



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405178

引用格式:武传健,李聪聪,侯延琦,等.考虑边界折射系数的混合直流输电线路单端保护方案:以乌东德混合直流工程为例[J].科学技术与工程,2025,25(18):7659-7667.

Wu Chuanjian, Li Congcong, Hou Yanqi, et al. Single-ended protection scheme for hybrid DC transmission lines considering boundary re-refraction coefficients:taking the Wudongde Hybrid DC Project as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(18): 7659-7667.

考虑边界折射系数的混合直流输电线路单端保护方案:以乌东德混合直流工程为例

武传健^{1,2}, 李聪聪^{1,2}, 侯延琦^{1,2}, 张岩^{1,2}, 张晓东^{1,2}, 张大海³

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 济南 250002; 2. 山东省智能电网技术创新中心, 济南 250001;

3. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要 混合直流输电系统存在边界元件不统一、故障响应特性不一致、高阻故障影响难解决和近端故障识别准确率低等问题,降低了保护方案的可靠性。为此,分析了混合直流输电系统的区域折射系数相位特征,并据此提出了一种适合混合边界的单端保护方案。首先,建立混合直流输电系统模型,解析不同故障类型的行波传递特征;随后,划分混合直流输电系统故障区域,分别推导区域的折射系数表达式及其相频特征;最后,提出基于特定频率折射系数的单端保护方案并进行性能测试。测试结果表明,所提保护方案具备传统保护方案的快速性外,具备更好的耐高阻故障、噪声干扰等能力。

关键词 混合直流输电; 线路保护; 单端保护; 近端故障; 故障电阻; 折射系数

中图分类号 TM774; **文献标志码** A

Single-ended Protection Scheme for Hybrid DC Transmission Lines Considering Boundary Re-refraction Coefficients: Taking the Wudongde Hybrid DC Project as an Example

WU Chuan-jian^{1,2}, LI Cong-cong^{1,2}, HOU Yan-qi^{1,2}, ZHANG Yan^{1,2}, ZHANG Xiao-dong^{1,2}, ZHANG Da-hai³

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China; 2. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China; 3. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

[Abstract] The hybrid DC transmission system has problems such as inconsistent boundary components, inconsistent fault response characteristics, difficult resolution of high resistance fault effects, and low accuracy in identifying near end faults, which reduces the reliability of protection schemes. Therefore, the phase characteristics of the regional refractive index of the hybrid DC transmission system were analyzed for the first time, and a single ended protection scheme suitable for hybrid boundaries was proposed based on this. Firstly, establish a hybrid DC transmission system model and analyze the traveling wave transmission characteristics of different fault types. Subsequently, the fault areas of the hybrid DC transmission system were divided, and the refractive index expressions and phase frequency characteristics of the areas were derived separately. Finally, a single ended protection scheme based on a specific frequency refractive index is proposed and its performance is tested. The test results show that the proposed protection scheme not only has the speed of traditional protection schemes, but also has better resistance to high impedance faults, noise interference, and other abilities.

[Keywords] hybrid DC transmission; line protection; single-ended protection; near-end fault; fault resistance; refraction factor

近年来,直流输电技术凭借着其容量大、距离远的特点在电网建设中受到了更多的重视。混合直流输电技术有效解决了多直流馈入的问题,可以实现远距离、大容量的多端电能输送^[1-2]。目前中国已建成的昆柳龙特高压直流工程——乌东德电站送电广东广西特高压多端直流示范工程采用的是±800 kV 三端混合直流技术^[3-4]。混合多端直流

输电系统具有极为广阔的工程应用前景,但目前仍采用传统保护方案。

传统直流系统的保护方案可分为基于时域分析和基于频域分析两种^[5]。基于时域分析的行波保护方案通过检测电压微分、变化量和电流梯度进行故障识别^[6-7]。然而,此类保护方案存在近距离故障难检测、耐故障电阻和干扰能力差等问题。为改善此类保

收稿日期:2024-07-10 修订日期:2025-03-19

基金项目:国网山东省电力公司科技项目(520626230105);国家重点研发计划(2023YFB2407200)

第一作者:武传健(1994—),男,汉族,山东济宁人,博士,工程师。研究方向:直流系统继电保护。E-mail:19117032@bjtu.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

护方案的性能,文献[8-9]分别提出了自适应行波保护方案和基于电压、电流变化量乘积的保护方案,较大的增强了保护方案的耐故障电阻能力。基于时域的保护方案原理简单且易于实现,但存在抗干扰能力差的问题。为保证系统的安全运行,以电流差动保护为代表的后备保护方案被用于直流线路的高阻故障。然而,电流差动保护易受分布电容电流的影响,其可靠性存疑^[10]。基于频域的保护方案多利用区内、外故障信息的频率差异构造保护原理。直流输电系统存在限流电抗器和直流滤波器等边界元件。此类边界元件对高频信号的衰减作用和对波形的平滑作用使得区内、外故障信息出现较大的差异^[7,11]。文献[12]利用直流滤波器和限流电抗器两侧的高频能量进行故障识别,充分利用了边界元件的特性。基于频域的保护方案多利用小波变换等数学工具提取差异频率信息构造故障识别判据^[13-14]。然而,这些数学工具自身存在延时,影响了保护的速动性。另外,上述基于频域的保护方案依赖于强边界元件及其衰减的统一性^[15]。

目前,关于混合直流输电系统的保护方案研究较少。文献[16]利用初始行波相位特征建立单端保护方案,文献[17]则加入了基于行波低频相位特征的雷击干扰判据。考虑故障处理方式,文献[16-17]将两条线路均认定为区内故障,即任意故障均闭锁三端换流器,此类处理方式适用于不含直流断路器的系统,存在一定局限性。文献[18]推导分析了三端混合直流输电系统的测量波阻抗表达式及其故障特征,建立了双端保护方案。该方案依赖双端量信息,增加了近端故障识别率,但也增加了通信时间。文献[19]在柔性直流系统中分析了折射系数的幅值特征,建立了柔直系统的双端保护方案。

