

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190444

基于 VMD 与广义 S 变换的 HVDC 线路故障定位

付 华, 吴 赛, 徐耀松, 谢国民

(辽宁工程技术大学, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘要: 针对高压直流输电线路故障定位中存在的输电线路长、故障概率大、测距精度不高以及故障波形含有噪声等问题, 提出了 VMD 分解与广义 S 变换结合的高压直流输电线路故障测距算法。首先通过变分模态分解 (Variational Model Decomposition, VMD) 对含噪声的行波信号进行 VMD 分解, 滤去噪声并获得最优模态分量。然后采用广义 S 变换 (Generalized S-transform, GST) 计算最优模态分量, 生成高时间分辨率 S 矩阵。并选取 S 矩阵中的高频分量, 识别该频率分量的波形突变点, 从而获取故障初始行波到达时刻。最后通过测距公式获得故障距离。PSCAD/EMTDC 仿真表明, 所提方法受过渡电阻影响很小, 不同故障距离的测距精度很高。经过现场故障行波数据的验证, 可以实现在线路范围内快速准确的故障定位。

关键词: 高压直流输电; 故障定位; 故障行波; 变分模态分解; 广义 S 变换

HVDC line fault location based on VMD and generalized S-transform

FU Hua, WU Sai, XU Yaosong, XIE Guomin

(Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

Abstract: Aiming at the problems existing in fault location of HVDC transmission line, such as long transmission line, high fault probability, low fault location accuracy and noise in fault waveform, a fault location algorithm for HVDC transmission line based on VMD decomposition and generalized S transform is proposed. Firstly, the traveling wave signal with noise is decomposed by Variational Model Decomposition (VMD), and the noise is filtered to obtain the optimal modal component. Then, the Generalized S-Transform (GST) is used to calculate the optimal modal component, and generate the S-matrix with high temporal resolution. And then the high frequency component in the S-matrix is selected, the waveform mutation point of the frequency component is identified, thus, the arrival time of the initial traveling wave of the fault can be obtained. Finally, the fault distance is obtained by the formula of fault location. PSCAD/EMTDC simulation results show that the proposed method is less affected by the transition resistance and has high accuracy in fault location with different fault distances. Through the verification of field fault traveling wave data, fast and accurate fault location can be achieved in the line range.

This work is supported by Key Laboratory Project of Liaoning Province (No. LJZS003).

Key words: HVDC transmission; fault location; fault traveling wave; variational mode decomposition; generalized S-transform

0 引言

高压直流输电 (High Voltage Direct Current, HVDC) 具有输送容量大、送电距离远、线路造价低等优点。我国幅员辽阔, 高压直流输电在我国具有广阔的应用前景^[1-7], 直流输电线路通常为几百上千公里, 需要跨越气候恶劣的地区, 检修难度大, 故

障概率高。因此, 为了增强供电可靠性, 提高经济性, 研究能够快速准确地定位故障点的直流输电线路故障测距方法变得十分重要。

目前输电线路的故障测距方法主要是行波法, 行波法分为单端行波法与双端行波法, 双端行波法比单端行波法更加精确可靠, 通过标定故障初始行波分别到达线路两端的时刻来测定故障距离^[8-13]。一些学者将神经网络、小波变换以及其他方法与行波法结合进行故障测距^[14-18], 文献[16]提出基于行

基金项目: 辽宁省重点实验室项目资助 (LJZS003)

波瞬时频率的高压直流输电线路故障测距方法, 将故障行波经过 EEMD 分解, 对高频模态分量进行 Hilbert 变换来标定初始行波波头, 该方法需要对故障行波中添加白噪声, 影响故障行波中的高频分量, 使通过 Hilbert 变换得到的时频图峰值较多, 突变点不够清晰, 难以识别故障初始行波, 从而影响检测结果。文献[17]提出利用神经网络与双端行波法结合来进行故障测距, 选取整流侧与逆变侧的暂态电压线模分量作为输入量, 对神经网络不断训练, 形成直流输电线路故障测距神经网络模型, 该方法需要大量的训练样本作为输入量, 输入量之间差值较大降低神经网络的精度, 且对神经网络的训练会耗费大量时间, 过程繁琐。文献[18]通过单纯 S 变换来处理故障行波, 生成 S 矩阵以检测在某一频率下的波形突变点, 确定波头到达时刻, 该方法忽略了噪声对波形的影响, 降低了测距精度。

通过分析高压直流输电线路故障行波中的噪声与故障测距精度不高等问题, 提出了 VMD 与广义 S 变换结合的双端行波故障测距方法, 可以有效分解故障行波, 降低噪声对波形的影响, 更加精确地识别故障初始行波波头, 提高了故障定位精度。

1 故障行波的 VMD 分解

1.1 故障行波变分问题的构造

故障行波变分问题构造的思路, 即将行波信号分解问题变换为带有约束条件的变分问题, 通过在约束条件内不断寻找最优解, 得到每个频域的频率中心和带宽, 从而达到将信号模态分解的目的, 基本原则是使分解得到的所有模态量的频率估计带宽之和最小, 设获得原始故障行波信号 f , 分解为 K 个模态分量 $u_k(t)$, 每个模态分量的中心频率为 ω_k 。

