

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241313

基于小波变换与 TKEO 的故障识别与定位方法研究

王海龙¹, 何山^{1,2}, 胡帅³, 王维庆^{1,2}

1. 可再生能源发电与并网技术自治区重点实验室(新疆大学), 新疆 乌鲁木齐 830017;
2. 可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心(新疆大学), 新疆 乌鲁木齐 830017;
3. 国网新疆电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 在含有储能的光伏制氢系统中, 故障类型的准确识别及精确定位对其安全稳定运行具有重要意义。针对短距离直流输电系统故障识别与定位精度低、快速性差的问题, 提出一种基于小波变换(wavelet transform, WT)和 Teager-Kaiser 能量算子(Teager-Kaiser energy operator, TKEO)的双端行波故障测距方法。首先对故障信号进行小波变换, 使用软阈值进行去噪并重构信号。提取并分析每个小波分解层的特征信息, 根据高低频分解层能量的比值判定故障类型。其次采用 TKEO 法提取出经小波分解后的瞬时能量谱, 精确标定首个波头到达直流线路两端的采样点。然后采用双端测距法精确求解出故障距离。最后在 Matlab/Simulink 中搭建光伏直流制氢系统进行仿真验证。结果表明, 所提方法对故障类型的识别和定位具有较高的准确性。

关键词: 直流微电网; 故障识别; Teager-Kaiser 能量算子; 故障定位

Research on fault identification and location method based on wavelet transform and TKEO

WANG Hailong¹, HE Shan^{1,2}, HU Shuai³, WANG Weiqing^{1,2}

1. Key Laboratory of Renewable Energy Power Generation and Grid-connected Technology in the Autonomous Region, Xinjiang University, Urumqi 830017, China; 2. Engineering Research Center of Renewable Energy Power Generation and Grid-connected Control, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830017, China;
3. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, China)

Abstract: In photovoltaic hydrogen production systems equipped with energy storage, accurate identification and precise localization of faults are critical for ensuring safe and stable operation. To address the issues of low accuracy and poor rapidity in fault identification and localization in short-distance DC transmission systems, a dual-terminal traveling wave fault location method based on wavelet transform (WT) and Teager-Kaiser energy operator (TKEO) is proposed. First, the fault signal undergoes wavelet transform, denoised using soft thresholding, and then reconstructed. Feature information of each wavelet decomposition layer is extracted and analyzed, and the fault type is determined based on the energy ratio between high- and low-frequency decomposition layers. Subsequently, the TKEO method is applied to extract the instantaneous energy spectrum from the wavelet-decomposed signal, accurately identifying the sampling points where the first wavefront arrives at both ends of the DC line. A dual-terminal location method is then employed to precisely calculate the fault distance. Finally, the proposed method is validated through simulations in a photovoltaic-based DC hydrogen production system modeled in MATLAB/Simulink. The results demonstrate that the proposed method achieves high accuracy in both fault identification and localization.

This work is supported by the Key Research and Development Program of the Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2022B01003-3).

Key words: DC microgrid; fault identification; Teager-Kaiser energy operator; fault location

0 引言

在“双碳”背景下, 迫切要求能源结构转型与

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发项目资助(2022B01003-3); 新疆维吾尔自治区重点实验开放课题项目资助(2023D04029); 国家自然科学基金项目资助(52266018)

技术创新。氢能作为零碳排放的二次能源, 因其清洁、高效的特点, 逐渐成为推动能源革命的重要力量。目前多采用直流系统电解水制氢, 直流线路发生故障后会在短时间内产生极大的故障电流, 而雷击故障会使直流线路出现高频暂态电压和电流, 进而对直流微电网的安全稳定造成严重的影响, 保护装置需要在故障发生后极短时间内准确识别并定

位。因此，在短时间内准确地识别故障，以及对故障点进行准确定位是光伏直流制氢系统面临的一个重要问题。

目前，针对直流系统的故障识别方法有电压和电流分析法、故障暂态能量分析法和故障行波分析法，故障定位方法有行波法、阻抗法、故障分析法以及固有频率法，其中行波法对波头的提取极为严苛，目前精确提取波头的方法有小波变换法^[1-2]和希尔伯特-黄变换法^[3-4]。文献[5]通过小波熵值提取故障特征，但在复杂环境下，噪声会干扰熵值变化，降低故障判定的准确性。文献[6]结合变分模态分解(variational modal decomposition, VMD)和卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)进行特征提取，但在处理高频信号时计算复杂度增大，并且CNN训练过程效率低。文献[7-8]均是利用优化算法对VMD参数进行优化，但其对初始参数和迭代次数依赖较大，若设定不合理，可能导致算法陷入局部最优或过度迭代，增加计算复杂度，并且单一的能量突变可能不足以提供足够的信息，难以精确区分不同类型的故障。文献[9]提出玻尔兹曼机器学习(Boltzmann machine learning, BML)应用程序，用于存在电压源转换器的高压直流输电系统中，利用故障行波对故障进行识别分类，虽然BML能够处理复杂特征，但对未知或非典型故障的泛化能力较差。文献[10]使用S变换分离频带能量进行故障识别，但在强噪声环境下，频带能量提取效果差。文献[11]通过小波奇异熵比值识别雷击故障，但其抗噪能力弱，会导致熵值计算不准确。文献[12-13]基于电流特性判断短路故障，但弱故障情况下特性不明显，影响准确性。文献[14]提出门控循环单元(gate recurrent unit, GRU)优化的故障测距方法，但参数设置不当会影响准确性。文献[15-18]均是结合分解算法与Teager能量算子(Teager energy operator, TEO)提取瞬时能量定位故障，但经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和VMD对参数设置的要求都极高，并且存在模态混叠问题。文献[19]提出VMD和瞬态提取变换(transient extraction transform, TET)结合的单端故障定位方法，但仅使用单端电气量对于弱故障或远距离故障难以准确提取瞬态特征，影响故障定位的准确性。

基于上述背景，提出一种基于小波变换和Teager-Kaiser能量算子的双端行波故障测距方法。首先，选取合适的小波分解层数对经过相模变换后的故障分量进行分解，其次，通过计算零模分量高频与低频分解层的能量比值对故障进行识别分类，最后，对线模分量进行TKEO处理，获得波形突变明显的

