

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231531

# 基于故障分量时频突变特征的海上风电直流升压 送出线路纵联保护

孙均磊, 贾科, 李再男, 张旻, 刘昊霖, 毕天姝

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

**摘要:** 直流汇集送出系统具有效率高、体积小和无需无功补偿等优点, 是未来远海风电场汇集送出的发展趋势。然而, 相较于陆上架空线, 送出海缆分布电容明显, 区外故障时, 长海缆分布电容电流使得线路两侧电流具有较大的差异, 从而易导致基于暂态量的传统纵联保护误动作。针对该问题, 提出基于故障分量时频突变特征的纵联保护原理。通过分析直流送出线路、换流器的暂态电流频率特征, 考虑区内外故障时两侧暂态故障电流的频段差异, 选择合适的保护应用频段。利用小波变换对故障电流进行时频变换, 通过 Wasserstein 距离构造区内外故障识别判据, 解决了区外金属或低阻故障时基于暂态时域量的纵联保护误动作问题。在半实物仿真平台(real-time digital simulation, RTDS)中搭建海上风电直流汇集送出系统模型, 对所提保护方案进行仿真验证。仿真结果表明, 所提保护方法能够可靠识别区内外故障, 保护动作时间小于 5 ms, 耐受过渡电阻达 300  $\Omega$ , 抗噪声能力达 20 dB。

**关键词:** 时频特征; Wasserstein 距离; 直流送出系统; 纵联保护

## Pilot protection for offshore wind power DC transmission lines based on the time-frequency mutation characteristics of fault components

SUN Junlei, JIA Ke, LI Zainan, ZHANG Yang, LIU Haolin, BI Tianshu

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources  
(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

**Abstract:** DC collecting and transmission systems will be the development tendency for future offshore wind farms because of the advantages of high efficiency, small size and no reactive power compensation. However, the distinct distribution capacitance of submarine cables, in contrast to overhead lines, can lead to significant differences in line currents during external faults, potentially causing false operation in traditional transient pilot protection. Addressing this problem, this paper proposes a pilot protection method using time-frequency mutations in fault components. This paper analyzes transient fault current frequency characteristics in DC transmission lines and converters taking into consideration the differences of frequency band of the transient fault current on both sides when internal and external faults occur, thereby selecting an appropriate frequency band for protection. Using wavelet transformation for time-frequency analysis of the fault current and employing Wasserstein distance, it develops criteria to distinguish internal and external faults. This removes the transient time-domain quantity-based pilot protection false action during external metallic or low-resistance fault. The offshore wind farms collecting and transmission system model is built on a real-time digital simulation (RTDS) platform to verify the proposed protection method. The results show that the proposed method effectively identifies fault locations and operates within 5 ms, with tolerance to transition resistances up to 300  $\Omega$  and noise resistance up to 20 dB.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277097).

**Key words:** time-frequency characteristics; Wasserstein distance; DC transmission system; pilot protection

## 0 引言

截至 2023 年 6 月底, 我国海上风电累计装机

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52277097); 国家电网总部科技项目资助(5100-202455005A-1-1-ZN)

3264 万 kW, “十四五”期间, 海上风电发电量将实现翻倍<sup>[1-2]</sup>。目前海上风电的开发正在“走向深远海”<sup>[3-5]</sup>, 海上风电直流汇集送出具有效率高、体积小、无需无功补偿等优点<sup>[6-7]</sup>, 适合海上风电远距离传输, 是未来远海风能开发利用的发展趋势之一<sup>[8-9]</sup>。远海风电直流送出系统中, 直流送出海缆发生

故障后,故障电流迅速增长<sup>[10]</sup>,严重危害送出系统关键设备,为避免扩大故障区域,亟需保护在故障暂态发展阶段迅速隔离故障。然而在区外故障时,现有基于暂态量直流送出线路纵联保护存在误动作的问题,为保障设备和系统安全,亟待提出新的纵联保护方法。

目前基于双端量测的直流送出线路保护分为行波纵联和暂态量纵联保护两类。针对行波纵联保护,由于故障高频信息在边界元件具有衰减特性,利用限流电抗电压频率比值<sup>[11]</sup>、能量积分<sup>[12]</sup>实现故障识别,此类保护依赖于边界元件。由于海上平台建设成本以及体积的问题<sup>[13]</sup>,海上送出系统仅陆上模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)侧设置限流电抗器,不存在明显边界元件,故障边界弱化,导致以上依赖边界元件的行波纵联保护方法无法应用。文献[14]提出基于故障前行波极值时间的双端量保护方法。理论上不依赖边界元件,但在近端故障时存在一定死区<sup>[15]</sup>;同时对采样设备要求高,采样频率可达数百 kHz<sup>[16]</sup>。综合可知,行波类纵联保护具有一定局限性。

相较行波保护,暂态量纵联保护方法采样频率在 10 kHz 以内,具有采样设备要求低的优点。对于暂态量纵联保护方法,部分专家提出利用限流电抗器两侧的暂态电压、能量差异识别故障<sup>[17-18]</sup>。此类保护同样依赖于边界元件。而差动保护受过渡电阻影响小,并通过增加延时躲开分布电容的影响,但降低了保护的速动性和灵敏性<sup>[19]</sup>。由于故障暂态阶段线路两侧故障电流具有明显的差异性,文献[20-21]提出利用两侧时域差异的波形相似度保护新原理,通过改变整定阈值减少线路分布电容对相似度保护的影响,但同样降低了保护的速动性和灵敏性。文献[22]提出利用送出线路两侧频率特征的相似度保护方法,适用于短线路而且并未计及线路的频带特征。由于海缆分布电容影响较大,其数值为架空线的 10~20 倍<sup>[23]</sup>,线路分布特征更加显著,发生区外故障时,暂态量保护存在区外误动作的情况<sup>[24]</sup>,因此针对以上问题提出新型保护原理。

本文针对现有双端量保护区外故障时存在的误动作问题,首先分析海上风电直流送出线路区内外故障的时频特征,利用小波变换提取故障时频突变特征,通过 Wasserstein 距离构造区内外故障识别判据。所提方法有效地解决了现有纵联保护区外故障时误动作的问题。在半实物仿真平台(real-time digital simulation, RTDS)中构建了海上风电全直流送出系统进行验证,结果表明所提保护方法能够在 5 ms 内识别区内外故障,保证区内故障时可靠动

作、区外故障时保护可靠不动作,充分验证了所提保护方法的有效性。

## 1 海上风电直流送出线路故障特征分析

### 1.1 海上风电直流汇集送出系统结构

图 1 为海上风电直流汇集送出系统,第一级、第二级直流变压器均采用并入串出双有源桥(dual active bridge, DAB)型<sup>[25]</sup>直流变压器(DC transformer, DCT)拓扑。参考如东工程海上风电限流电抗器设置方式,仅在陆上 MMC 侧设置限流电抗器。 $f_1-f_3$  为直流送出线路区内故障点,  $f_4、f_5$  为区外故障点。本文研究对象为二级 DCT 与 MMC 之间的直流送出海缆线路。

