

# 基于 PSCAD 的海上特高压柔性直流线路保护的故障处理方法

雷翔胜<sup>1</sup>, 王兴华<sup>1</sup>, 余梦泽<sup>1</sup>, 杨帆<sup>2</sup>, 刘寒轩<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电网规划研究中心, 广州 510080;

2. 南京南瑞继保工程技术有限公司, 南京 211102)

**摘要:** 柔性直流输电技术迅速发展, 但其所面对的问题也越来越多, 一个典型的问题是直流输电线路出现故障时, 其迅速变化的故障电流会对其可靠性产生影响, 因此, 如何在最短的时间内切断故障电流, 保证电网的安全运行, 研究符合要求的快速、可靠的柔性直流输电 (FDC, flexible direct current) 故障处理方法显得尤为重要; 本文首先对 FDC 系统保护机理的研究现状进行了综述分析, 对故障特点进行了探讨, 针对直流输电线路的新原理、新的布线方式进行了创新, 提出了一种既能满足各种需求又能保证其正常运行的高效的直流线路故障处理方法; 仿真试验得出: 在灵敏度系数  $K_{sen} = 8.7$  的时候, 不受过渡电阻的干扰, 能够迅速地识别和隔离故障, 判定时间最大为 0.84 ms, 判定准确率为 100%, 在工程应用中保证 FDC 系统的安全作用显著。

**关键词:** 柔性直流电网; 线路保护; 故障分析; 故障识别; 保护方案

## Protection of Offshore UHV Flexible DC Lines Based on PSCAD

LEI Xiangsheng<sup>1</sup>, WANG Xinghua<sup>1</sup>, YU Mengze<sup>1</sup>, YANG Fan<sup>2</sup>, LIU Hanxuan<sup>2</sup>

(1. Research Center of Grid Planning, Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China;

2. NR Engineering Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Flexible DC transmission technology is developing rapidly, but it faces more and more problems. A typical problem is that when a DC transmission line fails, rapidly changing fault current has an impact on its reliability. Therefore, how to cut off the fault current in the shortest time and ensure the safe operation of the power grid, it is particularly important to study the fast and reliable flexible direct current (FDC) fault processing method that meets the requirements. In this paper, the research status of the protection mechanism is summarized and analyzed in the FDC system, and the characteristics of the faults are discussed. The new principle and new wiring method of the DC transmission line are innovated. An efficient DC line fault processing method that can meet various needs and ensure its normal operation is proposed. The simulation results show that when the sensitivity coefficient  $K_{sen}$  is 8.7, it is not disturbed by the transition resistance, which can quickly identify and isolate the fault. The maximum determination time is 0.84 ms, and the determination accuracy is 100%. The safety of the FDC system is significant in engineering applications.

**Keywords:** flexible DC grid; line protection; fault analysis; fault recognition; protection scheme

## 0 引言

亚洲柔性直流输电技术在全球范围内取得了零突破。三峡能源如东海上柔性直流输电项目的第一台海上风电机组, 在风机叶片徐徐旋转的同时, 也标志着我国已经掌握了海上风电柔性直流输电工程领域核心技术<sup>[1]</sup>。

柔性直流输电在可再生能源并网、远距离输送与多区域系统互联等方面具有十分重要的作用<sup>[2]</sup>, 特别是在电力电子技术大力发展的背景下, 它的应用前景更为广阔。但随着 FDC 技术的迅速发展, 将加剧局部潮流、增大短路电

流, 且一定程度上危害了交流电网的安全<sup>[3]</sup>。因此, 研究快速、可靠的保护机制尤为重要。

直流线路保护方法分为单端量保护方法和双端量保护方法。其中, 单端量保护方法只利用本端故障信息, 无需与对端进行通信, 不存在由于信息交互造成的时延问题, 因此具有更快的动作速度, 通常作为线路的主保护。而双端量保护方案虽然存在不可避免的通信时延问题, 在一定程度上动作速度会降低, 但由于同时利用两端故障信息, 选择性更高, 通常作为线路的后备保护<sup>[4-6]</sup>。由此可见, 实现单端量保护和双端量保护的合理配置, 对保障电网的安

收稿日期: 2023-01-27; 修回日期: 2023-03-02。

基金项目: 国家自然科学基金项目(52061635102); 南方电网公司科技项目资助(037700KK52220018)。

作者简介: 雷翔胜(1976-), 男, 硕士研究生, 高级工程师。

引用格式: 雷翔胜, 王兴华, 余梦泽, 等. 基于 PSCAD 的海上特高压柔性直流线路保护的故障处理方法[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(11): 74-80.