故障特征分量，准确标定到达两端检测处的初始波头，实现高精度双端行波故障测距。

1 系统模型

1.1 光伏制氢直流系统

利用Matlab/Simulink软件搭建含储能的光伏直流制氢系统，进行仿真验证。图1为光伏制氢系统示意图。在工程应用中，通常将采样频率设置在100 kHz~1 MHz之间，在此系统模型仿真中采用1 MHz作为采样频率，系统的直流母线电压为800 V，输电线路的总长度为100 km。

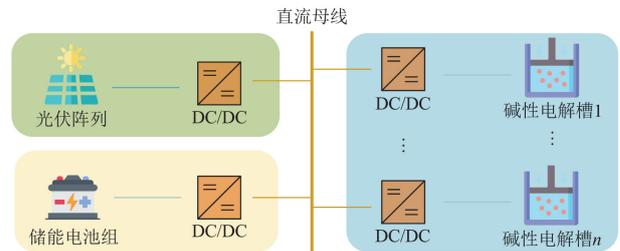


图1 光伏制氢系统

Fig. 1 Photovoltaic hydrogen production system

1.2 雷电流模型

由于雷电放电的复杂性和随机性，真实的雷电流波形极不规则，通过研究和实践，专家们提出了多种数学模型来近似描述其波形，根据国标，雷电流采用负极性双指数波形^[20]，如式(1)所示。

$$i(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ kI_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}), & t \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： $i(t)$ 为雷击瞬时电流值； I_0 为雷电流的峰值； k 为校正系数； α 和 β 分别为雷电流的波尾、波头衰减系数。雷电流波形如图2所示。

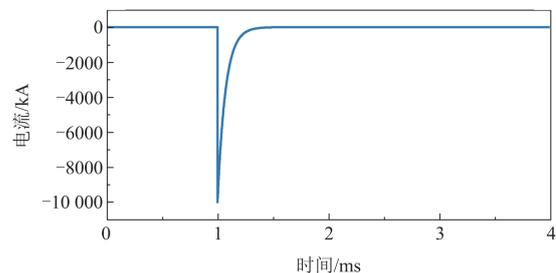


图2 雷电流波形($I_0 = 10 \text{ kA}$)

Fig. 2 Lightning current waveform ($I_0 = 10 \text{ kA}$)

在雷电防护工程与高电压绝缘试验领域，1.2/50 μs 雷电流冲击波形被广泛采纳为国际化的试验波形，用于模拟实际雷电流冲击的特征，以确保防雷装置能够有效地应对雷电冲击。

雷击的主放电阶段, 可以形象地描述为雷电波从雷云源头出发, 沿着一条具有固定波阻抗 Z 、理论上无限延伸的雷电通道, 向预定的雷击点快速传播的过程。

在构建仿真模型时, 为了模拟这一过程, 常将其简化为一个内部阻抗设定为 Z 的电流源, 以模拟雷电波在通道中流动时产生的电流效应。在 Matlab/Simulink 中搭建如图 3 所示的雷电流模型, 其中雷电通道波阻抗为 300Ω ^[21]。

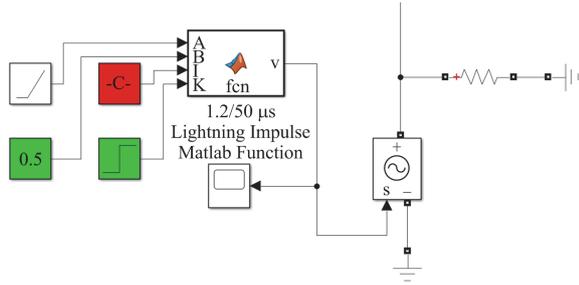


图 3 雷电流模型

Fig. 3 Lightning current model

2 故障识别

由于雷击是造成输电线路保护误动的主要原因, 需要区分雷击故障、雷击干扰和接地故障, 因此主要针对这 3 种类型的故障进行研究。为了准确识别故障类型, 根据小波分解后各模态中不同分解层的能量比值判定故障类型。

2.1 提取模量电流

模量分析作为一种解耦分析方法, 在直流线路故障检测中具有重要的作用, 能够有效地解耦复杂信号, 提取故障特征, 进行频谱分析和动态响应分析, 从而提高故障检测的精度和灵敏度, 并实现故障的准确定位。

采用的相模变换矩阵为

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_1 \end{bmatrix} = \mathbf{S} \begin{bmatrix} i_+ \\ i_- \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: i_0 、 i_1 分别为经过变换后的零模、线模电流分量; i_+ 、 i_- 分别为直流线路正、负极的电流。

2.2 故障类型的识别

为快速准确地识别出故障类型, 对经相模变换后的零模电流分量进行小波分解, 在分解时, 需要选择合适的小波基函数与小波分解层数。由于 Daubechies 小波通过其不同的长度和阶数提供了良好的时间-频率局部化特性, 适合检测具有复杂特征

的故障信号, 尤其在处理高频噪声时效果更好, 又考虑到平滑性与对称性, 选取 db4 作为小波分解的基函数, 在处理信号时能够有效地保留信号的主要特征。不同层数的小波分解会影响对信号特征的提取, 较低的分解层数可能无法捕捉到信号中的细节特征, 而较高的分解层数可能会过度分解信号, 导致特征混叠。为了分析到更多的高频成分, 最低频率细节应包括 1 kHz 以下的频段(即第 N 层频率的上限 $f/2^N$ 应小于 1 kHz, f 是故障信号的采样频率), 此外, 须避免在 100 Hz 范围内(即第 N 层频率的下限 $f/2^{N+1}$ 应大于 100 Hz)出现由外部故障引发的二次谐波。为了降低计算的复杂度, 同时能快速地对故障信号进行分解, 应选择满足条件的最小 N 值。因此, 根据式(4)可计算出最大分解层数 N_{\max} 。

$$N_{\max} = \min \left[\begin{array}{l} \text{round}(\log_2(f/1000) + 1), \\ \text{round}(\log_2(f/100) - 1) \end{array} \right] \quad (4)$$

式中: round 表示舍入函数。将采样频率代入式(4)可求得 N_{\max} 为 11。图 4 为正极接地故障、雷击干扰、雷击故障经小波分解后不同分解层的频谱分析对比图。

