 FC 信号

仍较好的保留了故障特征。证明所提波头提取方法具有较好地抗噪能力。

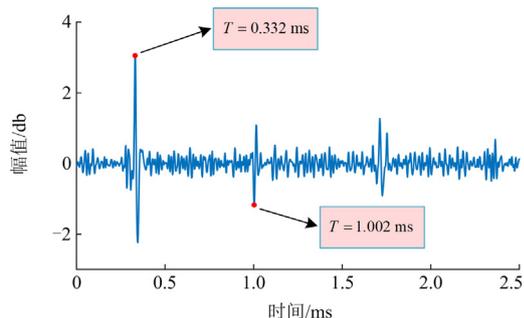


图 21 CRS-LMD 重构 FC 信号进行 SVD 的 2 个波头时间点(整流侧)

Fig. 21 Two wave-head time points of CRS-LMD decomposing reconstructed signals for SVD (rectifier side)

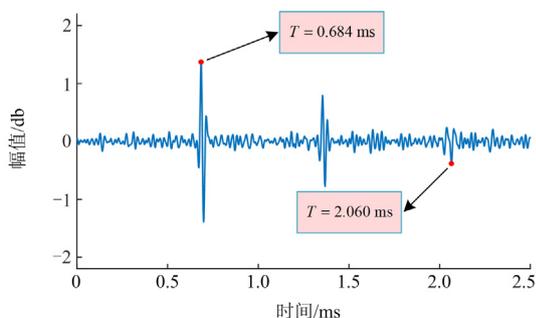


图 22 CRS-LMD 重构 FC 信号进行 SVD 的 2 个波头时间点(逆变侧)

Fig. 22 Two wave head time points of CRS-LMD decomposing reconstructed signals for SVD (inverter side)

3.3.2 过渡电阻

过渡电阻与故障行波信号的幅值呈反比关系, 随着过渡电阻的逐渐增大, 行波波头的提取将会变得越来越困难。幅值越小的行波信号提取过程越容易受到干扰, 导致波头的检测过程发生误测。随着过渡电阻的增大, 行波幅值的变化如图 23 所示。

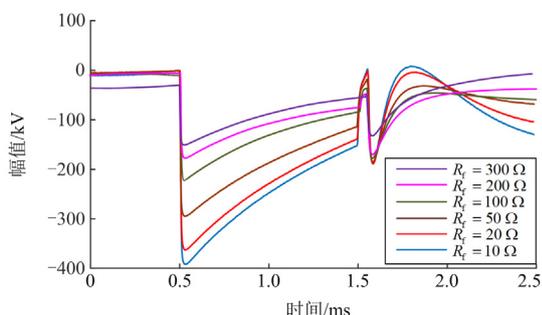


图 23 不同过渡电阻下行波幅值变化

Fig. 23 Variation of the downgoing amplitude of different transition resistors

由图 23 可知, 随着过渡电阻的增大, 行波幅值的大小变化较为明显。在 $200\ \Omega$ 接地电阻状态下的行波峰值相比于 $10\ \Omega$ 接地电阻下降了 57%。幅值越小的行波信号越容易被混杂的噪声覆盖, 导致行波波头的分解极其困难。本文选取接地电阻为 $200\ \Omega$ 状态下叠加 20 db 高斯白噪声, 来验证所提算法在较大的过渡电阻下的测距精确性。

图 24 为 $200\ \Omega$ 接地电阻状态下叠加 20 db 噪声的故障电压行波和无噪声且接地电阻为 $0.1\ \Omega$ 状态下的原始故障行波信号对比图, 可以明显地看出波头幅值下降, 且叠加的噪声对行波的提取也造成了一定的影响。

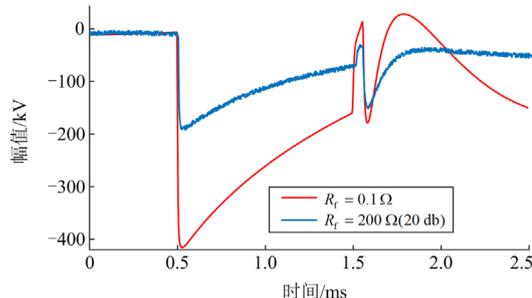


图 24 $200\ \Omega$ 接地电阻下叠加 20 db 噪声和无噪声且 $0.1\ \Omega$ 接地电阻下的故障行波

Fig. 24 $200\ \Omega$ ground resistance with 20 db noise and $0.1\ \Omega$ ground resistance with no noise

图 25 和图 26 为滤去噪声的重构 FC 信号经奇异值分解的 2 个波头时间点。将时间点代入式(17), 可得故障距离为 149.968 km, 误差为 32 m。

