

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210990

# 一种基于暂态量的柔性直流系统保护及雷击识别方法

薛士敏, 陈硕, 顾诚, 陈箫

(智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

**摘要:** 暂态量保护伴随着柔直技术的发展迎来了国内外研究的热潮, 当前保护动作速度的研究进展已趋近于极限。而保护识别速度的提高必然伴随着可靠性的降低, 所以, 如何在保证速动性要求下提高保护的可靠性是重中之重。远距离输电工程中雷击发生较为频繁, 在不引起闪络的情况下, 其作为一种干扰源是不容忽略的。基于此原因, 利用希尔伯特黄变换设计了一种高频保护方案, 同时利用雷电波波特征提出了一种雷击干扰识别方法。之后, 将雷击判据与保护判据相结合, 以弥补暂态量保护的不足, 提高其可靠性。最后, 在 PSCAD 仿真平台中搭建张北四端柔直系统以及雷电流模型完成保护方法的验证。经验证, 所设计保护方法可以准确识别故障极和区内外故障, 且不会因雷击干扰而误动, 同时保护具备较高的耐过渡电阻能力。

**关键词:** 柔性直流输电; 暂态量保护; 雷击干扰; 高频保护; 可靠性

## A method for protection and lightning identification in a flexible DC system based on transient quantities

XUE Shimin, CHEN Shuo, GU Cheng, CHEN Xiao

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China)

**Abstract:** With the development of flexible and straightening technology, transient protection has ushered in an upsurge of research at home and abroad, and the current research progress of protection action speed has approached its limit. The improvement of protection recognition speed will inevitably be accompanied by a decrease of reliability. So how to improve the reliability of protection under the requirement of ensuring quick motion is the most important thing. Lightning strikes occur frequently in long-distance power transmission projects, and they cannot be ignored as a source of interference without causing flashover. For this reason, this paper uses the Hilbert Huang transform to design a high-frequency protection scheme. At the same time, it uses the characteristics of the lightning wave to propose a lightning interference identification method. Then the lightning strike and protection criteria are combined to make up for the shortcomings of transient protection and improve its reliability. Finally, the Zhangbei four-terminal flexible DC system and the lightning current model are built in the PSCAD simulation platform to complete the verification of the protection method. It has been verified that the protection method designed in this paper can accurately identify fault poles and internal and external faults, and will not malfunction because of lightning interference. At the same time, the protection has a high resistance to transition resistance.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. KJ21-1-66).

**Key words:** flexible DC transmission; transient protection; lightning interference; high-frequency protections; reliability

## 0 引言

面对传统直流输电中无法解决的难题, 基于电

压源换流器的柔性直流输电技术(VSC-HVDC)得到了广泛的研究与迅速的发展, 将其与传统直流输电技术结合构成混合直流输电系统可以提高运行的灵活性, 且其自身也具备远大的发展前景<sup>[1-3]</sup>。采用两电平或三电平换流器的柔性直流输电技术无法满足当前的大容量和远距离输电的需求, 为此, 模块化

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助(KJ21-1-66)

多电平换流器(MMC)的提出将这一输电技术的发展前景又提升一个高度。

虽然基于模块化多电平换流器的柔直输电技术(MMC-HVDC)凭借优秀的运行性能得到了国内外学者认可,但是该结构下的直流侧故障发展迅速,甚至影响整个直流电网的稳定运行。为了避免直流侧故障对整个电网的不利影响,需要继电保护拥有极高的速动性,在短时间内实现故障的识别与清除。例如在我国最近建设的张北柔性直流电网工程中,要求保护在 3 ms 完成故障识别,并且直流断路器的动作时间也要在 3 ms 以内。

为保证速动性,目前保护的研究基本集中在暂态电气量上,研究角度主要分为时域和频域两个方面<sup>[4]</sup>。文献[5]利用限流电抗器电压识别区内外故障,文献[6]利用正负极的电流变化率辨别故障线路,文献[7-8]基于保护安装处的电压变化率构造保护,但是这些时域上的保护方法的耐过渡电阻能力有限。文献[9-10]利用线路两边的高频边界设计高频保护方法,文献[11]根据不同频率成分的衰减速度差异完成故障识别,虽然从频域的角度可以提高耐过渡电阻能力,但是需要选择合适的信号处理方法,且保护在干扰信号下容易误动。双端量保护有着较好的可靠性,文献[12-13]分别利用两端测量电流的大小关系和电流增量的极性辨别线路故障状态,文献[14]利用两端电流波形差异度识别区内故障,文献[15]考虑了线路频变特性并以反向电压行波构成纵差保护,但是它们在远距离输电中难以满足速度性要求。无论是时域还是频域的保护,它们都在获得速动性的同时牺牲了可靠性。非故障源信号带来的干扰同样可能引起电气量的剧烈突变,如不采取措施去识别这些干扰,则会造成保护不必要的误动作,中断电网的功率传输,这对于高压电网来说损失是巨大的。因此,如何在短时窗内权衡好速动性和可靠性的关系是至关重要的。

雷电冲击是一种持续时间极短的单极性脉冲波,当雷击不引起线路绝缘闪络时,对于保护来说是一种高频干扰源。在采用架空线的长距离输电系统中,受环境和气候因素的影响,雷击的发生概率明显提高,雷电干扰已经成为一种常见干扰因素。文献[16]利用电流变化量的大小进行雷击干扰的识别,文献[17]利用电流波形在时间轴的交替变化规律分辨雷击干扰与线路故障,但是这两种方法都是基于线路均匀性是否遭到破坏,以行波在线路两端或故障点可以完成数次的折反射为条件,不能在柔直系统中实现快速识别。文献[18]分析故障行波与雷电波在频率分布上的差异,利用高低频比值识别