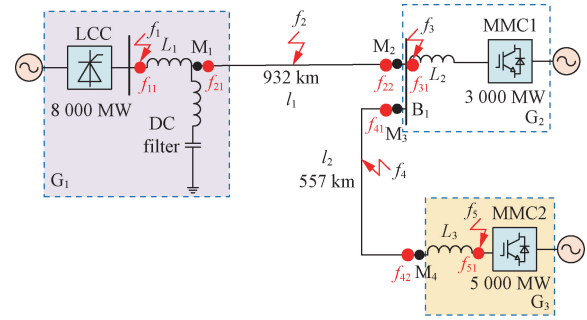
基于此,现进一步分析混合直流输电系统折射系数的故障特征,力求建立不受故障电阻影响、可识别近端故障、不需要通讯的单端保护方案。

1 混合直流系统折射过程分析

1.1 模型及折射系数

三端混合直流输电系统的拓扑结构如图1所示,系统详细参数列于表1中。送端LCC换流器,受端MMC换流器的结构,使得该系统具备长输电能力的同时,不存在换相失败的风险^[20]。保护装置的测量点 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 分别配置在线路 l_1 和线路 l_2 的两侧。LCC换流器侧出口配有平波电抗器(L_1)和直流滤波器。MMC1和MMC2的出口配有限流电抗器(L_2 和 L_3)。 f_1 、 f_3 、 f_5 代表区外故障, f_2 和 f_4 表示区内故障, f_{11} 、 f_{21} 、 f_{22} 、 f_{31} 、 f_{41} 、 f_{43} 、 f_{51} 表示近端故障。

行波在波阻抗不连续的位置发生折反射现象^[19],



DC filter 为直流电感器; G_1 、 G_2 、 G_3 为存在阻抗不连续性的位置划分区域

图1 三端混合直流输电系统简化模型

Fig. 1 Simplified model of three-terminal hybrid DC transmission system

表1 模型主要参数

Table 1 Main parameters of the model

元件	LCC	MMC1/MMC2
$L_1/L_2/L_3/\text{mH}$	150	100/75
DC filter	12/24; 1 μF /4.524 μF / 23.419 mH/11.683 mH	12/36; 1 μF /1.876 μF / 12.923 mH/22.69 mH
线路等值电阻/($\text{m}\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	39.6	39.6
线路等值电感/($\text{mH} \cdot \text{km}^{-1}$)	0.847	0.847
线路等值电导/($\mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$)	0.001	0.001
线路等值电容/($\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$)	0.012 97	0.012 97
桥臂等值电感/mH	—	50/26.7
桥臂等值电阻/ Ω	—	3.84
桥臂等值电容/ μF	—	245.9/368.8

其中进入波阻抗不连续位置前的行波为入射波、经过波阻抗不连续位置的行波为折射波,折射波和入射波的比值为折射系数。故折射系数由阻抗不连续位置的状态决定。

首先,将极电压转换为模电压。分别定义 u_p 和 u_n 为正极电压和负极电压,则线模电压(u_1)和零模式电压(u_0)的计算公式为

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_p \\ u_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

随后,利用线模电压计算前行波和反行波。将前行波和反行波分别定义为 S_1 和 S_2 ,其计算公式为

$$\begin{cases} S_1 = \frac{1}{2}(u_1 + Z_c i_1) \\ S_2 = \frac{1}{2}(u_1 - Z_c i_1) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: Z_c 为线路波阻抗; i_1 为线模电流。

最后,利用前行波和反行波计算折射系数为

$$\alpha = 1 + \frac{S_1}{S_2} \quad (3)$$

1.2 正向故障

图1中正向故障(f_2 和 f_4)的行波传输过程如图2

所示。考虑彼得逊法则的先决条件是反射波第二次到达测量点之前,因此未考虑的行波过程用虚线表示。以 f_2 故障为例,行波由故障点开始向两侧测点传播。反行波1通过LCC产生折射波2,反向行波3通过MMC1产生折射波4,折射波4继续传输至MMC2产生折射波5。其他正向故障的分析方式相同,不再赘述。

定义 M_1 处的折射系数为 α_{lcc} , M_2 和 M_3 处的折射系数分别为 α_{MMC12} 和 α_{MMC13} , M_4 处的折射系数为 α_{MMC2} 。由行波传输过程可知,正向故障时,各保护装置可在彼得逊法则生效时间内测得折射系数,且该系数同装置背侧区域相关(G_1 、 G_2 、 G_3)。

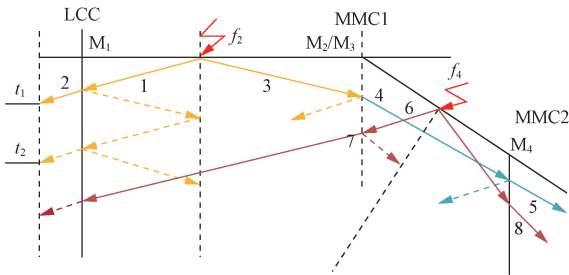


图2 正向故障行波的传输过程
Fig. 2 Transmission process of traveling wave during forward fault

1.3 反向故障

图1中区外故障的行波传输过程如图3所示。仍以彼得逊法则为前提,决定折射系数的行波如实线所示,其他行波如虚线所示。以线路 l_1 的反向故障 f_1 为例,行波由故障点抵达测点 M_1 ,随后通过线路 l_1 抵达 M_2 。此时, M_1 处只存在前行波(虚线部分),不存在反向行波。依据定义,此时折射系数计算公式的分母为0,即 M_1 不存在折射系数。随着反行波1和前行波3的到来, t_2 时间后,测点 M_1 和 M_2 可以测得折射系数,但此时的折射系数不在本文探讨范围内。分析可得结论,反向故障时,各保护装置无法在彼得逊法则生效时间内测得折射系数。

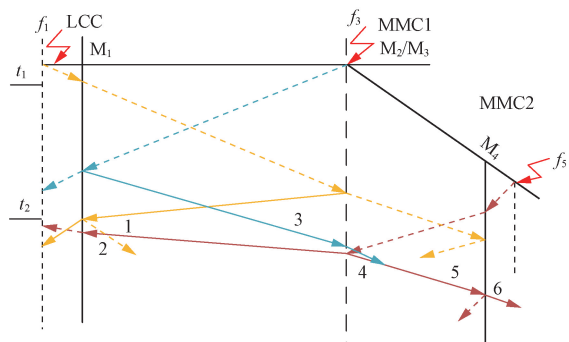


图3 反向故障行波的传输过程
Fig. 3 Transmission process of traveling wave during reverse fault