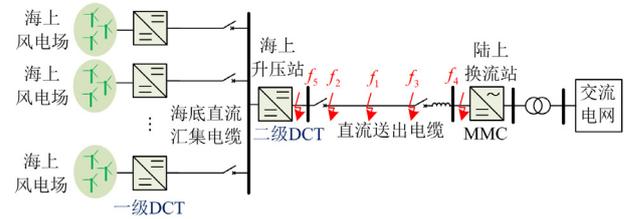


图 1 海上风电直流汇集送出系统示意图

Fig. 1 Diagram of offshore wind farm collecting and transmission system

### 1.2 海上风电 DCT、MMC 故障等效简化模型

直流送出海缆发生短路故障后,故障发展迅速,由于控制延迟,在不控阶段故障电流迅速上升,此阶段可进行线性化等效分析<sup>[26]</sup>。首先对 DCT 进行等效简化,如图 2 所示, DCT 所有子模块均通过故障回路向故障点迅速放电,此时第二级 DCT 出口可等效为电容,如式(1)所示。

$$C_{DCT} = \frac{C_{DAB-out}}{n} \quad (1)$$

式中:  $C_{DCT}$  为出口侧等效电容;  $C_{DAB-out}$  为 DCT 单个子模块出口电容;  $n$  为 DCT 内部子模块数量。

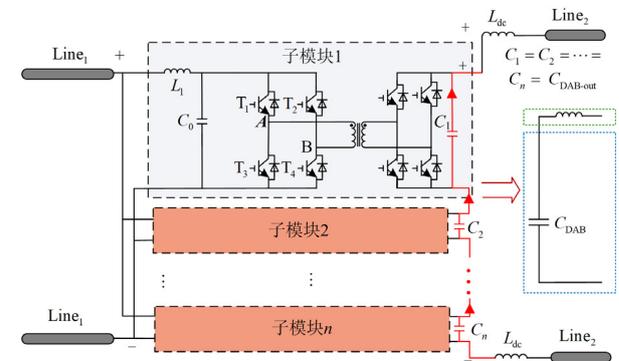


图 2 DCT 出口侧简化故障等效网络

Fig. 2 Simplified fault-equivalent network on the outlet DCT

再对 MMC 进行等效简化。故障暂态阶段电容放电电流起主导作用, 交流馈入电流可以忽略。直流出系统发生故障瞬时, MMC 内三相的上下桥臂投入子模块数量固定, 且投入数量相同。因能量平衡, 故障瞬间子模块电容电压相等。

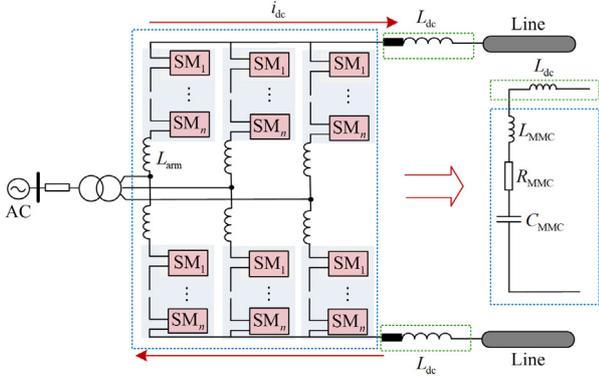


图 3 MMC 简化暂态等效网络

Fig. 3 MMC simplified transient equivalent network

由图 3 可知, 桥臂电阻、桥臂电感串联, 三相并联, MMC 换流站最终等效为 RLC 串联电路,  $R_{MMC}$ 、 $L_{MMC}$  和  $C_{MMC}$  为 MMC 端口等效电阻、等效电感和等效电容, 等效参数计算如式(2)所示。

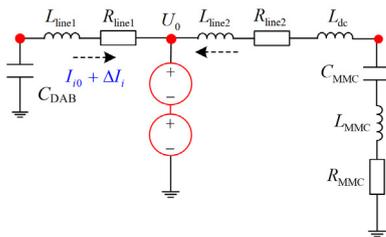
$$\begin{cases} R_{MMC} = 2(R_{arm} + R_{on})/3 \\ L_{MMC} = 2L_{arm}/3 \\ C_{MMC} = 6C_{sm}/N_{sm} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $R_{arm}$ 、 $L_{arm}$  分别为桥臂电阻和电感;  $R_{on}$  为导通电阻;  $C_{sm}$  为子模块电容;  $N_{sm}$  为单个桥臂子模块数量。

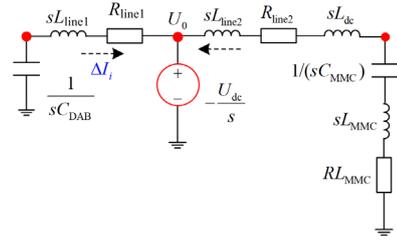
### 1.3 换流器、海缆线路特征分析

故障暂态阶段可将故障网络进行线性化分析<sup>[27]</sup>, 因此可以利用叠加定理将故障网络拆分为正常网络和故障附加网络。区内故障线性等效网络如图 4 所示。

根据叠加定理, 图 4(a)中的故障等效网络可以分解为具有独立源  $U_{dc}$  的正常网络和具有独立源  $-U_{dc}$  的叠加网络。正常网络反映故障前线路电流 ( $I_0$ ) 的稳态值, 而故障附加网络决定故障后线路电



(a) 等效故障模型



(b) 故障分量模型

图 4 区内故障线性等效网络

Fig. 4 Internal fault linear equivalent network

流的增量 ( $\Delta i$ )。  $\Delta i$  对确定瞬态短路电流更为重要, 本文故障电流为故障叠加网络电流。

区内故障电流受分布电容电流和换流器放电电流共同影响; 理论上区外故障时故障电流为贯穿性电流, 线路两侧故障电流的差异主要由线路分布电容电流引起。

首先分析区内故障时换流器放电电流频率特征。图 4(b)所示为送出线路发生故障时的复频域下的附加网络, 对两侧故障回路列写频域故障电流  $i_f(s)$  表达式, 如式(3)所示。

$$i_f(s) = \frac{U_{dc}}{s(R + sL + 1/sC)} \quad (3)$$

式中:  $R$ 、 $L$ 、 $C$  分别为故障回路总电阻、总电感和总电容;  $U_{dc}$  为直流电压。对式(3)进行拉式反变换可以得到暂态故障电流时域解析式, 如式(4)所示。

$$i_f(t) = Ae^{-\tau t} \sin(\omega t) \quad (4)$$

公式中各系数如式(5)所示。

$$\begin{cases} A = U_{dc} / \omega L, R = R_{line} + R_f + R_{eq}, \tau = R / (2L) \\ \omega_0 = 1 / \sqrt{LC}, \omega = \sqrt{\omega_0^2 + \tau^2}, L = L_{line} + L_{eq} + L_{dc} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\omega$  为故障电流角频率;  $\omega_0$  为固有角频率;  $\tau$  为时间衰减常数;  $L_{line}$  为故障回路中线路等效电感;  $L_{eq}$  为故障回路中两侧换流器等效电感;  $L_{dc}$  为故障回路中限流电抗器电感;  $R_{line}$  为故障回路中线路等效电阻;  $R_{eq}$  为换流器等效电阻;  $R_f$  为过渡电阻。