为检验该算法在发生高阻故障时的自适应能力, 将过渡电阻设置为 $300\ \Omega$ 。由图 23 可以看出, 行波幅值衰减程度较高。图 27 为 FC 分量经奇异值分解的 3 个波头时间点。将时间点代入式(15), 可得故障距离为 149.81 km, 误差为 190 m。此时提取

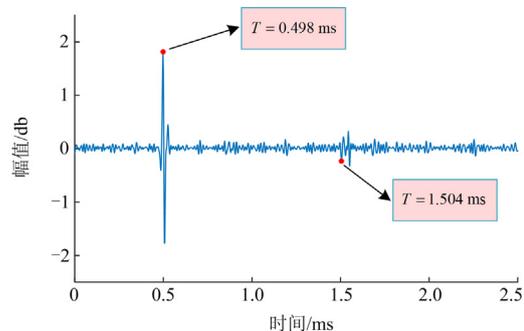


图 25 CRS-LMD 重构 FC 信号进行 SVD 的 2 个波头时间点(整流侧)

Fig. 25 Two wave-head time points of CRS-LMD decomposing reconstructed signals for SVD (rectifier side)

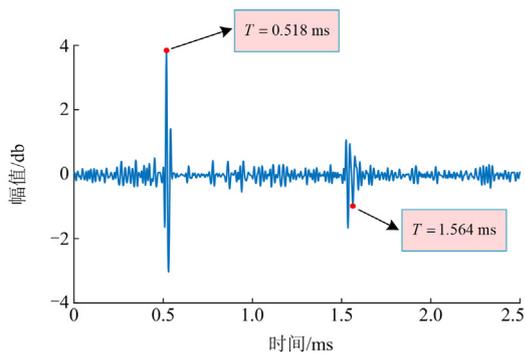


图 26 CRS-LMD 重构 FC 信号进行 SVD 的 2 个波头时间点(逆变侧)

Fig. 26 Two wave-head time points of CRS-LMD decomposing reconstructed signals for SVD (inverter side)

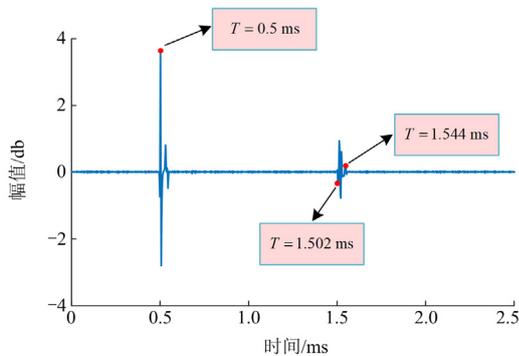


图 27 FC 分量经 SVD 的 3 个波头时间点

Fig. 27 Three wave-head time points of FC component via SVD

的波头时间基本不会偏移，仍可以保持较好测距精度。本文使用的方法在较大过渡电阻和叠加噪声影响下，依旧可以保证较高的测距精度。

3.3.3 远端测距

为验证所提算法在远距离输电情况下的测距效果，将整流站与逆变站距离延长至 2000 km，设距整流侧 1000 km 处发生负极接地故障(接地电阻 10 Ω)。

由于传输距离较远，图 28 中的行波波头到达的时间间隔较长，行波的能量衰减较快，幅值较小。将图 29 中的时间点代入式(15)，可得故障距离为 999.152 km，相对误差为 0.0848，证明本文所提方法在远距离故障下依旧适用。

3.3.4 不同故障状况下对比

图 30 展示了本文测距方法在不同距离和噪声状态下测距精度的变化趋势。分别采样不同故障距离下发生负极接地故障的电压行波，并叠加不同强度的噪声，综合检验所提算法的抗噪声性和有效性。

由图 30 可以看出，当故障发生点距整流侧 10~150 km 且叠加 20~30 db 噪声时，本文所提算法的绝对测距误差峰值在 200 m 以内。当故障发生点距整流侧 200~300 km 且叠加较高噪声时，测距误差虽然逐渐上升，但相对误差仍然较小，满足精准测距的需求。

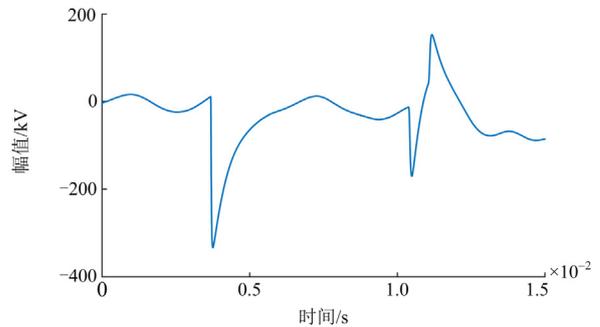


图 28 整流侧 1000 km 负极接地故障电压行波

Fig. 28 Voltage traveling wave of 1000 km negative ground fault at rectifier side