每个模态分量 $u_k(t)$ 经过 Hilbert 变换得到其单边频谱, 将各个单边频谱调制到基频带, 并求得混合预估中心频率 $e^{-j\omega_k t}$, 计算此基频带信号的平方范数, 从而构造行波的变分函数。

对应的约束变分模型为

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

式中: $\{u_k\} = \{u_1, \dots, u_K\}$ 为分解得到的 K 个 IMF 分量; $\{\omega_k\} = \{\omega_1, \dots, \omega_K\}$ 为各分量的频率中心。

1.2 故障行波变分问题的求解

为了求解上述变分问题, 引入二次惩罚因子 α

和 Lagrange 乘法算子 $\lambda(t)$, 得到增广 Lagrange 表达式为

$$L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda) = \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right)^* u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle \quad (2)$$

利用交替方向乘子算法 (Alternate Direction Method of Multipliers, ADM) 求取上述增广 Lagrange 函数的鞍点, 即为式(2)的最优解, 对于公式中的三个变量 u_k 、 ω_k 和 λ 要不断迭代更新, u_k^{n+1} 的迭代公式为

$$u_k^{n+1} = \arg \min_{u_k \in X} \left\{ \alpha \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right)^* u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \left\| f(t) - \sum_i u_i(t) + \frac{\lambda(t)}{2} \right\|_2^2 \right\} \quad (3)$$

式中, 近似认为 $\omega_k^n = \omega_k^{n+1}$, 并且 $\sum_i u_i(t) = \sum_{i \neq k} u_i^{n+1}(t)$ 。

利用 Parseval/Plancherel 傅里叶等距变换将式(3)变换到频域, 得

$$\hat{u}_k^{n+1} = \arg \min_{\hat{u}_k, u_k} \left\{ \alpha \left\| j\omega \left[\frac{1 + \text{sgn}(\omega + \omega_k)}{2} \right] \hat{u}_k(\omega + \omega_k) \right\|_2^2 + \left\| \hat{f}(\omega) - \sum_i \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2} \right\|_2^2 \right\} \quad (4)$$

式中, \hat{u}_k^{n+1} 、 $\hat{f}(\omega)$ 、 $\hat{\lambda}(\omega)$ 为 $u_k(t)$ 、 $f(t)$ 、 $\lambda(t)$ 的频域表达式, 将式(4)中的 ω 用 $\omega - \omega_k$ 代替, 转为非负频率区间积分的形式, 并经过二次优化可得模态分量迭代式如下。

$$\hat{u}_k^{n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (5)$$

对于 ω_k 的迭代式, 可用式(6)表示。

$$\omega_k^{n+1} = \arg \min_{\omega_k} \left\{ \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right)^* u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \quad (6)$$

将 ω_k^{n+1} 转换为非负频率区间积分的形式, 经过优化, 解得中心频率的迭代式为

$$\omega_k^{n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega} \quad (7)$$

同理, 可解得 λ 的迭代式如下。

$$\hat{\lambda}^{n+1}(\omega) \leftarrow \hat{\lambda}^n(\omega) + \tau \left[\hat{f}(\omega) - \sum_k \hat{u}_k^{n+1}(\omega) \right] \quad (8)$$

求得 u_k 、 ω_k 、 λ 的迭代式后, 即可将式(5)、式(7)、式(8)代入式(2)求解。首先令 $n=0$, 并初始化 $\{\hat{u}_k^1\}$ 、 $\{\omega_k^1\}$ 、 $\{\hat{\lambda}^1\}$, 接下来, 执行循环, 令 $n=n+1$, 对于 $k=1:K$, 根据式(5)和式(7)更新 u_k 和 ω_k , 每迭代完一次 $k=1:K$ 之后, 根据式(8)更新 λ , 重复以上循环, 直至满足式(9)时迭代结束。

$$\sum_k \left\| \hat{u}_k^{n+1} - \hat{u}_k^n \right\|_2^2 / \left\| \hat{u}_k^n \right\|_2^2 < e \quad (9)$$

VMD 算法将故障行波从时域转换到频域, 迭代求出频率区间以及中心频率, 再通过傅里叶逆变换将频域转换到时域, 最终得到模态分量, 这种行波信号分解方法突出了每段频率区域的局部特征, 使模态分量的变化趋势更为清晰, 且分解过程具有较强的鲁棒性^[19-20]。

1.3 VMD 分解特性及参数选取

为了体现 VMD 的分解能力, 选取多分量谐波信号, 向其中添加高斯噪声, 模拟输电线路发生故障时产生的故障行波, 多分量谐波信号波形如图 1。

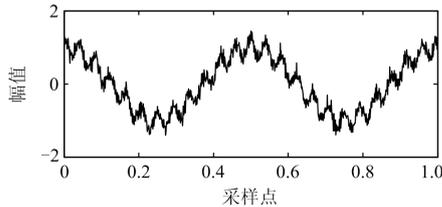
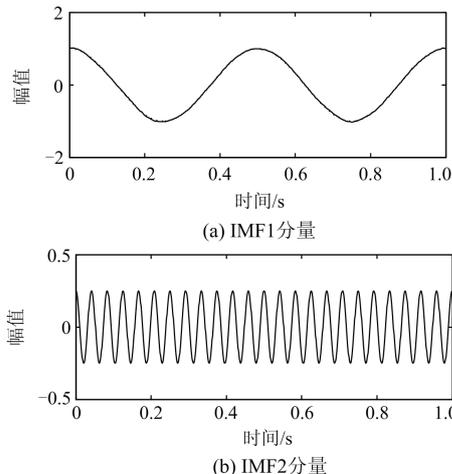