由式(5)可知, 故障电流频率  $\omega$  与回路  $L$ 、 $C$  相关, 电流幅值  $A$  与  $U_{dc}$ 、 $\omega$  和回路  $L$  相关。由于两侧故障回路中的  $L$ 、 $C$  均不同, 因此两侧故障电流的频率不同; 同理, 故障点压降  $U_{dc}$  相同, 而故障电流频率  $\omega$ 、回路电感  $L$  也不同, 因此两侧故障电流的幅值也具有差别。因此送出线路故障后, 两侧故障电流具有明显差异性。依据频率与角速度的关系, 由式(5)可求得两侧换流器的放电电流振荡频率

$f_{DCT}$ 、 $f_{MMC}$ ，如式(6)所示。将线路、换流器等效参数代入式(6)可知，两侧换流器放电电流振荡频率都在 100 Hz 以内。

$$\begin{cases} f_{DCT} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{1/(L_1 C_{DCT}) + R_1^2 / (4L_1^2)} \\ f_{MMC} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{1/(L_2 C_{MMC}) + R_2^2 / (4L_2^2)} \end{cases} \quad (6)$$

式中， $R_1$ 、 $R_2$  和  $L_1$ 、 $L_2$  分别为 DCT 侧和 MMC 侧回路等效电阻和电感。

接着分析海缆线路分布特征。如附录 A 图 A1 所示，由于海缆线路分布参数与架空线参数明显不同，海缆线路分布电容约为 0.25  $\mu\text{F}/\text{km}$ ，明显高于架空线分布电容 0.013  $\mu\text{F}/\text{km}$ ，因此分布电容电流的影响不容忽略。直流送出线路发生故障后，故障行波向线路两侧传播，在线路末端、故障点发生多次折反射，导致故障电流存在高频分量，其固有频率特征方程<sup>[28]</sup>为

$$1 - \Gamma_1 \Gamma_2 e^{-2sl/v} = 0 \quad (7)$$

式中： $s$  为复数角频率； $v$  为波速； $l$  为故障点到端点的长度； $\Gamma_1 = (Z_1 - Z_C)/(Z_1 + Z_C)$ ，其中  $Z_1$  表示电源阻抗， $Z_C$  表示线路波阻抗； $\Gamma_2 = (Z_2 - Z_C)/(Z_2 + Z_C)$ ，其中  $Z_2$  表示故障点阻抗。对式(7)进行变换得

$$|\Gamma_1| e^{j\theta_1} |\Gamma_2| e^{j\theta_2} = e^{2sl/v} \quad (8)$$

式中， $\theta_1$ 、 $\theta_2$  分别为电源侧和故障点处的反射系数角。利用欧拉公式  $e^{j\theta} = \cos \theta + j \sin \theta$ ，求得方程有无穷解，对应无穷角频率为

$$s = \begin{cases} \frac{v}{2l} (\ln |\Gamma_1 \Gamma_2| + j(\theta_1 + \theta_2 + \pi + 2k\pi)), & 0 < \theta_1 + \theta_2 < \pi \\ \frac{v}{2l} (\ln |\Gamma_1 \Gamma_2| + j(\theta_1 + \theta_2 + 2k\pi)), & \pi < \theta_1 + \theta_2 < 2\pi \end{cases} \quad (9)$$

式中， $k$  为整数。从而可得线路频率为

$$f = \begin{cases} \frac{v}{4\pi l} (\theta_1 + \theta_2 + \pi + 2k\pi) & 0 < \theta_1 + \theta_2 < \pi \\ \frac{v}{4\pi l} (\theta_1 + \theta_2 + 2k\pi) & \pi < \theta_1 + \theta_2 < 2\pi \end{cases} \quad (10)$$

固有频率主频为固有频率中频率最低的一个频率，且在此频率下能量最大，频谱幅值最高。区外故障时，故障电流的主要成分是分布式电容暂态电流，其频率与行波固有频率一致。可以得出，送出线路两侧测点频率差异主要体现为分布电容电流频率差异。

进而简化式(10)，可得区内、区外故障的行波固有频率的理论最低值，如式(11)<sup>[29]</sup>所示。

$$\begin{cases} f = \frac{v}{4l}, & \text{区内故障} \\ f = \frac{v}{2\pi l}, & \text{区外故障} \end{cases} \quad (11)$$

本文以仿真海缆为例，波速  $v$  的变化范围在  $(0.5 \sim 2) \times 10^8 \text{ m/s}$ 。若发生区外故障，依据式(11)可得线路分布电容影响的理论最低频段为 119.36~477.44 Hz。为降低分布电容的影响，可以选取低于 119.36 Hz 以内频段。计及实际工程中海缆长度可能不同，为凸显区内外故障频段差异，本文采用 100 Hz 以内低频段作为故障特征频段。

#### 1.4 区内外故障时故障分量时频突变方向特征分析

前文分析了区内故障时两侧故障电流时频突变频段数值特征具有差异性，区外故障时在选定频段内具有一致性，但并未考虑故障后突变方向特征。为形成有效的保护方案，本节将进一步分析区内外故障时电流波形突变特征，形成基于故障分量时频突变特征的保护方案。

如图 5(a) 中所示，送出线路  $R_0$  测点处由母线流向线路为正， $R_{11}$  测点处电流正方向为由线路流向母线。正常运行状态时，线路中不存在电流突变，也不存在时频方向突变。区内故障时，如图 5(b) 所示，DCT 侧故障电流仍为正向传输，电流突变量  $\Delta_0$  为正值，时频突变方向为正向突变；而 MMC 测点处电流呈现反向传输，电流突变量  $\Delta_1$  为负值，时频突变方向为反向突变。两侧故障分量时频突变方向相反，如式(12)所示。

$$\Delta_0 > 0, \Delta_1 < 0 \quad \text{区内故障} \quad (12)$$

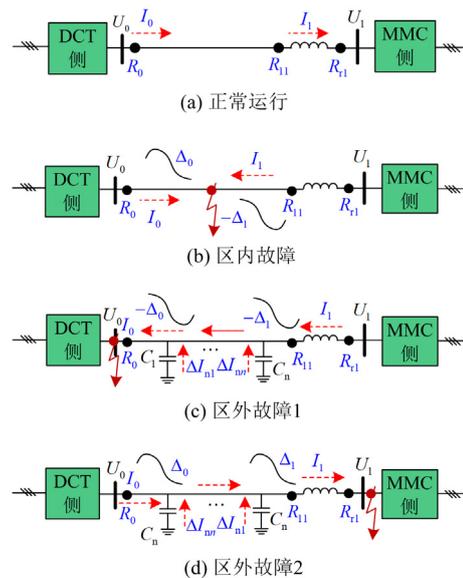


图 5 时频方向突变特征示意图

Fig. 5 Time-frequency direction mutation characteristics

区外故障时, 如图 5(c)和图 5(d)所示, DCT 侧和 MMC 侧在测点处电流均发生电流突变, 且两侧突变方向具有一致性, 如式(13)所示。

$$\begin{cases} \Delta_0 < 0, \Delta_1 < 0 & \text{正向区外故障} \\ \Delta_0 > 0, \Delta_1 > 0 & \text{反向区外故障} \end{cases} \quad (13)$$

