

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250144

# 交直流跨线故障时距离保护适应性分析及故障判别方法研究

房诗祺, 李永丽

(天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

**摘要:** 随着交直流混联电网建设的发展, 交直流线路同塔输电的情况日益增多。交直流跨线故障作为其特有的故障类型, 发生概率也会逐渐增加。以交直流跨线不接地故障为研究对象, 分析其故障特征及交流线路距离保护在跨线故障时的适应性。研究表明, 故障发生后, 故障相测量阻抗在复平面上位于第四象限, 呈现容性特征, 且数值大于线路全长阻抗, 使得距离保护动作的灵敏度降低, 存在拒动风险。提出基于交流三相电流波形差异度的故障选相判据, 并基于测量阻抗性质给出交直流跨线故障的判定方法, 实现了故障选相及故障判别。此外, 还在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建了交直流同塔输电线路模型并进行了大量仿真实验, 仿真结果验证了所提故障判别方法的有效性。

**关键词:** 交直流混联电网; 交直流跨线故障; 距离保护; 测量阻抗; 故障判别

## Research on distance protection adaptability and fault discrimination method under AC/DC cross-line faults

FANG Shiqi, LI Yongli

(School of Electrical Automation and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** With the continued development of hybrid AC/DC power grids, the practice of having AC and DC transmission lines on the same tower has become increasingly common. Consequently, AC/DC cross-line faults, which are unique to this configuration, are expected to occur more frequently. Focusing on ungrounded AC/DC cross-line faults, this paper analyzes their fault characteristics and investigates the adaptability of AC line distance protection under such conditions. The results indicate that after the fault occurs, the measured impedance of the faulted phase lies in the fourth quadrant of the complex plane, exhibiting capacitive characteristics and having a magnitude larger than the total line impedance. This causes a reduction in the sensitivity of the distance protection, leading to a risk of protection failure to trip. A fault phase selection criterion based on the difference in the three-phase AC current waveforms is proposed. Furthermore, a method for determining AC/DC cross-line faults based on measured impedance properties is developed, achieving both fault phase selection and fault discrimination. In addition, a same tower AC/DC transmission line model is built on the PSCAD/EMTDC simulation platform, and extensive simulation experiments verify the effectiveness of the proposed fault discrimination method.

This work is supported by the Smart Grid Joint Fund of National Natural Science Foundation of China-State Grid Corporation of China (No. U2066210).

**Key words:** hybrid AC/DC power grid; AC/DC cross-line fault; distance protection; measured impedance; fault discrimination

## 0 引言

我国一次能源和负荷需求具有逆向分布的特点, 建设远距离大容量输电是我国电力发展的方向。

**基金项目:** 国家自然科学基金委员会-国家电网公司智能电网联合基金项目资助(U2066210)

高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)具有传输容量大、运行可靠、有功损耗小的优点, 已得到快速且持续的发展<sup>[1-3]</sup>。目前我国已形成世界上电压等级最高的大型交直流混联电网, 交直流混联电网是我国电网发展的必经过程和必然趋势<sup>[4-7]</sup>。而随着土地资源的日益紧张, 交流输电线路与直流输电线路同塔架设, 二者电气距离较近, 不可避免地

存在发生交直流跨线故障的风险。

交直流跨线故障是一种同时涉及直流系统和交流系统的复杂故障类型<sup>[8]</sup>, 发生跨线故障后, 交流电气量会通过故障点流入直流系统, 直流电气量会通过故障点流入交流系统, 直流系统和交流系统会呈现出与纯直流系统中线路故障或者纯交流系统中线路故障不同的故障特性, 以往可行的故障分析方法可能不再适用。这将对继电保护构成严重挑战, 甚至关系到电网系统的安全稳定运行<sup>[9-10]</sup>。

目前, 国内外关于交直流跨线故障的故障特征分析及其对继电保护的影响研究还处于起步阶段。文献<sup>[11]</sup>重点讨论了跨线故障对线路感应过电压的影响, 表明交直流同塔跨线故障引起的过电压比传统直流故障要大, 但对故障本身并未进行延伸研究。文献<sup>[12-13]</sup>侧重推导了跨线故障后换流器的工频稳态等值阻抗, 主要研究了变压器支路、交流侧系统阻抗及直流偏磁等因素对等值阻抗的影响, 但对故障特性并未进行深入分析。文献<sup>[14]</sup>主要讨论了跨线故障后直流系统受交流侵入情况下的稳定性, 指出因为交直流两系统相关保护缺少时序配合, 且出口动作上存在差异, 使得某一保护动作将会对其他保护的动作用产生影响, 导致直流系统稳定性不足。文献<sup>[15-17]</sup>主要侧重于故障后换流器的导通特性及交流输电线路故障测距算法的适应性研究, 表明频域法对交直流跨线故障的测距误差很大, 而时域法的测距精度较高, 具有良好的适应性。文献<sup>[18-19]</sup>分析了跨线故障后交直流电气量的故障特征, 主要讨论了交流电流中直流分量和直流电流中 50 Hz 分量的影响因素, 并对继电保护的适应性进行了讨论, 但并未深入研究在保护拒动等情况下的应对策略。

本文针对交直流同塔输电线路跨线不接地故障建立了故障后的等效电路; 对于跨线故障时交直流保护动作特性差异, 着重研究了交流线路在不同故障条件下测量阻抗的变化趋势, 并进行了线路距离保护的适应性分析; 基于测量阻抗的故障特征, 提出了交流侧的交直流跨线故障判别方法; 通过 PSCAD/EMTDC 平台搭建交直流同塔输电线路仿真模型, 对所提方法进行了仿真验证。