全运行具有重要意义。

文献 [7] 对模块化多电平换流器 (MMC, modular multi-level converter) 的拓扑结构及典型故障进行了分析, 为今后 FDC 保护策略的研究奠定了基础。文献 [8] 针对 FDC 系统中的兼容性问题, 设计了一种基于波特率的动态自适应解码算法, 采用动态扫描方式, 对信号的波特率进行识别, 并根据需要调节相关的参数。文献 [9] 介绍了一种用于可视化编程的 FDC 控制与保护系统, 该系统具有硬件程序和软件程序, 可同时由多个操作员进行调试, 使其能够实现多路操作, 并能独立总线通信, 大大提高了工作效率和实时性。文献 [10] 根据行波原理, 将 Marti 模型与 MMC 拓扑结构相结合, 建立了一种基于 Marti 模型的纵联行波差动保护, 并通过 PSCAD/EMTDC 软件对其进行了仿真验证。文献 [11] 通过对线路两端边界的暂态能量比的差别来判别区内、外故障, 并根据正负极的暂态能量比确定故障极, 该方案具有较强的耐过渡电阻能力和抗干扰能力。文献 [12] 为提高测量精度, 提出了一种基于 FDC 线路的单端故障定位的新思路。文献 [13] 研究了 FDC 系统的高频谐振现象, 并对产生的呈现负阻尼的原因进行分析, 建立了 MMC 的正序阻抗模型。仿真结果表明: 降低系统延时、减小电流内环和功率外环的比例系数、改善控制均有效地减小了高频谐振的发生。文献 [14] 就海上风电经柔性直流网系统受端交流故障导致的直流过电压特点进行了分析, 对单极直流过电压和双极直流过电压问题进行了研究, 并针对不同问题提出了不同处理方案。文献 [15] 针对海上风电 FDC 系统局部放电的异常现象, 提出了一种基于回路补偿的端间改进试验方法。文献 [16] 提出了一种具备故障穿越能力的海上风电—柔直并网系统, 既能实现对直流母线电压的灵活控制, 又能提高电网的抗干扰性。文献 [17] 提出了柔性电源模块智能诊断方法, 实现了电源模块的多项功能和性能检测, 同时还可检测电源模块是否老化或异常, 有效预测和避免了电源模块失效的风险, 提高了 FDC 系统的可靠运行。

本文研究了海上特高压柔性直流线路的新原理、新的布线方式, 分析了 FDC 系统中各个主要设备的工作特点和故障特点, 提出了一种基于暂态等效的直流输电系统故障分析方法; 其次, 研究并分析了多端 FDC 网络的故障特点, 提出了一种基于单端量保护的直流输电系统; 最后, 基于 PSCAD 软件对所提方法进行仿真验证。所提方法能够快速识别与隔离故障, 从而保证电网的安全稳定运行。

## 1 海上特高压柔性直流线路

### 1.1 故障分析

由于直流电网的对称结构<sup>[18]</sup>, 以最常见正极接地故障为例, 故障时间设定在 3.5 s, 故障类型为金属性故障, 金属性故障是指直接接地故障, 其特性是故障电阻很小。故障点设在 Line12 的末尾。在故障发生时间之前和之后,

所测得的正电极线路的电压和电流的波形如图 1 (a) 和 (b) 所示。

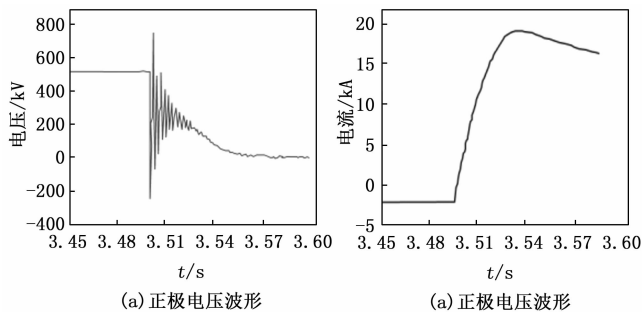


图 1 发生正极接地故障时的电压电流波形

结果表明: 在直流输电线路出现故障后, 短路电流会迅速增加, 尽管限流电抗器可以有效地抑制电流的增长, 但在极短的时间里, 电流仍然超过了额定值的数倍, 同时系统的电压也会大幅下降<sup>[19]</sup>。当采用稳态电压和电流的电量值作为保护准则时, 严重的短路现象将会对换流器等核心设备的安全工作产生较大影响, 所以在常规的交流保护方式中, 采用故障电压和电流稳态成分的保护策略是不适合于柔性直流电网的。

为了更好地了解故障瞬时的电气量特性, 在图 2 中, 得到了在故障发生之前和之后的数秒内的瞬时电压和电流的波形。

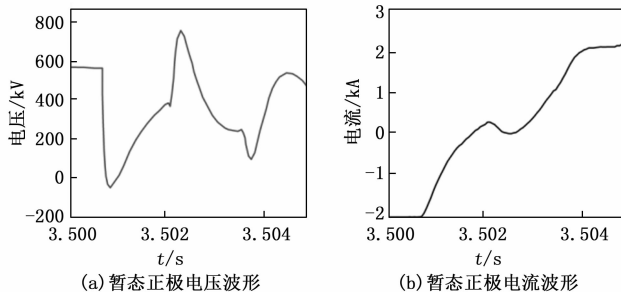


图 2 发生正极接地故障时的暂态电压电流波形

从图 2 可以看出, 在短时瞬态过程中, 存在着大量的电压、电流的波形变化特征, 寻找并合理地运用这些特征, 是快速进行故障识别的关键<sup>[20]</sup>。为此, 本文对电力系统的故障后电压和电流的瞬态特性进行了研究, 并提出了一种适合于 FDC 系统运行特性的直流线路保护方案。

