

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220272

适配柔直系统快速性及可靠性需求的雷击干扰识别方法

吴通华¹, 黎钊², 李新东¹, 郑宇超³, 李正天², 林湘宁², 童宁⁴

(1. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106;

2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 3. 国网江苏省电力有限公司
经济技术研究院, 江苏 南京 210008; 4. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要: 直流线路遭受雷击干扰易导致行波保护等灵敏性较高的主保护误动作。在主保护动作前, 可靠区分雷击干扰和短路故障将有效提高主保护的安全性, 保障直流系统的安全稳定运行。但对于柔直系统而言, 现有雷击干扰识别方法动作速度不足, 难以在主保护动作之前判定雷击/故障性质, 且在因数据传输异常或噪声干扰条件下出现远偏离实际值的坏数据时, 动作性能有待进一步提升。为此, 提出了一种具有足够速动性及安全性的雷击干扰识别方法。首先揭示了反向线模电压行波的特征。然后根据所揭示的特征分别提出了基于小波熵相对变化率识别算法的判据以及一种结合中值滤波的线性拟合函数一次项系数大小的判据, 二者协同工作实现不同雷击及故障叠加场景下雷击非故障场景的识别与主保护的闭锁, 从而有效增强主保护的安全性。基于 PSCAD/EMTDC 的仿真结果表明, 在短至 1 ms 的时窗内即可在全线范围内完成对雷击干扰的辨识, 并具有良好的抗坏数据干扰能力。

关键词: 雷击识别; 柔性直流系统; 小波熵; 中值滤波; 线性拟合

Lightning interference identification method for the speed and reliability of a flexible DC system

WU Tonghua¹, LI Zhao², LI Xindong¹, ZHENG Yuchao³, LI Zhengtian², LIN Xiangning², TONG Ning⁴

(1. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nari Group Corporation, Nanjing 211106, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 3. Economic Research Institute of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210008, China; 4. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Lightning strikes on DC transmission lines can easily cause a malfunction in main protection with high sensitivity such as traveling wave protection. Before the main protection is activated, a reliable distinction between lightning interference and short circuit failure will effectively improve the security of main protection and guarantee the security and stability of DC systems. However, for the VSC-HVDC, the existing lightning interference identification scheme is inadequate in terms of speed, and finds it difficult to recognize the lightning strike/fault before the main protection activates. Also the action performance under the random interference such as sampling abnormality needs to be improved. To solve the above problems, this paper proposes a novel lightning interference identification criterion acting with high speed and safety. First, this paper reveals the characteristics of the reverse line mode traveling wave, according to the characteristics mentioned, and proposes a relative change rate of wavelet entropy criterion and fit coefficient criterion based on linear fixed function. These changes collaborate to deal with different lightning strikes and faults in the field of lightning strike non-fault scenes and the lock of the main protection. They thereby effectively enhance the security of primary protection. Based on simulation in PSCAD/EMTDC, the method can identify lightning interference in 1 ms within all the lines, and is provided with good anti-bad data interference ability.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51907069).

Key words: lightning strike recognition; VSC-HVDC; wavelet entropy; median filter; linear fitting

基金项目: 国家自然科学基金项目资助“适配换流器极限耐受能力的多端柔直电网非边界依赖型主保护判据研究”(51907069); 南瑞集团有限公司《2020 年国家重点实验室开放课题》“非边界依赖型多端柔直电网超高速主保护判据研究”

0 引言

作为高压直流输电系统的主保护,行波保护在直流输电系统中已取得广泛应用^[1-3]。然而,发生雷击时,不论是否引起短路故障,保护安装处检测到雷电流注入所引起的高频分量与短路故障所引起的波过程极为相似,可能导致行波保护误动^[4-5]。为了避免保护误动所引起的换流器停运或线路切除,需要对雷击未故障(也称为雷击干扰)的场景进行准确识别。

针对传统高压直流输电系统的雷击干扰识别问题,众多专家及学者已开展了大量研究。文献[6]介绍了与雷击相关的仿真模型,为仿真系统的搭建奠定了基础。文献[7]根据极线上电压行波与轴线的关联度分辨出雷击干扰,利用小波变换分析行波高频能量和中低频能量的比值区分雷击故障和接地故障。文献[8]通过计算正、负极暂态电压与 ± 800 kV的相关系数区分雷击干扰。上述方法在传统直流高压线路中取得了良好效果。不同于传统高压直流输电系统,适用于柔直系统的专有雷击识别原理具有一定的特殊性,对于基于VSC换流器的柔直系统而言,考虑到VSC换流器的开关管由对短路电流耐受能力较弱的IGBT构成,为保障VSC的安全,主保护需要以更快的速度动作,因此雷击的识别必然要先于主保护的出口。一般而言,柔直输电系统要求主保护出口时间最短为 3 ms ^[9],由此导致适用于传统高压直流输电系统的雷击干扰识别方法无法在时间上与柔直系统的超高速主保护形成配合^[10-15],因此亟需提出一种面向柔直系统、出口速度更快的雷击干扰识别方法。文献[16]在分析地模、线模电流附加分量变化特征的基础上,构造了幅值、幅值比和变化率判据。该判据能够可靠区分雷击干扰和雷击故障,并且其数据窗长度仅为 $20\text{ }\mu\text{s}$,速动性优越;然而,该判据选取极短的采样数据窗并采用了微分算法,在雷击干扰伴随采样异常发生的场景下,其安全性不足。为良好应对采样异常场景、提高判据安全性,文献[4]尝试使用滑动平均值滤波算法对雷击波形进行处理,在一定程度上实现了波形本身特征的还原,但对雷击引入的尖峰等高频噪声的滤除效果不甚理想,也无法充分解决采样异常引起波形畸变后的判据安全性问题。

鉴于此,本文综合各种雷击及短路故障场景下保护安装处所得到的反向线模电压行波波形的形态特征,提出了一种能够区分雷击未故障的场景、从而对主保护实现闭锁并防止主保护误动的雷击识别

方法。首先对反向线模电压行波进行高阶中值滤波,并根据中值滤波前后 1 ms 时窗内的小波熵变化情况,对线路是否遭遇雷击进行识别;然后根据中值滤波后波形的走势特征,对是否因雷击而发生短路故障做进一步判断,从而实现“非雷击短路故障”、“雷击故障”以及“雷击未故障”3种场景的划分,使得主保护最终在“雷击未故障”场景下可靠闭锁、避免误动。基于PSCAD/EMTDC的仿真结果表明,该方法可在全线范围内准确识别雷击干扰,同时,本文针对非雷击短路故障、雷击故障和雷击未故障几种场景对所提出方法的速动性、可靠性以及抗坏数据干扰能力进行了研究。

1 雷击后的暂态电压行波特征

本节通过依次分析雷击线路未引发接地短路故障、雷击线路或杆塔引发接地短路故障、单极接地故障、极间短路故障(上述场景在后文依次简称为雷击未故障、雷击故障、非雷击短路故障)中附加分量(雷电流或者短路故障所引入)的性质,进而揭示雷击和接地故障场景下保护端检测到的反向线模电压行波的特征,为提出后续的雷击识别方法提供了理论依据。

为解除正、负极电气量之间的电磁耦合,本文使用凯伦贝尔变换将波形进行解耦,线模分量相比于零模分量,不流经大地,因此所测值不受大地电阻率和接地情况的影响,数值更加稳定;且线模波阻抗的数值基本不受频率的影响,在各频率上基本为恒定值,因此更有利于计算准确的反向线模电压行波;此外,线模分量在线路上的色散度更小,行波在线路上传播时可保留更为完整的频带分布,有利于提高后续判据的可靠性,因此本文选取反向线模电压行波作为研究对象。下述波形均为基于文献[17]中四端柔性直流输电系统模型的仿真结果。

