

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230947

# 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

王艳婷, 莫文斌, 白明远, 梁栋, 贾嵘

(西安理工大学电气工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 柔性直流输电系统的线路主保护速动性要求极高, 线路受雷击干扰后引入大量高频暂态信号易引发线路保护误动作。针对此问题, 首先根据行波的传播规律分析雷击后线路电压行波特征, 得出雷击干扰与故障的特征差异。雷击干扰时, 暂态过程中电压行波经线路边界反射后波头极性不发生改变, 行波波头到达线路边界的时间间隔大。雷击故障时, 电压行波经故障点反射后波头极性发生改变, 行波波头到达线路边界的时间间隔小。然后, 根据电压行波波形特征差异提出长短窗结合的雷击干扰识别方法。最后, 利用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件对所提方法进行验证。结果表明, 所提出的雷击干扰识别方案能够快速、可靠、准确地识别雷击干扰与故障情况, 不受雷击位置、线路参数、雷电流参数和噪声的影响。

**关键词:** 柔性直流输电; 雷击干扰识别; 行波极性特征; 行波时间特征; 可靠性

## Lightning interference identification method based on voltage traveling wave waveform characteristics for flexible DC transmission lines

WANG Yanting, MO Wenbin, BAI Mingyuan, LIANG Dong, JIA Rong

(School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The speed requirement for the main protection of the MMC-HVDC system is extremely high. The introduction of a large number of high-frequency transient signals after the line is disturbed by lightning strikes can easily lead to misoperation of line protection. To solve this problem, this paper first analyzes the characteristics of a line voltage traveling wave after lightning strike according to the propagation law of traveling waves. The characteristic difference between lightning disturbance and fault is obtained. When lightning disturbance occurs, the polarity of the wave head does not change after the voltage traveling waves is reflected by the line boundary during the transient process, and the time interval between the traveling waves head and the line boundary is large; when the lightning fault occurs, the polarity of the voltage traveling waves changes after being reflected by the fault point, and the time interval between the traveling waves head and the line boundary is small. Then, based on voltage traveling waveform features, a lightning interference identification method combining long and short windows is proposed. Finally, the proposed method is validated using PSCAD/EMTDC electromagnetic transient simulation software. The results show that the proposed lightning interference identification scheme can quickly, reliably, and accurately identify lightning interference and fault conditions, independent of the location of lightning strikes, line parameters, lightning current parameters, and noises.

This work is supported by the Postdoctoral Science Foundation of China (No. 2021M690126).

**Key words:** flexible DC transmission; lightning interference identification; traveling wave polarity characteristics; traveling wave time characteristics; reliability

## 0 引言

在“双碳”目标背景下, 由于柔性直流输电技

术在新能源集中送出等方面具有显著优势, 目前已有大批柔性直流输电工程相继投运<sup>[1-3]</sup>。柔性直流输电系统具有“低阻尼、小惯量”特性, 直流线路发生故障后会在极短时间内产生极大的故障电流, 考虑到目前直流断路器切断电流能力的限制, 对柔性直流输电线路保护装置的速动性提出了苛刻的要

**基金项目:** 中国博士后科学基金项目资助(2021M690126);  
陕西省科技厅项目资助(2021JQ-482)

求,保护装置必须在故障发生后 3 ms 内可靠地判别故障<sup>[4-6]</sup>。暂态量保护作为柔直系统的主保护,主要依靠故障暂态信息实现故障判别<sup>[7]</sup>,但是当输电线路受到雷击干扰时,暂态过程中同样包含大量高频信号,与普通短路故障相似,极易引发暂态量保护的误判<sup>[8-9]</sup>,严重影响了保护的可靠性。因此,如何快速准确地识别雷击故障与雷击干扰是柔性直流输电系统面临的一个至关重要的问题。

国内外专家学者对雷击干扰识别做了一定研究,识别原理主要分为基于暂态频域特征和基于时域波形特征两类<sup>[10]</sup>。频域特征法主要利用雷击干扰和雷击故障暂态过程中不同频带能量的特征差异实现雷击干扰识别,通过构造高低频能量比判据实现雷击干扰与故障的识别,用到的方法有小波变换<sup>[11-12]</sup>、数学形态学<sup>[13]</sup>、数字滤波器<sup>[14]</sup>、经验模态分解<sup>[15]</sup>、HHT<sup>[16]</sup>等,但是线路高频分量易受线路参数、雷电流幅值、电流互感器传变特性等因素影响,频带选取不易确定,整定较为困难。

利用时域波形特征方面,文献[17]根据直流输电系统不同故障后电流波形波动程度的差异,提出利用差分电流幅值最大值构造防雷击干扰判据。文献[18]综合利用线模、零模电流的幅值、极大值之比以及变化率等特征,实现不同类型雷击故障和雷击扰动的识别。也有学者提出可以根据雷击发生前后电流变化大小的不同识别雷击干扰<sup>[19]</sup>。但这些方法的整定大多依赖于经验,且可能会受到直流输电线路结构以及线路参数的影响。文献[20]利用线路电流反复过零点特征分辨雷击干扰和故障,但是此方法会受到母线结构影响,如果线路的均匀性被破坏,识别结果会不准确。文献[21]针对柔性直流输电系统,提出利用故障前行波到达谷值点和过零点的差异实现故障与雷击干扰情况的区分,但未考虑雷击杆塔或避雷线干扰以及雷击故障情况。

综上所述,目前多数针对柔性直流输电线路雷击干扰识别方法的门槛值整定依赖于仿真结果或经验,且考虑的雷击类型不够全面,部分雷击干扰识别判别结果易受雷电流幅值、线路参数等因素影响。针对上述问题,本文对柔性直流输电系统受到雷击后的暂态行波过程展开分析,研究不同雷击故障和雷击干扰情况下的电压行波特征,提出基于电压行波波形特征的雷击干扰识别方法,该方法原理清晰、定值明确。PSCAD/EMTDC 仿真验证结果表明,所提出的识别方案能可靠、准确地识别不同类型雷击干扰与故障,不受雷电流幅值、雷击距离、雷电流模型、线路参数以及噪声的影响,具有良好的适用性。

## 1 系统模型

### 1.1 柔性直流输电系统

本文利用 PSCAD/EMTDC 软件搭建真双极双端柔性直流输电系统模型,并进行各类雷击干扰和雷击故障的仿真。图 1 为本文采用的双端柔性直流输电系统示意图。系统额定电压为 $\pm 500$  kV,额定传输容量为 3000 MVA,输电线路全长为 500 km,采样频率为 100 kHz。

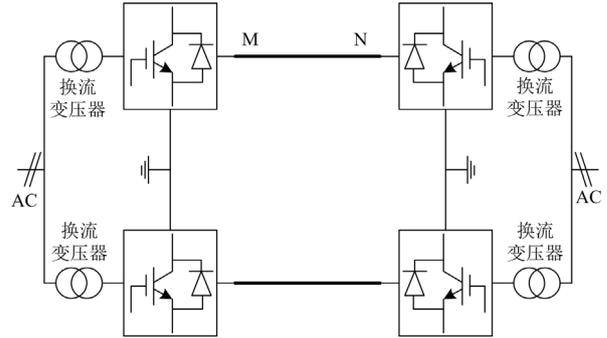


图 1 双端柔性直流输电系统

Fig. 1 Two-terminal bipolar MMC-HVDC transmission system

### 1.2 雷电流模型

大量工程实践证明雷电流波形近似指数衰减波,根据我国标准,本文雷电流采用负极性双指数波形<sup>[18]</sup>,表达式如式(1)所示。

$$i(t) = AI_L (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1)$$

式中:  $i(t)$  为雷电流瞬时幅值,单位为 kA;  $A$  为校正系数;  $I_L$  为雷电流幅值,单位为 kA;  $\alpha$  为雷电流波尾衰减系数;  $\beta$  为雷电流波头衰减系数。

