

基于参数优化 VMD 和 TET 的柔直线路单端故障测距方法

池梓斌^{1,2}, 夏成军^{1,2}, 杨明嘉^{1,2}

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东省新能源电力系统智能运行与控制
企业重点实验室, 广东 广州 510663)

摘要: 单端行波故障测距方法在考虑频变波速影响时需要提取故障行波时频域特征, 但现有方法存在时频分辨率较低、波头识别困难和波速计算不准确的问题。为此, 提出一种基于参数优化变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)和瞬态提取变换(transient extraction transform, TET)的单端故障定位方法。首先, 利用麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)优化 VMD 参数, 提取含有故障特征的高频模态分量。然后, 对该模态分量进行瞬态提取变换, 通过去除短时傅里叶变换中模糊的时频能量, 保留与信号瞬态特征密切相关的时频信息, 得到故障行波时频域全波形。最后, 在故障行波全波形中提取主频分量并标定初始波头与第二反射波头, 通过计算主频分量下的波速度, 结合行波定位方法实现单端故障测距。在 PSCAD/EMTDC 中搭建四端柔性直流电网的仿真结果表明, 所提算法对过渡电阻和噪声具有较强的耐受性, 即使在较低采样率下也能实现准确的故障定位。

关键词: 柔性直流输电; 单端故障测距; 频变波速; 变分模态分解; 时频分析

Single-end fault location method for MMC-HVDC transmission lines based on parameter-optimized VMD and TET

CHI Zibin^{1,2}, XIA Chengjun^{1,2}, YANG Mingjia^{1,2}

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Province New Energy Power System Intelligent Operation and Control Enterprise Key Laboratory, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The single-ended traveling wave fault location method needs to extract the time-frequency domain characteristics of the fault traveling wave when considering the influence of frequency-dependent wave velocity. However, existing methods have low time-frequency resolution, difficulty in identifying the wave head, and inaccurate calculation of wave speed. Therefore, a single-ended fault location method based on parameter-optimized variational mode decomposition (VMD) and transient extraction transform (TET) is proposed. First, the VMD parameters are optimized using the sparrow search algorithm (SSA) to extract the high-frequency modal components containing fault features. Then, a time-frequency analysis method based on transient extraction transform is proposed. This removes the ambiguous time-frequency energy in the short-time Fourier transform and only retains the time-frequency information closely related to the transient characteristics of the signal, accurately extracting the time-frequency characteristics of the fault traveling wave. Finally, this paper extracts the main frequency component of the fault traveling wave full waveform and calibrates the initial wavehead and the second reflected wavehead, and calculates the wave velocity under the main frequency component, so as to realize the single-ended fault location. The simulation results of a four-terminal flexible DC grid built in PSCAD/EMTDC show that the proposed algorithm has strong tolerance to transition resistance and noise, and can achieve accurate fault location even at low sampling rates.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2022YFB2403500).

Key words: MMC-HVDC; single-ended fault location; frequency-variable wave speed; variational mode decomposition; time-frequency analysis

0 引言

柔性直流输电技术凭借其有功无功独立解耦、

可向弱系统甚至无源系统提供电压支撑等优点, 广泛应用于新能源并网、多区域电网互联等场景^[1-4]。由于输电电能距离较远, 受恶劣气候环境影响等问题, 直流输电线路发生故障概率较高, 精确的故障定位是快速清除线路故障、减少巡线工作量、提高

供电可靠性的关键^[5-7]。

在线路发生故障后,故障信息以行波的形式在电网中传播,文献[8-10]分析了柔直线路发生故障后初始阶段的传播特性,各换流站子模块电容会立即向故障点馈入短路电流,故障电流上升速度快、幅值大。以张北工程为例,要求在短路发生后 6 ms 内完成故障清除^[11],基于行波法的保护与测距原理可以满足速动性的要求,因此在实际工程中得到了广泛应用。行波测距法主要分为单端法和双端法,单端法无需时钟同步及双端通信,相较于双端法建设成本更低,得到了广泛研究^[12]。单端法的定位精度主要受波头标定和波速整定的影响。针对故障波头标定,现有研究主要采用小波变换、数学形态法、模态分解法对奇异信号进行检测。文献[13]通过检测故障行波电流信号的小波变换模极大值进行波头标定;文献[14]采用集成经验模态分解算法滤除低频分量,对分解后的信号使用 Teager 算子进行波头标定;文献[15]则采用变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)算法提取故障分量,有效抑制了模态混叠、端点效应等问题。上述方法都是采用信号分解算法提取局部突变特征进行标定,但信号分解结果受参数选择、基函数选取等人为因素影响,算法自适应性较差。此外,线路的趋肤效应和频变特性会影响波速,仅靠时域量信息进行故障定位,误差较大。

考虑到故障行波具有连续频谱的特性,波速与频率相关,因此综合利用故障行波时频域特征进行故障定位是解决上述问题的一种有效思路。文献[16]采用故障信号频谱峰值对应的频率作为主频分量进行波速整定,但当信号存在噪声分量时容易造成主频混叠;文献[17]提出变分模态分解-同步挤压变换(synchrosqueezing wavelet transform, SWT)联合算法,通过重组小波变换后的时频图获得较高频率精度的时频曲线;在此基础上,文献[18]采用多重同步挤压小波变换(multi-synchrosqueezing transform, MSST)提高了频率识别的精度,但该算法只能提取行波最高频率分量进行波速整定,误差较大;文献[19-20]基于 Wigner-Ville 分布(wigner-ville distribution, WVD)对信号进行时频分析,提取了故障行波全波形,但其结果受测不准定理限制,时间分辨率较低,无法同时标定行波到达时刻及其频率。

针对现有研究存在的故障时频特征难以准确提取、频变波速无法准确计算的问题,本文提出了一种基于参数优化的 VMD 和瞬态提取变换(transient extraction transform, TET)的柔直线路单端测距方法。首先,分析故障行波的传播特性,得到柔直线路故障电压行波解析表达式。然后,利用麻雀搜索算法优

化的 VMD 对故障行波信号进行分解,获得波形突变明显的故障特征分量。对该特征分量进行瞬态提取变换,得到故障时频域全景波形。根据 TET 结果提取故障行波主频分量,准确标定初始波头与第二反射波头,实现较高精度的单端行波故障测距。最后,通过大量仿真验证本文测距方案的有效性。

1 故障行波特征分析

1.1 柔直线路故障行波传播特性分析

MMC 换流器直流侧短路故障发展过程分为 3 个阶段:(1)闭锁前子模块电容放电阶段;(2)闭锁后桥臂电抗器续流阶段;(3)三相不控整流阶段^[8]。研究故障行波传播特征主要针对子模块放电阶段,利用故障分量网络法进行分析。该阶段下换流器的等值阻抗为

$$Z_m = sL_{eq} + R_{eq} + 1/sC_{eq} \quad (1)$$

式中, R_{eq} 、 L_{eq} 、 C_{eq} 分别为换流器等效电阻、电感与电容。其中, $R_{eq} = 2R_{arm}/3$, R_{arm} 为桥臂电阻; $L_{eq} = 2L_{arm}/3$, L_{arm} 为桥臂电抗; $C_{eq} = 6C_{sm}/N$, C_{sm} 为子模块电容, N 为该阶段中投入的子模块个数。