1.1 遭遇雷击但未引发接地故障的场景

线路遭遇雷击时,雷击引入的干扰行波将在线路上传播,为排除线路的耦合作用,将正、负极电压、电流进行解耦,经凯伦贝尔变换,因雷电流引入的附加线模、零模电压分别为

$$\begin{cases} u_1 = \sqrt{2}/2 \cdot (u_+ - u_-) = \sqrt{2}/2 \cdot (1 - M) I_g Z_g \\ u_0 = \sqrt{2}/2 \cdot (u_+ + u_-) = \sqrt{2}/2 \cdot (1 + M) I_g Z_g \end{cases} \quad (1)$$

附加线模、零模电流分别为

$$\begin{cases} i_1 = \sqrt{2}/2 \cdot (i_+ - i_-) I_g = \sqrt{2}/2 \cdot (1 - M) I_g \\ i_0 = \sqrt{2}/2 \cdot (i_+ + i_-) I_g = \sqrt{2}/2 \cdot (1 + M) I_g \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_+ 、 u_- 分别为正、负极线路因遭遇雷击产生的附加电压; i_+ 、 i_- 分别为正、负极线路因遭遇雷击产生的附加电流; 电压 u_1 、 u_0 分别为附加线模电压与附加零模电压; i_1 、 i_0 分别为附加线模电流与附加零模电流; M 为正负极线路之间的耦合系数 ($M < 0$); I_g 为雷电流; Z_g 为雷击处看进去正负极线路等效系统阻抗。由式(1)可推导出保护端检测到的附加反向线模电压行波为

$$u_b = 0.5(u_1 - Z_1 i_1) = C I_g \quad (3)$$

式中: u_b 为保护端检测到的附加反向线模电压行波; Z_1 为线模网络波阻抗; $C = \sqrt{2}/4(1-M)(Z_g - Z_1)$, 为常数。因此, 遭遇雷击时, 雷电流在线路上引入的初始反向线模电压行波的附加分量正比于雷电流, 即附加分量波形也呈尖峰变化。

根据文献[18]的结论, 雷电波超过 80% 的能量集中在 1~100 kHz, 低频(0~100 Hz)的能量仅占 2.3%, 故当雷电流引入的反向线模电压行波在线路上传播并发生折/反射时, 保护端检测到的反向线电压行波将包含有频率分布集中于 1~100 kHz 的雷电流引入的尖峰。

当雷电流能量较小而未引发绝缘子串击穿时, 系统不存在经过渡电阻的对地泄流通道, 故雷电流引入的尖峰行波仅在线路边界进行折/反射, 保护端将周期性地检测到尖峰状的行波。由前文分析, 尖峰波形类似于雷电流波形。故该尖峰持续时间极短, 当尖峰经折/反射离开保护端后, 保护端检测的反向线模电压行波将恢复至初始值。因此, 在遭遇雷击而未引发接地故障的场景下, 保护端检测到的反向线模电压行波将周期性地出现尖峰, 随后恢复至初始值。其波形如图 1 所示。

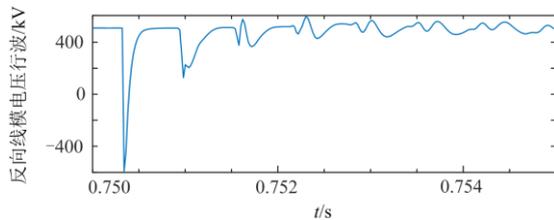


图 1 雷击未故障场景下的反向线模电压行波

Fig. 1 Reverse traveling wave voltage traveling wave under lightning strike without fault scenario

1.2 非雷击短路故障场景下反向线模电压行波特征

当线路遭遇短路故障时, 在 MMC 闭锁前, 文献[19]已对直流侧电压的变化情况做详细分析: 在换流器闭锁之前, 直流侧电压的衰减过程是一个欠阻尼振荡的过程, 其振荡角频率为

$$\omega' = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{2L}{3} + L_0\right)\left(\frac{6C}{N}\right)} - \left[\frac{\frac{2R}{3} + R_0}{2\left(\frac{2L}{3} + L_0\right)}\right]^2} \quad (4)$$

式中: L 为桥臂电感; L_0 为放电回路直流侧等效电抗; C 为子模块电容; R_0 为放电回路直流侧等效电阻; R 为桥臂等效电阻; N 为投入运行的子模块数量。对式(4)的右式进行数学变换, 使得 ω' 满足如式(5)所示不等式。

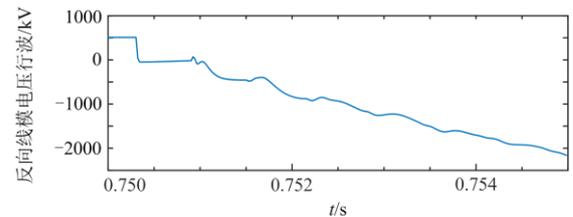
$$\omega' < \sqrt{1/\left[(2L/3)(6C/N)\right]} \quad (5)$$

式(5)的右侧表达式不再含有放电回路直流侧等效电阻 R_0 、等效电抗 L_0 , 因此即使受线路频变特性的影响致使 R_0 、 L_0 发生变化, 直流侧电压的振荡频率 ω' 总小于式(5)中的右侧值, 且该值仅与换流器自身参数有关。代入本文的实际工程参数 $N=436$, $L=100$ mH, $C=150$ mF^[20], 得

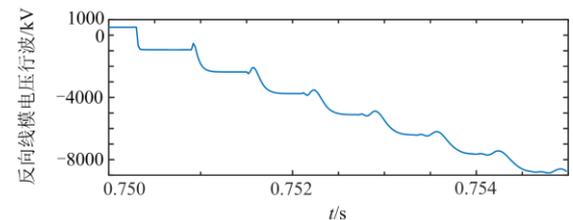
$$\omega' < 85.4 \text{ rad/s} \quad (6)$$

将之换算成频率信息, 可见发生接地故障时, 系统电压的振荡频率 $f < 13.6$ Hz。

可见, 相比于雷电流频率分布, 短路故障时的故障分量呈非周期性衰减变化, 在反向线模电压行波上反映为不含尖峰跌落特征, 波形如图 2 所示。



(a) 单极接地故障



(b) 极间短路故障

图 2 非雷击故障场景下的反向线模电压行波

Fig. 2 Reverse traveling wave voltage traveling wave under non-lightning fault scenario

1.3 遭遇雷击并且引发接地故障的场景

当线路遭遇较强的雷击, 导致绝缘子串发生击穿并引发接地故障时, 不同于雷击未故障的场景, 该场景下由于绝缘子串发生了击穿, 线路将由击穿的绝缘子串经杆塔与地相接, 由此引发接地故障。

该场景下, 保护端检测到的反向线模行波中不仅包含由雷电流引入的尖峰, 还叠加有由接地故障点产生的附加故障分量, 该分量将导致正极电压发生跌落, 进而导致反向线模电压行波呈跌落趋势。