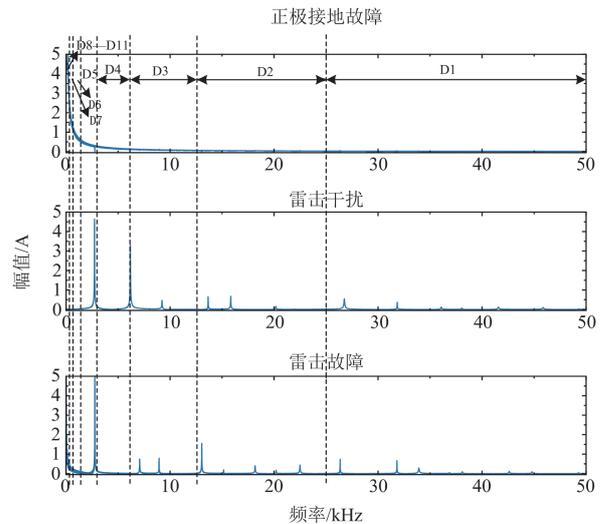


图 4 不同分解层的频谱分析

Fig. 4 Spectral analysis of different decomposition layers

3 故障定位

3.1 Teager-Kaiser 能量算子

TKEO 是一种用于信号处理的非线性算子, 在分析信号瞬时特性方面较为有效, 用于计算信号的瞬时能量, 在传统信号能量概念的范畴之外, TKEO 展现了一种更为全面的考量方式, 它不仅将信号的幅度特性纳入计算之中, 还创新性地融入了信号瞬时频率的变动因素。通过计算信号幅值的平方与其

瞬时频率平方的乘积来实现,这一过程完全独立于信号的初始相位状态,确保了分析的客观性和准确性,使得 TKEO 能够紧密追踪信号幅度与频率的动态变化,进而在信号处理过程中,有效减轻由运动误差或信号间串扰所引发的负面干扰,从而在一定层面上提升了信号的整体信噪比水平,为后续的精确定分析奠定基础。

对于连续时间信号 $x(t)$, Teager-Kaiser 能量算子表达式为

$$\psi_c[x(t)] = \dot{x}^2(t) - x(t)\ddot{x}(t) \quad (5)$$

式中: $\dot{x}(t)$ 和 $\ddot{x}(t)$ 分别是一阶和二阶导数。

对于离散时间信号 $x(n)$, Teager-Kaiser 能量算子表达式为

$$\psi_d[x(n)] = x^2(n) - x(n-k)x(n+k) \quad (6)$$

式中: ψ_d 为采样点的能量值; $x(n)$ 为离散形式的时间信号采样点。

相比于 KEO, TKEO 具有更高的鲁棒性,在计算过程中数值精度更为稳定,减少了由于数值误差引起的不稳定现象,对于长时间复杂信号分析,能够可靠地提供更为准确的瞬时能量估计。TKEO 改进后的算法结构能更好地避免数值计算中的舍入和累积误差,提高计算精确度。

3.2 双端行波测距法

在输电线路发生故障后,故障点会引发电压与电流急剧变动,生成电压与电流的瞬时变化成分,随后以接近光速的速度,沿输电线路双向迅速蔓延。此类瞬时变化的成分被称为暂态行波,在故障定位中具有非常重要的作用。相比于单端行波测距法,双端行波测距法定位精度更高,有效地减少了单端测距中因行波多次反射和线路复杂性带来的误差,显著提高了故障定位的精度。采用两端信号检测的时间差计算,能够更好地应对行波信号在传播过程中可能出现的衰减和畸变问题。

双端行波测距法的原理公式为

$$\Delta t = \frac{L_1 - R_1}{F_s} \quad (7)$$

$$d_1 = \frac{L + v\Delta t}{2} \quad (8)$$

$$d_2 = \frac{L - v\Delta t}{2} \quad (9)$$

式中: L_1 和 R_1 分别为初始行波波头到达左右两端检测处的采样点; F_s 为两端检测处的采样率; d_1 、 d_2 分别为故障点到检测处两端的距离; L 为线路两端检测处间的距离; v 为线模行波速度; Δt 为故障的初始行波波头到达两端的时间差。

故障处初始行波传输图如图 5 所示。图中: A、

B 分别为左右两端故障检测处; f 为故障点。

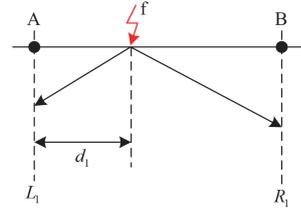


图 5 故障处初始行波传输图

Fig. 5 Initial traveling wave transmission diagram at the fault

在行波测距中,零模行波各频率分量之间波速差别较大,导致零模行波的波速变化特性明显,线模波速受频率变化的影响则远小于零模,由于线模行波在传播过程中的衰减较小,所以线模波速较为稳定^[22],因此在测距研究中,对线模行波进行分析并使用线模行波速度对故障点进行定位。

线模行波速度 v 计算公式^[23]为

$$v = \frac{\omega}{\sqrt{\frac{1}{2}[\omega^2 L_0 C_0 - R_0 G_0 + \sqrt{(R_0^2 + \omega^2 L_0^2)(G_0^2 + \omega^2 C_0^2)}]}} \quad (10)$$

式中: R_0 、 L_0 、 G_0 、 C_0 分别为某一频率下单位长度线路的电阻、电感、电导和电容; ω 为该频率分量的角频率。

一般输电线路的电导可以忽略不计,即 $G_0 = 0$, 则式(10)可化简为

$$v = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{2}\left[L_0 C_0 + C_0 \sqrt{\left(\frac{R_0}{\omega}\right)^2 + L_0^2}\right]}} \quad (11)$$

文献[24-25]讨论了在给定输电线路参数情况下波速随频率的变化规律,当频率大于 100 Hz 后,输电线路的波速趋于定值。而故障行波的频率往往在几 kHz 至几百 kHz 之间,因此在研究行波故障测距时可忽略频率对波速的影响^[26]。即当频率 ω 很大时, R_0/ω 近似为 0, 式(11)可以进一步化简为

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \quad (12)$$

此时线模行波波速为常数,其中 $L_0 = 1.210\ 96\ \text{mH/km}$, $C_0 = 9.546\ 147\ 4\ \text{nF/km}$ 是在线路模型中的参数设置,代入式(12)可求得线模行波速度 $v = 294\ 117\ 613\ \text{m/s}$ 。

行波信号检测的精度是影响故障定位精度的关键因素。行波在故障点产生后以接近光速的速度传播,必须在极短时间内精确检测到行波到达两端的时间,因此左右两端检测处的采样率取 1 MHz,即