前文分析表明,正向故障和反向故障的折射系数存在差异性,借此可识别正向故障和反向区外故障。实际上,正向区内、外故障的识别是此类方案最大的难点。如图3所示, f_1 故障可以看作 M_2 的正向故障,其传输特征同 f_2 的差异为:故障行波需穿越 G_1 区域,此时, f_1 故障和 f_2 故障的折射系数存在区别。

2 表达式推导及特征分析

前文分定性分析了不同故障的行波传输特性和折射系数差异。本节将推导折射系数的表达式,并定量分析其故障特征,以求建立起无需方向元件的可靠判据。

2.1 区域 G_1

首先,推导 M_1 测点的 α_{lcc} 的表达式。依据其传输过程可知其同区域 G_1 息息相关,依据彼得逊法则建立其等效电路如图4所示。

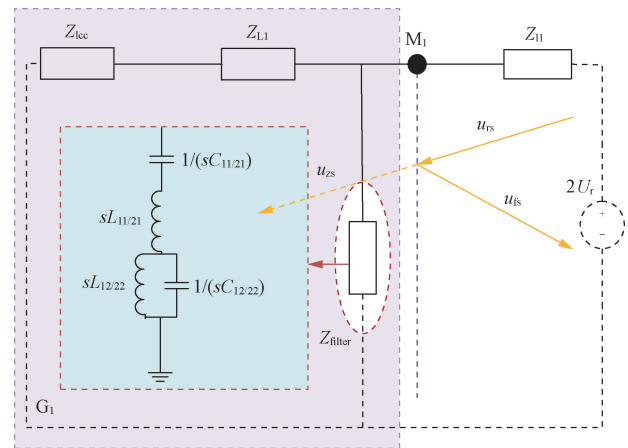
区域 G_1 包括LCC换流器、平波电抗器和直流滤波器。依据图4可得彼得逊等效电路。其中,直流滤波器包括电感($L_{11/21}$ 和 $L_{12/22}$)和电容($C_{11/21}$ 和 $C_{12/22}$)。由于LCC换流器在暂态电路中的等效阻抗远小于平波电抗器的波阻抗,因此可以忽略 Z_{lcc} 。

由于电压行波和电流行波的折、反射原理相同,此处以电压行波为例。折射系数 α_{lcc} 的表达式为

$$\alpha_{lcc} = \frac{u_{zs}}{u_{rs}} = \frac{2(Z_{L1} \parallel Z_{filter})}{Z_{L1} \parallel Z_{filter} + Z_{l1}} \quad (4)$$

$$Z_{filter} = \frac{1}{sC_{11/21}} + sL_{11/21} + sL_{12/22} \parallel \frac{1}{sC_{12/22}} \quad (5)$$

式中: u_{rs} 、 u_{fs} 和 u_{zs} 分别为入射波、反射波和折射波。



Z_{lcc} 为LCC换流器的等效阻抗; Z_{L1} 为平波电抗器的等效阻抗;
 Z_{l1} 为 l_1 线路的波阻抗; Z_{filter} 为直流滤波器的等效阻抗

图4 区域 G_1 的彼得逊等效电路

Fig. 4 Peterson equivalent circuit of region G_1

对式(1)进行化简可得

$$\alpha_{\text{Icc}} = \frac{2}{1 + \frac{\sqrt{(r_a + sl_a)/(g_a + sc_a)}}{sL_1 \parallel [1/sC_{l1/21} + sL_{l1/21} + sL_{l2/22} \parallel (1/sC_{l2/22})]}} \quad (6)$$

式(6)中: r_a 、 l_a 、 g_a 和 c_a 分别为线路 l_1 的电阻、电感、电导和电容。

将表1的详细参数代入式(3),可以得到 α_{Icc} 的相频特性如图5所示。从图5可知, α_{Icc} 在20~80 Hz时相角为 $85^\circ \sim 87.2^\circ$ 。随后,相角随频率的增高而降低至 0° ,此时的 α_{Icc} 幅值为2,意味着该频率信息无法穿过区域 G_1 。

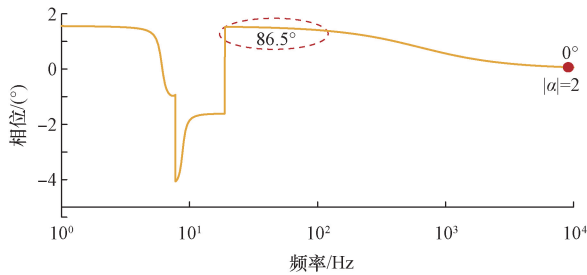


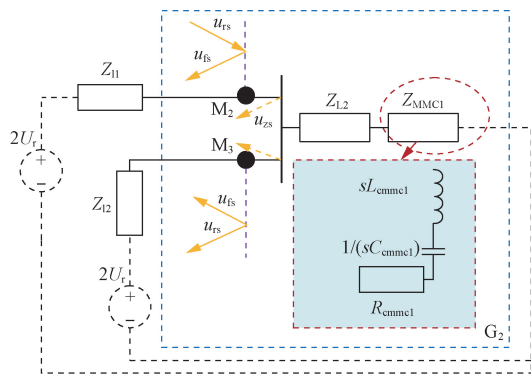
图5 α_{Icc} 的相频特征

Fig. 5 Phase frequency characteristics of α_{Icc}

2.2 区域 G_2

与区域 G_1 不同,区域 G_2 存有二个测点 M_2 和 M_3 。依据行波传输过程及彼得逊法则,区域 G_2 的故障等值电路如图6所示。图6表明,电压行波由 l_1 折射至 l_2 和由 l_2 折射至 l_1 的机制相同。考虑两条线路模型参数一致, M_2 和 M_3 的等值电路相同。则 α_{MMC12} 和 α_{MMC13} 的表达式为

$$\alpha_{\text{MMC12}} = \frac{2(Z_{l2} + sL_{\text{cmmc1}} + R_{\text{cmmc1}} + 1/sC_{\text{cmmc1}}) \parallel Z_{l2}}{(Z_{l2} + sL_{\text{cmmc1}} + R_{\text{cmmc1}} + 1/sC_{\text{cmmc1}}) \parallel Z_{l2} + Z_{l1}} \quad (7)$$