在工程实践中一般以 1.2/50  $\mu$ s 的雷电流波形进行分析,具体波形如图 2 所示。

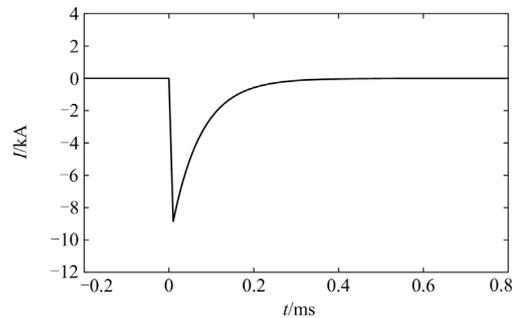


图 2 1.2/50  $\mu$ s 的雷电流模型 ( $I_L = 10$  kA)

Fig. 2 Lightning current model with 1.2/50  $\mu$ s ( $I_L = 10$  kA)

## 2 雷击后电压行波暂态特征分析

本文主要针对直击雷展开研究,根据雷击位置的不同,分为雷击塔顶、雷击避雷线和雷击导线,

其中雷击塔顶和雷击避雷线情况又称为反击, 雷击导线情况又称为绕击。雷击造成绝缘子闪络的为雷击故障; 未造成绝缘子闪络的为雷击干扰。

自然界雷电流主要为负极性, 因此发生雷击导线时多数情况击中正极线路。考虑正负极线路间存在耦合关系, 本文利用相模变换, 对线模分量和零模分量进行分析, 解耦公式如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} F_0 \\ F_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_p \\ F_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $F_0$  和  $F_1$  分别为零模分量和线模分量;  $F_p$  和  $F_n$  分别为正负极电气量。

## 2.1 雷击干扰电压行波特征分析

### 1) 线路边界处反射特性分析

发生雷击干扰后, 暂态行波从雷击点处沿输电线路向线路两端传播, 在线路边界处发生折反射。

根据行波理论分析雷击干扰情况下行波折反射特征。如图3所示,  $A$  为线路1和线路2的分界点, 线路1和线路2的波阻抗分别为  $Z_1$  和  $Z_2$ ,  $u_{1f}$  为由线路1向线路2传播的电压前行波, 在  $A$  点发生折反射, 分别产生折射波  $u_{2f}$  和反射波  $u_{1b}$ , 且折反射波表达式如式(3)所示。

$$\begin{cases} u_{2f} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} u_{1f} = H u_{1f} \\ u_{1b} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} u_{1f} = K u_{1f} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $H$  为折射电压波与入射电压波的比值, 称为折射系数;  $K$  为反射电压波与入射电压波的比值, 称为反射系数。

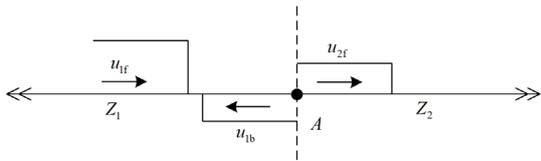


图3 电压行波折反射示意图

Fig. 3 Refraction and reflection diagram of voltage traveling wave

在柔性直流输电系统中, 电压行波在线路边界处发生折反射, 对应于式(3)  $Z_1$  为输电线路波阻抗,  $Z_2$  为线路边界元件及换流站共同作用的等值阻抗。根据换流站拓扑结构特征及线路边界处平波电抗器的作用,  $Z_2$  对高频雷电流行波呈高阻态<sup>[5]</sup>, 因此有

$$Z_2 > Z_1 \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)可以得到  $K > 0$ , 因此  $u_{1b}$  与  $u_{1f}$  保持同号, 反射电压波极性不变, 即负极性电压反行波沿输电线路传播到换流站边界处, 电压行波

经过反射后, 仍然为负极性。

### 2) 绕击与反击情况下首行波特征分析

绕击情况下, 相当于在正极线路叠加一个负极性电压源, 由于正负极线路耦合系数  $k_c$  为负且幅值  $|k_c| < 1$ , 在负极线路会耦合出正极性电压波动, 且正极线路的电压行波幅值较负极电压行波幅值大, 根据式(5)计算电压反行波零模分量和线模分量。

$$\begin{cases} \Delta u_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (\Delta u_p + \Delta u_n) = \frac{1+k_c}{\sqrt{2}} \Delta u_p \\ \Delta u_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} (\Delta u_p - \Delta u_n) = \frac{1-k_c}{\sqrt{2}} \Delta u_p \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\Delta u_0$  和  $\Delta u_1$  分别为电压反行波零模分量和线模分量;  $\Delta u_p$  和  $\Delta u_n$  分别为正负极电压故障分量。

可以得出绕击情况下电压反行波线模分量和零模分量的首行波均为负极性, 即:  $\Delta u_0 < 0$ ,  $\Delta u_1 < 0$ 。

与绕击情况不同, 发生反击(如雷击塔顶)后, 雷电流一部分沿杆塔向大地传播, 一部分沿架空地线向两侧传播, 输电线路因耦合作用感应出故障行波。雷击塔顶情况下, 相当于在塔顶附加负极性电压源  $\Delta u_n < 1$ , 雷击附加源与正极线路和负极线路的耦合系数近似相等, 在正负极输电线路中同时耦合出幅值相差不大的正负极故障电压分量  $\Delta u_p$  和  $\Delta u_n$ 。

$$\Delta u_p \approx \Delta u_n \approx k_c \Delta u_n \quad (6)$$

但由于初始情况正极电压为 500 kV, 即  $u_{p0} = 500$  kV, 负极电压为 -500 kV, 即  $u_{n0} = -500$  kV,  $u_{p0}$  和  $u_{n0}$  分别为正负极正常运行电压值。叠加近似相同的正极性电压故障分量后, 正极电压  $u_p$  的过电压情况远大于负极电压  $u_n$ , 如式(7)所示。

$$u_p = \Delta u_p + u_{p0} \gg u_n = \Delta u_n + u_{n0} \quad (7)$$

线路装设的避雷器能够限制过电压幅值, 对幅值较高的正极线路电压的削减量远大于对幅值较低的负极线路电压的削减量。因此, 实际正极电压的变化量  $\Delta u'_p$  小于负极电压的变化量  $\Delta u'_n$ 。

根据式(5)计算出反击情况下电压反行波零模分量和线模分量, 如式(8)所示。

$$\begin{cases} \Delta u_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (\Delta u'_p + \Delta u'_n) \\ \Delta u_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} (\Delta u'_p - \Delta u'_n) \end{cases} \quad (8)$$

可得反击情况下, 线模分量首行波波头仍为负极性,  $\Delta u_1 < 0$ , 而零模分量首行波波头为正极性,  $\Delta u_0 > 0$ , 与绕击时存在差异。因此可以利用零模电

压反行波首波波头极性对雷击位置进行识别, 正极性为反击, 负极性为绕击。

### 3) 雷击干扰情况下行波传播过程分析

发生雷击干扰时, 线路绝缘子未被击穿, 线路不存在接地点, 电压行波沿线路传播至线路边界处发生反射。行波网格图如图 4 所示。

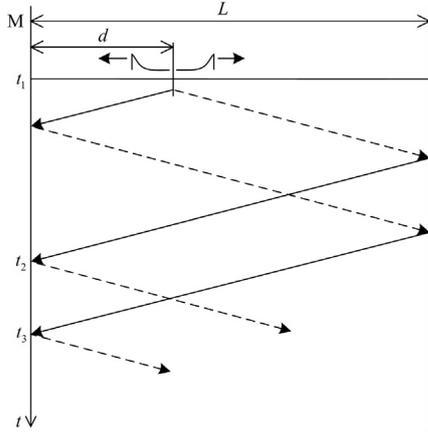


图 4 雷击干扰情况下行波网格图

Fig. 4 Traveling waves lattice diagram under lightning disturbance

设雷击发生时刻为 0 时刻, 雷击点距线路 M 端保护处距离为  $d$ , 线路全长为  $L$ ,  $v$  代表电压行波波速。记首行波、第 2 个行波波头和第 3 个行波波头到达时刻分别为  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ , 则有

