

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200916

基于 EMD 与 Spearman 相关系数的混合直流线路 纵联保护方法

张大海, 杨宇辰, 刘艳梅, 和敬涵

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 混合直流输电系统兼备常规直流以及柔性直流的优势, 是直流系统发展的必然趋势。现有直流差动保护易受线路分布电容的影响, 纵联保护依赖于边界条件, 在混合直流输电系统中适用性差。针对以上问题, 提出了一种基于经验模态分解(EMD)与斯皮尔曼(Spearman)相关系数的混合直流线路纵联保护方法。在分析故障电流增量的极性特征、考虑分布电容影响的基础上, 首先对线路两端故障电流信号进行镜像延拓, 通过 EMD 提取表征电流变化方向的残余函数, 再计算残余函数的 Spearman 相关系数, 以此识别线路内外部故障。该方法不受分布电容影响、不依赖于边界条件。通过仿真验证, 所提保护方案动作速度快、可靠性高, 且具有较强耐受过渡电阻与抗噪声干扰的能力。

关键词: 混合直流输电; 纵联保护; EMD; Spearman 相关系数; 故障识别

Hybrid HVDC line pilot protection method based on EMD and Spearman correlation coefficient

ZHANG Dahai, YANG Yuchen, LIU Yanmei, HE Jinghan

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: A hybrid HVDC transmission system combines the advantages of LCC-HVDC and MMC-HVDC, and their adoption is an inevitable trend in the development of HVDC systems. Existing DC differential protection is susceptible to the influence of line distributed capacitance, and pilot protection depends on the boundary conditions. This has poor applicability in hybrid HVDC transmission systems. In response to the above problems, a hybrid HVDC line pilot protection method based on Empirical Mode Decomposition (EMD) and Spearman correlation coefficient is proposed. To analyze the polarity characteristics of the fault current increment and considering the effect of distributed capacitance, first, the fault current signals at both ends of the line are mirror-extended, and the residual function representing the direction of current change is extracted by EMD. Then the Spearman correlation coefficients of residual functions are calculated to identify the internal and external faults of the line. This method is not affected by distributed capacitance and does not depend on boundary conditions. Simulation results show that the proposed protection has fast operation, high reliability, and a strong ability to withstand transition resistance and noise interference.

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

Key words: hybrid HVDC transmission; pilot protection; EMD; Spearman correlation coefficient; fault identification

0 引言

采用电网换相换流器(Line Commutated Converter, LCC)的高压直流输电系统在远距离、大容量输电工

程中取得了较大的发展, 但其存在谐波、无功消耗以及受端换流站换相失败等问题^[1]。采用模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的柔性直流输电系统具有较低的谐波水平, 不存在无功消耗与换相失败等问题, 但其成本高昂、系统损耗大^[2]。送端采用 LCC、受端采用 MMC 的混合直流输电系统(LCC-MMC)兼备两者的优势, 在保证能

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)

够远距离、大容量输电的同时，又解决了受端换相失败的问题，具有广阔的应用前景^[3]。然而，长距离架空线路意味着较高的故障发生率，亟需针对混合直流输电系统探讨快速、可靠的线路保护方案。

在传统直流线路保护中，通常将行波保护作为线路的主保护，直流欠电压保护、电流差动保护作为后备保护^[4-5]。电流差动保护作为一种后备保护，主要用于检测直流线路高阻接地故障，但通常具有较长的动作延时(最长可达 1.1 s)，以躲过线路分布电容的影响^[6]。而对于混合直流输电系统而言，换流器本身具有脆弱性、高可控性，为避免器件过流损坏，故障发生后换流器将快速调节或闭锁来限制短路电流，造成线路上缺失电气量，进而导致差动保护判别失效^[7]。为提高差动保护的速动性，文献[8-9]均对线路分布电容暂态电流的补偿进行研究，但此类方法具有计算量大、需要对线路参数精确估计等问题。

基于双端电气量的纵联保护同样可以作为直流线路的后备保护。文献[10]以母线侧直流滤波器的阻抗-频率特性为理论依据，提出了一种基于两端电流相关性的高压直流线路纵联保护方案。由于混合直流系统边界条件的差异，MMC 母线侧不配置直流滤波器，该保护方法不具有适用性。文献[11]提出了一种基于两端电流突变量的高压直流线路纵联保护方案。电流突变量由故障分量的积分决定，与电流故障分量的幅值密切相关。但在混合直流系统中，由于换流器结构、电抗器大小等边界条件的不同，两端电流故障分量的幅值存在较大差异，将对保护的動作性能产生影响。综上，由于混合直流系统控制策略及边界条件与常规直流系统或柔性直流系统均有区别，现有直流差动保护与纵联保护难以满足后备保护的需求。

针对混合直流系统，文献[12]提出了一种基于电流、电压故障分量极性特征的线路纵联保护方案，该方法不受两端故障分量幅值差异的影响。文献[13]提出了一种基于电流相似度的混合直流线路纵联保护方案，该方法不需要严格的通信同步。以上两种保护方案动作速度快、不依赖于边界条件，但均未考虑线路分布电容、通信噪声对电气量极性、波形相似度的影响。为保证混合直流系统的安全可靠运行，本文根据线路两端电流增量的极性特征，提出一种基于经验模态分解(EMD)与斯皮尔曼(Spearman)相关系数的混合直流线路纵联保护方案。该方法不受分布电容暂态电流的影响，不依赖于边界条件，且通过 PSCAD/EMTDC 仿真，验证所提保护方案具有良好的动作性能。

1 故障特性分析

1.1 故障电流增量极性特征

混合直流输电拓扑结构与故障位置如图 1 所示，与双端传统直流输电系统相比，混合直流输电系统在整流侧换流站与逆变侧换流站分别采用了 LCC、MMC 换流器，使得直流输电线路暂态故障特征具有复杂性。

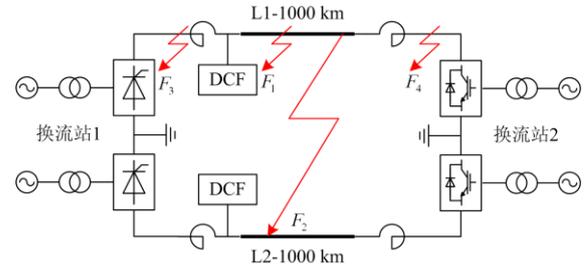


图 1 混合直流输电拓扑结构与故障位置

Fig. 1 Topology and fault point of hybrid HVDC transmission

LCC、MMC 换流站在直流线路故障后，发展过程均要经历两个阶段^[14]：故障检测阶段与故障隔离阶段。直流线路故障各阶段等值电路如图 2 所示，在故障检测阶段，LCC 换流站等效电路为电流源串联平波电抗器再与双调谐滤波器并联进行馈流，而 MMC 换流站可等值为 RLC 串联电路，以电容放电为主；在故障隔离阶段，故障电流上升至换流器自身保护的定值，LCC 换流器由整流状态调整为逆变状态，由于晶闸管旁路阻尼较大，交流侧馈流将会被阻断，MMC 换流器采用的是半桥、全桥子模块混合结构，因此通过子模块电容给二极管提供反向电压，可以强迫直流线路电流下降至 0。当直流线

