

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211262

基于零模电流相关性的直流配电网单极接地选线方法

左鹏飞¹, 秦文萍¹, 夏福良², 陈晓乾¹, 杨乐¹

(1. 太原理工大学电力系统运行与控制山西省重点实验室, 山西 太原 030024;

2. 国网晋中市太谷区供电公司, 山西 晋中 030800)

摘要: 柔性直流配电系统最常见的故障是单极接地故障。发生单极接地故障后, 系统出现故障极与非故障极电压不平衡的现象, 对系统安全稳定运行产生威胁, 对保护方案的快速性和可靠性提出很高要求。针对此问题, 首先分析了柔性直流配电系统线路发生单极接地故障后的故障电流特征, 然后验证了故障时线路两端零模电流分量的相关性, 最后提出基于线路两端零模电流量相关性的柔性直流配电系统单极接地选线方案。该保护方案充分利用故障后系统固有暂态特征, 无需利用边界元件构造边界特性。在实时数字仿真器(Real Time Digital simulator, RTDS)上搭建基于模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的柔性直流配电系统电磁仿真模型验证所述方案的有效性。结果表明该选线方案能够实现快速、可靠识别故障线路, 且耐受过渡电阻、噪声、传输延时的能力强, 不受交流侧故障影响。

关键词: 单极接地故障; 配电系统; 零模电流; 相关性; 模块化多电平换流器

Single-pole ground selection method for DC distribution networks based on zero-mode current correlation

ZUO Pengfei¹, QIN Wenping¹, XIA Fuliang², CHEN Xiaoqian¹, YANG Le¹

(1. Shanxi Key Laboratory of Power System Operation and Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. State Grid Jinzhong Taigu District Power Supply Company, Jinzhong 030800, China)

Abstract: The most common fault of a flexible DC distribution system is the single-pole grounding fault. After the occurrence of such a fault, the system will have voltage imbalance between the fault and non-fault poles. This poses a threat to the safe and stable operation of the system, and demonstrates the need for the speed and reliability of the protection scheme. This paper first analyzes the fault current characteristics of a flexible DC distribution system after a single-pole grounding fault, and then verifies the correlation of zero-mode current components at both ends of the line when the fault occurs. Finally, a single-pole grounding line selection scheme based on the correlation of zero-mode current at both ends of the line is proposed. This protection scheme makes full use of the inherent transient characteristics of the system after failure and does not need to use boundary elements to construct boundary characteristics. A modular multilevel converter (MMC)-based electromagnetic simulation model of a flexible DC distribution system is built on a real time digital simulator (RTDS) to verify the effectiveness of the scheme. The results show that the proposed route selection scheme can identify fault lines quickly and reliably, and has a strong capability to withstand transition resistance, noise and transmission delay, and is not affected by AC side faults.

This work is supported by the Shanxi Province Science and Technology Major Project (No. 20181102028).

Key words: unipolar earth fault; distribution system; zero mode current; correlation; modular multilevel converter

0 引言

柔性直流配电系统具有换流环节少、控制灵活、线路损耗低、便于分布式电源及储能设备的接入、

基金项目: 山西省科技重大专项资助(20181102028); 国网山西省电力公司科技项目资助(520530200014)

电能质量高等优点。直流配电网已逐渐成为未来直流技术和配电系统发展的重要方向^[1-5]。

然而, 直流配电系统的低惯性、弱阻尼特性导致系统故障电流大, 故障过程发展极快, 再考虑到电力电子装置的耐受冲击能力, 要求系统中的保护装置能够在 3~5 ms 内快速识别故障, 并有选择性地切除, 防止事故扩大和设备受损, 以满足电力系统

安全、稳定运行的要求^[6-8]。

目前,针对直流配电网的保护方案大多借鉴了交流侧的保护原理,如过流保护、微分欠压保护、差动保护等。其中:过流保护^[9]、微分欠压保护^[10-11]易受过渡电阻和电力系统运行方式的影响,难以准确识别故障;电流差动保护^[12-13]需要数据严格同步,且易受通信和直流线路分布电容的影响;行波保护^[14-15]抗干扰能力低、对采样率要求较高。为限制故障电流,文献^[16-17]通过线路两端装设的直流电抗器来构造保护边界,利用电抗器两侧故障暂态特性的差异进行故障识别,但并非所有的系统都允许安装电抗器,且如果电抗值较大可能会降低直流传输效率。文献^[18]利用固有模态能量熵来提取故障电流特征量构建保护判据,但该方案基于双端系统,其在 MMC-MVDC 中的适用性还有待研究。为了避免单极接地故障时故障极因耦合作用对非故障极产生影响,有学者提出对直流线路进行解耦,通过对故障分量进行模量分解,分析其暂态特征,从而设计单极接地保护方案。文献^[19]利用故障发生时会有零模分量出现,通过检测零模故障分量的多少来进行故障极的识别,但是发生单极高阻接地故障后故障特征不明显,故障识别很大可能会失效。文献^[20]利用标准拟合函数对故障发生后采集到的故障零模电流进行拟合,实现应对高阻接地故障的自适应行波保护,但是其参数依赖于提前对过渡电阻的区间进行估计,参数变化的不确定性较大。文献^[21]基于参数识别原理,发生故障后利用故障零模网络列写故障定位时域微分方程,然后运用最小二乘法进行优化来求解故障距离,但最小二乘法默认是线性估计,使用时有一定的局限性。

综上所述,目前直流配电系统单端量保护易受过渡电阻影响,双端量保护易受通信和线路分布电容影响,上述基于零模分量的保护方案虽可以避免线路耦合对故障识别的影响,但是其适用范围也都存在一定的局限性,针对上述基于直流配电系统单极接地保护方案的不足,本文首先分析了直流配电系统线路发生单极接地故障后的故障电流特征,然后利用故障时故障线路与非故障线路两端零模电流相关性区分区内、外故障,并据此提出了基于线路零模电流相关性的柔性直流配电系统单极接地故障选线方案。最后,通过实时数字仿真器(Real Time Digital simulator, RTDS)搭建电磁仿真模型,验证了所提选线方案能快速有效地实现接地故障选线。

1 系统拓扑及接地方式

典型直流配电系统结构如图 1 所示。交流系统

通过联接变压器与 MMC 换流器相连,中压直流配电系统采用伪双极接线方式。鉴于下文所用保护方案是基于正、负极线路两端电流而设计的,所以直流线路 L1—L6 正、负极两端均装设保护装置, f1—f5 分别为可能的接地故障点。本文采用中压直流配电系统常见的主从控制策略,设 MMC1 采用定直流电压、定交流电压控制, MMC2 采用定有功功率、定交流电压控制^[22], PV 采用 MPPT 控制^[23]。