$$t_1 = \frac{d}{v} \quad (9)$$

$$t_2 = \frac{2L - d}{v} \quad (10)$$

$$t_3 = \frac{2L + d}{v} \quad (11)$$

雷击扰动引入的故障行波仅在线路边界处发生折反射, 保护检测到的行波时间间隔较大。

## 2.2 雷击故障电压行波特征分析

### 1) 雷击故障点处折反射特性分析

当雷电流较大时, 雷击造成的过电压使得绝缘子串发生闪络, 发生雷击故障。利用彼得逊等效法则对雷击故障情况进行分析。

如图 5 所示, 多根线路连接于同一节点  $X$ ,  $X$  点经电阻  $Z_X$  接地, 各条线路的波阻抗为  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$ ;  $U_{1X}, U_{2X}, \dots, U_{nX}$ ,  $U_{nX}$  为入射至  $X$  点电压波;  $U_{X1}, U_{X2}, \dots, U_{Xn}$  为从  $X$  点反射的电压波。根据边界条件, 可得到式(12)。

$$u_X + i_X Z_\Sigma = 2u_\Sigma \quad (12)$$

式中,  $u_X$  为  $X$  点处电压;  $i_X$  为由  $X$  点处流向接地

电阻  $Z_X$  的电流;  $Z_\Sigma = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{Z_i}}$ ;  $u_\Sigma = Z_\Sigma \sum_{i=1}^n \frac{U_{nX}}{Z_i}$ 。

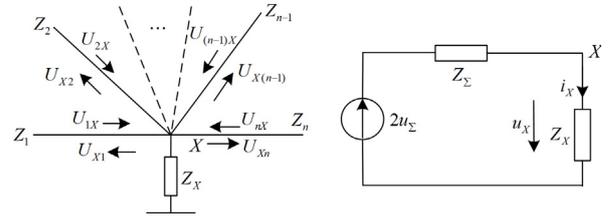


图 5 多根不同导线连接  $X$  点的波过程

Fig. 5 Wave process of multiple conductors connected to  $X$  point

求得  $u_X$  后, 可由式(12)算出由  $X$  点流向每条线路的电压波。

$$U_{Xn} = u_X - U_{nX} \quad (13)$$

在柔性直流输电线路发生雷击故障时对应的模型如图 6 所示,  $X$  点为雷击故障点。

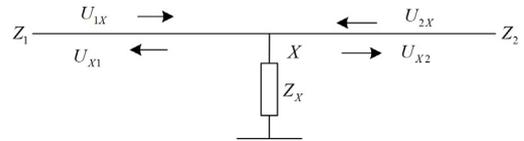


图 6 柔性直流输电线路雷击故障示意图

Fig. 6 Schematic diagram of lightning fault on flexible DC lines

图 6 中,  $Z_1$  和  $Z_2$  属于同一条线路, 故  $Z_1 = Z_2$ , 此时接地电阻  $Z_X$  为闪络点杆塔对地阻抗, 根据式(12)和式(13), 可求出  $X$  点电压表达式, 如式(14)所示。

$$u_X = \frac{2Z_X(U_{1X} + U_{2X})}{2Z_X + Z_1} \quad (14)$$

将式(14)代入式(13), 可得由  $X$  点向  $Z_1$  与  $Z_2$  反射的电压表达式, 如式(15)所示。

$$\begin{cases} U_{X1} = \frac{2Z_X U_{2X} - Z_1 U_{1X}}{2Z_X + Z_1} \\ U_{X2} = \frac{2Z_X U_{1X} - Z_1 U_{2X}}{2Z_X + Z_1} \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)整理可得

$$U_{X1} = \eta U_{2X} - \lambda U_{1X} \quad (16)$$

式中:  $\lambda$  为雷击故障点的反射系数;  $\eta$  为雷击故障点的折射系数。

$$\lambda = -\frac{Z_1}{2Z_X + Z_1} \quad (17)$$

$$\eta = 1 + \lambda = \frac{2Z_X}{2Z_X + Z_1} \quad (18)$$

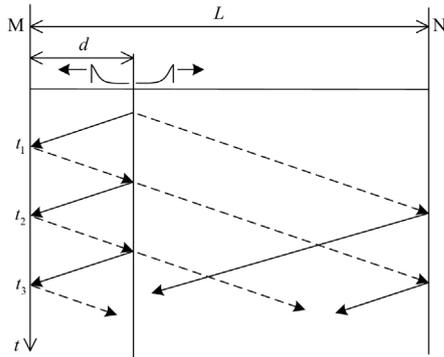
可知, 雷击故障点处反射系数为负, 折射系数为正。即故障行波经雷击故障点反射后改变极性,

经雷击故障点折射后极性不变。

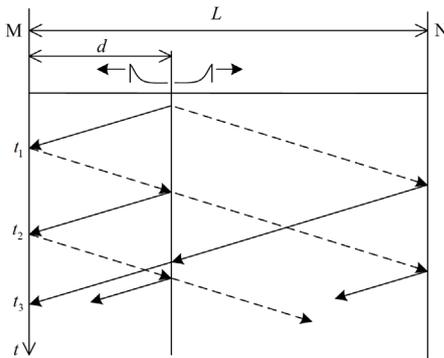
## 2) 雷击故障情况下行波传播过程分析

雷击故障情况下首行波的特征与雷击干扰情况相同, 详见 2.1 节 2) 小节, 此处不再赘述。但在后续的行波传播过程中, 由于线路绝缘子被击穿, 线路存在接地点, 由雷击点引入的电压行波经线路边界反射后回至雷击点处会再次发生折反射, 根据雷击点位置的不同, 对应的行波网格图如图 7 所示。

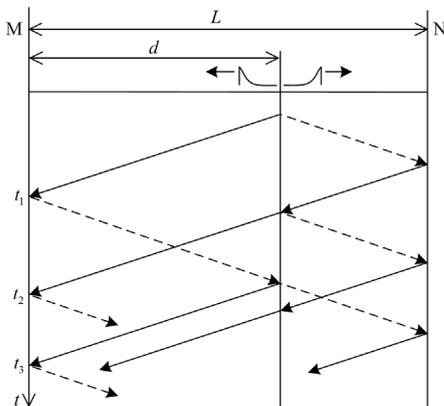
以线路 M 端为例, 保护处检测到首行波到达时刻如式(19)所示。



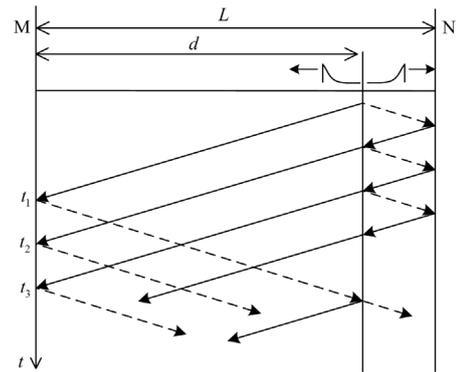
(a) 雷击点位于线路0~L/3处



(b) 雷击点位于线路L/3~2L/2处



(c) 雷击点位于线路L/2~2L/3处



(d) 雷击点位于线路2L/3~L处

图 7 雷击故障情况下行波网格图

Fig. 7 Traveling waves lattice diagram under lightning fault

$$t_1 = \frac{d}{v} \quad (19)$$

第 2 个行波波头到达时刻与雷击点的位置有关, 对于线路前半段发生雷击故障情况, 如图 7(a)和图 7(b)所示, 有

$$t_2 = \frac{3d}{v} \quad (20)$$

对于线路后半段发生雷击故障情况, 如图 7(c)和图 7(d)所示, 有

$$t_2 = \frac{2L-d}{v} \quad (21)$$

第 3 个行波波头到达时刻同样受雷击位置的影响, 若雷击点位于线路的前 1/3, 如图 7(a)所示, 有

$$t_3 = \frac{5d}{v} \quad (22)$$

若雷击点位于线路的 1/3 到线路中点之间, 如图 7(b)所示, 有

$$t_3 = \frac{2L-d}{v} \quad (23)$$

若雷击点位于线路中点到线路 2/3 处之间, 如图 7(c)所示, 有

$$t_3 = \frac{3d}{v} \quad (24)$$

若雷击点位于线路的后 1/3 段, 如图 7(d)所示, 有

$$t_3 = \frac{4L-3d}{v} \quad (25)$$

可以看出, 雷击故障引入的故障行波在线路边界和故障点处均会发生折反射, 使得保护检测到的行波比较密集, 行波时间间隔较小。

## 3 基于电压行波波形特征的雷击识别原理

### 3.1 电压行波波形特征总结

#### 1) 电压行波波头极性特征

根据上文对雷击后线路电压行波暂态特征分析结果, 总结电压行波波头极性特征如下。

(1) 零模电压首行波波头在反击情况下为正极性, 绕击情况下为负极性。基于此特征可以进行雷击位置的判别。

(2) 雷击干扰时, 故障行波只在线路边界处发生反射, 波头极性不变, 负极性入射波经过边界反射后极性依然为负极性; 雷击故障时, 故障行波除了在边界发生反射外, 还会在故障点处发生折反射现象, 故障点处反射改变行波波头极性, 因此雷击故障情况会出现正极性波头。