图 1 多分量谐波信号

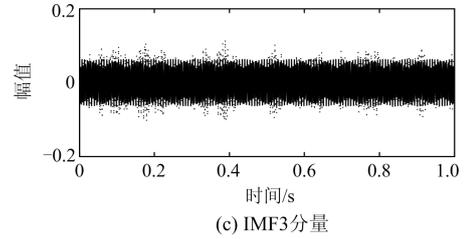
Fig. 1 Multicomponent harmonic signal

将该信号进行 VMD 分解, 设定分解模态个数为 $K=3$, 所得模态如图 2。



(a) IMF1分量

(b) IMF2分量



(c) IMF3分量

图 2 模态分量

Fig. 2 Modal components

由图 2 可知, IMF1 分量为低频分量, IMF2 分量为中频分量, IMF3 分量为高频分量, 当 $K=3$ 时, 模态分量频谱图如图 3 所示。

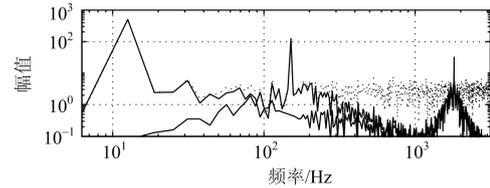
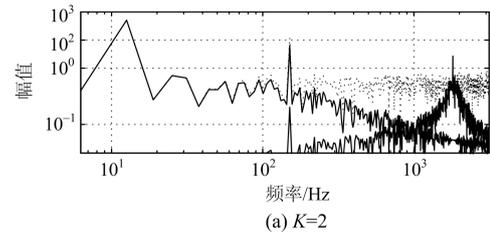


图 3 模态分量频谱图

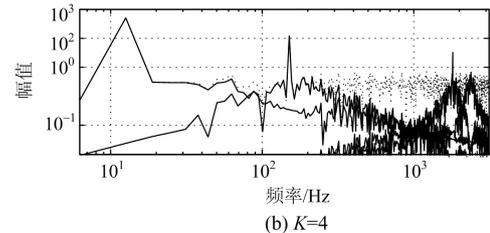
Fig. 3 Spectrum of modal components

图 3 中, 三个波峰依次为低频分量频谱、中频分量频谱与高频分量频谱, 噪声信号主要集中在高频部分。当 $K=3$ 时, 模态分量的中心频率间隔清晰, 各频带带宽适宜, 能够将噪声信号与低、中、高频分量清晰地分解。

当 $K=2$ 及 $K=4$ 时的模态分量频谱图如图 4 所示。



(a) $K=2$



(b) $K=4$

图 4 不同 K 值模态分量频谱图

Fig. 4 Spectrum of modal components with different K values

由图 4 可知: 当 $K=2$ 时, 图中只有低频分量、高频分量与噪声信号, 低频带与高频带之间间隔较大, 缺乏中频分量, 分解不彻底; 当 $K=4$ 时, 图中存在低频、中频以及两个高频分量、噪声信号, 低频与中频分量分解清晰, 两个高频分量带中心频

率相距太近, 分解效果模糊, 含有较多的噪声。

由以上可得, 分解模态量个数 K 过小, 会导致信号分解不完全, K 过大, 会导致高频分量分界模糊, 因此, 选取最佳模态量分解个数为 $K=3$ 。

2 故障行波的特征提取

2.1 广义 S 变换基本原理

S 变换由 Stockwell 首次提出, 通过对基本信号添加随频率变化的高斯窗进行傅里叶变换, 生成具有时频特性的 S 矩阵, 此矩阵可以体现不同频率下信号的幅值、相位变化信息^[21-22]。

定义信号 $x(t)$ 的 S 变换如下。

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \omega(\tau - t, f) e^{-j2\pi ft} dt \quad (10)$$

$$\omega(\tau - t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2}} \quad (11)$$

式中: τ 为控制高斯窗口在时间轴 t 上的参数; f 为频率; j 为复数单位。

由式(11)可以看出, 时窗宽度与频率为反向变化关系, 随着频率 f 的增大, 时窗宽度变窄, 随着频率 f 的减小, 时窗宽度变宽。通过 S 变换的信号低频段时窗较宽, 高频段时窗较窄。

为了进一步调整 S 变换中的时频分辨率, 提出广义 S 变换, 在高斯窗口函数中引入调节因子 $g(g > 0)$, 则广义 S 变换窗口函数为

$$\omega(\tau - t, f) = \frac{|f|}{g\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2g^2}} \quad (12)$$

该窗口函数可以通过改变 g 值调节广义 S 变换的时频分辨率, 则广义 S 变换为

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{|f|}{g\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(\tau-t)^2}{2g^2}} e^{-j2\pi ft} dt \quad (13)$$