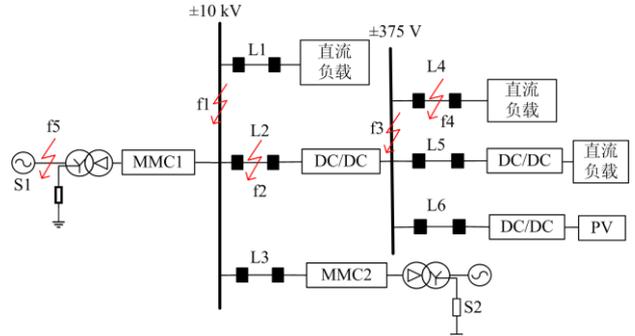


图 1 柔性直流配电网拓扑结构

Fig. 1 Topology structure of flexible DC distribution network

1.1 线路电流模量分解原理

本文规定线路电流正方向为母线流向线路。当输电线路发生单极接地故障时,故障点处产生的故障行波向故障线路两侧进行传播,再加上输电线路的电磁耦合和电容耦合的作用,在非故障极线路上出现感应的故障电气分量,导致正负极电气量不对称。为消除极间线路因耦合作用而产生的影响^[24],本文引入模量分解法对输电线路的故障分量进行分解,文献^[25]介绍了一种适用于直流线路电气量的解耦矩阵,如式(1)和式(2)所示。

$$S = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_0 \end{bmatrix} = S^{-1} \begin{bmatrix} X_P \\ X_N \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_P \\ X_N \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: X_P 、 X_N 分别对应直流线路正、负极电气量; X_1 、 X_0 分别对应一、零模量; S 为解耦矩阵; S^{-1} 为解耦逆矩阵。

联立式(1)和式(2)可得

$$I_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} (I_P + I_N) \quad (3)$$

由式(3)可知,正、负极电气量相加得到零模电气量,这意味着零模电气量对应的是正、负极电气量中方向相同的成分,即零模电流在正、负极中的流通方向是相同的,在两极线路中不能形成环流,只能流入大地。当系统处于正常运行状态或发生双极短路故障时,线路上无零模分量,仅在发生单极

接地故障时零模分量才会出现^[26]。

1.2 故障电流零模分量特性分析

正常运行时，线路电流如图 2 所示。

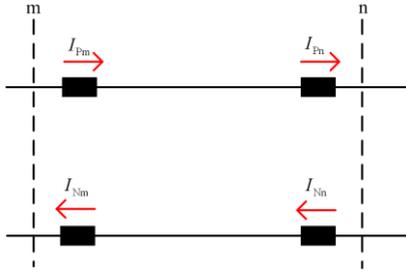


图 2 正常运行网络电流示意图

Fig. 2 Diagram of network current in normal operation

由于直流电流没有相位，只有极性，正常运行时正、负两极线路 m、n 两侧电流为一正一负，且电流幅值大小相等。结合式(3)可以得出式(4)的结论，即正常运行时，线路两侧零模电流均为 0。

$$I_0 = \frac{\sqrt{2}}{2} (I_P + I_N) = 0 \quad (4)$$

当发生故障时，线路两侧零模电流幅值计算如式(5)所示。

$$I_{m0} = I_{Pm} + I_{Nm} = \Delta I_{Pm} + \Delta I_{Nm} \quad (5)$$

式中： I_{Pm} 与 I_{Nm} 分别为故障时 m 侧的实际电流值； ΔI_{Pm} 与 ΔI_{Nm} 分别为故障发生时对应电流的突变量。

$$I_{n0} = I_{Pn} + I_{Nn} = \Delta I_{Pn} + \Delta I_{Nn} \quad (6)$$

式中： I_{Pn} 与 I_{Nn} 分别为故障时 n 侧的实际电流值； ΔI_{Pn} 与 ΔI_{Nn} 分别为故障发生时对应电流的突变量。

当线路发生区内故障时，以正极接地故障为例，故障电流如图 3 所示。

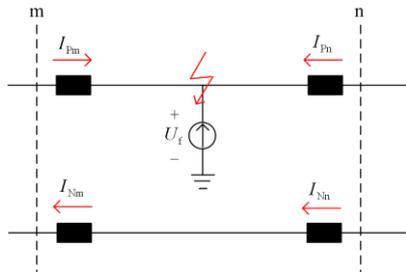


图 3 区内故障附加网络

Fig. 3 Additional internal fault network

当线路发生单极接地故障时，故障极电流突变量的幅值远大于非故障极。因此，由图 3 结合式(3)、式(5)和式(6)可以得出，当发生区内正极接地故障时，线路两侧零模电流幅值为

$$\begin{cases} I_{m0} = I_{Pm} + I_{Nm} = \Delta I_{Pm} + \Delta I_{Nm} > 0 \\ I_{n0} = I_{Pn} + I_{Nn} = \Delta I_{Pn} + \Delta I_{Nn} > 0 \end{cases} \quad (7)$$

因此，线路两侧零模电流的关系可以用正比例系数 k_1 表示，即

$$I_{m0} = k_1 I_{n0} \quad (8)$$

同理，发生区内负极接地故障时，线路两侧零模电流幅值为

$$\begin{cases} I_{m0} = I_{Pm} + I_{Nm} = \Delta I_{Pm} + \Delta I_{Nm} > 0 \\ I_{n0} = I_{Pn} + I_{Nn} = \Delta I_{Pn} + \Delta I_{Nn} > 0 \end{cases} \quad (9)$$

因此，线路两侧零模电流的关系可以用正比例系数 k_2 表示，即

$$I_{m0} = k_2 I_{n0} \quad (10)$$

当线路发生区外故障时，以正极接地故障为例，故障电流如图 4 所示。

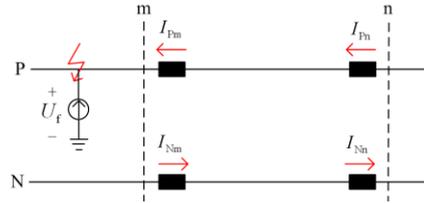


图 4 区外故障附加网络

Fig. 4 Additional external fault network

由图 4 结合式(3)、式(5)和式(6)可以得出，当线路发生区外正极接地故障时，线路两侧零模电流幅值为

$$\begin{cases} I_{m0} = I_{Pm} + I_{Nm} = \Delta I_{Pm} + \Delta I_{Nm} < 0 \\ I_{n0} = I_{Pn} + I_{Nn} = \Delta I_{Pn} + \Delta I_{Nn} > 0 \end{cases} \quad (11)$$

