

基于T区中低频衰减特性构成方向元件的特高压三端混合直流输电线路单端方向保护研究

邢超¹, 黄泽^{1,2}, 毕贵红², 陈仕龙², 王龙^{1,2}, 牛元有^{1,2}

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南省 昆明市 650217;

2. 昆明理工大学电力工程学院, 云南省 昆明市 650500)

Research on Single-end Directional Protection for UHV Three-terminal Hybrid DC Transmission Lines Based on T-zone Low and Medium Frequency Attenuation Characteristics as Directional Elements

XING Chao¹, HUANG Ze^{1,2}, BI Guihong², CHEN Shilong², WANG Long^{1,2}, NIU Yuanyou^{1,2},

(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, Yunnan Province, China;

2. School of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, Yunnan Province, China)

ABSTRACT: Protection devices are installed on both sides of the T-zone line, Propose a transient current direction protection method for UHV three-terminal hybrid DC transmission lines. The frequency characteristics of the rectifier side, the T-zone, and the inverter side boundary of the line end of the UHV three-terminal hybrid DC transmission system are analyzed, and it is found the T-zone boundary has a certain attenuation effect on the low-frequency component of the fault current transient signal. Rectifier side boundary and end of line inverter side boundary had a significant attenuation effect on the high-frequency components of the fault current transient signal. Using wavelet decomposition, according to the T zone on both sides of the line transient current in the low-frequency band energy difference to determine the direction of the fault, put forward the fault direction criterion. When the fault occurs on the left side of the T-zone, the high-frequency transient current energy detected at the end of the line and the ratio of the low-frequency transient current energy to discriminate the rectifier side within and outside the fault; when the fault occurs on the right side of the T-zone, the high-frequency transient current energy detected at the first end of the line and the ratio of the low-frequency transient current energy to discriminate the inverter side of the end of the line within and outside the fault; When a fault occurs within the T zone, it is directly determined as an outside zone fault. To give a single-end direction-preserving expansion scheme for UHV three-terminal hybrid DC transmission lines based on the T-zone low and medium frequency attenuation characteristics constituting the

directional element, Finally, the PSCAD/EMTDC simulation platform was used to build a model of the Kunliulong UHV three-terminated hybrid DC transmission system and to validate the proposed protection method. The simulation shows that the method proposed in this paper can realize the complete line speed protection of UHV three-terminated hybrid DC transmission lines.

KEY WORDS: UHV three-terminal hybrid DC; transmission lines; T zone; high and low-frequency energy differences in transient currents; direction protection

摘要: 将保护装置安装在T区两侧, 基于T区中低频衰减特性构成方向元件, 提出一种特高压三端混合直流输电线路单端方向保护方法。分析特高压三端混合直流输电系统整流侧、T区以及线路末端逆变侧三端边界频率特性, 发现T区边界对故障电流暂态信号中低频分量有一定的衰减作用、整流侧边界和线路末端逆变侧边界对故障电流暂态信号高频分量有明显衰减作用。利用小波分解, 根据T区两侧线路暂态电流中低频能量差判断故障方向, 并提出故障方向判据。当T区左侧发生故障时, 利用线路L₁末端所检测到的高频暂态电流能量与低频暂态电流能量的比值来判别整流区内、外故障; 当T区右侧发生故障时, 利用线路L₂首端所检测到的高频暂态电流能量与低频暂态电流能量的比值来判别线路末端逆变区内、外故障; T区发生故障时, 判定为线路区外故障。给出基于T区中低频衰减特性构成方向元件的特高压三端混合直流输电线路单端方向保护方案, 最后在PSCAD/EMTDC仿真平台搭建昆柳龙特高压三端混合直流输电系统模型并对所提保护方法进行验证, 仿真表明该文所提保护方法能实现特高压三端混合直流输电线路全线速动保护。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52067009)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (52067009).

关键词: 特高压三端混合直流; 输电线路; T区; 暂态电流高低频能量差; 方向保护

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0551

0 引言

近年来,随着高压直流输电工程的不断增加,出现了一些技术难题亟待解决^[1-2]。其中多回直流的集中馈入引发的连续换相失败及直流闭锁引起的过电压问题日益严重,对电网的安全稳定运行造成严重的影响,而特高压多端混合直流输电技术成为解决该问题的新技术^[3-4]。特高压多端混合直流输电技术,送端采用 LCC 换流器(line commutation converter, LCC),受端采用多个 MMC 换流器(modular multilevel converter, MMC)并联,避免了换相失败的问题。如已经投运的昆柳龙特高压多端混合直流输电工程。

特高压多端混合直流输电线路供电距离远且工作环境复杂,直流线路故障成为直流系统中最常见的故障^[5-6]。目前,特高压多端混合直流输电线路任意位置发生故障,均需 LCC 换流站快速识别故障,并进行移相,MMC 换流站换流器闭锁或主动控制故障电流,从而实现线路能量的释放和去游离。若为瞬时性故障,线路只需重启;但若为永久性故障,则需保护准确识别故障线路并正确动作^[7-9],最小范围隔离故障。

目前,直流线路主保护主要采用行波保护,行波保护主要可分为基于时域突变量和频域能量两种类型^[10]。当直流线路发生高阻接地或故障位置距离保护安装处较远时,行波时域类型保护的突变量幅值大大减小,此时该类型保护容易拒动^[11-13]。针对时域类型行波保护在高阻接地故障时存在拒动问题,国内外学者做了大量研究,从行波频域信息或突变量方向信息出发,提出一系列保护方案。文献[14]针对特高压直流输电系统边界和线路的频率特性进行研究;文献[15]基于小波分解,利用区内、外暂态电压小波能量的差异来区分区内、外故障;文献[16]利用 VSC-HVDC 直流输电系统出口并联的电容和一段线路等效阻抗构成边界,利用该边界对高频信号的衰减作用,提出高低频电流幅值比的全线速动保护;文献[17]针对 T 型接线,利用余弦相似度来判别故障线路;文献[18]根据线路边界对高频信号的衰减作用,利用区内、外故障暂态电压 Hilbert 高频能量幅值和波形的差异来构造保护;文献[19]针对传统双端高压直流输电,利用暂态功率在不同频带分布的差异构造保护判据。对于昆柳龙特高压多端混合直流输电线路,上下级线路通过汇流母线连接,两极线路间不存在平波电抗器,边界

条件不明显。整流侧边界由平波电抗器和直流滤波器构成,直流线路末端边界由平波电抗器和一段架空线路对地电容构成。可见,特高压三端混合直流输电线路边界不对称,T 区边界不明显,研究基于频域信息的特高压三端混合直流输电线路保护是很必要的。

本文提出以平波电抗器和直流滤波器构成整流侧边界、平波电抗器和 MMC 换流器串联后并联于直流输电线路构成 T 区边界、平波电抗器和一段架空线路对地电容构成线路末端逆变侧边界;分析了三端边界对故障暂态电流信号的衰减特性;提出将保护装置安装在 T 区两侧,根据 T 区两侧线路暂态电流中低频能量差判别故障方向;根据故障线路电流高频暂态能量与电流低频暂态能量的比值区分线路首端整流侧和线路末端逆变侧的区内、外故障。

1 特高压多端混合直流输电线路边界频率特性分析

本文以昆柳龙特高压多端混合直流输电系统为研究对象,送端换流站采用 LCC 换流站,受端并联两个换流站,受端换流站均采用 MMC 换流器;直流线路包含线路 L₁ 和线路 L₂ 两段;线路 L₁ 首端连接送端换流站,线路 L₁ 末端和线路 L₂ 首端通过汇流母线连接受端换流站,线路 L₂ 末端连接受端换流站。保护装置 A₁ 和 A₂ 安装在 T 区两侧,即安装在线路 L₁ 末端和线路 L₂ 首端,特高压多端混合直流输电系统结构如图 1 所示。

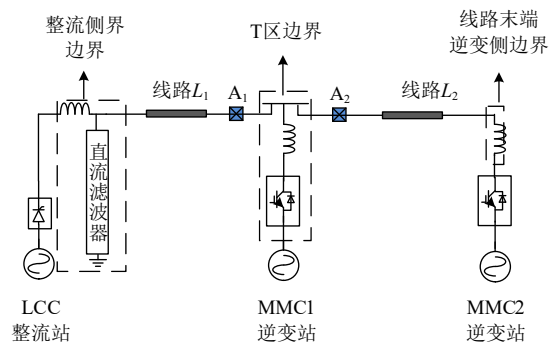


图 1 特高压三端混合直流输电系统结构

Fig. 1 Structure of the UHV three-terminal hybrid DC transmission system

传统直流输电线路边界为对称结构,整流侧边界和逆变侧边界相同,均由直流滤波器和平波电抗器构成;而特高压多端混合直流输电系统整流侧边界、T 区边界与线路末端逆变侧边界各不同,因此有必要对特高压多端混合直流线路边界频率特性进行研究,即对整流侧边界频率特性、T 区边界频率特性以及线路末端逆变侧边界频率特性进行分析。

1.1 整流侧边界频率特性

昆柳龙特高压三端混合直流输电系统送端换流站采用传统电网换相型换流器(LCC)，直流系统谐波较大，在每极线路上安装平波电抗器与 2 组 3 调谐直流滤波器，二者构成整流侧物理边界，该边界如附录图 A1 所示。

当整流侧边界区外发生故障后，故障分量等效网络如图 2 所示。

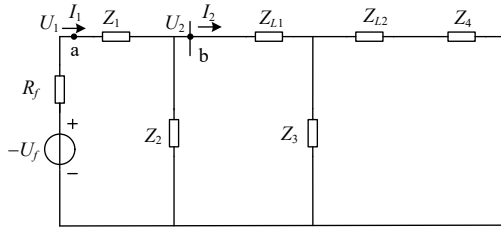


图 2 整流侧区外故障等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit for rectifier-side out of zone faults