因此, 区内故障时线路两侧测点的故障分量时频突变特征具有差异, 区外故障时低频带时频突变差异具有一致性, 并利用此特征作为区内和区外故障的判别依据。

## 2 基于故障时频特征的新型纵联保护

小波变换在时频域具有表征信号局部特征的能力, 能够充分检测电流的瞬态或奇异点, 本文采用小波变换原理提取故障电流时频特征。

### 2.1 小波变换原理

小波变换继承和发展了短时傅立叶变换局部化的思想, 是进行信号时频分析和处理的理想工具。其中, Morlet 小波能够有效分析时频局部化特性, 适用于非平稳信号的特征提取。由于直流故障电流具有局部突变性, 为了分析故障电流局部时频特征, 因此本文选择 Morlet 小波实时提取电流的时频域突变特征, 对采样数据进行预处理。小波变换和母小波函数如式(14)所示<sup>[22]</sup>。

$$\begin{cases} W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{\mathbb{R}} f(t) \cdot \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \\ \psi(t) = \frac{1}{\sqrt{f_b \pi}} e^{j2\pi f_c t} \cdot e^{-t^2 / f_b} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $W_f$  为小波变换的系数;  $a$  为尺度因子, 对应于频率,  $a$  越大, 频率分辨率越高, 设置为 5;  $b$  为平移因子, 对应于时间;  $f(t)$  为线路两侧待处理电流突变信号  $I_{DCT}$  和  $I_{MMC}$ ;  $\psi(t)$  为母小波函数,  $\psi^*$  为母小波函数的共轭值;  $f_b$  和  $f_c$  分别为截止频率和中心频率, 两者均设置为 50 Hz。

通过小波变换对电流采样数据进行预处理后, 将形成三维时频突变特征的矩阵图像。从前文分析可知, 内部故障时两侧时频突变特征图像具有明显差异, 而外部故障或正常运行时两侧时频突变特征图像是近似相同的。再利用表征线路两侧图像相似程度的算法即可识别内部故障和外部故障。

### 2.2 Wasserstein 距离

Wasserstein 距离是一种度量两个概率分布差异的方法, 广泛应用于机器学习、图像处理等领域。相较于余弦相似度, Wasserstein 距离具有运算时间短的优势, 且在 0/0 型时不存在判断错误的问题。Wasserstein 距离的数学定义如下, 设  $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ ,

$$\mu, \nu \subset P_p(\Omega), P_p(\Omega) = \left\{ \mu \in P(\Omega) : \int_{\Omega} \|x\|^p d\mu < +\infty \right\},$$

其中,  $p \in [1, +\infty)$ 。并以  $c(x, y) = \|x - y\|^p$  的最小传输距离为目标, 利用式(15)计算 Wasserstein 距离  $w(\mu, \nu)$ , 衡量两个数据矩阵间的差异。

$$w(\mu, \nu) = \min \left\{ \int_{\Omega \times \Omega} \|x - y\| d\gamma : \gamma \in \prod(\mu, \nu) \right\}^{1/p} \quad (15)$$

式中:  $\mu, \nu$  分别代表两侧故障电流时频突变数据矩阵;  $x$  和  $y$  分别代表两幅三维图像对应的矩阵数据元素点  $x_{ij}$ 、 $y_{ij}$ , 表示  $i$  时刻  $f_j$  频率下的电流突变幅值, 分别由送出线路首端与末端电流经过小波变换数据预处理后得到。

具体计算原理如图 6 所示, 红色双箭头虚线表示在  $t_j$  时刻  $f_j$  频率幅值存在差异。利用 Wasserstein 距离衡量不同时刻两侧时频差异, 依照时间维度将三维数据划分为不同时刻的频率向量  $f_{ij}$ , 如式(16)所示。

$$f_{ij} = f_{i1} + \dots + f_{ij} + \dots + f_{in} \quad (16)$$

式中:  $n$  与频率分辨率相关;  $t$  表示时刻。通过计算  $t_j$  时刻频率向量间的 Wasserstein 距离, 得到  $t_j$  时刻的 Wasserstein 距离值  $w_i$ , 实现将三维数据转换为二维数据, 计算结果如图 10 所示。由于直流线路保护要求速动性, 保护判别时间越短, 对直流关键设备越有利。Wasserstein 距离由于其运算量少, 比余弦相似度保护动作时间更短, 约为其运行时间的一半。

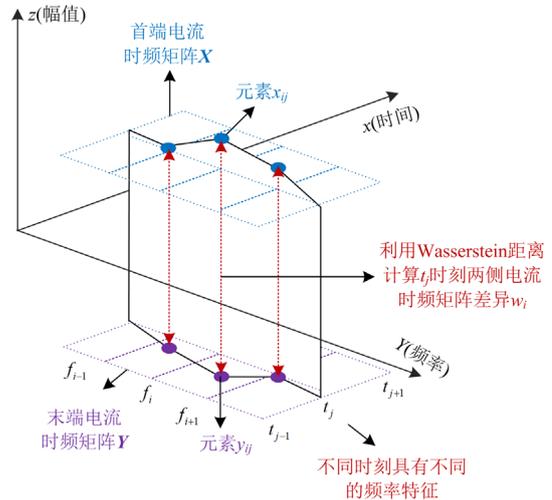


图 6 区内故障时两侧时频突变差异计算示意图

Fig. 6 Illustration of the calculation of time-frequency mutation differences on both sides during internal fault

### 2.3 保护启动设置、动作阈值整定及保护判据构造

保护启动: 可以通过检测电压变化率  $du/dt$  或者电流变化率  $di/dt$  实现<sup>[30]</sup>。当利用  $du/dt$  或者  $di/dt$

作为保护启动判据时, 保护启动阈值整定如式(17)所示。

$$|di/dt| > \delta_{iset} \text{ 或 } |du/dt| > \delta_{uset} \quad (17)$$

式中,  $\delta_{iset}$ 、 $\delta_{uset}$  分别为保护启动中电流变化率、电压变化率阈值, 具体数值参考文献[30]。

动作阈值整定: 原则上可以将  $w=0$  作为识别区内外故障的依据。但由于传感器误差、噪声干扰、传输误差等因素影响可能导致保护判别错误, 因此需要对保护阈值进行整定。