### 1.2 故障提取与建模

柔性直流电网的设备构成和故障发展过程与传统电网相比具有较大差异, 分析柔性直流电网运行特性和故障特征对直流线路保护新原理的提出具有重要意义, 且对故障时暂态电气量信息的利用是保护方案建立的关键<sup>[21-24]</sup>。因此, 介绍了柔性直流电网关键设备的构成和运行特性, 分析了直流线路故障时的稳态特征和暂态特征, 结合柔性直流电网暂态运行特性, 建立了直流线路故障分析暂态等效模型, 从而为保护方案的构建提供理论基础<sup>[25]</sup>。

### 1.2.1 换流器

换流器是柔性直流电网组成中的核心设备,其功能是实现交直流电气量的变换,使电能与交流侧和直流侧之间传输。由全控型电力电子器件 IGBT 构成的电压源型换流器具有不需要装设无功补偿装置、能实现功率快速解耦独立控制、无换相失败风险等诸多优势<sup>[26]</sup>,在直流换流器中得到了广泛应用。以张北柔性直流输电工程为例,该工程采用半桥子模块多电平换流器,具有响应速度快、输出波形质量好、损耗小、可拓展性强等特点。在采用 MMC 的情况下,线路直流侧的故障发展可分成两个阶段,第一个阶段是 MMC 闭锁之前的直流电容器放电,这一阶段的故障电流主要来自于子组件的电容器放电;第二个阶段为 MMC 闭锁,在交流端由反向并联二极管供电,使其进入非控制整流相位<sup>[27]</sup>。本文提出了一种基于短路电流瞬态行波的保护准则,该方法仅限于第一阶段,在这种情况下,换流器可以被简化成 RLC 级联,其表达式如下:

$$C_s = \frac{6c}{n} \quad (1)$$

$$L_s = \frac{2}{3}L_{arm} \quad (2)$$

$$R_s = \frac{2(R_0 + \sum R_m)}{3} \quad (3)$$

上式中,  $c$  为换流器中子模块电容的取值,  $L_{arm}$  为换流器中桥臂电抗器的取值,  $n$  为每个桥臂子模块的数量,  $\sum R_m$  为各桥臂导通子模块 IGBT 的导通电阻,  $R_0$  为桥臂电阻;  $R_s$ 、 $L_s$  和  $C_s$  分别为在等值 RLC 串联电路中,电阻、桥臂电抗器和故障后参与放电的子模块电容的等效值。由此,得到了换流器等效阻抗复频率域的简化公式:

$$Z_{CM} = R_s + sL_s + \frac{1}{sC_s} \quad (4)$$

结果表明:这种简化的等值模型在故障发生后 2 ms 内,其错误率在 5% 以下,满足了研究的需要。

### 1.2.2 直流输电线路

保护测试设备设在直流线路的前端,当直流线路的某个节点出现故障时,行波通过故障点传输至保护测试设备,造成线路的行波衰减和失真,这一问题可用式(5)来说明:

$$\begin{aligned} U_m(s) &= T(s) \cdot U_f(s) \\ I_m(s) &= T(s) \cdot I_f(s) \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $U_f(s)$ 、 $I_f(s)$  分别为故障点处电压、电流首行波复频域表达式;  $U_m(s)$ 、 $I_m(s)$  分别为直流线路首端电压、电流首行波复频域表达式;  $T(s)$  为线路传递函数,其表达式如式(6)所示:

$$T(s) = e^{-\gamma(s)x} \quad (6)$$

式中,  $\gamma(s)$  的实部是衰减系数,虚部是相移系数,它们分别表示了直流线路上传输时,故障首行波的衰减与失真;  $x$  是在保护测量设备上从失效点到所述防护测量设备的距离。为了便于计算,对该电路的传输函数作了简单的处理,

其结果如式(7)所示:

$$e^{-\gamma(s)x} \approx \frac{K_a}{1+sT_a} \cdot e^{-sT} \quad (7)$$

式中,  $e^{-sT}$  为故障首行波在直流线路传播过程中的时延;  $K_a$  为线路衰减比例系数,表示故障首行波在直流线路传播过程中的衰减;  $T_a$  为线路色散时间常数,表示故障首行波在直流线路传播过程中的畸变。 $K_a$  和  $T_a$  的表达式如式(8)所示:

$$\begin{aligned} K_a &= 1 - k_a x \\ T_a &= \tau_a x \\ K_a &= 1 \end{aligned} \quad (8)$$

式中,  $K_a$  和  $T_a$  分别为单位长度的衰减系数和畸变系数。通过上述等价的传输函数,可以保持基本的行波延时、衰减和畸变,从而大大简化了运算量。