采样间隔为 $1 \mu\text{s}$, 以使行波信号检测更为精确。为了更精确地计算出初始行波到达检测点 A、B 的时间差, 采用 Teager-Kaiser 能量算子处理线模行波信号, 用阈值法设置适合直流输电线路故障的数值, 在满足此阈值的条件下, 分别提取出行波信号到达 A、B 两端的第一个能量突变的采样点, 之后结合线路两端检测处的采样率计算出故障行波信号到达检测点 A、B 两端的时间差 Δt 。

图 6 为故障识别、定位的控制流程图。提出基于小波分解与 TKEO 相结合的故障定位方法, 共分为 3 个阶段: 1) 故障数据处理; 2) 故障识别; 3) 故障定位。

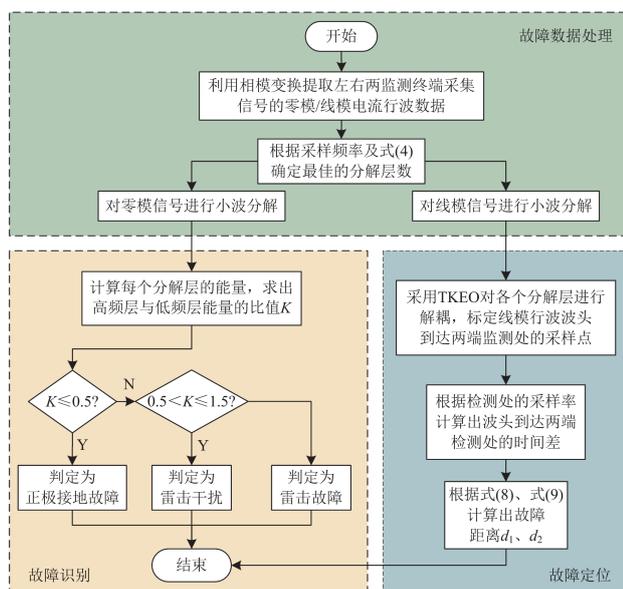


图 6 故障识别、定位流程图

Fig. 6 Fault identification and location flow chart

4 仿真实验

为验证所提方法的可行性及优越性, 在 Matlab/Simulink 平台搭建如图 1 所示的光伏制氢系统仿真模型。信号分解时选用 db4 小波作为小波基, 分解层数为 11, 对故障信号零模分量进行小波分解, 并计算不同分解层的能量, 根据能量比值 K 的大小判定故障类型, 对故障信号线模分量进行小波分解, 然后运用 TKEO 提取波头精确地计算出故障距离。表 1 为仿真模型参数设置。

4.1 故障识别

为了更明显地区别不同故障信号的特征, 展示故障前后 50 ms 的波形, 为了在短时间内检测出故障, 必须在故障开始时充分利用暂态信息。分别描述正极接地故障、雷击干扰和雷击故障 3 种不同故障状态下的波形以及频谱特征。

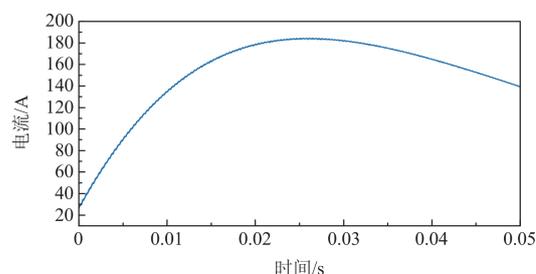
表 1 参数设置

Table 1 Parameter settings

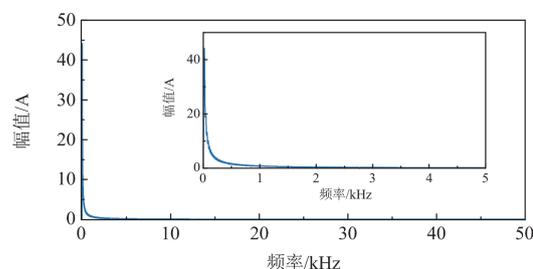
系统仿真参数	数值
采样频率/MHz	1
直流母线电压/V	800
光伏输出功率/kW	1.5×10^4
蓄电池输出功率/kW	5×10^3
线路长度/km	100
线路等效电感/(H/km)	1.21096×10^{-3}
线路等效电容/(F/km)	9.5461474×10^{-9}
故障类型	正极接地故障, 雷击干扰, 雷击故障
过渡电阻/ Ω	0.1, 100, 300
采样数据长度	50 000(故障前后 50 ms)

4.1.1 正极接地故障

正极接地故障与地之间形成了一个故障回路, 导致暂态信号在传播过程中严重衰减。图 7 为正极接地故障零模分量波形示意图。



(a) 正极接地故障电流波形图



(b) 正极接地故障频谱特性图

图 7 正极接地故障零模分量

Fig. 7 Positive ground fault zero mode component

由图 7(b)可见, 各频段的幅值随频率升高而逐渐降低。在 $0 \sim 5 \text{ kHz}$ 的频率范围内, 经过小波分解后, 零模分量的幅值迅速下降, 不同频率间的幅值差异相较于其他频段更为显著。 $5 \sim 50 \text{ kHz}$ 之间, 幅值基本无变化。

4.1.2 雷击干扰

由于雷击干扰的持续时间较短且暂态电流较小, 其暂态能量会逐渐降低直至消失, 因此保护装置应确保不发生误动作。雷击干扰可以等效为叠加在输电线路上的一个独立电流源, 其故障电流的零

模分量如图 8 所示。从图 8(b)可以看出,幅值主要集中在 0~30 kHz 的低频范围内,而 30~50 kHz 频段幅值波动较小。此外,在 20 kHz 以下的频率范围内,各频率分量的能量差异较大,且幅值变化的陡度较高。由此可见,雷击干扰引起的时域振荡波形导致频谱分析中各频率的幅值出现振荡。