结合前文论述, 利用 Wasserstein 距离值  $w$  构造保护原理, 以此快速识别故障。考虑多种因素的阈值整定如式(18)所示。

$$w_{set} = w_{bian} \cdot k_{er} \cdot k_{other} \cdot k_{mar} \quad (18)$$

式中:  $w_{set}$  为保护整定阈值;  $k_{er}$  为传变、噪声误差, 通常 CT 传变误差为  $\pm 10\%$ , 噪声误差为  $\pm 5\%$ , 本文  $k_{er}$  选取为 1.2;  $k_{other}$  为其他误差, 本文选取为 105%;  $k_{mar}$  为预留裕度, 本文选取为 1.1;  $w_{bian}$  为区外金属性故障时的  $w$  距离值, 为 0.192, 以此作为保护边界。综合将阈值  $w_{set}$  设置为 0.5, 能够保证区内故障保护不拒动, 区外故障保护不误动。

保护判据: 依据式(19)进行区内外故障识别。

$$\begin{cases} w > w_{set}, \text{区内故障} \\ w < w_{set}, \text{区外故障} \end{cases} \quad (19)$$

### 2.4 保护实现方案

本文所述保护方案包含启动判据、故障频率突变特征提取、区内外故障识别, 具体保护算法流程如图 7 所示。具体保护动作流程可分为以下步骤:

① 送出系统发生故障, 当  $di/dt$ 、 $du/dt$  大于整定值时, 保护启动;

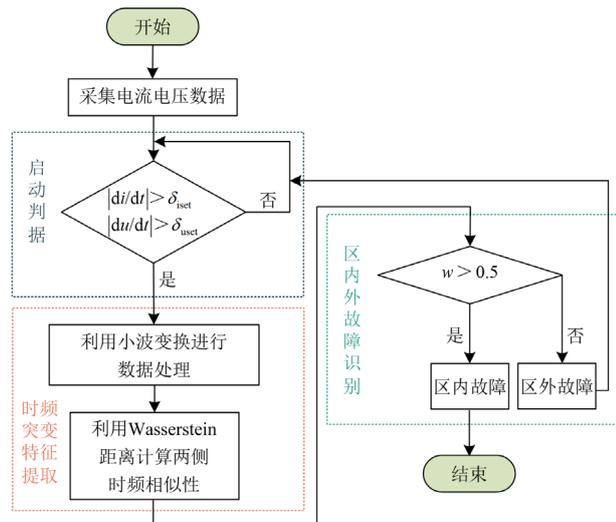


图 7 保护算法流程图

Fig. 7 Flow chart of the proposed protection method

② 保护启动后对采集的数据进行处理, 并利用小波变换进行电流时频突变特征提取;

③ 利用 Wasserstein 距离衡量两侧时频突变差异, 将  $w$  值与整定值进行比较, 若存在  $w > w_{set}$ , 为区内故障, 否则为区外故障。

### 3 实验验证

为验证所提保护方法的有效性, 在 RTDS 中搭建了全直流送出系统模型进行仿真验证, 如附录 A 图 A2 所示。额定容量为 1200 MW, 采用 100 km 直流送出海缆, 按照图 1 设置  $f_1-f_3$  故障位置。采样频率为 10 kHz, 陆上换流站侧限流电抗器为 100 mH, 送出海缆模型如附录 A 图 A3 所示, 其他模型参数详见附录 A 表 A1。

#### 3.1 所提保护与现有双端量保护性能对比

将本文所提保护方法与传统电流差动、余弦相似度保护方法在区内、区外故障情况下进行了对比, 其中电流差动保护制动系数取为 0.6, 余弦相似度保护阈值设置为 -0.9。区内故障位置设置在  $f_1$  处, 区外故障位置设置在  $f_4$  处, 其中过渡电阻为 100  $\Omega$ 。

由图 8(a)、图 8(b)可知, 区内故障时两侧故障电流幅值、频率具有明显差异, 同时电流时频突变差异较大; 由图 8(c)、图 8(d)可知, 区外故障时因分布电容的影响两侧电流具有差异性, 而在低频段两侧时频突变量基本一致。从图 9 中可以看出, 在区内高阻故障时, 电流差动、余弦相似度保护均能够可靠动作。区外故障时, 受线路特性影响, 两侧时域电流暂态量具有明显差异性, 导致电流差动、

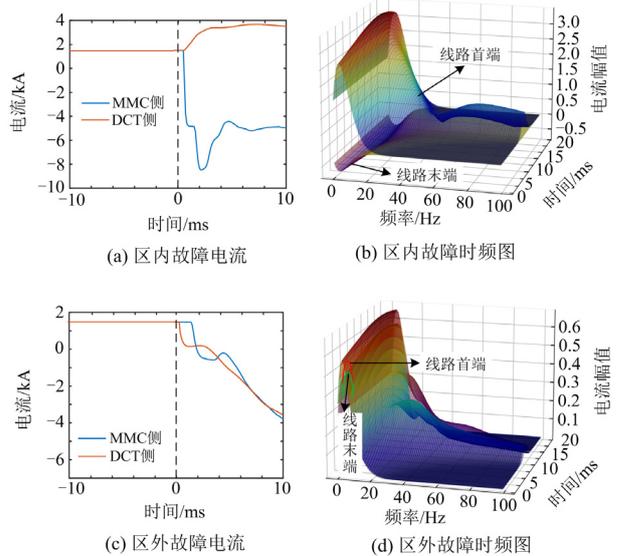


图 8 区内外故障电流及其时频突变特征图

Fig. 8 Fault current and time-frequency mutation characteristic for internal and external faults

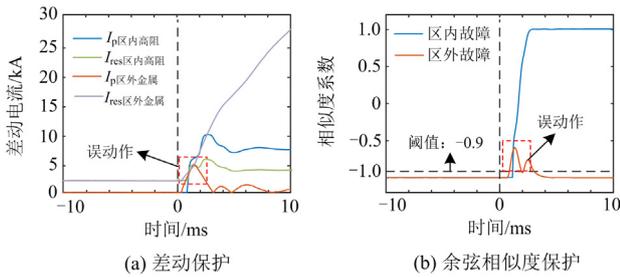


图9 区内外故障时电流差动、相似度保护性能图

Fig. 9 Performance diagram for current differential and similarity protection in case of internal and external faults

波形相似度保护误动作。这说明按时域电流量作为保护基础, 受海缆分布特性的影响, 保护存在不可靠的问题。如果将时域暂态电流量转化至时频域, 即按本文所提的时频突变量作为保护基础, 能够可靠识别故障。

如图 8(d)所示, 区外故障时, 两侧时频突变量差异小, 此时两侧  $w$  距离值小, 低于保护阈值 0.5, 所提保护能够可靠不动作。而区内故障时, 如图 8(b)所示, 由于两侧时频突变量差异明显, 具有较大  $w$  距离值, 远大于保护阈值 0.5, 如图 10 所示, 所提时频突变保护在 2.8 ms 识别故障, 并在 5 ms 内可靠动作, 充分说明所提保护方法的有效性。