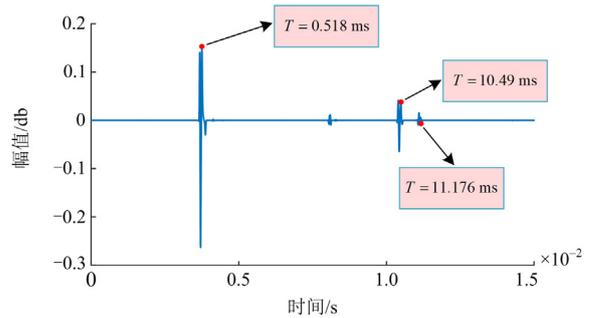


图 29 FC 分量经 SVD 的 3 个波头时间点

Fig. 29 Three wave-head time points of FC component via SVD

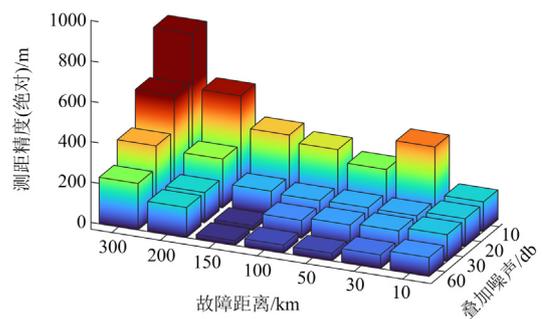


图 30 不同故障状况下的测距精度

Fig. 30 Range accuracy under different fault conditions

3.3.5 不同方法对比

在不同故障距离下，分别利用 LMD-TEO、小波分解(db4)和本文方法进行行波波头的提取，并代入测距公式计算故障距离，检测结果如图 31 所示。

相对误差是误差距离与故障距离的比值。由图

31 可以看出, 本文测距方案的相对误差相对于其他方法较小, 证明本文方法的自适应性和准确性较高, 相比其他两种波头检测方法的检测效果更加优越。

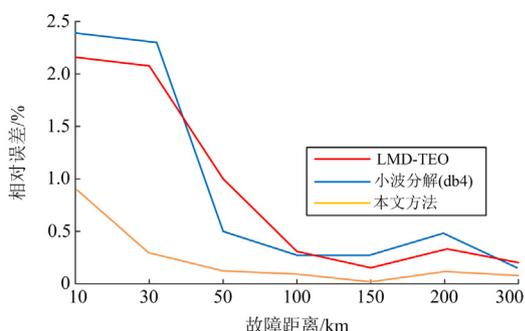


图 31 不同方法下的测距误差对比

Fig. 31 Comparison of range error under different methods

4 结论

针对行波法精度受波速影响以及传统信号处理算法缺乏自适应性和抗干扰性弱的问题, 本文提出一种基于局部特征有理样条插值均值分解和奇异值分解的故障测距方法。根据工程实际参数在 PSCAD/EMTDC 中搭建模型, 并运用 Matlab 仿真验证所提故障测距算法的有效性, 得到以下结论:

1) 采用镜像延拓的方法抑制了端点效应, 利用特征有理样条插值放大局部特征的优势, 可以选取有理样条插值的最优 P 值, 从而有效改善传统 LMD 结果误差大以及三次样条插值局部均值分解无法自适应调节所导致的过包络和欠包络现象。

2) 利用二分递推奇异值分解来对奇异值进行了精确检测。应用 SVD 检测突变特征的能力对行波波头进行标定。CRS-LMD 配合 SVD 可以实现对行波波头的准确提取, 缓解了 SVD 单独分解时对噪声的适应性差的问题。应用导数法推断波头顺序, 避免了波速不确定性对测距精度的影响。

3) 仿真结果表明, 所提算法在不同故障距离和故障类型下均能实现故障测距, 且在噪声和过渡电阻的干扰下仍可以保证自适应性和较好的测距精度。

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] 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.

[3] 郭铭群, 梅念, 李探, 等. ± 500 kV 张北柔性直流电网工程系统设计[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 4194-4204.
GUO Mingqun, MEI Nian, LI Tan, et al. System design of ± 500 kV Zhangbei VSC-based DC grid project[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 4194-4204.

[4] CHANDIO R H, CHACHAR F A, SOOMRO J B, et al. Control and protection of MMC-based HVDC systems: a review[J]. Energy Reports, 2023, 9: 1571-1588.

[5] 李学鹏, 全玉生, 黄徐, 等. 数学形态学用于高压直流输电线路行波保护的探讨[J]. 继电器, 2006, 34(5): 5-9.
LI Xuepeng, QUAN Yusheng, HUANG Xu, et al. Application of mathematical morphology to traveling wave protection of HVDC transmission lines[J]. Relay, 2006, 34(5): 5-9.