雷击,但是有研究指出,在某些情况下二者频域特征类似,且阈值确定并不容易。文献[19]利用小波变换捕捉模极大值并拟合波尾来消除雷击干扰,但是该方法需要极高的采样率来实现,且在近端故障时,由于行波的折反射影响,行波的波尾是难以提取的。

本文利用希尔伯特黄变换获取反向行波中的高频分量,区内外故障时的高频含量差别显著,此特点保证了暂态量保护实现的可行性。为提高保护可靠性,根据雷电波与故障行波在时域上存在的明显差异,灵活利用时域波形面积关系提出了相应的雷击识别办法。最后,经仿真验证,本文所提方法在柔性直流输电系统中具备较高的实用性。

## 1 系统结构

图 1 为本文采用的张北四端柔性直流输电工程的拓扑图,该系统包含张北、北京、康保以及丰宁四个换流站<sup>[20]</sup>。张北和康保为新能源功率送端,丰宁为抽水蓄能站,北京为功率受端,为减少接地投资,四个换流站以金属回线的方式接地。换流站采用对称双极接线方式,正负极换流器具备独立运行的能力,子模块采用常见的半桥结构,该结构不具备故障自清除能力。直流侧环形架空线路的两侧都串接有限流电抗器以及断路器,保护安装在限流电抗器的线路侧。

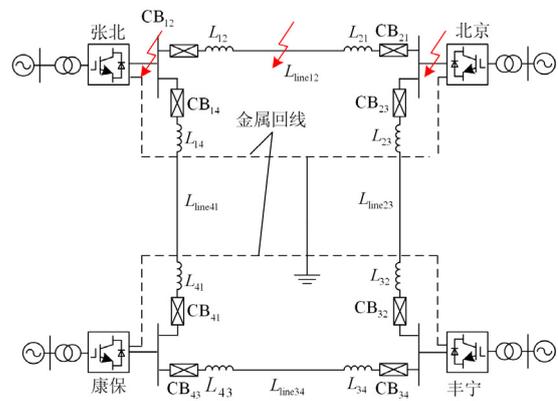


图 1 四端柔性直流输电系统

Fig. 1 Four-terminal flexible DC transmission system

## 2 故障及雷击干扰特性分析

### 2.1 线路故障分析

当线路发生故障时,故障点电压迅速降低,在不考虑过渡电阻的情况下,相当于在故障点叠加了一个大小为 $-U_{dc}$ 的阶跃信号,如图 2 所示(故障发生时刻为 1.3 s)。

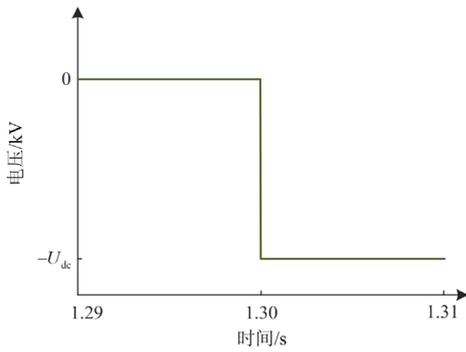


图2 故障点电压分量波形

Fig. 2 Waveform of voltage component at fault point

电压突变的同时同样也伴随着各个高频分量的产生, 且故障分量的低频分量含量较大。之后, 该阶跃信号将以行波的形式向线路两端传输。经短暂延时后, 测量点所测得的反向行波  $B_m$  与原始阶跃信号有着明显差异, 在传输过程中由于线路的分布参数及频变特性, 行波中的各个频率成分将发生不同程度的衰减, 从而导致故障行波的波头变缓, 如图3所示。

$$B_m(t) = -U_{dc} A(t) \varepsilon(t - \tau_m) \quad (1)$$

式中,  $A(t)$  是线路的传播函数, 频率越高该值越小, 即衰减程度越大。同时, 故障距离越远,  $A(t)$  越小, 即线路对行波的衰减作用越大。由上述可知, 当行波到达时, 在保护安装处所测得的故障电压的频率成分主要集中在较低频段。此外, 当线路区外发生故障时, 由于线路两端限流电抗器的存在, 高频分量经过电抗器会发生大幅衰减, 这个特点可以作为构造保护方案的重要依据。

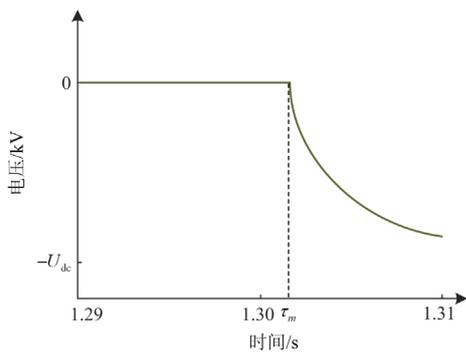


图3 测量点电压反行波波形

Fig. 3 Reverse wave waveform of the voltage at the measuring point

## 2.2 雷电冲击分析

雷击对输电线路的冲击主要分为直击雷与感应雷两种形式, 其中直击雷根据雷击位置又可以分

为雷击避雷线、雷击杆塔以及雷击输电线路, 雷击输电线路又可称为绕击。

雷击避雷线中较为严重的是雷击档距中央, 但是发生概率较低, 且难以对高压输电线路构成威胁。雷击杆塔或是其附近的避雷线有可能对输电线路引起反击, 而对于特高压输电线路来说, 反击的耐雷水平很高, 因此反击概率极低。雷电冲击不足以引起绝缘受损时, 保护不应该动作, 这种情况属于雷击干扰。上述干扰情况可由文献[19]所述的利用 0 模和 1 模电压变化量进行区分, 本文主要针对雷电绕击的情况进行分析。