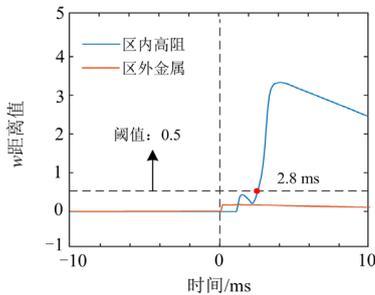


图10 本文所提保护动作性能图

Fig. 10 Operation performance of proposed protection method

### 3.2 不同故障位置场景下保护性能

为全方位验证所提保护的動作性能, 在送出海缆  $f_1 - f_5$  等 5 处(包含区内、区外故障点)设置不同故障类型, 其中仿真所用数据为故障前后 10 ms。

如表 1 所示, 当区外故障时,  $w$  距离计算值远小于保护整定值 0.5, 保护可靠不动作; 而区内故障时,  $w$  距离计算值远大于保护整定值 0.5, 保护可靠动作。由于 DCT 侧线路无限流电抗器, 在  $f_2$  处发生故障时换流器放电电流较大, 此时  $w$  距离计算值较大, 但保护识别故障时间更快速, 达 0.8 ms。通过仿真验证, 所提保护能够在不同位置、不同故障类型下正确识别故障区域, 保证区内故障正确动作、

区外故障不动作, 验证了所提保护方法的有效性。

表 1 不同故障位置时的保护性能

Table 1 Protection performance with different fault locations

故障位置	故障类型	$w$ 距离值	保护动作情况
$f_1$ 区内	单极	3.298	✓
	双极	3.301	✓
$f_2$ 区内	单极	4.952	✓
	双极	79.13	✓
$f_3$ 区内	单极	3.171	✓
	双极	3.764	✓
$f_4$ 区外	单极	0.162	×
	双极	0.149	×
$f_5$ 区外	单极	0.083	×
	双极	0.178	×

注: “✓”代表保护动作, “×”代表保护不动作。

### 3.3 不同过渡电阻场景下保护性能

发生直流故障时, 通常存在过渡电阻, 100  $\Omega$  过渡电阻即为高过渡电阻<sup>[31]</sup>。受过渡电阻的影响, 保护可能存在拒动的风险。为验证所提保护的抗过渡电阻能力, 在  $f_1$  处设置 100  $\Omega$ 、200  $\Omega$  和 300  $\Omega$  高阻故障, 具体仿真结果如表 2 所示。

表 2 不同过渡电阻下的保护性能

Table 2 Protection performance with different transition resistances

故障类型	过渡电阻/ $\Omega$	最大 $w$ 距离值 $w_{max}$	保护判别时间/ms
正极故障	100	2.364	2.7
	200	1.340	2.9
	300	0.632	3.2
双极故障	100	2.663	2.5
	200	1.370	2.7
	300	0.759	3.0

由表 2 可知, 发生区内故障时, 随着过渡电阻的增大, 所提保护的  $w$  值逐渐变小, 即使在 300  $\Omega$  过渡电阻情况下, 仍然大于整定值 0.5, 所提保护原理在高阻故障情况下能够可靠动作。因此本文所提保护方法具有较强的耐过渡电阻的能力。

### 3.4 不同噪声场景下保护性能

直流系统运行过程中不可避免地存在随机噪声。受噪声的影响, 正常运行时, 保护存在误动作的情况; 故障时非故障区域存在误动作的情况, 因此需考虑噪声对保护动作性能的影响。通常认为信噪比为 25 dB<sup>[32]</sup>时足够影响保护性能, 因此本文直接选取信噪比 20 dB、30 dB、40 dB 分析噪声对保护动作性能的影响, 以  $f_1$  处发生正极故障、双极故障为例进行保护动作性能分析, 仿真结果如表 3 所示。

表 3 不同噪声下的保护性能

Table 3 Protection performance under different noise

故障类型	信噪比/dB	w 距离值	保护判别时间/ms
单极故障	20	3.215	2.6
	30	3.314	2.5
	40	3.327	2.5
双极故障	20	3.902	2.3
	30	3.357	2.4
	40	3.386	2.4

从表 3 可知，即使在 20 dB 信噪比的噪声影响下，单极、双极故障 w 值都能稳定在近似范围，且所提保护仍能正确识别故障区域。可以证明，本文所提保护方法具有良好的抗噪能力。主要原因在于噪声属于高频，而本文采用低频段能够有效解决噪声影响。

### 3.5 不同采样频率对所提保护的影响

不同采样频率意味着时间窗内的采样数据量不同，高采样频率下数据质量更高，同时对设备要求更高，相应成本更高。因本文保护所需频段低，因此对设备采样频率低。直流工程中通常采用 10 kHz 采样频率<sup>[30]</sup>。为验证所提保护对采样频率的要求，本文选取采样频率 2 kHz、5 kHz 和 10 kHz 分析不同采样频率对保护的影响，并以  $f_1$  处发生正极故障、双极故障为例进行保护动作性能分析，仿真结果如表 4 所示。

表 4 不同采样频率对所提保护的影响

Table 4 Impact of different sampling frequencies on the proposed protection method

故障类型	采样频率/kHz	w 距离值	保护判别时间/ms
单极故障	2	3.524	2.6
	5	3.237	2.5
	10	3.298	2.5
双极故障	2	3.147	2.3
	5	3.359	2.4
	10	3.301	2.4

由表 4 可知，在 2 kHz 采样频率下，单、双极故障时，w 值均保持稳定，同时保护可靠动作，能够正确识别故障。说明所提保护对采样设备要求低。由于 2 kHz 采样频率低，数据质量可靠性低于 5 kHz，为保证保护的可靠性，建议采用 5 kHz 及以上采样频率。

### 3.6 通信延时所提保护的影响

为保证保护的速动性，保护启动后选择故障前后 2.5 ms 内的故障数据进行数据处理。在  $f_1$  处设置区内双极故障、 $f_5$  处设置区外双极故障，根据线路长度不同，数据延时设置为 0.5 ms 和 0.7 ms，采样

频率设置为 10 kHz，仿真结果如表 5 所示。

双端量保护在数据传输过程中存在通信延时、数据同步的问题。信号在 100 km 长度传输，导致通信延时为 0.5 ms<sup>[33]</sup>。保护动作时间为保护启动到保护出口时间，通常包括：保护启动时间、数据通信延时、保护判别时间<sup>[34]</sup>。保护启动时间约 0.3 ms，保护判别时间为保护算法计算时间，即前文保护算法区分区内外故障的时间。

表 5 通信延时所提保护的影响

Table 5 Impact of communication delays on the proposed protection method

故障类型	数据延时/ms	w 距离值	保护判别时间/ms	保护动作时间/ms
区内故障	0.5	4.068	3.1	3.9
	0.7	4.135	3.1	4.1
区外故障	0.5	0.254	3.3	4.1
	0.7	0.293	3.2	4.2