[6] 陶彩霞, 杜雪, 高锋阳, 等. 基于经验小波变换的混合输电线路单相接地故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 105-112.
TAO Caixia, DU Xue, GAO Fengyang, et al. Single-phase to ground fault location of hybrid transmission lines based on empirical wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 105-112.

[7] 李文艺, 彭跃辉, 刘坤亮, 等. 基于小波变换和随机森林算法的高压断路器机构机械特性监测技术研究[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 75-82.
LI Wenyi, PENG Yuehui, LIU Kunliang, et al. Research on monitoring technology of mechanical characteristics of operating mechanism for high-voltage circuit breaker based on wavelet transform and random forest algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 75-82.

[8] 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.

[9] ZHANG Y, CONG W. An improved single-ended frequency-domain-based fault detection scheme for MMC-HVDC transmission lines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 125.

[10] 高淑萍, 姜元月, 宋国兵, 等. 混合三端直流输电线路故障测距方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 76-83.

- GAO Shuping, JIANG Yuanyue, SONG Guobing, et al. Research on a fault location method for a hybrid three-terminal DC transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 76-83.
- [11] SILVA A S, SANTOS R C, TORRES J A, et al. An accurate method for fault location in HVDC systems based on pattern recognition of DC voltage signals[J]. Electric Power Systems Research, 2019, 170: 64-71.
- [12] ZHANG M, WANG H. Fault location for MMC-MTDC transmission lines based on least squares-support vector regression[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16): 2125-2130.
- [13] 廖晓辉, 赵肖健, 梁恒娜. 一种基于 Hilbert-Huang 变换的电力电缆故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 20-25.
LIAO Xiaohui, ZHAO Xiaojian, LIANG Hengna. A power cable fault location method based on Hilbert-Huang transform[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 20-25.
- [14] WANG D, HOU M. Travelling wave fault location algorithm for LCC-MMC-MTDC hybrid transmission system based on Hilbert-Huang transform[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 121.
- [15] SMITH J S. The local mean decomposition and its application to EEG perception data[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2005, 2(5): 443-454.
- [16] 王燕. 电能质量扰动检测的研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 174-186.
WANG Yan. Review of research development in power quality disturbance detection[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 174-186.
- [17] 徐艳春, 高永康, 李振兴, 等. 改进 LMD 算法在微电网电能质量扰动信号检测中的应用[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 332-339.
XU Yanchun, GAO Yongkang, LI Zhenxing, et al. Application of improved LMD algorithm in signal detection of power quality disturbance in microgrid[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 332-339.
- [18] 邓林峰, 赵荣珍. 基于 CHI-LMD 方法的转子振动信号分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(15): 58-64.
DENG Linfeng, ZHAO Rongzhen. Vibration signal analysis of rotor based on the CHI-LMD method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(15): 58-64.
- [19] 徐艳春, 赵彩彩, 孙思涵, 等. 基于改进 LMD 和能量相对熵的主动配电网故障定位方法[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 133-143.
XU Yanchun, ZHAO Caicai, SUN Sihan, et al. Fault location for active distribution network based on improved LMD and energy relative entropy[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 133-143.
- [20] 郝勇奇, 王倩, 周士琼, 等. 基于 LMD 与 Teager 能量算子的 VSC-HVDC 输电线路故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 81-88.
HAO Yongqi, WANG Qian, ZHOU Shiqiong, et al. Fault location for VSC-HVDC transmission lines based on LMD and Teager energy operator[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 81-88.
- [21] PEGRAM G G S, PEEL M C, MCMAHON T A. Empirical mode decomposition using rational splines: an application to rainfall time series[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2008, 464: 1483-1501.
- [22] 林顺富, 于俊苏, 李东东, 等. 基于二分递推 SVD 分解的居民电器开关事件检测方法[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1534-1542.
LIN Shunfu, YU Junsu, LI Dongdong, et al. Method of switching events detection of residential appliances based on binary recursive SVD decomposition[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1534-1542.
- [23] 郑文光, 张加岭, 邢强. 基于改进 LMD 方法的电压骤降检测与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 119-127.
ZHENG Wenguang, ZHANG Jialing, XING Qiang. Voltage sag detection and analysis based on a modified LMD method[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 119-127.

收稿日期: 2023-07-05; 修回日期: 2023-09-20

作者简介:

贺宇阳(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流输电系统继电保护与信号处理; E-mail: hyy_982021@163.com

马千里(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为多电平变换器, 电力系统稳定性分析;

刘喜梅(1961—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力电子、智能控制。E-mail: liuximeiqd@163.com

(编辑 姜新丽)