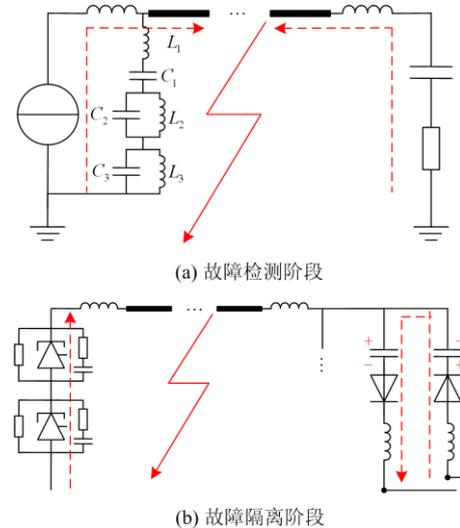


图 2 直流线路故障各阶段等值电路

Fig. 2 Equivalent circuit at each stage of DC line fault

路故障时, 短路电流上升速度快, 对于输电系统而言, 要求只对故障线路进行隔离而不影响正常线路的运行, 因此对保护的快速性与可靠性具有较高的要求。

由上述分析可知, 当系统处于故障隔离阶段时, 直流线路不存在电流, 无法为保护提供有效的特征量。参考云广特高压直流工程与张北柔性直流工程情况^[15-16], 由于 LCC 换流器耐受过电流能力强, 通常认为其故障检测时间可持续 10 ms 以上; 而 MMC 换流器承受过电流能力较弱, 认为其检测时间不超过 3 ms。为了能够在短时间内可靠识别线路区内外故障, 本文针对故障检测阶段 3 ms 内电流增量的极性特征进行分析。

规定电流的方向从母线流向线路为正, 假设线路正常电流为 i_z , 正极线路故障等效图如图 3 所示, M、N 两点为线路两端故障电流测量点, i_m 、 i_n 分别为整流侧与逆变侧的电流。

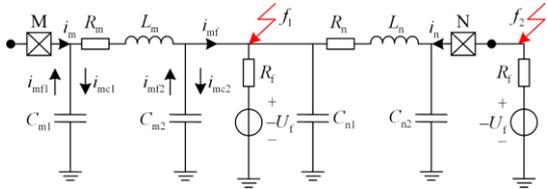


图 3 正极线路故障等效图

Fig. 3 Equivalent diagram of positive line fault

在系统正常运行时, 有式(1):

$$i_m = -i_n = i_z \quad (1)$$

故障初期, LCC 换流器的低压限流控制作用不明显, MMC 换流器未对短路电流进行限制, 此时可采用叠加定理进行分析^[17]。当发生图 3 中 f_1 、 f_2 所示正极接地故障时, 等同于在故障点处叠加了一个负电压源 $-U_f$, 过渡电阻为 R_f , 线路两端故障电流 i_m 、 i_n 可视为正常电流 i_z 与故障分量电流 Δi_m 、 Δi_n 的叠加。当线路发生 f_1 所示区内故障时, 故障电流 i_m 、 i_n 均流向故障点, 且故障分量电流 Δi_m 、 Δi_n 均为正值, 即两端电流增量的极性相同, 如式(2)所示。

$$\begin{cases} \Delta i_m = i_m - i_z > 0 \\ \Delta i_n = i_n + i_z > 0 \end{cases} \quad (2)$$

当线路发生 f_2 所示区外故障时, 故障电流方向同样指向故障点, 但故障分量电流 Δi_m 为正值, 而 Δi_n 为负值, 即两端电流增量的极性相反, 如式(3)所示。

$$\begin{cases} \Delta i_m = i_m - i_z > 0 \\ \Delta i_n = i_n + i_z < 0 \end{cases} \quad (3)$$

表 1 故障电流增量极性特征

故障位置	正极线路		负极线路		两端电流增量极性
	首端电流	末端电流	首端电流	末端电流	
区内	+	+	-	-	相同
正向区外	+	-	-	+	相反
反向区外	-	+	+	-	相反

正极线路反向区外故障、负极线路故障分析与上述过程类似。因此, 可以得到故障电流增量的极性特征如表 1 所示, 当区内发生故障时, 线路两端电流增量的极性相同, 即故障电流的变化方向相同; 当区外发生故障时, 两端电流增量的极性相反, 即故障电流的变化方向相反。

1.2 分布电容暂态电流分析

线路分布电容、信道引入噪声会造成电流的波动, 因此故障电流的波形可能不是平滑单调变化的。故障行波在线路上传播引起电压的变化, 从而造成分布电容的充放电。为了体现分布电容暂态电流的特性, 以单个 Π 型线路模型进行分析^[18], 图 3 中 i_{mf1} 、 i_{mf2} 为分布电容放电电流, i_{mc1} 、 i_{mc2} 为分布电容充电电流, i_{mf} 表示故障点处电流, 考虑分布电容的充放电过程, 分别有式(4)一式(7)所示。

$$\Delta i_m = \Delta i_{mf} - i_{mf1} - i_{mf2} \quad (4)$$

$$\Delta i_m = \Delta i_{mf} + i_{mc1} + i_{mc2} \quad (5)$$

$$\Delta i_m = \Delta i_{mf} - i_{mf1} + i_{mc2} \quad (6)$$

$$\Delta i_m = \Delta i_{mf} + i_{mc1} - i_{mf2} \quad (7)$$

式(4)、式(5)分别表示 2 个分布电容同时放电、充电的过程, 式(6)为电容 C_{m1} 放电而电容 C_{m2} 充电的过程, 式(7)表示 C_{m1} 充电而 C_{m2} 放电的过程。由式(4)一式(7)可知, 多个分布电容不同的充放电过程会引起直流暂态电流的波动。图 1 所示直流系统的传输距离为 1 000 km, 由于长距离架空线路通过多个 Π 型线路模型串联等值, 实际充放电过程会更加复杂。

分布电容暂态电流的振荡频率与行波固有频率相同^[19], 其与边界条件以及故障距离相关, 如式(8)所示。

$$f_s = \frac{(\theta_s + \theta_f + 2k\pi)v}{4\pi d}, k = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (8)$$