雷击杆塔并引发接地故障的场景类似于雷击线路故障, 反向线模电压行波同样包含尖峰并呈跌落走势。与之不同的是, 由于雷电流首先击中杆塔, 并非直击线路, 故大部分雷电流的能量将经由杆塔耗散至大地, 因此, 保护端检测到的尖峰幅值较低, 陡度较小。因此, 该场景下(“雷击线路、杆塔故障”场景)的反向线模电压行波同样包含有雷电流引入的尖峰, 并呈跌落走势, 其波形如图 3 所示。

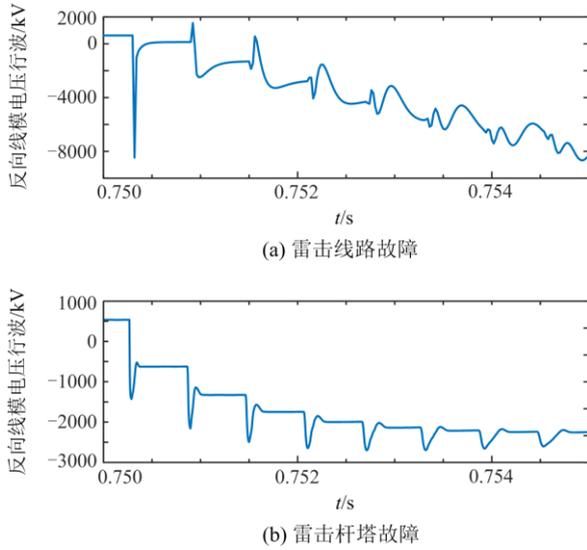


图 3 雷击故障场景下的反向线模电压行波

Fig. 3 Reverse traveling wave voltage traveling wave under lightning fault scenario

1.4 波形特征分析

综合 1.1 节与 1.2 节的分析结果, 可得到关于各类场景下反向线模电压行波的结论如下: 遭遇雷击的场景相比于非雷击短路故障的场景, 波形中含有雷击引入的尖峰; 雷击故障场景相比于雷击未故障场景, 波形呈跌落走势。将各类场景的反向线模电压行波的波形特征归纳于表 1。

表 1 各类场景下波形特征总结

Table 1 Summary of waveform characteristics in various scenarios

场景	尖峰含量	走势特征
雷击线路未故障	高	围绕初值振荡
雷击线路故障	高	跌落
雷击杆塔故障	高	跌落
非雷击短路故障	低	跌落

因此, 如果采用合适的数学工具对波形中尖峰的含量进行定量分析, 则有望区分遭遇雷击的场景和未遭遇雷击的短路故障场景; 若能排除雷电流引入的尖峰干扰以有效判别波形的走势特征, 则可进一步区分雷击场景下线路是否遭遇短路故障。

2 雷击干扰识别方法

根据第 1 节的理论分析, 在设计判据时: 一方面, 需要提出可量化分析波形中的高频尖峰成分含量的算法, 以区分是否遭受雷击; 另一方面, 需要对反向线模行波的走势特征进行评估, 以辨识是否发生短路故障。本节内容将主要围绕上述两点展开: 首先利用高阶中值滤波算法(滤波窗长后续整定为 50 个数据点), 滤除雷击场景下波形中的高频尖峰, 计算中值滤波前后波形的小波熵相对变化率, 以定量衡量原波形中雷电流引入的高频尖峰的含量, 进而实现对是否遭遇雷击进行区分; 与此同时, 中值滤波后的波形由于滤除了雷电流引入的尖峰干扰, 可更为直观地反映波形的走势特征, 结合线性拟合函数一次项系数即可进一步做定量衡量, 从而实现雷击故障和雷击未故障两类场景的区分。

2.1 基于中值滤波的高频成分分离算法

本文将中值滤波算法应用于处理保护端所采集到的反向线模电压行波, 原理与二维图像去噪过程类似^[21]: 对于一组一维数据 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 以 x_i 为中心, 取数据长度为 l 的滑动数据窗 $L = \{x_{i-(l/2)+1}, \dots, x_i, \dots, x_{i+(l/2)}\}$, 将滑动数据窗 L 中的 l 个数据按大小顺序排列, 得到新的数组 $L' = \{y_{i-(l/2)+1}, \dots, y_i, \dots, y_{i+(l/2)}\}$, 取数组 L' 的中位数作为原数组中 x_i 的新值, 即

$$\begin{cases} x_i = y_i & \text{当 } i \text{ 为奇数} \\ x_i = (y_i + y_{i+1})/2 & \text{当 } i \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (7)$$

将式(7)用于对反向线模电压行波的处理, 以滤除雷击产生的尖峰。

如图 4(a)~图 4(c)所示, 在遭受雷击的 3 种场景下, 中值滤波算法对雷击产生的尖峰滤除效果显著, 良好地还原了波形走势特征。雷击线路未故障时, 中值滤波后波形近似于一条水平线; 而雷击线路或杆塔故障时, 中值滤波后的波形呈跌落走势。如图 4(d)和图 4(e), 发生单极接地故障和极间短路故障时, 由于不存在雷击引入的剧烈变化的尖峰, 中值滤波基本不对波形产生影响, 滤波前、后的波形基本重合, 并呈跌落的走势特征。

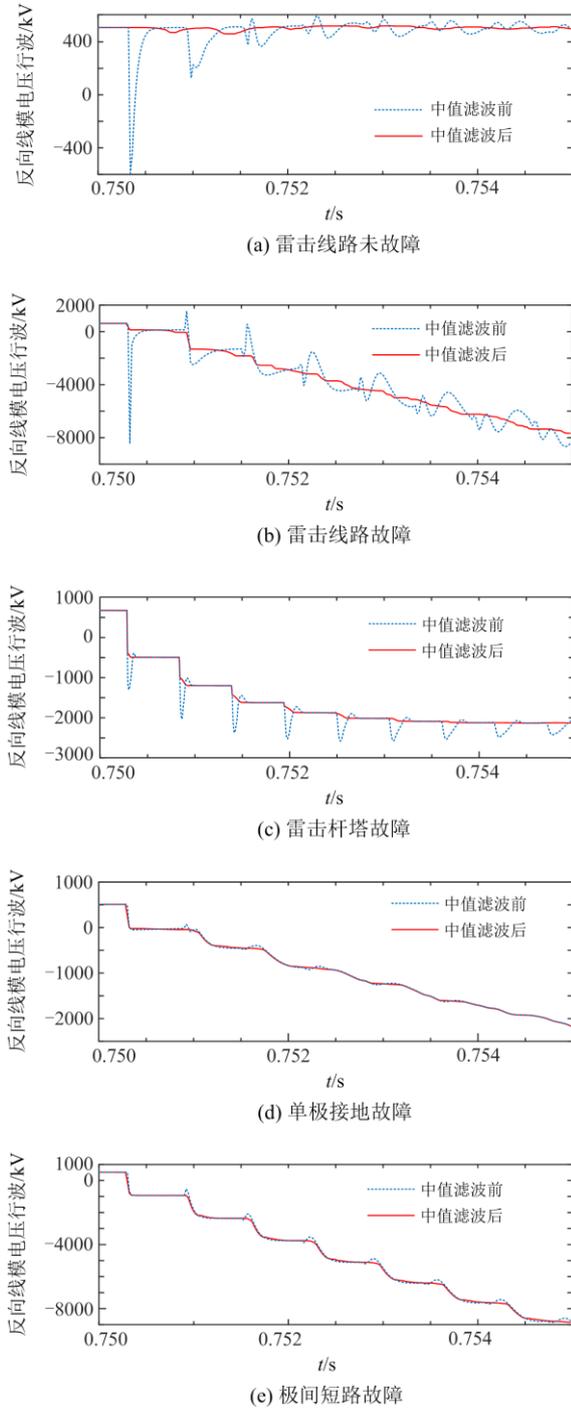


图 4 反向线模电压行波经中值滤波后的波形

Fig. 4 Reverse line mode voltage traveling waveform after median filtering

2.2 基于中值滤波与小波熵算法的雷击/非雷击场景识别判据

2.2.1 小波熵算法

将小波变换与 Shannon 信息熵相结合得出小波熵的定义由式(8)给出。

$$S_{\text{WT}} = -\sum p_j \ln(p_j) \quad (8)$$

式中, $p_j = E_j/E_{\Sigma}$ 。其中, E_j 为待分析信号经过小波分解后的第 j 层的能量, E_{Σ} 为待分析信号的总能量, 两者分别由式(9)和式(10)给出。

$$E_j = \sum_{k=1} E_k = \sum_{k=1} |(W_{\psi}S)(j,k)|^2 \quad (9)$$

$$E_{\Sigma} = \sum_{j=1} E_j = \sum_{j=1} \sum_{k=1} |(W_{\psi}S)(j,k)|^2 \quad (10)$$