图中： U_1 、 U_2 、 I_1 、 I_2 分别为 a、b 两点的故障分量电压和电流； U_f 为故障点附加电压源； R_f 为过渡电阻； Z_1 、 Z_3 、 Z_4 分别为昆北侧、柳北侧以及龙门侧平波电抗器的等值阻抗； Z_2 为直流滤波器的等值阻抗； Z_{L1} 和 Z_{L2} 分别为直流线路 L_1 和直流线路 L_2 的等值阻抗。

定义整流侧边界电流传递函数为

$$G_1(j\omega) = \frac{I_2(j\omega)}{I_1(j\omega)} \quad (1)$$

为 $G_1(j\omega)$ 取得极大值，分别将直流线路 L_1 和 L_2 视为短路，则 I_1 和 I_2 分别为

$$I_1(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{Z_2(j\omega)} + \frac{U_2(j\omega)}{Z_3(j\omega) // Z_4(j\omega)} \quad (2)$$

$$I_2(j\omega) = \frac{U_2(j\omega)}{Z_3(j\omega) // Z_4(j\omega)} \quad (3)$$

将式(2)和式(3)代入式(1)中，化简可得整流侧边界电流传递函数为

$$G_1(j\omega) = 1 - \frac{Z_3(j\omega)Z_4(j\omega)}{Z_3(j\omega)Z_4(j\omega) + Z_2(j\omega)(Z_3(j\omega) + Z_4(j\omega))} \quad (4)$$

Z_2 、 Z_3 和 Z_4 的计算公式分别为

$$Z_2(j\omega) = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 + (j\omega L_2 // \frac{1}{j\omega C_2}) + (j\omega L_3 // \frac{1}{j\omega C_3}) \right] \quad (5)$$

$$Z_3(j\omega) = j\omega L_d \quad (6)$$

$$Z_4(j\omega) = j\omega L_{d2} \quad (7)$$

昆北换流站平波电抗器的参数为： $L_0=300\text{mH}$ ；柳北换流站平波电抗器的参数为： $L_d=150\text{mH}$ ；龙

门换流站平波电抗器的参数为： $L_{d2}=150\text{mH}$ ；直流滤波器的参数为： $C_1=2\mu\text{F}$ 、 $L_1=11.773\text{mH}$ 、 $L_2=10.266\text{mH}$ 、 $C_2=3.415\mu\text{F}$ 、 $L_3=4.77\text{mH}$ 、 $C_3=11.773\mu\text{F}$ ，代入参数后，可得到整流侧边界传递函数 $G_1(j\omega)$ 幅频特性如图 3 所示。

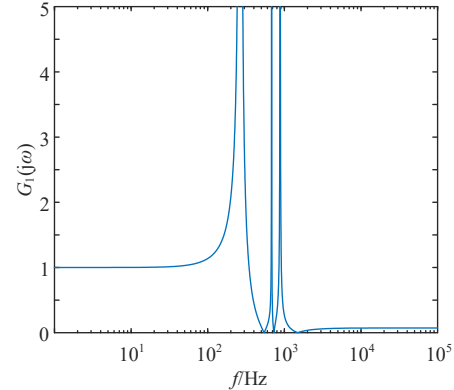


图 3 整流侧边界传递函数幅频特性

Fig. 3 Amplitude-frequency characteristics of the rectifier-side boundary transfer function

由图 3 可见，当 $0 \text{ Hz} < f < 100 \text{ Hz}$ ， $|G_1(j\omega)| \approx 1$ ；当 $100 \text{ Hz} < f < 192 \text{ Hz}$ ， $|G_1(j\omega)| > 1$ ；当 $f=266 \text{ Hz}$ 、 $f=673 \text{ Hz}$ 以及 $f=884 \text{ Hz}$ 时， $|G_1(j\omega)|$ 取极大值；当频率 $f > 1000 \text{ Hz}$ 时， $|G_1(j\omega)| \approx 0.07$ ，可见整流侧边界对故障电流高频信号有显著的衰减效果。当线路 L_1 发生故障时，故障信号从故障点出发到达保护 A_1 处，故障信号仅经过线路 L_1 的衰减，即可到达保护 A_1 ，保护 A_1 检测的高频能量较大；当整流侧区外发生故障时，故障信号需经过整流侧边界和 L_1 线路的双重衰减到达保护安装处 A_1 ，保护 A_1 检测的高频能量较小。

1.2 T 区边界频率特性

昆柳龙特高压多端混合直流输电与传统直流输电系统结构差异较大，传统直流输电只有一段直流线路，而特高压多端混合直流输电有两段直流线路，其中线路 L_1 与线路 L_2 通过汇流母线连接中间换流站 MMC1，根据实际工程，该换流站还安装平波电抗器，平波电抗器和 MMC1 换流站串联后并联于直流线路构成 T 区边界，如图 1 所示。MMC 换流器在线路故障过程中分为子模块电容放电阶段和闭锁阶段。由于本文行波暂态量保护要求换流器闭锁前快速识别故障，因此行波暂态量保护相关研究仅关注其闭锁前的电容放电阶段，期间控制系统尚未起作用，即 MMC 换流器的行波解析等值模型仅需计及子模块电容放电阶段，无需计及控制系统作用，因此 MMC 换流器的行波解析可等值为 RLC 串联电路，其参数值不受 MMC 变流器的运行状态和控制方式的影响^[20-21]。T 区边界在故障暂态

阶段可等效如图 4 所示。

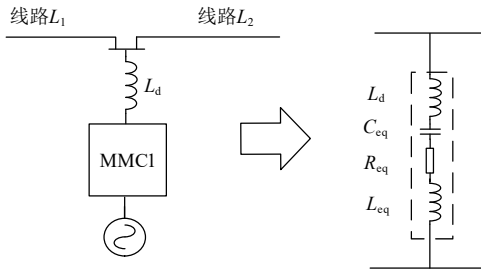


图 4 T 区边界等效电路

Fig. 4 T-zone boundary equivalent circuit

图中： C_{eq} 、 R_{eq} 、 L_{eq} 为 MMC1 换流站的等效电容、电阻以及电感； L_d 为换流站 MMC1 平波电抗器的等效电感。因此 T 区的等效阻抗为

$$Z_T(j\omega) = j\omega(L_d + L_{eq}) + \frac{1}{j\omega C_{eq}} + R_{eq} \quad (8)$$

式中： $R_{eq} = \frac{4R_{arm}}{3}$ 、 $L_{eq} = \frac{4L_0}{3}$ 、 $C_{eq} = \frac{3C_0}{2N}$ ； R_{arm} 为桥臂电阻； L_0 为桥臂电感； C_0 为子模块电容； N 为子模块数^[22]。

当直流线路发生故障时，入射波是沿分布参数线路传来的，根据彼得逊法则和叠加定理，可得故障分量等效电路如图 5 所示。图中 U_{1f} 为故障处附加的线模电压源， U_{2f} 为 T 区汇流母线的线模电压， ΔI_1 、 ΔI_2 分别为线路 L_1 和 L_2 故障暂态电流线模分量， Z_{L1} 、 Z_{L2} 为线路 L_1 和 L_2 的波阻抗， R_f 为过渡电阻。

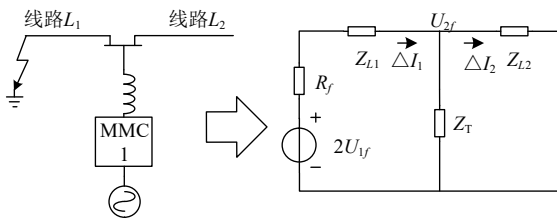


图 5 线路 L_1 故障等效电路

Fig. 5 Line L_1 fault equivalent circuit

此时，定义故障电流传递函数^[3]为

$$G_2(s) = \frac{\Delta I_2(s)}{\Delta I_1(s)} \quad (9)$$

式中 $\Delta I_1(s)$ 和 $\Delta I_2(s)$ 为

$$\Delta I_1(s) = \frac{U_{2f}(s)}{Z_T(s)} + \frac{U_{2f}(s)}{Z_{L2}(s)} \quad (10)$$

$$\Delta I_2(s) = \frac{U_{2f}(s)}{Z_{L2}(s)} \quad (11)$$

将式(10)和(11)代入式(9)可得 T 区边界电流传递函数为

$$G_2(s) = \frac{\Delta I_2(s)}{\Delta I_1(s)} = 1 - \frac{Z_2(s)}{Z_T(s) + Z_2(s)} \quad (12)$$

式中 $Z_T(s)$ 为 T 区等值频域阻抗，令 $s = j\omega$ 。根据昆柳龙直流输电工程参数，换流器 MMC1 参数为： $L_d=150\text{mH}$ 、 $L_0=65\text{mH}$ 、 $C_0=12\text{mF}$ 、 $R_{arm}=0.45\Omega$ ，子模块数 N 为 200，代入参数计算得 $R_{eq}=0.6\Omega$ 、 $L_{eq}=87\text{mH}$ 、 $C_{eq}=90\mu\text{F}$ 。将 R_{eq} 、 L_{eq} 、 C_{eq} 代入式(12)可得 T 区电流传递函数的幅频特性如图 6 所示。