### 1 交直流跨线故障特征分析

交直流同塔输电线路结构与交流同塔多回线路类似, 在某一段线路上交流输电线路与直流输电线路同塔架设, 非同塔段则各自单独架设。其结构示意图如图 1 所示。

图中:  $\dot{E}_{s,1}$ 、 $\dot{E}_{s,2}$  为交流系统电源;  $\dot{E}_{s,3}$ 、 $\dot{E}_{s,4}$  为直流系统电源; 交流系统输送功率方向为从 m 端向

n 端, 直流系统输送功率方向为从整流侧向逆变侧;  $I_m$ 、 $I_n$  分别为交流线路 m 端、n 端电流;  $I_f$  为故障线路电流;  $f_{ac}$  为交流线路上的故障点;  $f_{dc}$  为直流线路上的故障点;  $R_f$  为交流线路与直流线路之间的过渡电阻, 通常为纯阻性, 相间故障时, 跨线过渡电阻  $R_f$  最大取值一般为 50  $\Omega$ 。

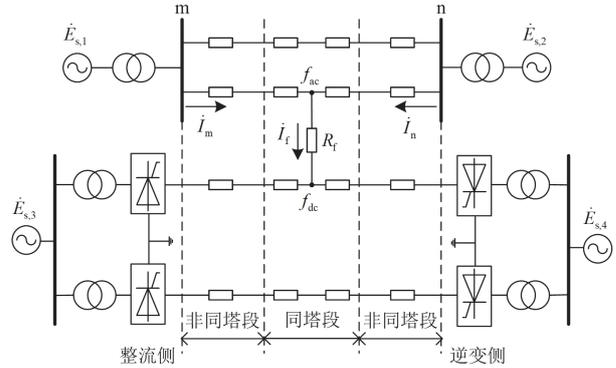


图 1 交直流同塔输电线路结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of AC/DC transmission lines on the same tower

本文研究的故障类型为同塔段线路上交流单相与直流单极之间的不接地跨线故障, 这是因为发生跨线故障的同时发展成接地故障的概率较低, 从现有经验而言, 发生同塔单相单极跨线不接地故障的可能性最高<sup>[20]</sup>。同时由于同塔段线路一般较短, 区外即为非同塔段, 而在非同塔段交直流线路电气距离较远, 发生跨线故障概率较低, 因此暂不考虑区外跨线故障。

#### 1.1 故障等效电路

交直流跨线故障同时涉及直流系统和交流系统, 在发生交直流跨线故障后, 交流电气量会通过跨线故障点流入直流系统, 直流电气量也会通过跨线故障点流入交流系统, 此时可用叠加原理进行故障分析<sup>[18]</sup>。

交直流跨线不接地故障的短路电流在故障点可分解成交流分量和直流分量的叠加, 由图 1, 将同塔段、非同塔段输电线路及系统各元件均等值为阻抗, 可得交流和直流电流回路如图 2 所示。图中:  $I_{f,ac}$  为交流故障电流;  $I_{f,dc}$  为直流故障电流;  $Z_{l,ac}$  为交流同塔段线路阻抗;  $\alpha$  为交流故障点与同塔段线路起点之间的距离占同塔段线路全长的百分比;  $Z_{ac,m}$ 、 $Z_{ac,n}$  分别为交流 m 端、n 端非同塔段线路阻抗;  $Z_{sm}$ 、 $Z_{sn}$  分别为交流 m 端、n 端电源等值阻抗;  $Z_p$ 、 $Z_b$  分别为交流滤波器组、直流滤波器组等值阻抗;  $Z_{sr}$ 、 $Z_{si}$  分别为整流侧、逆变侧换流器等值

阻抗;  $Z_{sR}$ 、 $Z_{sI}$  分别为整流侧、逆变侧交流电源等值阻抗;  $Z_d$  为平波电抗器阻抗;  $Z_{1,dc}$  为直流同塔段线路全长阻抗;  $\beta$  为直流故障点与同塔段线路起点之间的距离占同塔段线路全长的百分比;  $Z_{dc,r}$  为直流整流侧非同塔段线路阻抗;  $Z_{dc,i}$  为直流逆变侧非

同塔段线路阻抗。图中虚线部分表示直流系统等值电路中可忽略的元件, 这是因为跨线故障发生后若行波保护等直流线路保护快速动作, 两侧换流器隔离故障点后可从等值电路中删除(换流器在正常运行时其等值阻抗为数百欧<sup>[15]</sup>)。

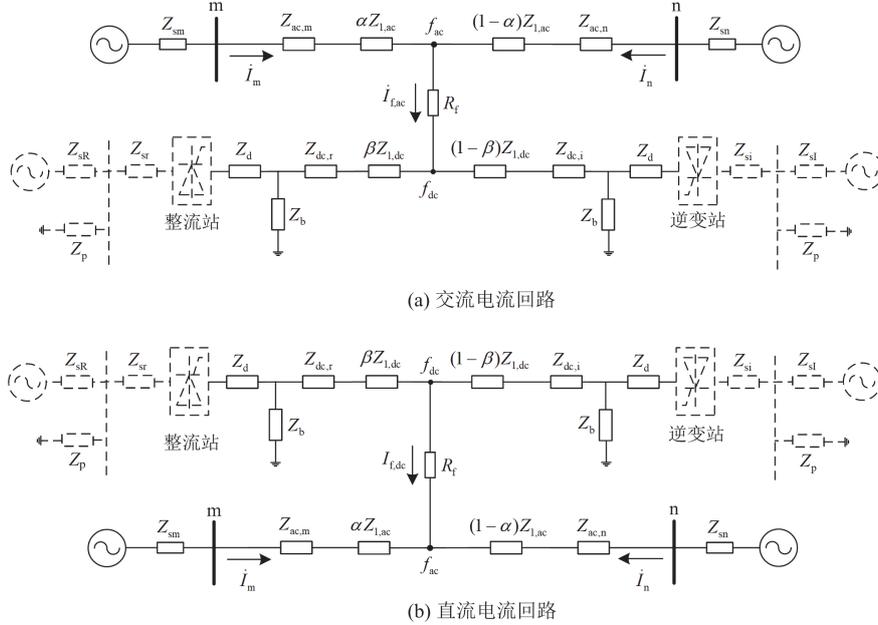


图 2 交直流跨线不接地故障电流回路图

Fig. 2 Current circuit diagram for AC/DC cross line ungrounded fault

由图 2 可见, 当发生交直流跨线故障时, 在跨线故障点  $f_{ac}$  处直流系统的等值阻抗一定会对交流线路的故障相测量阻抗产生影响。因此, 研究交流线路距离保护的适应性是必要的。