### 1.2.3 直流断路器

从理论上可以看出,直流断路器主支路的阻抗值非常低,所以在等值模式下可以忽略不计。

### 1.2.4 限流电抗器

限流电抗器设在直流线路的两端,当进行模型等值时,它的复频域表示为  $sL$ 。

通过对直流输电系统各个关键设备的工作特点及传输线的传播特点进行分析,得出了两端 FDC 系统的故障分析暂态等值模型,表达式如式(9):

$$T(s) = \frac{K_a}{1+sT_a} \cdot e^{-sT} \quad (9)$$

通过以上分析可知,柔性直流电网直流侧故障发展速度极快,快速识别故障信息是直流线路故障隔离的关键。直流线路单端量保护方案仅需本端故障信息,能够保证保护动作的快速性,通常作为线路的主保护。而现有的直流线路保护方案存在灵敏度受过渡电阻影响较大、保护门槛整定依赖于仿真、缺乏理论依据等问题<sup>[28-30]</sup>。针对以上问题,本章通过研究直流线路故障首行波的传播特征,在本文提出了相应的保护方案。

## 2 保护方案设计

### 2.1 启动单元

柔性直流输电技术在快速发展的同时也面临许多挑战,直流线路发生故障后,急剧上升的故障电流会对系统运行的可靠性造成严重影响,为了在短时间内对故障电流进行切除,保障系统的稳定运行,研究满足快速可靠的柔性直流输电线路保护原理尤为重要<sup>[31-35]</sup>。在直流线路出现故障时,故障电压成分会迅速增加,在此根据限流电抗器一个模式的故障电压建立了一个正向区内外的故障判据,同时,启动判据也是以一个模式的故障电压为依据,设定为额定电压的 10%,即 50 kV,启动判据如式(10):

$$|\Delta u_1| > 0.1U_a \quad (10)$$

式中,  $|\Delta u_1|$  为限流电抗器一个模式的故障电压绝对值。图 3 示出了在区域的端部  $F_1$  点出现由 500  $\Omega$  的过渡电阻正

电极接地失效时, 限流器的一个模式故障电压波形, 并将故障时间设定在 3.5 s。

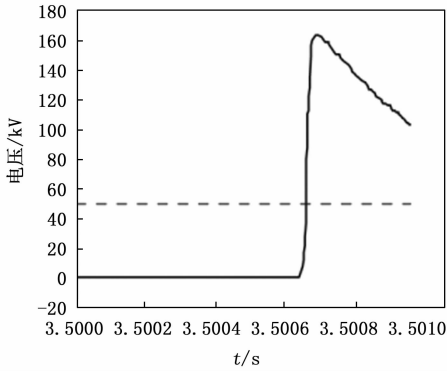


图 3 限流电抗器故障电压波形

从图 3 可以看出, 在正常工作状态下, 一模式的故障电压为 0 时, 保护不会起动, 而一旦出现故障, 故障行波到达线路前端保护测试设备, 即使是在高电阻故障的情况下, 一模式的故障电压绝对值也能在很短的时间内达到额定电压的 10%, 从而保证了故障启动的可靠性。

### 2.2 故障识别与驱动单元

由于直流输电系统存在着很低的阻尼, 所以在直流输电线路出现故障后, MMC 的子模块会迅速放电, 从而使故障线路的电流迅速增加, 使短路电流的幅度在短期内提高<sup>[35]</sup>。在单极性接地故障时, 由于极线与正极线间的电磁耦合, 使正常极线上的电流有一定的起伏, 但振幅比故障极线要小得多。在出现双极性短路时, 由于正、负两个方向都是同一回路, 所以电流的波动幅度基本一致。

从正向电流理论中可以看出, 正极线在正向失效时, 电流升高, 正极端线的电流值是正的, 而在逆向失效时, 正极端线的电流值是负值; 在负极线上, 其故障电流的变化规律与正极线的情况相反。根据上述结果, 通过对故障电流首波采样点电流值的正负差, 可以准确地判断出故障的方向, 同时, 也可以根据故障电流的不同, 建立正、负两种故障电流的方向判断。根据故障极辨识准则, 在故障发生后 0.3 ms 内, 将全部取样点的电流值相加, 以此来判断故障电流的正、负故障方向判据。

通过对前、后两种不同类型的短路电流电抗器的一模式故障电压差别进行分析, 给出了一模式的故障电压突变点和第一次峰点的时间差 PTV, 表达式如式 (11):

$$PTV = t_m - t_0 \quad (11)$$

式中,  $t_m$  和  $t_0$  分别表示限流电抗器一模式故障电压首个峰值点时刻和突变点时刻。在正向区内、外故障中, PTV 的初始峰值与区域内的差别很大, 而正向区外故障的 PTV 要远大于区域内的故障, 根据 PTV 的大小, 可以准确地判断出正向区内、外部的故障。

由分析可知: 取 PTV 大小 0.87 ms, 可靠系数  $K_{rel}$  为 2, 由此可得保护门槛  $PTV_{th} = 0.435$  ms。总而言之, 在线路出

现正向失效的情况下, 在第一次峰值 PTV 超过 0.435 ms 的情况下, 防护判定为正向区域外部失效, 0.435 ms 以内的判定为正向区域内部失效。

直流线路的单端保护方案, 包括故障启动判据、故障极识别判据、方向识别判据、正向区域故障识别判据等 4 个部分组成, 整个保护方案流程图见图 4, 图中  $I_{sum,p}$  为正极故障电流,  $I_{sum,n}$  为负极故障电流。