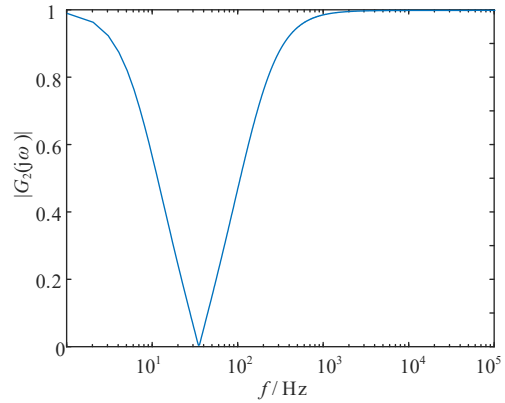


图 6 T 区边界传递函数幅频特性

Fig. 6 Amplitude-frequency characteristics of T-zone boundary transfer function

从图 6 可见， $|G_2(j\omega)|$ 在直流和高频段幅值趋于 1，说明故障电流信号在直流和高频段衰减很小；当 $f = 53\text{Hz}$ 时， $|G_2(j\omega)|$ 取极小值 0.00353，表明故障电流信号在中低频段衰减很大。当线路发生故障时，故障电流由故障线路流向非故障线路，T 区边界对故障电流中低频带衰减很大，因此故障线路的故障电流中低频分量远远大于非故障线路，可利用该差异判别故障方向^[23]。

1.3 线路末端逆变侧边界频率特性

昆柳龙特高压多端混合直流输电系统受端换流站均采用模块化多电平换流器(MMC)，在线路 L_2 末端只装平波电抗器。由于导线存在对地电容，为便于推导逆变侧边界电流传递函数，本文利用一段架空输电线路对地电容和平波电抗器来构成线路末端逆变侧边界，该边界如附录图 A2 所示。

当线路末端逆变侧边界区外发生故障时，故障分量等效电路如图 7 所示。

图中： U_1' 、 U_2' 、 I_1' 、 I_2' 分别为 a'、b' 两点的故

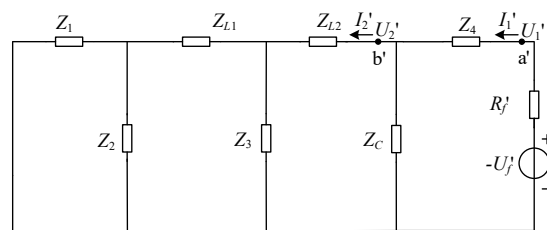


图 7 线路末端逆变侧区外故障等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit for out of zone faults on the inverter side at the end of the line

障分量电压和电流； U_f' 为故障点附加电压源； R_f' 为过渡电阻； Z_1 、 Z_3 、 Z_4 分别为昆北侧、柳北侧以及龙门侧平波电抗器的等值阻抗； Z_2 为昆北侧直流滤波器的等值阻抗； Z_{L1} 和 Z_{L2} 分别为直流线路 L_1 和直流线路 L_2 的等值阻抗。

定义逆变侧边界电流传递函数为

$$G_1'(j\omega) = \frac{I_2'(j\omega)}{I_1'(j\omega)} \quad (13)$$

为 $G_1'(j\omega)$ 取得极大值，分别将直流线路 L_1 和 L_2 视为短路，则 I_1' 和 I_2' 分别为

$$I_1'(j\omega) = \frac{U_2'(j\omega)}{Z_C(j\omega)} + \frac{U_2'(j\omega)}{Z_1(j\omega)//Z_2(j\omega)//Z_3(j\omega)} \quad (14)$$

$$I_2'(j\omega) = \frac{U_2'(j\omega)}{Z_1(j\omega)//Z_2(j\omega)//Z_3(j\omega)} \quad (15)$$

将式(14)和式(15)代入式(13)中，化简可得逆变侧边界电流传递函数为

$$G_1'(j\omega) = \frac{1 - \{Z_1(j\omega)Z_2(j\omega)Z_3(j\omega) / [Z_1(j\omega)Z_2(j\omega)Z_3(j\omega) + Z_C(j\omega)(Z_1(j\omega)Z_2(j\omega) + Z_1(j\omega)Z_3(j\omega) + Z_2(j\omega)Z_3(j\omega))]\}} \quad (16)$$

式中： $Z_1(j\omega) = j\omega L_0$ ； Z_2 、 Z_3 在公式(6)和公式(7)中已给出； $Z_C(j\omega) = 1 / j\omega C$ ，其中 $C = 0.15 \mu F$ [23]。代入参数后，可得到逆变侧边界传递函数 $G_1'(j\omega)$ 幅频特性如图 8 所示。由图 8 可知，当 $0 \text{ Hz} < f < 100 \text{ Hz}$ ， $|G_1'(j\omega)| \approx 1$ ；当频率 $f > 1300 \text{ Hz}$ 时， $|G_1'(j\omega)| \approx 0.001$ ，可见逆变侧边界对故障电流高频信号有显著的衰减效果。当线路 L_2 发生故障时，故障信号从故障点出发到达保护 A_2 处，故障信号仅经过线路 L_2 的衰减，即可到达保护 A_2 ，保护 A_2 检测的高频能量较大；当逆变侧区外发生故障时，故障信号需经过逆变侧边界和 L_2 线路的双重衰减到达保护安装处 A_2 ，保护 A_2 检测的高频能量较小。

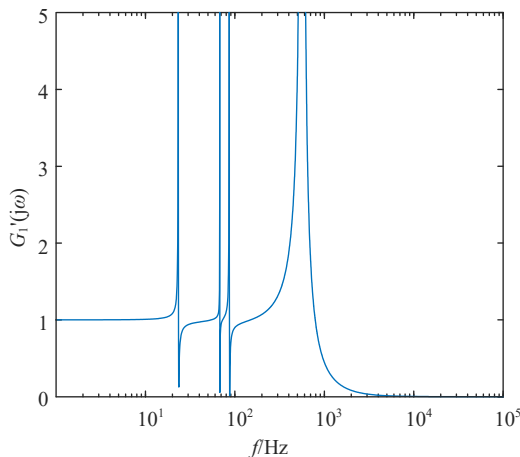


图 8 逆变侧边界传递函数幅频特性
Fig. 8 Amplitude-frequency characteristics of the inverter-side boundary transfer function

2 小波暂态电流能量特征提取

小波变换是一种窗口可自适应的时频分析工具，它对处理非平稳、非周期信号有良好的优越性，能很好地反映信号的突变特性。因此利用小波变换对 T 区两侧线路的故障电流线模分量进行多尺度小波分解，并计算各尺度下的小波能量 [3]，计算公式为 $E_{ij} = \sum (W_j(k))^2, i = L, R$ (17) 式中： E_{Lj} 、 E_{Rj} 分别为保护 A_1 和 A_2 第 j 层电流小波能量； $W_j(k)$ 为故障电流线模分量经小波分解后第 j 层的近似系数。

本文采用 20kHz 采样频率，利用 db4 小波提取暂态电流小波能量。对故障电流线模分量进行 8 尺度小波分解，则小波能量谱序列为

$$E = [E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, E_6, E_7, E_8, E_8^0] \quad (18)$$

式中： E_1 — E_8 分别为 d1—d8 频带下对应的小波能量，d1—d8 频带对应的频率范围如表 1 所示； E_8^0 为频带 a8 ($0 \text{ Hz} < f < 39.0625 \text{ Hz}$)的小波能量。

频带	频率范围	频带	频率范围
d1	5kHz~10kHz	d5	312.5Hz~625Hz
d2	2.5kHz~5kHz	d6	156.25Hz~312.5Hz
d3	1250Hz~2.5kHz	d7	78.125Hz~156.25Hz
d4	625Hz~1250Hz	d8	39.0625Hz~78.125Hz

根据故障电流线模分量经小波分解后，不同频带上小波能量分布的特点，来区分故障方向和判别故障发生位置。

3 故障方向判据及区内外故障判据

1.2 节分析结果表明，T 区边界对故障电流中低频分量有较大的衰减作用。当线路发生故障时，故障电流由故障线路流向非故障线路，T 区边界对故障电流中低频带衰减很大，因此故障线路检测到的中低频分量远远大于非故障线路检测到的中低频分量。综上，当 T 区两侧区域发生故障时，通过比较 T 区两侧线路故障电流中低频的小波能量大小可以区分故障方向。

当判别故障方向后，还需判别故障是否发生在保护范围内。1.1 节和 1.3 节分析结果表明，整流侧边界和线路末端逆变侧边界均对故障电流高频分量有很强的衰减作用，当线路 L_1 或线路 L_2 发生故障时，保护检测的暂态电流高频小波能量较大，当整流侧区外或线路末端逆变侧区外发生故障时，保护检测的暂态电流高频小波能量较小，因此可基于该差异来判断故障是否发生在保护范围内。

3.1 保护启动判据

当直流系统发生故障后, T区两侧线路的电流都会发生突变, 为提高保护灵敏度, 选择突变量幅值变化大的一侧作为启动判据, 启动判据为

$$\max(\Delta i_{L_1}, \Delta i_{L_2}) > K_{\Delta i} \quad (19)$$

式中: Δi_{L_1} 、 Δi_{L_2} 分别为线路 L_1 和线路 L_2 的电流线模突变量(标么值); $K_{\Delta i}$ 为启动门槛值, 整定原则为躲过正常运行时直流线路电流线模变化量。考虑 MMC 换流站输电波形质量好和平波电抗器的抑制作用, 正常运行时直流电流波动较小, 因此设置 $K_{\Delta i} = 0.1I_{\text{ref}}$, I_{ref} 为线路稳定运行电流标么值^[3]。

3.2 故障方向判据

文献[3]提出了并联型多端混合特高压混合直流线路故障区域识别判据:

$$\begin{cases} |\Delta E_j| > \Delta_{\text{setT}}, \Delta E_j > 0, \text{故障发生在T区左侧} \\ |\Delta E_j| > \Delta_{\text{setT}}, \Delta E_j < 0, \text{故障发生在T区右侧} \\ |\Delta E_j| < \Delta_{\text{setT}}, \text{故障发生在T接区域} \end{cases} \quad (20)$$