### 1.2 交流测量阻抗故障特征

根据图 2(b), 从故障点  $f_{dc}$  看进去的直流系统等值阻抗  $Z_{dceq}$  为

$$Z_{dceq} = ((Z_p \parallel Z_{sR} + Z_{sr} + Z_d) \parallel Z_b + Z_{dc,r} + \beta Z_{1,dc}) \parallel ((Z_p \parallel Z_{sI} + Z_{si} + Z_d) \parallel Z_b + Z_{dc,i} + (1-\beta)Z_{1,dc}) \quad (1)$$

通常, 当交流线路在  $f_{ac}$  处发生金属性单相接地故障时, 交流 m 侧故障相测量阻抗  $Z_m$  计算公式为

$$Z_m = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m + k_0 3\dot{I}_0} = Z_{ac,m} + \alpha Z_{1,ac} \quad (2)$$

式中:  $\dot{U}_m$  为交流 m 侧保护安装处的电压;  $k_0$  为零序补偿系数, 由线路单位零序阻抗  $Z_0$  和单位正序阻抗  $Z_1$  决定;  $\dot{I}_0$  为零序电流。

$$k_0 = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \quad (3)$$

根据式(2), 金属性故障时  $Z_m$  与  $Z_{ac,m}$ 、 $Z_{1,ac}$  的性质相同, 呈感性; 即使出现双端电源线路经过渡电阻单相接地故障导致的稳态超越情况, 线路两端电源的功角差通常小于  $60^\circ$ ,  $Z_m$  仍落在第一象限, 呈感性<sup>[21]</sup>。

而在发生交直流跨线不接地故障时, 交流线路 m 侧保护安装处故障相测量阻抗  $Z_m$  的计算公式为

$$Z_m = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m + k_0 3\dot{I}_0} = Z_{ac,m} + \alpha Z_{1,ac} + \frac{\dot{I}_f (R_f + Z_{dceq})}{\dot{I}_m + k_0 3\dot{I}_0} = Z_{ac,m} + \alpha Z_{1,ac} + \gamma e^{j\delta} Z_g = R_m + jX_m \quad (4)$$

式中:  $\gamma$  为  $\dot{I}_f$  与  $\dot{I}_m + k_0 3\dot{I}_0$  的幅值比;  $\delta$  为二者的相角差;  $Z_g = R_f + Z_{dceq}$ ;  $R_m$  和  $X_m$  分别为测量阻抗  $Z_m$  的实数和虚数部分。

$Z_m$  的性质与直流系统等值阻抗  $Z_{dceq}$  息息相关, 而换流器等值阻抗则是研究  $Z_{dceq}$  的重点。若不考虑直流线路故障后直流保护动作闭锁换流器功率传输, 换流器等值阻抗  $Z_{sx}$  可表示为式(5)<sup>[15]</sup>。

$$Z_{sx} = Z_{eq1} + Z_{eq2} + Z_{eq3} \quad x = r, i \quad (5)$$

其中

$$Z_{eq1} = \frac{3}{\pi} \omega L_T + \left( 2 - j \frac{3\mu}{2\pi} \right) \omega L_T \quad (6)$$

$$Z_{eq2} = \frac{3}{4} \sum_{n=6y \pm 1}^{\infty} A_n B_n (Z_{n+1} + Z_{n-1}) \quad (7)$$

$$Z_{eq3} = \frac{3mK}{8} A_1 B_1 Z_2 \angle (\xi + \theta_2) \quad (8)$$

式中： $\omega$ 为角频率； $L_T$ 为换流变压器漏抗等值电感； $\mu$ 为换相重叠角； $A_n$ 为修正后的电流开关系数，

$$A_n = \frac{4}{n\pi} \sin \left( n \left( \frac{\pi}{3} - k\mu \right) \right),$$

其中  $k$  为换相重叠角修正

系数， $k < 1$ ； $B_n$ 为电压开关函数系数； $Z_{n+1}$ 、 $Z_{n-1}$ 分别为直流系统交流侧  $n+1$ 、 $n-1$ 次谐波阻抗， $n = 6y \pm 1$ ， $y = 0, 1, 2, \dots$ ； $m$ 为变压器联接组标号不同的修正系数； $K$ 为等效二次谐波幅值与直流电流的比值； $Z_2$ 为直流系统交流侧二次谐波阻抗幅值； $\xi$ 为等效二次谐波相角； $\theta_2$ 为对应阻抗角。

在换流器正常导通的情况下， $Z_{sx}$ 可表示为式(5)，然而在发生交直流跨线不接地故障后，行波保护等直流线路保护的動作时间在几毫秒内，能够快速隔离两侧换流器<sup>[22]</sup>，此时直流系统等值阻抗 $Z_{dceq}$ 可简化计算，即忽略换流器及换流器侧等值阻抗，则式(1)变为

$$Z_{dceq} = (Z_d \parallel (Z_b + Z_{dc,r} + \beta Z_{l,dc})) \parallel (Z_d \parallel (Z_b + Z_{dc,i} + (1-\beta)Z_{l,dc})) \quad (9)$$