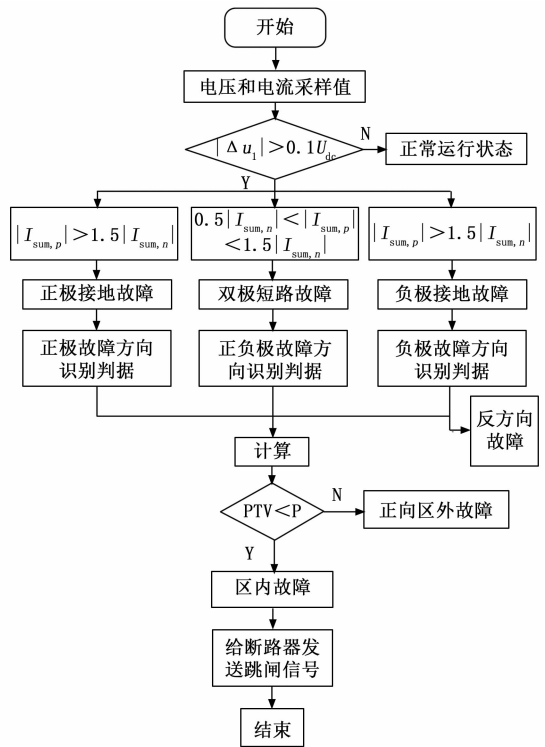


图 4 单端量保护方案流程图

如图 4: 保护测量装置实时监测系统运行情况, 若满足  $|\Delta u_1| > 0.1U_{dc}$ , 则判定有故障发生。若  $|I_{sum,p}| > 1.5|I_{sum,n}|$ , 则为正极接地故障: 通过正极故障方向识别判据识别故障方向, 当  $I_{sum,p} > I_{th}$  时为正向故障, 当  $I_{sum,p} < -I_{th}$  时为反向故障。若  $|I_{sum,n}| > 1.5|I_{sum,p}|$ , 则为负极接地故障: 通过负极故障方向识别判据识别故障方向, 当  $I_{sum,n} < -I_{th}$  时为正向故障, 当  $I_{sum,n} > I_{th}$  时为反向故障。若  $0.5|I_{sum,n}| < |I_{sum,p}| < 1.5|I_{sum,n}|$ , 则为双极短路故障: 利用正极和负极故障方向识别判据识别故障方向, 当  $I_{sum,p} > I_{th}$  且  $I_{sum,n} < -I_{th}$  时为正向故障, 当  $I_{sum,p} < -I_{th}$  且  $I_{sum,n} > I_{th}$  时为反向故障。当识别故障方向为正方向时, 再进行正向区内、外故障的识别, 当 PTV 小于保护门槛值时, 则为区内故障, 给断路器发送跳闸信号, 将故障隔离。

## 3 仿真与测试

### 3.1 PSCAD 仿真参数设定

快速有效的直流输电线路保护方案是多端柔性直流电网发展的关键, 针对现有的直流线路保护方案存在抗过渡电阻能力差、保护门槛整定依赖于仿真、缺乏理论依据等

问题,通过对故障暂态特征进行分析,提出了一种基于限流电抗器—模式故障电压首峰值时间的单端量保护方案<sup>[36]</sup>。首先,分析了故障行波在直流线路上的传播特征,利用时频域转换的思想,分别推导出了正向区内外故障时限流电抗器—模式故障电压解析表达式,并给出了首峰值时间的理论解,结果表明:正向区外故障时的首峰值时间值远大于区内故障时的首峰值时间,据此差异构建了正向区内外故障识别判据。

此外,分析了故障电流行波的变化特征,结果表明:不同故障类型时故障电流变化特征存在显著差异,且正向和反向故障时故障电流变化特征相反,据此构建了故障极和故障方向识别判据。

在张北四端绕曲直流输电工程的结构参数的基础上,建立了一个模型,将取样频率设定为 100 kHz,模拟时的失效时间设定为 3.5 s。由于系统的结构是对称的,并且模拟结果与理论推导相一致,因此本文将通过一个直流线路 Line12 换流站 S<sub>1</sub> 的保护来模拟该保护方案的可行性。与上述分析相符,故障方向辨识准则中的保护临界值  $I_{th}$  是依据区域内终端 F<sub>1</sub> 点出现的 500 Ω 过渡电阻正极接地故障而调整的,设定为 1 kA,正向区域内外失效准则的防护阈值  $PTV_{th}$  设定为 0.435 ms。

### 3.2 仿真结果及分析

#### 3.2.1 故障方向判定及分析

在故障发生后,首先确定故障的极点和方向,通过模拟试验,证明了所提出的各种故障情况下所提出的保护策略的正确性。图 5 分别为正极接地故障、负极接地故障、双极短路故障 3 种情况下的正、负故障电流变化波形。