根据公式(20), $|\Delta E_j| > \Delta_{\text{setT}}$, 有 $\Delta E_j > \Delta_{\text{setT}}$ 或 $\Delta E_j < -\Delta_{\text{setT}}$, 且 $\Delta E_j > 0$, 可化简为 $\Delta E_j > \Delta_{\text{setT}}$; 同理, $|\Delta E_j| > \Delta_{\text{setT}}$, $\Delta E_j < 0$ 可化简为 $\Delta E_j < -\Delta_{\text{setT}}$;

综上, 故障方向识别判据可简化为

$$\begin{cases} \Delta E_j > \Delta_{\text{setT}}, \text{T区左侧} \\ \Delta E_j < -\Delta_{\text{setT}}, \text{T区右侧} \end{cases} \quad (21)$$

式中 ΔE_j 为标准能量差, 计算公式为

$$\Delta E_j = \frac{E_{Lj} - E_{Rj}}{\max(E_{Lj}, E_{Rj})} \quad (22)$$

Δ_{setT} 为故障方向判据的整定值, Δ_{setT} 的计算公式为

$$\Delta_{\text{setT}} = 0.5(|\Delta E_{Tj, \max}| + |\Delta E_{ij, \min}|) \quad (23)$$

式中: $\Delta E_{Tj, \max}$ 为 T 区故障时标准能量差的最大值, 对应 T 区发生金属性接地故障时, 所计算的 ΔE_j ; $\Delta E_{ij, \min}$ 为 T 区两侧故障时标准能量差的最小值, 公式为

$$\Delta E_{ij, \min} = \min(\Delta E_{Lj, \min}, \Delta E_{Rj, \min}) \quad (24)$$

式中: $\Delta E_{Lj, \min}$ 代表整流侧高阻接地故障时根据式(22)所计算的 ΔE_j ; $\Delta E_{Rj, \min}$ 代表线路末端逆变侧高阻接地故障时根据式(22)所计算的 ΔE_j 。通过仿真计算, Δ_{setT} 取 0.357 最为合理。

根据 T 区边界幅频特性确定衰减中心频率为 53Hz, 对应小波变换分解的层数 $j=8$, 对应 d8 频带 (39.0625~78.1250Hz), 在给定时间窗内, 利用式(17)计算 T 区两侧线路故障电流线模分量 d8 频带下暂

态电流小波能量 E_{L8} 、 E_{R8} , 根据公式(21)来判别故障方向。

3.3 雷击干扰判据

不同雷击故障下的暂态电流一般分为负荷直流分量和附加分量, 而其主要的差异性体现在附加分量上。发生雷击干扰时, 电流波形会急剧上升后再骤降, 最后趋于平稳。由于雷电波是一种负脉冲波, 其频谱的主要频率分量集中在低频段, 而其所产生的电流暂态分量的频谱能量主要以高频段为主。发生雷击但未故障时, 电流波形会急剧上升, 其与刚发生雷击干扰时的特征相同, 但随着雷电压过大, 导致绝缘子被击穿, 将造成短路故障, 此时电流波形与发生其他接地短路故障时的波形特征相同, 其波形变化较为缓慢。在雷击未故障前, 所产生的电流暂态分量的频谱能量以高频段为主, 但在雷击故障后, 其频谱能量又以低频为主^[24]。

由于发生雷击干扰和雷击故障所产生的电流暂态分量的主要频谱能量不同, 导致经小波变换得到的不同频段谱能量也不同, 其高频能量与低频能量的比值必有差异^[25]。因此本文采用高频暂态电流能量与低频暂态电流能量的比值作为雷击干扰和雷击故障的判据。即采用 d1 频段作为高频带, 计算高频暂态电流能量即 E_{L1} , 采用 d6 频段作为低频带。计算低频暂态电流能量即 E_{L6} 。定义:

$$K_A = \frac{E_{L1}}{E_{L6}} \quad (25)$$

式中 E_{L1} 、 E_{L6} 分别为保护检测到线路末端电流线模分量 d1 频带和 d6 频带下的暂态电流小波能量。

当线路发生雷击干扰时, 该比值较大; 当线路发生雷击故障时, 该比值相对较小。于是, 可得雷击干扰与雷击故障的判据为

$$\begin{cases} K_A \geq \Delta_{\text{setL}}, \text{雷击干扰} \\ K_A < \Delta_{\text{setL}}, \text{雷击故障} \end{cases} \quad (26)$$

Δ_{setL} 为保护预先设置整定值, 本文经仿真实验后发现, 取 Δ_{setL} 的值为 0.9 作为雷击干扰和雷击故障判据的整定值可有效区分雷击干扰和雷击故障。

3.4 整流侧区内外判据

1.1 节的分析结果表明, 整流侧边界对故障电流高频信号有显著的衰减作用。当整流侧区外发生故障时, 故障电流由故障点流向保护 A_1 , 故障电流的高频分量需经过整流侧边界和线路 L_1 的双重衰减到达保护 A_1 安装处, 因此保护 A_1 检测的高频能量很小; 然而, 当线路 L_1 发生故障时, 故障电流的高频分量只需经过线路 L_1 的衰减, 便可到达保护 A_1 安装处, 保护 A_1 检测的高频能量较大。

当故障位置距离保护安装处较远且过渡电阻很大时，保护检测到的高频暂态电流能量较小，保护可能无法甄别，造成拒动。因此采用高频暂态电流能量与低频暂态电流能量的比值作为区内、外保护判据，从而降低过渡电阻的影响^[16]。即采用 d1 频段(5~10kHz, 衰减较大)作为高频带，计算高频暂态电流能量即 E_{L1} ，采用 d6 频段(156.25~312.5Hz, 衰减较小)作为低频带。计算低频暂态电流能量即 E_{L6} 。定义：

$$K_{A1} = \frac{E_{L1}}{E_{L6}} \quad (27)$$

式中 E_{L1} 、 E_{L6} 分别为保护 A_1 检测到线路 L_1 末端故障电流线模分量 d1 频带和 d6 频带下的暂态电流小波能量。

当线路 L_1 发生故障时，该比值较大；当整流侧区外发生故障时，该比值较小。于是，可得整流侧区内、外判据为

$$\begin{cases} K_{A1} \leq \Delta_{set1}, & \text{整流侧区外故障} \\ \Delta_{set1} < K_{A1}, & \text{线路 } L_1 \text{ 故障} \end{cases} \quad (28)$$

Δ_{set1} 为保护 A_1 预先设置整定值，计算公式为

$$\Delta_{set1} = K_{rel} K_{A1.out} \quad (29)$$

式中： K_{rel} 为可靠系数， K_{rel} 取 1.5； $K_{A1.out}$ 为图 12 中 f_{out1} 处发生金属性接地故障时，保护所计算的 K_{A1} 值。对于整流侧区外故障，线路 L_1 保护应该可靠不动作，因此应按照最严重故障来进行保护整定，即图 12 中 f_{in1} 处高阻接地故障躲过图 12 中 f_{out1} 处金属性接地故障，通过式(29)得 Δ_{set1} 取 0.00107 最为合理。

3.5 线路末端逆变侧区内外判据

1.3 节的分析结果表明，逆变侧边界对故障电流高频信号有显著的衰减作用。同理，采用线路 L_2 首端故障电流线模分量下 d1 频带暂态电流小波能量与 d6 频带暂态电流小波能量的比值来区别线路末端逆变侧区内、外故障。

线路末端逆变侧区内、外判据为

$$\begin{cases} K_{A2} \leq \Delta_{set2}, & \text{线路末端逆变侧区外故障} \\ \Delta_{set2} < K_{A2}, & \text{线路 } L_2 \text{ 故障} \end{cases} \quad (30)$$

Δ_{set2} 为保护 A_2 预先设置整定值， Δ_{set2} 的计算公式为

$$\Delta_{set2} = K_{rel} K_{A2.out} \quad (31)$$

式中： K_{rel} 为可靠系数， K_{rel} 取 1.5； $K_{A2.out}$ 为图 12 中 f_{out3} 处发生金属性接地故障时，保护所计算的 K_{A2} 值。对于线路末端逆变侧区外故障，线路 L_2

保护应该可靠不动作，因此 Δ_{set2} 应按照线路末端区外最严重故障进行整定计算，即图 12 中 f_{in3} 处发生高阻接地故障躲过图 12 中 f_{out3} 处发生金属性接地故障，通过式(31)得 Δ_{set2} 取 0.00435 最为合理。

3.6 故障选极判据

本文根据时间窗内的两极电流突变量幅值构成故障选极判据，定义 P 为时间窗内正极与负极电流突变量绝对值积分的比值^[26]。

$$P = \frac{I_{p1}}{I_{p2}} = \frac{\left| \sum_{t_0}^{t_0+K\Delta t} \Delta i_{L_x,p}(t_0+n\Delta t) \right|}{\left| \sum_{t_0}^{t_0+K\Delta t} \Delta i_{L_x,n}(t_0+n\Delta t) \right|} \quad (32)$$

式中： x 取 1 或 2， t_0 为故障发生时刻； Δt 为采样间隔； $\Delta i_{L_x,p}$ 、 $\Delta i_{L_x,n}$ 为线路 L_1 或线路 L_2 正极和负极电流突变量； I_{p1} 和 I_{p2} 分别为 $\Delta i_{L_x,p}$ 和 $\Delta i_{L_x,n}$ 在时间窗的积分并取绝对值。故障极判据如下^[26]：

$$\begin{cases} P > 1.5, & \text{正极故障} \\ P \leq 0.8, & \text{负极故障} \\ 0.8 < P < 1.5, & \text{双极故障} \end{cases} \quad (33)$$

