

基于模量传输时间差的直流线路双端故障测距

刘群

安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001

摘要:针对传统高压直流输电线路双端测距依赖高精度同步对时,对通信通道要求较高的问题,提出利用故障行波线模、零模分量在线路中的传输时差来计算故障距离的双端测距方法。该方法通过提取故障行波两种模态分量的暂态信息,检测两种模量分别到达线路两端处的时刻,利用两者的时间差实现故障定位,克服了因两端检测装置时钟不同步所引起的误差。对于线模零模波速难以确定的问题,利用数学方法结合仿真数据拟合出波速曲线,再通过多次迭代过程不断对行波波速和故障距离进行优化,最后得到更准确的行波模量波速和故障距离值。在PSCAD/EMTDC仿真平台中搭建系统仿真模型,模拟时间不同步、不同故障距离和过渡电阻情况下的输电线短路状况,通过分析仿真,结果表明该方法定位准确性高,耐过渡电阻能力强,且不受时间不同步影响,具有良好的稳定性。

关键词:模量传输时间差;行波故障测距;高压直流输电线路

中图分类号:TM755 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2023.0001.009

Two-terminal Fault Location of DC Line Based on Modulus Transmission Time Difference

LIU Qun

School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Anhui Huainan 232001, China

Abstract: In order to solve the problem that traditional HVDC transmission lines have high requirements on communication channels when they rely on high-precision synchronous pairs, a two-terminal location method was proposed to calculate the fault distance by using the transmission time difference between fault traveling wave line mode and zero mode component in the line. The method extracted the transient information of the two modal components of the fault traveling wave, detected the moment when the two modal components arrived at the two ends of the line, and used the time difference between them to achieve fault location, overcoming the error caused by the unsynchronized clocks of the detection devices at both ends. For the problem that it was difficult to determine the wave speed of line-mode and zero-mode, the wave speed curve was fitted by mathematical methods combined with simulation data, and then the line wave speed and fault distance were continuously optimized through multiple iterations. Finally, more accurate values of the traveling mode wave speed and fault distance were obtained. A system simulation model was built in the PSCAD/EMTDC simulation platform to simulate the short-circuit condition of transmission lines under the condition of time asynchronism, different fault distances, and transition resistance. Through analysis and simulation, the results show that the method has high positioning accuracy, strong resistance to transition resistance, and good stability without the influence of time asynchronism.

Keywords: modulus transmission time difference; traveling wave fault location; high voltage direct current (HVDC) transmission lines

1 引言

高压输电线路承担着传输电能的重任,关乎电力

系统运行的安全和可靠。由于高压直流输电线路输送距离比较长,沿线环境气候复杂,途经多雷区,所以导

收稿日期:2021-12-14 **修回日期:**2022-05-18 **文章编号:**1672-058X(2023)01-0053-06

作者简介:刘群(1997—),男,安徽宣城人,硕士研究生,从事电力系统故障定位研究。

引用格式:刘群.基于模量传输时间差的直流线路双端故障测距[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2023,40(1):53—58.

LIU Qun. Two-terminal fault location of DC line based on modulus transmission time difference [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2023, 40(1): 53—58.

致输电线路故障频发。因此,实现精确定位输电线路中故障位置,从而快速准确地切除线路故障,对电力系统的稳定运行有着非常重要的意义^[1-4]。

当前,直流输电线路故障定位普遍采用行波法^[5]。传统的行波测距无论是单端法还是双端法,都存在测距误差大、可靠性低等问题,无法实现稳定可靠的高精度故障定位^[6-7]。文献[8]提出利用连接两端线路的信道,通过发送的脉冲信号在信道中的传输时间来计算初始故障行波到达两头检测点的时差,从而完成故障测距计算。该方法无需双端精确对时,仅靠简单的双端通信便能完成,但要求两端硬件设备参数保持一致且要保证信号在信道中的传输速率相同,实际应用中稳定性较差;文献[9]通过把故障检测装置和线路保护装置结合一体,利用线路保护装置内的时钟计算初始故障行波波头到达两端的时间差,实现故障定位计算,摆脱了对外部 GPS 时钟信号的依赖,通过一体化装置的内部时钟计算两侧外部时钟的同步偏差,从而对外部时钟是否同步起到校验作用,但该方法定位准确性低,测距效果不理想;文献[10]提出在线路中间另设置一固定距离的测量点,通过比较该点发生故障时故障行波波头到达线路末端检测点的时间与实际故障情况下故障行波波头到达线路末端检测点的时间来判断故障发生区段,利用两测量点所测时间比例计算故障距离,消除了线路弧垂、行波波速的影响,有效减少了测距误差,提高了故障定位准确性,但该方法仍依赖两检测点同步时钟高精度对时,对通信通道要求较高,受时间不同步影响明显;文献[11]提出一种利用双端非同步数据进行测距计算的行波测距方法,该方法计算出的行波波速更加准确,在保证与双端行波法测距精度基本相同的情况下,无需两头检测装置的时钟设备保持高度同步,但该方法在大过渡电阻短路情况下受影响较大,测距精度有明显下降,不具有耐受高过渡电阻的能力。