式中: v 表示行波波速; d 表示故障距离; 线路始端反射系数角 θ_s 与故障点处反射系数角 θ_f 之和在 0 至 π 之间变化。

故行波固有频率有理论最低值为

$$f_{s\min} = \frac{v}{4d} \quad (9)$$

行波波速 v 通常为 97% 至 99% 的光速, 而对于图 1 所示的直流系统而言, 故障距离 d 不会大于 1 000 km。由式(9)可计算出分布电容暂态电流的振荡频率在 75 Hz 以上, 具有较宽的频率范围。当故障发生于线路首端或末端时(故障时刻为 $t=1$ ms), 两端电流波形如图 4 所示。由图可见, 线路两端故障电流振荡频率相差较大, 同时由于 LCC 侧直流滤波器造成特定频率(谐波频率)的电流故障分量显著增大^[10], 首端电流变化特征更加复杂。

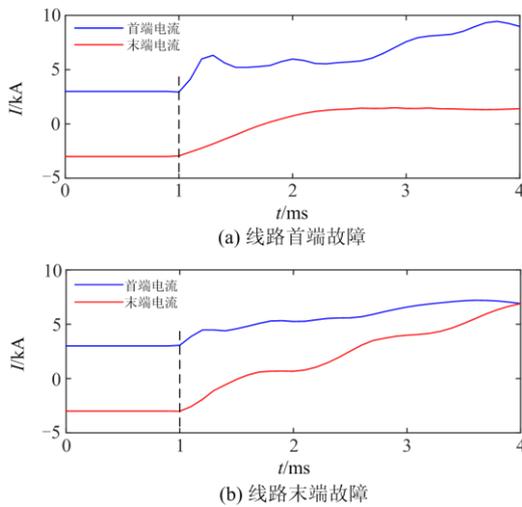


图 4 线路两端电流波形

Fig. 4 Current waveform at both ends of the line

架空线路的长度超过 1 000 km 时, 随着故障距离 d 的增加, 由式(9)可知分布电容暂态电流的最小振荡频率将低于 75 Hz; 当故障发生于线路首端或末端时, 两端故障电流的振荡频率将存在更大差异。若直接以线路两端电流的相关系数作为判别标准, 可能无法正确识别区内外故障; 而传统直流差动保护需要躲过分布电容暂态电流的影响, 因此具有较长的延时。

基于上述分析, 以发生区内外故障时, 线路两端电流增量的极性差异为理论依据, 构建基于 EMD 与 Spearman 相关系数的纵联保护新原理: 利用 EMD 消除分布电容与噪声的影响, 得到表征电流变化方向(增量极性)的残余函数; 再结合 Spearman 相关系数, 判断残余函数的相关性, 以此识别线路内外部故障。

2 EMD 与 Spearman 相关系数

由第 1.1、1.2 节分析可知, 通过判别线路两端

故障电流增量极性的相关性, 便可识别内外部故障; 但线路分布电容、通信噪声使故障电流在变化方向上具有波动性, 若直接计算两端电流的相关系数, 可能会产生误判。因此, 在计算相关系数之前, 需要利用信号分解方法消除分布电容与通信噪声的影响。

2.1 EMD 提取残余函数

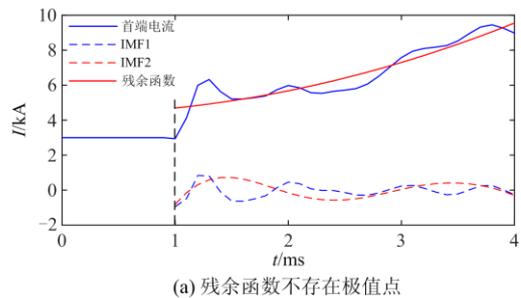
小波变换和 EMD 均可对多频叠加信号进行分解从而消除非平稳信号的波动性。小波变换的优势在于良好的局部分析能力, 但小波基函数的选取没有固定的规则, 且基函数一旦确定便无法更改, 进而可能影响分解效果, 自适应性较差^[20]。与小波变换相比, EMD 以信号的局部变化特征为基础, 无需以任何既定的函数作为基底, 可自适应地将非平稳信号平稳化, 有效消除波动性^[21]。本文选取 EMD 方法对故障电流信号进行分解, 以消除分布电容及通信噪声的影响。

EMD 的分解步骤包括: 1) 根据原始信号的局部极大、极小值点, 采用三次样条函数分别拟合构造上、下包络线; 2) 求取上、下包络线的均值曲线, 原始信号减去均值曲线得到中间信号; 3) 判断中间信号是否满足均值趋于 0, 若满足特征要求, 则作为固有模态函数(IMF)从原始信号中分离; 4) 当残余信号的极值点数小于 2 时, 分解结束。原始信号 $s(t)$ 为各阶 IMF 分量与残余函数的叠加, 即

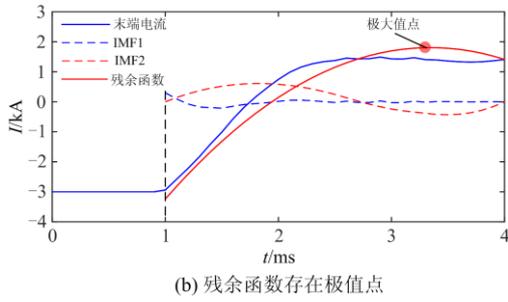
$$s(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (10)$$

式中: IMF 分量 $c_j(t)$ 从高频至低频对信号进行表征, 反映故障电流的波动性; 残余函数 $r_n(t)$ 代表信号的平均趋势, 即故障电流的变化方向。

利用 EMD 对图 4(a)中的故障电流信号进行分解, 结果如图 5 所示。由图可知, EMD 可以有效消除故障电流的波动性, 将电流波形平稳化。由于 EMD 的分解终止条件限制, 提取的残余函数具有单调性或只存在单一极值点。图 5(a)中的残余函数单调上升无极值点; 图 5(b)中的残余函数存在 1 个极大值点, 表征的电流变化方向不唯一, 将影响相关性的判别。



(a) 残余函数不存在极值点



(b) 残余函数存在极值点

图 5 EMD 分解

Fig. 5 EMD decomposition

为确保残余函数在时间窗内具有唯一的变化方向, 本文采用镜像延拓方法增加对称的极值点。镜像延拓与 EMD 分解如图 6 所示, 假设在原始数据的末端放一面镜子, 将故障后 3 ms 时间窗内的电流波形对称延拓, 再通过 EMD 对延拓后的电流信号进行分解, 得到各 IMF 分量与残余函数。