由表 5 可知，在通信延时最大为 0.7 ms 时，区内故障时，最大保护判别时间为 3.1 ms，从而最大保护动作时间为 4.1 ms；区外故障时，最大保护判别时间为 3.3 ms，而最大保护动作时间为 4.2 ms。即所提保护方法能在 5 ms 内可靠动作，充分说明通信延时所提保护方法影响较小。

## 4 结论

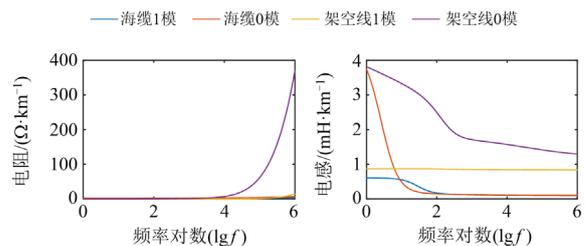
现有双端量保护区外故障时受直流送出海缆分布电容的影响，导致现有暂态量纵联保护误动作。针对该问题，本文提出基于故障分量时频突变特征的新型保护原理，得到如下结论：

1) 所提保护能够有效提取故障后时频突变低频段特征，与现有电流差动、余弦相似度保护相比，有效解决了线路分布电容导致暂态量保护区外故障时误动作的问题；

2) 在区内故障时，能够可靠动作，抗过渡电阻能力达 300 Ω，抗噪声能力达 20 dB；

3) 所提保护方法能够在 5 ms 内正确识别区内外故障，并可靠动作，受通信延时影响小，具有较高的速动性。

## 附录 A



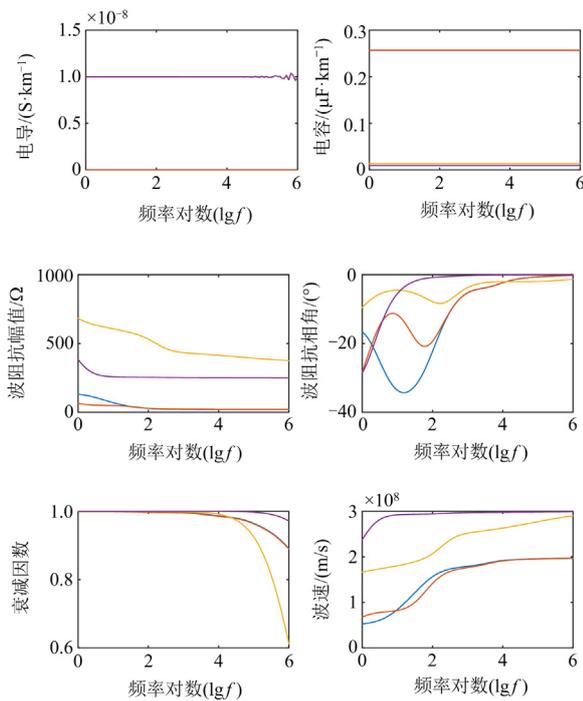


图 A1 架空线、海缆依频传输参数对比图

Fig. A1 Comparison of the frequency-dependent transmission parameters of overhead and submarine cable

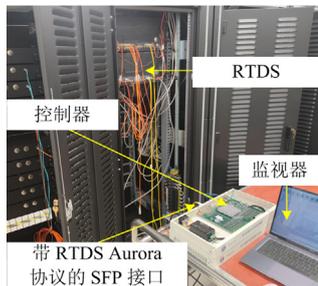


图 A2 RTDS 仿真验证平台

Fig. A2 RTDS simulation and verification platform

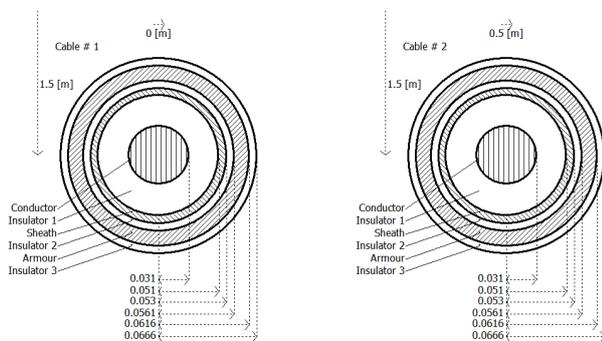


图 A3 送出海缆结构示意图

Fig. A3 Schematic diagram of the transmission submarine cable structure

表 A1 MMC 与 DCT 参数

Table A1 MMC and DCT parameters

换流站名称	参数名称	数值
MMC	网侧稳态控制	直流电压-无功控制
	电流环 $k_p/k_i$ 参数/p.u.	1/0.01
	额定电压/kV	±400
	桥臂电感/mH	50
	子模块电容/μF	3500
DCT	出口电容/μF	37 500
	子模块数	50
	变比	1/10

### 参考文献

- [1] 文劲宇, 周博, 魏利岫. 中国未来电力系统储电网初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 1-10.  
WEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 1-10.
- [2] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2819.  
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [3] 郑黎明, 贾科, 侯来运, 等. 基于奇异值分解的海上风电接入柔直系统的交流线路保护[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(增刊 1): 75-83.  
ZHENG Liming, JIA Ke, HOU Laiyun, et al. Singular value decomposition based protection for AC transmission lines of VSC-HVDC system with offshore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 75-83.
- [4] 彭忠, 黄海, 叶荣, 等. 远海风电柔性直流送端交流系统故障协调控制[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(6): 628-639.  
PENG Zhong, HUANG Hai, YE Rong, et al. Coordination control for sending end AC system fault of flexible DC transmission connected offshore wind power[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(6): 628-639.
- [5] 李钢, 田杰, 王仙荣, 等. 远海风电送出技术应用现状及发展趋势[J]. 供用电, 2022, 39(11): 2-10.  
LI Gang, TIAN Jie, WANG Xianrong, et al. Application status and development trend of offshore wind power transmission technology[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(11): 2-10.
- [6] 蔡旭, 施刚, 迟永宁, 等. 海上全直流型风电场的研究