Z_{l2} 为线路 l_2 的波阻抗; Z_{l2} 为限流电抗器 l_2 的等效阻抗; Z_{MMC1} 为MMC1的等效阻抗, Z_{MMC1} 包括电感(L_{cmmc1})、电容(C_{cmmc1})和电阻(R_{cmmc1})

图6 区域 G_2 的彼得逊等值电路

Fig. 6 Peterson equivalent circuit of region G_2

$$\alpha_{\text{MMC13}} = \frac{2(Z_{l2} + sL_{\text{cmmc1}} + R_{\text{cmmc1}} + 1/sC_{\text{cmmc1}}) \parallel Z_{l1}}{(Z_{l2} + sL_{\text{cmmc1}} + R_{\text{cmmc1}} + 1/sC_{\text{cmmc1}}) \parallel Z_{l1} + Z_{l2}} \quad (8)$$

将表1参数代入式(5)可获得 α_{MMC12} 和 α_{MMC13} 的相频特性,如图7所示。从图7可知,随着频率的增高, α_{MMC12} 和 α_{MMC13} 的相位变化过程为: 0° 降低至 -51.5° ,增高至 51.5° ,降低至 0° 。其中9.8 Hz处的相位为 0° ,此时 α_{MMC12} 和 α_{MMC13} 的幅值为2。

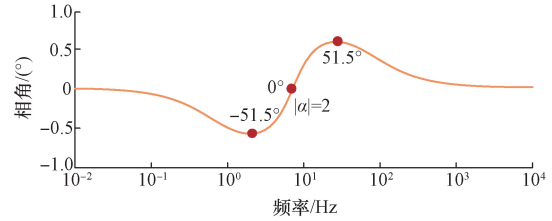


图7 α_{MMC12} 和 α_{MMC13} 的相频特征

Fig. 7 Phase frequency characteristics of α_{MMC12} and α_{MMC13}

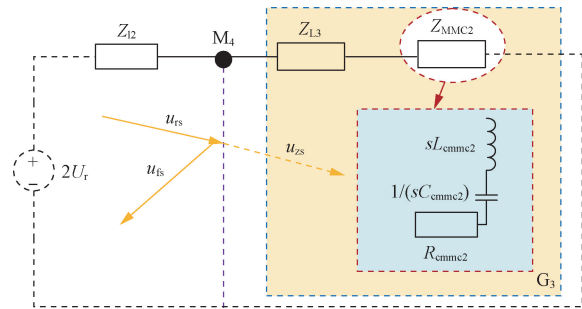
2.3 区域 G_3

区域 G_3 的行波传输机制与LCC侧相同,但组成存在较大差异。入射波 u_{rs} 从 l_2 传播到MMC2时,反射波 u_{rs} 返回 l_2 ,并且折射波 u_{zs} 进入MMC2换流器。区域 G_3 的等值电路如图8所示。

α_{MMC2} 的表达式为

$$\alpha_{\text{MMC2}} = \frac{2\left(Z_{l3} + sL_{\text{cmmc2}} + R_{\text{cmmc2}} + \frac{1}{sC_{\text{cmmc2}}}\right)}{Z_{l3} + sL_{\text{cmmc2}} + R_{\text{cmmc2}} + \frac{1}{sC_{\text{cmmc2}}} + Z_{l2}} \quad (9)$$

同理,将表1中的参数代入式(6)可以获得的相频特性如图9所示。随着频率增大, α_{MMC2} 的相位变化过程为: -43° 增大至 72° ,降低至 0° ,此时 α_{MMC2} 的幅值为2。



Z_{l2} 为 l_2 的波阻抗; Z_{l3} 为限流电抗器 l_3 的等效阻抗;

Z_{MMC2} 为换流器MMC2的等效阻抗

图8 区域 G_3 的彼得逊等值电路

Fig. 8 Peterson equivalent circuit of region G_3

2.4 区域特性总结

依据前文分析可知,折射系数存在以下特性:

(1)反向区外故障时,彼得逊法则运行时间内

只存在前行波,此时折射系数的相位取决于前行波的相位。依据文献[16],高于1 kHz后,行波相位为0°。

(2)正向区内故障时,彼得逊法则允许时间内可测得折射系数。此时折射系数的相位由图5、图7和图9选取。

(3)正向区外故障时,行波过3个区域(G₁、G₂、G₃),特定频率下区域存在折射系数幅值为2的情况。此频率下,测点无法获取行波信号,折射系数幅值和相位均为0。

综上,三端混合直流输电系统的折射系数故障特性如表2所示。

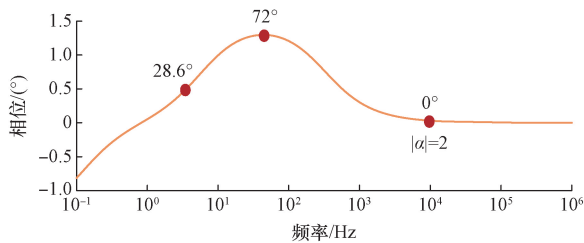


图9 α_{MMC2} 的相频特征

Fig. 9 Phase frequency characteristics of α_{MMC2}

表2 折射系数的故障特征

Table 2 Fault characterization of refraction coefficient

测点	参数	反向	正向	
			区内	区外
M1	频率/Hz	> 1 000	20 ~ 100	9.8
	相位/(°)	0	86.5	0
M2、M3	频率/Hz	> 1 000	5 ~ 50	9.8
	相位/(°)	0	± 51.5	0
M4	频率/Hz	> 1 000	10 ~ 1 000	9.8
	相位/(°)	0	> 28.6	0