发生绕击时, 如果雷电流不足以引起绝缘子闪络时, 线路仍能维持正常运行, 此时为非故障性绕击。当雷电流幅值过高, 线路遭受的过电压过大时, 线路绝缘将会遭到破坏, 这种情况为故障性绕击, 保护应该动作。非故障性绕击也伴随着电压降低、电流增大以及高频分量的产生, 所以要提高暂态量保护的可靠性, 必须准确区分非故障性绕击和线路故障。

雷击输电线路的过程可以看作是雷电波沿无限长的雷电通道经雷击点向线路两端传输, 雷电流波形可以用式(2)的双指数函数来表示<sup>[21]</sup>。雷电压波形与之类似, 其波形为雷电流波形乘以雷电通道的波阻抗。

$$i(t) = AI_p (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (2)$$

式中:  $I_p$  是雷电流的峰值;  $A$ ,  $\alpha$  以及  $\beta$  为波形参数, 不同的雷电流波形对应不同的参数。IEC 的标准波形 1.2/50  $\mu$ s 如图4所示, 其中,  $T_1 = 1.2 \mu$ s 为(视在)波前时间,  $T_2 = 50 \mu$ s 为(视在)半峰值时间。

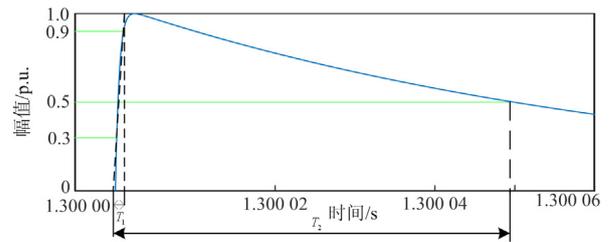


图4 标准雷电波波形

Fig. 4 Waveform of standard lightning wave

对式(2)进行傅立叶变换, 可以得到雷电波的频域表达式。

$$I(\omega) = AI_p \int_0^{+\infty} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) e^{-j\omega t} dt = AI_p \left( \frac{1}{\alpha + j\omega} - \frac{1}{\beta + j\omega} \right) \quad (3)$$

由此可以得到 1.2/50  $\mu$ s 波形的幅值谱如图5所示, 可见, 雷电波的频率成份也主要分布在低频段。

有文献指出在高频成分与低频成份的相对含量上,雷电波比故障行波有着更高的高频含量,故可利用高低频的相对大小识别雷击干扰。但是,当考虑线路对行波的衰减作用时,当雷击位置位于线路远端时,高频分量衰减较大,这时保护安装处所检测到的高低频成份关系可能与故障行波类似。并且,当近距离故障发生时,在有限的数据窗长内,行波在平波电抗器与故障点之间已经发生了数次折反射过程,测量点电压的频率分布将会发生变化<sup>[22]</sup>。此时的故障电压同样具有包含较多高频成分的特征,保护将难以判定是否为短路故障或是雷击干扰。可见,利用频域方法将难以准确识别雷击干扰,只能从时域上寻求判定方法。

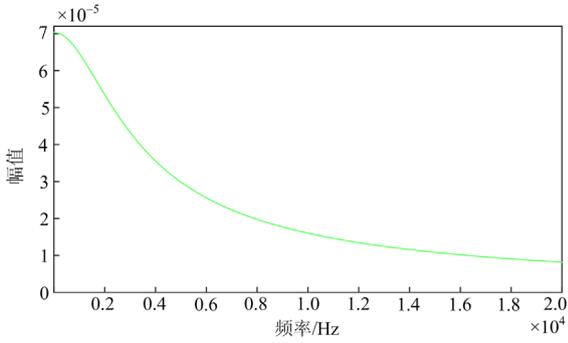


图5 标准雷电波幅值谱

Fig. 5 Amplitude spectrum of standard lightning wave

图6和图7分别为雷电波与故障行波的时域波形,在一个固定时间窗内,取黄色区域为窗内横坐标轴与该时窗内波形最大值之间所构成的面积,雷电波曲线与坐标轴构成图5中的 $S_2$ ,故障行波曲线与坐标轴构成图7中的 $T_2$ 。固定时间窗的长度要包含雷电波的波头以及大部分波尾,综合保护的速动性要求,本文采用0.6 ms的窗长。

令:

$$M_1 = \frac{T_2}{T_1 + T_2} \quad (4)$$

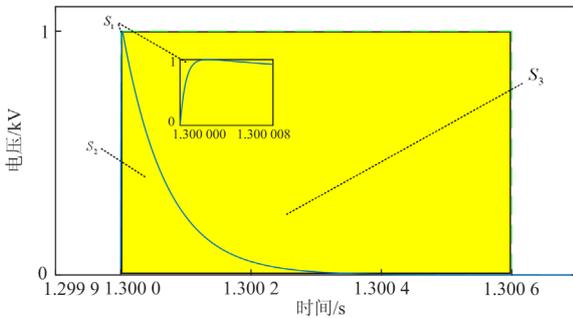


图6 雷电波时域波形

Fig. 6 Time-domain waveform of lightning wave

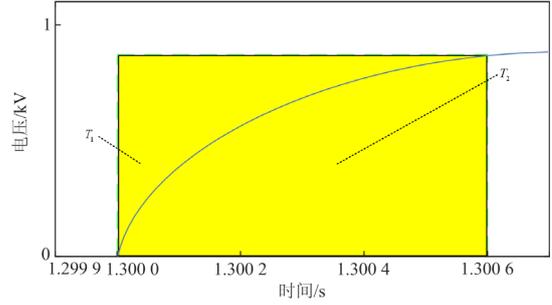


图7 故障行波时域波形

Fig. 7 Time-domain waveform of fault traveling wave

$$M_2 = \frac{S_2}{S_1 + S_2 + S_3} \quad (5)$$

从图7可以看出,故障行波的 $M_1$ 是大于0.5的。 $M_2$ 可由式(6)计算得出, $t_s$ 为保护启动时刻。

$$M_2 = \frac{\int_{t_s}^{t_s+0.0006} i(t)dt}{0.0006 \times \max(i(t))(t_s \leq t \leq t_s + 0.0006)} \quad (6)$$

表1为不同常见雷电波形下的 $M_2$ 计算结果。可见, $M_2$ 的大小都小于0.5。故 $M_1 > M_2$ ,通过此特点可以制定雷击干扰识别方法。

表1 各雷电波形下的 $M_2$ 计算值

Table 1 Calculated value of  $M_2$  under different

| lightning waveforms |         |
|---------------------|---------|
| 波形                  | $M_2$   |
| 0.25/100 $\mu$ s    | 0.235   |
| 1.2/50 $\mu$ s      | 0.117 2 |
| 2.6/50 $\mu$ s      | 0.116 6 |
| 8/20 $\mu$ s        | 0.034 8 |

### 3 保护及雷击识别方法

#### 3.1 保护启动与故障选极

线路故障伴随着明显的电压下降,故可利用电压变化量的大小实现保护启动。令 $\Delta U$ 为保护安装处的实时测得的电压变化量, $\Delta U_z$ 为保护启动的阈值。当连续两个采样点的 $\Delta U$ 满足下式时,保护启动。

$$\Delta U(t_s) > \Delta U_z \ \& \ \Delta U(t_{s+1}) > \Delta U_z \quad (7)$$

故障发生时,故障极的电压变化量大于非故障极的,双极故障时正负极电压变化量接近,利用正负极的电压变化量的比值可以进行故障极的确定。设 $k_{pole}$ 为连续十个采样点的电压变化量。

$$k_{pole} = \frac{\sum_{i=1}^{10} |\Delta U_p(i)|}{\sum_{i=1}^{10} |\Delta U_n(i)|} \quad (8)$$

令  $k_1$  为故障极判定阈值, 可构造选极判据如式(9)。

$$\begin{cases} k_{\text{pole}} > k_1 \cdots \text{正极故障} \\ \frac{1}{k_1} < k_{\text{pole}} < k_1 \cdots \text{双极故障} \\ k_{\text{pole}} < \frac{1}{k_1} \cdots \text{负极故障} \end{cases} \quad (9)$$

### 3.2 故障识别

故障的发生伴随着各种高频分量的产生, 平波电抗器可以构成线路两边的高频边界, 利用测量电压反行波的高频含量可以进行故障识别。故障电压作为一种非平稳信号, 需要采用合适的信号处理方法提取高频分量。加窗傅里叶变换、小波变换、Winger-Ville 分布以及 S 变换等基于傅里叶分析演变而来的时频分析方法同样都受傅里叶分析不足的限制。同时, 受海森堡不确定原理的限制, 这些分析方法在时间分辨率和频率分辨率之间难以权衡。

希尔伯特黄变换从瞬时频率的角度对原信号依次进行经验模态分解以及希尔伯特变换, 可以揭示信号频率随时间变化的特征。经验模态分解将原信号按照高频到低频的顺序依次分解成一系列的 IMF 分量。

对各 IMF 分量进行希尔伯特变换后可得到解析信号  $z(t)$ , 进而可以得到 IMF 中各时刻的瞬时频率  $f$ 。

$$z(t) = IMF(t) + j \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{IMF(\delta)}{t - \delta} d\delta = x(t)e^{j\theta} \quad (10)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta}{dt} \quad (11)$$

考虑到线路对 1 模行波分量的衰减作用相对较小, 本文对 1 模故障电压行波进行经验模态分解得到第一个固有模态函数分量  $IMF_1$ 。对  $IMF_1$  中瞬时频率大于 500 Hz 的数据进行绝对值求和, 并将其定义高频能量  $E_1$ 。则保护启动后  $t_1$  内的  $E_1$  为

$$E_1 = \sum_{j=1}^{N_1} |IMF_1(j)| (f_j > 500\text{Hz}) \quad (12)$$

式中,  $N_1$  为判据时间窗内的数据点个数。当  $E_1$  大于  $E_2$  时, 可认为线路区内发生了故障。 $E_2$  根据最严重区外故障来整定。

### 3.3 雷击干扰识别

虽然雷击干扰信号与故障信号在频域上难以区分, 但在时域上两者有明显差别。

根据 2.2 节分析, 可以利用反行波构造雷击干扰识别判据, 因为反行波直接来源于故障点或雷击点。根据采样得到的离散数据, 则 2.2 节中的波形面积比  $M_1$  或  $M_2$  可表示为  $k_s$ 。

$$k_s = \frac{\sum_{j=1}^{N_2} B_1(j)}{N_2 \cdot \max(B_1(j)) (j=1, 2, \dots, N_2)} \quad (13)$$