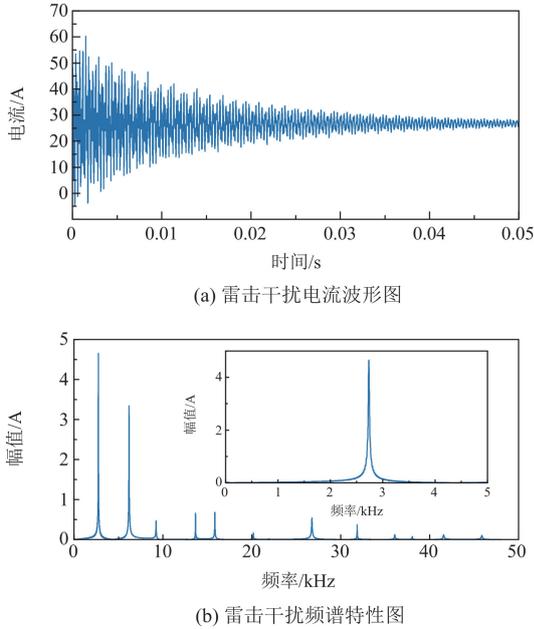
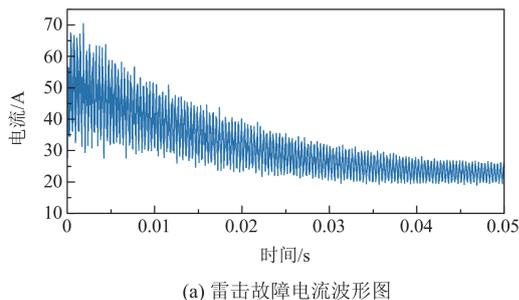


图 8 雷击干扰零模分量

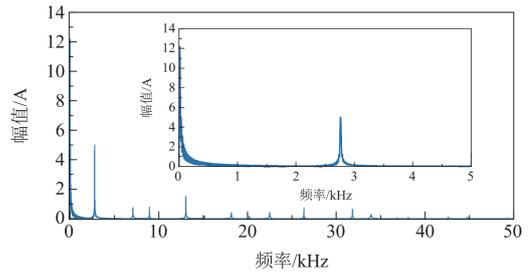
Fig. 8 Lightning-induced interference zero mode component

4.1.3 雷击故障

当雷击电流幅值较大时,容易导致绝缘材料击穿,从而在短时间内形成电弧,对电力设备造成损害,发生雷击故障。雷击故障的零模分量如图 9 所示,其频谱特性与图 8 中的雷击干扰频谱类似,但也存在差异。由于雷击故障的幅值波动主要集中在低频段,其频谱特性图显示出正极接地故障与雷击干扰的叠加特性。如图 9(b)所示,大部分幅值波动集中在 0~20 kHz,频率分量的幅值波动明显,在 20 kHz 之后幅值波动逐渐减小并趋于稳定。尽管在 20~50 kHz 的频段中,雷击故障包含了更多类似谐波成分,但在这些频段的幅值衰减率比雷击干扰要小。



(a) 雷击故障电流波形图



(b) 雷击故障频谱特性图

图 9 雷击故障零模分量

Fig. 9 Lightning failure zero mode component

4.1.4 故障识别方法

由图 4 可知,正极接地故障的幅值波动主要集中在 D4—D11,雷击干扰的幅值波动主要集中在 D3—D5,而雷击故障结合了前两种故障的特性,幅值波动主要集中在 D5—D9。

通过仿真实验,验证所提故障识别方法的准确性。引入高频层与低频层的能量之比 K 作为故障识别的判据,其中 D1—D8 作为高频层, D9—D11 作为低频层。各分解层的能量计算公式为

$$E_N = \sum (W_N(k))^2 \quad (13)$$

$$K = \frac{E_H}{E_L} \quad (14)$$

$$E_H = \sum_{N=1}^8 E_N \quad (15)$$

$$E_L = \sum_{N=9}^{11} E_N \quad (16)$$

式中: E_N 为第 N 层小波能量; $W_N(k)$ 为故障电流零模分量经小波分解后第 N 层的小波系数; E_H 和 E_L 分别为小波分解后的高频层和低频层的能量。

以 45 km 处分别发生雷击故障、雷击干扰以及正极接地故障为例,对零模电流进行小波分解,根据式(13)~式(16)得出各层能量值、高频层能量值、低频层能量值以及 K 值,其中高频层的能量值是 1—8 层的能量和,低频层的能量值是 9—11 层的能量和,各分解层能量如表 2 所示。

为验证所提方法的准确性,设置步长为 3 km,分别对接地故障、雷击故障以及雷击干扰 3 种情况进行大量的仿真实验,对比分析各情况下得出的 K 值,并结合一定的裕度得出结论:当 $K \leq 0.5$ 时,判定故障类型为正极接地故障;当 $0.5 < K \leq 1.5$ 时,判定为雷击干扰;当 $K > 1.5$ 时,判定故障类型为雷击故障。受篇幅所限,文中仅呈现部分数据结果。

表 2 各分解层的能量值

Table 2 Energy value of each decomposition layer

分解层	能量值		
	雷击故障	雷击干扰	正极接地故障
1	23.526 95	0.243 02	0.056 08
2	107.646 97	2.877 86	0.725 84
3	513.413 56	6.934 08	1.274 60
4	1196.332 52	20.5453	3.649 04
5	2270.188 14	36.255 37	7.231 59
6	3705.811 32	62.693 91	13.824 05
7	8154.482 47	96.333 64	27.470 49
8	12 135.722 38	229.657 24	61.641 82
9	8775.158 79	221.139 97	63.745 21
10	1475.617 59	113.608 47	47.336 98
11	928.521 54	128.654 84	323.733 05
高频层	28 107.1243	455.540 42	115.873 51
低频层	11 179.297 92	463.403 27	434.815 24
K	2.514 21	0.983 03	0.266 49

图 10 是故障距离分别为 20、30、40、50 km 时雷击故障、正极接地故障以及雷击干扰的高频层能量与低频层能量比值图。

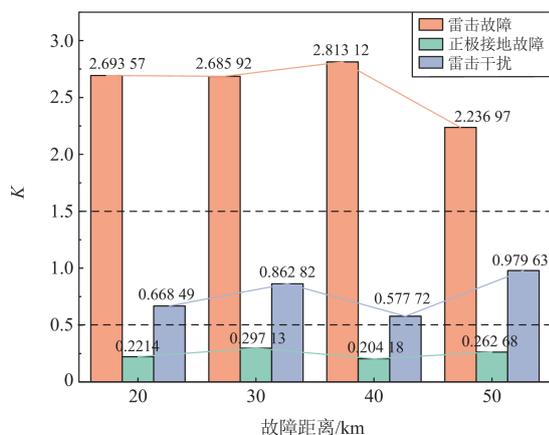


图 10 不同故障类型下的 K 值

Fig. 10 K values for different fault types

4.2 故障定位

4.2.1 不同故障类型的影响

使用 TKEO 提取出故障信号到达线路两端检测点的瞬时峰值能量点, 根据两点的差值与采样频率求出故障到达两端检测点的时间差, 进而对故障进行精确定位, 避免了故障反射波的测量, 定位更可靠。以 40 km 处发生雷击故障为例进行仿真验证, 图 11 是故障电流线模分量经 TKEO 提取后的采样点能量峰值, 为了便于观察, 取故障前后共 400 个采样点进行分析, 图 11(a)表示标记故障行波波头到