当 $g=1$ 时, 为 S 变换; 当 $0 < g < 1$ 时, 广义 S 变换时间分辨率较高, 可以检测突变点; 当 $g > 1$ 时, 广义 S 变换频率分辨率较高, 可以生成更清晰的高频信号。

2.2 离散信号的广义 S 变换

定义信号 $x(t)$ 的离散采样向量为 $x[iT]$, 则 $x[iT]$ 的离散傅里叶变换为

$$X\left[\frac{n}{NT}\right] = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x[iT] e^{-\frac{j2\pi ni}{N}} \quad (14)$$

式中: T 为采样时间间隔; N 为采样点数; $n=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

令式(13)中 $f = \frac{n}{NT}$, $\tau = kT$, 则 $x[iT]$ 的广义

S 变换为

$$\begin{cases} S\left[kT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} X\left[\frac{m+n}{NT}\right] e^{-\frac{2\pi^2 m^2 g^2}{n^2}} e^{\frac{j2\pi mk}{N}} & n \neq 0 \\ S[kT, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x\left(\frac{m}{NT}\right) & n = 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中, $k=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

将经过 VMD 模态分解所得离散模态量经过式(15)的广义 S 变换, 得到 S 矩阵, 该矩阵为复矩阵, 行代表频率分量随时间变化, 列代表在某一采样时间点不同频率的变化, 每一行的频率差为

$$\Delta f = \frac{f}{N} \quad (16)$$

f 为采样频率, 第一行为直流分量, 第 n 行频率为

$$f_n = \frac{f}{N} n \quad (17)$$

调节 g 值提高广义 S 变换的时间分辨率, 通过 S 矩阵中高频分量的变化识别突变点, 完成故障行波波头检测。

3 故障测距模型的建立

3.1 测距基本原理

采用双端行波故障测距法, 设 F 为故障点, t_M 、 t_N 分别为故障初始行波到达线路两端的时刻, d_M 、 d_N 分别为故障点距 M、N 端的距离, L 为线路全长, v 为行波传播速度, 故障测距原理图如图 5。

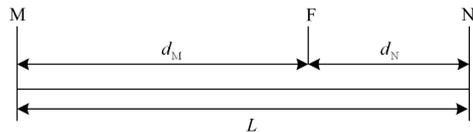


图 5 故障测距原理图

Fig. 5 Schematic diagram of fault location

当故障点 F 发生故障时, 故障行波向两侧母线 M 和 N 端传播, 记录下故障初始行波波头到达母线 M 的时间 t_M 和到达母线 N 的时间 t_N , 将其代入式(18)可计算故障距离为

$$\begin{cases} d_M = \frac{L + v(t_M - t_N)}{2} \\ d_N = \frac{L + v(t_N - t_M)}{2} \end{cases} \quad (18)$$

式(18)中对于行波波速 v 的选取应根据实际经验^[23-24], 在 $0.936c(11 \text{ kV}) \sim 0.987c(500 \text{ kV})$ 之间。

3.2 故障测距算法

建立 VMD 与广义 S 变换结合的高压直流输电线路双端行波法故障测距算法:

(1) 高压直流输电线路某一点发生故障, 并在该点产生故障行波沿线向两端传播, 由安装在变电站的高精度故障录波装置记录故障行波;

(2) 通过分析确定VMD分解模态量个数;

(3) 故障行波进行VMD分解, 生成 K 个模态分量, 选取其中一个模态分量 $u_k(n)$;

(4) 将模态分量 $u_k(n)$ 通过广义S变换处理, 获得高时间分辨率的S矩阵;

(5) 提取S矩阵中的高频分量, 识别其波形突变点, 确定故障初始行波到达时刻;

(6) 将故障初始行波到达线路两端时刻与行波波速代入故障测距公式(18)进行计算, 最终得到故障距离。

算法流程如图6所示。

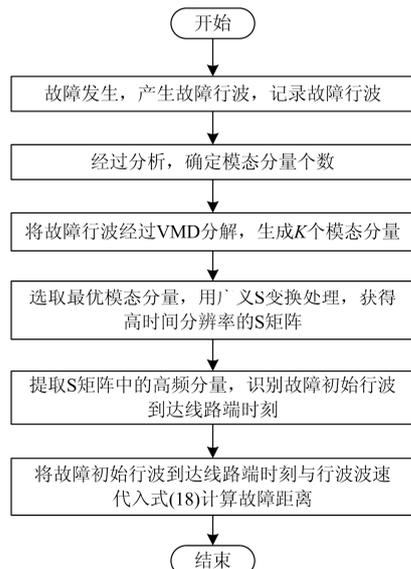


图6 故障测距算法流程图

Fig. 6 Flow chart of fault location algorithm

4 仿真研究及结果

4.1 仿真模型

利用电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC, 建立了一个 ± 500 kV 双极十二脉冲的高压直流输电模型, 如图7所示。该仿真模型电压等级为500 kV, 功率为1 000 MW, 分别在交流侧与直流侧设置滤波器与平波电抗器, 直流输电线路采用频率相关(相位)模型, 输电线路全长1 000 km, 采用4分裂钢芯铝绞线布置方式, 子导线间分裂间距为0.5 m。