式中：平波电抗器阻抗 $Z_d$ 的取值为几百毫亨； $Z_b$ 各电感取值为几十毫亨，各电容取值为几微法；直流线路长度较长，受分布电容影响， $Z_{dc,r}$ 与 $Z_{dc,i}$ 呈容性，幅值通常为几百欧姆<sup>[14]</sup>； $Z_{l,dc}$ 与交流同塔段线路阻抗相同，呈感性，因同塔段线路长度较短，取值较小，通常最大为几十欧姆。

$\beta$ 的变化表征了故障点在直流同塔段线路上的变化，其仅影响 $\beta Z_{l,dc}$ 与 $(1-\beta)Z_{l,dc}$ 的大小。因为 $Z_{l,dc}$ 的幅值较小， $Z_{dc,r}$ 与 $Z_{dc,i}$ 幅值较大，根据式(9)，跨线故障时直流系统等值阻抗 $Z_{dceq}$ 呈容性。

综上所述，可将交流单相与直流单极的跨线不接地故障等效为交流单相容性过渡阻抗接地的情况，将问题简化。由于故障后直流系统呈现较强的非线性特征，难以得到 $Z_{dceq}$ 的精确数值，无法对测量阻抗进行定量计算，准确的数学描述难以实现，因此本文从影响测量阻抗的因素入手，对测量阻抗的变化趋势进行定性分析，进而分析交流线路距离保护的适应性。

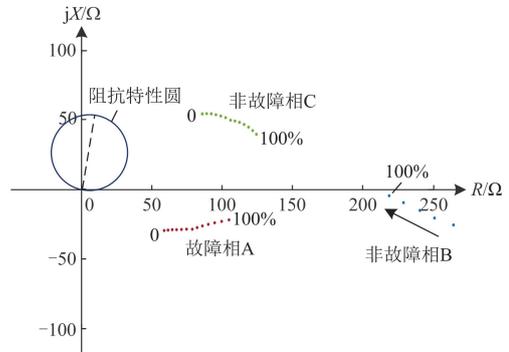
## 2 距离保护适应性分析

### 2.1 测量阻抗变化趋势

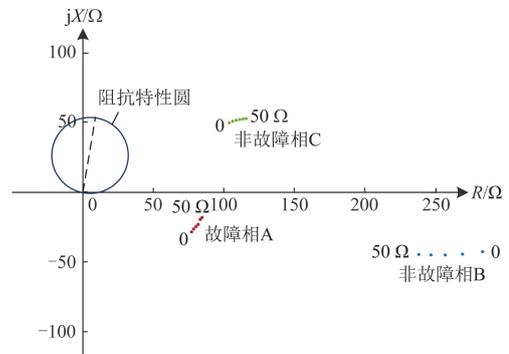
根据式(1)和式(4)，交、直流线路故障点位置占比 $\alpha$ 、 $\beta$ 及过渡电阻 $R_f$ 、直流线路长度 $Z_L$ 对测量阻抗 $Z_m$ 均有影响，其中直流线路长度 $Z_L$ 影响 $Z_{dc,r}$ 与 $Z_{dc,i}$ 的大小，从而间接影响 $Z_m$ 。

下面分别通过仿真分析这4种因素对测量阻抗的影响。

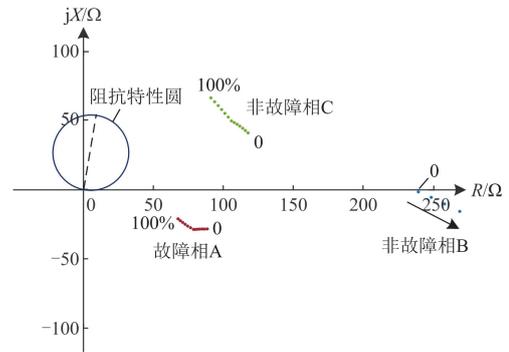
以交流A相与直流正极发生跨线不接地故障为例，m端A、B、C三相测量阻抗在复平面上的变化轨迹如图3所示。阻抗特性圆按照距离保护I段整定。



(a) 测量阻抗随交流线路故障点位置占比 $\alpha$ 变化



(b) 测量阻抗随过渡电阻 $R_f$ 变化



(c) 测量阻抗随直流线路故障点位置占比 $\beta$ 变化

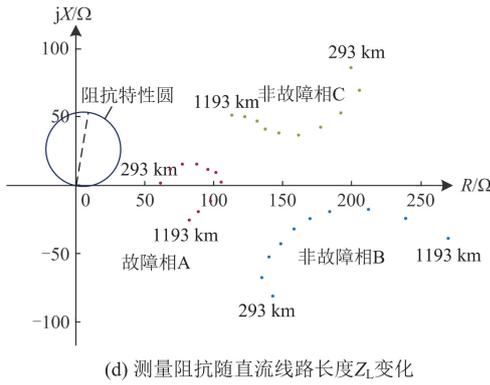


图3 复平面内测量阻抗变化轨迹

Fig. 3 Measured impedance locus in the complex plane

由图3(a)可见,当 $R_f$ 为 $0\ \Omega$ 、 $Z_L$ 不变、 $\beta$ 为50%不变时,随着交流同塔段线路故障点位置占比 $\alpha$ 从0向100%变化,故障相的测量阻抗 $Z_m$ 轨迹位于第四象限,呈容性, $R_m$ 逐渐增大, $X_m$ 小于0。

由图3(b)可见,当 $Z_L$ 不变、 $\alpha$ 、 $\beta$ 为50%不变时,随着过渡电阻 $R_f$ 从0向 $50\ \Omega$ 变化,故障相的测量阻抗 $Z_m$ 轨迹位于第四象限,呈容性, $R_m$ 逐渐增大, $X_m$ 小于0。