由于两极线路间存在电气量耦合关系,利用 KarenBauer 变换将正负极电气量转换为线模、零模电气量,如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_p \\ a_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: a_p 、 a_n 分别为正负极电气量; a_1 、 a_0 分别为线模和零模电气量。

图 1 为 ± 200 kV 四端柔直电网, L_{ij} 表示 i 、 j 站之间的限流电抗器, M_{ij} 表示行波测量装置, i 、 $j = A$ 、 B 、 C 、 D 。图 1 中 F_1 处发生正极接地故障时,其故障点线模网络如图 2 所示。图 2 中: U_{f1} 为故障点线模电压; U_f 为故障激励源电压; U_{M1} 为行波量测装置处的监测点电压; R_f 为故障电阻; Z_{c1} 为线模波阻抗。

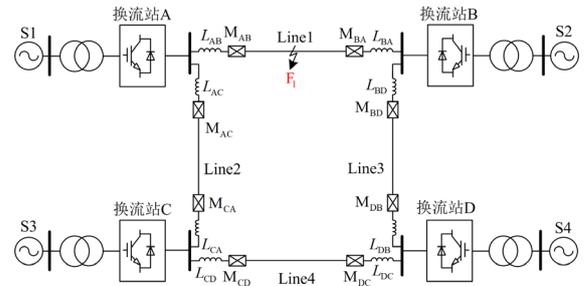


图 1 四端柔直电网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the four-terminal MMC-HVDC grid

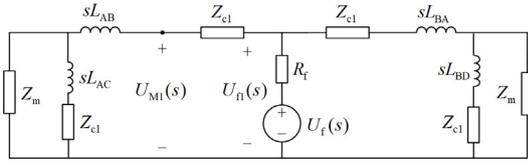


图2 线模故障分量网络

Fig. 2 Line-mode fault component network

正极接地故障的边界条件为

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

式中: U_{fp} 为正极故障点电压; I_{fp} 、 I_{fn} 分别为正极、负极故障电流。故障点电压和电流的关系式为

$$\begin{cases} I_{f1}(s) = -\frac{U_{f1}(s)}{Z_{F1}(s)} \\ I_{f0}(s) = -\frac{U_{f0}(s)}{Z_{F0}(s)} \end{cases} \quad (4)$$

式中: I_{f1} 和 I_{f0} 分别为故障点的线模和零模电流; Z_{F1} 和 Z_{F0} 分别为从故障点看入的线模和零模等效阻抗。

联立式(2)一式(4)可得故障点线模电压 U_{f1} 为

$$U_{f1}(s) = \frac{\sqrt{2}U_f(s)Z_{F1}(s)}{Z_{F1}(s) + Z_{F0}(s) + 2R_f} \quad (5)$$

故障发生后, U_{f1} 沿线路向两端传播。测量装置 M_{AB} 检测到的首行波为入射波与反射波的叠加, 其表达式为

$$U_{M1}^{(1)}(s) = (1 + \beta_m)e^{-\gamma_1(s)d}U_{f1}(s) \quad (6)$$

式中: β_m 为测量端母线的反射系数, $\beta_m = (Z_{eq} + sL_{AB} - Z_{c1}) / (Z_{eq} + sL_{AB} + Z_{c1})$, $Z_{eq} = (sL_{AB} + Z_{c1}) // Z_m$; d 为故障距离; $\gamma_1(s)$ 为线路的传输系数^[10]。

入射波经过反射后继续向故障点传播, 则故障点处的电压为

$$U_{f1}^{(2)} = (e^{-\gamma_1(s)d})^2 U_{f1}(s) \beta_m (1 + \beta_f) = (e^{-\gamma_1(s)d})^2 U_{f1}(s) \beta_m \alpha_f \quad (7)$$

式中: β_f 为故障点的反射系数, $\beta_f = -Z_{F1} / (Z_{F1} + Z_{F0} + 2R_f)$; α_f 为故障点折射系数, $\alpha_f = 1 + \beta_f$ 。

电压行波将在故障点和线路端口之间发生折射和反射。若故障点位于线路前半段, 则监测点处测得的第二行波为来自故障点的反射波, 其表达式为

$$U_{M1}^{(2)} = (e^{-\gamma_1(s)d})^3 U_{f1}(s) (1 + \beta_m) \beta_m \beta_f \quad (8)$$

若故障点位于线路后半段, 则监测点处测得的第二行波为来自对端线路的反射波, 其表达式为

$$U_{M1}^{(2)} = (e^{-\gamma_1(s)d})^3 U_{f1}(s) (1 + \beta_m) \beta_m \alpha_f \quad (9)$$

由上述推导可知, 故障点折射系数 $\alpha_f > 0$ 、反射系数 $\beta_f < 0$, 故障点的折射波与反射波极性相反, 因此可以通过检测处的前 2 个波头极性判断故障点位于线路的位置。

1.2 故障行波全波形

F_1 处发生正极接地故障时, 由 M 端测量装置得到的线模电压行波波头如图 3 所示。从时域角度分析, 故障暂态行波是由初始行波及后续折反射行波按照一定的时序叠加构成, 其中包含了故障发生时间、行波浪涌幅值、波头极性等信息。从频域角度看, 故障行波具有连续频谱, 沿线路传播时会受到色散效应影响, 其不同频率分量信号在传播过程中的信号畸变和衰减程度均不相同, 且线路的基本参数也会随着频率的变化而变化。因此在利用行波法进行故障定位时须综合考虑信号的时频域信息。

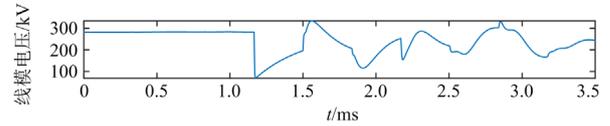


图3 线模电压行波

Fig. 3 Traveling wave of line-mode voltage

利用时频分析方法(如连续小波变换)处理图 3 的时域波形, 得到的故障行波时频域全景波形如图 4 所示。与简单的时域波形相比, 全景波形反映了行波在时频域上的多尺度特征, 提供了更丰富的故障信息, 包括行波浪涌频谱成分、特征频带幅值等。对多尺度故障信息进行综合分析, 有利于构建更可靠的故障保护和定位方案^[21]。但是传统的时频分析方法在提取和利用行波时频信息时, 存在以下问题。