从图 5 仿真结果可见,对于正向 F<sub>1</sub> 点,当发生正极接地故障时,正负极故障电流满足  $|I_{sum,p}| > 1.5 |I_{sum,n}|$ ,根据故障极识别判据识别故障极为正极;利用正极故障方向识别判据进行故障方向的识别,满足  $I_{sum,p} > I_{th}$ ,从而识别为正方向故障。当发生负极接地故障时,满足  $|I_{sum,n}| > 1.5 |I_{sum,p}|$ ,识别故障极为负极;根据负极故障方向识别判据  $I_{sum,n} < -I_{th}$ ,也识别为正方向故障。当发生双极短路故障时,满足  $0.5 |I_{sum,n}| < |I_{sum,p}| < 1.5 |I_{sum,n}|$ ,识别故障极为正极和负极,同时满足正极和负极故障方向识别判据,即  $I_{sum,p} > I_{th}$ ,同样识别为正方向故障。

#### 3.2.2 灵敏度判定及分析

定义保护灵敏度系数为:

$$K_{sen} = \frac{PTV_{th}}{PTV} \quad (12)$$

常规的直流线路单端保护方案具有较低的抗过渡电阻性能,尤其是在直流线路区域终端出现高阻接地故障时,将会极大地降低保护方案的可靠性和敏感性,从而使其难以识别出高阻故障。为检验所提出的保护方法在抵抗过渡电阻性能上优于常规保护方法,以区内末端 M 点发生经 0 Ω、100 Ω、300 Ω、500 Ω 过渡电阻正极接地故障为例,

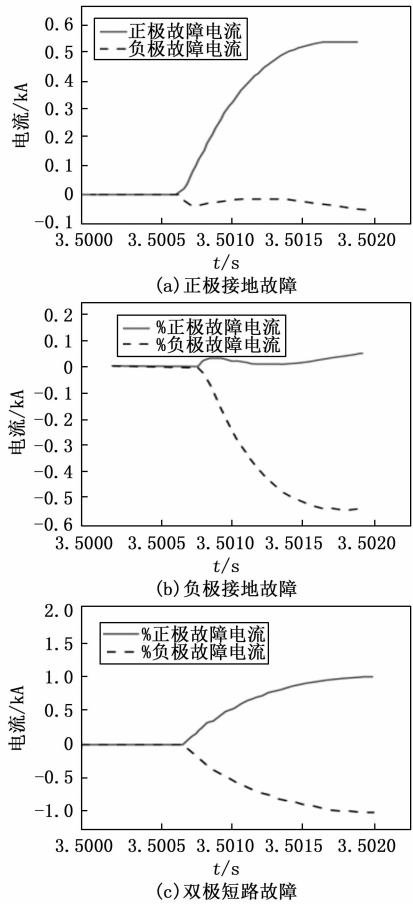


图 5 3 种类型故障时故障电流波形

进行仿真验证。限流电抗器—模故障电压仿真波形如图 6 所示,故障判别结果如表 1 所示。

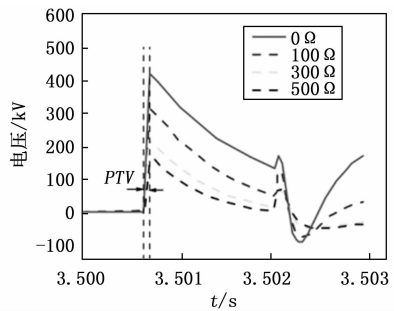


图 6 不同电阻限流电抗器故障电压波形

表 1 不同过渡电阻时的仿真结果

故障位置	过渡电阻	PTV	$K_{sen}$	判别结果
F <sub>1</sub>	0 Ω	0.05 ms	8.7	区内故障
F <sub>1</sub>	100 Ω	0.05 ms	8.7	区内故障
F <sub>1</sub>	300 Ω	0.05 ms	8.7	区内故障
F <sub>1</sub>	500 Ω	0.05 ms	8.7	区内故障

从图 6 和表 1 中可以看出,随着过渡电阻的增大,故障

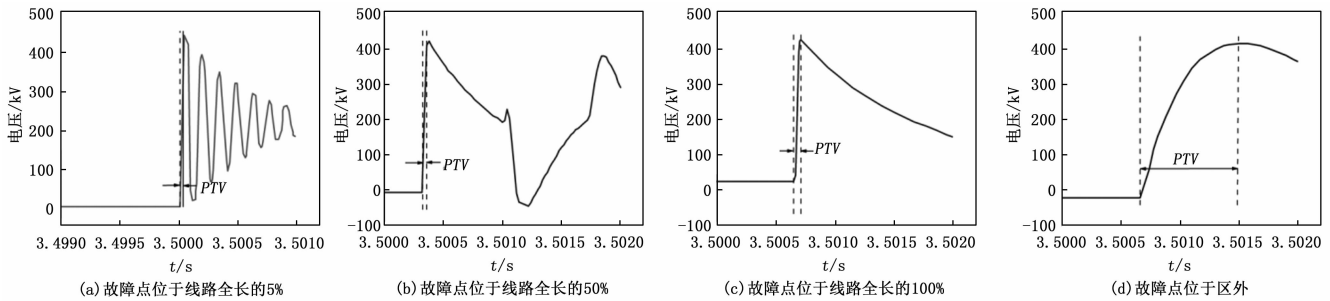


图 7 不同故障位置时的识别结果

电压的幅度逐渐减小, 这是常规单端保护方式耐过渡电阻性能差的主要原因, 同时, 在  $0.05 \text{ ms}$  的第一峰时刻不变, 灵敏度系数也一直很高。由此可以看出, 基于第一峰时间的保护准则, 其敏感性和可靠性均不会受到过渡电阻的影响, 有效地克服了常规单端保护方案在远端高阻接地时的敏感性下降以及保护拒动现象, 能较好地识别远端高阻故障, 使保护的可靠性和敏感性得到了极大的改善。