因此，线路两侧零模电流的关系可以用负比例系数 k_3 表示，即

$$I_{m0} = k_3 I_{n0} \quad (12)$$

综合以上分析，不同故障类型情况下，线路两侧零模电流之间的关系如表 1 所示。

表 1 不同故障类型线路两侧零模电流比例关系

Table 1 Proportional relationship of zero mode current on both sides of line with different fault types

故障类型	线路两侧零模电流比例关系 k
区内正极故障	正
区内负极故障	正
区外正极故障	负
区外负极故障	负

当线路发生单极接地故障时，线路上零模电流会出现暂态振荡过程，为实现保护快速、可靠地切除故障，就要充分利用暂态过程中的暂态信息量。

以图 1 中线路 L2 发生正极接地故障为例, 当 L2 发生正极接地故障时, L1 和 L2 两侧保护安装处的暂态零模电流仿真波形如图 5 所示(具体仿真参数见第 4 节)。

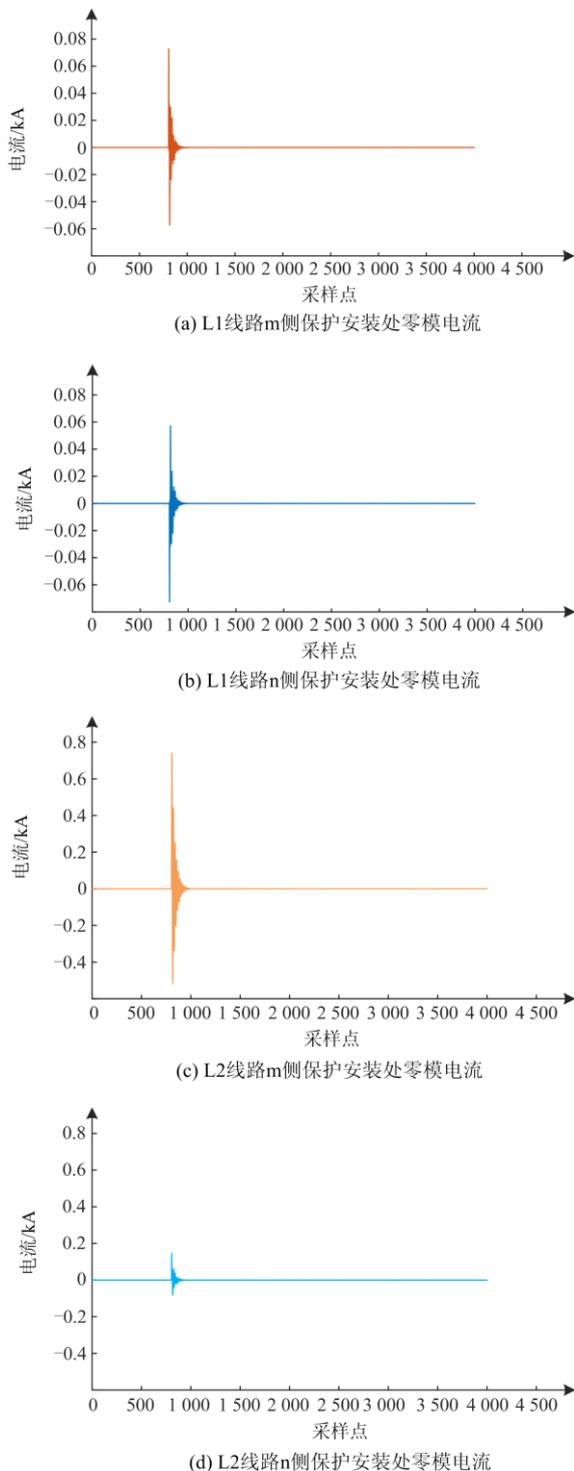


图 5 L2 发生正极接地故障时 L1 与 L2 零模电流仿真图

Fig. 5 L1 and L2 zero mode current simulation graph of positive ground fault at L2

2 暂态故障电流提取及其相关性系数确定

2.1 暂态故障电流提取

线路发生单极接地故障后, 故障过程会出现暂态^[27-28], 而故障过程中的暂态电流信号包含着丰富的故障信息, 提取其对应的暂态故障特征量有助于快速、可靠地切除故障。

常见的影响直流侧故障暂态特征的因素有很多, 例如系统电压等级、控制方式、拓扑结构、接线方式、故障类型、线路参数、过渡电阻及信号噪声等。

高压直流系统控制方式和线路参数等与中低压直流系统是不同的, 本文研究聚焦于中低压直流配电网和与之对应的架空线路。对于中低压直流系统而言, 对故障暂态特征主要的影响因素有故障类型、过渡电阻、信号噪声、线路参数和拓扑结构等。线路参数中最常见的影响因素是线路分布式电容大小, 但本文针对的是单极接地故障, 分布式电容大小对故障暂态特征影响不大, 所以本文未考虑其影响。本文研究主要考虑了过渡电阻、信号噪声、拓扑结构的影响。过渡电阻值越小, 暂态电流越大, 暂态持续时间越长, 反之, 暂态电流越小, 暂态持续时间越短; 信号噪声会增强暂态电流的波动性, 噪声越大, 暂态电流的波动越大, 反之, 暂态电流的波动越小; 拓扑结构中, 两端供电网及环网供电会使故障线路的暂态电流增大, 暂态持续时间变长。

为了更好地表征区内外故障电流的差异, 利用滑动平均滤波^[29]方法提取直流线路暂态电流特征量, 判别暂态故障电流变化趋势。滑动平均滤波是一种具有非递归性质的低通滤波器, 与传统低通滤波器相比其响应速度更快, 滤波精度更高。滑动平均滤波与传统滤波两种方法提取暂态故障电流的比较结果如图 6 所示。滑动平均滤波方法在一些要求在线快速处理等实时性要求较高的应用场合中有广阔的应用前景。

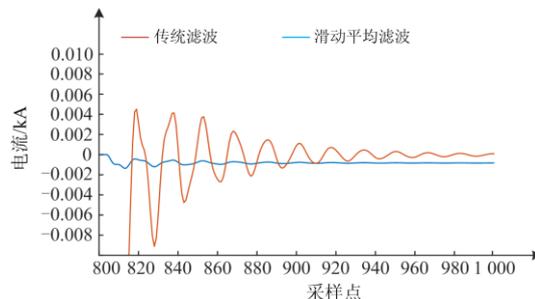


图 6 滑动平均滤波与传统滤波两种方法提取暂态故障电流比较

Fig. 6 Comparison of moving average filtering and traditional filtering for extracting transient fault current