针对上述行波测距方法中所存在的不足,为了进一步提高行波故障定位的精确性,消除时间不同步以及行波波速对测距的影响,本文利用故障行波线模和零模分量在线路传输过程中的不同特性,提出新的直流线路双端故障测距算法。同时,为消除行波模量传输过程中波速变化的影响,运用插值拟合方法对模量波速不断进行优化,计算出更贴近真实值的行波波速。通过仿真实验结果表明:本方法测距误差小,不受两端时钟不同步影响,在多种过渡电阻接地情况下都具有良好的适应性。

2 传统双端行波故障定位

2.1 双端法行波定位原理

当直流输电线路区间发生故障时,在故障点会分别产生向线路两侧传输的故障行波^[12],如图 1 所示。

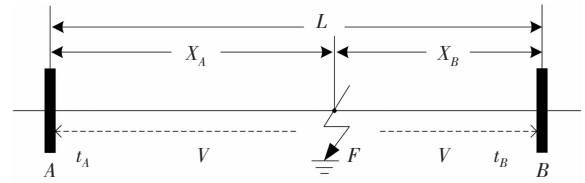


图 1 双端法行波定位原理图

Fig. 1 Schematic diagram of two-terminal method traveling wave positioning

假设故障发生后,初始故障行波以速度 V (根据工程经验,一般取 94% 左右光速) 向线路两端传播, A 、 B 两端故障检测装置检测到的行波波头到达时刻分别为 T_A 和 T_B , 故障点 F 到 A 检测端和 B 检测端的距离为 X_A 和 X_B , 输电线路 AB 全长 L 。根据原理图,有如下关系式:

$$\begin{cases} \frac{X_A}{V} - \frac{X_B}{V} = T_A - T_B \\ X_A + X_B = L \end{cases}$$

求解上述方程组,可得到传统双端行波法的测距公式为

$$\begin{cases} X_A = \frac{L + (T_A - T_B) \times V}{2} \\ X_B = \frac{L - (T_A - T_B) \times V}{2} \end{cases} \quad (1)$$

2.2 时间不同步对双端行波定位的影响

当线路两端故障检测装置的时钟无法达到完全同步时,两端故障检测点记录的故障行波抵达时刻必然存在误差^[13]。假设两端故障检测装置存在一个 Δt 的不同步误差,则 Δt 是某一时刻下 A 端检测点标示时刻 T'_A 与 B 端检测点标示时刻 T'_B 之差,即

$$|T'_A - T'_B| = \Delta t \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中,可得

$$\begin{cases} X'_A = \frac{L + (T'_A + T'_B + \Delta t) \times V}{2} \\ X'_B = \frac{L - (T'_A - T'_B - \Delta t) \times V}{2} \end{cases}$$

实际测距误差为

$$\Delta d = \frac{\Delta t \times V}{2} \quad (3)$$

由式(3)可得, Δt 将影响测距精度,双端时钟不同步的影响不容忽略。

2.3 波速变化对行波故障测距的影响

直流线路发生故障时产生的故障行波是由无数个频率分量混叠而成的,不同频率分量的行波波速不同。由行波波速的计算公式可知,行波波速受频率影响,频率越高行波波速越快^[14-16]。在线路中传播时,高频行波分量比低频行波分量会有更明显的幅值衰减,

导致到达线路检测端时的高频分量由于幅值太小而无法被检测到。故障行波的波速由实际工况下检测装置所能分辨最小幅值的次高频行波分量决定。随着传输距离和不同过渡电阻的影响,检测装置每次识别出的次高频行波分量的频率 f 都不是定值,即行波波速不是一个定值。图 2 为实际波速示意图。