4 保护方案及流程

4.1 保护方案

基于前面的分析提出特高压多端混合直流输电线路暂态电流方向保护：首先采集 T 区两侧线路的电流信号，将两侧线路电流的突变量代入式(19)判别直流系统是否发生故障；当判别直流系统发生故障后，对故障暂态电流进行相模变换，然后对 T 区两侧线路 L_1 和线路 L_2 的故障电流线模分量进行小波分解，计算各频带下小波能量；将 E_{L8} 和 E_{R8} 代入式(21)中，判别故障方向，最后判断区内外故障：

1) 当 $\Delta E_8 > \Delta_{setT}$ 判别 T 区左侧发生故障；进而判断故障位置，根据 E_{L1} 和 E_{L6} 计算 K_{A1} ； $\Delta_{set1} < K_{A1}$ 判断线路 L_1 区内发生故障，保护 A_1 动作； $K_{A1} \leq \Delta_{set1}$ 判断整流侧区外发生故障，保护 A_1 不动作。

2) 当 $\Delta E_8 < -\Delta_{setT}$ 判别 T 区右侧发生故障，进而判断故障位置，根据 E_{R1} 和 E_{R6} 计算 K_{A2} ； $\Delta_{set2} < K_{A2}$ 判断线路 L_2 区内发生故障，保护 A_2 动作； $K_{A2} \leq \Delta_{set2}$ 判断线路末端逆变侧区外发生故障，保护 A_2 不动作。

3) 当 $-\Delta_{setT} < \Delta E_8 < \Delta_{setT}$ 不满足 T 区故障方向判据，直接判断为 T 区发生故障，属于线路区外故障，保护 A_1 和 A_2 均不动作。

4.2 保护流程

根据上述保护方案和故障选极判据，本文设计

了如附录图 A3 所示的特高压多端混合直流输电线路暂态电流方向保护方法流程图。

5 建模及仿真验证

5.1 仿真模型

根据昆柳龙特高压多端混合直流输电系统工程参数,利用 PSCAD/EMTDC 搭建特高压多端混合直流输电系统模型,其传输容量为 8000MW;昆北换流站、柳北换流站以及龙门换流站额定电压均为 $\pm 800\text{kV}$;昆北换流站、柳北换流站以及龙门换流站额定电流分别为 5、1.875、3.125kA;昆北换流站采用定电流控制、柳北换流站采用定功率控制、龙门换流站采用定直流电压控制;昆北换流站、柳北换流站以及龙门换流站三端均安装平波电抗器;其中昆北侧还加装 12/24/36 三调谐直流滤波器;直流线路采用 Frequency Dependent(Phase)Model Options 模型,线路 L_1 与线路 L_2 输电距离分别为 908km 和 542km。在 PSCAD/EMTDC 中搭建模型如附录图 A4 所示。

图中: f_{in1} 、 f_{in2} 、 f_{in3} 为线路 L_1 首端、中点以及末端发生故障; f_{in11} 、 f_{in12} 、 f_{in13} 为线路 L_2 首端、中点以及末端发生故障; f_{out1} 、 f_{out2} 、 f_{out3} 为各端平波电抗器外侧发生故障;保护 A_1 安装在线路 L_1 末端,保护范围覆盖线路 L_1 全长;保护 A_2 安装在线路 L_2 首端,保护范围覆盖线路 L_2 全长;本文保护采样频率为 20kHz,取 4ms 时间窗数据进行保护判据计算。

5.2 仿真验证

利用 PSCAD 搭建如附录图 A4 所示的昆柳龙特高压多端混合直流系统模型,并对本文所提的保护方案进行验证,设置故障发生在 1s 时刻,持续时间 0.1s;考虑不同故障位置,直流线路区内故障如图 12 中 $f_{in1} - f_{in3}$ 、 $f_{in11} - f_{in13}$,线路区外故障如 $f_{out1} - f_{out3}$ 所示。仿真采样频率为 20kHz,时间窗为 4ms,过渡电阻在 0~500 Ω 之间选取。根据第 4 节所提保护方案,在 MATLAB 中编写保护算法。并导入故障仿真数据,得到保护 A_1 与保护 A_2 的判别结果如附录表 A1—表 A3 所示。

从附录表 A1—表 A3 可以看出,当故障发生在 f_{out2} 处时, $-0.357 < \Delta E_8 < 0.357$, 不满足故障方向判据,根据保护流程图直接判断为区外故障,保护 A_1 和 A_2 均不动作;当故障发生在 f_{out1} 或线路 L_1 时,满足 T 区左侧故障方向判据即满足 $\Delta E_8 > \Delta_{setT} = 0.357$, 根据保护流程,由保护 A_1 判别 T 区左侧区内、外故障,计算 K_{A_1} , 发现当故障位

于区内线路 L_1 时, $K_{A_1} > \Delta_{set1} = 0.00107$, 保护 A_1 动作,当故障位于整流侧区外 f_{out1} 处时, $K_{A_1} \leq \Delta_{set1} = 0.00107$, 保护 A_1 不动作;当故障发生在 f_{out3} 或线路 L_2 时,满足 T 区右侧故障方向判据即满足 $\Delta E_8 < -\Delta_{setT} = -0.357$, 根据保护流程,由保护 A_2 判断 T 区右侧区内、外故障,计算 K_{A_2} , 发现当故障位于区内线路 L_2 时, $K_{A_2} > \Delta_{set2} = 0.00435$, 保护 A_2 动作,当故障位于线路末端逆变侧区外 f_{out3} 处时, $K_{A_2} \leq \Delta_{set2} = 0.00435$, 保护 A_2 不动作。保护 A_1 和保护 A_2 在不同故障极和过渡电阻下,均能正确动作。

5.3 抗干扰能力仿真分析

5.3.1 雷击仿真分析

为验证保护算法的抗雷击干扰效果,分别对直流线路 L_1 和直流线路 L_2 中点发生雷击干扰和雷击故障进行仿真,保护算法的测试结果如附录表 A4 所示。

从附录表 A4 中可以看出,当线路发生雷击干扰时,保护所检测的高频分量远大于低频分量,保护 A_1 和 A_2 的 K_A 均大于 $\Delta_{setL} = 0.9$, 满足雷击干扰辅助判据,保护 A_1 和 A_2 准确识别雷击干扰;当线路发生雷击故障时,保护检测到部分雷电流高频分量,因此保护 A_1 和 A_2 的 K_A 相比接地故障时增大,但仍会小于 $\Delta_{setL} = 0.9$, 因此保护 A_1 和保护 A_2 均能可靠识别。

5.3.2 抗噪声干扰仿真分析

为验证保护的抗噪声干扰能力,分别对整流侧区外、直流线路 L_1 、直流线路 L_2 以及线路末端逆变侧区外在金属性接地故障和高阻接地故障,并对故障电流添加信噪比 40dB 的随机高斯白噪声进行仿真验证,保护算法的实验测试结果如附录表 A5 所示。

从附录表 A5 可以看出,当采样电流存在一定误差时,整流侧区外、直流线路 L_1 、直流线路 L_2 以及线路末端逆变侧区外发生故障时,会影响 ΔE_8 、 K_{A1} 和 K_{A2} 计算结果,但保护仍正确动作。该保护方法具有一定的抗噪声干扰能力。

6 结论

本文将保护装置安装在 T 区两侧,提出特高压多端混合直流输电线路暂态电流方向保护方法。该保护方法基于整流侧边界、T 区边界、线路末端逆变侧边界的频率特性,利用 T 区边界对故障暂态电流中低频分量的衰减特性,根据 T 区两侧线路故障

暂态电流中低频能量差判断故障方向, 根据线路首端整流侧边界和线路末端逆变侧边界对故障暂态电流高频分量的衰减特性, 利用故障暂态电流高低频能量比判别线路区内、外故障。该方法具有以下优点:

1) 充分利用特高压多端混合直流输电系统的结构特点, 将保护装置安装在 T 区两侧, 利用两个保护实现两条线路的全线速动保护。

2) 该方法仅需电流量, 利用 T 区两侧电流线模分量的中低频分量判断故障方向, 利用故障方向线路的电流高频能量与低频能量比值区分区内、外故障, 利用正极和负极故障电流突变量绝对值积分的比值判断故障极。

3) 该方法对采样频率要求较低, 并且耐过渡电阻能力强, 大量仿真结果表明, 该方法能准确判别 T 区故障方向, 并正确区分线路首端整流侧和线路末端逆变侧区内外故障。