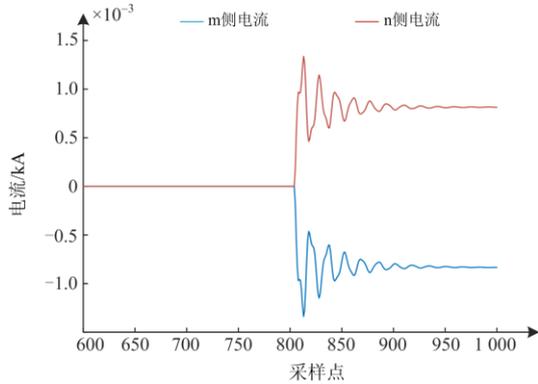
直流线路电流经滑动平均滤波后输出的离散表达式为

$$I_{\text{MAF}}(k) = \frac{1}{N} \sum_{j=k-(N-1)}^k I(j) \quad (13)$$

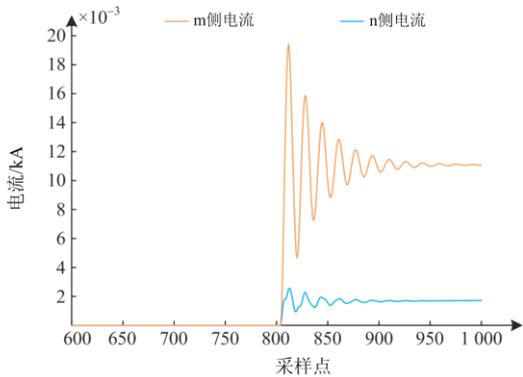
式中： N 为滑动平均滤波的数据窗点数； $I(j)$ 为当前时刻 j 的线路零模电流采样点。

从图6可以看出，与传统的低通滤波提取直流线路暂态电流特征量相比，滑动平均滤波可以更好地避免电流幅值变化带来的阈值整定困难问题。

L2发生正极接地故障后，L1和L2左右两侧保护安装处经过滑动平均滤波后提取的暂态零模电流波形如图7所示(仿真参数见第4节)，可以看出滑动平均滤波后的电流可以很好地表征区内外故障暂态电流的差异。



(a) L1两侧保护安装处提取的暂态零模电流



(b) L2两侧保护安装处提取的暂态零模电流

图7 L2发生正极接地故障时L1与L2提取的暂态零模电流波形比较

Fig. 7 Comparison of the transient zero mode current waveforms extracted from L1 and L2 of positive ground fault at L2

2.2 暂态电流相关性系数确定

基于以上区内外故障时零模电流的不同，可以利用体现信号间相关性的系数表征故障的差异性。

在表征电流信号间变化趋势的同时考虑故障电流的符号特性，能够更加准确地表征电流信号间的相关性。本文采用柯西不等式表征故障后线路两端零模电流的相关性。

柯西不等式概率论形式为

$$|\sum x(k)y(k)| \leq \sqrt{\sum x(k)^2 \sum y(k)^2} \quad (14)$$

式中， $x(k)$ 、 $y(k)$ 分别为两个不同变量同一时刻的采样值。

式(14)可以简化为

$$\rho(x, y) = \frac{\sum_{k=1}^{N_1} (x(k)y(k))}{\sqrt{\sum_{k=1}^{N_1} x^2(k) \sum_{k=1}^{N_1} y^2(k)}} \quad (15)$$

相关性系数 ρ 是一个无量纲的数值， $\rho \in [-1, 1]$ 。若 $0 < \rho < 1$ ，两变量间存在正相关关系；若 $-1 < \rho < 0$ ，则两变量之间存在负相关关系； $\rho = 0$ 时，表示两变量完全无关； $\rho = 1$ (或者 -1)时，两变量间正(负)相关性最强。

3 基于零模电流相关性的单极接地选线方案

由第1节、第2节可知，在直流配电系统发生单极接地故障后，故障线路两端零模电流呈正相关，非故障线路两端零模电流呈负相关。在此基础上，本文提出基于零模电流相关性的单极接地选线方案。

3.1 故障启动判据

为避免系统投入时MMC自启动过程^[30]以及正常运行时系统扰动的影响，需要设置故障启动判据。根据文献^[30]的描述，在线路发生单极接地故障或其他情况下，正极线路与负极线路电压变化情况如表2所示。

表2 各种情况下正、负极线路电压变化关系

Table 2 Voltage variation of positive and negative lines under various conditions

故障或其他情况	dV_p/dt	dV_N/dt
正极接地	-	-
负极接地	+	+
MMC自启动	+	-
双极短路	-	+
正常运行	+/-	-/+

由表2可以看出，只有发生单极接地故障时，线路正、负极电压变化率方向相同，其他情况下正、负极电压变化率方向均相反。因此单极接地故障启动判据可以设计为

$$(dV_p/dt)(dV_N/dt) > 0 \quad (16)$$

式中: V_p 为正极线路保护安装处对地电压; V_N 为负极线路保护安装处对地电压。为避免雷击等扰动因子的影响, 当采样频率为 20 kHz 时, 启动判据连续 3 个采样点均成立时认为发生接地故障。

3.2 故障选极判据

在正极线路发生单极接地故障后, 无论故障发生在线路何处, 过渡电阻值多大, 连在同一条母线上的故障线路与非故障线路正极线路保护安装处暂态电压均振荡变为 0, 而负极线路保护安装处暂态电压均振荡变为原来电压的 2 倍, 但两极之间电压保持不变、振荡持续时间均很短, 且故障线路振荡持续时间小于非故障线路。同理, 在负极线路发生单极接地故障后, 无论故障发生在线路何处, 过渡电阻值多大, 连在同一条母线上的故障线路与非故障线路负极线路保护安装处暂态电压均振荡变为 0, 而正极线路保护安装处暂态电压均振荡变为原来电压的 2 倍, 两极之间电压仍保持不变、振荡持续时间仍很短, 且故障线路振荡持续时间仍小于非故障线路, 因此, 故障选极判据设计为

$$D_k = \begin{cases} 1 & |V_p| < 0.8U_N \cap |V_N| > 1.2U_N, \text{ 正极故障} \\ -1 & |V_N| < 0.8U_N \cap |V_p| > 1.2U_N, \text{ 负极故障} \end{cases} \quad (17)$$

3.3 故障选线判据

本文的选线方案需记录一定时长的故障电流波形, 以便提取故障暂态特征量。而暂态时间的长短决定于过渡电阻的大小, 过渡电阻值越小, 暂态过程持续时间将越长, 一定时长内能够提取到的暂态信息量就越少。经过 RTDS 仿真验证(具体仿真参数见第 4 节), 本文所搭建电磁仿真模型中直流线路发生金属性接地后, 故障零模电流达到第一个峰值所用时间约为 0.27 ms, 达到第二个峰值时间约为 0.9 ms, 再综合考虑暂态特征量的提取效果以及相关系数计算时间长短, 最终决定选定保护启动后 3 ms 内 60 个零模电流采样点的波形作为故障电流波形。此外, 还需记录故障发生之前一段时间正常的电流波形与故障后的电流波形共同组成样本电流波形, 正常波形选取约 10 ms 内 200 个采样点。因此本文中采样点包括正常波形采样点、启动判据采样点和故障波形采样点共计 265 个采样点。