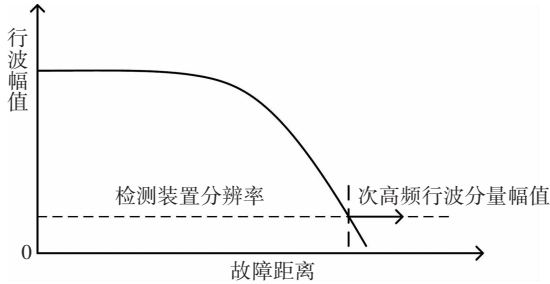


图 2 行波幅值变化

Fig. 2 Diagram of traveling wave amplitude variation

若假设 V_A 和 V_B 分别表示故障行波到达检测装置 A 和检测装置 B 时的实际波速,则式(1)可表示为

$$\begin{cases} X_A = \frac{LV_A + V_A V_B (T_A - T_B)}{V_A + V_B} \\ X_B = \frac{LV_B - V_B V_A (T_A - T_B)}{V_A + V_B} \end{cases}$$

固定经验波速与故障行波到达检测端时的实际波速误差为

$$\begin{cases} \Delta V_A = V_A - V \\ \Delta V_B = V_B - V \end{cases}$$

ΔV_A 、 ΔV_B 大小与 V_A 和 V_B 有关,由上述行波在线路中的传播特性可知:行波波速随故障距离变化而变化,所以 ΔV_A 、 ΔV_B 同时受故障距离和固定经验波速 V 影响。图 3 为选取固定经验波速 $V=0.94c$ ($c=3 \times 10^8$ km/s) 时, ΔV_A 受故障距离影响变化情况。

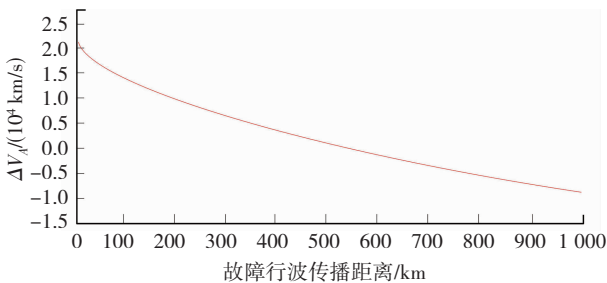


图 3 固定经验波速下 ΔV_A 受故障距离影响变化曲线

Fig. 3 Variation curve of ΔV_A affected by fault distance at fixed empirical wave velocity

对图 3 中 ΔV_A 的变化情况分析,可看出在线路近端和远端处发生故障时,故障行波实际波速与固定经验波速之间误差较大,线路中部发生故障时波速误差较小;同时,发生远端故障和近端故障时故障行波波速的衰减程度也有差异。所以,取某一固定波速代替实

际波速进行测距计算时,测距结果不理想,可靠性低。

3 故障测距算法的改进

3.1 测距原理

直流输电线路发生故障时产生的故障行波可分为零模分量和线模分量^[17],利用两者在输电线中的传播时间差,可用于无需双端时钟同步的双端测距原理中。设零模分量波速为 V_0 ,线模分量波速为 V_1 ,A、B 两端故障检测装置记录的行波零模分量波头到达时刻分别为 T_{A0} 、 T_{B0} ,行波线模分量波头到达时刻分别为 T_{A1} 、 T_{B1} ,如图 4 所示。

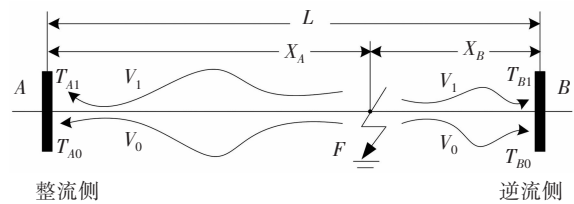


图 4 模量传输原理图

Fig. 4 Schematic diagram of modulus transfer

根据图 4,可建立方程如下:

$$\begin{cases} X_A = V_1 (T_{A1} - T_0) \\ X_A = V_0 (T_{A0} - T_0) \\ X_B = V_1 (T_{B1} - T_0) \\ X_B = V_0 (T_{B0} - T_0) \\ X_A + X_B = L \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: T_0 是线路发生故障时刻, X_A 、 X_B 分别是故障点到整流侧和逆流侧的距离, L 为线路全长。