### 2) 电压行波波头时间特征

雷击干扰与故障情况下, 电压行波到达保护测量处的波头时间差存在明显差异: 雷击干扰时, 行波只能在线路边界发生反射, 波头数量较少; 雷击故障时, 故障行波在线路边界及短路点处发生折反射, 波头数量较多。

具体以线路 M 侧保护为例, 对雷击故障和雷击干扰情况下, 故障行波达到的时间特征进行定量分析。记雷击扰动发生后, 第 2 个波头和第 3 个波头与首行波到达时刻的时间差分别记为  $\Delta t_2$  和  $\Delta t_3$ , 即

$$\Delta t_2 = t_2 - t_1 \quad (26)$$

$$\Delta t_3 = t_3 - t_1 \quad (27)$$

根据行波理论, 可以得出雷击干扰和雷击故障情况下前 3 个行波波头达到保护处的时刻对应的表达式, 如式(9)一式(11)以及式(19)一式(25)所示, 不同雷击类型情况下行波波头时间差计算结果如表 1 所示。

表 1 波头到达时间差

Table 1 Wave head arrival time difference

雷击类型	雷击距离/km	$\Delta t_2/\text{ms}$	$\Delta t_3/\text{ms}$
干扰	0~L	$2(L-d)/v$	$2L/v$
	0~L/3	$2d/v$	$4d/v$
故障	L/3~L/2	$2d/v$	$2(L-d)/v$
	L/2~2L/3	$2(L-d)/v$	$2d/v$
	2L/3~L	$2(L-d)/v$	$4(L-d)/v$

为更直观地表达不同雷击情况与不同雷击距离下行波波头时间差的特征, 将时间差  $\Delta t_2$  和  $\Delta t_3$  随距离的变化作图表示, 如图 8 所示。

对于雷击干扰情况,  $\Delta t_2$  随着雷击距离的增大而减小,  $\Delta t_3$  为固定常数  $2\tau$  ( $\tau = L/v$ )。对于雷击故障情况,  $\Delta t_2$  是雷击距离的分段函数, 雷击发生在线路前半段时,  $\Delta t_2$  随着雷击距离的增大而增大, 发生在线路后半段时,  $\Delta t_2$  随着雷击距离的增大而

减小。在线路中点处  $\Delta t_2$  取得最大值  $\tau$ 。与雷击干扰情况  $\Delta t_3$  为固定常数不同, 雷击故障情况下  $\Delta t_3$  的曲线呈“M”形, 雷击点位于线路 1/3 和 2/3 处时,  $\Delta t_3$  取得最大值  $4\tau/3$ 。

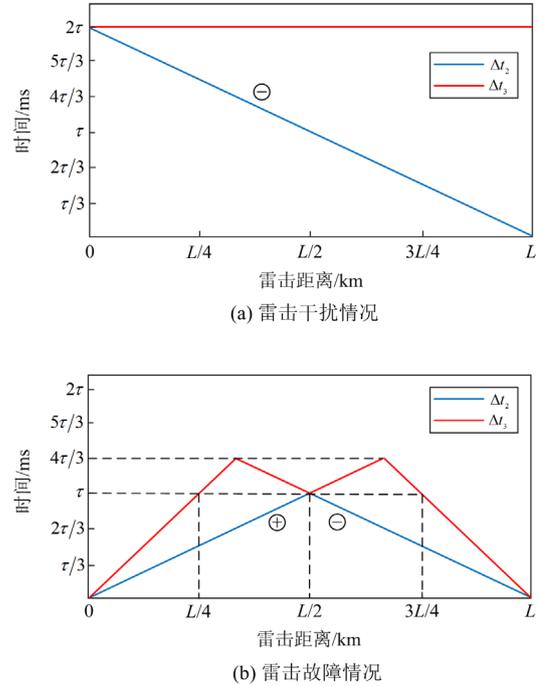


图 8 电压行波波头时间差与雷击距离的关系图

Fig. 8 Relationship between the time difference of voltage traveling waves head and the lightning distance

### 3.2 基于电压行波特征的雷击干扰识别原理

根据上文分析得到的特征, 提出雷击干扰识别原理: 首先, 利用零模首行波的极性判断雷击位置; 其次, 根据线模行波波头极性和时间特征, 判别发生了雷击故障还是雷击干扰。考虑柔性直流输电系统保护速动性的要求, 希望利用尽量短的数据窗内信息实现雷击干扰识别。

对于雷击故障情况, 在首行波到达后的  $\tau$  (含) 时间窗内, 记该数据窗为  $T_1$ , 必定会出现第 2 次行波波头的到达, 对于雷击位置位于线路前 1/4 和后 1/4 的情况, 会出现第 3 次及以上行波波头的到达; 对于雷击干扰情况, 在  $T_1$  时间窗内, 位于线路前 1/2 处的情况仅有首行波的到达, 位于线路后 1/2 处的情况会出现第 2 次行波波头的到达。因此, 仅利用  $T_1$  数据窗内行波波头数量  $n$  可以实现线路 50% 雷击故障与 50% 雷击干扰的区分。

再考虑  $T_1$  数据窗内第 2 个行波波头的极性: 对于雷击干扰情况, 第 2 个波头均为经对端线路边界反射回来的行波, 波头极性为负。对于雷击故障情

况, 在  $0 \sim L/2$  处发生雷击, 第 2 个波头为经故障点处反射回来的行波, 波头极性为正; 在  $L/2 \sim L$  处发生雷击, 第 2 个波头为经对端线路边界反射、再经故障点处折射得到的行波, 波头极性为负。因此, 可以利用  $T_1$  时间窗内第 2 个波头是否为正极性实现  $L/4 \sim L/2$  处雷击故障与雷击干扰的判别。

综上, 利用  $T_1$  数据窗可以识别的雷击故障与雷击干扰情况如图 9 所示。对于无法判别的部分, 需要利用更长的数据窗。

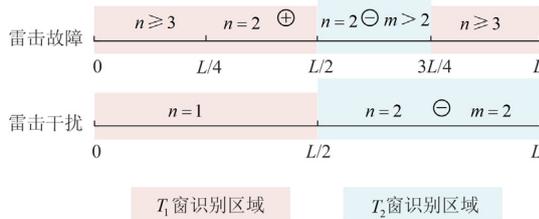


图 9 长短数据窗识别区间示意图

Fig. 9 Recognition intervals of the short and long data windows

由前文分析可知, 对于雷击故障情况,  $\Delta t_3$  是雷击距离的分段函数, 在雷击位置为  $L/3$  和  $2L/3$  处取得最大值  $4\tau/3$ , 即在首行波到达后的  $4\tau/3$  时间窗内(含), 记该数据窗为  $T_2$ , 存在包括首行波在内的 3 个及以上行波波头的到达。而雷击干扰情况, 在  $T_2$  数据窗内, 仅存在两个行波波头。对于仅利用  $T_1$  时间窗无法判别雷击故障与雷击干扰的情况, 可以根据  $T_2$  数据窗内行波波头的个数  $m$  实现判别, 识别区间如图 9 所示。