根据表 1, 故障选线判据可以设置为

$$\begin{cases} \rho > \rho_{\text{set}}, \text{ 区内故障} \\ \rho < \rho_{\text{set}}, \text{ 区外故障} \end{cases} \quad (18)$$

式中, ρ_{set} 为设定的相关性系数阈值, 以区分不同故障类型。通过式(15)计算求得相关性系数, 并与式(18)设定的相关性系数阈值进行比较, 若大于阈值, 则满足相关性要求, 可以判定发生区内故障,

若不满足, 则判定为发生区外故障。

结合仿真实验(具体仿真参数见第 4 节), 区内故障时最小相关性系数为 0.927 4, 计及线路参数、电压、电流互感器传变等误差因素的影响, 按照整定系数为 1.5(实际工程中可根据需要进行调整)进行相关性系数阈值整定, 将相关性系数阈值设定为 0.6(0.9274/1.5 = 0.618 27, 四舍五入为 0.6)。仿真结果表明将相关性系数阈值设定为 0.6, 不仅能正确识别线路上所有区内和区外故障, 还可满足保护动作对可靠性和灵敏性的要求。

3.4 基于零模电流相关性的单极接地故障保护方案流程图

根据本文 3.1—3.3 节所述原理, 基于零模电流相关性的单极接地故障保护方案流程图如图 8 所示。当保护启动判据满足后启动, 故障 3 ms 后记录 265 个采样点的电流数据, 利用故障选极判据实现故障选极; 接着, 对零模电流进行滑动滤波处理; 最后, 计算各线路的相关性系数值和和阈值比较, 实现故障选线。

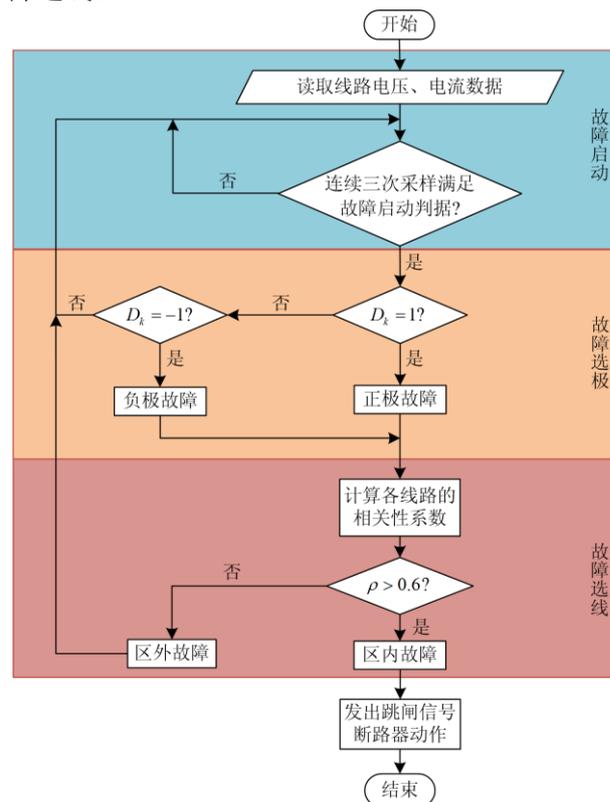


图 8 单极接地故障保护方案流程图

Fig. 8 Flow chart of single-pole ground fault protection scheme

4 仿真验证

本文利用 RTDS 实时仿真软件搭建图 1 所示柔性直流配电网全电磁仿真模型, 系统参数见表 3,

仿真采样频率为 20 kHz。

表 3 系统仿真参数

Table 3 System simulation parameters

系统参数	数值
中压直流母线电压/kV	±10
低压直流母线电压/V	±375
MMC1 额定交流电压/kV	10
MMC2 额定功率/MW	4
MMC 子模块电容/μF	4 800
线路电感/(mH km ⁻¹)	0.72
线路电阻/(Ω km ⁻¹)	0.125
线路电容/(μF km ⁻¹)	0.618
L1 长度/km	10
L2 长度/km	10
L3 长度/km	10
L4 长度/km	10
L5 长度/km	15
L6 长度/km	8

当线路发生单极接地故障时，与故障线路连接在同一直流母线上的非故障线路的故障启动判据也会启动，然后保护装置会按照保护方案流程进行选极、选线判断。

4.1 选极判据验证

4.1.1 L2 发生正极接地故障时选极判据验证

在 0.4 ms 时，设 L2 发生正极接地故障，过渡电阻为 5 Ω。各线路 D_k 值如表 4 所示。

表 4 L2 正极接地故障时各线路 D_k 值

Table 4 D_k values of all lines in case of L2 positive ground fault

线路	L1	L2	L3	L4	L5	L6
D_k 值	1	1	1	0	0	0
选极结果	正极	正极	正极	无故障	无故障	无故障

由表 4 中各线路 D_k 值可以得出，当 L2 发生正极接地故障时，与线路 L2 共同接于中压直流母线的线路 L1、L2、L3 被判定为正极线路发生故障，而 L2 下游线路 L4、L5、L6 被判定为无故障发生。

4.1.2 L4 发生负极接地故障时选极判据验证

在 0.4 ms 时，设 L4 发生负极接地故障，过渡电阻为 5 Ω。各线路 D_k 值如表 5 所示。

表 5 L4 负极接地故障时各线路 D_k 值

Table 5 D_k values of all lines in case of L4 negative ground fault

线路	L1	L2	L3	L4	L5	L6
D_k	0	0	0	-1	-1	-1
选极结果	无故障	无故障	无故障	负极	负极	负极

由表 5 中各线路 D_k 值可以得出，当 L4 发生负极接地故障时，与线路 L4 共同接于低压直流母线的线路 L4、L5、L6 被判定为负极线路发生故障，

而 L4 上游线路 L1、L2、L3 被判定为无故障发生。

4.2 选线方案验证

4.2.1 L2 发生正极接地故障时选线结果验证

在 0.4 ms 时，设 L2 发生正极接地故障，过渡电阻为 5 Ω。对于故障线路 L2，左右两端故障启动判据均在故障发生后约 2 个采样点(0.1 ms)启动，保护在 0.25 ms 后启动，故障 3 ms 后，提取到 265 个采样点的电流数据，相关性系数的计算时间约为 0.13 ms，保护在 3.43 ms 后动作。