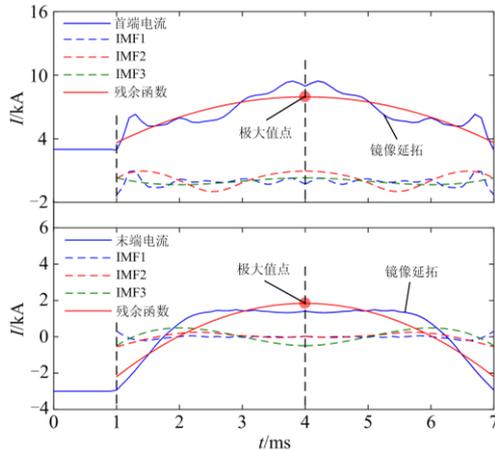


图 6 镜像延拓与 EMD 分解

Fig. 6 Mirror extension and EMD decomposition

由于延拓后的电流波形具有对称的极值点, 进而使分解得到的 IMF 分量与残余函数也满足对称性。根据 EMD 的分解终止条件可知, 镜像延拓后通过 EMD 提取的残余函数只会在对称轴处存在 1 个极大值或极小值点, 即在故障后 3 ms 时间窗内只存在唯一变化方向。在下文仿真验证中均先对原始信号镜像延拓, 再利用 EMD 提取残余函数。

2.2 Spearman 相关系数

常用的相关系数包括皮尔逊(Pearson)相关系数与斯皮尔曼(Spearman)相关系数。与 Pearson 相关系数相比, Spearman 相关系数具有不受数据量纲影响、对异常大数不敏感等优点。本文采用 Spearman 相关系数(下文简称为相关系数)描述残余函数的相关性, 相关系数的计算方法如下^[22]。

1) 对原始信号中所有数据的等级数进行计算。分别将 $x(n)$ 、 $y(n)(n=1,2,\dots,N)$ 两组数据按从小到大的规律进行排序, 并赋予一个对应的等级数。

2) 根据等级数计算相关系数。设原始数据对 $(x(n), y(n))$ 的等级数对为 (X_n, Y_n) , 代入如式(11)所示相关系数 ρ 的计算公式。

$$\rho = \frac{\sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})(Y_n - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})^2 \sum_{n=1}^N (Y_n - \bar{Y})^2}} \quad (11)$$

式中, \bar{X} 、 \bar{Y} 分别表示等级数 X_n 、 Y_n 的平均值,

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n, \quad \bar{Y} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N Y_n。$$

相关系数体现 $x(n)$ 与 $y(n)$ 的相关方向, 其大小介于 -1 至 1 之间。若变化方向一致, $x(n)$ 与 $y(n)$ 近似呈完全正相关性, 满足 $\rho_{\max}=1$; 反之, $x(n)$ 与 $y(n)$ 近似呈完全负相关性, 满足 $\rho_{\min}=-1$ 。通过计算残余函数的相关系数, 可以确定故障电流增量极性的相关性。

3 纵联保护方案

由上文分析可知, 当发生区内故障时, 线路两端电流增量的极性相同; 发生区外故障时, 两端电流增量的极性相反。在对故障电流信号进行镜像延拓后, 经过 EMD 分别得到残余函数 $r_M(t)$ 、 $r_N(t)$, 计算残余函数的相关系数并作为判别区内外故障的标准, 以此构成保护。

3.1 保护启动判据

系统正常运行时, 极电流的波动范围在 $\pm 5\%$ 之间^[23]。为确保保护在稳态情况不误动, 结合故障特性, 当极电流变化量幅值超过 10% 的额定电流值时, 即认为满足启动判据。具体可由式(12)表示。

$$|\Delta i_\phi| > 0.1 I_n \quad (12)$$

式中: Δi_ϕ 表示正极或负极电流的变化量, 由某一时刻的电流瞬时值减去其 1 ms 前的瞬时值得到; I_n 为额定电流值。

考虑故障识别、故障选极等判据的判别时间, 并留有一定裕度, 启动判据满足后展宽 15 ms^[6]。

3.2 区内外故障识别判据

根据式(11)并结合故障电流增量极性特征的分析。区内故障时, 两组残余函数 $r_M(t)$ 、 $r_N(t)$ 近似呈完全正相关性, 相关系数 ρ 的理论值为 1; 区外故障时, $r_M(t)$ 、 $r_N(t)$ 近似呈完全负相关性, ρ 的理论值为 -1。因此, 在考虑误差影响的基础上设置

一定门檻值，区内外故障识别判据具体为

$$\begin{cases} \text{区内故障: } \rho > 0.95 \\ \text{区外故障: } \rho < -0.95 \end{cases} \quad (13)$$

EMD 的数据窗长度选取主要考虑 2 个方面的因素：一是保护速动性的要求，由于图 1 所示混合直流输电系统在逆变侧采用 MMC 换流器，对比整流侧的 LCC 换流器，其耐受故障电流的能力较弱，因此要求数据窗长度尽可能短，使保护迅速动作；二是保护抗干扰性的要求，为了尽可能多地包含有效特征量，以提高保护的抗干扰能力，要求数据窗长度尽量长。

考虑以上因素，对数据窗的长度 L 进行选取。在图 4(a)所示的首端故障电流信号上叠加 20 dB 白噪声，设置多种长度数据窗，经 EMD 得到各残余函数如图 7 所示。在白噪声的干扰下，当 $L=1$ ms 时，残余函数 r_1 的变化方向与第 1.1 节所述理论方向相反；当 $L=2$ ms 时， r_2 虽满足增量极性为正，但不具有显著增量特征；当 $L \geq 3$ ms 时，残余函数的变化方向与理论方向一致，且增量特征明显，EMD 具有更优的分解效果。综合考虑保护的抗干扰性与速动性要求，数据窗长度选取为故障发生后 3 ms。

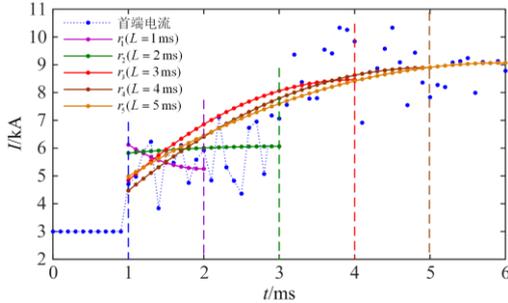


图 7 不同长度数据窗下 EMD 所得残余函数
Fig. 7 Residual function obtained from EMD with different length data windows

3.3 故障选极判据

定义残余函数突变量 Δr 为 EMD 提取的残余函数与故障前相应极电压的差值。选极系数 p 可表示为

$$p = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\Delta r_p(n)|}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |\Delta r_n(n)|} \quad (14)$$