4.2 故障仿真及结果分析

分别在距线路一端100 km、300 km、500 km、700 km、900 km处设置故障点, 并取多种接地电阻, 由于数据众多, 只选取距线路一端500 km处, 接地电阻为零时发生单极接地故障, 详细描述其求解

过程, 故障发生时刻为0.8 s, 采样频率为100 kHz。

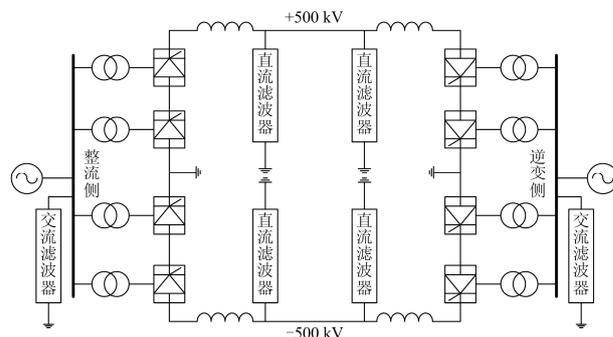


图7 ± 500 kV 直流输电仿真模型

Fig. 7 ± 500 kV HVDC simulation model

单极接地故障发生时, M端和N端的故障初始行波波形如图8所示, 取故障发生前5 ms与故障发生后5 ms的数据, 其中M端为整流侧, N端为逆变侧。

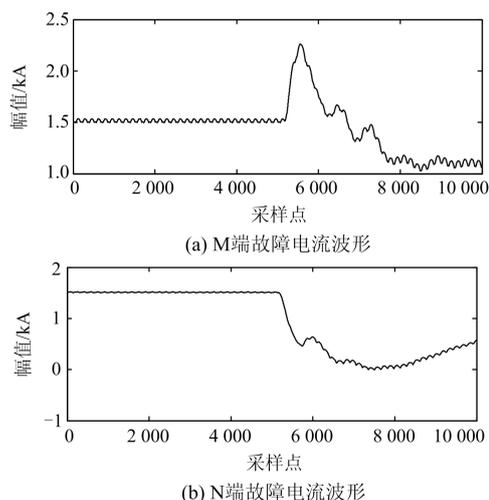
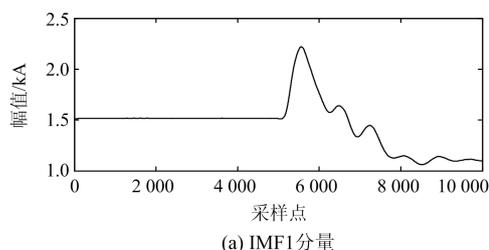


图8 故障行波时域信号

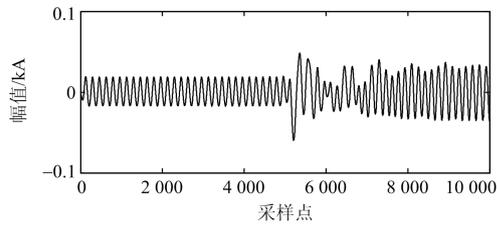
Fig. 8 Fault traveling wave time domain signal

将M、N端故障电流波形经VMD分解后的模态分量如图9、图10所示。

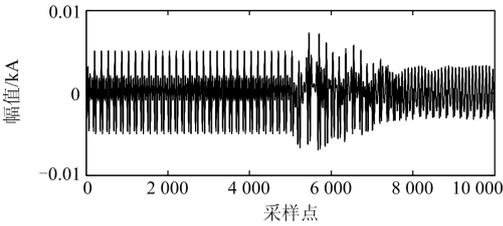
由图9和图10可以看出, M端和N端故障初始行波的IMF1分量最接近原始行波, 且噪声含量较其他模态分量少, 选取IMF1经过广义S变换来处理, 并令调节因子 $g=0.1$, 提高时间分辨率, 结果如图11、图12所示。



(a) IMF1分量



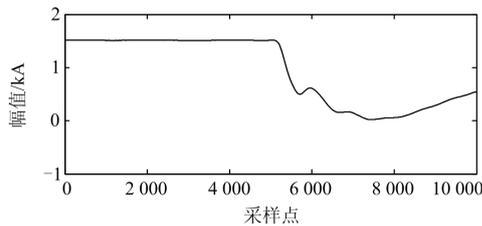
(b) IMF2分量



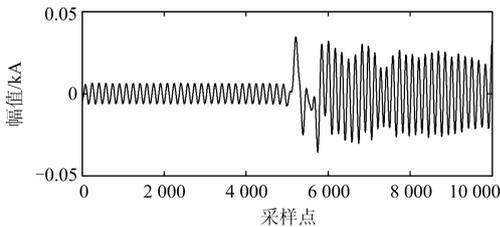
(c) IMF3分量

图 9 M 端故障行波模态分量

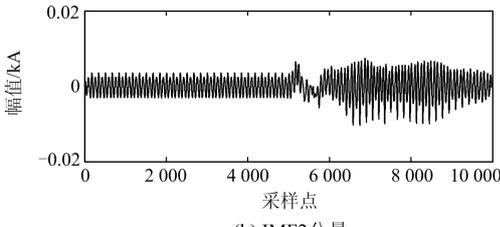
Fig. 9 M terminal fault traveling wave mode component