### 3.2.3 保护线路全长能力仿真分析

为了检验所提出的保护方案在整个线路长度上的有效性, 通过一个正电极的金属性接地故障实例进行了模拟, 分别设定了从线路全长的  $5\%$ ,  $50\%$ ,  $100\%$  (也就是凡点) 的范围内, 限流电抗器的一模式故障电压模拟波形, 以及故障识别的结果如图 7 与表 2 所示。

表 2 不同故障位置时的识别结果

故障位置	PTV	PTV 与 $PTV_{th}$	$K_{sen}$	判别结果
$5\%$	$0.02 \text{ ms}$	小于	21.5	区内故障
$50\%$	$0.03 \text{ ms}$	小于	14.5	区内故障
$100\%$	$0.05 \text{ ms}$	小于	8.7	区内故障
区外 $F_2$ 点	$0.84 \text{ ms}$	大于	—	区外故障

从图 7 和表 2 可以看出, 在区域不同部位发生故障时, PTV 的值都要比保护阈值小得多, 而且这些保护都能准确地识别出区域内、外的故障, 并且灵敏度系数很高。另外, 随着故障位置与线路头端的距离越近, PTV 的误差越小, 并逐渐接近 0, 这是因为故障位置离导线头越近, 线路失真对线路畸变的影响越小。而在 3.1 节的理论推导中, 忽略线路失真效应 (即不考虑线路色散时间常数  $T_d$ ) 时, 第一峰理论值为 0, 而在接近故障点时, 模拟结果接近 0, 验证了模拟的有效性。

以上结果表明: 故障类型不会影响到 PTV, 不管是在 DC 区域内还是在正向区外, 都能用本文提出的方法对区域内、外的故障进行可靠的识别。

## 4 结束语

柔性直流电网在远距离、大功率传输、清洁能源消纳等领域有着明显的优越性, 但是, 柔性直流电网的直流侧故障危害巨大, 存在着严重的过流问题, 影响了电力系统

的正常工作和系统的稳定性。本文对直流输电线路的新原理、新的布线方式进行了研究, 对 FDC 电力系统中各主要设备的工作特点、故障特点进行了分析, 并提出了一种基于暂态等效的直流输电系统故障分析方法; 研究并分析了多端 FDC 网络的故障特点, 提出了一种基于单端量保护的直流输电系统, 能够迅速地识别和隔离故障, 有利于 FDC 系统的安全、稳定运行。

1) 在故障方向判定中, 正极短路故障、负极短路故障及双极短路故障可根据判定原则准确做出判断, 验证了本文方案的准确性。

2) 在灵敏度分析中, 本文提出的保护方案不受过渡电阻的干扰, 灵敏度系数  $K_{sen} = 8.7$ , 保证了此方案的抗干扰性和灵敏性。

3) 在保护线路全长分析中, 分别设定了故障点在线路全长的  $5\%$ 、 $50\%$ 、 $100\%$  和区外故障进行验证, 准确地判别了区域内、外的故障, 且 PTV 与灵敏度系数达到预期。

尽管在动作速度、可靠性、灵敏度和选择性上都能满足保护动作的要求, 但是受工作环境的限制, 提出的保护方案在工程环境验证及抗干扰能力分析等方面仍需进一步的研究。在仿真验证中, 这些资料都是从实验室模拟模型中得到的, 对于保护方案在实际工程中的运用, 尚需进一步的探讨与检验。

### 参考文献:

- [1] 曾鑫辉, 谭建成, 文泓铸, 等. 基于行波的柔性直流输电线路保护综述 [J]. 广西电力, 2020, 43 (2): 15-21.
- [2] 王渝红, 傅云涛, 曾琦, 等. 柔性直流电网故障保护关键技术综述 [J]. 高电压技术, 2019, 45 (8): 2362-2374.
- [3] 孙鹏伟, 洪潮, 周保荣, 等. 大容量柔性直流分极接入电网方式及对控制保护系统的影响 [J]. 南方电网技术, 2020, 14 (10): 1-8.
- [4] NING HUANG, CHUNJU FAN, SHAN JIANG. Research of protection for AC transmission lines based on characteristic of grid-side inverter [J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019 (16): 3240-3245.
- [5] CHENG LV, NENGLING TAI, XIAODONG ZHENG. Protection principle for MMC-HVDC DC lines based on boundary