由图 9 可以看出，当 L2 发生正极接地故障时，线路 L2 相关性系数值为 0.996 7，满足区内故障选线判据，可以准确识别出线路 L2 发生区内故障，其他线路相关性系数值满足区外故障选线判据，故障选线结果为发生区外故障。

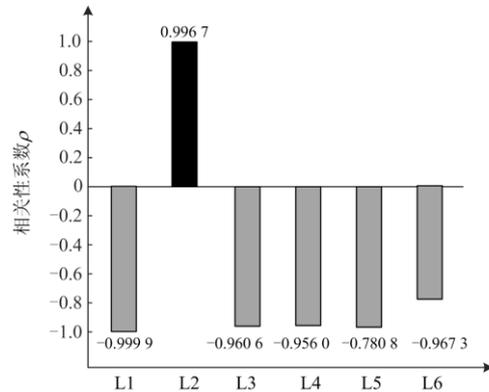


图 9 L2 正极接地故障时各线路相关性系数值

Fig. 9 Phase relation values of all lines in case of L2 positive ground fault

4.2.2 L4 发生负极接地故障时选线结果验证

在 0.4 ms 时，设 L4 发生负极接地故障，过渡电阻为 5 Ω。左右两端故障启动判据均在故障发生后约 0.2 ms 启动，保护在 0.35 ms 后启动，故障 3 ms 后，提取到 265 个采样点的电流数据，算法计算时间为 0.15 ms，保护在 3.55 ms 后动作。

由图 10 可以看出，当 L4 发生负极接地故障时，线路 L4 相关性系数值为 0.977 5，满足区内故障选线判据，可以准确识别出线路 L4 发生区内故障，其他线路相关性系数值满足区外故障选线判据，故障选线结果为发生区外故障。

4.3 选线方案灵敏度分析

本节在以下 4 种典型情况下进行仿真，分析选线方案的灵敏度。

情况 1: 经不同过渡电阻接地(以 L2 正极接地为例);

情况 2: 线路正负极电流采样信号存在不同程

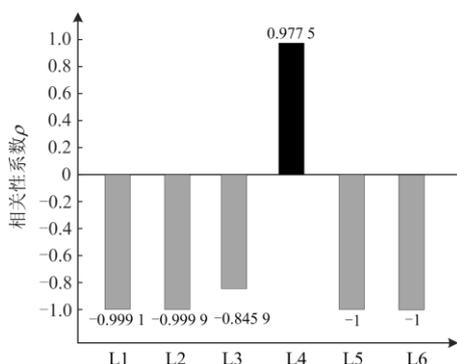


图 10 L4 负极接地故障时各线路相关性系数值

Fig. 10 Phase relation values of all lines in case of L4 negative ground fault

度的传输延时(以 L2 发生正极接地故障为例);

情况 3: 线路正负极电流采样信号叠加不同程度的噪声(以 L2 为例);

情况 4: 交流线路发生接地故障。

4.3.1 情况 1 选线方案灵敏度分析

表 6 为情况 1 故障启动判据启动后各线路相关性系数值, 当中压直流线路发生单极接地故障时, 低压直流线路的电压由于 DC/DC 变换器的隔离作用, 低压直流线路的电压保持不变, 低压直流线路上保护装置的故障启动判据不会启动, 因此只列出中压直流线路 L1、L2 和 L3 的相关性系数值, 考虑到中低压直流配电网过渡电阻最大一般仅为十几欧姆^[31], 因此本文选取过渡电阻最大值为 20Ω 。从表 6 可以看出, 在不同的过渡电阻值情况下, 本文选线方案均能准确识别故障线路。

表 6 L2 正极经不同过渡电阻接地故障选线结果

Table 6 Line selection results under different transition resistances of L2 positive ground fault

过渡电阻/ Ω		0	5	10	20
相关性系数	L1	-0.999 9	-0.999 9	-0.999 9	-0.999 9
	L2	0.995 9	0.995 9	0.997 2	0.998 3
	L3	-0.993 8	-0.988 1	-0.989 6	-0.946 8
选线结果		L2	L2	L2	L2

由表 6 中各线路相关性系数值可以得出: 线路 L2 正极经不同过渡电阻接地情况下其相关性系数值

表 8 L2 电流采样信号叠加不同程度噪声故障选线结果

Table 8 Sampling signal of L2 current is superimposed with the fault line selection results of different degrees of noise

故障类型	L2 正极接地 5Ω		L2 负极接地 15Ω		10 kV 母线正极接地 10Ω		375 V 母线负极接地 20Ω		
	信噪比/dB	30	50	30	50	30	50	30	50
相关性系数	L1	-0.999 9	-0.999 9	-0.999 9	-0.999 9	-0.999 9	-0.999 9	-0.999 9	-0.999 9
	L2	0.995 9	0.995 9	0.997 9	0.997 9	-1	-1	-1	-1
	L3	-0.969 2	-0.911 4	-0.697 3	-0.849 4	-0.9843	-0.982 8	-0.960 0	-0.9917
选线结果		L2	L2	L2	L2	区外	区外	区外	区外

均满足区内故障选线判据, 并且过渡电阻值越大, 其相关性越强, 更加有利于准确判定出线路 L2 发生区内故障, 而线路 L1、L3 选线结果判定为发生区外故障。

4.3.2 情况 2 选线方案灵敏度分析

表 7 为 L2 发生正极接地故障时电流采样信号存在不同程度的传输延时对选线方案的影响。传输延时考虑线路距离长短不一, 导致采样数据传输到处理中心的通信延时。在通信延时方面, 若配置专用光纤通信, 光纤中信号的传输速率约为 $4.9 \text{ km}/\mu\text{s}$, 而文中主要针对的是中低压直流配电网, 线路距离较短, 因此考虑最大通信延时为 0.3 ms 。可以看出电流采样信号存在不同程度的传输延时对保护方案没有影响, 保护能可靠识别故障线路。

表 7 L2 正极接地故障时电流采样信号存在不同程度传输延时故障选线结果

Table 7 Fault line selection results show that the current sampling signal has different transmission delays of L2 positive ground fault

延时时间/ms	相关性系数 ρ	选线结果
0.05	0.990 8	L2
0.1	0.975 2	L2
0.2	0.943 5	L2
0.3	0.927 4	L2

由表 7 中相关性系数值可以得出: 线路 L2 电流采样信号存在在不同程度传输延时其相关性系数值均满足区内故障选线判据, 选线结果判定为线路 L2 发生区内故障。

4.3.3 情况 3 选线方案灵敏度分析

表 8 为 L2 电流采样信号叠加不同程度的噪声对选线方案的影响情况。信号噪声会使采样信号产生波动, 线路两侧采集的原始数据(电流)通过滑动平均滤波算法进行处理后, 减少了原始采样数据的波动, 同时并未影响两组独立数据的整体变化趋势, 极大降低了噪声的影响, 可以看出在不同的噪声影响下, 保护方案仍能准确识别故障线路。