达左端检测处 A 为第 71 个点, 图 11(b)表示到达右端检测处 B 为第 105 个点, 代入公式可求出 $d_1 = 40\,000.001158\text{ m}$ 和 $d_2 = 59\,999.998\,842\text{ m}$ 。

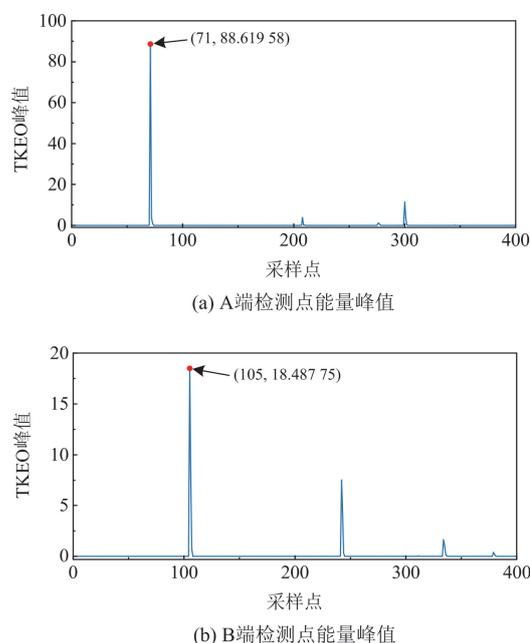


图 11 采样点能量峰值

Fig. 11 Energy peak value of sampling point

为了验证所提方法的正确性和测距精度, 对距离 A 端检测点 19、36、45、67、74 km 处不同位置发生不同的故障进行仿真验证, 仿真结果如表 3 所示。

4.2.2 不同过渡电阻的影响

由于过渡电阻的影响, 故障行波的传播会经历更快的衰减过程, 这一现象使得故障行波的特征变得模糊且难以辨识, 增加了故障定位的难度。为了验证过渡电阻对所提方法测距精确度的影响, 分别设置过渡电阻为 0.1、100、300 Ω ^[27], 在故障类型为雷击故障、正极接地故障, 故障位置为 26、51、71 km 处进行仿真验证, 结果如表 4 所示。

仿真结果表明, 在过渡电阻为 0.1、100、300 Ω 时, 发生雷击故障与接地故障两种不同情况下, TKEO 仍能精确地识别并提取出故障行波波头, 从而保证故障测距的准确度, 说明该方法不受过渡电阻大小的影响。

4.3 噪声的影响

在直流输电系统中, 故障信号的特征提取与故障定位精度在很大程度上受到噪声的影响。噪声的存在不仅会降低故障特征的可辨识性, 还可能引发误判, 从而影响测距算法的准确性和鲁棒性。

表 3 不同故障距离下的测距结果

Table 3 Ranging results at different fault distances

故障位置/km	故障类型	L_1	R_1	测距结果/m	误差/m
19	正极接地故障	36	142	18 823.533 022	-176.466 978
	雷击干扰	35	141	18 823.533 022	-176.466 978
	雷击故障	35	141	18 823.533 022	-176.466 978
36	正极接地故障	65	113	35 882.354 576	-117.645 424
	雷击干扰	64	112	35 882.354 576	-117.645 424
	雷击故障	64	112	35 882.354 576	-117.645 424
45	正极接地故障	80	97	45 000.000 579	0.000 579
	雷击干扰	79	96	45 000.000 579	0.000 579
	雷击故障	79	96	45 000.000 579	0.000 579
67	正极接地故障	118	60	67 058.821 554	58.821 554
	雷击干扰	117	59	67 058.821 554	58.821 554
	雷击故障	117	59	67 058.821 554	58.821 554
74	正极接地故障	130	48	74 117.644 266	117.644 266
	雷击干扰	129	47	74 117.644 266	117.644 266
	雷击故障	129	47	74 117.644 266	117.644 266

表 4 不同过渡电阻下的测距结果

Table 4 Ranging results at different transition resistances

故障类型	过渡电阻/ Ω	故障距离/km	L_1	R_1	测距结果/m	误差/m
雷击故障	0.1	26	47	129	25 882.355 734	-117.644 266
		51	90	87	50 882.352 839	-117.647 161
		71	124	52	71 176.468 136	176.468 136
	100	26	47	129	25 882.355 734	-117.644 266
		51	90	87	50 882.352 839	-117.647 161
		71	124	52	71 176.468 136	176.468 136
	300	26	47	129	25 882.355 734	-117.644 266
		51	90	87	50 882.352 839	-117.647 161
		71	124	52	71 176.468 136	176.468 136
正极接地故障	0.1	26	48	130	25 882.355 734	-117.644 266
		51	91	88	50 882.352 839	-117.647 161
		71	125	53	71 176.468 136	176.468 136
	100	26	48	130	25 882.355 734	-117.644 266
		51	91	88	50 882.352 839	-117.647 161
		71	125	53	71 176.468 136	176.468 136
	300	26	48	130	25 882.355 734	-117.644 266
		51	91	88	50 882.352 839	-117.647 161
		71	125	53	71 176.468 136	176.468 136

噪声信号包含大量的高频信号，使用软阈值法处理经小波分解后的信号，其公式为

$$X_N = \begin{cases} \text{sign}(W_N)(|W_N| - T), & |W_N| > T \\ 0, & |W_N| \leq T \end{cases} \quad (17)$$

式中： X_N 为去噪后的小波系数； W_N 为去噪前的小波系数； T 为阈值； $\text{sign}(W_N)$ 表示符号函数。

$$\text{sign}(W_N) = \begin{cases} 1, & W_N > 0 \\ -1, & W_N < 0 \end{cases} \quad (18)$$