本原理利用长短数据窗结合的方法, 可以实现 75% 处的雷击故障和 50% 处的雷击干扰的加速判别, 相比于文献[5]提出的采用固定数据窗的雷击干扰识别方法, 本文提出的雷击识别原理能够提高保护的速动性。

### 3.3 雷击干扰识别流程

所提雷击干扰识别原理具体识别流程如下。

步骤 1: 利用零模电压首行波极性判断雷击位置。保护启动后, 采集  $T_1$  数据窗的电压电流信号, 计算零模电压行波, 利用小波变化模极大值<sup>[22-23]</sup>提取零模电压行波波头极性  $\delta_1$ , 若满足  $\delta_1 > 0$ , 则判断为反击, 否则判断为绕击。

为完整提取首波,  $T_1$  数据窗从保护启动前 0.5 ms 开始, 至启动后  $\tau$  时刻结束, 并保留一定裕度。在本文中, 线路全长取 500 km,  $\tau$  近似取为 1.7 ms。

步骤 2: 利用  $T_1$  数据窗内线模电压行波波头数量进行雷击干扰识别。计算  $T_1$  数据窗内线模电压行

波, 利用小波变化模极大值提取  $T_1$  数据窗内行波波头数量  $n$ 。如果  $n=1$ , 则判断为雷击干扰; 如果  $n \geq 3$ , 则判断为雷击故障; 如果  $n=2$ , 继续下一步判别。

步骤 3: 利用  $T_1$  数据窗内线模电压行波第 2 个波头极性进行雷击干扰识别。提取  $T_1$  数据窗内线模电压第 2 个波头极性  $\delta_2$ , 若满足  $\delta_2 > 0$ , 则判别为雷击故障; 否则进入下一步判别。

步骤 4: 利用雷击发生后  $T_2$  数据窗内行波波头数量进行雷击干扰识别。利用小波变化模极大值提取  $T_1$  数据窗内行波波头数量  $m$ 。若满足  $m > 2$ , 则判断为雷击干扰, 否则判断为雷击故障。

同理, 为完整提取首波,  $T_2$  数据窗从保护启动前 0.5 ms 开始, 至启动后  $4\tau/3$  时刻结束, 并保留一定裕度。在本文中, 线路全长取 500 km,  $4\tau/3$  近似取为 2.3 ms。

雷击干扰识别方案的流程图如图 10 所示。

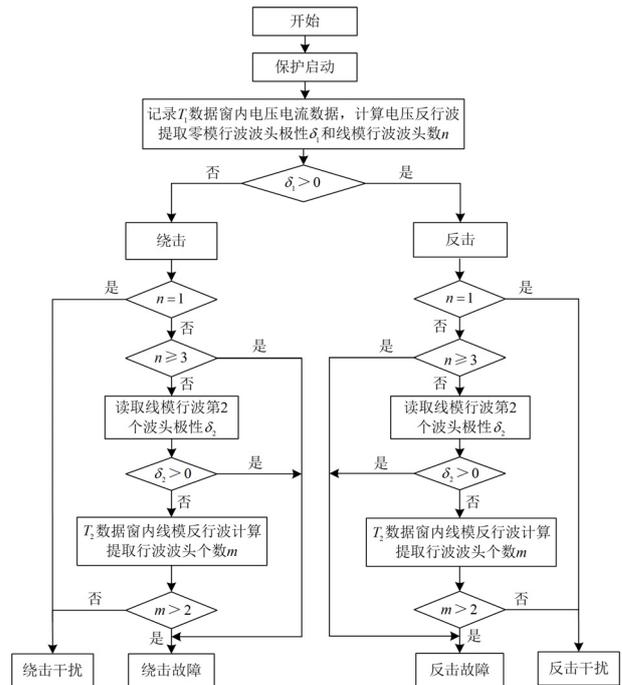


图 10 雷击干扰识别方案流程图

Fig. 10 Flow chart of lightning interference identification scheme

## 4 仿真验证

本文利用 PSCAD 软件搭建图 1 所示的双端柔性直流输电系统, 并利用此系统对各类雷击干扰和故障进行仿真, 验证所提雷击干扰识别方案的准确性。

### 4.1 雷击干扰情况

以距离 M 侧 100 km 处发生绕击干扰情况为例, 给出雷击干扰情况仿真验证结果。图 11 给出零模与

线模电压行波的时域波形和对应的小波变换模极大值(wavelet transform maximum modulus, WTMM)分解结果, 本文采用 db4 小波基, 取第 4 层分解结果。

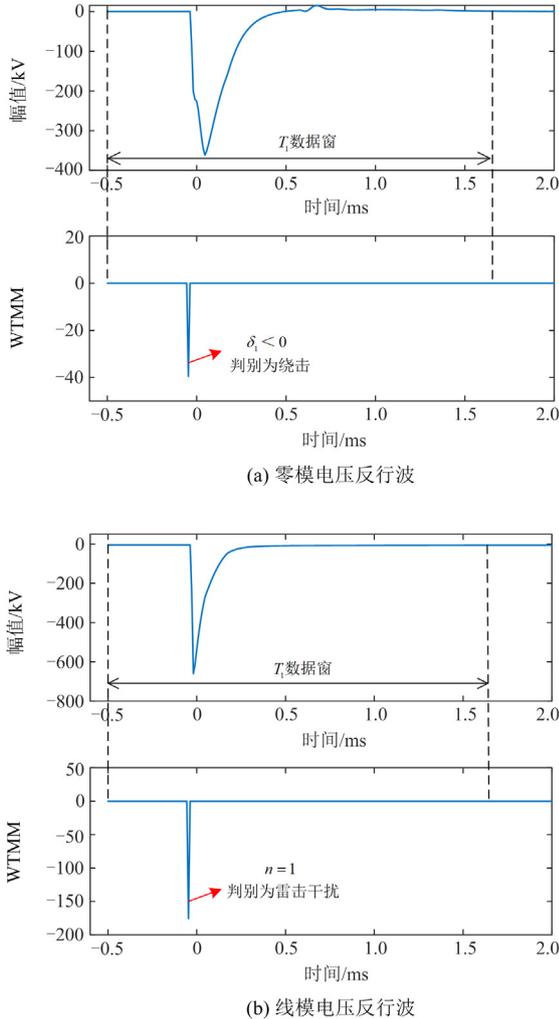


图 11 雷击干扰判别结果

Fig. 11 Lightning interference identification results

如图 11 所示, 零模电压首行波波头为负极性, 判别为绕击; 且线模行波在  $T_1$  数据窗内仅有一个波头,  $n=1$ , 正确判别为雷击干扰情况。

#### 4.2 雷击故障情况

以距离 M 侧 400 km 处发生反击故障情况为例, 给出雷击故障情况仿真验证结果。图 12 给出零模与线模电压行波的时域波形和对应的 WTMM 分解结果。如图 12 所示, 零模电压首行波波头为正极性, 判别为反击, 且线模波形在  $T_1$  数据窗内有 3 个波头,  $n=3$ , 正确判别为雷击故障情况。