由表 8 中相关性系数值可以得出：线路 L2 电流采样信号在叠加不同程度噪声的情况下，当 L2 发生区内故障时，其相关性系数值满足区内故障选线判据，选线结果判定为线路 L2 发生区内故障，而线路 L1、L3 选线结果判定为发生区外故障；当发生区外母线故障时 L1、L2、L3 其相关性系数值均满足区外故障选线判据，选线结果判定为发生区外故障。

4.3.4 情况 4 选线方案灵敏度分析

图 11、图 12 为交流线路发生接地故障时直流母线电压波形图。可以看出各母线电压均大于 0.8 倍额定电压，直流单极接地保护不会启动。且在交流侧发生故障后，由于变压器的隔离作用，直流侧正负极电流将同时振荡，对零模电流而言基本不发生变化，不会引起选线方案误动。

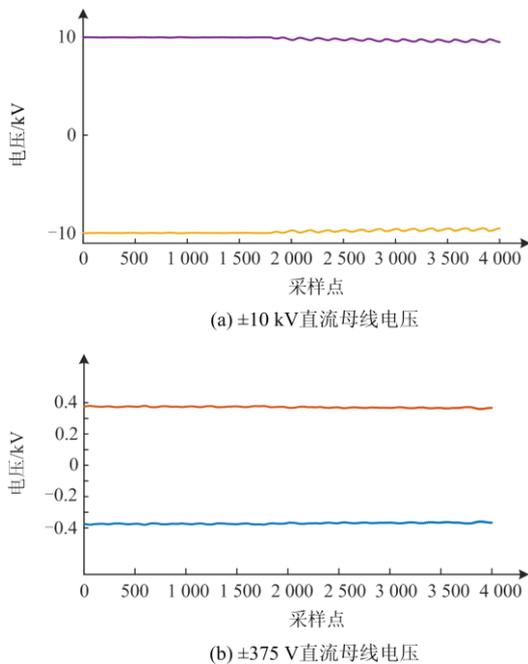


图 11 交流侧发生单相接地故障后各直流母线电压
Fig. 11 Voltage of each DC bus after a single-pole ground

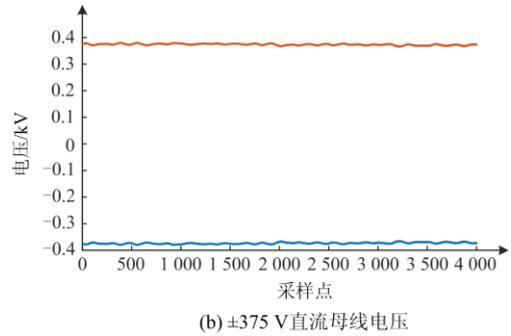
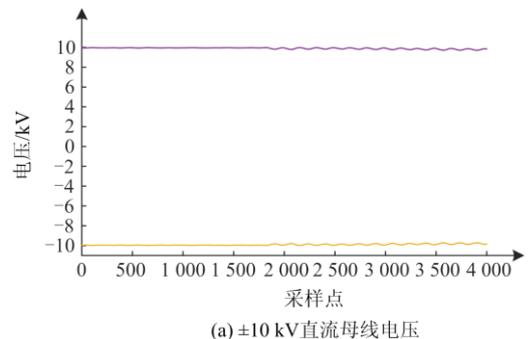


图 12 交流侧发生两相接地故障后各直流母线电压
Fig. 12 Voltage of each DC bus after a two-phase ground fault

5 结论

本文分析了柔性直流配电系统发生单极接地故障后的故障电流特征，设计了基于线路零模电流相关性的故障选线方案，结论如下：

1) 柔性直流配电系统发生单极接地故障后，故障线路零模电流呈正相关性，而非故障线路呈负相关性，并且过渡电阻值越大，故障线路零模电流相关性越强，更加有利于准确选出故障线路。

2) 利用滑动平均滤波提取的故障暂态电流特征量可以避免线路扰动以及电流幅值变化带来的阈值整定难题。

3) 中低压直流系统常见的拓扑结构有辐射状、两端供电网以及环网，不论是何种拓扑结构，单极接地故障发生时，区内外零模电流的故障方向不变，因此拓扑结构对本文设计的保护方案无影响。

4) 基于零模电流相关性的柔性直流配电系统单极接地选线方案还具有以下优点：不需利用边界元件构造边界特性，且耐过渡电阻、噪声、传输延迟的能力强，不受交流侧故障影响。

鉴于本文保护方案考虑到线路单极接地故障发生时，故障极对非故障极的影响，因此本文保护方案适用于采用双极接线方式的中低压直流系统单极接地故障识别。

参考文献

[1] 梁汉东, 高毓群, 侯婷, 等. 柔性直流配电系统负荷波动对系统过电压及过电流影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 56-62.
LIANG Handong, GAO Yuqun, HOU Ting, et al. Study on the influence of load fluctuation on overvoltage and overcurrent of a VSC-DC distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 56-62.

[2] 上官鑫, 秦文萍, 夏福良, 等. 基于暂态电压 Pearson 相关性的 MMC 多端柔性直流配电网单极接地故障保护方案[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1740-1749.