3 保护方案

3.1 启动元件

本文中选取极电流构造启动元件^[10],其具体判据为

$$|i_{\Delta}| > k_{set} I_n \quad (10)$$

式(10)中: i_{Δ} 、 I_n 和 k_{set} 分别为极电流、额定电流和阈值。

阈值的设置原则是线路发生最小方式下故障时,保护可以快速启动。一般认为扰动和故障的分界点为前后电流差为0.1倍的额定电流^[19,21],故本文设置阈值为1.1。

3.2 识别元件

依据折射系数的故障特性可知,三端混合直流输电系统区内故障时,总存在特定频率的折射系数相位为固定值。反向区外故障时,折射系数在彼得

逊法则时间内不存在,相位为0°。正向区外故障时,总存在特定频率的折射系数相位为0°。因此,本文以折射系数的相位为特征值,建立单端保护方案的故障识别判据为

$$\begin{cases} \text{反向区外: } |\alpha_{ph. (>1kHz)}| < k_{set1} \\ \text{正向区内: } 0.9k_{set2} < |\alpha_{ph. (M1 \setminus M2 \setminus M3 \setminus M4)}| < 1.1k_{set2} \\ \text{正向区外: } |\alpha_{ph. (9.8Hz)}| < k_{set1} \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: $\alpha_{ph. (>1kHz)}$ 、 $\alpha_{ph. (9.8Hz)}$ 和 $\alpha_{ph. (M1 \setminus M2 \setminus M3 \setminus M4)}$ 分别为该频率下的折射系数相位,其中 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 代表4个测点的频率,分别取值为20~100 Hz、5~50 Hz、5~50 Hz、10~1 000 Hz。

考虑实际情况各类影响因素,设置阈值分别为 k_{set1} 和 k_{set2} ,其中 k_{set1} 取为5°。而 k_{set2} 则针对4个测点分别取值,依次取86.5°、51.5°和28.6°,其中 α_{M2} 、 α_{M3} 相同。此阈值只需要系统参数即可计算,不依赖于仿真获取。

综上,所提单端保护方案的详细流程如图10所示。

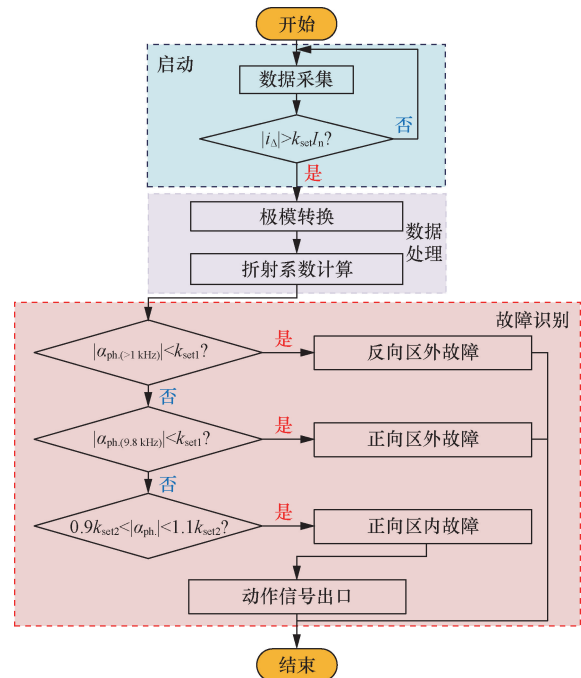


图10 保护方案的处理流程

Fig. 10 Processing process of protection scheme

3.3 提取算法及动作时间

采用基于小波变换的折射系数计算方法^[21]。小波变换响应于信号在相应位置的变化率,而小波变换模极大值与信号的突变点一一对应。利用三次中心B样条小波函数处理行波电压。设前行波和反行波的小波变换模极大值分别为 $XS_1 \angle XS_1$ 和 $XS_2 \angle XS_2$,则折射系数计算公式为

$$\alpha = 1 + \frac{XS_1 \angle XS_1}{XS_2 \angle XS_2} \quad (12)$$

式(12)中:相位 $\angle XS_1$ 和相位 $\angle XS_2$ 的差即为折射系数的相位。

由于所提方案只需要使用单端测量信号,因此不存在数据传输时间。故动作时间主要由启动元件时间、数据窗时间和算法计算时间组成。启动元件时间和采样频率相关,以10 kHz为例,启动元件连续两次判断的时间为0.3 ms。以继电保护装置目前的芯片计算能力,数据算法的动作时间不超过0.1 ms^[18,22]。

数据窗的选择是关键因素。4.1节和4.2节分析中存在一个重要前提,即彼得逊等效电路的存在时间要求。彼得逊法则要求,在故障发生的时刻和线路末端产生的反射波尚未到达线路头部的时刻之间,方可建立彼得逊等效电路。

因此,数据窗口(T)应满足以下条件^[19],即

$$T < \frac{2l}{v_1} \quad (13)$$

式(13)中: l 为线路 l_1 、 l_2 的长度; v_1 为行波的传输速度,其近似于光速(300 000 km/s)。将最短线路的长度代入,可得数据窗的最大时间为3.71 ms。

综上所述,保护方案的最大动作出口时间不超过4.11 ms。考虑直流系统对故障的冲击耐受度较小,本文选择2 ms的数据窗,动作出口时间为2.4 ms。

4 仿真验证

为验证保护方案的正确性、可靠性,进行了不同情景下的保护性能测试,包括:验证保护方案是否能够准确识别区内外故障的正确性测试;验证保护方案对故障电阻、故障距离、噪声、采样频率等因素的可靠性测试。

4.1 正确性

首先,以LCC侧的 M_1 为例,分别设置不同的故障区域(f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5),提取此时的前行波和反行波,仿真结果如图11所示。

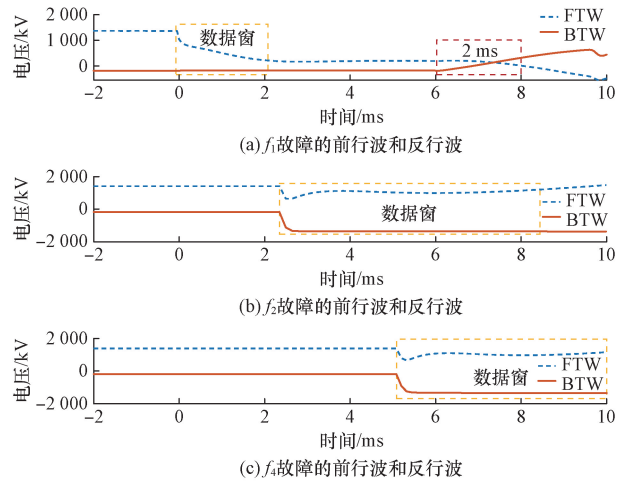
图11(a)代表故障 f_1 ,即 M_1 的反向区外故障。可以看出,在数据窗(0~2 ms)内, M_1 只可测到反行波,仿真验证了前文的理论分析。根据行波折射过程,第一个折射波只有在前行波抵达 M_2 并返回 M_1 后才能产生,即 $2l_1/v_1 = 6.21$ ms。因此,图11(a)中,LCC侧边界的折射系数真实数据窗为6~8 ms。但是,该数据窗已经错过了所提方案的数据窗。