分别联立式(4)中各式,求解可得到:

$$\begin{cases} X_A = \frac{V_1 V_0 (T_{A1} - T_{A0})}{V_0 - V_1} \\ X_B = \frac{V_1 V_0 (T_{B1} - T_{B0})}{V_0 - V_0} \end{cases}$$

则有

$$\begin{cases} \Delta X_{AB} = X_A - X_B = \frac{V_1 V_0}{V_0 - V_1} \Delta t \\ \Delta t = (T_{A1} - T_{A0}) - (T_{B1} - T_{B0}) \end{cases}$$

从而可得到新的双端行波测距基本公式:

$$\begin{cases} X_A = \frac{L}{2} + \frac{V_1 V_0}{V_0 - V_1} \Delta t \\ X_B = \frac{L}{2} - \frac{V_1 V_0}{V_0 - V_1} \Delta t \end{cases} \quad (5)$$

对比式(1)可知,新的双端行波测距基本不受时间不同步影响,有着良好的测距精度。

3.2 模量波速曲线拟合

故障行波波速和故障距离之间存在某种变化关

系,受工程实际中众多其他因素影响,这种关系难以代数化。运用插值法思想,构造一个函数多项式 $F(x)$,使其满足 $F(x_n) = V(x_n)$ ($n=0,1,2,\dots,n$),则可将 $F(x)$ 作为插值函数对 $V(x)$ 进行拟合,从而获取故障行波波速受故障距离影响的变化曲线。

在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上建立实际直流输电线路的仿真模型,通过仿真得到不同故障距离下的故障行波数据,在 Matlab 中进行数据计算得到对应故障距离下的行波波速,用得到的多组行波波速 V_n 和故障距离 X_n 构造插值函数 $F(x)$ 。本文搭建的仿真系统模型,线路全长为 1 000 km,从线路 50 km 处开始,每隔 90 km 分别设置电阻值为 0 Ω 、250 Ω 、500 Ω 的接地性故障,得到 3 组不同过渡电阻下的 11 个故障距离 X_n 和对应的行波波速 V_n ,由此构造插值函数 $F(x)$ 用于模量波速曲线拟合。图 5 为行波线模、零模分量在不同故障距离及过渡电阻下的波速拟合曲线。

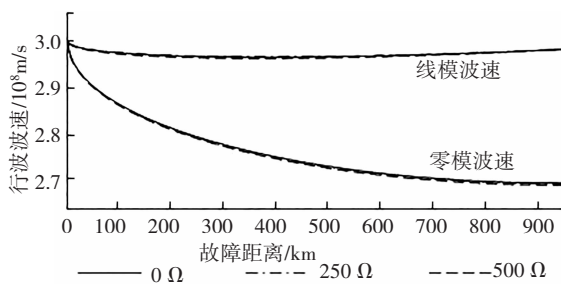


图 5 行波线模、零模分量波速拟合曲线

Fig. 5 Velocity fitting curve of linear mode and zero mode component of traveling wave

由图 5 分析可知:故障行波在线路传播过程中,其线模分量波速相对稳定,变化较小;零模分量波速随故障距离增加明显减小,变化较大。不同过渡电阻故障情况下,故障行波线模、零模分量波速基本不发生改变,因此实际计算行波波速时,勿需考虑过渡电阻对行波波速变化的影响。

3.3 波速优化和故障距离逐步逼近的测距算法

故障发生后,两端测距装置分别提取故障行波零模分量和线模分量波形,利用 IHHT 算法标定两个模量到达整流侧的时刻 T_{A0} 、 T_{A1} 和到达逆流侧的时刻 T_{B0} 、 T_{B1} 。通过预设的零模、线模行波波速初值,由式(5)可计算出初始故障距离 X_{A0} 、 X_{B0} 。然后,用 X_{A0} 、 X_{B0} 作为插值输入量分别代入 $X-V_0$ 和 $X-V_1$ 曲线求解更准确的波速 V_0 、 V_1 ,并利用此波速求得更接近实际故障位置的 X_{A1} 、 X_{B1} 。重复上述“然后”中步骤,直至测距结果满足收敛条件,则测距计算结束,输出测距结果 $X_A = (X_{An} + X_{An-1})/2$ 和 $X_B = (X_{Bn} + X_{Bn-1})/2$ 。随着迭代次数增加,线模、零模行波波速 V_1 、 V_0 和故障距离 X_A 、 X_B 逐渐收敛于真实值。算法原理流程图如图 6 所示。