附录见本刊网络版 (<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 童晓阳, 权文杰, 李智, 等. 利用行波波形成改进编辑距离的柔性直流输电线路后备保护方案[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 294-300. TONG Xiaoyang, QUAN Wenjie, LI Zhi, et al. Backup protection scheme for flexible DC transmission line by traveling wave waveform similarity based on improved editing distance[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 294-300(in Chinese).
- [2] 袁茜, 卢毅, 季一润, 等. 柔性直流换流站可靠性分析及状态检修决策优化[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 5068-5076. YUAN Xi, LU Yi, JI Yirun, et al. Reliability analysis and condition maintenance decision optimization of flexible dc converter stations[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 5068-5076(in Chinese).
- [3] 李海锋, 张坤, 王钢, 等. 并联型多端混合高压直流线路故障区域判别方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(4): 119-125. LI Haifeng, ZHANG Kun, WANG Gang, et al. Fault area discrimination method for parallel multi-terminal hybrid HVDC line [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(4): 119-125(in Chinese).
- [4] 刘佳硕, 李永丽, 陈晓龙, 等. 基于暂态电流比值的多端柔性直流电网保护[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1439-1449. LIU Jiashuo, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. Novel protection based on transient current ratio for MTDC Grid[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1439-1449(in Chinese).
- [5] 黄伟煌, 饶宏, 黄莹, 等. 一种基于常规直流输电系统的混合直流改造方案[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2861-2868. HUANG Weihuang, RAO Hong, HUANG Ying, et al. A novel refurbishment scheme for reforming the existing LCC-HVDC to hybrid HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2861-2868(in Chinese).
- [6] 王蕾, 孙孝峰, 王宝诚, 等. LCC-MMC 混合高压直流输电系统直流线路故障保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(21): 7339-7351. WANG Lei, SUN Xiaofeng, WANG Baocheng, et al. Research on protection scheme of DC line fault in LCC-MMC hybrid HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7339-7351(in Chinese).
- [7] 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 current limiter and a DC circuit breaker[J]. Power Systems Protection and Control, 2020, 48(19): 119-127(in Chinese).
- [8] 陈争光, 周泽昕, 王兴国, 等. 混合多端直流输电系统线路保护方案研究[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2617-2622. CHEN Zhengguang, ZHOU Zexin, WANG Xingguo, et al. Research on protection scheme of hybrid Multi-terminal DC transmission lines [J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2617-2622(in Chinese).
- [9] 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(in Chinese).
- [10] 梁远升, 黄泽杰, 李海锋, 等. 基于行波相位特性的三端混合直流线路行波保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4525-4542. LIANG Yuansheng, HUANG Zejie, LI Haifeng, et al. Phase characteristics based travelling wave protection for transmission line of three-terminal hybrid HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4525-4542(in Chinese).
- [11] 董新洲, 汤兰西, 施慎行, 等. 柔性直流输电线路保护配置方案[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1752-1759. DONG Xinzhou, TANG Lanxi, SHI Shenxing, et al. Configuration scheme of transmission line protection for flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1752-1759(in Chinese).
- [12] 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): 3201-3211. 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): 3201-3211(in Chinese).
- [13] 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(in Chinese).
- [14] 陈仕龙, 束洪春, 谢静, 等. 特高压直流输电线路和边界频率特性研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 134-139, 153. CHEN Shilong, SHU Hongchun, XIE Jing, et al. Frequency characteristics of UHVDC transmission line and its boundary[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 134-139, 153(in Chinese).
- [15] 许小雪, 刘建锋, 江玉蓉. 基于多频带能量的高压直流输电线路单端暂态电流保护[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 32-39. XU Xiaoxue, LIU Jianfeng, JIANG Yurong. HVDC transmission line protection based on single-ended transient current using multiband energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 32-39(in Chinese).
- [16] 宋国兵, 冉孟兵, 褚旭, 等. 利用高低频电流幅值比的 VSC-HVDC 输电线路全线速动保护新原理[J]. 电网技术, 2014, 38(5):

- 1402-1407.
SONG Guobing, RAN Mengbing, CHU Xu, et al. A new single-end current based whole-line quick-action protection for VSC-HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1402-1407(in Chinese).
- [17] 郑黎明, 贾科, 毕天姝, 等. 基于余弦相似度的新能源场站 T 接型送出线路纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 111-119.
ZHENG Liming, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Cosine similarity based pilot protection of teed transmission line connected to renewable energy power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18): 111-119(in Chinese).
- [18] 樊艳芳, 王永进. 基于 Hilbert 能量幅值信息和波形信息的特高压直流输电线路单端保护方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1818-1830.
FAN Yanfang, WANG Yongjin. Single-ended protection method for UHVDC transmission line based on Hilbert energy amplitude information and waveform information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1818-1830(in Chinese).
- [19] 侯俊杰, 宋国兵, 常仲学, 等. 基于暂态功率的高压直流线路单端量保护[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(21): 203-212.
HOU Junjie, SONG Guobing, CHANG Zhongxue, et al. Transient power based single-end protection for HVDC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(21): 203-212(in Chinese).
- [20] 黄泽杰, 梁远升, 李海峰, 等. 计及汇流母线行波特性的三端混合直流系统行波解析方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 136-144.
HUANG Zejie, LIANG Yuansheng, LI Haifeng, et al. Analytical calculation method of travelling wave for three-terminal hybrid DC system considering characteristics of T-connect bus[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 136-144(in Chinese).
- [21] ZHANG Yanxia, WANG Jian, JIANG Huilan, et al. A novel fault location method for hybrid-HVDC transmission line[C]//2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Atlanta: IEEE, 2019.
- [22] LETERME W, VAN HERTEM D. reduced modular multilevel converter model to evaluate fault transients in DC grids[C]//12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014). Copenhagen: IET, 2014.
- [23] 邢超, 蔡旺, 毕贵红, 等. 昆柳龙特高压三端混合直流输电线路边界频率特性研究[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(2): 135-141.
XING Chao, CAI Wang, BI Guihong, et al. Research on boundary frequency characteristics of Kunliulong hybrid three-terminal UHVDC transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(2): 135-141(in Chinese).
- [24] 陈仕龙, 曹蕊蕊, 毕贵红, 等. 基于形态学的特高压直流输电线路雷击干扰识别[J]. 中国电力, 2014, 47(10): 40-46.
CHEN Shilong, CAO Ruirui, BI Guihong, et al. Identification of UHVDC transmission line lightning disturbance based on morphology[J]. Electric Power, 2014, 47(10): 40-46(in Chinese).
- [25] 刘可真, 束洪春, 于继来, 等. $\pm 800\text{kV}$ 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 $\pm 800\text{kV}$ UHVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3007-3014(in Chinese).
- [26] 束洪春, 田鑫萃, 张广斌, 等. $\pm 800\text{kV}$ 直流输电线路的极波暂态量保护[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 96-104.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, ZHANG Guangbin, et al. Protection for $\pm 800\text{kV}$ HVDC transmission lines using pole wave transients[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 96-104(in Chinese).



邢超

在线出版日期: 2023-12-28。

收稿日期: 2023-04-07。

作者简介:

邢超(1986), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为直流输电控制保护与试验技术;

陈仕龙(1973), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统继电保护, E-mail: chenshilong3@126.com。

(编辑 李健一)

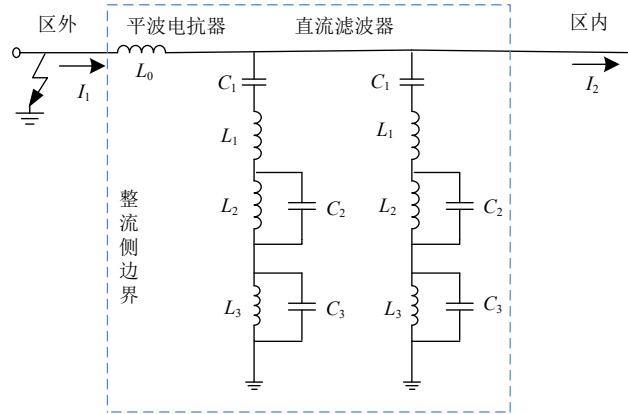


图 A1 整流侧线路边界

Fig.A1 Line boundary on rectifier side

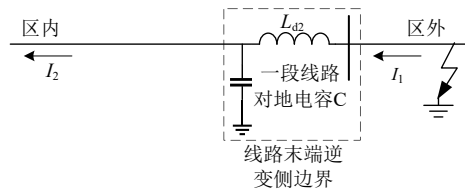


图 A2 线路末端逆变侧边界

Fig.A2 End of line inverter side boundary

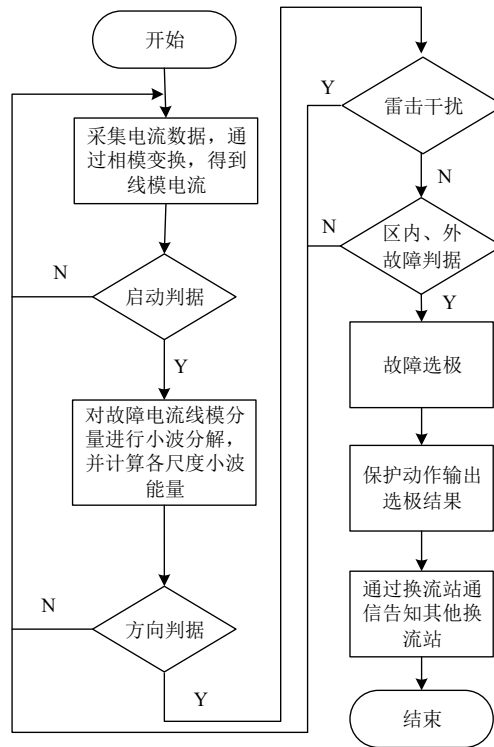


图 A3 保护流程图

Fig. A3 Protection flow chart

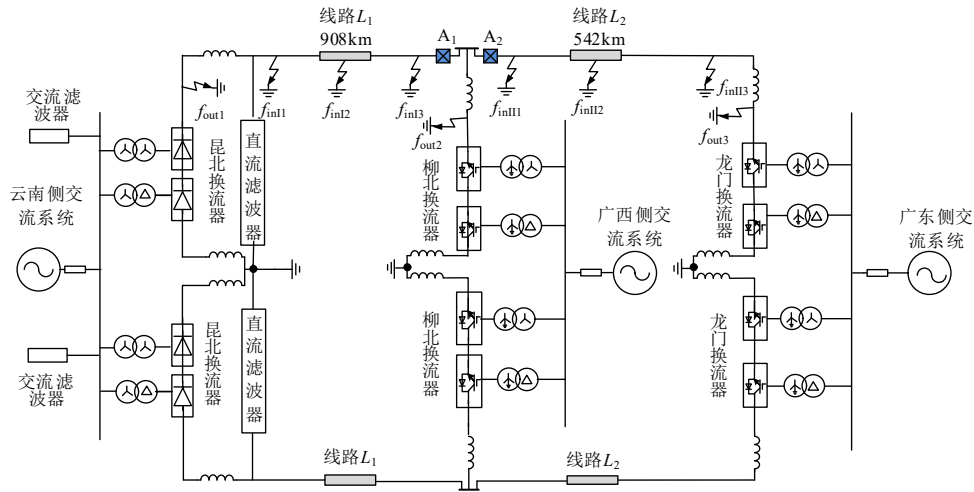


图 A4 昆柳龙特高压三端混合直流输电仿真模型

Fig. A4 Simulation model of Kunliulong UHV Three-terminal hybrid DC transmission

表 A1 保护动作结果(正极故障)