(a) IMF1分量



(b) IMF2分量



(b) IMF2分量

图 10 N 端故障行波模态分量

Fig. 10 N terminal fault traveling wave mode component

图 11 中的突变点为 5 169, 图 12 中的突变点为 5 170, 所建模型为 500 kV, 取波速 $v = 2.96 \times 10^5$ km/s, 将突变点检测结果与行波波速代入式(18), 计算其距离为

$$d_M = \frac{1000 + v((5169 - 5170) \times 10^{-5})}{2} = 498.52 \quad (19)$$

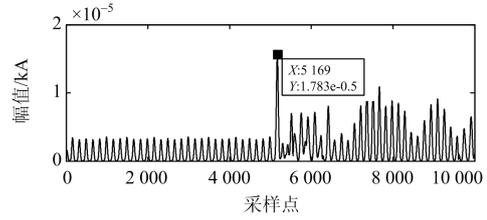


图 11 M 端 IMF1 分量瞬时能量谱

Fig. 11 Instantaneous energy spectrum of IMF1 component at M end

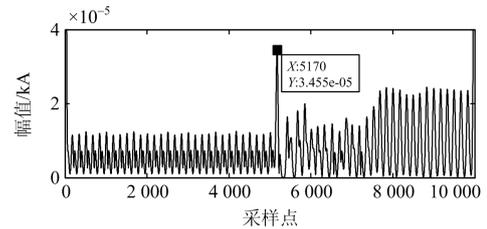
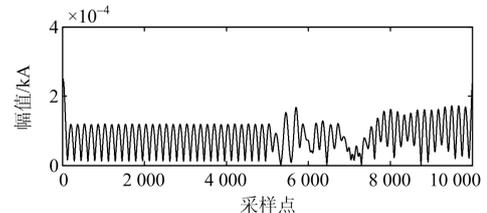


图 12 N 端 IMF1 分量瞬时能量谱

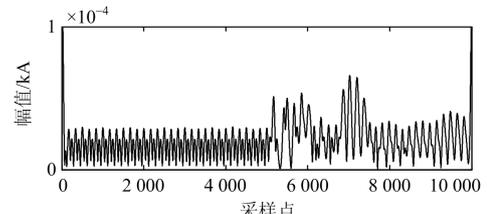
Fig. 12 Instantaneous energy spectrum of IMF1 component at N end

式中, $t_M - t_N = (5169 - 5170) \times 10^{-5}$, 表示初始行波到达 M 端与 N 端的时间差, 测得故障发生点距 M 端距离为 498.52 km, 相对误差为 0.1%, 测距结果比较理想, 可以满足实际工作需要。

对于图 9 与图 10 中的模态分量, 采用单纯 S 变换处理结果如图 13 所示。



(a) M端故障行波时频图



(b) N端故障行波时频图

图 13 单纯 S 变换处理结果

Fig. 13 Simple S-transform processing results

可见, 单纯 S 变换的时间分辨率不如广义 S 变换高, 对于处理同样的模态分量, S 变换的处理结果不如广义 S 变换处理结果清晰, 突变点的识别较为模糊, 经过以上对比可得, VMD 与广义 S 变换

结合的高压直流输电线路故障测距效果要比单纯 S 变换效果好。

为了验证本文方法的有效性,在不同故障距离、不同过渡电阻的情况下进行了仿真,测距结果如表 1 所示。由表 1 可知,本文所用测距方法不受过渡电阻影响,利用广义 S 变换测得故障初始行波分别到达整流侧和逆变侧的时间的比例与故障点距离整

流侧和逆变侧的距离的比例几乎一致,测得时间比较准确,并且测距结果显示位于线路中部区域的故障测距精度较高,误差几乎为零,而接近线路两端的区域测距结果由于传播距离过短,其误差比中部区域大一些,总体来看,输电线路全长范围内测距结果误差较小,具有一定的有效性,可以满足实际生产需要。