式中： N 为故障后极电压采样点数； Δr_p 、 Δr_n 分别为正、负极残余函数突变量。

对于直流对称双极系统而言，正负极线路之间存在电磁耦合。当正极线路发生故障，在线路耦合

作用下负极线路电压也会发生波动，而通过 EMD 提取其残余函数可以消除波动性。与传统电压突变量选极判据相比，采用残余函数突变量进行故障选极具有更强的抗干扰能力。

当发生单极接地故障时，故障极残余函数突变量的幅值比非故障极大；当发生双极短路故障时，两极残余函数突变量的幅值相近。因此，可采用如下故障选极判据^[24-25]。

$$\begin{cases} \text{正极故障: } p \geq p_{\text{set1}} \\ \text{负极故障: } p \leq p_{\text{set2}} \\ \text{双极故障: } p_{\text{set1}} < p < p_{\text{set2}} \end{cases} \quad (15)$$

式中， p_{set1} 、 p_{set2} 分别为选极判据的上、下门檻值。

定义耦合系数 $k = |\Delta u_p| / |\Delta u_n|$ ， Δu_p 、 Δu_n 分别为正、负极电压突变量，同杆并架双极直流线路间的耦合系数 $k \leq 0.5$ ^[26]。本文近似认为 $k \approx |\Delta r_p| / |\Delta r_n|$ ，结合式(14)可知：正极故障时，选极系数 $p \geq 2$ ；负极故障时，选极系数 $p \leq 0.5$ 。同时考虑为长输电线路高阻接地故障留有一定裕度，本文设置选极判据的上槛值 $p_{\text{set1}}=1.5$ ，下门檻值 $p_{\text{set2}}=0.7$ 。

3.4 保护逻辑

保护方案流程图如图 8 所示，在极电流变化量的幅值满足启动判据后，提取故障后 3 ms 时间窗内线路两端的电流数据并进行镜像延拓，再通过 EMD 分解得到两组残余函数，计算分解所得两组残余函数

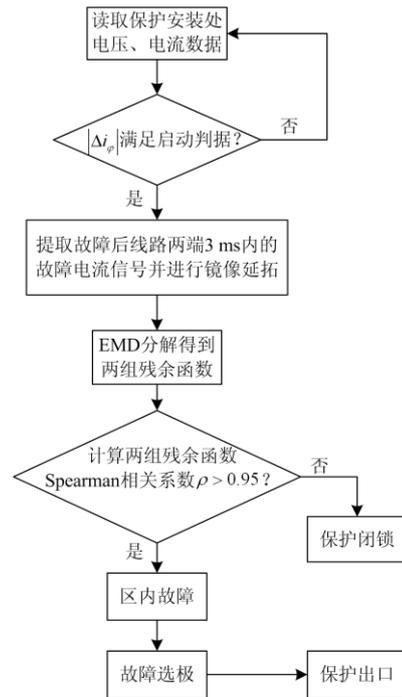


图 8 保护方案流程图

Fig. 8 Flow chart of the protection scheme

数的相关系数 ρ , 若满足 $\rho > 0.95$, 则判断为区内故障, 经故障选极后保护出口。

保护的采样频率为 10 kHz, 时间窗长度为 3 ms 的数据包含有 31 个采样点(含故障前 1 个数据点), 经过 EMD 得到的残余函数同样为 31 个数据点。对每 3 个数据点计算 1 个相关系数, 采用递推算算法即每增加 1 个数据点计算 1 次相关系数。因此 31 个数据点可计算得到 29 个相关系数, 当 29 个相关系数均大于 0.95 时, 判别为区内故障, 以此可有效提高保护故障识别的可靠性。

4 仿真验证

为了验证所提保护方案的理论正确性, 在 PSCAD/EMTDC 中建立如图 1 所示的混合直流输电系统仿真模型, 该系统为 ± 800 kV 对称双极系统; 换流站 1、2 的额定容量均为 5 000 MW; 换流站 1 正负极均采用 12 脉动 LCC 换流器, 换流站 2 正负极均为半桥、全桥子模块混合构成的 MMC 换流器, 全桥子模块占比为 75%; 换流站 1 控制策略主要为定直流电流、定最小触发角控制, 换流站 2 主要采用定直流电压、定无功功率控制; 换流站 1 平波电抗器电感值为 300 mH, 换流站 2 限流电抗器电感值为 150 mH; LCC 侧直流滤波器的电感 L_1 、 L_2 、 L_3 分别为 17.4 mH、15.7 mH、3.2 mH, 电容 C_1 、 C_2 、 C_3 分别为 $1 \mu\text{F}$ 、 $3.047 \mu\text{F}$ 、 $3.675 \mu\text{F}$; 正、负极架空线路 L1、L2 频率相关模型如图 9 所示, 均采用六分裂导线, 长度为 1 000 km。为结合工程实际情况, 本文搭建模型的仿真步长设置为 0.1 ms, 所提保护的采样频率选取为直流工程中通常使用的 10 kHz。

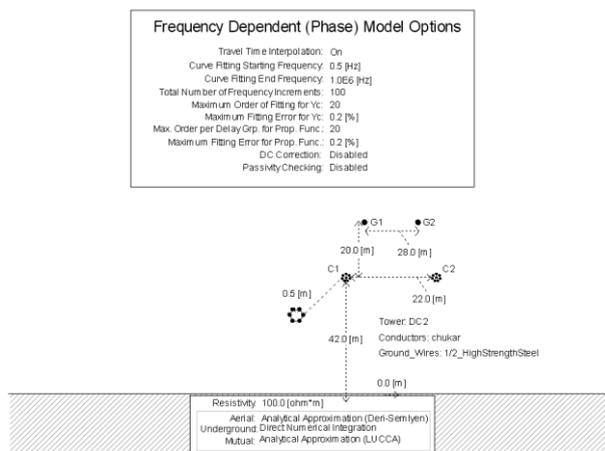


图 9 架空线路频率相关模型

Fig. 9 Frequency dependent model of overhead lines

为了对保护方案的动作性能进行全面评估, 在图 1 中设置了不同位置、不同类型的故障, F_1 为区

内正极线路单极接地故障, F_2 表示区内双极短路故障, F_3 、 F_4 分别为整流侧区外、逆变侧区外正极接地故障。设置故障时刻 $t=1$ ms, 分别对不同位置、不同类型故障进行仿真分析, 检验所提保护方案耐受过渡电阻以及抗噪声干扰的能力。

4.1 区内故障检验

直流线路中点发生 F_1 正极接地故障(过渡电阻为 300Ω)、 F_2 双极短路故障(金属性短路)时, 正极线路首末端电流、残余函数及其相关系数计算结果分别如图 10、图 11 所示。