图11(b)和图11(c)分别代表 f_2 故障和 f_4 故障的仿真结果,两种故障在数据窗内均存在前行波和

反行波。利用图11数据窗的数据提取折射系数相位,结果如图12所示。

图12(a)表示反向区外故障 f_1 ,其在数据窗中的折射系数远高于2,表明折射系数不存在,此时其相位小于 1° 。图12(b)表示区内故障的仿真结果,其中行波在故障后1.5 ms到达 M_1 ,此时折射系数相位在20~100 Hz表现为 -90° ,保护方案可以正确动作。图12(c)表示正向区外故障。由于故障距离长于区内故障,故障行波3 ms内到达 M_1 。数据窗内存在折射系数,但1 Hz的折射系数几乎为0。计算此时的折射系数相位,得到相位结果小于 1° 。结果表明,正向区外故障时,保护方案不会动作。

图1中所有故障的测试结果列于表3中,结果表明所提方案仿真条件下可以准确识别区内外故障。



FTW 为前行波;BTW 为反行波
图 11 LCC 侧不同故障的前、反行波

Fig. 11 Forward and backward traveling wave for internal and external faults on the LCC side

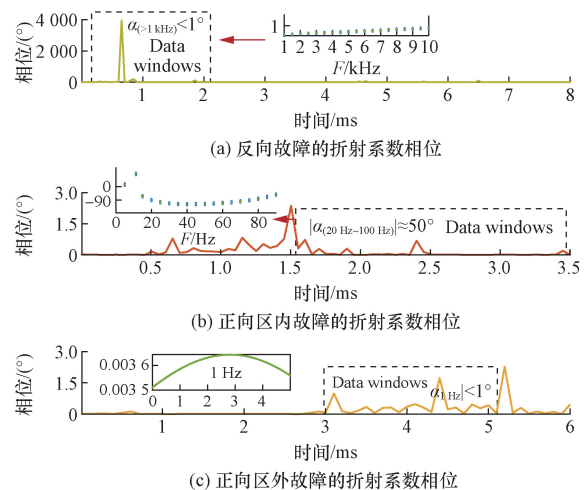


图 12 不同故障时折射系数相位的测试结果

Fig. 12 Test results of refractive phase under different faults

表3 不同故障的正确性测试结果

Table 3 Fault characterization of refraction coefficient

故障位置	相位/(°)			
	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
f ₁	0.18	0.71(1)	—	—
f ₂	91.0	54.1	—	—
f ₃	0.34(1)	0.71	0.03	0.67(1)
f ₄	—	—	50.0	27.0
f ₅	—	—	0.11(1)	0.65

注:括号内数值表示在1 Hz时。

4.2 可靠性

4.2.1 故障电阻和故障距离

从公折射系数表达式[式(1)~式(6)]可以看出,该表达式与故障电阻无关。因此,折射系数天然具备耐故障电阻能力,这种能力正是传统行波保护所缺乏的。此外,单端保护的方案是其性能的重要指标。因此,故障距离也是单端保护需要考虑的一个因素。为测试所提出的保护方案的耐故障电阻和距离的能力,设置了不同故障情景,其仿真结果如图13所示。从图13可知:区内故障时(0~900 km),折射系数相位约为90°,而区外故障时,折射系数相位均接近于0°。

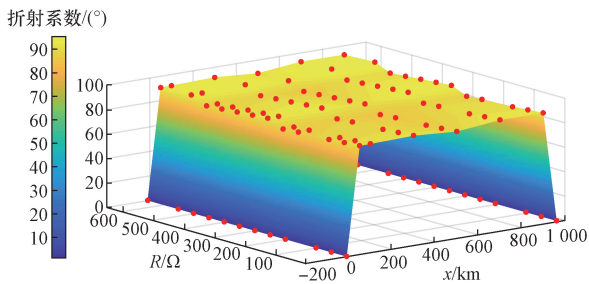


图13 不同故障电阻、距离的测试结果

Fig. 13 Test results of different fault resistances and distances

4.2.2 噪声

信噪比可以反映信号中的噪声含量^[23]。以f₂故障为例,对其行波电压施加10~30 dB的白噪声,波形如图14所示。信噪比从10 dB增加到30 dB,信号中的噪声越来越小。可以看出,随着噪声的增加,图14中的行波信号与原始信号的偏差越来越大。

对含噪声行波电压计算折射系数相位,测试结果如图15所示。图15(b)和图15(c)所示为20 dB和30 dB噪声的相位在20~100 Hz均处于阈值范围内。但图15(a)所示的10 dB仿真结果显示,100 Hz噪声的相位接近于50°,此时保护拒动。分析表明,10 dB时小波变换对行波数据的提取出现误差,以至于无法准确获取其折射系数的相位。所提方案只能接受20 dB以上的噪声信号。