Table A1 Result of protection action (positive pole fault)

故障位置	过渡电阻/ Ω	$E_{1.8}$	$E_{2.8}$	ΔE_8	故障方向	P	故障选极	K_{A1}	K_{A2}	A ₁ 判断结果	A ₂ 判断结果
f _{out1}	0	118.7883	14.3495	0.879	T 区左侧	2.15	正极	0.00071	—	整流侧区外	—
	100	22.7137	3.0119	0.867	T 区左侧	2.21	正极	0.00047	—	整流侧区外	—
	300	4.3627	0.9522	0.781	T 区左侧	2.25	正极	0.00027	—	整流侧区外	—
	500	1.7403	0.471	0.729	T 区左侧	2.25	正极	0.00026	—	整流侧区外	—
f _{I1}	0	27.7349	0.7945	0.971	T 区左侧	2.60	正极	0.0098	—	线路 L ₁ 区内	—
	100	8.0674	0.7738	0.904	T 区左侧	2.59	正极	0.0059	—	线路 L ₁ 区内	—
	300	2.5826	0.254	0.901	T 区左侧	2.54	正极	0.0035	—	线路 L ₁ 区内	—
	500	1.1093	0.1173	0.894	T 区左侧	2.52	正极	0.0026	—	线路 L ₁ 区内	—
f _{I2}	0	17.3128	0.0767	0.995	T 区左侧	9.10	正极	0.1984	—	线路 L ₁ 区内	—
	100	8.0962	0.0429	0.994	T 区左侧	9.10	正极	0.1045	—	线路 L ₁ 区内	—
	300	3.0605	0.018	0.994	T 区左侧	9.05	正极	0.1008	—	线路 L ₁ 区内	—
	500	1.6035	0.0098	0.993	T 区左侧	8.95	正极	0.1001	—	线路 L ₁ 区内	—
f _{I3}	0	115.8555	1.1329	0.990	T 区左侧	12.14	正极	0.2732	—	线路 L ₁ 区内	—
	100	22.06	0.2296	0.989	T 区左侧	12.13	正极	0.2563	—	线路 L ₁ 区内	—
	300	2.1487	0.0282	0.986	T 区左侧	12.32	正极	0.2563	—	线路 L ₁ 区内	—
	500	1.6011	0.0245	0.984	T 区左侧	12.58	正极	0.2125	—	线路 L ₁ 区内	—
f _{in11}	0	1.4886	118.7122	-0.987	T 区右侧	15.40	正极	—	0.83	—	线路 L ₂ 区内
	100	0.2834	22.5802	-0.987	T 区右侧	17.47	正极	—	0.475	—	线路 L ₂ 区内
	300	0.0187	4.2884	-0.995	T 区右侧	22.96	正极	—	0.427	—	线路 L ₂ 区内
	500	0.0185	1.6772	-0.989	T 区右侧	27.23	正极	—	0.2574	—	线路 L ₂ 区内
f _{in12}	0	0.1913	21.3206	-0.991	T 区右侧	13.56	正极	—	0.4914	—	线路 L ₂ 区内
	100	0.1668	7.4255	-0.977	T 区右侧	12.20	正极	—	0.4469	—	线路 L ₂ 区内
	300	0.1889	2.1728	-0.913	T 区右侧	9.39	正极	—	0.3686	—	线路 L ₂ 区内
	500	0.1349	1.0166	-0.867	T 区右侧	7.66	正极	—	0.221	—	线路 L ₂ 区内
f _{in13}	0	0.1867	16.3017	-0.988	T 区右侧	3.29	正极	—	0.065	—	线路 L ₂ 区内
	100	0.1153	7.056	-0.983	T 区右侧	3.11	正极	—	0.059	—	线路 L ₂ 区内
	300	0.1364	2.6192	-0.947	T 区右侧	2.78	正极	—	0.053	—	线路 L ₂ 区内
	500	0.1163	0.8831	-0.868	T 区右侧	2.52	正极	—	0.051	—	线路 L ₂ 区内
f _{out3}	0	0.1622	14.5646	-0.988	T 区右侧	3.19	正极	—	0.0005	—	L ₂ 末端逆变侧区外
	100	0.1022	0.6455	-0.841	T 区右侧	2.99	正极	—	0.0004	—	L ₂ 末端逆变侧区外
	300	0.0932	0.4121	-0.773	T 区右侧	2.56	正极	—	0.0003	—	L ₂ 末端逆变侧区外
	500	0.0372	0.1551	-0.760	T 区右侧	2.24	正极	—	0.0001	—	L ₂ 末端逆变侧区外
f _{out2}	0	11.4025	12.0759	0.099	线路区外	7.13	正极	—	—	—	—
	100	0.615	0.574	0.066	线路区外	7.08	正极	—	—	—	—
	300	0.0076	0.0072	0.052	线路区外	7.09	正极	—	—	—	—
	500	0.0055	0.0054	0.018	线路区外	3.49	正极	—	—	—	—

表 A2 保护动作结果(负极故障)
Table A2 Result of protection action (negative pole fault)

故障位置	过渡电阻/ Ω	E_{L8}	E_{R8}	ΔE_8	故障方向	P	故障极	K_{A1}	K_{A2}	A ₁ 判断结果	A ₂ 判断结果
f_{out1}	0	119.8125	14.5805	0.878	T区左侧	0.46	负极	0.0006	—	整流侧区外	—
	100	22.9223	3.0533	0.867	T区左侧	0.45	负极	0.0005	—	整流侧区外	—
	300	4.4211	0.9614	0.783	T区左侧	0.44	负极	0.0004	—	整流侧区外	—
	500	1.7742	0.435	0.755	T区左侧	0.44	负极	0.0002	—	整流侧区外	—
f_{in1}	0	26.0446	0.7169	0.972	T区左侧	0.55	负极	0.0089	—	线路L ₁ 区内	—
	100	7.8844	0.8578	0.891	T区左侧	0.38	负极	0.0065	—	线路L ₁ 区内	—
	300	2.5311	0.2799	0.889	T区左侧	0.39	负极	0.0041	—	线路L ₁ 区内	—
	500	1.2905	0.1504	0.883	T区左侧	0.39	负极	0.0026	—	线路L ₁ 区内	—
f_{in2}	0	17.2144	0.8741	0.949	T区左侧	0.11	负极	0.1851	—	线路L ₁ 区内	—
	100	8.0385	0.6412	0.920	T区左侧	0.11	负极	0.1736	—	线路L ₁ 区内	—
	300	3.0224	0.297	0.902	T区左侧	0.11	负极	0.1052	—	线路L ₁ 区内	—
	500	1.7129	0.2	0.883	T区左侧	0.11	负极	0.1026	—	线路L ₁ 区内	—
f_{in3}	0	115.732	6.0167	0.948	T区左侧	0.08	负极	0.2732	—	线路L ₁ 区内	—
	100	22.3425	1.8442	0.917	T区左侧	0.09	负极	0.2561	—	线路L ₁ 区内	—
	300	7.2453	0.632	0.913	T区左侧	0.09	负极	0.2364	—	线路L ₁ 区内	—
	500	1.9379	0.2391	0.877	T区左侧	0.09	负极	0.2165	—	线路L ₁ 区内	—
f_{in11}	0	6.8262	118.8853	-0.943	T区右侧	0.07	负极	—	0.7952	—	线路L ₂ 区内
	100	1.3239	22.9706	-0.942	T区右侧	0.06	负极	—	0.5345	—	线路L ₂ 区内
	300	0.267	4.4331	-0.940	T区右侧	0.06	负极	—	0.4261	—	线路L ₂ 区内
	500	0.171	1.7467	-0.902	T区右侧	0.05	负极	—	0.2694	—	线路L ₂ 区内
f_{in12}	0	0.213	22.3734	-0.990	T区右侧	0.07	负极	—	0.4862	—	线路L ₂ 区内
	100	0.1288	7.9144	-0.984	T区右侧	0.08	负极	—	0.4369	—	线路L ₂ 区内
	300	0.1527	2.3298	-0.934	T区右侧	0.09	负极	—	0.3697	—	线路L ₂ 区内
	500	0.1131	1.0845	-0.896	T区右侧	0.11	负极	—	0.2169	—	线路L ₂ 区内
f_{in13}	0	0.2617	21.7088	-0.988	T区右侧	0.29	负极	—	0.0069	—	线路L ₂ 区内
	100	0.1363	8.3375	-0.984	T区右侧	0.31	负极	—	0.0612	—	线路L ₂ 区内
	300	0.0465	2.4265	-0.981	T区右侧	0.33	负极	—	0.0569	—	线路L ₂ 区内
	500	0.0423	0.3985	-0.894	T区右侧	0.36	负极	—	0.0524	—	线路L ₂ 区内
f_{out3}	0	0.5513	19.3172	-0.971	T区右侧	0.29	负极	—	0.0006	—	L ₂ 末端逆变侧区外
	100	0.5599	7.3085	-0.923	T区右侧	0.31	负极	—	0.0005	—	L ₂ 末端逆变侧区外
	300	0.0611	0.7013	-0.913	T区右侧	0.35	负极	—	0.0004	—	L ₂ 末端逆变侧区外
	500	0.0332	0.3031	-0.890	T区右侧	0.38	负极	—	0.0002	—	L ₂ 末端逆变侧区外
f_{out2}	0	11.5214	12.3658	-0.068	T区故障	0.16	负极	—	—	—	—
	100	0.5244	0.5391	-0.027	T区故障	0.18	负极	—	—	—	—
	300	0.0214	0.0215	-0.005	T区故障	0.21	负极	—	—	—	—
	500	0.0114	0.0115	-0.009	T区故障	0.25	负极	—	—	—	—