#### 4.3 不同雷击距离的影响

为了全面验证雷击距离对判别结果的影响, 在

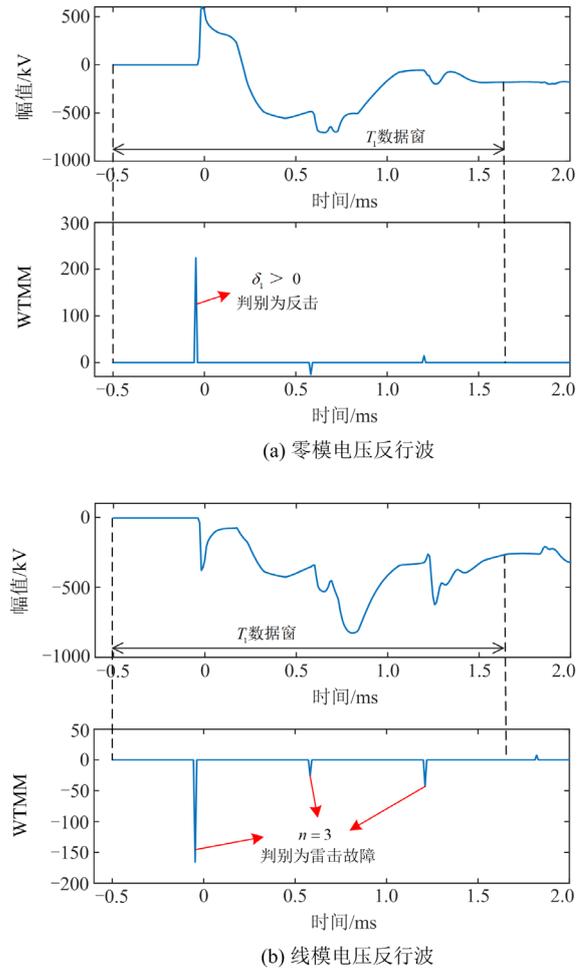


图 12 雷击故障判别结果

Fig. 12 Lightning fault identification results

线路不同处设置雷击干扰和雷击故障, 根据仿真结果对提出的雷击干扰识别方法进行验证。验证结果如表 2 所示, 表中 A 表示绕击干扰; B 表示绕击故障; C 表示反击干扰; D 表示反击故障, 下同。

可以看出, 不同雷击距离下均能正确判别雷击类型。对于位于线路前半段的所有雷击情况以及位于线路后 25% 处的雷击故障情况, 仅利用  $T_1$  数据窗的信息即可实现判别, 提高了判别的速度, 其余情况根据  $T_2$  数据窗的信息可以实现准确判别, 判别速度满足柔性直流输电系统主保护 3 ms 的要求。仿真测试结果验证了所提雷击识别原理的正确性。

需要说明的是, 在线路中点处发生雷击故障时, 理论上首行波后经故障反射回来的行波与经对端线路边界反射回来的行波同时到达保护处, 无法实现第 2 个波头和第 3 个波头的区分, 存在判别死区, 需要借助其他原理的辅助判据进行判别。

表 2 不同距离下雷击干扰及故障的验证结果

Table 2 Verification results of lightning interference and fault at different distances

雷击距离/km	雷击位置	雷击类型	$\delta_1$	$n$	$\delta_2$	$m$	判别结果	识别数据窗/ms
30	导线	干扰	-84.3	1	—	—	A	1.7
	导线	故障	-269.2	4	—	—	B	1.7
	塔顶	干扰	298.6	1	—	—	C	1.7
	塔顶	故障	322.5	9	—	—	D	1.7
100	导线	干扰	-39.5	1	—	—	A	1.7
	导线	故障	-112.1	3	—	—	B	1.7
	塔顶	干扰	246.7	1	—	—	C	1.7
	塔顶	故障	282.2	3	—	—	D	1.7
150	导线	干扰	-32.5	1	—	—	A	1.7
	导线	故障	-123.8	2	56.7	—	B	1.7
	塔顶	干扰	257.6	1	—	—	C	1.7
	塔顶	故障	270.4	2	42.8	—	D	1.7
200	导线	干扰	-41.4	1	—	—	A	1.7
	导线	故障	-118.4	2	58.9	—	B	1.7
	塔顶	干扰	234.0	1	—	—	C	1.7
	塔顶	故障	197.6	2	43.7	—	D	1.7
300	导线	干扰	-24.2	2	-41.5	2	A	2.3
	导线	故障	-135.7	2	-60.2	3	B	2.3
	塔顶	干扰	89.8	2	-48.4	2	C	2.3
	塔顶	故障	251.0	2	-54.0	3	D	2.3
350	导线	干扰	-15.1	2	-41.8	2	A	2.3
	导线	故障	-81.1	2	-35.2	3	B	2.3
	塔顶	干扰	147.4	2	-47.4	2	C	2.3
	塔顶	故障	263.8	2	-48.4	3	D	2.3
400	导线	干扰	-12.3	2	-41.2	2	A	2.3
	导线	故障	-47.0	3	—	—	B	1.7
	塔顶	干扰	163.5	2	-61.3	2	C	2.3
	塔顶	故障	224.7	3	—	—	D	1.7
470	导线	干扰	-11.9	2	-69.6	2	A	2.3
	导线	故障	-72.3	4	—	—	B	1.7
	塔顶	干扰	101.0	2	-90.3	2	C	2.3
	塔顶	故障	149.5	3	—	—	D	1.7

#### 4.4 不同雷电流模型的影响

前文中用到的雷电流模型参数为  $1.2/50 \mu\text{s}$ , 为了验证雷电流模型对判别结果的影响, 分别用  $2.6/50 \mu\text{s}$  和  $5/100 \mu\text{s}$  的雷电流模型进行验证。验证结果如表 3 和表 4 所示, 判别结果全部正确。

本文提出的雷击干扰识别原理是利用行波波头的极性和时间特征进行判别, 理论上不受雷电流波形的影响, 仿真测试结果验证了这一结论。

#### 4.5 不同线路参数的影响

为了验证此方法的有效性不受线路参数影响, 在 PSCAD 中参照文献[21]对线路参数进行修改, 如

表 5 和图 13 所示。利用参数修改后的系统进行仿真验证, 结果如表 6 所示, 判别结果全部正确。理论上线路参数的不同不会影响行波波头的极性和时间特征, 本文提出的识别原理不受线路参数的影响, 仿真测试结果验证了这一结论。

#### 4.6 抗噪声能力分析

在采集到的暂态信号中加入不同信噪比的高斯白噪声, 验证噪声对所提出的雷击干扰识别方法的影响, 测试结果如表 7 所示。在信噪比达到 20 dB 时, 判别结果全部正确, 表明所提出的雷击干扰识别方案具有较强的抗噪声干扰能力。

表 3 雷电流模型为 2.6/50 μs 的验证结果

Table 3 Verification results of lightning current model with 2.6/50 μs

雷击距离/km	雷击位置	雷击类型	$\delta_1$	$n$	$\delta_2$	$m$	判别结果	识别数据窗/ms
100	导线	干扰	-35.6	1	—	—	A	1.7
	导线	故障	-111.0	3	—	—	B	1.7
	塔顶	干扰	48.1	1	—	—	C	1.7
	塔顶	故障	282.8	3	—	—	D	1.7
200	导线	干扰	-42.2	1	—	—	A	1.7
	导线	故障	-120.1	2	61.2	—	B	1.7
	塔顶	干扰	75.7	1	—	—	C	1.7
	塔顶	故障	196.0	2	43.9	—	D	1.7
300	导线	干扰	-24.7	2	-42.3	2	A	2.3
	导线	故障	-183.3	2	-63.9	3	B	2.3
	塔顶	干扰	38.2	2	-6.9	2	C	2.3
	塔顶	故障	252.0	2	-55.4	3	D	2.3
400	导线	干扰	-12.6	2	-41.2	2	A	2.3
	导线	故障	-51.1	3	—	—	B	1.7
	塔顶	干扰	27.1	2	-10.6	2	C	2.3
	塔顶	故障	224.4	3	—	—	D	1.7

表 4 雷电流模型为 5/100 μs 的验证结果

Table 4 Verification results of lightning current model with 5/100 μs

雷击距离/km	雷击位置	雷击类型	$\delta_1$	$n$	$\delta_2$	$m$	判别结果	识别数据窗/ms
100	导线	干扰	-24.9	1	—	—	A	1.7
	导线	故障	-94.5	3	—	—	B	1.7
	塔顶	干扰	48.9	1	—	—	C	1.7
	塔顶	故障	284.5	3	—	—	D	1.7
200	导线	干扰	-48.7	1	—	—	A	1.7
	导线	故障	-107.4	2	61.2	—	B	1.7
	塔顶	干扰	77.9	1	—	—	C	1.7
	塔顶	故障	188.4	2	43.9	—	D	1.7
300	导线	干扰	-26.1	2	-42.3	2	A	2.3
	导线	故障	-149.4	2	-78.4	3	B	2.3
	塔顶	干扰	39.1	2	-7.9	2	C	2.3
	塔顶	故障	256.2	2	-65.5	3	D	2.3
400	导线	干扰	-12.9	2	-41.2	2	A	2.3
	导线	故障	-64.7	3	—	—	B	1.7
	塔顶	干扰	29.4	2	-12.3	2	C	2.3
	塔顶	故障	221.5	3	—	—	D	1.7