- SHANGGUAN Xin, QIN Wenping, XIA Fuliang, et al. Pole-to-ground fault protection scheme for MMC multi-terminal flexible DC distribution network based on Pearson correlation of transient voltage[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(5): 1740-1749.
- [3] HE Jinghan, HE Keao, CHEN Meng, et al. Review of protection and fault handling for a flexible DC grid[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2020, 5(2): 151-165.
- [4] 李卫丰, 王超, 薛永端, 等. 基于暂态功率方向的柔性直流配电网线路单极接地保护方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(23): 1-10.
- LI Weifeng, WANG Chao, XUE Yongduan, et al. A flexible DC distribution network line unipolar grounding protection method based on transient power direction[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(23): 1-10.
- [5] YANG X, XUE Y, WEN P. Comprehensive understanding of DC pole-to-pole fault and its protection for modular multilevel converters[J]. *High Voltage*, 2018, 3(4): 246-254.
- [6] 林湘宁, 刘琦, 范理想, 等. 基于相关分析的多端直流配电网线路纵联保护新原理[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(13): 45-55.
- LIN Xiangning, LIU Qi, FAN Lixiang, et al. A novel pilot protection for VSC-MTDC based on correlation analysis[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(13): 45-55.
- [7] 李岩, 黄豫, 龚雁峰, 等. 柔性直流电网直流线路故障的过电压机理分析[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(5): 146-153.
- LI Yan, HUANG Yu, GONG Yanfeng, et al. Analysis on overvoltage mechanism of DC line fault in flexible DC grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(5): 146-153.
- [8] 韩永霞, 冯帅松, 高毓群, 等. 柔性直流配电系统过电压及过电压防护研究综述[J]. *广东电力*, 2020, 33(12): 81-89.
- HAN Yongxia, FENG Shuaisong, GAO Yuqun, et al. Review on research of overvoltage and overcurrent protection for flexible DC distribution system[J]. *Guangdong Electric Power*, 2020, 33(12): 81-89.
- [9] LI B, LI C, GUO F. Overcurrent protection coordination in a power distribution network with the active superconductive fault current limiter[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2014, 24(5): 1-4.
- [10] 王艳婷, 张保会, 范新凯. 柔性直流配电网架空线路快速保护方案[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(21): 13-19.
- WANG Yanting, ZHANG Baohui, FAN Xinkai. Fast protection scheme for overhead transmission lines of VSC-based HVDC grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(21): 13-19.
- [11] 李振兴, 王露, 谭洪, 等. 基于 U-I 特性的 UHVDC 线路纵联保护新判据[J]. *智慧电力*, 2020, 48(10): 16-23.
- LI Zhenxing, WANG Lu, TAN Hong, et al. New criterion for pilot protection of UHVDC transmission lines based on U-I characteristic[J]. *Smart Power*, 2020, 48(10): 16-23.
- [12] 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.
- [13] 林军, 韦恬静, 蒋红亮, 等. 一种基于 5G 通信的配电网差动保护算法[J]. *电力信息与通信技术*, 2021, 19(10): 20-29.
- LIN Jun, WEI Tianjing, JIANG Hongliang, et al. A differential protection method for distribution network with 5G mobile communication[J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2021, 19(10): 20-29.
- [14] AZIZI S, SANAYE-PASAND M, ABEDINI M, et al. A traveling-wave-based methodology for wide-area fault location in multiterminal DC systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014, 29(6): 2552-2560.
- [15] 黄烜超, 李海锋, 许灿雄, 等. 并联型混合多端直流线路单极-双极混合运行方式下的故障行波特性[J]. *广东电力*, 2020, 33(4): 48-57.
- HUANG Dachao, LI Haifeng, XU Canxiong, et al. Faulted traveling wave characteristics of parallel hybrid multi-terminal DC lines under unipolar-bipolar hybrid operation mode[J]. *Guangdong Electric Power*, 2020, 33(4): 48-57.
- [16] FARHADI M, MOHAMMED O A. Event-based protection scheme for a multiterminal hybrid DC power system[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(4): 1658-1669.
- [17] BUCHER M K, FRANCK C M. Contribution of fault current sources in multiterminal HVDC cable networks[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, 28(3): 1796-1803.
- [18] 宁连营, 邵能灵, 郑晓冬, 等. 基于单端暂态电流的 MMC-HVDC 输电线路保护方案研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(17): 5010-5017.
- NING Lianying, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al.

- Research on MMC-HVDC transmission line protection scheme based on one terminal transient current[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 5010-5017.
- [19] 余修勇, 肖立业, 林良真, 等. 基于单端量的柔性直流电网故障识别方案[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 1-8.
YU Xiuyong, XIAO Liye, LIN Liangzhen, et al. Single-ended fast fault detection scheme for MMC-based HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 1-8.
- [20] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲. 一种应对高阻故障的单端自适应行波保护方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(11): 3548-3557.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou. A non-unit adaptive traveling wave protection method for high impedance faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3548-3557.
- [21] 宋国兵, 李德坤, 褚旭, 等. 基于参数识别原理的VSC-HVDC输电线路单端故障定位[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 94-99.
SONG Guobing, LI Dekun, CHU Xu, et al. One-terminal fault location for VSC-HVDC transmission lines based on principles of parameter identification[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 94-99.
- [22] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [23] 张小东, 王宇, 李白, 等. 光储联合运行直流微电网控制策略[J]. 广东电力, 2018, 31(2): 58-64.
ZHANG Xiaodong, WANG Yu, LI Bai, et al. Control strategy for DC micro-grid based on photovoltaic and energy storage systems[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(2): 58-64.
- [24] 付华, 陈浩轩, 李秀菊, 等. 含边界元件的MMC-MTDC直流侧单端量故障辨识方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(1): 215-226.
FU Hua, CHEN Haoxuan, LI Xiujun, et al. MMC-MTDC DC side single-ended quantity fault identification method with boundary elements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(1): 215-226.
- [25] 宋国兵, 周德生, 焦在滨, 等. 一种直流输电线路故障测距新原理[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(24): 57-61.
SONG Guobing, ZHOU Desheng, JIAO Zaibin, et al. A novel fault location principle for HVDC transmission line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 57-61.
- [26] 戴志辉, 刘雪燕, 黄敏, 等. 基于相似度比较的环状柔直配电网线路单极接地故障保护[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 107-115.
DAI Zhihui, LIU Xueyan, HUANG Min, et al. Similarity comparison based single-pole grounding fault protection for lines in ring-shaped flexible DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 107-115.
- [27] 薛士敏, 廉杰, 齐金龙, 等. MMC-HVDC故障暂态特性及自适应重合闸技术[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 4015-4021.
XUE Shimin, LIAN Jie, QI Jinlong, et al. Fault transient characteristic and adaptive reclosing technique of MMC-HVDC network[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 4015-4021.
- [28] 李俊松, 张英敏, 曾琦, 等. MMC-MTDC系统单极接地故障电流计算方法[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 546-555.
LI Junsong, ZHANG Yingmin, ZENG Qi, et al. Pole-to-ground fault current calculation method for MMC-MTDC systems[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 546-555.
- [29] GOLESTAN S, RAMEZANI M, GUERRERO J M, et al. Moving average filter based phase-locked loops: performance analysis and design guidelines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(6): 2750-2763.
- [30] 刘若平, 李银红, 肖浩, 等. MMC-HVDC直流极保护对启动过程故障的适应性研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(7): 84-91.
LIU Ruoping, LI Yinhong, XIAO Hao, et al. Research on adaptability of DC pole protection to fault occurred during start-up process for MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7): 84-91.
- [31] 李斌, 何佳伟, 李晔, 等. 基于边界特性的多端柔性直流配电系统单端量保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5741-5749, 6016.
LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. Single-ended protection scheme based on boundary characteristic for the multi-terminal VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5741-5749, 6016.

收稿日期: 2021-09-13; 修回日期: 2022-01-12

作者简介:

左鹏飞(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 1659378050@qq.com

秦文萍(1972—), 女, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统可靠性/稳定性分析、交直流混合微电网保护等。E-mail: qinwenping@tyut.edu.cn

(编辑 周金梅)