式(13)中:  $B_1$  为保护安装处测得的 1 模反行波;  $N_2$  为判据时间窗内的数据点个数。当  $k_s > k_2$  时可认为是线路故障,  $k_2$  为雷击干扰判定阈值, 否则为雷击干扰。

### 3.4 保护流程图

根据 3.1—3.3 节的分析, 可绘制保护流程图如图 8 所示。

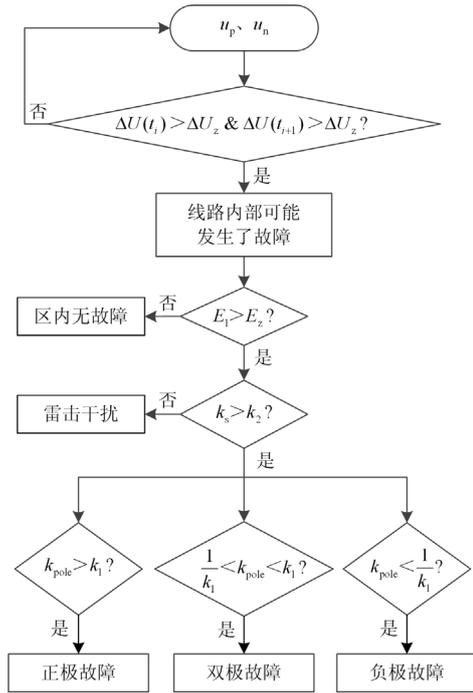


图 8 保护流程图

Fig. 8 Flow chart of protection

## 4 仿真实验

### 4.1 系统参数及阈值确定

本文在 PSCAD 中搭建张北柔性直流输电系统, 各换流站及输电线路的参数如表 2 和表 3。换流站未设置闭锁功能, 暂不考虑器件的电气应力, 线路采用频变参数模型。

保护启动判据要保证启动的灵敏度,  $E_2$  取为区外故障时  $E_1$  最大值的 1.5 倍, 最大值通过仿真得到,  $k_1$  和  $k_2$  的取值需保证选极和雷击干扰识别的准确性, 同样需要根据仿真取得较为可靠的大小。因此, 本文保护的整定值如表 4 所示。希尔伯特黄变换的数据窗取故障前后各 1 ms, 雷击判据和保护识别判据的时窗都取故障后 0.6 ms。保护所用采样频率为 40 kHz, 仿真步长 25  $\mu\text{s}$ , 仿真总时长 2.0 s, 仿真

验证以图 1 中  $L_{line12}$  为例。频变线路的特性阻抗可以通过离线拟合获得<sup>[23]</sup>，1 模特性阻抗拟合结果为 243.8  $\Omega$ 。

表 2 系统主要参数

Table 2 Main parameters of system

| 换流站       | A 站     | B 站     | C 站     | D 站     |
|-----------|---------|---------|---------|---------|
| 容量/MW     | 3 000   | 3 000   | 1 500   | 1 500   |
| 桥臂子模块数/个  | 20      | 20      | 20      | 20      |
| 子模块电容值/mF | 1.23    | 1.23    | 0.666   | 0.666   |
| 桥臂电抗器/mH  | 50      | 50      | 100     | 100     |
| 变压器额定变比   | 500/260 | 500/260 | 230/260 | 230/260 |
| 限流电抗器/mH  | 150     | 150     | 150     | 150     |

表 3 线路参数

Table 3 Parameters of lines

| 线路                   | Line12          | Line23 | Line34 | Line41 |
|----------------------|-----------------|--------|--------|--------|
| 长度/km                | 206.6           | 186.7  | 205.1  | 49.3   |
| 材质                   | 钢芯铝绞线           |        |        |        |
| 分裂数                  | 6               |        |        |        |
| 内径/外径/m              | 0.004/0.02      |        |        |        |
| 直流电阻/( $\Omega$ /km) | 0.321           |        |        |        |
| 土壤电阻/( $\Omega$ /km) | $1 \times 10^5$ |        |        |        |

表 4 保护整定值

Table 4 Setting values

| 参数 | $\Delta U_z/kV$ | $E_z/kV$  | $k_1/W$ | $k_2/W$ |
|----|-----------------|-----------|---------|---------|
| 阈值 | 20 kV           | 198.23 kV | 1.5     | 0.5     |

#### 4.2 雷电流模型

雷击主放电过程可以看作是雷电波自雷云沿着波阻抗为  $Z_0$  的无限长雷电通道向雷击点传播的过程。在仿真系统中，雷击过程可以看作是一个内阻抗为  $Z_0$  的电流源作用过程<sup>[24]</sup>，雷电流模型如图 9 所示，雷电通道波阻抗取为 300  $\Omega$ 。

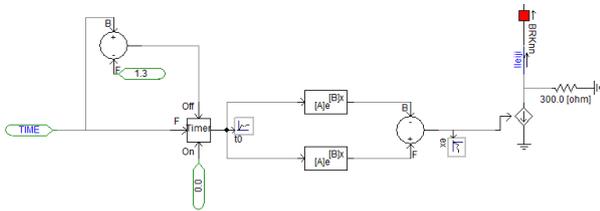


图 9 雷电流模型

Fig. 9 Lightning current model

#### 4.3 故障仿真

表 5 为不同故障位置的仿真结果，故障时刻均为 1.3 s。区内不同位置故障时， $E_1$ 、 $k_s$  均大于设定阈值，在结合选极判据的情况下，故障都能被准确识别。区外故障的高频分量经限流电抗器发生大幅