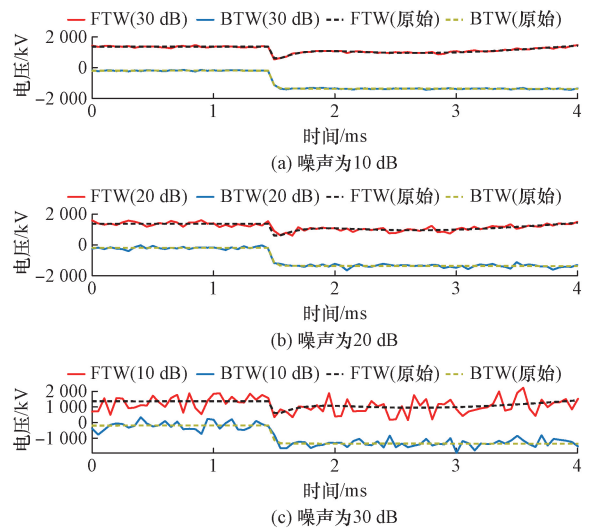


图14 含噪声的行波电压

Fig. 14 Traveling wave voltage with noise

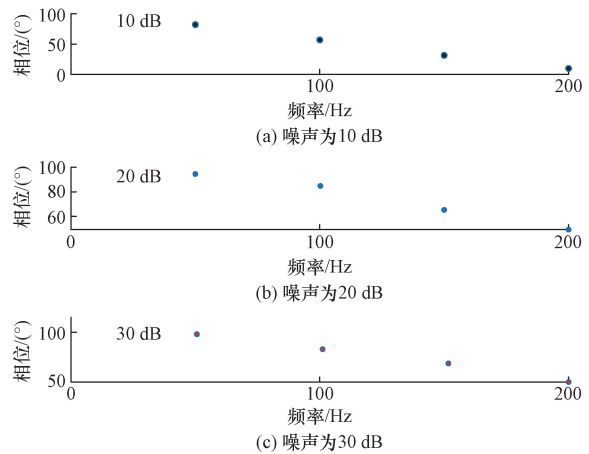


图15 含噪声的折射系数相位

Fig. 15 Phase of refraction coefficients with noise

4.2.3 采样频率

折射系数的计算需要精确的行波信号分辨率。因此,近端故障对采样频率的要求较高。以10 km为例,由行波速度(300 000 km/s)和故障距离(10 km)计算,此时最低采样频率应为33 kHz。若需分析0~10 km的故障,需要更高的采样频率。

为验证上述分析,不同的采样频率测试结果如表4所示。表4中的结果表明,若计算10 km的折射

表4 采样频率的测试结果

Table 4 Test results of sampling frequency

采样频率/kHz	不同故障距离(km)的折射系数/(°)			
	10	20	30	40
10	∞	∞	∞	85.3
20	∞	∞	∞	80.0
30	∞	91.2	85.1	86.5
40	∞	79.9	89.7	86.5
50	85.0	90.0	90.0	86.5

系数表达式,需要最低 50 kHz 的采样频率。显然,实际应用中,采样频率的需求高于其理论值。

4.2.4 性能对比

目前,直流输电工程采用单端行波保护方案作为主保护,包括西门子和 ABB 直流线路行波保护^[24-26],保护判据为

$$\text{西门子} \begin{cases} du/dt > \Delta_1 \\ \Delta u > \Delta_2 \\ \Delta i > \Delta_3 (\text{整流侧}) \\ \Delta i < \Delta_4 (\text{逆变侧}) \end{cases} \setminus \text{ABB} \begin{cases} \Delta P_i > \Delta_5 \\ dP_i/dt > \Delta_6 \\ \Delta G_{\text{wav}} > \Delta_7 \\ dG_{\text{wav}}/dt > \Delta_8 \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中: u 、 i 、 P 和 G_{wav} 分别为电压、电流、极波和地模波; $\Delta_1 \sim \Delta_8$ 分别为阈值。

已有文献^[1,7-8]已经对传统单端行波保护的适应性进行了大量分析,本文研究只从噪声、故障电阻、故障距离、动作时间、采样频率 5 个维度对比性能,结果如图 16 所示。结果表明,所提方案综合性能高于现有行波保护。

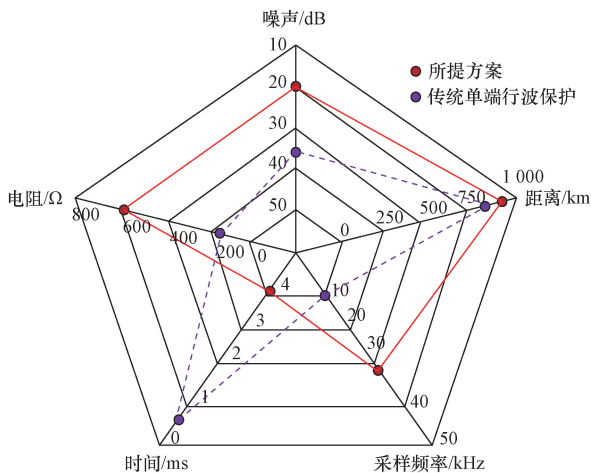


图 16 性能对比结果

Fig. 16 Performance comparison results

5 结论

为保证三端混合直流系统的可靠性,提出了一种基于折射系数相位特征的单端量保护方案。推导三端混合直流系统折射系数的表达式,并分析了其故障特征。区内故障时特定频率的折射系数相位为固定值,而区外故障时特定频率的折射系数相位不存在。据此特征,建立了区内外故障识别判据。本文研究的主要贡献如下。