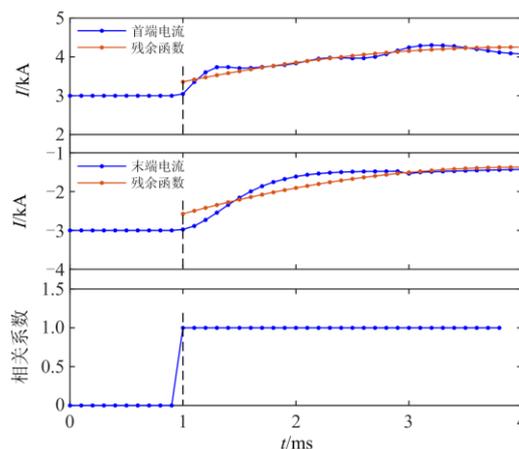


图 10 直流线路中点正极接地故障仿真结果

Fig. 10 Simulation results of positive pole-to-ground fault at the midpoint of DC line

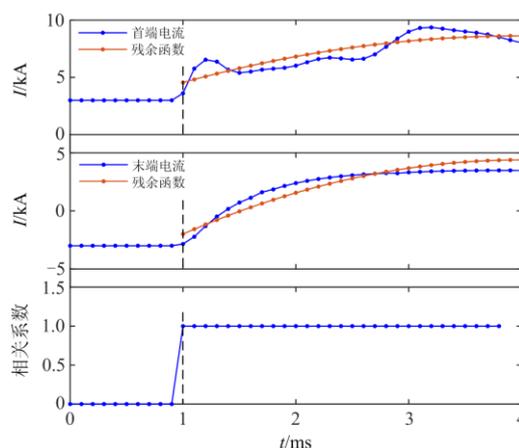


图 11 直流线路中点双极短路故障仿真结果

Fig. 11 Simulation results of pole-to-pole fault at the midpoint of DC line

由图 10、图 11 可知, 在故障后 3 ms 时间窗内, 正极线路首末两端所测电流波形均为上升方向, 与 1.1 节中的理论分析一致。故障电流在上升的同时还存在波动性, 而通过 EMD 对线路两端故障电流进行分解, 可以得到变化方向相同的两组残余函数。

计算得到两组残余函数的所有相关系数均为 $\rho = 1$ ，即呈现完全正相关，满足区内故障动作判据。对于如图 10 所示的正极接地故障，通过式(14)可计算出选极系数 $p = 25.9415$ ，远大于选极判据的上门槛值 $p_{set1} = 1.5$ ，满足正极故障动作判据；对于如图 11 所示的双极短路故障，可计算得出选极系数 $p = 1.0048$ ，位于选极判据上、下门槛值之间，满足双极故障动作判据。

正极线路 L1 发生 F_1 单极接地故障，故障位置分别设置于线路首端(10%)、中点(50%)、末端(90%)处，故障点处过渡电阻分别为 $0\ \Omega$ 、 $100\ \Omega$ 、 $300\ \Omega$ ，仿真结果如表 2 所示。故障判别结果表明，对于正极线路首端、中点以及末端发生单极接地故障，在 3 种过渡电阻下均满足相关系数 ρ 大于 0.95、选极系数 p 大于 1.5，保护可靠识别故障，检验了所提保护具有良好耐受过渡电阻的能力。

表 2 区内故障仿真结果

Table 2 Simulation results of internal faults

故障位置	过渡电阻/ Ω	相关系数 ρ	选极系数 p	判别结果
F_1 (L1 首端)	0	1	11.988 5	区内正极
	100	1	10.776 1	区内正极
	300	1	10.750 7	区内正极
F_1 (L1 中点)	0	1	27.301 2	区内正极
	100	1	25.548 7	区内正极
	300	1	25.941 5	区内正极
F_1 (L1 末端)	0	1	5.516 4	区内正极
	100	1	5.675 1	区内正极
	300	1	5.707 1	区内正极

4.2 区外故障检验

图 12、图 13 分别给出了直流系统发生整流侧区外 F_3 、逆变侧区外 F_4 金属性接地故障时，正极线

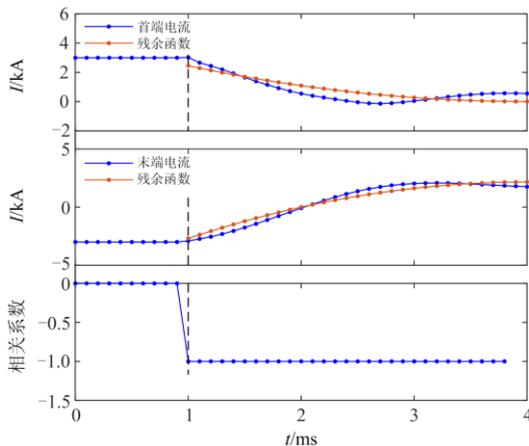


图 12 整流侧区外正极接地故障仿真结果

Fig. 12 Simulation results of external positive pole-to-ground fault on the rectifier side

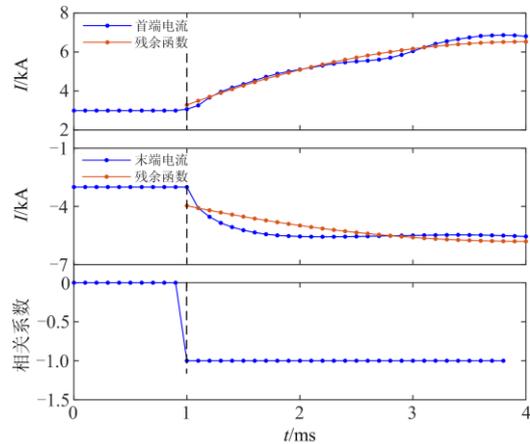


图 13 逆变侧区外正极接地故障仿真结果

Fig. 13 Simulation results of external positive pole-to-ground fault on the inverter side

路首末端电流、残余函数及其相关系数计算结果。采用 EMD 对线路两端故障电流进行分解，得到的两组残余函数变化方向相反，计算可得两组残余函数的所有相关系数均为 $\rho = -1$ ，即呈现完全负相关，与理论分析相同，满足区外故障判别条件。

整流侧、逆变侧区外发生 F_3 、 F_4 单极接地故障，过渡电阻分别设置为 $0\ \Omega$ 、 $100\ \Omega$ 、 $300\ \Omega$ ，仿真结果如表 3 所示。故障判别结果表明，在区外故障情况下，经 3 种过渡电阻单极接地时均满足相关系数 ρ 小于 -0.95，保护均不会发生误动作。

表 3 区外故障仿真结果

Table 3 Simulation results of external faults

故障位置	过渡电阻/ Ω	相关系数 ρ	判别结果
F_3	0	-1	区外故障
	100	-1	区外故障
	300	-1	区外故障
F_4	0	-1	区外故障
	100	-1	区外故障
	300	-1	区外故障