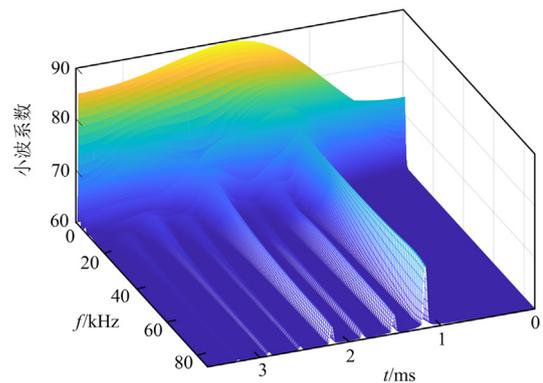


图4 故障行波时频域全景波形

Fig. 4 Time-frequency domain panoramic waveforms of traveling wave

1) 高频信号传播速度快、波形奇异性高, 故障特征大都集中于高频段。但对全频带信号进行时频

分析时,受信号不确定性原理的限制,高频信号的频率分辨率较低。

2) 小波变换类算法在高频段有更高的时间分辨率,但时频能量仍没有集中在突变点处,难以准确标定行波到达时刻,这将影响利用全波形进行单端故障测距时的精度。

对于传统时频分析方法存在的上述问题,如果能对故障行波信号进行分解,提取含故障特征的高频分量,并使时频能量聚集在突变点附近,则可以提高全景波形的时频分辨率,进而提高故障定位方法的准确度。

2 故障特征信号提取

2.1 变分模态分解

变分模态分解是一种非平稳信号自适应分解方法,可将故障行波电压信号分解成多个内涵模态分量(intrinsic mode function, IMF),每个 IMF 子信号均有独立的中心频率,且分量信号间互不相关^[22-23]。VMD 算法的本质是构造一个受约束的变分模型,在每个模态分量中心频率带宽之和最小的条件下确定每个模态分量及其对应的中心频率。对故障行波信号 $f(t)$ 进行分解,其变分约束模型为

$$\begin{cases} \min_{\{u_k\}, \{\omega_k\}} \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \\ \text{s.t.} \sum_k u_k(t) = f(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\delta(t)$ 为狄拉克函数; “*” 表示卷积运算; u_k 为分解得到的第 k 个 IMF 分量信号, $\{u_k\} = \{u_1, u_2, \dots, u_k\}$; ω_k 为第 k 个 IMF 分量的中心频率, $\{\omega_k\} = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k\}$ 。

引入二次惩罚因子 α 和拉格朗日乘法算子 λ 解决式(10)中的约束问题,得到其增广表达式为

$$\begin{aligned} L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \{\lambda\}) = & \alpha \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \\ & \left\| f(t) - \sum_k u_k(t) \right\|_2^2 + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_k u_k(t) \right\rangle \end{aligned} \quad (11)$$

利用交替方向乘子法求解式(11)的非约束问题,通过迭代计算找到增广表达式的鞍点,可得到最优模态分量及其对应的中心频率。

2.2 麻雀搜索算法

VMD 算法的分解结果与模态分量个数 K 、二次惩罚因子 α 密切相关。若参数选择不当,则产生模态混叠、额外的虚假分量等问题。当存在噪声时,模态分量中的波形突变可能被掩盖,不利于对其进行波头标定。为改进这一问题,本文利用麻雀搜索

算法,选择合适的适应度函数对 VMD 算法的参数进行优化。麻雀搜索算法是一种基于麻雀觅食行为的启发式群优化算法,它按个体适应度值将群体分为发现者、跟随者和警戒者,通过模拟麻雀群体觅食过程中信息交换和栖息地优化的行为,迭代搜索最优适应度解^[24]。如文献[25]展示了麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)的具体寻优过程,本文不再详细描述,主要介绍适应度函数的选取原则。

2.2.1 样本熵

样本熵(sample entropy, SE)是一种用于衡量时间序列复杂性的指标,该指标根据序列中的重复情况来评估其复杂度^[26]。序列的复杂度与信号噪声成分的含量成正比,即噪声越多、序列越复杂、样本熵越大。因此,在分解故障行波信号时,应尽量降低故障特征信号的样本熵,减小噪声干扰。长度为 N 的时间序列 $x(x = \{x(1), x(2), \dots, x(N)\})$ 样本熵的计算过程如下。

1) 将序列 x 按顺序重构为多个 m 维序列,其中第 $i(i = 1, 2, \dots, N - m + 1)$ 个序列 $X(i)$ 表示为

$$X(i) = \{x(i), x(i+1), \dots, x(i+m-1)\} \quad (12)$$

2) 计算 $X(i)$ 与其余序列 $X(k)(k = 1, 2, \dots, N - m + 1, \text{且} k \neq i)$ 对应元素的最大差值 $d_{\max}(X(i), X(k))$;

3) 给定阈值 r , 统计 $d_{\max}(X(i), X(k))$ 中小于 r 的个数,计算其在差值总数中的占比,记为 $B_i^m(r)$;

4) 对所有 $B_i^m(r)$ 取平均值,得到 $B^m(r)$;

$$B^m(r) = \frac{1}{N - m + 1} \sum_{i=1}^{N-m+1} B_i^m(r) \quad (13)$$

5) 将维数增加至 $m+1$, 重复步骤 1)~步骤 4), 得到 $B^{m+1}(r)$;

6) 则该信号的样本熵 E_{samp} 如式(14)所示。

$$E_{\text{samp}} = -\ln \frac{B^{m+1}(r)}{B^m(r)} \quad (14)$$

2.2.2 峭度值

信号的峭度值是一种评估信号波形的指标,用于衡量信号的尖峰或扁平程度。较高的峭度值表示信号具有更尖峭的波峰,而峭度值较低表示信号更加扁平。峭度值 q 的计算公式为

$$q = \frac{E(s - \mu)^4}{\sigma^4} \quad (15)$$

式中: s 为待测信号; μ 为该信号的均值; σ 为信号的标准差; E 为数学期望。

正常信号接近正态分布,其峭度值约为 3。在分解故障行波信号时,希望得到峭度值大于 3 的非平稳模态分量,使其波形突变更加明显,更有利于

对故障行波进行波头标定。

2.3 基于 SSA 优化的 VMD

为了使 VMD 结果拥有明显的波形突变, 同时降低噪声的影响, 本文考虑采用样本熵和峭度值作为适应度函数。具体的适应度函数计算如式(16)所示。

$$f_i = \min_k E_{\text{samp}k} / |q_k - 3| \quad (16)$$

式中: f_i 表示第 i 个个体的适应度; $E_{\text{samp}k}$ 为第 k 个分量信号的样本熵; q_k 为第 k 个分量信号的峭度值。根据麻雀位置参数对信号进行 VMD 后, 计算各个模态分量 $E_{\text{samp}k}$ 与 $|q_k - 3|$ 的比值, 选取最小值作为当前个体的适应度。基于 SSA 优化的 VMD 具体步骤如下。