表 5 不同线路参数

Table 5 Different lines parameters

参数	修改前	修改后 <sup>[21]</sup>
架空地线间距/m	12	12.27
输电线间距/m	15.6	15.9
架空地线与输电线间距/m	4	9
输电线与地面间距/m	29	28

#### 4.7 采样频率的影响

本文提出的雷击干扰识别方案是基于行波波头的极性与个数信息进行判别, 采样频率为 100 kHz。更高的采样频率可以更好地还原行波波头特征, 更有利于提取行波波头特征; 采样频率过低会影响波头的检测结果。

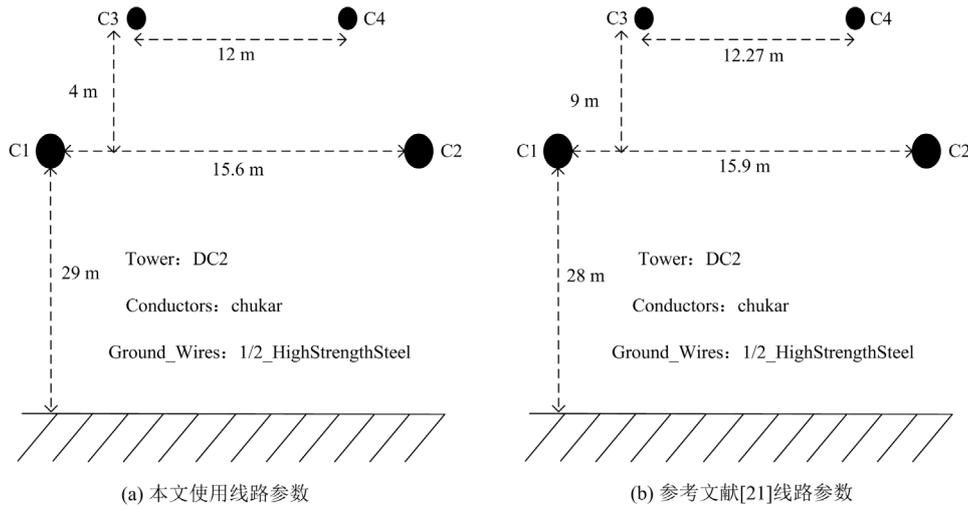


图 13 不同线路参数对比

Fig. 13 Comparison of different line parameters

表 6 修改线路参数后的验证结果

Table 6 Verification results after modifying the line parameters

雷击距离/km	雷击位置	雷击类型	$\delta_1$	$n$	$\delta_2$	$m$	判别结果	识别数据窗/ms
100	导线	干扰	-42.9	1	—	—	A	1.7
	导线	故障	-98.7	3	—	—	B	1.7
	塔顶	干扰	44.4	1	—	—	C	1.7
	塔顶	故障	279.2	3	—	—	D	1.7
200	导线	干扰	-33.6	1	—	—	A	1.7
	导线	故障	-102.0	2	39.5	—	B	1.7
	塔顶	干扰	73.3	1	—	—	C	1.7
	塔顶	故障	213.9	2	26.6	—	D	1.7
300	导线	干扰	-22.3	2	-42.2	2	A	2.3
	导线	故障	-113.1	2	-35.2	3	B	2.3
	塔顶	干扰	43.9	2	-6.0	2	C	2.3
	塔顶	故障	239.8	2	-59.4	3	D	2.3
400	导线	干扰	-9.3	2	-31.9	2	A	2.3
	导线	故障	-87.4	3	—	—	B	1.7
	塔顶	干扰	21.0	2	-14.0	2	C	2.3
	塔顶	故障	235.7	3	—	—	D	1.7

目前, 许继公司已研制出硬件设计采样频率为 50 kHz 的超高速保护样机<sup>[24]</sup>。将采样频率降为 50 kHz 后的测试结果如表 8 所示。判别结果全部正确, 表明提出的雷击干扰识别方法可以适用于 50 kHz 的采样频率。

需要说明的是, 在测试中进一步降低采样频率至 25 kHz, 则出现部分情况未能准确识别行波波头而误判的结果。因此本文提出的方法适用于 50 kHz 及以上的采样频率。

#### 4.8 与其他方法的对比

文献[5]提出的雷击干扰识别方法利用保护启动

后  $2\tau$  数据窗内故障行波的 WTMM 个数和幅值大小判别是否发生雷击干扰。本文提出的方法对于 75% 的雷击故障情况和 50% 的雷击干扰情况, 仅需要  $\tau$  数据窗即可实现判别, 其余情况利用  $4\tau/3$  数据窗内数据完成判别, 与文献[5]方法相比, 判别速度更快。

文献[25]提出了一种适配柔直系统快速性及可靠性的雷击干扰识别方法, 首先利用电压行波中值滤波前后小波熵的相对变化率判别是否发生雷击, 再利用中值滤波后电压行波的线性拟合一次项系数判别是否发生雷击故障。其中小波熵相对变化率判据和线性拟合系数判据均需要根据大量的仿真结果

表 7 不同信噪比下的验证结果

Table 7 Verification results under different signal-noise ratios

雷击距离/km	雷击位置	雷击类型	信噪比/dB	$\delta_1$	$n$	$\delta_2$	$m$	判别结果	识别数据窗/ms
200	导线	干扰	40	-41.4	1	—	—	A	1.7
			30	-41.4	1	—	—	A	1.7
			20	-41.2	1	—	—	A	1.7
	导线	故障	40	-118.4	2	58.9	—	B	1.7
			30	-118.5	2	58.9	—	B	1.7
			20	-118.4	2	58.9	—	B	1.7
	塔顶	干扰	40	234.0	1	—	—	C	1.7
			30	234.0	1	—	—	C	1.7
			20	233.8	1	—	—	C	1.7
	塔顶	故障	40	197.6	2	43.7	—	D	1.7
			30	197.6	2	43.8	—	D	1.7
			20	197.7	2	43.8	—	D	1.7
400	导线	干扰	40	-12.3	2	-41.2	2	A	2.3
			30	-12.3	2	-41.2	2	A	2.3
			20	-12.4	2	-41.2	2	A	2.3
	导线	故障	40	-47.0	3	—	—	B	1.7
			30	-47.0	3	—	—	B	1.7
			20	-47.2	3	—	—	B	1.7
	塔顶	干扰	40	163.5	2	-61.3	2	C	2.3
			30	163.5	2	-61.3	2	C	2.3
			20	163.5	2	-61.3	2	C	2.3
	塔顶	故障	40	224.6	3	—	—	D	1.7
			30	224.6	3	—	—	D	1.7
			20	224.6	3	—	—	D	1.7

表 8 不同采样频率的验证结果

Table 8 Verification results with different sampling frequencies

雷击距离/km	雷击位置	雷击类型	$\delta_1$	$n$	$\delta_2$	$m$	判别结果	识别数据窗/ms
100	导线	干扰	-91.8	1	—	—	A	1.7
	导线	故障	-78.8	3	—	—	B	1.7
	塔顶	干扰	291.5	1	—	—	C	1.7
	塔顶	故障	313.6	3	—	—	D	1.7
200	导线	干扰	-75.9	1	—	—	A	1.7
	导线	故障	-84.6	2	118.8	—	B	1.7
	塔顶	干扰	244.6	1	—	—	C	1.7
	塔顶	故障	204.8	2	103.2	—	D	1.7
300	导线	干扰	-43.3	2	-141.8	2	A	2.3
	导线	故障	-131.8	2	-119.3	3	B	2.3
	塔顶	干扰	88.8	2	-142.3	2	C	2.3
	塔顶	故障	250.8	2	-71.8	4	D	2.3
400	导线	干扰	-20.7	2	-107.1	2	A	2.3
	导线	故障	-30.4	3	—	—	B	1.7
	塔顶	干扰	186.8	2	-132.5	2	C	2.3
	塔顶	故障	280.5	3	—	—	D	1.7