衰减，保护安装处的  $E_1$  低于阈值，保护不动作。

表 5 不同位置故障的仿真结果

Table 5 Simulation results of faults at different locations

| 故障位置 | 故障类型 | $E_1/kV$           | $k_s$ | $k_{pole}$ | 判定结果 |
|------|------|--------------------|-------|------------|------|
| 始端   | 正极接地 | 474.01             | 0.84  | 5.90       | 正极故障 |
|      | 负极接地 | 479.98             | 0.84  | 0.15       | 负极故障 |
|      | 双极短路 | $1.13 \times 10^3$ | 0.85  | 1.00       | 双极故障 |
| 中点   | 正极接地 | $1.36 \times 10^3$ | 0.95  | 6.01       | 正极故障 |
|      | 负极接地 | $1.18 \times 10^3$ | 0.95  | 0.16       | 负极故障 |
|      | 双极短路 | $2.34 \times 10^3$ | 0.96  | 1.00       | 双极故障 |
| 末端   | 正极接地 | 891.43             | 0.94  | 10.35      | 正极故障 |
|      | 负极接地 | 896.81             | 0.94  | 0.09       | 负极故障 |
|      | 双极短路 | $1.78 \times 10^3$ | 0.92  | 1.00       | 双极故障 |
| 背侧母线 | 正极接地 | 1.73               | 0.74  | 6.02       | 区外故障 |
|      | 负极接地 | 5.18               | 0.63  | 0.18       | 区外故障 |
|      | 双极短路 | 2.26               | 0.80  | 0.98       | 区外故障 |
| 对侧母线 | 正极接地 | 55.15              | 0.63  | 19.38      | 区外故障 |
|      | 负极接地 | 54.74              | 0.63  | 0.06       | 区外故障 |
|      | 双极短路 | 132.15             | 0.59  | 1.02       | 区外故障 |

实际中，高压直流输电线路可能经数百欧姆的过渡电阻接地，接地电阻的存在会影响故障行波的幅值，行波中高频分量的大小也会相应地降低，所以有必要验证保护的耐过渡电阻能力。图 10 为线路不同位置经不同大小的过渡电阻接地时  $E_1$  的值。可以看出保护具备很高的耐过渡电阻能力，且在线路末端的过渡电阻达到 800  $\Omega$  时，保护仍可以正确识别。

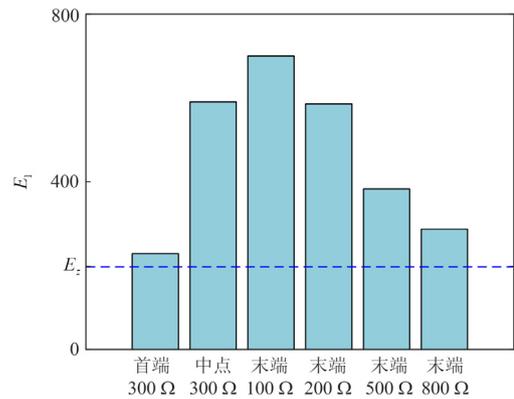


图 10 不同过渡电阻下的仿真结果

Fig. 10 Simulation results under different transition resistances

#### 4.4 雷击仿真

在线路不同位置施加雷击干扰，波形采用 1.2/50  $\mu s$ ，干扰时刻设为 1.3 s，雷电流幅值为 10 kA。图 11 和图 12 为雷击线路中点并不引起故障时测量点电压和电流的波形，可见此时具有明显的电压下降以及电流上升趋势。虽然雷击干扰在一定时间内

的电压电流会沿额定值波动,但对于柔直系统来说,基于此规律识别雷击干扰所需时间太长,不能满足速动性要求。

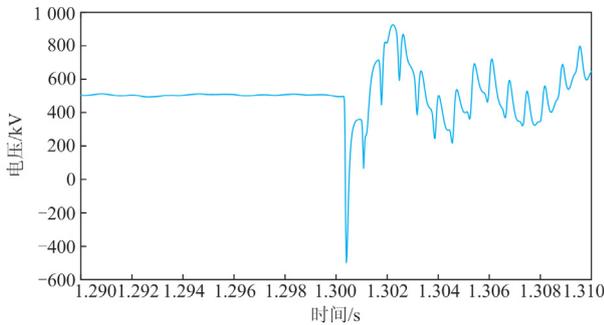


图 11 雷击干扰下的故障电压波形

Fig. 11 Fault voltage waveform under lightning interference

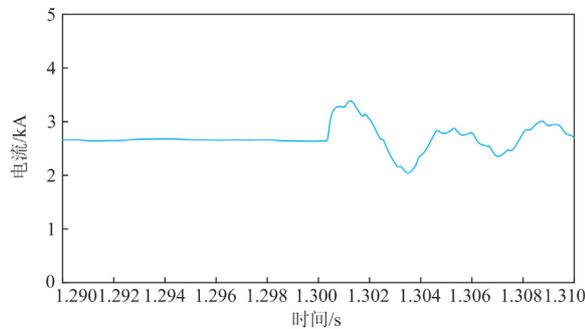


图 12 雷击干扰下的故障电流波形

Fig. 12 Fault current waveform under lightning interference

表 6 为雷击干扰状态下各电气量的大小,可以看出雷击干扰下各电气量的变化很大,与故障情况类似,这极易引起保护误动作,故可靠的雷击识别方法是必要的。

表 6 雷击干扰下测量点的电气量

Table 6 Electrical quantity of the measuring point under the interference of lightning

| 雷击位置 | $du/dt/(kV/s)$      | $di/dt/(kA/s)$ | $\Delta P/kW$ | $E_1/kV$           |
|------|---------------------|----------------|---------------|--------------------|
| 始端   | $-9.92 \times 10^5$ | 255.92         | -158.65       | $2.04 \times 10^3$ |
| 中点   | $-1.1 \times 10^6$  | 310.87         | -212.90       | $2.10 \times 10^3$ |
| 末端   | $-3.08 \times 10^6$ | 593.24         | -1.14e3       | $2.22 \times 10^3$ |