- 1) 初始化 SSA 参数, 设定 K 、 α 的搜索范围。在搜索范围内随机生成初始群体。
- 2) 按当前位置参数进行 VMD, 并根据式(16)计算各麻雀个体的适应度。
- 3) 按适应度对种群进行排序, 更新当前最小、最大适应度值及对应的位置参数。
- 4) 更新发现者、跟随者、警戒者的个体位置。
- 5) 重复步骤 2)~步骤 4), 不断更新最佳麻雀位置, 直到达到最大迭代次数。输出最小适应度值及其对应的最优参数 K_{op} 、 α_{op} 。对应最小适应度值的 IMF 分量即目标故障特征分量。

3 考虑故障行波时频特征的单端测距方法

3.1 瞬态提取变换

瞬态提取变换是文献[27]提出的一种时频分析方法, 可用于提取突变信号的瞬态特征^[27]。TET 方法基于短时傅里叶变换(short-time fourier transform, STFT), 短时傅里叶变换表达式为

$$G(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(\tau - t) s(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (17)$$

式中: $G(t, \omega)$ 为短时傅里叶变换的输出; $g(\tau - t)$ 为窗函数; ω 为角频率。

瞬态特征信号往往发生在非常短的时间内, 通常使用狄拉克函数 $\delta(t)$ 对其进行理想代替。因此瞬态特征信号 $s_\delta(t)$ 可表示为

$$s_\delta(t) = M \delta(t - t_0) \quad (18)$$

式中, M 表示 t_0 时刻的信号幅值。

将式(18)代入式(17), 则 $\delta(t)$ 的 STFT 可表示为

$$G(t, \omega) = Mg(t_0 - t) e^{-j\omega t_0} \quad (19)$$

由于 $|e^{-j\omega t_0}| = 1$, 因此 $\delta(t)$ 的时频能量分布可以表示为

$$|G(t, \omega)| = Mg(t_0 - t) \quad (20)$$

由于窗函数存在时间偏移, $|G(t, \omega)|$ 的时频能

量聚集在 t_0 附近, 并在处取得极大值 $Mg(0)$ 。因此, 其时频能量在 $[t_0 - \Delta t, t_0 + \Delta t]$ (Δt 为窗函数的时间偏移)内分散。

为了解决这个问题, 从群延迟(group delay, GD)的角度对突变信号进行分析。群延迟表示信号在通过系统时不同频率成分之间相位的差异, $\delta(t)$ 的 STFT 是由一系列群延迟为 t_0 的 $\delta(t)$ 构成的。根据群延迟的定义, 求 $G(t, \omega)$ 对频率的偏导数:

$$G_\omega(t, \omega) = \frac{\partial}{\partial \omega} [Mg(t_0 - t) e^{-j\omega t_0}] = \quad (21)$$

$$-jt_0 Mg(t_0 - t) e^{-j\omega t_0} = -jt_0 G(t, \omega)$$

若 $G(t, \omega) \neq 0$, 则群延迟 $t_0(t, \omega)$ 的表达式为

$$t_0(t, \omega) = j \frac{G_\omega(t, \omega)}{G(t, \omega)} = \begin{cases} t_0, t \in [t_0 - \Delta t, t_0 + \Delta t] \\ 0, \text{else} \end{cases} \quad (22)$$

由式(22)可知, 在 $[t_0 - \Delta t, t_0 + \Delta t]$ 内, 所有 GD 的值都与 t_0 相同, 这导致 STFT 时频能量在 t_0 邻域内发生扩散。因此可以去除 t_0 邻域内模糊的时频系数, 仅保留 t_0 处的时频系数。因此, 定义瞬态提取函数 $F(t, \omega)$ 为

$$F(t, \omega) = \delta(t - t_0(t, \omega)) \quad (23)$$

$F(t, \omega)$ 的作用是重新分配信号 STFT 的扩散能量, 使得群延迟只在 $t = t_0$ 时提取时频系数。因此, 信号的瞬态提取变换 $T(t, \omega)$ 的表达式为

$$T(t, \omega) = G(t, \omega) F(t, \omega) \quad (24)$$

TET 的时频能量分布为

$$\begin{aligned} |T(t, \omega)| &= |G(t, \omega) F(t, \omega)| = \\ &= |Mg(t_0 - t) e^{-j\omega t_0} \delta(t - t_0(t, \omega))| = \\ &= |Mg(0) e^{-j\omega t_0} \delta(t - t_0)| = \\ &= Mg(0) \delta(t - t_0) \end{aligned} \quad (25)$$

对比式(25)和式(20)可知, TET 的时频能量高度集中并且仅存在于 t_0 时刻, 邻域内分散的时频能量消失, 且与 $\delta(t)$ 具有相同的时间位置。因此 TET 可以准确定位瞬态信号发生的时间并分析其频率组成。

3.2 行波主频分量的提取与波速计算

为了提高单端定位方法的准确性, 需要准确计算波头对应的瞬时频率。但由于不确定性原理的限制, 只能在一定频段内观测信号, 难以准确提取瞬时频率。为此, 可以预先选择一个适当的频率, 利用该频率进行波头标定, 并计算该频率下的波速进行测距。可以选取行波全景波形的主频分量对该瞬时频率进行代替^[28]。根据能量和最大原则, 计算瞬态提取变换的主频分量。TET 的时频系数幅值矩阵

T 的表达式为

$$T = |T(t, \omega)| = \begin{bmatrix} |T_{11}| & |T_{12}| & \cdots & |T_{1n}| \\ |T_{21}| & |T_{22}| & \cdots & |T_{2n}| \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ |T_{m1}| & |T_{m2}| & \cdots & |T_{mn}| \end{bmatrix} \quad (26)$$

该矩阵为 m 行 n 列的实矩阵, 表示该信号在频域上被划分为 m 个频带, 在时域上按采样间隔划分为 n 个时段。求解 T 的无穷范数, 无穷范数所在行对应频带即所求主频分量。

$$f_D = \arg \max_{f_i} (\|T\|_{\infty}) \quad (27)$$

求得主频分量后, 计算该频率下的行波传播速度。频变参数模型下的行波传播速度 $v(\omega)$ 为^[29]

$$v(\omega) = \omega / \beta(\omega) \quad (28)$$

$$\beta(\omega) = \{[(R(\omega)G(\omega) + \omega^2 L(\omega)C(\omega))^2 + \omega^2 (L(\omega)G(\omega) - R(\omega)C(\omega))^2]^{1/2} - (R(\omega)G(\omega) - \omega^2 L(\omega)C(\omega))\}^{1/2} / \sqrt{2} \quad (29)$$

式中: ω 为频率; $\beta(\omega)$ 为频变衰减系数; $R(\omega)$ 、 $G(\omega)$ 、 $L(\omega)$ 、 $C(\omega)$ 均为线路频变参数。

通过式(28)、式(29)计算不同频率下线模分量和零模分量的行波传播速度, 结果如图 5 所示。图 5 中, v_0 为零模分量, v_1 为线模分量, 其中零模分量波速度随频率变化剧烈, 一般用线模分量进行故障定位。