式中, $(W_{\psi}S)(j,k)$ 为第 j 层第 k 个小波系数。

由式(9)和式(10)可知, 对于频率分布比较单一的信号, 小波变换所得的小波系数的分布更集中, 其他频带下的小波系数接近 0, 信号的能量谱分布比较集中, 因此由式(8)计算的小波熵数值较小; 相反, 对于“混乱”的信号, 各种频率的信号发生混叠, 小波系数的分布比较均匀, 其能量谱分布散布在各个尺度上, 小波熵数值较大^[22]。

在雷击场景下, 由 2.1 节可知, 因尖峰的存在, 波形中存在大量由尖峰引入的中高频频带, 波形的能量谱分布较为广泛, 因此所计算小波熵较大; 经中值滤波后, 由于尖峰被滤除, 波形中的中高频成分大幅削弱, 能量谱分布变得更为集中, 从而使小波熵数值大幅度降低。而在非雷击短路故障下, 由于不存在雷电流引入的尖峰, 故中值滤波前后的中高频成分无明显变化, 波形的能量谱分布基本不变, 波形的小波熵无明显变化。因此, 通过计算中值滤波前后的小波熵相对变化率, 即可定量反映中值滤波的滤波效果, 判别原波形中是否存在雷电流引入的高频尖峰, 进而对线路、杆塔是否遭遇雷击进行判别。

2.2.2 小波熵相对变化率判据

根据中值滤波对雷击场景与非雷击短路故障场景的反向线模电压行波不同的滤波效果, 本文用小波熵相对变化率区分遭遇雷击和非雷击短路故障的场景。考虑到雷击判据的出口时间应不大于主保护的出口时间, 根据文献[9]的分析, 主保护出口时间最短为 3 ms, 考虑一定的时间裕度, 本文以启动判据启动为起始时刻开始采样, 采样时长为 1 ms。其中, 雷击干扰识别判据和与它相配合的主保护共用同一个启动判据, 本文采用文献[23]中所述的方向突变量启动判据。与传统行波主保护所面临的问题类似, 采用该启动判据时, 虽然能够保证对轻微故障的灵敏响应, 但雷击干扰同样会导致保护启动, 若此, 则后续保护误动的情况无法完全避免, 需要可靠的雷击干扰识别判据予以应对。

计算上述 5 种场景的小波熵和小波熵相对变化率, 结果如表 2 所示。从表 2 中数据可知, 遭受雷击场景和非雷击短路故障场景的小波熵相对变化率数值差别较大, 应证了 2.2.1 节的结论, 由此构造小波熵相对变化率判据, 如式(11)所示。

$$\begin{cases} S_{\Delta} < S_{\text{set}} & \text{普通短路故障} \\ S_{\Delta} > S_{\text{set}} & \text{雷击工况} \end{cases} \quad (11)$$

式中: S_{set} 为整定的小波熵相对变化率阈值; S_{Δ} 为中值滤波前后的小波熵的相对变化率。 S_{Δ} 定义为

$$S_{\Delta} = (S_0 - S_1)/S_0 \times 100\% \quad (12)$$

式中, S_0 、 S_1 分别为中值滤波处理前、后的小波熵。

表 2 5 种场景下的小波熵相对变化率

Table 2 Relative rate of change of wavelet entropy for five scenarios

场景	原波形小波熵	中值滤波后小波熵	小波熵相对变化率/%
雷击线路未故障	0.021 83	0.001 74	92.00
雷击线路故障	0.178 10	0.017 40	90.21
雷击杆塔故障	0.020 14	0.003 60	82.10
单极接地故障	0.001 25	0.000 95	24.14
极间短路故障	0.001 03	0.000 98	4.72

2.3 基于中值滤波与线性拟合函数一次项系数的雷击故障/雷击未故障的识别判据

由 2.1 节对中值滤波后的波形分析, 中值滤波可以滤除由雷电流引入的尖峰, 还原波形的走势特征。对于雷击故障, 中值滤波后波形呈跌落走势, 而对于雷击未故障, 波形近似于水平线。为量化分析波形的跌落走势, 本文首先对初始波形进行中值滤波处理, 滤除雷击引入的尖峰干扰, 随后利用最小二乘法对中值滤波后的波形进行线性拟合, 构造反向线模电压行波与时间的一次多项式函数, 由函数的一次项系数对波形的走势进行量化, 以判断波形的走势特征。

2.3.1 基于最小二乘法的线性拟合法

最小二乘拟合法的基本原理为: 寻找与给定的 m 个点 $(x_i, y_i) (i=1, 2, \dots, m)$ 的距离平方和最小的曲线 $f(x)$, 其中 $f(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n$, a_0 为截距, $a_1 \sim a_n$ 为拟合系数, n 为拟合次数。本文利用最小二乘法拟合判断波形走势特征, 设置一次拟合函数 $f(x) = b + kx$, 求解条件为

$$k, b = \arg \left(\sum_{i=1}^n (y_i - kx_i - b)^2 \right)_{\min} \quad (13)$$

解得:

$$\begin{cases} k = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i} \\ b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i} \end{cases} \quad (14)$$

根据 k 值的大小, 即可定量判断波形的走势特征。

事实上, 当波形中存在大量由雷电流引入的尖峰等干扰时, 短时窗内拟合系数的大小将无法准确衡量波形的走势特征, 以雷击故障为例进行说明, 分别以 0.5 ms、1 ms、5 ms 的时窗对未经中值滤波的波形进行线性拟合, 结果如图 5 所示。

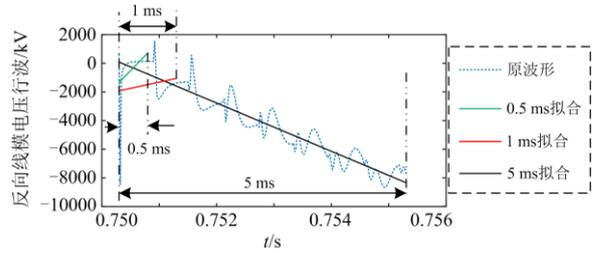


图 5 不同时窗下的线性拟合结果

Fig. 5 Linear fitting results under different time windows

图 5 可较为直观地反映不同时窗下的拟合情况: 随着拟合时窗的增加, 拟合直线的斜率逐渐逼近波形的真实走势, 当拟合时窗分别为 0.5 ms、1 ms、5 ms 时, 拟合直线斜率分别为 4.112×10^6 kV/s、 8.622×10^5 kV/s、 -1.684×10^6 kV/s。在 0.5 ms 以及 1 ms 窗长下的拟合系数远大于 0, 与波形的跌落走势相悖。可见, 雷电流引入尖峰的干扰将导致短时窗下的拟合结果无法准确反映波形的走势特征, 而较长的时窗虽可准确反映波形走势特征, 却无法满足快速性的要求。因此, 本文为兼顾拟合的准确性和快速性, 首先将原始波形进行中值滤波, 滤除雷电流引入的尖峰干扰, 再于短时窗内对滤波后波形进行拟合, 以实现波形走势特征准确而快速的判别。