表 1 单极接地故障测距结果

Table 1 Results of single pole to ground fault location

| 故障位置/km | 过渡电阻/ Ω | 波头到达整流侧时刻/s | 波头到达逆变侧时刻/s | 测距结果/km | 绝对误差/km | 相对误差/% |
|---------|----------------|-------------|-------------|---------|---------|--------|
| 100 | 0 | 0.050 34 | 0.053 04 | 100.4 | 0.4 | 0.04 |
| | 100 | 0.050 34 | 0.053 04 | 100.4 | 0.4 | 0.04 |
| | 200 | 0.050 33 | 0.053 04 | 98.92 | 1.08 | 0.1 |
| | 300 | 0.050 34 | 0.053 04 | 100.4 | 0.4 | 0.04 |
| 300 | 0 | 0.051 02 | 0.052 37 | 300.20 | 0.2 | 0.02 |
| | 100 | 0.051 02 | 0.052 37 | 300.20 | 0.2 | 0.02 |
| | 200 | 0.051 02 | 0.052 37 | 300.20 | 0.2 | 0.02 |
| | 300 | 0.051 01 | 0.052 37 | 298.72 | 1.28 | 0.1 |
| 500 | 0 | 0.051 69 | 0.051 70 | 498.52 | 1.48 | 0.1 |
| | 100 | 0.051 70 | 0.051 70 | 500 | 0 | 0 |
| | 200 | 0.051 70 | 0.051 70 | 500 | 0 | 0 |
| | 300 | 0.051 70 | 0.051 70 | 500 | 0 | 0 |
| 700 | 0 | 0.052 37 | 0.051 02 | 699.80 | 0.2 | 0.02 |
| | 100 | 0.052 37 | 0.051 02 | 699.80 | 0.2 | 0.02 |
| | 200 | 0.052 37 | 0.051 02 | 699.80 | 0.2 | 0.02 |
| | 300 | 0.052 37 | 0.051 01 | 701.28 | 1.28 | 0.1 |
| 900 | 0 | 0.053 04 | 0.050 34 | 899.60 | 0.4 | 0.04 |
| | 100 | 0.053 04 | 0.050 34 | 899.60 | 0.4 | 0.04 |
| | 200 | 0.053 04 | 0.050 33 | 901.08 | 1.08 | 0.1 |
| | 300 | 0.053 04 | 0.050 34 | 899.60 | 0.4 | 0.04 |

4.3 方法对比

为了进一步突出本文方法的验证效果和准确性,选择与文献[6]与文献[16]中的方法进行对比,结果如图 14 所示。

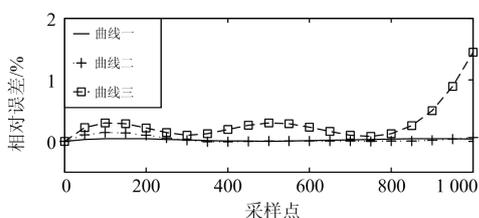


图 14 不同方法结果对比

Fig. 14 Results comparison of different methods

图 14 中,曲线一代表本文方法,曲线二代表文献[14]的方法,曲线三代表文献[6]的方法,纵横坐标分别为相对误差与故障距离,经计算得,本文方法平均相对误差为 0.0234%,曲线二的平均相对误

差为 0.0325%,曲线三的平均相对误差为 0.3096%,由图 14 以及误差结果可见,相比于文献[6]的方法,本文方法与文献[16]的方法定位精度更高,本文方法平均相对误差低于文献[16]方法的平均相对误差,定位效果稳定,具有一定的实际应用价值。

4.4 现场数据验证

为了验证本文方法的有效性,选择某 ± 500 kV 直流输电线路于 2017 年 4 月 9 日发生故障时的故障录波数据进行验证。

对整流侧与逆变侧的故障行波数据分别进行 VMD 分解与广义 S 变换处理,识别初始行波波头到达整流侧与逆变侧的时刻,通过式(18)进行计算,得到故障点与某一端的距离为 575.62 km,实际故障点与该端距离为 576.71 km,绝对误差为 1.09 km,相对误差为 0.09%,实验表明,本文方法具有一定的有效性与实用性。

5 结论

(1) 针对高压直流长距离输电线路故障测距中存在的波形难以分辨、行波波头识别精度不高等问题, 提出了 VMD 分解与广义 S 变换结合的直流输电线路故障测距思想, 建立了测距模型, 可以实现准确的故障测距。

(2) 利用 VMD 可以清晰有效地将故障波形进行模态分解, 避免了 EMD 存在的模态混叠现象, 分离效果优于 EMD 等方法, 基于广义 S 变换的时频分辨率可调特性, 提高广义 S 变换的时间分辨率, 处理 VMD 分解所得最优模态分量, 可以得到高时间分辨率的 S 矩阵, 更为准确地识别波形突变点, 提高了检测精度, 简单可靠, 易于实现。

(3) 大量 PSCAD/EMTDC 仿真表明, 本文所提方法在长距离直流输电线路故障测距中精度很高, 不受过渡电阻影响, 与其他文献的故障测距方法比较误差较小, 经过现场故障行波验证, 具有一定的有效性与实用性, 可以满足实际生产要求。