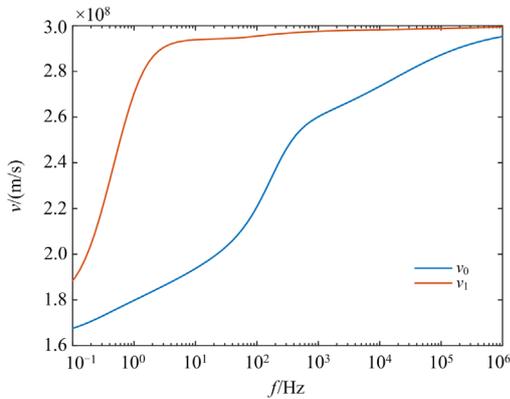


图 5 波速随频率变化的函数关系

Fig. 5 Relationship between wave speed and frequency

3.3 测距方法

在进行故障测距前, 需要先通过保护装置判定故障区域。通常在每条线路两端加装限流电抗器来抑制故障后暂态电流上升速度, 并作为保护区域的边界。故障行波传播到直流线路边界处的限流电抗器时, 其高频分量将会被阻隔, 使得区内故障的电压行波呈现陡峭的波头, 而区外故障行波波头则较为平缓, 因此可以根据此特性判断区内和区外故障。

一般采用小波变换模极大值来定量描述行波波头的陡峭程度, 具体方案及整定原则参考文献[30]。判断故障线路后, 启动故障测距流程, 如图 6 所示, 其步骤如下。

1) 读取故障线路一端量测装置记录的正、负极电压行波 U_p 、 U_n 。

2) 利用式(2)所示的 KarenBauer 变换提取故障电压线模分量 U_1 。

3) 对线模电压 U_1 进行 2.3 节所述的参数优化 VMD, 并选择样本熵与峭度值比值最小的 IMF 分量作为待测信号。

4) 对待测信号进行瞬态提取变换。由式(27)提取其主频分量并根据波速随频率变化的函数关系, 并确定该频率下的波速 v 。

5) 将瞬态变换结果 T 进行时域重构, 观察该时域信号波头的极性, 若前两个波头极性相反, 则故障点位于线路前半部分; 若前两个波头极性相同, 故障点位于线路后半部分。

6) 沿主频分量所在行对 T 进行搜索, 找到极大值点, 该点对应时刻即为突变发生时刻。假设第一个极大值点对应时刻为 t_1 , 第二个极大值点对应时刻为 t_2 , 则故障距离 d 为

$$d = \begin{cases} (t_2 - t_1)v/2, & d \leq l/2 \\ l - (t_2 - t_1)v/2, & d > l/2 \end{cases} \quad (30)$$

式中, l 为线路长度。

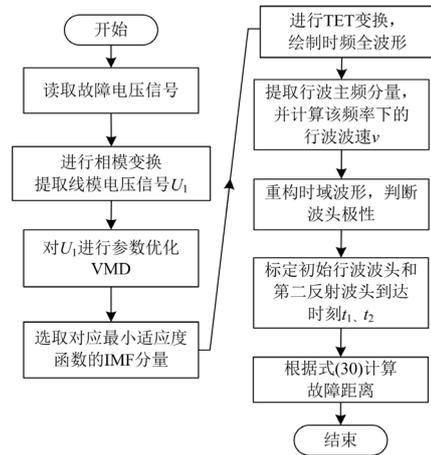


图 6 行波故障测距流程图

Fig. 6 Flow chart of traveling wave fault location method

4 仿真验证

4.1 故障仿真分析

为验证本文所提测距方法的有效性, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了图 1 所示的直流电网, 其系统参数如表 1 所示, 线路参数参考文献[31]。设置 1 ms

时线路 1 处发生单极接地故障, 利用 M_{AB} 测得的数据进行单端故障测距。记录故障发生后 2.5 ms 的电压数据, 采样频率为 200 kHz。当故障距离换流站 A 50 km, 过渡电阻为 0.1Ω 时, 线模电压波形如图 3 所示。首先, 使用 2.3 节中基于 SSA 优化的 VMD 算法对该线模电压波形进行分解, 设置种群大小为 20, 最大迭代次数为 30 次, K 的搜索范围为 [3, 8], α 的搜索范围为 [10, 8000]。SSA 优化过程中适应度随迭代次数变化如图 7 所示, 可以看出, SSA 收敛速度快, 且有一定跳出局部最优的能力。最终得到的 (K, α) 为 (4, 57), 其 VMD 结果如图 8 所示。在分量 IMF3、IMF4 中可以看出, 基于 SSA 的 VMD 增强了原信号的突变特征, 便于准确提取奇异点进行波头标定。

选择样本熵与峭度值比值最小的分量 IMF4 进行 TET 分解, 得到时频系数矩阵 T , 绘制其时频域全景波形如图 9 所示, 该全景波形在 t - f 平面上的投影如图 10 所示。图 9 描绘了故障波头各频率分量的幅值及到达时刻, 每一个波头到达都会引起时频系数突变。由于瞬态提取变换能将时频能量聚集于突变发生时刻, 得到波头突变时清晰的时频表达, 因此

表 1 四端柔直电网系统参数

Table 1 Parameters of the four-terminal MMC-HVDC grid

系统参数	参数值
线路长度/km	线路 1: 架空线 200
	线路 2: 电缆 200
	线路 3: 电缆 200
	线路 4: 架空线 100+电缆 100
控制策略	A 站定直流电压, 其余为定有功功率
额定功率/MW	A 站 800, B 站 1200, C 站 800, D 站 400
限流电抗器/mH	100
子模块电容/mF	10
桥臂子模块数量	200