雷击电流幅值过大时可能造成线路的绝缘闪络,有必要验证当雷击引起接地故障时,保护能否动作。当雷电流幅值达到 25 kA 时引起线路绝缘闪络,此时线路出现故障。表 7 为正极线路不同雷击位置下的仿真结果。表 7 中  $k_s$  的值略高于 2.2 节中的分析值,这是因为由于采样频率的限制,所采得的数据对波形的描述与原波形存在偏差。从表 7 可以看出,雷击干扰可以准确被识别,且当雷击引起

线路绝缘受损时,保护依旧可以正确动作。

表 7 雷击仿真结果

Table 7 Lightning simulation results

| 雷击位置 | 绝缘闪络 | $k_s$ | 判定结果 |
|------|------|-------|------|
| 始端   | 否    | 0.33  | 雷击干扰 |
|      | 是    | 0.82  | 正极故障 |
| 中点   | 否    | 0.33  | 雷击干扰 |
|      | 是    | 0.93  | 正极故障 |
| 末端   | 否    | 0.32  | 雷击干扰 |
|      | 是    | 0.92  | 正极故障 |

当线路近距离故障时,判据时间窗内所得到的反行波是多个反行波的叠加,此时波尾已难以捕捉,测量点的反行波波形如图 13 所示。虽然行波的叠加会使反行波发生波动,但是趋势仍然是远离坐标轴变化, $k_s$  仍具备较大的值。表 8 为近距离故障时的仿真结果,可见保护依旧能正常判定为故障,不会与雷击干扰混淆。

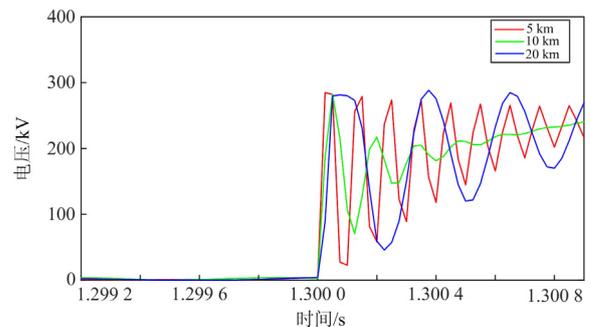


图 13 近距离故障时的电压反行波波形

Fig. 13 Waveform of the reverse traveling wave of the voltage at the time of a close fault

表 8 近距离故障仿真结果

Table 8 Fault simulation results at close range

| 故障位置  | $k_s$ |
|-------|-------|
| 5 km  | 0.66  |
| 10 km | 0.67  |
| 20 km | 0.65  |

#### 4.5 噪声干扰仿真

噪声信号同样拥有丰富的高频分量,这极易引起保护误动,所以有必要验证噪声信号下的判定结果。然而,噪声信号在时域上沿坐标轴上下波动,如图 14 所示,且容易出现较大突变点,则基于雷击判据  $k_s$  可以将噪声干扰排除,判定结果如表 9 所示。

本文最长数据窗长取到保护启动后 1 ms,如果算上光电转换、测量延时、互感器延时以及希尔伯特黄变换时间,保护可在 2 ms 内完成故障识别。其中希尔伯特黄变换的大部分计算时间主要是集中在

EMD 分解的计算三次样条插值系数过程中,该过程所需乘法数量不超过 5 400 次, DSP 芯片可在一个指令周期内完成一次乘法运算,目前 TM320 系列处理器的指令周期在 20 ns 以下,再算上其他零散计算过程,计算时间理论上不会超过 0.2 ms。

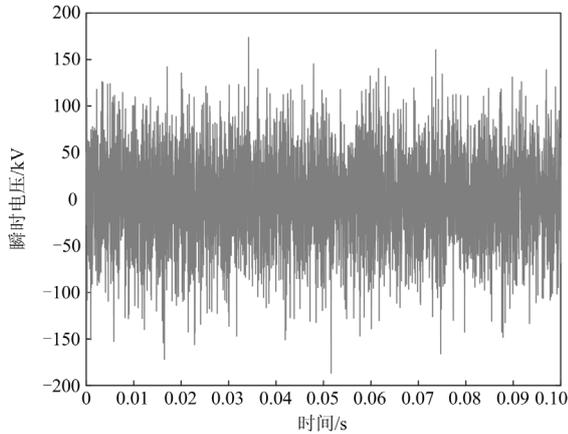


图 14 噪声信号时域波形

Fig. 14 Time-domain waveform of noise signal

表 9 噪声仿真结果

Table 9 Noise simulation results

| 信噪比/dB | $k_s$ |
|--------|-------|
| 20     | 0.38  |
| 25     | 0.34  |
| 30     | 0.37  |

## 5 结论

1) 由于限流电抗器这一天然高频边界的存在,故障行波的高频分量经限流电抗器后会发生大幅的衰减,通过希尔伯特黄变换提取 1 模反行波的高频分量可以准确识别区内外故障,并具备较高的耐过渡电阻能力。

2) 本文从时域角度合理利用波形面积特征设计雷击识别方法,所提办法可以准确排除线路不同位置的雷击干扰,防止保护因雷击干扰而误动,保证输电系统稳定持续地运行。即便是在雷击引起线路故障的情况下,本方法也不会影响保护的正常动作。虽然近距离故障时的反行波波型会受到折反射的影响,但并不会影响方法的判定。

## 参考文献

[1] 陈磊,何慧雯,王磊,等.基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(19):119-127.  
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method of a hybrid HVDC system based on the

coordination of a fault[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 119-127.