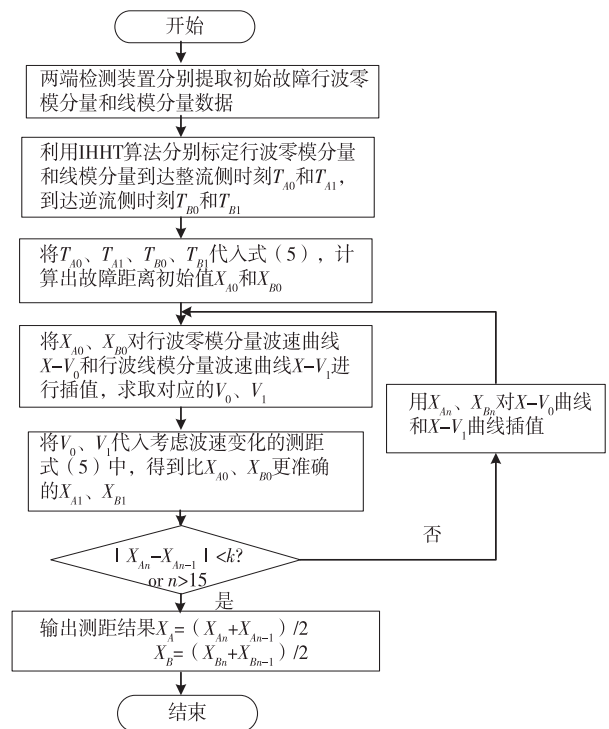


图 6 算法原理流程图

Fig. 6 Flow chart of algorithm principle

4 仿真分析

在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上建立如图 7 所示 ± 800 kV 双极直流输电系统模型。输电线路采用 Frequency Dependent (Phase) Model Options 模型^[18],线路全长 1 000 km,在 $t=0.2$ s 时发生故障,故障持续时间为 0.01 s,采用 16 位 A/D 采样,采样频率取 1 MHz。将仿真后的实验数据在 Matlab 中进行测距计算。

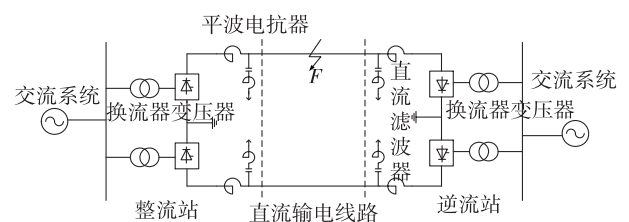


图 7 双极直流输电系统模型图

Fig. 7 Model diagram of bipolar DC transmission system

4.1 时间不同步对故障测距的影响

表 1 为传统双端法行波定位与本文新算法定位在同一故障距离下不同对时误差时的测距结果对比。故障点 F 距离整流站母线(A 端)600 km,过渡电阻 $R_f=0$ 。

表 1 中 Δt 为两端检测装置对时误差, ΔX_A 、 ΔX_B 是故障距离绝对误差, ε_A 、 ε_B 是相对误差百分数。由表 1 测距结果可知:传统双端法故障测距受时间不同步影响较大,而本文提出的基于模量传输时间差的新双端法故障测距对两端同步对时无要求,且测距精度远远高于传统双端法。

表 1 不同定时误差对故障测距的影响 (取 $V=2.8 \times 10^5$ km/s 为固定经验波速)

Table 1 Influence of different timing errors on fault location (taking $V=2.8 \times 10^5$ km/s as the fixed empirical wave velocity)

算 法	$\Delta t/\mu s$	X_A/km	$\Delta X_A/km$	$\varepsilon_A/\%$	X_B/km	$\Delta X_B/km$	$\varepsilon_B/\%$
传统双端 法定位	0	597.31	-2.69	-0.448	402.69	2.69	0.673
	1	597.17	-2.83	-0.472	402.83	2.83	0.708
	5	598.01	-1.99	-0.332	401.99	1.99	0.498
	10	595.91	-4.09	-0.682	404.09	4.09	1.023
本文算法	0	600.48	0.48	0.08	399.52	-0.48	-0.12
	1	600.48	0.48	0.08	399.52	-0.48	-0.12
	5	600.48	0.48	0.08	399.52	-0.48	-0.12
	10	600.48	0.48	0.08	399.52	-0.48	-0.12