2.3.2 拟合系数判据

利用最小二乘拟合法, 取启动判据启动后的 1 ms 时间窗, 对雷击故障和雷击未故障场景下的反向线模电压行波经中值滤波后的波形进行线性拟合。拟合结果如图 6 所示。

对比图 6 中的 3 类遭遇雷击场景的反向线模电压行波依次经中值滤波后的波形, 以及经线性拟合后的直线, 可知中值滤波将雷击引入的尖峰滤除后, 波形的走势特征更为明显: 遭遇雷击并导致短路故障时, 由于对地存在泄流通道, 附加故障分量将导

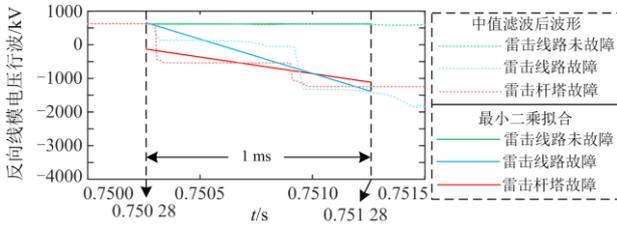


图 6 3 类工况下的线性拟合结果

Fig. 6 Linear fitting results for three types of working conditions

致反向线模电压行波呈跌落走势, 因此拟合函数的一次项系数(直线斜率)远小于 0, 且与雷击未故障的场景相差多个数量级; 雷击未故障场景下, 由于不存在故障分量, 中值滤波后波形在初始值附近, 因此拟合直线接近于水平线, 拟合系数的一次项系数更接近于 0. 3 种雷击场景下的拟合函数一次项系数分别为: 雷击线路未故障为 2.29×10^2 kV/s; 雷击线路故障为 -2.04×10^6 kV/s; 雷击杆塔故障为 -1.09×10^6 kV/s. 可见, 雷击故障与雷击未故障场景下的线性拟合函数的一次项系数有较大数量级的差别, 利用该特征可进一步构造判据区分雷击故障和雷击未故障的场景, 判据如式(15).

$$\begin{cases} k < k_{set} & \text{雷击故障场景} \\ k > k_{set} & \text{雷击未故障场景} \end{cases} \quad (15)$$

式中: k 为中值滤波后的波形拟合函数中的一次项系数; k_{set} 为整定值。

2.4 雷击识别方法的详细流程图

综上所述, 所提方法的流程图如图 7 所示。

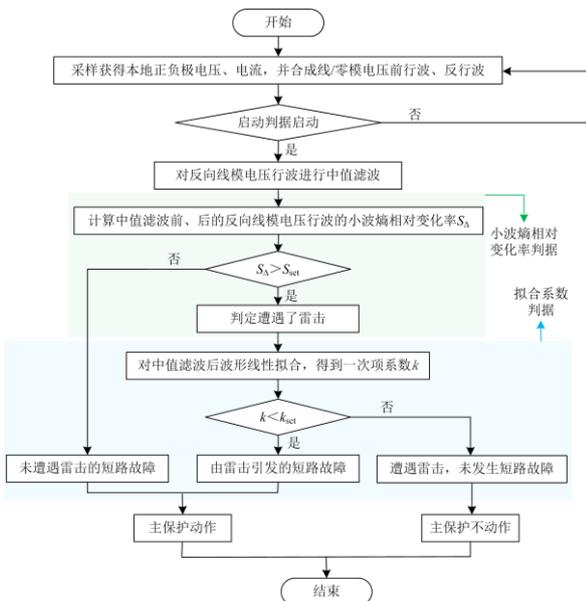


图 7 所提雷击识别方法的流程图

Fig. 7 Flow chart of the proposed lightning strike identification method

3 判据整定方法

3.1 中值滤波窗长的整定

中值滤波窗长的整定需要满足两个原则: 其一, 需要完全滤除雷电流在波形中引入的尖峰, 以尽可能排除其干扰, 故窗长不能太小; 其二, 为使遭遇雷击与未遭遇雷击的场景的小波熵相对变化率存在较大的差别, 窗长不能过大。

针对原则一: 为尽可能完全滤除雷电流在反向线模电压行波中引入的尖峰, 并考虑到尖峰在边界折/反射作用以及线路色散作用使尖峰持续时间增大的影响, 应使中值滤波窗长对应的时间远大于雷电流的波长时间。本文选用雷电流模型为典型双指数 $2.6/50 \mu\text{s}$ 模型, 取雷电流波尾时间的 5 倍作为中值滤波窗长对应时间的最小值, 即 $250 \mu\text{s}$ 。本文采样频率为 100 kHz , 对应中值滤波的数据窗长为 25。故为保证雷电流引入的尖峰被完全滤除, 中值滤波窗长不应小于 25 个数据点。

针对原则二: 对于典型场景, 计算了杆塔位于线路上不同位置时(由于绝缘子串击穿位置与杆塔所在位置相同, 故将故障点、雷击点所在位置近似等同于与故障点距离最近的杆塔所在位置), 雷击线路未故障、雷击线路故障、雷击杆塔故障 3 种雷击场景和单极接地故障、极间短路故障两种非雷击短路故障场景在 0~80 个采样点的滤波窗长下, 中值滤波处理前后的小波熵相对变化率结果如图 8 所示。

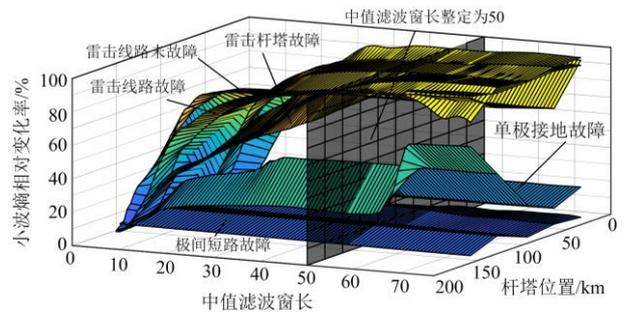


图 8 小波熵相对变化率在不同场景下的计算结果

Fig. 8 Calculation results of the relative rate of change of wavelet entropy in different scenarios

由图 8 可知, 5 种场景下小波熵的相对变化率随着中值滤波窗长的增加而增加, 但不同场景下小波熵相对变化率的增加幅度受具体场景的影响: 雷击线路故障、雷击线路未故障和雷击杆塔故障 3 种遭遇雷击的场景下 S_{Δ} 的增加速度远大于单极接地故障、极间短路故障场景下 S_{Δ} 的增加速度。由图 8 可知, 当杆塔距离本地保护端 150 km 附近时, 最

不利于雷击与非雷击短路故障场景的区分。为使整定的中值滤波窗长适用于杆塔位于线路任意位置的情况,在最不利于区分雷击场景与非雷击短路故障场景下,即杆塔距离本地保护端 150 km 的情况下绘制 S_{Δ} 随中值滤波窗长的变化情况如图 9 所示。