由图3(c)可见,当 $R_f$ 为 $0\ \Omega$ 、 $Z_L$ 不变、 $\alpha$ 为50%不变时,故障相的测量阻抗 $Z_m$ 轨迹位于第四象限,呈容性, $X_m$ 小于0。

由图3(d)可见,当 $R_f$ 为 $0\ \Omega$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 均为50%不变、交直流同塔段线路长度不变时,在直流线路较长的情况下,故障相测量阻抗 $Z_m$ 位于第四象限,呈容性, $X_m$ 小于0;当直流线路长度 $Z_L$ 减小时, $Z_m$ 轨迹由第四象限进入第一象限,由容性变为感性, $X_m$ 大于0。

综上所述,无论过渡电阻与交、直流线路上的故障位置如何变化,故障相的测量阻抗均呈容性,且在复平面上位于第四象限。直流线路较短时,测量阻抗可能落在第一象限,但由于直流线路通常建设长度较长(具有经济效益),若其长度在1000 km以上,测量阻抗仍呈容性。算例表明,发生交直流跨线不接地故障时,交流故障相测量阻抗在大多数情况下呈容性,在复平面上落在距离保护阻抗I段特性圆外。

## 2.2 距离保护适应性

距离保护不受系统运行方式的影响,可通过测量阻抗的大小反映故障点到保护安装处的距离,因此被广泛应用于交流输电线路。距离保护的判据中测量阻抗通常表示为式(10)<sup>[20]</sup>。

$$Z_m = \frac{\dot{E}_{\text{seq}}}{\dot{I}_{K,\text{ac}}} \quad (10)$$

式中: $\dot{E}_{\text{seq}}$ 为保护安装处的母线电压; $\dot{I}_{K,\text{ac}}$ 为保护安装处流过的电流。

当发生交直流跨线故障后,实际的测量阻抗为

$$Z_m = \frac{\dot{E}_{\text{seq}}}{\dot{I}_{K,\text{ac}}} = Z_{\text{accq}} + Z_{\Delta} \quad (11)$$

式中: $Z_{\text{accq}}$ 为 $Z_{\text{ac,m}}$ 与 $\alpha Z_{L,\text{ac}}$ 之和; $Z_{\Delta}$ 为附加阻抗, $Z_{\Delta} = \gamma e^{j\delta} Z_g$ 。

由前文分析可知,发生交直流跨线不接地故障后,故障相测量阻抗相当于在原交流等值电路中接入了一个附加阻抗,这个附加阻抗受过渡电阻、直流线路分布电容等因素影响,通常呈容性且幅值较大,使得测量阻抗落在复平面内第四象限并位于距离保护阻抗I段特性圆外,距离速断保护拒动。

综上所述,由于交直流跨线不接地故障呈现出与纯交流系统故障不同的故障特征,且可能导致距离速断保护拒动,因此在发生故障后需要进行故障性质的判别以区分跨线或非跨线故障。

## 3 基于测量阻抗性质的交直流跨线故障判别方法

### 3.1 故障选相

由2.1节的分析发现,在直流线路上的故障点位置接近同塔段末端时,除故障相外,非故障相的测量阻抗也有可能呈容性,因此需要选相判据选出故障相。

跨线故障后,交流故障相电流不仅会因直流电流的流入而偏移,且由于各次谐波的存在,其波形会产生畸变;对于非故障相,其故障电路中不存在故障电压源,仅因耦合作用受到影响,电流波形变化不大,仍具有较强的三角函数对称特性<sup>[23]</sup>。尤其是交流线路两非故障相波形具有较高相似性。

以交流A相与直流正极同塔线路中点发生跨线不接地故障为例,对交流三相电流进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT),提取各频次谐波含量,所得FFT频谱如图4所示。

由图4可见,交流故障相电流除了含有较大的直流分量外,其余频次谐波也比非故障相电流的含量高,这表明故障相与非故障相之间电流波形差异程度较高,而非故障相之间差异程度较低,因此可以通过电流波形差异程度来区分故障相与非故障相。

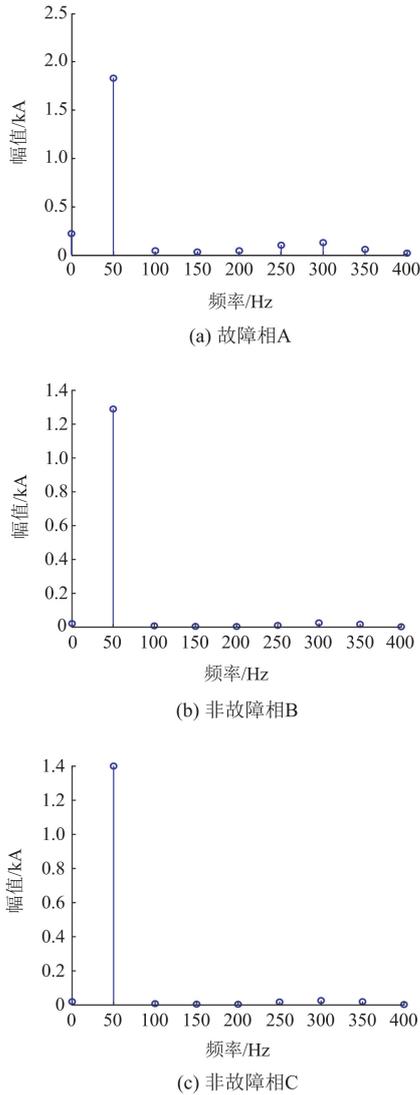


图4 故障后交流电流的FFT频谱

Fig. 4 FFT frequency spectrum of AC current after fault

为具体体现波形差异程度大小,应对三相电流波形相同相位的采样数据进行比较。取故障后一周波 20 ms 内的交流电流  $i$ ,每一相电流的采样数据与其余两相对应相位的采样数据相减,定义其总和为波形差异度  $K_{pq}$ ,如式(12)所示。

$$K_{pq} = \sum_{s=1}^N |i_{p,s} - i_{q,s+h}| \quad p, q = A, B, C \text{ \& } p \neq q \quad (12)$$