4.3 抗噪性能检验

所提纵联保护需要使用长通信通道，可能会在信号的传输过程中引入噪声，纵联保护的可靠性需要考虑信道噪声的影响^[27]。为了对本文所提保护方案的抗噪声干扰能力进行检验，将白噪声信号叠加于故障电流信号之上，对保护的故障判别能力进行仿真检验。对于正极直流线路中点、整流侧区外发生单极金属性接地故障，在原始故障电流信号中叠加一个信噪比为 10 dB 的白噪声信号，故障判别仿真结果分别如图 14、图 15 所示。

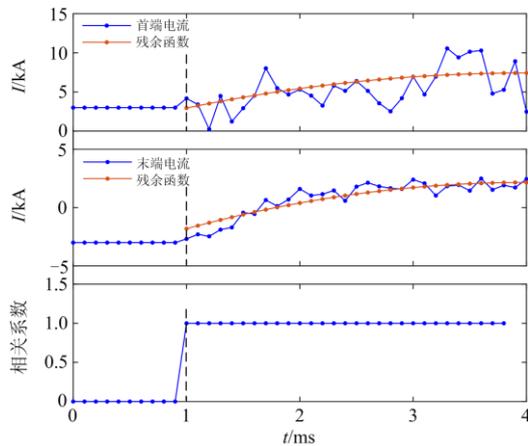


图 14 直流线路中点正极接地故障仿真结果

Fig. 14 Simulation results of positive pole-to-ground fault at the midpoint of DC line

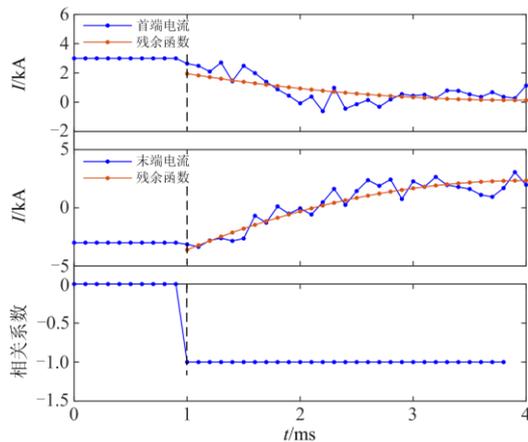


图 15 整流侧区外正极接地故障仿真结果

Fig. 15 Simulation results of external positive pole-to-ground fault on the rectifier side

由图 14、图 15 可知, 白噪声信号会对故障电流波形产生影响, 导致其幅值波动, 可能会使基于电流波形相似度的纵联保护以及传统直流差动保护拒动或误动作。本文所提保护方法通过 EMD 有效消除故障电流的波动性, 计算分解所得残余函数的相关系数, 能够可靠识别区内外故障。

白噪声属于高频信号, 经过 EMD 进行分解后只存在于高层 IMF 分量中, 同时由于白噪声不会影响原始信号中的高频极值点, 并且可以使信号中、低频段的极值点均匀分布, 减小三次样条函数拟合构造信号包络线的均值误差, 有效解决模态混叠问题, 可分解得到更为准确的 IMF 分量与残余函数。由此可见, 噪声不会对所提保护方案的可靠性产生影响。

4.4 保护动作时间分析

根据所提保护方案的动作流程, 保护动作时间需要考虑^[28-29]: 行波传达时间差、信道通信延时以及算法计算时间。故障行波的波速可近似为 97% 的光速, 对于 1 000 km 长的输电线路, 行波传达至线路两端量测点的时间差最大约为 3.4 ms; 在通信延时方面, 考虑配置专用光纤通信, 光纤中信号的传输速率约为 4.9 $\mu\text{s}/\text{km}$, 则 1 000 km 光纤纵联通道的传输延时约为 4.9 ms; 对于算法计算时间, 采用的数据窗长度为 3 ms, 通过 DSP 运算的时间小于 0.5 ms。综合上述分析并考虑一定裕度, 所提保护方案可在 12 ms 内动作, 远快于需要考虑线路分布电容暂态电流影响的直流差动保护(动作时间约为 1 100 ms), 可较好满足线路后备保护的要求。

5 结论

本文提出了一种基于 EMD 与 Spearman 相关系数的混合直流线路纵联保护方法, 通过理论分析与仿真验证, 整体评估了保护的動作性能, 得到以下结论:

1) 直流线路发生区内故障时, 两端故障电流增量的极性相同; 区外故障时, 两端故障电流增量的极性相反。通过对比电流增量的极性特征, 可准确识别直流线路的区内外故障。

2) 对故障电流信号镜像延拓后, 利用 EMD 可以消除线路分布电容与通信噪声的影响, 得到表征电流变化方向的残余函数; 通过计算残余函数的相关系数, 即可确定故障电流增量极性的相关性。

3) 与现有直流差动保护、纵联保护相比, 所提保护不受分布电容的影响、不依赖于边界条件。经仿真验证, 该方法动作速度快、能够可靠识别线路内外部故障, 具有较强耐受过渡电阻和抗噪声干扰的能力, 较好地满足混合直流线路后备保护的需求。

参考文献

- [1] 索之闻, 陈启超, 李晖, 等. 混合直流输电系统送端交流暂态电压特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 125-132.
SUO Zhiwen, CHEN Qichao, LI Hui, et al. Research on sending end AC transient voltage characteristics of hybrid HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 125-132.
- [2] 杜晓磊, 郭庆雷, 吴延坤, 等. 张北柔性直流电网示范工程控制系统架构及协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 164-173.
DU Xiaolei, GUO Qinglei, WU Yankun, et al. Research on control system structure and coordination control