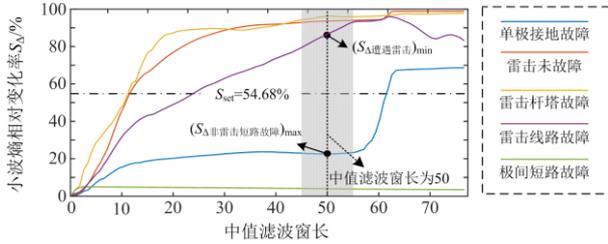


图 9 S_{Δ} 随中值滤波窗长的变化情况

Fig. 9 Variation of S_{Δ} with median filter window length

如图 9 中阴影部分所示,当中值滤波窗长为 45~55 个采样点时,雷击场景和非雷击短路故障场景计算出的小波熵相对变化率差值最大。本文将中值滤波窗长整定为 50 个采样点,既满足了原则一的要求,又保证了遭遇雷击和非雷击短路故障场景下的小波熵相对变化率具有充足的区分度。针对不同的柔直工程,可参照上述流程,整定兼顾上述两原则的中值滤波窗长。

3.2 小波熵相对变化率 S_{set} 的整定

根据图 9,当中值滤波窗长整定为 50 个采样点时,雷击场景下小波熵相对变化率的最小值 $(S_{\Delta\text{遭遇雷击}})_{\min}$ 为 86.78%,非雷击短路故障场景下小波熵相对变化率的最大值 $(S_{\Delta\text{非雷击短路故障}})_{\max}$ 为 22.58%,为保证 S_{set} 可将两类场景可靠区分的同时留有一定的裕度,本文取 S_{set} 为 $(S_{\Delta\text{遭遇雷击}})_{\min}$ 和 $(S_{\Delta\text{非雷击短路故障}})_{\max}$ 的平均值,故整定 $S_{set} = 54.68\%$ 。因此,小波熵相对变化率判据如式(16)所示。

$$\begin{cases} S_{\Delta} < 54.68\% & \text{非雷击短路故障} \\ S_{\Delta} > 54.68\% & \text{发生雷击} \end{cases} \quad (16)$$

3.3 一次项系数 k_{set} 的整定

如 2.3.2 节所述,雷击故障和未故障场景下,反向线模电压行波的本质区别在于:相比于雷击未故障场景波形接近于水平的特性,在雷击故障场景下,波形呈跌落走势,线性拟合函数远远偏离于水平轴,其一次项系数远小于 0。因此,以雷击线路并引发最轻微接地故障(线路末端故障)场景下的反向线模电压行波经中值滤波后的波形的线性拟合函数的一次项系数进行整定,所求 $k = -1.04 \times 10^6$ kV/s,为保证其可靠性,在此基础上再降低一个数量级作为其整定值,最终所整定 $k_{set} = -1.04 \times 10^5$ kV/s。拟合系

数判据如式(17)所示。

$$\begin{cases} k_{set} < -1.04 \times 10^5 \text{ kV/s} & \text{雷击故障} \\ k_{set} > -1.04 \times 10^5 \text{ kV/s} & \text{雷击未故障} \end{cases} \quad (17)$$

4 仿真实验

4.1 仿真案例基本情况

基于电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 搭建了如图 10 所示的张北四端柔性直流输电线路模型^[24]。系统的电压等级为 ± 500 kV,以线路 Line1 为研究对象,仿真采样频率为 100 kHz。

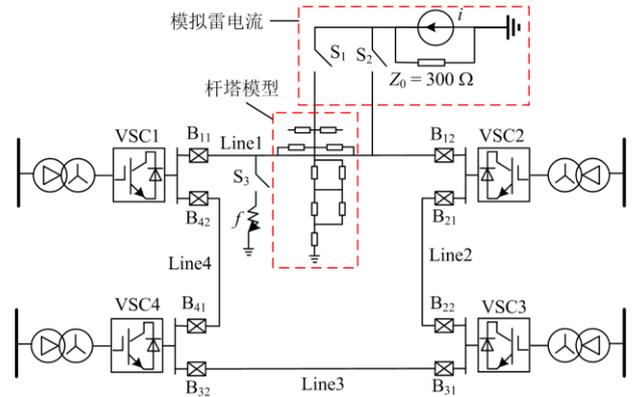


图 10 张北四端柔性直流输电线路仿真模型

Fig. 10 Zhangbei four-terminal flexible DC transmission simulation model

图 10 中,采用受控电流源模拟雷电流向被击中物体的放电过程,其中雷电流采用 2.6/50 μs 的双指数模型,雷电流通道波阻抗为 $Z_0 = 300 \Omega$ 。杆塔采用 500 kV 常用的 G1 直线型杆塔的多波阻抗模型,线路与杆塔之间连接的绝缘子串采用伏秒特性数学模型,即当绝缘子串两端电压与其伏秒特性曲线产生交点时,表示绝缘子串发生闪络。当开关 S_1 闭合时,表示负极性雷击中杆塔顶端;当开关 S_2 闭合时,表示负极性雷击中正极输电线路。当开关 S_3 闭合时,表示发生非雷击短路故障。研究表明,90% 以上的雷击为负极性的雷电流落于正极输电线路或者塔顶,因此本文只考虑负极性雷电流。

4.2 所提方法的动作性能分析

以杆塔位于 Line1 线路上各个位置进行上述 5 类场景下的仿真实验。由于篇幅限制,以杆塔距离左侧保护端 90 km 为例进行详细分析,剩余仿真结果详见图 11。以文献[25]所取雷电流幅值为参考,雷击线路未故障时,雷电流幅值取 10~30 kA;雷击线路故障时,取雷电流幅值为 40~160 kA;雷击杆塔故障时,由于反击造成故障所需的雷电流应大于绕击故障所需的雷电流^[16],故取雷击杆塔故障雷电

流幅值为 140~180 kA; 柔直系统遭遇非雷击短路故障时, 在单极接地故障场景下需要考虑的最大过渡电阻为 300 Ω^[23], 极间短路故障场景下需要考虑的最大过渡电阻为 20 Ω^[26], 仿真结果汇总于表 3。

由表 3 可知, 发生雷击时, 由于中值滤波对尖峰的滤除效果显著, 小波熵相对变化率均超过 80%, 在单极接地故障和极间短路故障时, 由于中值滤波无明显作用, 小波熵相对变化率均小于 30%。根据式(16), 小波熵相对变化率判据可以准确区分雷击场景和非雷击短路故障场景, 并留有足够裕度。

雷击故障场景下, 由于波形呈跌落走势, 线性拟合函数一次项系数均远小于 0; 雷击未故障场景下, 波形近似平行于水平线, 拟合函数一次项系数接近于 0。为进一步验证雷击识别方法的适用性, 本文遍历线路全长对雷击线路不同位置杆塔的场景进行大量仿真验证, 计算小波熵相对变化率 S_{Δ} 和 k 值分别如图 11(a)、图 11(b)所示。

如图 11(a)所示, 在线路全长范围内遭受雷击的 3 种场景下, 小波熵变化率 S_{Δ} 均大于 70%, 而非雷击短路故障的两场景下, 小波熵变化率 S_{Δ} 均小于 45%。整定值 S_{set} 可将雷击场景和非雷击短路故障准