4.2 不同故障位置对故障测距的影响

表 2 为过渡电阻 $R_f=0$, 不同故障位置下两种算法的测距结果仿真。由测距结果可看出:传统双端法测距在线路两端故障时误差较大,测距受故障位置影响明显;本文提出的算法误差较小,测距相对误差基本控制在 3% 以内,在线路全长范围内都具有较好的测距结果,基本不受故障位置影响。

表 2 不同故障位置对故障测距的影响
(取 $V=2.8 \times 10^5$ km/s 为固定经验波速)

Table 2 Influence of different fault locations on fault locations
(taking $V=2.8 \times 10^5$ km/s as the fixed empirical wave velocity)

过渡电阻 R_f/Ω	故障距离 L_A/km				
	80	210	430	620	840
0	76.75	208.77	429.57	620.33	840.17
100	76.75	208.74	429.56	620.33	840.26
200	76.64	208.74	429.56	620.25	840.26
300	76.63	208.74	429.56	620.25	840.26
400	76.64	208.73	429.37	620.25	840.26
500	76.55	208.57	429.37	620.25	840.45

表 3 本文新型双端测距算法的测距结果

Table 3 Distance measuring results of new two-terminal ranging algorithm

算 法	故障距离 L_A/km	X_A/km	$\varepsilon_A/\%$	X_B/km	$\varepsilon_B/\%$
220	225.76	2.62	774.24	-0.74	
330	332.74	0.83	667.26	-0.41	
440	442.33	0.53	557.67	-0.42	
550	548.09	-0.35	451.91	0.42	
660	656.85	-0.48	343.15	0.93	
770	763.05	-0.90	236.95	3.02	
880	867.59	-1.41	132.41	10.34	
本文 算法	110	107.63	-2.15	892.37	-0.27
	220	218.83	-0.53	781.17	-0.15
	330	330.54	0.16	669.46	0.08
	440	439.63	-0.08	560.37	-0.07
	550	550.26	0.05	449.74	0.06
	660	659.51	-0.07	340.49	-0.14
	770	769.27	-0.09	230.73	-0.32
	880	880.12	0.01	119.88	0.10

注: L_A 是故障点 F 与整流站 (A 端) 检测装置之间真实距离。

4.3 过渡电阻对故障测距的影响

表 3 是在不同故障距离和不同过渡电阻下采用基于模量传输差的新双端算法测距结果。根据仿真结果可以得出结论:基于模量传输时差故障距离逐步逼近的新型双端测距算法对过渡电阻有良好的适应性,各种接阻情况下测距精度都较稳定,且在远端高阻故障时仍有较高精确度,具有良好的抗过渡电阻能力。

5 结 论

本文提出的基于模量传输时差的直流线路双端测距,经仿真验证:其不受线路两端检测装置时钟不同步影响,抗过渡电阻能力强,算法具有良好的稳定性;在线路全长范围内都具有较高的测距精度,测距相对误差基本可以控制在 4% 左右,能有效满足实际工程中测距要求。

参考文献 (References):

[1] 武建卫, 邵剑峰. 计及波速变化的反行波直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 121—128.
WU Jian-wei, SHAO Jian-feng. Fault location of DC transmission lines based on backward waves considering wave speed changes[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 121—128.

[2] 杨明杰, 童晓阳, 张广骁. 基于极波模量时差的高压直流输电线路自适应单端保护[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(23): 117—124.
YANG Ming-jie, TONG Xiao-yang, ZHANG Guang-xiao. Adaptive single-end protection for HVDC transmission line based on time difference of pole wave mode components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 117—124.

[3] 王永进, 樊艳芳, 王勇, 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): 18—25.
WANG Yong-jin, FAN Yan-fang, WANG 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): 18—25.