式中:  $N$  为一相电流一周波内的采样点数量;  $h$  为  $p$  相与  $q$  相之间对应相位的采样点数量差。排除重复组合后,  $K_{pq}$  共含 3 种数据:  $K_{AB}$ 、 $K_{AC}$  及  $K_{BC}$ 。

由于非故障相组合对应的  $K_{pq}$  较小,含故障相的组合  $K_{pq}$  较大,二者比值远小于 1,因此可以通过这一特性来进行选相。为留一定裕度,门槛值设

为 0.5,故障选相判据可设为

$$\frac{K_u}{K_v} < 0.5 \quad u, v = AB, AC, BC \text{ \& } u \neq v \quad (13)$$

满足式(13)的分子  $K_u$  对应的角标  $u$  中不包含的相即为故障相。

### 3.2 故障判别

由前文分析可知,在直流输电线路长度为 1000 km 以上时,交直流跨线不接地故障与交流单相接地故障之间的区别在于故障相测量阻抗  $Z_m$  性质不同,交流单相接地故障时  $Z_m$  呈感性,  $X_m$  大于 0;交直流跨线不接地故障时  $Z_m$  呈容性,  $X_m$  小于 0。此外,交直流跨线不接地故障时,交流线路的测量阻抗较大,通常大于线路全长阻抗,因此基于测量阻抗的数值大小无法准确判定线路的区内外故障。

根据以上特性,考虑到行波保护等直流线路保护的動作时间在几毫秒内,動作速度较快,可通过判断交流线路测量阻抗  $Z_m$  是否为容性来判别是否发生交直流跨线不接地故障,并发出告警信息,进一步基于直流线路的故障位置判定交流线路的故障点。同时为进一步提高判据可靠性,避免线路空载时可能出现容性阻抗发生误判,交流单相接地故障时附加零序电流判据,则故障判别判据可设为

$$\begin{cases} Z_{m,i} \text{ 为容性} & \text{跨线不接地故障,发出告警信息} \\ Z_{m,i} \text{ 为感性且 } I_0 > I_{set} & \text{交流单相接地故障} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $Z_{m,i}$  为选相环节选出的故障相所对应的测量阻抗;  $I_{set}$  为零序电流判据的整定值。

## 4 仿真验证

参照实际工程,根据图 1 在 PSCAD/EMTDC 平台搭建交直流同塔输电线路仿真模型,其中交流系统双回线路电压等级为 220 kV,非同塔段线路总长度为 80 km,两端各 40 km;直流系统为双极大地运行方式,电压等级为  $\pm 500$  kV,非同塔段线路长度为 1073 km,两侧各 536.5 km;交直流同塔段线路长度为 120 km。所有线路均采用频率相关参数模型。

### 4.1 距离保护动作情况

为验证不同故障工况下距离保护的動作情况,改变故障相、故障位置及过渡电阻值进行仿真,故障发生时刻  $t=1$  s,仿真结果如表 1 所示。

故障位置在交直流同塔段线路中点且过渡电阻为 0  $\Omega$  时的测量阻抗如图 5 所示。

根据图 5,交直流跨线不接地故障时测量阻抗  $Z_m$  值为  $78.031 - j28.348 \Omega$ ,在复平面内位于第四象

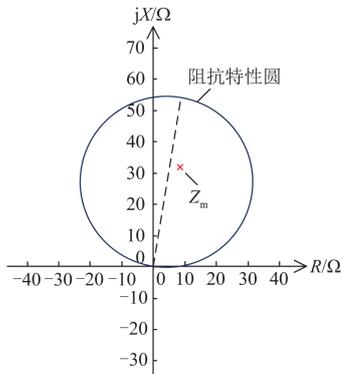
限, 落入阻抗特性圆外, 距离保护拒动, 与前文分析相符。

表 1 不同故障工况下距离保护的動作情况

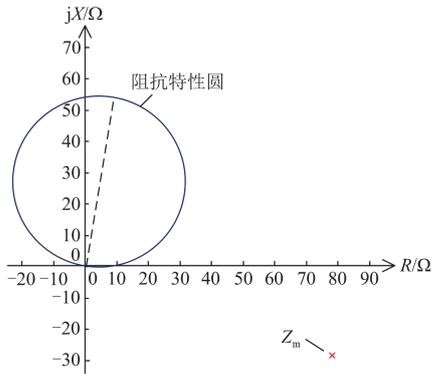
Table 1 Action of distance protection under different fault conditions

故障类型	故障位置( $\alpha/\beta$ )	过渡电阻/ $\Omega$	距离保护
1A-P	0%/50%	0	×
1B-P	0%/50%	50	×
1C-P	50%/50%	0	×
1A-P	50%/50%	50	×
1B-P	100%/50%	0	×
1C-P	100%/50%	50	×
1A-P	50%/0%	0	×
1B-P	50%/100%	50	×

注: 1A 表示交流一回 A 相; P 表示直流正极;  $\surd$  表示保护动作;  $\times$  表示保护拒动。



(a) 交流单相接地故障



(b) 交直流跨线不接地故障

图 5 距离保护测量阻抗

Fig. 5 Measured impedance of distance protection

#### 4.2 交直流跨线故障判别方法

为验证本文所提交直流跨线故障判别方法的有效性, 在交直流跨线不接地故障和交流单相接地故障下分别对故障选相判据和故障判别判据进行仿真, 故障发生时刻  $t=1\text{s}$ , 结果分别如表 2 和表 3 所示。