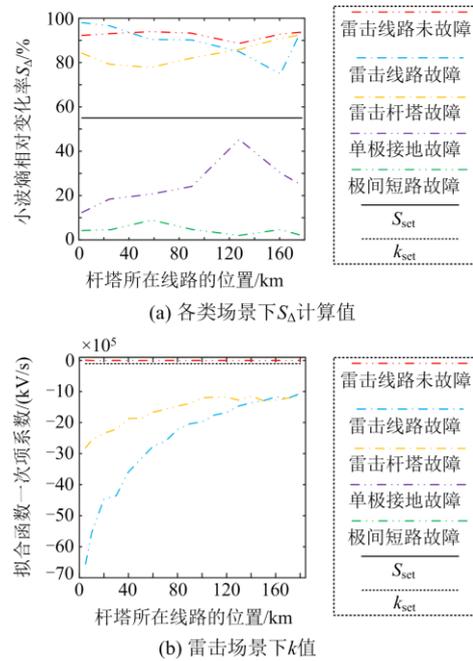


图 11 杆塔位于线路不同位置时的仿真结果

Fig. 11 Simulation results when the tower is located at different locations on the line

表 3 不同场景下仿真结果汇总

Table 3 Summary of simulation results in different scenarios

场景	雷电流极值 或过渡电阻阻值	中值滤波前 小波熵值	中值滤波后 小波熵值	小波熵值相对 变化率/%	初步判定 结果	拟合函数一次项 系数($\times 10^5$ kV/s)	最终判定结果
雷击 线路 故障	160 kA	0.178 10	0.017 437	90.2094	雷击场景	-20.4137	雷击故障
	130 kA	0.152 53	0.013 909	90.8811		-20.1394	
	100 kA	0.124 28	0.010 759	91.3429		-20.7652	
	70 kA	0.094 96	0.007 975	91.6017		-21.4135	
	40 kA	0.060 05	0.005 487	90.8626		-20.2739	
雷击 杆塔 故障	180 kA	0.019 87	0.003 58	82.1029		-10.9487	雷击未故障
	170 kA	0.020 07	0.003 59	82.1126		-13.5239	
	160 kA	0.020 14	0.003 60	82.1251		-14.5137	
	150 kA	0.020 07	0.003 62	81.9631		-12.6823	
雷击 线路 未故 障	140 kA	0.019 87	0.003 65	81.6306		-14.9234	雷击未故障
	30 kA	0.073 69	0.004 30	94.1647	0.0150		
	25 kA	0.057 80	0.003 40	94.1176	0.0145		
	20 kA	0.031 74	0.002 62	91.7454	-0.0711		
单极 接地 故障	15 kA	0.031 74	0.001 99	93.7303	非雷击 短路故障	-0.0865	—
	10 kA	0.021 83	0.001 74	92.0043		0.0023	
	0 Ω	0.001 25	0.000 95	24.1394		—	
	100 Ω	0.004 02	0.002 92	27.3632		—	
极间 短路	200 Ω	0.001 44	0.001 16	19.4444		—	—
	300 Ω	0.000 80	0.000 72	10.0000		—	
	0 Ω	0.001 03	0.000 98	4.7229		—	
极间 短路	10 Ω	0.001 20	0.001 17	2.8666		—	—
	20 Ω	0.001 40	0.001 37	1.6706		—	
	—	—	—	—		—	

确区分。同样的,如图 11(b)所示,在线路全长范围内,基于拟合函数一次项系数的判据也能可靠区分雷击故障和雷击未故障这两类场景。在图 11(b)中,由于纵坐标轴跨度过大导致雷击线路未故障与整定值的曲线看似较为接近,实际上两者纵坐标差 1~2 个数量级。

4.3 采样异常对所提雷击识别方法的影响

由于采样数据异常可能对雷击辨识带来较大影响,因此本节重点对此进行分析,并与文献[16]所提方法进行对比。由前文所述:文献[16]采样窗长仅为 20 μs,具有极佳的速动性。然而,当发生采样异常时,如采样点数据异常时,判据可能误判。假设在 0.7507 s 出现一个异常采样点,电流附加分量归 0。以 10 kA 雷击线路未故障为例,线、零模电流附加分量如图 12 所示。

采样正常时附加分量波形如图 12(a)所示,符合预期。采样异常时附加分量波形如图 12(b)所示,波形出现了一个凹形尖峰,有明显畸变。分别计算采样正常/异常时文献[16]的判据参数值,如表 4 所示。

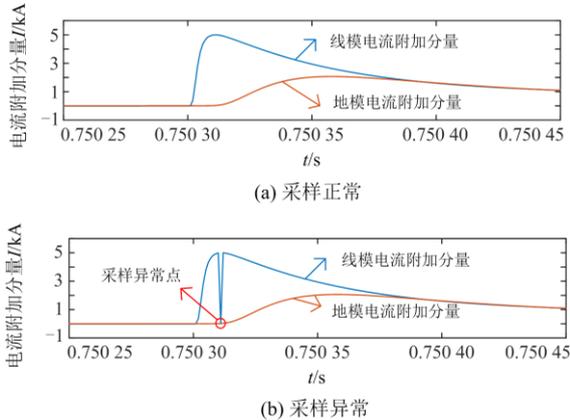


图 12 雷击线路未故障(10 kA 幅值雷电流)时的附加分量
Fig. 12 Additional component when lightning strikes the line without fault (10 kA amplitude lightning current)

表 4 采样正常/异常时 10 kA 雷击线路未故障场景下电气量的计算值

Table 4 Calculated value of the electrical quantity in the 10 kA lightning line without fault scenario when sampling normal/abnormal

参数	I_{1max}/kA	k_{ratio}	$\frac{di_1}{dt}/(kA s^{-1})$
采样正常	4.96	0.413	$1.228 \times 10^6 \sim 6.3 \times 10^4$
采样异常	4.96	0.413	$2.486 \times 10^6 \sim 2.5 \times 10^6$

将表 4 中采样正常数据代入文献[16]中判据,判定为雷击线路未故障。而将表 4 采样异常数据代入文献[16]中判据后,采样异常虽不会对文献[16]

中的幅值比判据产生影响,但会显著影响微分判据的结果,采样异常造成的扰动将导致结果会被误判为雷击线路故障,造成保护误动。

应用本文的雷击识别方法,基于上述数据进行中值滤波处理后,同样对 10 kA 雷击线路未故障的场景进行分析,当在 0.75076~0.75084 s 时段内出现连续 5 个采样异常点的极端恶劣情况时,波形如图 13 所示。

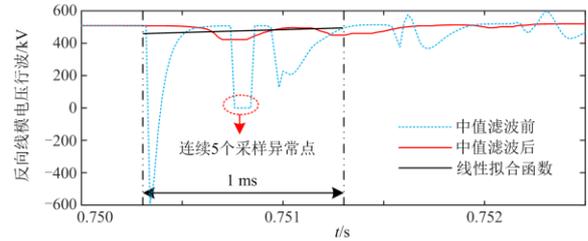


图 13 采样异常时反向线模电压行波

Fig. 13 Inverse line mode voltage line wave when sampling abnormalities

如图 13 所示,由于中值滤波算法可滤除采样异常数据,故中值滤波后波形的走势特征并未被改变,所计算判据参数 $S_{\Delta} = 92.7268\%$, 大于整定值 54.68%,判定为遭遇雷击的场景;所计算拟合函数一次项系数 $k = 1.73 \times 10^3$ kV/s, 大于整定值 $k_{set} = -1.04 \times 10^5$ kV/s,进一步判定为雷击未故障。因此,即便是连续出现 5 个采样异常点的极端情况,小波熵相对变化率判据与拟合函数一次项系数判据均可正确动作。