表 A3 保护动作结果(双极故障)
Table A3 Result of protection action (bipolar fault)

故障位置	过渡电阻/ Ω	E_{L8}	E_{R8}	ΔE_8	故障方向	P	故障极	K_{A1}	K_{A2}	A ₁ 判断结果	A ₂ 判断结果
f_{out1}	0	367.727	135.695	0.631	T区左侧	0.99	双极	0.0001	—	整流侧区外	—
	100	367.865	136.151	0.631	T区左侧	0.99	双极	0.0001	—	整流侧区外	—
	300	366.660	135.319	0.631	T区左侧	0.99	双极	0.0001	—	整流侧区外	—
	500	367.681	135.643	0.631	T区左侧	0.99	双极	0.0001	—	整流侧区外	—
f_{in1}	0	341.593	31.116	0.909	T区左侧	0.99	双极	0.0122	—	线路L ₁ 区内	—
	100	340.902	31.116	0.909	T区左侧	0.99	双极	0.0122	—	线路L ₁ 区内	—
	300	340.505	31.068	0.909	T区左侧	0.99	双极	0.0122	—	线路L ₁ 区内	—
	500	341.318	31.413	0.908	T区左侧	0.99	双极	0.0123	—	线路L ₁ 区内	—
f_{in12}	0	220.963	8.685	0.961	T区左侧	1.00	双极	0.0118	—	线路L ₁ 区内	—
	100	221.659	8.797	0.960	T区左侧	1.00	双极	0.0115	—	线路L ₁ 区内	—

f_{in13}	300	221.555	8.792	0.960	T 区左侧	1.00	双极	0.0112	—	线路 L_1 区内	—
	500	221.759	8.792	0.960	T 区左侧	1.00	双极	0.0111	—	线路 L_1 区内	—
	0	636.356	15.365	0.976	T 区左侧	1.01	双极	0.0121	—	线路 L_1 区内	—
	100	635.898	15.257	0.976	T 区左侧	1.00	双极	0.0120	—	线路 L_1 区内	—
	300	636.511	15.381	0.976	T 区左侧	1.00	双极	0.0120	—	线路 L_1 区内	—
	500	635.311	15.242	0.976	T 区左侧	1.00	双极	0.0120	—	线路 L_1 区内	—
f_{in11}	0	16.927	646.361	-0.974	T 区右侧	1.0016	双极	—	0.0121	—	线路 L_2 区内
	100	17.271	648.307	-0.973	T 区右侧	1.00	双极	—	0.0122	—	线路 L_2 区内
	300	17.139	647.308	-0.974	T 区右侧	1.00	双极	—	0.0121	—	线路 L_2 区内
	500	17.239	648.036	-0.973	T 区右侧	1.00	双极	—	0.0122	—	线路 L_2 区内
f_{in12}	0	12.173	217.476	-0.944	T 区右侧	1.00	双极	—	0.0122	—	线路 L_2 区内
	100	12.065	217.335	-0.944	T 区右侧	1.00	双极	—	0.0122	—	线路 L_2 区内
	300	12.045	216.808	-0.944	T 区右侧	1.00	双极	—	0.0122	—	线路 L_2 区内
	500	12.043	216.978	-0.944	T 区右侧	1.00	双极	—	0.0122	—	线路 L_2 区内
f_{in13}	0	12.470	255.821	-0.951	T 区右侧	1.00	双极	—	0.0087	—	线路 L_2 区内
	100	12.589	255.826	-0.951	T 区右侧	1.00	双极	—	0.0099	—	线路 L_2 区内
	300	12.581	256.080	-0.951	T 区右侧	0.99	双极	—	0.0088	—	线路 L_2 区内
	500	12.519	255.929	-0.951	T 区右侧	0.99	双极	—	0.0087	—	线路 L_2 区内
f_{out3}	0	46.452	284.686	-0.837	T 区右侧	0.99	双极	—	0.0029	—	L_2 末端逆变侧 区外
	100	46.422	284.543	-0.837	T 区右侧	0.99	双极	—	0.0029	—	L_2 末端逆变侧 区外
	300	46.812	285.265	-0.836	T 区右侧	0.99	双极	—	0.0029	—	L_2 末端逆变侧 区外
	500	46.779	285.182	-0.836	T 区右侧	0.99	双极	—	0.0028	—	L_2 末端逆变侧 区外
f_{out2}	0	78.425	71.954	0.083	T 区故障	1.01	双极	—	—	—	—
	100	78.389	72.112	0.080	T 区故障	1.01	双极	—	—	—	—
	300	78.418	72.225	0.079	T 区故障	1.01	双极	—	—	—	—
	500	78.281	72.216	0.077	T 区故障	1.01	双极	—	—	—	—

表 A4 雷击仿真
Table A4 Lightning strike simulation

故障性质	雷击位置	$E_{L,S}$	$E_{R,S}$	ΔE_S	故障方向	P	故障极	$K_A(A1)$	$K_A(A2)$	A ₁ 判断结果	A ₂ 判断结果
雷击故障	正极线路 L_1 中点	182.5	0.633	0.997	T 区左侧	1.2	正极	0.619	—	线路 L_1 区内	—
	负极线路 L_1 中点	305.1	17.893	0.941	T 区左侧	0.7	负极	0.752	—	线路 L_1 区内	—
	正极线路 L_2 中点	1.136	190.0	-0.99	T 区右侧	1.2	正极	—	0.6249	—	线路 L_2 区内
	负极线路 L_2 中点	5.405	263.25	-0.97	T 区右侧	0.6	负极	—	0.699	—	线路 L_2 区内
雷击干扰	正极线路 L_1 中点	0.032	0.000	0.998	T 区左侧	1.2	正极	2.22	—	雷击干扰	—
	负极线路 L_1 中点	0.055	0.004	0.931	T 区左侧	0.7	负极	2.856	—	雷击干扰	—
	正极线路 L_2 中点	0.073	0.461	-0.84	T 区右侧	1.2	正极	—	18.03	—	雷击干扰
	负极线路 L_2 中点	0.091	0.462	-0.80	T 区右侧	0.6	负极	—	20.915	—	雷击干扰

表 A5 抗噪声干扰实验
Table A5 Anti-noise interference experiments

故障位置	过渡电阻/ Ω	$E_{L,S}$	$E_{R,S}$	ΔE_S	故障方向	P	故障极	K_{A1}	K_{A2}	A ₁ 判断结果	A ₂ 判断结果
f_{out1}	0	118	14.37	0.87	T 区左侧	2.6	正极	0.0003	—	整流侧区外	—
	500	1.72	0.01	0.99	T 区左侧	2.5	正极	0.0008	—	整流侧区外	—
f_{in11}	0	11.678	0.0739	0.99	T 区左侧	2.9	正极	0.0069	—	线路 L_1 区内	—
	500	1.6214	0.0083	0.99	T 区左侧	2.3	正极	0.0064	—	线路 L_1 区内	—
f_{in12}	0	17.3	0.0076	0.99	T 区左侧	3.7	正极	0.0071	—	线路 L_1 区内	—
	500	1.609	0.01	0.99	T 区左侧	3.9	正极	0.0064	—	线路 L_1 区内	—
f_{in13}	0	115.73	5.847	0.95	T 区左侧	12.1	正极	0.0134	—	线路 L_1 区内	—
	500	1.629	0.323	0.80	T 区左侧	12.3	正极	0.0162	—	线路 L_1 区内	—
f_{in11}	0	6.59	118.88	-0.94	T 区右侧	14.7	正极	—	0.0135	—	线路 L_2 区内
	500	0.0229	1.645	-0.98	T 区右侧	13.2	正极	—	0.0173	—	线路 L_2 区内
f_{in12}	0	0.0913	20.957	-0.99	T 区右侧	4.7	正极	—	0.0158	—	线路 L_2 区内
	500	0.127	0.994	-0.87	T 区右侧	4.15	正极	—	0.0093	—	线路 L_2 区内

f_{in13}	0	0.159	14.842	-0.99	T 区右侧	3.9	正极	—	0.0098	—	线路 L_2 区内
	500	0.113	0.856	-0.87	T 区右侧	2.3	正极	—	0.0063	—	线路 L_2 区内
f_{out3}	0	9.1	59.11	-0.84	T 区右侧	4.5	正极	—	0.003	—	L_2 末端逆变侧 区外
	500	0.036	0.42	-0.91	T 区右侧	3.4	正极	—	0.002	—	L_2 末端逆变侧 区外
f_{out2}	0	13.42	12.15	0.1	线路区外	3.8	正极	—	—	—	—
	500	0.005	0.004	0.2	线路区外	5.7	正极	—	—	—	—