[4] 孙广, 王阳, 薛枫, 等. 特高压直流输电线路改进双端行波故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48

- (14): 114—120.
SUN Guang, WANG Yang, XUE Feng, et al. Research on an improved double-terminal traveling wave fault location method for UHVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 114—120.
- [5] 张怿宁, 徐敏, 刘永浩, 等. 考虑波速变化特性的直流输电线路行波故障测距新算法[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 228—232.
ZHANG Yi-ning, XU Min, LIU Yong-hao, et al. A novel travelling wave fault location algorithm for HVDC transmission lines considering variation characteristics of wave speed[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 228—232.
- [6] 李自乾, 樊艳芳, 胡剑生. 不受波速影响的特高压直流输电线路单端故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 143—148.
LI Zi-qian, FAN Yan-fang, HU Jian-sheng. Single terminal fault location method of UHVDC transmission line immune to wave speed[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 143—148.
- [7] 段宽, 樊艳芳, 王永进, 等. 考虑波速及弧垂效应的特高压直流线路测距方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(6): 22—27.
DUAN Kuan, FAN Yan-fang, WANG Yong-jin, et al. Fault location method for UHVDC transmission line considering effects of wave velocity and sag[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(8): 21—24.
- [8] 李振兴, 吴李群, 谭洪, 等. 基于简单通信的双端行波测距新方法[J]. 中国电力, 2018, 51(3): 74—79.
LI Zhen-xing, WU Li-qun, TAN Hong, et al. A novel method for double terminal traveling wave fault location based on simple communication[J]. Electric Power, 2018, 51(3): 74—79.
- [9] 谈浩, 徐晓春, 赵青春, 等. 两侧时钟同步校验及不依赖对时的行波测距[J]. 电气技术, 2019(1): 80—83.
TAN Hao, XU Xiao-chun, ZHAO Qing-chun, et al. Two side time synchronization check and travelling wave fault location independent of synchronize time [J]. Electrical Engineering, 2019(1): 80—83.
- [10] 黄元亮, 郝真真, 姜甜甜, 等. 一种新的输电线双端行波故障定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(1): 20—29.
HUANG Yuan-liang, HAO Zhen-zhen, JIANG Tian-tian, et al. Novel two-terminal travelling wave fault location algorithm for transmission line [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(1): 20—29.
- [11] 张科, 朱永利, 马长啸, 等. 基于优化行波波速的输电线路行波测距新方法[J]. 华北电力大学学报, 2018, 45(4): 35—40.
ZHANG Ke, ZHU Yong-li, MA Chang-xiao, et al. A new traveling wave fault location method based on optimized traveling wave velocity calculation for transmission lines [J]. Journal of North China Electric Power University, 2018, 45(4): 35—40.
- [12] 顾婷. 基于双端行波法的多端输电线故障测距研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.
GU Ting. Research on fault location of multi-terminal transmission line based on double terminal traveling wave method [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017.
- [13] 胡冰颖, 李梅. 基于零模线模时差的配电网双端行波故障测距[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 114—120.
HU Bing-ying, LI Mei. Double ended traveling wave fault location in distribution network based on the time difference of zero-mode and line-mode [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 114—120.
- [14] 张力. 基于行波分析的HVDC输电线路保护的研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
ZHANG Li. Study on HVDC transmission line protection based on the analysis of traveling wave [D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [15] 闫丽梅, 付春耕, 徐建军, 等. 基于改进插值HHT算法的输电线路故障测距[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(9): 1—6.
YAN Li-mei, FU Chun-geng, XU Jian-jun, et al. Transmission line fault location based on improved HHT interpolation algorithm [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(9): 1—6.
- [16] 张媛媛, 于立杰, 王永生, 等. 双端输电线路故障定位方法研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(16): 143—146.
ZHANG Yuan-yuan, YU Li-jie, WANG Yong-sheng, et al. Research on fault location method of two-terminal transmission line [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(16): 143—146.
- [17] 陈仕龙, 李建平, 谢佳伟, 等. 利用模量传输时间差的特高压直流线路故障测距[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(8): 21—24.
CHEN Shi-long, LI Jian-ping, XIE Jia-wei, et al. Single-ended fault location for UHVDC transmission line based on propagation time gap between zero and aerial mode [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(8): 21—24.
- [18] 朱金涛, 辛业春. 柔性高压直流输电仿真技术研究方法综述[J]. 智慧电力, 2021, 49(3): 1—11.
ZHU Jin-tao, XIN Ye-chun. Review of research on simulation methods of VSC-HVDC transmission system [J]. Smart Power, 2021, 49(3): 1—11.