- strategy for Zhangbei demonstration project of MMC-HVDC grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(9): 164-173.
- [3] 董朝阳, 吉攀攀, 冯敏, 等. 基于 LCC-FHMMC 混合直流输电的控制策略研究及试验验证[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(13): 148-155.
DONG Chaoyang, JI Panpan, FENG Min, et al. Control strategies and experimental verification for hybrid HVDC system based on LCC and FHMMC[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(13): 148-155.
- [4] 高本锋, 张学伟, 刘辛晔, 等. 高压直流输电保护定值整定流程的研究[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(12): 400-407.
GAO Benfeng, ZHANG Xuewei, LIU Xinye, et al. Research of HVDC protection value setting process[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(12): 400-407.
- [5] HE Jinghan, CHEN Ke'ao, LI 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): 28-42. DOI: 10.1186/s41601-020-00157-9.
- [6] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. ± 800 kV 云广直流输电线路保护的仿真及分析[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(31): 179-188.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al. Simulation and analyses for Yun-Guang ± 800 kV HVDC transmission line protection system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(31): 179-188.
- [7] 张晨浩, 宋国兵, 董新洲, 等. 混合多端直流输电线路快速保护及自适应重启方法实用化研究[J/OL]. *中国电机工程学报*: 1-12[2021-02-21]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.200542>.
ZHANG Chenhao, SONG Guobing, DONG Xinzhou, et al. Application research on fast line protection and adaptive restarting methods for multi-terminal hybrid LCC/MMC HVDC transmission lines[J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 1-12[2021-02-21]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.200542>.
- [8] 郑俊超, 文明浩, 秦瑜, 等. 具备故障选极能力的高压直流输电线路差动保护新原理[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(15): 4350-4358.
ZHENG Junchao, WEN Minghao, QIN Yu, et al. A novel differential protection scheme with fault line selection capability for HVDC transmission line[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(15): 4350-4358.
- [9] 郇能灵, 郭培育, 于仲安, 等. II 模型电容电流补偿的同塔四回线电流差动保护[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(12): 34-42.
TAI Nengling, GUO Peiyu, YU Zhongan, et al. Current differential protection using capacitive current compensating algorithm on Pi-model for four-parallel lines on same towers[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(12): 34-42.
- [10] 戴志辉, 刘宁宁, 张程, 等. 基于电流相关性的高压直流线路纵联保护新原理[J]. *华北电力大学学报: 自然科学版*, 2019, 46(5): 8-15.
DAI Zhihui, LIU Ningning, ZHANG Cheng, et al. A protection principle for HVDC lines based on current correlation[J]. *Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition*, 2019, 46(5): 8-15.
- [11] GAO Shuping, SONG Guobing, MA Zhibin, et al. Novel pilot protection principle for high-voltage direct current transmission lines based on fault component current characteristics[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2015, 9(5): 468-474.
- [12] WANG Yanting, ZHANG Baohui, CHENG Shaojie. Pilot protection scheme for transmission line of a hybrid HVDC system based on polarity characteristics of current and voltage fault components[J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(16): 820-825.
- [13] ZHANG Chu, GAO Shuping, SONG Guobing, et al. A pilot protection on hybrid DC line based on correlation coefficient[C] // 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), November 21-23, 2019, Beijing, China: 2575-2579.
- [14] ZHANG Zheren, XU Zheng, XUE Yinglin, et al. DC-side harmonic currents calculation and DC-loop resonance analysis for an LCC-MMC hybrid HVDC transmission system[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30(2): 642-651.
- [15] KONG Fei, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui. A novel traveling-wave-based main protection scheme for ± 800 kV UHVDC bipolar transmission lines[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2016, 31(5): 2159-2168.
- [16] 董新洲, 汤兰西, 施慎行, 等. 柔性直流输电线路保护配置方案[J]. *电网技术*, 2018, 42(6): 1752-1759.
DONG Xinzhou, TANG Lanxi, SHI Shenxing, et al. Configuration scheme of transmission line protection for flexible HVDC grid[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(6): 1752-1759.
- [17] HUANG Qiang, ZOU Guibin, ZHANG Shuo, et al. A pilot protection scheme of DC lines for multi-terminal HVDC grid[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(5): 1957-1966.
- [18] 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.
- [19] WANG Dong, YU Dachuan, YANG Haishan, et al. Novel travelling wave directional pilot protection for VSC-HVDC transmission line[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(9): 1705-1713.
- [20] 陈争光, 周泽昕, 王兴国, 等. 基于双树复小波变换的混合直流输电线路行波保护方法[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3832-3840.
CHEN Zhengguang, ZHOU Zexin, WANG Xingguo, et al. Traveling wave protection for hybrid HVDC transmission lines based on dual-tree complex wavelet transform[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3832-3840.
- [21] 蒋海峰, 张曼, 赵斌炎, 等. 基于改进 Hilbert-Huang 变换的电网故障诊断[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 1): 336-342, 351.
JIANG Haifeng, ZHANG Man, ZHAO Binyan, et al. Fault diagnosis of power grid based on improved Hilbert-Huang transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1): 336-342, 351.
- [22] SONG Guobing, HOU Junjie, GUO Bing, et al. Pilot protection of hybrid MMC DC grid based on active detection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 82-96. DOI: 10.1186/s41601-020-0152-2.
- [23] 李再男, 段建东, 路文超, 等. 柔性中压直流配电网线路加速纵联保护[J/OL]. 电力系统自动化: 1-16 [2021-02-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20201210.1057.004.html>.
LI Zainan, DUAN Jiandong, LU Wenchao, et al. Pilot acceleration line protection of flexible MVDC distribution network[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 1-16[2021-02-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20201210.1057.004.html>.
- [24] 何佳伟, 李斌, 李晔, 等. 多端柔性直流电网快速方向纵联保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6878-6887.
HE Jiawei, LI Bin, LI Ye, et al. A fast directional pilot protection scheme for the MMC-based MTDC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6878-6887.
- [25] 王勇, 李中波, 谢嘉晟, 等. 基于状态坐标分析的高压直流输电线路保护方案[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(1): 16-21.
WANG Yong, LI Zhongbo, XIE Jiasheng, et al. A scheme of HVDC transmission line protection based on the state coordinate[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(1): 16-21.
- [26] 张保会, 张嵩, 尤敏, 等. 高压直流线路单端暂态量保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(15): 18-23.
ZHANG Baohui, ZHANG Song, YOU Min, et al. Research on transient-based protection for HVDC lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(15): 18-23.
- [27] 韩钰, 樊超, 王广克, 等. 基于频谱分析的±800 kV 换流站噪声特性[J]. 中国电力, 2019, 52(10): 40-44, 177.
HAN Yu, FAN Chao, WANG Guangke, et al. Noise characteristics of ±800 kV HVDC convert station based on spectrum analysis[J]. Electric Power, 2019, 52(10): 40-44, 177.
- [28] 王磊, 黄力, 黄照厅, 等. 基于 VMD-后向预测 prony 的直流混合线路故障测距方法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(10): 61-67, 72.
WANG Lei, HUANG Li, HUANG Zhaoting, et al. A fault location method of the DC hybrid line based on VMD-backward prediction prony[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(10): 61-67, 72.
- [29] 王永进, 樊艳芳, 李自乾. 基于改进方向电流法的特高压直流输电线路故障识别[J]. 中国电力, 2019, 52(1): 76-81.
WANG Yongjin, FAN Yanfang, LI Ziqian. Fault diagnosis of UHVDC transmission lines based on improved directional current method[J]. Electric Power, 2019, 52(1): 76-81.

收稿日期: 2020-07-31; 修回日期: 2021-03-10

作者简介:

张大海(1973—), 男, 通信作者, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统监控、继电保护与电能质量等; E-mail: dhzhang1@bjtu.edu.cn

杨宇辰(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流输电故障分析与保护; E-mail: 19121518@bjtu.edu.cn

刘艳梅(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为直流输电故障分析与保护。E-mail: 19121462@bjtu.edu.cn

(编辑 许威)