- 现状与未来发展[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2036-2048.
- CAI Xu, SHI Gang, CHI Yongning, et al. Present status and future development of offshore all-DC wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2036-2048.
- [7] 彭开军, 周国梁, 李文津, 等. 采用二极管整流单元和模块化多电平换流器的混合型远海风电送出方案[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 166-175.
- PENG Kaijun, ZHOU Guoliang, LI Wenjin, et al. Hybrid offshore wind power delivery scheme using diode rectifier unit and modular multilevel converter[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 166-175.
- [8] 杜杰, 李子润, 李国杰. 海上风电直流汇集 DC/DC 系统实时仿真方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 170-177.
- DU Jie, LI Zirun, LI Guojie. Real-time simulation method for a DC/DC collection system in an offshore wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 170-177.
- [9] 廖修谱, 周全, 李磊, 等. 一种适用于远海风电直流汇集送出换流阀的拓扑及其技术经济性分析[J]. 中国电力, 2022, 55(6): 118-127.
- LIAO Xiupu, ZHOU Quan, LI Lei, et al. A feasible topology of DC collection valve for long-distance offshore wind farms and cost-effective analysis[J]. Electric Power, 2022, 55(6): 118-127.
- [10] 郭贤珊, 周杨, 梅念, 等. 张北柔性直流电网故障电流特性及抑制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5438-5446.
- GUO Xianshan, ZHOU Yang, MEI Nian, et al. Research on the fault current characteristic and suppression strategy of Zhangbei project[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5438-5446.
- [11] 张腾跃, 韩昆仑, 陈锋元, 等. 基于行波高频分量互相关函数离散度的高压直流线路双端保护方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 1254-1262.
- ZHANG Tengyue, HAN Kunlun, CHEN Fengyuan, et al. Two terminal protection method for HVDC transmission lines based on high-frequency cross-correlation function dispersion of traveling wave[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1254-1262.
- [12] WANG D, YU D, YANG H, et al. Novel travelling wave directional pilot protection for VSC-HVDC transmission line[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(9): 1705-1713.
- [13] 丁华星, 邹贵彬, 王凤莲, 等. 一种适用于深远海全直流风电汇集网络的保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(2): 15-25.
- DING Huaxing, ZOU Guibin, WANG Fenglian, et al. A fault protection method of a DC collection network for an all-DC offshore wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(2): 15-25.
- [14] LI J, LI Y, XIONG L, et al. DC fault analysis and transient average current based fault detection for radial MTDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1310-1320.
- [15] LI Y, LI J, XIONG L, et al. DC fault detection in meshed MTDC systems based on transient average value of current[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(3): 1932-1943.
- [16] 褚旭, 孙锦琛. 直流输电线路单极故障不平衡电流分析及差动保护改进方案[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 47-56.
- CHU Xu, SUN Jinchen. Analysis of single-pole fault unbalanced current and improvement of a differential protection scheme for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 47-56.
- [17] LI Rui, XU Lie, YAO Liangzhong. 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.
- [18] 谢志远, 胡斌俞, 张卫民, 等. 基于边界消耗暂态谐波能量的柔性直流输电线路保护新方案[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 34-42.
- XIE Zhiyuan, HU Binyu, ZHANG Weimin, et al. A novel protection scheme for VSC-HVDC transmission lines based on boundary transient harmonic energy[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 34-42.
- [19] 和敬涵, 宋元伟, 李猛, 等. 基于信息指纹的柔性直流线路差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13): 4800-4811.
- HE Jinghan, SONG Yuanwei, LI Meng, et al. Differential protection of flexible DC line based on information fingerprint[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4800-4810.
- [20] JIA K, WANG C, BI T, et al. Transient current correlation based protection for DC distribution system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(11): 9927-9936.
- [21] 张太升, 韩伟, 杨霖, 等. 基于波形相关分析的双馈风电场送出线时域距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 82-88.
- ZHANG Taisheng, HAN Wei, YANG Lin, et al. Time-domain distance protection for transmission lines of doubly-fed wind farms based on waveform correlation analysis[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 82-88.
- [22] 温志文, 贾科, 余磊, 等. 基于时频特性相似度的新能

- 源场站 T 接型送出线路高速保护[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 1-11.
- WEN Zhiwen, JIA Ke, YU Lei, et al. High speed protection based on time-frequency characteristic similarity for teed transmission line connected to renewable energy power plants[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 1-11.
- [23] 宋国兵, 蔡新雷, 高淑萍, 等. VSC-HVDC 频变参数电缆线路电流差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 105-111.
- SONG Guobing, CAI Xinlei, GAO Shuping, et al. Novel current differential protection principle of VSCHVDC considering frequency-dependent characteristic of cable line[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 105-111.
- [24] 邵庆祝, 赵晓东, 赵创业, 等. 基于高压直流输电线路分布参数模型的模态电流差动保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(22): 171-179.
- SHAO Qingzhu, ZHAO Xiaodong, ZHAO Chuangye, et al. Modal current differential protection method based on distributed parameter model of an HVDC transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(22): 171-179.
- [25] 李建国, 赵彪, 宋强, 等. 适用于中高压直流电网的开关电容接入式直流变压器[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 817-825.
- LI Jianguo, ZHAO Biao, SONG Qiang, et al. DC transformer based on switched capacitor in high and medium voltage DC power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 817-825.
- [26] 汤兰西, 董新洲. MMC 直流输电线路短路故障电流的近似计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 490-498.
- TANG Lanxi, DONG Xinzhou. An approximate method for the calculation of transmission line fault current in MMC-HVDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 490-498.
- [27] 郝亮亮, 李伟杰, 王卓雅, 等. MMC-HVDC 电网输电线路双极短路故障电流的实用计算[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(5): 68-76.
- HAO Liangliang, LI Weijie, WANG Zhuoya, et al. Practical calculation for bipolar short-circuit fault current of transmission line in MMC-HVDC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(5): 68-76.
- [28] 王兴国, 黄少锋. 基于固有频率的超高压线路选相新方法[J]. 高电压技术, 2009, 35(6): 1502-1508.
- WANG Xingguo, HUANG Shaofeng. New method of phase selection of EHV lines based on natural frequency[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(6): 1502-1508.
- [29] 董新洲. 故障行波理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [30] 王聪博, 贾科, 毕天姝, 等. 基于暂态电流波形相似度识别的柔性直流配电线路保护[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3823-3832.
- WANG Congbo, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Protection for flexible DC distribution system based on transient current waveform similarity identification[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3823-3832.
- [31] 林湘宁, 胡仙清, 童宁, 等. 具备高灵敏性与速动性的柔性直流输电系统纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 130-139.
- LIN Xiangning, HU Xianqing, TONG Ning, et al. A pilot protection scheme for an VSC-MTDC system with high sensitivity and rapidity[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 130-139.
- [32] 薛士敏, 陈硕, 顾诚, 等. 一种基于暂态量的柔性直流系统保护及雷击识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 45-53.
- XUE Shimin, CHEN Shuo, GU Cheng, et al. A method or protection and lightning identification in a flexible DC system based on transient quantities[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 45-53.
- [33] 邹晓峰, 沈冰, 蒋献伟. 5G 通信条件下配网差动保护快速动作方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 163-169.
- ZOU Xiaofeng, SHEN Bing, JIANG Xianwei. A quick action scheme of differential protection for a distribution network with 5G communication[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 163-169.
- [34] 李猛, 聂铭, 和敬涵, 等. 基于数字孪生的柔性直流电网纵联保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1773-1783.
- LI Meng, NIE Ming, HE Jinghan, et al. Pilot protection of flexible DC grid based on digital twin[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1773-1783.

收稿日期: 2023-12-06; 修回日期: 2024-03-08

作者简介:

孙均磊(1991—), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: sjlfight66@163.com

贾科(1986—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制、新型配电网保护与故障定位; E-mail: ke.jia@ncepu.edu.cn

李再男(1996—), 男, 博士, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: lizainan@ncepu.edu.cn

(编辑 魏小丽)