5 结论

为可靠、快速识别雷击干扰,提升主保护的安全性,本文结合中值滤波、小波熵算法以及线性拟合函数法提出了一种雷击识别方法,结论如下:

- 1) 所提雷击识别方法将中值滤波与小波熵、线性拟合的方法进行配合,兼顾了识别的准确性和速动性,采样窗长仅为 1 ms,先于柔直系统配置的线路高速主保护出口,从而提高主保护的安全性;
- 2) 所提雷击识别方法具有较高的安全性,即便是在连续 5 个采样点异常的情况下,该方法仍可准确判别;
- 3) 所提雷击识别方法可准确区分全线范围内不同雷电流幅值的雷击场景、过渡电阻高达 300 Ω 的单极接地故障场景以及过渡电阻达 20 Ω 的极间短路故障场景,具有较高的选择性和灵敏性。

参考文献

[1] 李泽文,唐迪,夏翔翔,等. 输电线路故障行波保护综

- 述[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 49-58.
- LI Zewen, TANG Di, XIA Yixiang, et al. A summary of fault traveling wave protection for transmission lines[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 49-58.
- [2] 宋国兵, 高淑萍, 蔡新雷, 等. 高压直流输电线路继电保护技术综述[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 123-129.
- SONG Guobing, GAO Shuping, CAI Xinlei, et al. Survey of relay protection technology for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 123-129.
- [3] 田培涛, 吴庆范, 黄金海, 等. 基于 LCC 和 FHMMC 的混合多端直流系统线路保护方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 170-177.
- TIAN Peitao, WU Qingfan, HUANG Jinhai, et al. Research on protection strategy of a hybrid multi-terminal DC system based on LCC and FHMMC[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 170-177.
- [4] 吕哲, 王增平. 基于暂态波形特征的输电线路雷击干扰与故障识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 18-26.
- LÜ Zhe, WANG Zengping. Identification of lightning strike disturbance and faults for transmission line based on transient waveform characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 18-26.
- [5] 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.
- [6] YOU M, ZHANG B H, CHENG L Y, et al. Lightning model for HVDC transmission lines[C] // 10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2010), Managing the Change, March 29- April 1, 2010, Manchester, UK.
- [7] 刘可真, 束洪春, 于继来, 等. ± 800 kV 特高压直流输电线路雷击暂态识别[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3007-3014.
- LIU Kezhen, SHU Hongchun, YU Jilai, et al. Transient identification of lightning strokes on ± 800 kV UHVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3007-3014.
- [8] 束洪春, 刘可真, 朱盛强, 等. ± 800 kV 特高压直流输电线路单端电气量暂态保护[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(31): 108-117.
- SHU Hongchun, LIU Kezhen, ZHU Shengqiang, et al. ± 800 kV UHVDC transmission line protection based on single end electrical transient signal[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(31): 108-117.
- [9] 汤广福, 王高勇, 贺之渊, 等. 张北 500 kV 直流电网关键技术与设备研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2097-2106.
- TANG Guangfu, WANG Gaoyong, HE Zhiyuan, et al. Research on key technology and equipment for Zhangbei 500 kV DC grid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2097-2106.
- [10] 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.
- [11] 郭贤珊, 周杨, 梅念, 等. 张北柔直电网的构建与特性分析[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3698-3707.
- GUO Xianshan, ZHOU Yang, MEI Nian, et al. Construction and characteristic analysis of Zhangbei flexible DC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3698-3707.
- [12] 戴志辉, 刘自强, 刘雪燕, 等. 基于首行波曲率的柔性直流输电线路单端量保护[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1831-1841.
- DAI Zhihui, LIU Ziqiang, LIU Xueyan, et al. Single-ended protection for flexible DC transmission line based on curvature of initial traveling wave[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1831-1841.
- [13] 王聪博, 贾科, 赵其娟, 等. 基于故障全电流相关性检验的柔性直流配电线路纵联保护[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1764-1775.
- WANG Congbo, JIA Ke, ZHAO Qijuan, et al. Pilot protection for flexible-DC distribution line based on correlation test of DC current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1764-1775.
- [14] 付华, 陈浩轩, 李秀菊, 等. 含边界元件的 MMC-MTDC 直流侧单端量故障辨识方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(1): 215-226.
- FU Hua, CHEN Haoxuan, LI Xiuju, et al. MMC-MTDC DC side single-ended quantity fault identification method with boundary elements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(1): 215-226.
- [15] 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.
- [16] 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, 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.
- [17] 李海锋, 王钢, 赵建仓. 输电线路感应雷击暂态特征分析及其识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 114-119.
- LI Haifeng, WANG Gang, ZHAO Jiancang. Study on characteristics and identification of transients on transmission lines caused by indirect lightning stroke[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 114-119.
- [18] 罗仕乾. 雷电波的频谱及能量分布[J]. 高电压技术, 1995, 21(1): 85-86.
- LUO Shiqian. The spectrum and energy distribution of lightning wave[J]. High Voltage Engineering, 1995, 21(1): 85-86.
- [19] 李英彪. 柔性直流电网故障特性及其控制策略研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2017.
- [20] 刘麒麟, 张英敏, 陈若尘, 等. 张北柔直电网单极接地故障机理分析[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3172-3179.
- LIU Qilin, ZHANG Yingmin, CHEN Ruochen, et al. Pole-to-ground fault mechanism in Zhangbei flexible DC power grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3172-3179.
- [21] 陈健, 郑绍华, 余轮, 等. 基于方向的多阈值自适应中值滤波改进算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(2): 156-161.
- CHEN Jian, ZHENG Shaohua, YU Lun, et al. Improved algorithm for adaptive median filter with multi-threshold based on directional information[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(2): 156-161.
- [22] 赵挺凯, 叶庆卫, 周宇. 基于小波时间熵的超声波信号检测研究与应用[C] // 中国控制决策会议, 2009: 5.
- ZHAO Tingkai, YE Qingwei, ZHOU Yu. Research and application of ultrasonic signal detection based on wavelet-time entropy[C] // Chinese Control and Decision Conference, 2009: 5.
- [23] 童宁, 林湘宁, 张雪松, 等. 不依赖于边界元件的架空型多端柔直电网就地测距式接地保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 2049-2060.
- TONG Ning, LIN Xiangning, ZHANG Xuesong, et al. Fault location based single-ended protection strategy for overhead VSC-MTDC independent on boundary component[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7): 2049-2060.
- [24] 杜晓磊, 郭庆雷, 吴延坤, 等. 张北柔性直流电网示范工程控制系统架构及协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 164-173.
- DU Xiaolei, GUO Qinglei, WU Yankun, et al. Research on control system structure and coordination control strategy for Zhangbei demonstration project of MMC-HVDC grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 164-173.
- [25] 赵航. 超高压直流输电线路保护及雷击辨识[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [26] 贾科, 王聪博, 毕天姝, 等. 考虑过渡电阻影响的柔性直流配电系统电流突变量保护[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3187-3196.
- JIA Ke, WANG Congbo, BI Tianshu, et al. A DC current derivative protection with capability of resisting high resistance for flexible DC distribution system[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3187-3196.

收稿日期: 2022-03-04; 修回日期: 2022-08-17

作者简介:

吴通华(1977—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: wutonghua@sgepri.com.cn

黎钊(1998—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 992717254@qq.com

林湘宁(1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护和新能源发电等。E-mail: xiangning.lin@hust.edu.cn

(编辑 魏小丽)