表 2 故障选相判据仿真结果

Table 2 Simulation results of fault phase selection criteria

故障类型	故障位置( $\alpha/\beta$ )	过渡电阻/ $\Omega$	$K_u/K_v$	选相结果
1A-P	0%/50%	0	0.166	A
1B-P	0%/50%	50	0.035	B
1C-P	50%/50%	0	0.134	C
1A-P	50%/50%	50	0.091	A
1B-P	100%/50%	0	0.148	B
1C-P	100%/50%	50	0.154	C
1A-P	50%/0%	0	0.235	A
1B-P	50%/100%	50	0.134	B
1C-G	50%	0	0.002	C
1A-G	100%	50	0.024	A

注: G 表示接地故障。篇幅所限, 表中仅列出满足故障选相判据的  $K_u/K_v$  值。

表 3 故障判别判据仿真结果

Table 3 Simulation results of fault discrimination criteria

故障类型	故障位置( $\alpha/\beta$ )	过渡电阻/ $\Omega$	$X_m/\Omega$ $I_0/\text{kA}$	判别结果
1A-P	0%/50%	0	-29.259 1.203	交直流跨线 不接地故障
1B-P	0%/50%	50	-19.227 0.694	交直流跨线 不接地故障
1C-P	50%/50%	0	-28.348 0.708	交直流跨线 不接地故障
1A-P	50%/50%	50	-20.005 0.451	交直流跨线 不接地故障
1B-P	100%/50%	0	-21.655 0.382	交直流跨线 不接地故障
1C-P	100%/50%	50	-17.746 0.224	交直流跨线 不接地故障
1A-P	50%/0%	0	-27.989 0.513	交直流跨线 不接地故障
1B-P	50%/100%	50	-18.723 0.566	交直流跨线 不接地故障
1C-G	50%	0	31.396 1.608	交流单相 接地故障
1A-G	100%	50	30.973 0.551	交流单相 接地故障

由表 2 可见, 在不同的故障工况下, 含有故障相的  $K_{pq}$  值均远大于仅含有非故障相的  $K_{pq}$  值, 二者比值远小于设定的门槛值; 由表 3 可见, 交直流跨线不接地故障时测量阻抗  $Z_m$  呈容性, 交流单相接地故障时  $Z_m$  呈感性, 均符合前文分析。

为验证本文所提交直流跨线故障判别方法的优势, 将不同故障工况下的仿真结果与文献[21, 23]中的仿真结果进行对比, 如表 4 所示。

由表 4 可见, 文献[21, 23]的方法并不能在故障

位置、过渡电阻变化时准确选出故障相并正确判别故障类型，与之相比，本文所提故障选相判据能够准确选出故障相，所提故障判别判据能够正确判别出交直流跨线不接地故障，且结果不受过渡电阻、故障位置等因素的影响，可靠性高。

表 4 本文所提方法与现有方法的仿真结果

Table 4 Simulation results of the method proposed in this paper and existing methods

故障类型	故障位置 ( $\alpha/\beta$ )	过渡 电阻/ $\Omega$	本文方法	文献[21, 23] 方法
1A-P	0%/50%	0	√	√
1B-P	0%/50%	50	√	√
1C-P	50%/50%	0	√	√
1A-P	50%/50%	50	√	√
1B-P	100%/50%	0	√	×
1C-P	100%/50%	50	√	×
1A-P	50%/0%	0	√	√
1B-P	50%/100%	50	√	×
1C-G	50%	0	√	×
1A-G	100%	50	√	×

注：√表示能够在发生故障时选出故障相并正确判别故障类型；×表示不能。

综上所述，本文所提交直流跨线故障判别方法能够在发生故障时准确选出故障相，且能正确判别出交直流跨线不接地故障。

## 5 结论

本文以交直流同塔输电线路为研究对象，基于 PSCAD/EMTDC 平台搭建仿真模型，对交直流跨线不接地故障时的故障特性及距离保护的适应性进行了深入研究，并提出了基于测量阻抗性质的交直流跨线故障判别方法，得到以下结论。

1) 跨线故障时直流系统与交流系统产生直接的电气联系，测量阻抗与交流单相接地故障时存在明显区别。交流单相接地故障时故障相测量阻抗在复平面上位于第一象限，呈感性；交直流跨线不接地故障时故障相测量阻抗在复平面上位于第四象限，呈容性，且随着故障位置由首端向末端变化、过渡电阻增加，故障相测量阻抗在复平面上始终位于第四象限，容性特征不变。