阈值 T 选择通用阈值，计算公式为

$$T = \sigma \sqrt{2 \lg n} \quad (19)$$

式中： n 为故障信号的长度； σ 为噪声的标准差，可通过小波高频系数的中位数 W 估计。

$$\sigma = \frac{\text{median}(|W|)}{0.6745} \quad (20)$$

为验证噪声对故障识别与定位精度的影响，在电流故障数据中分别加入信噪比为 20、30、40 dB 的白噪声进行仿真验证。去噪后的评价指标如表 5 所示。

表 5 去噪后的评价指标

Table 5 Evaluation index after denoising

信噪比/dB	故障类型	SSIM	MSE
20	雷击故障	0.717	0.243 57
	雷击干扰	0.882	0.074 88
	正极接地故障	0.914	0.108 49
30	雷击故障	0.766	0.067 28
	雷击干扰	0.895	0.019 87
	正极接地故障	0.915	0.034 15
40	雷击故障	0.841	0.016 15
	雷击干扰	0.921	0.004 73
	正极接地故障	0.919	0.011 71

仿真结果表明在不同噪声强度下, 结构相似性 (structural similarity index, SSIM) 接近 1, 均方误差 (mean squared error, MSE) 均小于 0.3, 表明去噪效果较好并且信号细节保持程度较高。

以 45 km 处分别发生雷击故障、雷击干扰以及正极接地故障为例, 验证噪声对故障识别与定位的影响。噪声对故障识别和故障定位的影响分别如表 6 和表 7 所示。

表 6 噪声对故障识别的影响

Table 6 Effect of noise on fault identification

信噪比/dB	故障类型	K	识别结果
20	雷击故障	1.998 766	✓
	雷击干扰	1.045 630	✓
	正极接地故障	0.013 671	✓
30	雷击故障	2.242 129	✓
	雷击干扰	1.138 504	✓
	正极接地故障	0.001 787	✓
40	雷击故障	2.400 427	✓
	雷击干扰	1.187 137	✓
	正极接地故障	0.198 808	✓

表 7 噪声对故障定位的影响

Table 7 Effect of noise on fault location

信噪比/dB	故障类型	L_1	R_1	误差/m
20	雷击故障	22	37	588.235 805
	雷击干扰	6	22	294.118 192
	正极接地故障	4	23	-588.234 647
30	雷击故障	6	22	294.118 192
	雷击干扰	6	22	294.118 192
	正极接地故障	4	20	294.118 192
40	雷击故障	79	96	0.000 579
	雷击干扰	79	96	0.000 579
	正极接地故障	6	23	0.000 579

4.4 不同测距方法对比

为了验证本文所提方法更具测距精度优势, 选取文献[16]中所提的基于 EMD-TEO 的测距方法及文献[17]中所提的基于 VMD-TEO 的测距方法与本文方法进行仿真对比。其中 VMD 的参数设置为: 分

解层数为 5, 惩罚因子取 2500; 而 EMD 算法是根据信号本身的特性自适应地决定分解层数, 为避免过度分解和特征混叠等问题, 设置最大分解层数为 12。

在不同距离下发生雷击故障的误差对比如表 8 所示, 仿真结果表明, EMD-TEO 测距方法在故障点越靠近两端检测点时测距精度越高, 而 VMD-TEO 测距方法则是在故障点越靠近线路中间位置时测距精度越高, 而本文方法无论是在两端还是中间均更具有优势, 因此本方法在故障定位上具有更高的精度。

表 8 与其他方法的测距误差对比

Table 8 Comparison of ranging error of different algorithms

故障位置/km	误差/m		
	EMD-TEO	VMD-TEO	本文方法
36	-117.645 424	-264.704 23	-117.645 424
45	147.059 385	0.000 579	0.000 579
67	-88.237 252	-88.237 252	58.821 554

在相同的实验环境下, 将本文方法与 EMD-TEO 算法、VMD-TEO 算法进行耗时对比, 具体结果如表 9 所示。可以看出, 本文所提方法测距总耗时相较于 EMD-TEO 算法和 VMD-TEO 算法具有显著的优势。这表明, 在相同的条件下, 本方法能够更高效地完成测距任务, 并且在相同的条件下耗时更短, 进一步验证了其在实际应用中的潜力和优势。

表 9 与其他方法的测距时间对比

Table 9 Comparison of ranging time with different methods

步骤	步骤耗时/s		
	EMD-TEO	VMD-TEO	本文方法
数据处理	0.956 205 7	0.951 895 5	0.985 763 3
模态分解	0.378 867 8	1.824 649 4	0.097 079
故障测距	0.077 776 2	1.818 240 7	0.273 708 4

5 结论

针对光伏制氢系统输电线路故障识别与定位精准度低、快速性差以及传统故障数据分解及其改进方法存在模态混叠、端点效应、计算量大等问题, 利用双端电气量, 提出一种新的故障识别与定位方法, 结论如下。

1) 对线路两端的零模电流电气量进行小波分解, 然后根据不同故障类型下故障信号的能量成分不同, 提出了基于小波分解依据不同分解层的能量比进行故障识别的方法。经仿真验证, 所提方法能可靠识别出雷击故障、雷击干扰与正极接地故障。

2) 对线路两端的线模电流电气量进行小波分解, 然后使用 TKEO 对故障电流行波的波头进行标定, 之后根据线模行波传播速度及双端测距法对故

障进行定位,提出了一种基于小波分解和 TKEO 的双端行波故障测距方法。

3) 仿真结果表明,在不同过渡电阻和故障距离下,本文方法测距结果基本不受影响,充分说明本文方法的精度较高,并且,在不同故障类型下测距精度均较高,这意味着本文所提方法在实际应用中能够降低对硬件设备的依赖,提高系统的经济性和实用性。