进行整定, 而本文提出的识别方案基于行波波头的极性与个数, 判据原理明确, 无须基于仿真整定, 可靠性更高。

## 5 结论

本文针对柔性直流输电线路保护易受雷击干扰引发误动的问题, 通过分析不同雷击情况下电压行波波头的极性和时间特征, 采用长短数据窗结合的方法构建基于电压行波波头特征的雷击干扰识别方法, 得出如下结论。

1) 发生绕击和反击情况线路零模电压首行波的极性不同, 绕击为负极性, 反击为正极性。利用线路零模电压首行波波头极性可以识别雷击位置。

2) 雷击干扰时, 暂态过程中电压行波经线路边界反射后波头极性不发生改变; 雷击故障时, 电压行波经故障点反射后波头极性发生改变。

3) 分析得出雷击故障与雷击干扰情况下行波波头时间差与雷击距离的定量关系, 基于此并结合行波波头极性特征, 提出基于长短数据窗结合的雷击干扰识别方法, 能够有效提高判别速度。

仿真表明该雷击干扰识别方案的判据简单、动作速度快、可靠性高, 不受雷击距离、雷电流模型、线路参数和噪声的影响, 具有良好的适用性。但在线路中点处发生雷击故障时存在判别死区, 后续须进一步优化, 借助其他原理的辅助判据进行判别。

## 参考文献

- [1] 刘英培, 谢乾, 梁海平. 柔性直流输电系统自适应虚拟惯性调频控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 129-136.  
LIU Yingpei, XIE Qian, LIANG Haiping. Frequency regulation control strategy for flexible DC transmission system based on adaptive virtual inertia[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 129-136.
- [2] 雷朝煜, 郝良收, 戴甲水, 等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 178-187.  
LEI Zhaoyu, HAO Liangshou, DAI Jiashui, et al. A review of fault location methods in HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 178-187.
- [3] 赵冠琨, 贾科, 陈金锋, 等. 基于断路器重合闸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, 2021, 49(7): 48-56.  
ZHAO Guankun, JIA Ke, CHEN Jinfeng, et al. A single terminal fault location method for a DC transmission line based on circuit breaker reclosing[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 48-56.
- [4] 薛士敏, 陈硕, 顾诚, 等. 一种基于暂态量的柔性直流系统保护及雷击识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 45-53.  
XUE Shimin, SHEN Shuo, GU Cheng, et al. A method for protection and lightning identification in a flexible DC system based on transient quantities[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 45-53.
- [5] 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. 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.
- [6] 王艳婷, 范新凯, 张保会. 柔性直流电网行波保护解析分析与整定计算[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3201-3212.  
WANG Yanting, FAN Xinkai, ZHANG Baohui. The analytical analysis and protection setting of traveling wave protection in VSC-HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3201-3212.
- [7] 刘青, 王增平, 郑振华, 等. 基于信号复杂度的串补线路单端暂态保护[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 81-88.  
LIU Qing, WANG Zengping, ZHENG Zhenhua, et al. Non-unit transient protection based on signal complexity for series compensated transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 81-88.
- [8] 李书勇, 郭琦, 崔柳, 等. 特高压直流输电线路雷击暂态过程与行波保护响应特性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2830-2835.  
LI Shuyong, GUO Qi, CUI Liu, et al. Thunderstruck transient process of UHVDC transmission line and response characteristic of traveling wave protection[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2830-2835.
- [9] 万帅, 张伟, 陈家宏, 等.  $\pm 800$  kV 直流线路避雷器关键技术参数设计及防雷效果分析[J]. 电瓷避雷器, 2016(4): 105-110.  
WAN Shuai, ZHANG Wei, CHEN Jiahong, et al. Key technical parameters designing of the arresters for  $\pm 800$  kV DC transmission line and lightning protection effect analysis[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(4): 105-110.
- [10] HE J H, CHEN K A, LI M, et al. Review of protection and fault handling for a flexible DC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 151-165.
- [11] 高艳丰, 黄晓胤, 闫红艳, 等. 输电线路雷击故障的综合识别研究[J]. 广东电力, 2016, 29(3): 93-98.

- GAO Yanfeng, HUANG Xiaoyin, YAN Hongyan, et al. Study on synthetic identification of lightning fault of power transmission lines[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(3): 93-98.
- [12] 谢仲润, 邹贵彬, 杜肖功, 等. 基于真双极的 MTDC 电网直流线路快速保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1906-1915.
- XIE Zhongrun, ZOU Guibin, DU Xiaogong, et al. Fast DC lines protection for symmetrical bipolar based MTDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1906-1915.
- [13] 赵军, 吕艳萍, 王汉广. 基于多尺度形态分解的特高压线路雷击干扰识别新方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(5): 994-998.
- ZHAO Jun, LÜ Yanping, WANG Hanguang. New scheme to identify lightning disturbance for the UHV transmission lines based on multi-scale morphology decomposition[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(5): 994-998.
- [14] DAI Z, LIU N, ZHANG C, et al. A pilot protection for HVDC transmission lines based on transient energy ratio of dc filter link[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 1695-1706.
- [15] YE D, XIE F, HAO Z. A novel identification scheme of lightning disturbance in HVDC transmission lines based on CEEMD-HHT[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2021, 6(2): 145-154.
- [16] 罗日成, 李稳, 陆毅, 等. 基于 Hilbert-Huang 变换的 1000 kV 输电线路雷击电晕与反击识别方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 232-239.
- LUO Richeng, LI Wen, LU Yi, et al. Identification method of shielding failure and back striking over-voltage of 1000 kV transmission line based on Hilbert-Huang transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 232-239.
- [17] 曹虹, 周泽昕, 柳焕章, 等. 基于单端电流积聚量的高压直流输电线路全线速动保护[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4091-4104.
- CAO Hong, ZHOU Zexin, LIU Huanzhang, et al. A novel whole-line fast protection scheme based on single-ended current accumulation for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4091-4104.
- [18] 顾焱彬, 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.
- 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.
- [19] 陈旭, 朱永利, 赵雪松, 等. 基于时频域的雷电扰动识别方法[J]. 高压电器, 2017, 53(1): 90-95.
- CHEN Xu, ZHU Yongli, ZHAO Xuesong, et al. Identification of lightning strikes based on time-frequency joint analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(1): 90-95.
- [20] 邹贵彬, 高厚磊, 朱峰, 等. 输电线路雷击与故障的积分识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 43-48.
- ZOU Guibin, GAO Houlei, ZHU Feng, et al. Integral identification method of lightning stroke and fault for transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 43-48.
- [21] 陈淼, 贾科, 王康达, 等. 基于前行波波形特征的柔性直流输电线路单端行波保护[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2386-2393.
- CHEN Miao, JIA Ke, WANG Kangda, et al. Single terminal traveling wave protection for flexible HVDC transmission lines based on forward wave shape information[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2386-2393.
- [22] DONG X, GE Y, HE J. Surge impedance rely[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1247-1256.
- [23] DONG X, LUO S, SHI S, et al. Implementation and application of practical travelling-wave-based directional protection in UHV transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 294-302.
- [24] 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.
- [25] 吴通华, 黎钊, 李新东, 等. 适配柔直系统快速性及可靠性需求的雷击干扰识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(24): 1-12.
- WU Tonghua, LI Zhao, LI Xindong, et al. Lightning interference identification method for the speed and reliability of a flexible DC system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(24): 1-12.

收稿日期: 2023-07-24; 修回日期: 2023-09-11

作者简介:

王艳婷(1991—), 女, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统继电保护与控制。E-mail: wangyanting@xaut.edu.cn

(编辑 周金梅)