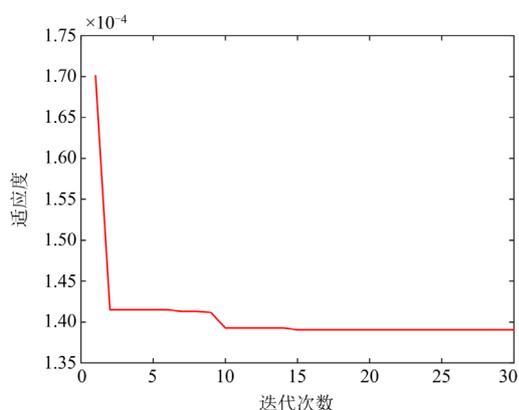


图 7 适应度值随迭代次数的变化曲线

Fig. 7 Variation curve of fitness value with the number of iterations

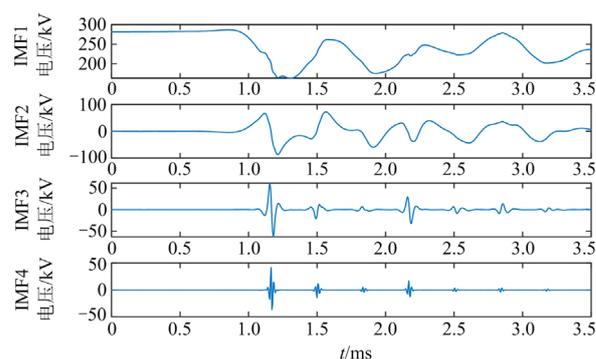


图 8 VMD 结果

Fig. 8 VMD results

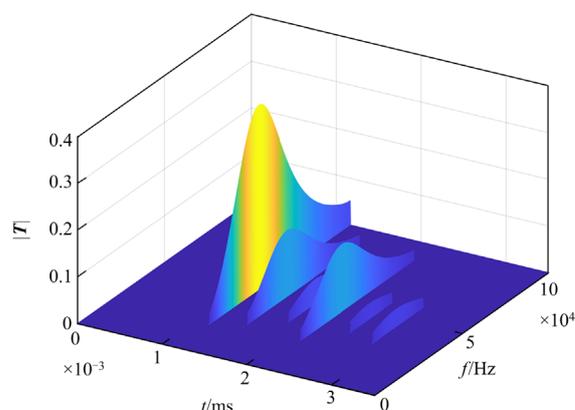
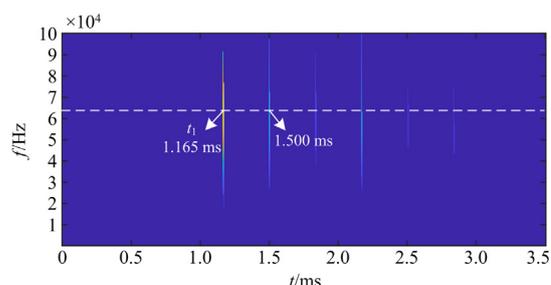


图 9 TET 分解后的故障行波时频域全景波形

Fig. 9 Time and frequency domain panoramic waveform of the fault traveling wave after TET

图 10 行波时频域全景波形在 t - f 平面上的投影Fig. 10 Projection of the traveling wave time-domain panoramic waveform in the t - f plane

可以根据该特性在提取故障行波的主频分量后直接标定初始行波、第二反射波头的到达时刻。

将 T 的各频率分量相加, 得到时域重构波形如图 11 所示, 由于初始行波波头与第二反射波头极性相反, 因此初步判断故障位于线路前半部分。根据 3.2 节中的方法, 得到该行波主频能量为 6.47×10^4 Hz, 测得该频率下波速为 298.69 km/ms, 在图 10 中标定

初始波头到达时刻 t_1 为 1.165 ms, 第二反射波头到达时刻 t_2 为 1.500 ms。根据式(30)计算得到故障距离为 50.0305 km, 误差为 30.575 m。

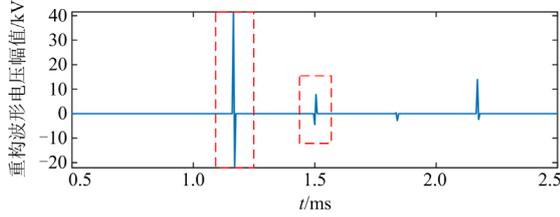


图 11 TET 时域重构波形

Fig. 11 TET time-domain reconstruction waveform

保持采样率为 200 kHz, 在线路 1 中发生故障距离、不同过渡电阻及不同故障类型(正极接地故障 pg、双极故障 pp)的测距结果如表 2 所示。表 2 中结果表明, 本文所提测距方法可耐受高过渡电阻, 各种故障情况下的测距误差基本控制在 270 m 以下, 证明本方法具有较高的测距精度。

表 2 不同故障条件下的测距结果

Table 2 Location results under different fault conditions

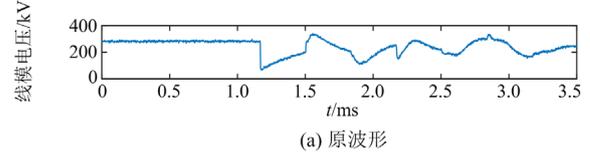
故障类型	故障位置/km	过渡电阻/ Ω	测距结果/km	误差/m
pp	30	0.1	29.868	132.100
	30	50	29.872	128.400
	30	200	29.873	126.700
pg	50	0.1	50.035	30.575
	50	50	50.028	27.895
	50	200	50.027	27.058
pp	100	0.1	100.060	60.145
	100	50	100.055	55.120
	100	200	100.069	69.190
pg	160	0.1	159.741	258.890
	160	50	159.739	261.185
	160	200	159.736	263.750

4.2 噪声对故障测距的影响

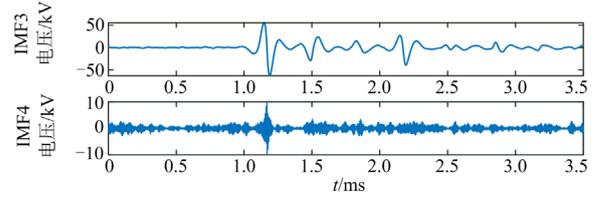
在仿真信号中加入信噪比为 35 dB 的白噪声, 以距离量测端 50 km 发生单极接地故障为例, 对比本文所提参数优化 VMD 算法和文献[15]中按经验选取 VMD 参数的性能。经过 SSA 优化后, (K, α) 取(5, 20), 而未优化的参数取(4, 2000)。对其分解结果中的含突变信号的 IMF 分量作对比, 如图 12 所示。

未优化参数的分解结果中, IMF3 中突变信号没有清晰的分离; 而 IMF4 波头幅值较小, 与噪声信号产生混叠, 因此各分量都难以进行波头标定。采用改进 VMD 算法后, 分解结果中的高频分量存在显著波峰, 便于波头整定, 且噪声分量均匀分布

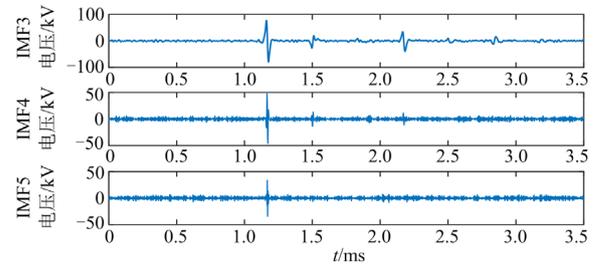
在每一个 IMF 分量, 一定程度上减少了噪声信号对突变信号的影响。选取适应度函数最小的 IMF3 分量进行 TET 分解, 得到测距结果为 49.917 km, 误差为 83 m, 因此本文所提方案具有良好的抗噪声能力。



(a) 原波形



(b) 参数未优化VMD结果



(c) 参数优化后VMD结果

图 12 高斯噪声下 VMD 结果对比

Fig. 12 Comparison of VMD results under Gaussian noise

4.3 采样频率对故障测距的影响

在实际应用中, 需要在准确性和经济性之间权衡, 选择合适的采样率。表 3 展示了在不同采样频率下, 对单极接地短路故障的测距结果。可以看出, 采样频率主要影响波头到达时刻 t_1 、 t_2 。当采样频率从 100 kHz 提高至 200 kHz, 测距精度提升明显;