参考文献

- [1] 于帆,张硕.一种基于小波基函数的电网故障测距方法研究[J].计算机与数字工程,2012,40(8):15-17.
YU Fan, ZHANG Shuo. A power network fault location methods based on the wavelet function[J]. Computer and Digital Engineering, 2012, 40(8): 15-17.
- [2] 邓志祥,张帆,潘建兵,等.基于零模-线模波速差的配电网单端测距新方法[J].电网与清洁能源,2023,39(1):78-84.
DENG Zhixiang, ZHANG Fan, PAN Jianbing, et al. A new method of traveling wave ranging in distribution networks based on the difference between zero-and aerial-mode velocities[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(1): 78-84.
- [3] 王凯亮,曾远方,李家淇,等.基于希尔伯特-黄变换的新型配电网系统行波故障定位仿真研究[J].供用电,2023,40(9):43-49.
WANG Kai liang, ZENG Yuanfang, LI Jiaqi, et al. Simulation study on traveling wave fault location of new distribution network system based on Hilbert-Huang transform[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(9): 43-49.
- [4] 刘晓燕.改进的 Hilbert-Huang 变换在电缆故障检测中的应用[D].西安:西安科技大学,2018.
LIU Xiaoyan. The application of improved Hilbert-Huang transform in cable detection[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018.
- [5] 黄威博.模块化多电平柔性直流输电线路保护方法研究[D].北京:北京交通大学,2021.
HUANG Weibo. Research on protection method of modular multilevel converter HVDC transmission line[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [6] 郭威.配电网故障类型辨识及故障选线定位方法的研究[D].北京:华北电力大学,2022.
GUO Wei. Research on method of fault type identification and fault line selection and fault location for distribution line[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [7] 裴东锋,刘勇,李勇,等.参数智能优化变分模态分解的输电短路信号提取[J].制造业自动化,2024,46(4):87-92,101.
PEI Dongfeng, LIU Yong, LI Yong, et al. Parameter intelligent optimization variational mode decomposition for short-circuit signal extraction[J]. Manufacturing Automation, 2024, 46(4): 87-92, 101.
- [8] 高淑萍,吕宇星,宋国兵,等.利用改进变分模态分解突变能量的直流配电网保护方法[J].西安交通大学学报,2023,57(5):159-170.
GAO Shuping, LÜ Yuxing, SONG Guobing, et al. A DC distribution network protection method based on improved VMD and abrupt energy[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(5): 159-170.
- [9] MUZZAMMEL R, RAZA A. Low impedance fault identification and classification based on boltzmann machine learning for HVDC transmission systems[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(2): 440-449.
- [10] 朱鹏,夏向阳,李明德,等.基于能量比值分析的直流输电线路故障判别[J].中国电力,2020,53(8):85-90,99.
ZHU Peng, XIA Xiangyang, LI Mingde, et al. Fault identification of DC transmission lines based on energy ratio analysis[J]. Electric Power, 2020, 53(8): 85-90, 99.
- [11] 齐国强,王增平,裘愉涛,等.基于信号复杂度衰减的特高压直流输电线路雷电暂态识别方法[J].电力系统保护与控制,2018,46(17):1-8.
QI Guoqiang, WANG Zengping, QIU Yutao, et al. Transient identification method of lightning strokes based on the attenuation of signal complexity for UHVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 1-8.
- [12] 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.
- [13] 张大海,杨宇辰,刘艳梅,等.基于 EMD 与 Spearman 相关系数的混合直流线路纵联保护方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(9):1-11.
ZHANG Dahai, YANG Yuchen, LIU Yanmei, et al. Hybrid HVDC line pilot protection method based on EMD and Spearman correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 1-11.
- [14] 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.
- [15] 白浩, 钟振鑫, 李巍, 等. 基于 CEEMD 和 NTEO 的故障行波定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 50-59.
BAI Hao, ZHONG Zhenxin, LI Wei, et al. A fault traveling wave location method based on CEEMD and NTEO[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 50-59.
- [16] 刘淼. 基于 EMD 和 TEO 的线缆混合型配电线路故障定位的研究[D]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2021.
LIU Miao. Research on fault location of cable hybrid distribution line based on EMD and TEO[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Engineering, 2021.
- [17] 高艳丰, 朱永利, 闫红艳, 等. 基于 VMD 和 TEO 的高压输电线路雷击故障测距研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 24-33.
GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. Study on lightning fault locating of high-voltage transmission lines based on VMD and TEO[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 24-33.
- [18] 王洪彬, 周念成, 王伟, 等. 基于行波模式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.
- [19] 池梓斌, 夏成军, 杨明嘉. 基于参数优化 VMD 和 TET 的柔性直流输电线路单端故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(4): 1-11.
CHI Zhibin, XIA Chengjun, YANG Mingjia. Single-end fault location method for MMC-HVDC transmission lines based on parameter-optimized VMD and TET[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(4): 1-11.
- [20] 王艳婷, 莫文斌, 白明远, 等. 基于电压行波波形特征的柔性直流输电线路雷击识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 31-44.
WANG Yanting, MO Wenbin, BAI Mingyuan, et al. Lightning interference identification method based on voltage traveling wave waveform characteristics for flexible DC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 31-44.
- [21] 顾彦彬, 宋国兵, 郭安祥, 等. 针对直流线路行波保护的雷击识别方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3837-3845, 4024.
GU Yaobin, SONG Guobing, GUO Anxiang, et al. A lightning recognition method for DC line traveling-wave protection of HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3837-3845, 4024.
- [22] 刘永浩, 蔡泽祥, 徐敏, 等. 基于波速优化与模量传输时间差的直流线路单端行波测距新算法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(10): 72-76.
LIU Yonghao, CAI Zexiang, XU Min, et al. Single-end fault location algorithm based on traveling wave speed optimization and modal propagation time difference for DC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 72-76.
- [23] 王永进, 樊艳芳, 唐勇, 等. 考虑强非线性和波速变化特性的特高压直流输电线路故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 17-25.
WANG Yongjin, FAN Yanfang, TANG Yong, et al. Fault location method for UHVDC transmission lines considering strong nonlinearity and wave velocity variation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 17-25.
- [24] 张腾跃. 基于互相关算法的高压直流线路故障测距与保护方法研究[D]. 南宁: 广西大学, 2023.
ZHANG Tengyue. Research on fault location and protection method of HVDC line based on cross-correlation algorithm[D]. Nanning: Guangxi University, 2023.
- [25] 尹欢欢. 计及波速变化的特高压直流输电线路故障测距方法[D]. 济南: 山东大学, 2020.
YIN Huanhuan. Fault location algorithm for UHVDC transmission lines considering wave speed changes[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [26] 邢志杰, 田行军, 刘宇晰, 等. 电缆-架空线混合线路行波故障测距算法研究[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3540-3546.
XING Zhijie, TIAN Xingjun, LIU Yuxi, et al. Research of traveling wave fault location algorithm for the overhead line-cable hybrid line[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3540-3546.
- [27] SHU H, WANG S, LEI S. 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): 1-11.

收稿日期: 2024-09-28; 修回日期: 2025-02-06

作者简介:

王海龙(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 1768884913@qq.com

何山(1974—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为可再生能源发电与并网控制。E-mail: 2513041660@qq.com

(编辑 周金梅)