[2] 吕文杰,储佳伟,吴健,等.基于模型预测控制的VSC-HVDC自适应控制策略[J].电力科学与技术学报,2020,35(1):122-129.  
LÜ Wenjie, CHU Jiawei, WU Jian, et al. Investigation of a VSC-HVDC adaptive control strategy based on the model prediction strategy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 122-129.

[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] HE Jinghan, CHEN Keao, LI Meng, 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.

[5] 周家培,赵成勇,李承昱,等.基于直流电抗器电压的多端柔性直流电网边界保护方案[J].电力系统自动化,2017,41(19):89-94,146.  
ZHOU Jiawei, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. Boundary protection scheme for multi-terminal flexible DC grid based on voltage of DC reactor[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 89-94, 146.

[6] ZHANG J, ZOU G, XIE Z, et al. A fast non-unit line protection strategy for the MMC-based MTDC grid[C] // 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), November 26-28, 2017, Beijing, China: 1-6.

[7] 张峻樾,林卫星,文劲宇.基于直流电压变化率的直流电网直流故障保护[J].南方电网技术,2017,11(1):14-22.  
ZHANG Junjie, LIN Weixing, WEN Jinyu. DC fault protection based on change rate of DC voltage in DC grid[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(1): 14-22.

[8] SNEATH J, RAJAPAKSE A D. DC fault protection of a nine-terminal MMC HVDC grid[C] // 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, February 10-12, 2015, Birmingham, UK: 1-8.

[9] XUE Shimin, CHEN Shuo, SUN Yabing, et al. Research on the protection scheme of MMC-MTDC based on high frequency energy[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15(18): 2593-2604.

[10] XIANG Wang, YANG Saizhao, XU Lie, et al. A transient voltage based DC fault line protection scheme for MMC-based DC grid embedding DC breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 334-345.

- [11] 张韵琦, 丛伟, 张玉玺. 基于初始电压行波频域衰减速率的 MMC-HVDC 线路保护方案[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(12): 143-155.  
ZHANG Yunqi, CONG Wei, ZHANG Yuxi. MMC-HVDC line protection scheme based on frequency-domain attenuation rate of initial voltage traveling wave[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12): 143-155.
- [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 Yanhai, 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] 吕承, 邵能灵, 郑晓冬, 等. 基于边界电流的柔性直流线路保护新方案[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(1): 115-121.  
LÜ Cheng, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Protection novel scheme for flexible DC line based on boundary current[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 115-121.
- [15] 薛士敏, 孙亚冰, 刘白冰, 等. 基于 Marti 模型的柔性直流输电系统纵联行波差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6288-6299.  
XUE Shimin, SUN Yabing, LIU Baibing, et al. Longitudinal travelling wave differential protection for flexible HVDC system based on Marti model[J]. Proceeding of the CSEE, 2019, 39(21): 6288-6299.
- [16] 董杏丽, 葛耀中, 董新洲. 行波保护中雷电干扰问题的对策[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 75-79.  
DONG Xingli, GE Yaozhong, DONG Xinzhou. Effect of lightning on protection based on travelling waves[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 75-79.
- [17] 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.
- [18] 段建东, 张保会, 郝治国, 等. 超高压线路暂态保护中雷电干扰与短路故障的识别[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 30-35.  
DUAN Jiandong, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Identification of lightning and fault in EHV transmission line transient-based protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(18): 30-35.
- [19] 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.
- [20] 李湃, 王伟胜, 刘纯, 等. 张北柔性直流电网工程新能源与抽蓄电站配置方案运行经济性评估[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7206-7214.  
LI Pai, WANG Weisheng, LIU Chun, et al. Economic assessment of Zhangbei VSC-based DC grid planning scheme with integration of renewable energy and pumped-hydro storage power station[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7206-7214.
- [21] 王振羽, 宋明钰, 薄岩, 等. 35 kV 线路避雷器与避雷线防雷效果量化比较分析[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(4): 165-171.  
WANG Zhenyu, SONG Mingyu, BO Yan, et al. Quantitative comparison of lightning protection effect between 35 kV line arrester and lightning line[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(4): 165-171.
- [22] 陈双. 基于行波固有频率的输电网故障定位方法关键问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.  
CHEN Shuang. Research on the key issues of transmission network fault location method based on natural frequencies of traveling waves[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [23] DUFOUR C, LE-HUY H. Real-time simulation of power transmission lines using Marti model with optimal fitting on dual-DSP card[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 412-419.
- [24] 高艳丰. 基于电流行波的输电线路雷击识别和故障定位方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.  
GAO Yanfeng. Research on methods of lightning stroke identification and fault location for transmission line based on current travelling[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.

收稿日期: 2021-07-30; 修回日期: 2021-09-08

作者简介:

薛士敏(1980—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护与控制、柔性直流电网控制保护; E-mail: xsm@tju.edu.cn

陈 硕(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流电网控制保护. E-mail: cs1825303953@tju.edu.cn

(编辑 葛艳娜)