表 3 不同采样频率下的测距结果

Table 3 Fault location results at different sampling frequencies

采样频率	故障位置/km	t_1 /ms	t_2 /ms	故障距离/km	误差/m
100 kHz	30	1.10	1.30	29.849	151.100
	50	1.16	1.50	50.755	755.370
	160	1.53	1.80	159.701	299.255
200 kHz	30	1.10	1.30	29.869	130.800
	50	1.165	1.500	50.031	30.575
	160	1.500	1.805	159.741	258.890
500 kHz	30	1.102	1.302	29.878	121.900
	50	1.168	1.502	49.926	74.181
	160	1.536	1.804	159.954	45.766
1 MHz	30	1.101	1.302	30.051	51.108
	50	1.168	1.502	50.049	49.335
	160	1.536	1.804	159.960	39.870

继续提高采样频率, 近端故障测距误差有所减小, 但总体精度提升有限。在测距结果中出现了低采样频率下误差更小的情况, 原因是随着采样率的提高, 其 IMF 分量频率也随之提高, 从而影响波速的整定, 但总体误差都在较低水平。因此, 本文测距方案在较低采样频率下仍能满足精度要求, 实际使用时推荐采样频率为 200 kHz~1 MHz。

4.4 不同方法的对比

为进一步验证本文所提方案的有效性, 将其与现有方法进行对比。在保持时间窗长度一致的前提下, 利用不同时频分析方法对图 8 中的 IMF4 进行分解, 结果如图 13 所示。由于受到不确定性原理的限制, SWT 方法在信号突变点处的时频分辨率差; WVD 时频分辨率有所提高, 但也无法对其进行精确时间定位, 而 TET 能将时频能量集中在突变发生点处, 锐化的时频曲线可以更准确直接地对突变发生时刻进行定位。此外还将本文方法与传统的单端测距方法进行对比, 其中方法一采用 TEO 进行波头标定, 取经验波速 $v = 296.1 \text{ km/ms}$; 方法二采用如图 13(b)所示的 WVD 算法, 标定时频能量中点作为波头到达时刻, 并计算频变波速; 方法三为本文所提方法, 其测距结果如图 14 所示。结果表明, 采用经验波速进行单端测距误差较大, 其误差在线路中点处达到最大值; 计及频变波速后单端测距精度得到明显提升。本文所提方法能兼顾波头识别和主频提取, 因此相较现有时频分析算法(方法二)精度更高。

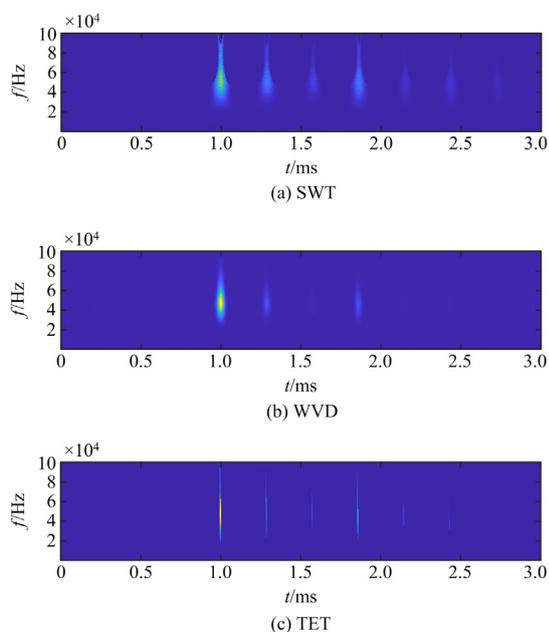


图 13 传统时频分析方法与本文方法对比

Fig.13 Comparison between traditional time-frequency analysis method and the proposed method

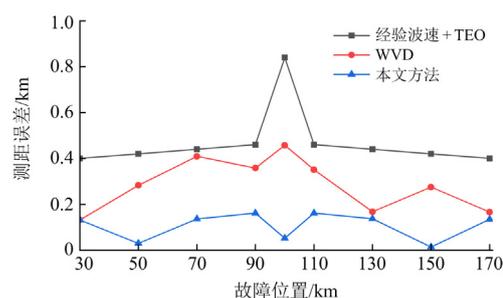


图 14 不同方法测距误差对比

Fig. 14 Comparison of fault location errors of different methods

5 结论

1) 提出了一种基于麻雀搜索的 VMD 算法。该方法综合样本熵及峭度值作为适应度函数, 增强了算法提取微弱故障特征的能力并减弱了噪声的影响, 使高频模态分量波形突变更加明显, 有利于后续对故障行波进行时频分析。

2) 针对现有时频分析方法分辨率不足的问题, 提出了一种基于瞬态提取变换的单端行波测距方法。该方法提高了全景波形的时频分辨率, 在提取行波主频分量的同时能更加准确地标定行波到达时刻。基于时频能量系数提取行波主频分量, 计算对应频率下的波速度, 实现了单端行波故障定位。

3) 仿真结果表明, 本文测距方案具有较高的测距精度, 测距误差在不同故障电阻和故障距离下均在 270 m 以内。此外, 本文方法具有良好的抗噪声能力, 且对采样频率的要求较低。

参考文献

- [1] 唐溢, 李保宏, 曾蕊, 等. 柔性直流对交流系统短路电流影响因素分析[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 40-47. TANG Yi, LI Baohong, ZENG Rui, et al. Influence of VSC-HVDC on short-circuit current of AC system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 40-47.
- [2] 李奇南, 夏勇军, 张晓林, 等. 渝鄂柔性直流输电系统中高频振荡影响因素及抑制策略[J]. 中国电力, 2022, 55(7): 11-21. LI Qinan, XIA Yongjun, ZHANG Xiaolin, et al. Key factors of medium-high frequency oscillation in Chongqing-Hubei HVDC system and suppression strategies[J]. Electric Power, 2022, 55(7): 11-21.
- [3] 邹常跃, 韦嵘晖, 冯俊杰, 等. 柔性直流输电发展现状及应用前景[J]. 南方电网技术, 2022, 16(3): 1-7. ZOU Changyue, WEI Ronghui, FENG Junjie, et al. Development status and application prospect of VSC-HVDC[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(3): 1-7.