(1) 推导了混合边界的三端直流系统折射系数表达式,并解析了其故障特征。

(2) 较其他方案,利用混合边界的折射系数相频特征判据的方案只需单端折射系数,无需通讯。

(3) 较其他方案,所提方案具备更好的近端故障识别能力和抗干扰能力。

参考文献

- [1] 高淑萍, 吕宇星, 宋国兵, 等. 基于暂态电流相关系数的环状直流配电网保护方法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(12): 5084-5093.
Gao Shuping, Lü Yuxing, Song Guobing, et al. Protection scheme of ring-shaped DC distribution network based on transient current correlation coefficient [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(12): 5084-5093.
- [2] 张悦宁, 罗易萍, 洪妍妍. 基于多端口混合直流断路器的 LCC-VSC 混合多端直流输电系统故障清除方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 146-153.
Zhang Yining, Luo Yiping, Hong Yanyan. Multi-port DC circuit breaker-based fault clearing scheme for LCC-VSC hybrid multi-terminal HVDC system [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 146-153.
- [3] 贾科, 冯涛, 陈森, 等. LCC-MMC 型混合直流配电网线路保护方案[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 656-665.
Jia Ke, Feng Tao, Chen Miao, et al. Line protection scheme for hybrid LCC-MMC type DC distribution system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 656-665.
- [4] 贺永杰, 向往, 周家培, 等. LCC-MMC 串联型混合直流输电系统小信号建模[J]. 电工技术学报, 2021, 36(3): 1492-1506.
He Yongjie, Xiang Wang, Zhou Jiawei, et al. Small-signal modeling of LCC-MMC series hybrid HVDC transmission system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(3): 1492-1506.
- [5] 张文嘉, 王荃荃, 李海坤, 等. 基于对称双极接线的全桥型 MMC-HVDC 直流侧短路故障穿越控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 147-154.
Zhang Wenjia, Wang Quanquan, Li Haikun, et al. DC short circuit fault ride-through method based on symmetrical bipolar FBSM-MMC HVDC system [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 147-154.
- [6] 李海峰, 赵洪峰, 曹培芳, 等. 考虑土壤电阻率的特高压直流输电线路过电压抑制措施[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(21): 9100-9106.
Li Haifeng, Zhao Hongfeng, Cao Peifang, et al. Study on the influence of soil resistivity on overvoltage of UHVDC transmission line and its suppression measures [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(21): 9100-9106.
- [7] 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.
- [8] 郑伟, 武霖阳, 李海峰, 等. 特高压直流线路自适应行波保护[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1995-2001.
Zheng Wei, Wu Jiyang, Li Haifeng, et al. Research on adaptive travelling wave based protection for UHVDC transmission line [J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1995-2001.
- [9] Wang J P, Berggren B, Linden K, et al. Multi-terminal DC system line protection requirement and high speed protection solutions

- [C]// GIGRE Session. New York: CIGRE, 2015: 109-114.
- [10] 李猛. 柔性直流配电网保护研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
Li Meng. Study on protection of VSC-DC distribution system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [11] Liu J, Tai N L, Fan C J. Transient-voltage-based protection scheme for DC line faults in the multiterminal VSC-HVDC system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1483-1494.
- [12] 杨亚宇, 邵能灵, 刘剑, 等. 利用边界能量的高压直流线路纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5757-5767.
Yang Yayu, Tai Nengling, Liu Jian, et al. A pilot protection scheme for HVDC transmission lines based on boundary energy [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5757-5767.
- [13] Li R, Xu L, Yao L Z. DC fault detection and location in meshed multiterminal HVDC systems based on DC reactor voltage change rate[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1516-1526.
- [14] Xiang W, Yang S, Xu L, 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.
- [15] Li B, Li Y, He J, et al. A novel single-ended transient-voltage-based protection strategy for flexible DC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(5): 1925-1937.
- [16] 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): 4525-4543.
Liang Yuansheng, Huang Zejie, Li Haifeng, et al. Phase characteristics based travelling wave protection for transmission line for three-terminal hybrid HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13): 4525-4543.
- [17] 戴志辉, 牛宝仪, 邱宏逸, 等. 基于初始电流行波相位的多端混合直流线路单端保护方案[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 649-659.
Dai Zhihui, Niu Baoyi, Qiu Hongyi, et al. Single-ended protection scheme for multi-terminal hybrid DC lines based on initial current traveling wave phase[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 649-659.
- [18] 公冶令姣, 张大海, 武传健, 等. 基于测量波阻抗相位特征的三端混合直流线路纵联保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 1-13.
Gongye Lingjiao, Zhang Dahai, Wu Chuanjian, et al. Pilot protection of a three-terminal hybrid DC line based on phase characteristics of measured wave impedance[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 1-13.
- [19] 戴志辉, 秦昊宇, 邱宏逸, 等. 基于电压行波折射系数的柔性直流电网线路纵联保护[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4676-4691.
Dai Zhihui, Qin Haoyu, Qiu Hongyi, et al. Line pilot protection of flexible DC grid based on voltage traveling-wave refraction coefficient [J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4676-4691.
- [20] 高淑萍, 李元泽, 宋国兵, 等. 基于暂态电流行波突变的LCC-MMC混合双极直流输电纵联方向保护[J]. 南方电网技术, 2024, 18(2): 21-29, 56.
Gao Shuping, Li Yuanze, Song Guobing, et al. Pilot directional protection for LCC-MMC hybrid bipolar DC transmission based on transient current traveling wave change [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(2): 21-29, 56.
- [21] 和敬涵, 韦智腾, 李猛, 等. 基于数字孪生的柔性直流线路保护中不良数据自纠错方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 141-152.
He Jinghan, Wei Zhiteng, Li Meng, et al. A self-correcting method for bad data in flexible DC line protection based on digital twinning [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 141-152.
- [22] 束洪春, 王广雪, 田鑫萃, 等. 基于随机矩阵理论的混合三端直流线路非单元式纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(19): 162-171.
Shu Hongchun, Wang Guangxue, Tian Xincui, et al. Non-unit pilot protection for hybrid three-terminal DC lines based on random matrix theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(19): 162-171.
- [23] 陈锋元, 韩昆仑, 张腾跃, 等. 基于VMD-SSA和多频段Hilbert能量的高压直流输电线路单端量保护方法[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(10): 4247-4258.
Chen Fengyuan, Han Kunlun, Zhang Tengyue, et al. Single-terminal protection method for HVDC transmission lines based on VMD-SSA and multi-band hilbert energy [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(10): 4247-4258.
- [24] 冉启胜, 张哲, 韩杰祥, 等. 基于改进动态时间弯曲距离算法的直流配电网线路纵联保护方案[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12): 157-164.
Ran Qisheng, Zhang Zhe, Han Jiexiang, et al. Pilot protection scheme for DC distribution network based on improved dynamic time warping distance algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 157-164.
- [25] 张文嘉, 王荃荃, 李海坤, 等. 基于对称双极接线的全桥型MMC-HVDC直流侧短路故障穿越控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 147-154.
Zhang Wenjia, Wang Quanquan, Li Haikun, et al. DC short circuit fault ride-through method based on symmetrical bipolar FBSM-MMC HVDC system [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 147-154.
- [26] 樊艳芳, 马翼飞. 基于行波电流极性差异的交直流混联系统纵联方向保护方法[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(10): 4132-4139.
Fan Yanfang, Ma Yifei. Longitudinal direction protection method of AC/DC hybrid system based on the difference in polarity of traveling wave current [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(10): 4132-4139.