参考文献

- [1] 张怿宁, 郝洪民, 李京, 等. 脉冲注入法与单端故障行波法相结合的直流输电系统接地极线路故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 117-122.
ZHANG Yining, HAO Hongmin, LI Jing, et al. Fault location of HVDC grounding electrode lines based on combination of pulse injection method and single-ended fault travelling wave method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 117-122.
- [2] 杨林, 王宾, 董新洲. 高压直流输电线路故障测距研究综述[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(8): 185-191.
YANG Lin, WANG Bin, DONG Xinzhou. Summarize of fault location for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(8): 185-191.
- [3] 束洪春, 田鑫萃, 白冰, 等. 基于多测点的特高压长距离直流输电线路行波故障测距[J]. 高电压技术, 2014, 42(7): 2105-2113.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, BAI Bing, et al. Traveling wave fault location for long-distance UHVDC transmission line based on multi-point measurement[J]. High Voltage Engineering, 2014, 42(7): 2105-2113.
- [4] DING Jiali, WANG Xin, ZHENG Yihui, et al. Distributed traveling-wave-based fault-location algorithm embedded in multiterminal transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 3045-3054.
- [5] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.
- [6] 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. HVDC transmission lines fault location method based on distributed parameter model[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 75-80.
- [7] 程佩芬, 李崇涛, 傅闯, 等. 基于状态空间法的高压直流输电系统暂态简化模型的解析算法[J]. 电工技术学报, 2018, 34(6): 1230-1239.
CHENG Peifen, LI Chongtao, FU Chuang, et al. An analytical solution for simplified electromagnetic transient model of HVDC transmission system based on state space method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 34(6): 1230-1239.
- [8] LOPES F V. Settings-free traveling-wave-based earth fault location using unsynchronized two-terminal data[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 2296-2298.
- [9] 谢李为, 曾祥君, 柳祎璇. 基于 VMD-Hilbert 变换的故障行波定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 75-81.
XIE Liwei, ZENG Xiangjun, LIU Yixuan. Research on fault traveling wave location based on VMD-Hilbert transform[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 75-81.
- [10] BENATO R, SESSA S D, POLI M, et al. An online travelling wave fault location method for unearthed-operated high-voltage overhead line grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 2776-2785.
- [11] LIVANI H, EVRENOSOGLU C Y. A machine learning and wavelet-based fault location method for hybrid transmission lines[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1): 51-59.
- [12] LIANG Rui, LIU Chenglei, PENG Nan, et al. Fault location for power grid based on transient travelling wave data fusion via asynchronous voltage measurements[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2017, 93: 426-439.
- [13] 张希鹏, 邵能灵, 郑晓冬, 等. 基于 WEMTR 的柔性直流输电线路故障测距[J]. 电工技术学报, 2018, 34(3): 589-598.
ZHANG Xipeng, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Fault location in VSC-HVDC transmission lines based on WEMTR[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,

- 2018, 34(3): 589-598.
- [14] QI P, JOVANOVIĆ S, LEZAMA J, et al. Discrete wavelet transform optimal parameters estimation for arc fault detection in low-voltage residential power networks[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 143: 130-139.
- [15] 赵肖雪, 宋吉江, 杨建平, 等. 基于小波包和包络线的行波相关法单端故障测距研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(15): 98-103, 114.
ZHAO Xiaoxue, SONG Jijiang, YANG Jianping, et al. Single-terminal fault location based on wavelet packet and envelope traveling wave correlation[J]. Electrical Measurement Instrumentation, 2018, 55(15): 98-103, 114.
- [16] 段建东, 刘静, 陆海龙, 等. 基于行波瞬时频率的高压直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1842-1848.
DUAN Jiandong, LIU Jing, LU Hailong, et al. HVDC transmission lines fault location method based on traveling wave instantaneous frequency[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1842-1848.
- [17] 陈仕龙, 谢佳伟, 毕贵红, 等. 一种特高压直流输电线路神经网络双端故障测距新方法[J]. 电工技术学报, 2014, 42(16): 52-58.
CHEN Shilong, XIE Jiawei, BI Guihong, et al. A new two terminal fault location method for UHVDC transmission lines based on neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 42(16): 52-58.
- [18] 李志斌, 许云辉, 吴宝兴, 等. 基于 S 变换的行波法高压输电线路故障定位[J]. 电测与仪表, 2014, 51(1): 40-42.
LI Zhibin, XU Yunhui, WU Baoxing, et al. Fault location of high voltage transmission line based on S-transform traveling wave method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(1): 40-42.
- [19] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3): 531-544.
- [20] 高艳丰, 朱永利, 闫红艳, 等. 一种新型的输电线路双端行波故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 8-13.
GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. A new fault location method for two-terminal traveling wave of transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 8-13.
- [21] 张艳霞, 李多多, 张帅, 等. 基于广义 S 变换的高压直流输电线路边界保护[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3197-3206.
ZHANG Yanxia, LI Duoduo, ZHANG Shuai, et al. Boundary protection of HVDC transmission lines based on generalized S transform[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3197-3206.
- [22] 何连杰, 史常凯, 闫卓, 等. 基于广义 S 变换能量相对熵的小电流接地系统故障区段定位方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(8): 274-280.
HE Lianjie, SHI Changkai, YAN Zhuo, et al. A fault section location method for small current neutral grounding system based on energy relative entropy of generalized S-transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 274-280.
- [23] 崔浩, 王丰华, 穆卡, 等. 基于实际波速的多端输电线路行波故障测距方法[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(2): 74-79.
CUI Hao, WANG Fenghua, MU Ka, et al. Traveling wave fault location method for multiplex transmission lines based on actual wave velocity[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(2): 74-79.
- [24] 宁一, 王大志, 江雪晨, 等. 基于零模行波波速特性的配电网单相接地故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(增刊): 93-98.
NING Yi, WANG Dazhi, JIANG Xuechen, et al. Distribution network single-phase-to-ground fault location method based on zero-mode traveling wave velocity characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(S): 93-98.

收稿日期: 2019-04-22; 修回日期: 2019-07-28

作者简介:

付 华(1962—), 女, 博士(后), 教授, 研究方向为电力系统故障诊断; E-mail: fxfuhua@163.com

吴 赛(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障诊断。E-mail: 2992268711@qq.com

(编辑 许 威)