- [4] 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.
- [5] 刘海金, 李斌, 温伟杰, 等. 柔性直流系统的线路保护关键技术与展望[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3463-3480.
LIU Haijin, LI Bin, WEN Weijie, et al. Review and prospect on transmission line protection in flexible DC system[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3463-3480.
- [6] 曹赋禄, 赵晋斌, 潘超, 等. 基于 DFFT 的低压直流线路主动式接地故障定位方法[J]. 中国电力, 2023, 56(4): 184-191.
CAO Fulu, ZHAO Jinbin, PAN Chao, et al. An active ground fault location method for low-voltage DC lines based on DFFT[J]. Electric Power, 2023, 56(4): 184-191.
- [7] 李梓玮, 许丽娟. 基于概率神经网络的直流滤波器电容器开路故障定位方法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(1): 48-56.
LI Ziwei, XU Lijuan. Open-circuit fault location method of DC filter capacitor based on probabilistic neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(1): 48-56.
- [8] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于半桥型 MMC 的柔性直流电网故障限流方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 175-186.
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Review of the fault current limiting approaches for a flexible DC grid based on a half-bridge MMC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 175-186.
- [9] 宋国兵, 李德坤, 靳东晖, 等. 利用行波电压分布特征的柔性直流输电线路单端故障定位[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 83-88.
SONG Guobing, LI Dekun, JIN Donghui, et al. One-terminal fault location for HVDC flexible transmission lines based on wave voltage distribution features[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 83-88.
- [10] 王鹤, 胡倩慈, 李筱婧, 等. 计及行波折反射的柔性直流电网故障限流器参数优化[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 54-63.
WANG He, HU Qianci, LI Xiaojing, et al. Parameter optimization of a fault current limiter in a flexible DC power grid considering refraction and reflection of a traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 54-63.
- [11] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲. 利用故障电流首行波拟合的柔性直流输电线路单端行波保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2651-2661.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou. Principle of non-unit traveling wave protection for VSC-HVDC transmission line using fault current initial traveling wave fitting[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2651-2661.
- [12] 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 Chaoyu, 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.
- [13] 马丹丹, 王晓茹. 基于小波模极大值的单端行波故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 55-59.
MA Dandan, WANG Xiaoru. Single terminal methods of traveling wave fault location based on wavelet modulus maxima[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 55-59.
- [14] 张艳霞, 王海东, 李婷, 等. LCC-VSC 混合直流输电线路的组合型单端故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 187-194.
ZHANG Yanxia, WANG Haidong, LI Ting, et al. Combined single-end fault location method for LCC-VSC hybrid HVDC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 187-194.
- [15] 吴佳享, 孙云莲, 陈楚昭. 基于 MRSVD-VMD 的多分支配电网故障定位[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(11): 58-65.
WU Jiexiang, SUN Yunlian, CHEN Chuzhao. Fault location of multi-branch distribution network based on MRSVD-VMD[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2022, 34(11): 58-65.
- [16] HUAI Q, LIU K, HOOSHYAR A, et al. Single-ended line fault location method for multi-terminal HVDC system based on optimized variational mode decomposition[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 194.
- [17] 付华, 刘超, 张松, 等. VMD-SWT 联合算法在故障行波检测中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(5): 55-61.
FU Hua, LIU Chao, ZHANG Song, et al. Application of VMD-SWT joint algorithm in fault traveling wave detection[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2020, 32(5): 55-61.
- [18] 郑茂然, 陈朝晖, 余江, 等. 基于 MSST 的高压直流线路故障定位方法[J]. 南方电网技术, 2022, 16(3): 8-15.
ZHENG Maoran, CHEN Chaohui, YU Jiang, et al. Fault

- location method based on MSST for HVDC lines[J]. *Southern Power System Technology*, 2022, 16(3): 8-15.
- [19] 曾哲, 邓丰, 张振, 等. 基于 VMD-WVD 的故障行波全波形时-频分析方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(7): 49-57.
ZENG Zhe, DENG Feng, ZHANG Zhen, et al. Time-frequency analysis of a traveling wave based on VMD and WVD[J]. *Power System Protection and Control*. 2022, 50(7): 49-57.
- [20] 王志武, 涂画, 李力行, 等. 基于时频域反射法的核电站仪控电缆缺陷检测[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(5): 240-249.
WANG Zhiwu, TU Hua, LI Lixing, et al. Defect detection of I&C cable in NPP based on TFDR[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(5): 240-249.
- [21] 邓丰, 徐帆, 曾哲, 等. 基于多源暂态信息融合的单端故障定位方法[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(13): 3201-3212.
DENG Feng, XU Fan, ZENG Zhe, et al. Single-ended fault location method based on multi-source transient information fusion[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(13): 3201-3212.
- [22] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2014, 62(3): 531-544.
- [23] 陈皇熹, 方春华, 普子恒, 等. 基于 VMD-WVD 相位法的长电缆局放双端定位[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(3): 171-177.
CHEN Huangxi, FANG Chunhua, PU Ziheng, et al. Double-ended positioning of partial discharge for long cable based on VMD-WVD phase method[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(3): 171-177.
- [24] 宋扬, 石勇, 刘宝泉, 等. 基于反向变异麻雀搜索算法的微电网优化调度[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(2): 163-170.
SONG Yang, SHI Yong, LIU Baoquan, et al. Optimal dispatch of microgrid based on reverse mutation sparrow search algorithm[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(2): 163-170.
- [25] XUE J, SHEN B. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2020, 8(1): 22-34.
- [26] 江友华, 朱毅轩, 杨兴武, 等. 基于 Hankel-SVD-CEEMDAN 改进阈值的局部放电特征提取方法[J]. *电网技术*, 2022, 46(11): 4557-4567.
JIANG Youhua, ZHU Yixuan, YANG Xingwu, et al. Hankel-SVD-CEEMDAN improved threshold partial discharge feature extraction method[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(11): 4557-4567.
- [27] YU G. A concentrated time-frequency analysis tool for bearing fault diagnosis[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(2): 371-381.
- [28] 邓丰, 祖亚瑞, 黄懿菲, 等. 基于行波全波形主频分量的单端定位方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(6): 2156-2167.
DENG Feng, ZU Yarui, HUANG Yifei, et al. Research on single-ended fault location method based on the dominant frequency component of traveling wave full-waveform[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(6): 2156-2167.
- [29] SHU Hongchun, WANG Shixin, LEI Shunguang. Single-ended protection method for hybrid HVDC transmission line based on transient voltage characteristic frequency band[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(2): 453-463.
- [30] 汤兰西, 董新洲, 施慎行, 等. 柔性直流电网线路超高速行波保护原理与实现[J]. *电网技术*, 2018, 42(10): 3176-3186.
TANG Lanxi, DONG Xinzhou, SHI Shenxing, et al. Configuration principle and implementation of ultra-high-speed travelling wave based protection for transmission line of flexible HVDC grid[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(10): 3176-3186.
- [31] VRANA T D, SEBASTIEN, YANG Y, et al. The Cigré B4 DC grid test system[J]. *CIGRE Electra*, 2013, 270(1): 10-19.

收稿日期: 2023-03-31; 修回日期: 2023-11-25

作者简介:

池梓斌(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析运行与控制; E-mail: zibinchi@foxmail.com

夏成军(1974—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统分析运行与控制、HVDC 和 FACTS。E-mail: cjxia@scut.edu.cn

(编辑 张颖)