- signals [J]. The Journal of Engineering, 2017, 2017 (13): 961-965.
- [6] XIONG Y, CHEN M, LEI Z, et al. Intelligent Diagnosis Method of Flexible DC Power Module using a New Test Platform [C] //2022 IEEE 5th International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE), IEEE, 2022; 361-366.
- [7] HU X, CHEN K, WANG T, et al. Analysis of typical fault characteristics of modular multilevel converter for flexible HVDC transmission [C] //Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2022, 2369 (1): 012067.
- [8] 董朝武, 李 哲, 蒲 莹, 等. 一种应用于柔性直流输电控制保护系统的波特率动态自适应通信技术 [J]. 电力建设, 2022, 43 (7): 57-62.
- [9] 马浩宇, 秦骏达, 刘 近, 等. 用于可视化编程的柔性直流控制保护系统研制 [J]. 电测与仪表, 2020, 57 (17): 129-135.
- [10] 薛士敏, 孙亚冰, 刘白冰, 等. 基于 Marti 模型的柔性直流输电系统纵联行波差动保护 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39 (21): 6288-6300.
- [11] 高 飘, 郑晓冬, 晁晨栩, 等. 基于边界暂态能量的多端柔性直流输电线路保护 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45 (17): 171-179.
- [12] 赵冠琨, 贾 科, 陈金锋, 等. 基于断路器重合闸的柔性直流输电线路单端故障测距方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (7): 48-56.
- [13] 陈 威, 汪娟娟, 叶运铭, 等. 柔性直流输电系统交流侧中高频谐振附加阻尼抑制措施 [J]. 电力系统自动化, 2021, 45 (18): 151-161.
- [14] 李国庆, 徐亚男, 江守其, 等. 海上风电经柔性直流联网系统受端交流故障穿越协调控制策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50 (7): 111-119.
- [15] 杨张斌, 阮 琳, 雷 肖, 等. 海上风电柔性直流换流阀端间绝缘试验异常分析及改进方法 [J]. 电力建设, 2021, 42 (12): 68-74.
- [16] 杨仁妍, 张 琛, 蔡 旭, 等. 海上风电-柔直并网系统自同步电压源控制与电网故障穿越 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42 (13): 4823-4835.
- [17] 白晋川, 张旭光. 海上平台柔性直流技术直流控制保护配置研究 [J]. 南方能源建设, 2018, 5 (2): 109-114.
- [18] 何 冰, 谢天祥, 胡园园, 等. 基于批量匹配算法模型的配电网故障诊断方法 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (8): 19-24.
- [19] 张鑫宇, 樊艳芳, 马 健, 等. 基于拟合电流斜率特性的柔性直流配电网纵联保护方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49 (18): 128-136.
- [20] 黄威博. 模块化多电平柔性直流输电线路保护方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [21] 朱光彬. 基于时频分析法的柔性直流输电线路保护研究 [D]. 济南: 济南大学, 2021.
- [22] 刘海金, 李 斌, 温伟杰, 等. 柔性直流系统的线路保护关键技术与展望 [J]. 电网技术, 2021, 45 (9): 3463-3480.
- [23] 张 烁. 柔性直流电网直流线路故障处理关键技术研究 [D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [24] 陈超超. 柔性直流电网直流线路快速保护研究 [D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [25] 朱莹月. 中压柔性直流配电网的线路保护策略研究 [D]. 重庆: 重庆理工大学, 2022.
- [26] 郭 伟, 贾永飞, 赵 欣. 基于改进型 LS-SVM 技术的煤泥浮选智能优化控制方法 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (12): 119-124.
- [27] 赵 博, 满益明, 邹 彦, 等. 长期在轨推进系统故障诊断实时仿真技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (9): 28-33.
- [28] 汤兰西, 董新洲, 施慎行, 等. 柔性直流电网线路超高速行波保护原理与实现 [J]. 电网技术, 2018, 42 (10): 3176-3186.
- [29] 张 娜, 方舟, 张元明, 等. 张北柔性直流保护通道传输时延研究与应用 [J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16 (9): 55-60.
- [30] 王 鑫. 基于 MMC 的柔性直流输电系统直流侧保护研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [31] 王 波. 高压直流线路保护特性分析与基于特勒根拟功率定理保护研究 [D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [32] 漆炜之, 崔 玉, 王 业, 等. 特高压直流保护高仿真度建模和动作行为评价 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2022, 55 (1): 61-70.
- [33] 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.
- [34] GUO X. Analysis of influence of distributed photovoltaic on 10 kV line relay protection [C] //Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2022, 2360 (1): 012027.
- [35] LI Y, SUN X, CAI H, et al. Research on grid-connected distributed generation considering relay protection [C] //Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2022, 2310 (1): 012031.
- [36] 石万里, 王荣超, 胡付有. 特高压多端柔性直流线路及汇流母线保护配置及检修隔离措施研究 [J]. 电工技术, 2019 (24): 76-78.
- [37] 吴水明, 吉志远, 王震宇, 等. 基于 Dueling-DDQN 的电力信息网络入侵检测算法 [J]. 计算机与现代化, 2021 (12): 43-47.
- [38] HE J, CHEN K, LI M, et al. Review of protection and fault handling for a flexible DC grid [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5: 1-15.