2) 发生交直流跨线不接地故障后，测量阻抗数值通常会大于线路全长阻抗，在复平面上位于阻抗特性圆外，导致距离保护灵敏度下降，有拒动风险。

3) 为区分跨线与非跨线故障，本文提出了在交流系统中的交直流跨线故障判别方法，在发生故障时准确判断故障相及故障类型，以提高系统可靠性。

由于篇幅有限，本文并未对交直流保护在交直

流跨线故障情况下的时序配合进行分析，后续将对此开展进一步研究。

## 参考文献

- [1] HOU Junjie, SONG Guobing, FAN Yanfang. Fault identification scheme for protection and adaptive reclosing in a hybrid multi-terminal HVDC system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(2): 403-419.
- [2] 王洪彬, 周念成, 王伟, 等. 基于行波模式分解的特高压直流输电线路双端行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(1): 109-120.  
WANG Hongbin, ZHOU Niancheng, WANG Wei, et al. A double-terminal fault location method for UHVDC transmission lines based on traveling wave mode decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(1): 109-120.
- [3] 杨新宇, 赵庆生, 韩肖清, 等. 基于 IF-AD-ELM 的特高压直流输电系统故障辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(8): 1-9.  
YANG Xinyu, ZHAO Qingsheng, HAN Xiaoqing, et al. Fault identification of a UHVDC transmission system based on IF-AD-ELM[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(8): 1-9.
- [4] 童潇宁, 王月强, 仇张权, 等. 基于数据驱动多面体集合的交直流混合配电网鲁棒调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(3): 38-50.  
TONG Xiaoning, WANG Yueqiang, QIU Zhangquan, et al. Robust scheduling method for AC/DC hybrid distribution networks based on a data-driven polyhedral set[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(3): 38-50.
- [5] 张宁宇, 赵欣, 周前, 等. 适用于交直流混联受端电网的电压弹性评估方法[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 90-97.  
ZHANG Ningyu, ZHAO Xin, ZHOU Qian, et al. Voltage-resilience assessment method for AC/DC hybrid receiving-end power grid[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 90-97.
- [6] 朱建昆, 高红均, 贺帅佳, 等. 考虑 VSC 与光-储-充协同配置的交直流混合配电网规划[J]. 智慧电力, 2023, 51(11): 7-14.  
ZHU Jiankun, GAO Hongjun, HE Shuaijia, et al. AC-DC hybrid distribution network planning considering VSC and photovoltaic-storage-charging coordinated configuration[J]. Smart Power, 2023, 51(11): 7-14.
- [7] 赖逸洋, 王增平, 王彤. 电流差动保护在柔直接入的交流电网中适应性分析及改进措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 145-154.  
LAI Yiyang, WANG Zengping, WANG Tong. Adaptability analysis of current differential protection in an AC power grid with an MMC-HVDC and improvement measures[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 145-154.
- [8] 薛海平, 王俊生, 张少凡, 等. 交直流交叉跨越碰线故

- 障分析及处理策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 150-158.
- XUE Haiping, WANG Junsheng, ZHANG Shaofan, et al. Touching fault analysis and clearing action strategy for AC/DC crossed transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(24): 150-158.
- [9] 杜婉琳, 唐旭, 黄泽杰. 交-直流碰线故障对交流线路距离保护的影响[J]. 广东电力, 2019, 32(4): 48-54.
- DU Wanlin, TANG Xu, HUANG Zejie. Affect on distance protection of AC line by AC-DC line touching fault[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(4): 48-54.
- [10] 滕志鹏. 基于卷积神经网络的输电线路故障定位与交直流碰线故障辨识方法[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- TENG Zhipeng. Transmission line fault location and AC/DC line touching fault identification based on convolutional neural network[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [11] VERDOLIN R, GOLE A M, KUFFEL E, et al. Induced overvoltages on an AC-DC hybrid transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(3): 1514-1524.
- [12] 张杰. 交流与直流交叉跨越处跨线短路分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- ZHANG Jie. AC and DC interline fault analysis at crossing place[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [13] 王洪敏. 交直流混合输电线路的跨线故障分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- WANG Hongmin. DC/AC cross line fault analysis[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [14] ZHOU Xiangxian, LU Tiebing, CUI Xiang, et al. Simulation of ion-flow field at the crossing of HVDC and HVAC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(4): 2382-2389.
- [15] 杜婉琳. 交-直流线路碰线故障特性分析及对交流线路保护与故障测距的适应性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- DU Wanlin. Study on fault characteristic and adaptability of AC relay protection and fault location for AC-DC cross short fault[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [16] 林加隽. 含交直流同塔的交流输电线路接地故障测距方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- LIN Jiajuan. Research of fault location method of AC transmission lines sharing tower with DC transmission lines[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [17] 唐旭, 梁远升, 杜婉琳, 等. 计及线间互感的两回输电线路交叉跨越故障的短路电流计算方法[J]. 南方电网技术, 2017, 11(9): 41-47.
- TANG Xu, LIANG Yuansheng, DU Wanlin, et al. Short circuit current calculation method for crossing fault of two transmission lines with mutual inductance[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(9): 41-47.
- [18] 李晓华, 梁子鹏, 冯家伟, 等. 交直流交叉跨越碰线故障及其保护风险分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(9): 52-59.
- LI Xiaohua, LIANG Zipeng, FENG Jiawei, et al. Touching fault and its risk protection analysis for AC/DC crossed transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(9): 52-59.
- [19] 梁子鹏. 交直流同塔线路故障分析及保护适应性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- LIANG Zipeng. Study on fault analysis and protection adaptability for AC-DC transmission lines shared the same tower[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [20] 冯家伟. 交直流碰线故障后保护动作时序及风险分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- FENG Jiawei. Protection operation sequences and risks in AC/DC line touch fault[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [21] 汤未, 于溯, 郑涛, 等. 基于交直流保护协同配合的交直流碰线保护新方案[J]. 中国电力, 2022, 55(11): 41-50.
- TANG Wei, YU Su, ZHENG Tao, et al. A novel protection scheme of AC and DC line-touching based on coordination of AC and DC protection[J]. Electric Power, 2022, 55(11): 41-50.
- [22] 戴志辉, 刘宁宁, 刘媛, 等. 基于电压反行波的特高压直流输电单端量线路保护[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 80-87.
- DAI Zhihui, LIU Ningning, LIU Yuan, et al. Single-terminal line protection for UHVDC power transmission based on voltage backward traveling wave[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 80-87.
- [23] 于溯. 交直流系统不同碰线故障下继电保护适应性及对策研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- YU Su. Research on the adaptability and countermeasures of relay protection under different line-touching faults in AC/DC hybrid system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.

收稿日期: 2025-02-15; 修回日期: 2025-05-20

作者简介:

房诗祺(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: shiqifang2021@126.com

李永丽(1963—), 女, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: lytju@163.com

(编辑 周金梅)