

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200999

基于 MMC 的直流输电系统双极短路故障保护策略研究

王思华^{1,2}, 赵磊¹, 王军军¹, 陈龙¹

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃省轨道交通电气自动化工程实验室(兰州交通大学), 甘肃 兰州 730070)

摘要: 直流侧故障的区间识别和准确定位是多端柔性直流电网亟需解决的重要问题。利用双极短路故障的电流特征, 提出了一种基于 Pearson 相关系数的故障区间识别方法。根据故障后电流的最大值及其对应的电压值, 提出了一种基于双端非同步电气量数据的故障定位方法。设计了包括故障启动、故障区间识别、故障定位、故障隔离在内的线路保护方案。该方案通过利用本地的电气量来实现线路保护, 具有较强的耐受过渡电阻和抗扰动的能力。在 PSCAD 平台上搭建了一个四端柔性直流输电系统, 经大量的仿真验证了所提出的故障区间识别和故障定位方案的适用性和准确性。

关键词: 多端柔性直流电网; 模块化多电平换流器; 双极短路; 故障区间识别; 故障定位

Research on protection strategy of a bipolar short circuit fault in an HVDC transmission system based on MMC

WANG Sihua^{1,2}, ZHAO Lei¹, WANG Junjun¹, CHEN Long¹

(1. College of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Rail Transit Electrical Automation Engineering Laboratory of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Interval identification and accurate location of faults on the DC side are important issues that need to be resolved urgently for a multi-terminal flexible DC grid. This paper uses the current characteristics of bipolar short-circuit faults and proposes a fault interval identification method based on the Pearson correlation coefficient. Given the maximum value of the current after the fault and its corresponding voltage value, a fault location method based on double-ended asynchronous electrical quantity data is proposed. A line protection scheme including fault initiation, fault zone identification, fault location, and fault isolation is designed. This scheme realizes line protection by measuring local electrical quantities, and has strong tolerance to transition resistance and anti-disturbance capabilities. A four-terminal flexible DC transmission system is built on the PSCAD platform, and a large number of simulations have verified the applicability and accuracy of the fault zone identification and fault location scheme proposed in this paper.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51767014 and No. 51867013).

Key words: multi-terminal flexible DC grid; modular multi-level converter; bipolar short circuit; fault section identification; fault location

0 引言

基于模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的柔性直流输电系统由于其在电网非同步互联、新能源连接、孤岛供电、远距离大

容量传输等方面所表现出的优势而被广泛应用^[1-3]。随着电力电子技术的不断发展, 柔性直流输电已成为当下世界能源互联网的重要发展趋势。

目前, 直流电的传输仍然以电缆线路为主, 因其故障率低, 且一般为永久性故障, 本应停电检修。但电缆线路并不适合远距离大容量的直流电传输, 相比之下, 架空线路由于其结构简单、造价低廉、输电线路走廊利用率高等优势, 将被广泛运用于未来的直流电网建设中^[4-5]。但是架空线发生故障的概

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51767014, 51867013); 中国铁路总公司科技研究开发计划资助项目(2017010-C)

率较高,主要故障类型有单极接地短路、双极短路和断线故障。其中,双极短路故障对系统的危害最为严重。因此,研究基于 MMC 的直流系统双极短路故障保护策略对系统的安全运行具有重大意义^[6-7]。

当前有关双极短路故障的保护在文献[8-18]中有所报道。文献[8]利用基于 MMC 的柔性直流输电线路两端的电流突变量来进行双极短路故障定位,具有较高的准确性和适用性,但此法对于短线路故障定位误差较大。文献[9-11]采用行波测距的方法进行柔性直流线路的故障定位,但行波波头的可靠识别和行波传输速度的确定是需要解决的难题。文献[12]针对 MMC-MTDC 提出了一种基于最小二乘法的支持向量回归方案,通过希尔伯特-黄变换提取故障特征,利用故障特征作为支持向量回归的输入从而得到故障距离,具有较好的准确性和可靠性。文献[13]运用小波变换分析柔性直流故障电流中的特征信息,再将其作为模糊遗传算法的输入量进行短路故障保护,在一定程度上提高了测距精度,避免了电压、电流传感器所产生的误差。文献[14]提出了一种改进的基于 MMC 的架空直流电网直流故障保护算法,在模态域分析的基础上,结合正负电抗器电压故障特征,采用线模电抗器电压识别内部故障,具有较强的鲁棒性,检测速度较快。文献[15]通过小波变换提取故障后的线路边界特征量来识别 MMC-HVDC 故障发生区间,但此法并不能准确区分出故障极。文献[16]提出了一种新型的 MMC-HVDC 线路保护方案,该方案采用状态估计算法检测瞬时测量值与受保护的 MMC-HVDC 线路模型的一致性,如果发现不一致则跳闸。该方法在充分利用了测量数据的冗余性的同时减少了测量误差的影响,但快速数据测量和精确的模型是需要解决的难题。文献[17]采用余弦距离判据,设计并提出了一种用于半桥 MMC-HVDC 输电线路短路故障检测的纵联保护方案。该方案对受保护线路沿线的任何故障位置都具有较为正确的反应动作。文献[18]提出了一种基于故障定位比较分量法的半桥 MMC-HVDC 电网母线无单元无差动保护方案。该方案对高阻的单极和双极短路故障具有较高的灵敏性,同时对指定保护区外的所有交直流故障具有较强的鲁棒性。

本文以双极短路故障为研究对象,提出了一整套的线路保护方案设计。首先通过分析双极短路故障的电流电压特征,提出了一种双极短路故障的启动判据。其次利用故障区内、外电流的不同,提出了一种基于 Pearson 相关系数的故障区间识别方法。随后利用双端 MMC 非同步的故障电流最大值与电压值来进行故障的定位。最后选择了一种适用于双

极短路故障的隔离方案。在 PSCAD 上搭建了四端柔性直流电网,仿真验证了所提出的保护方案的可行性。

1 MMC-HVDC 双极短路故障特征分析

MMC 拓扑结构由德国学者在 2001 年首次提出,其桥臂由子模块(Sub-Module, SM)级联的方式构成^[19]。基于 MMC 的柔性直流输电线路发生双极短路故障后,其故障的发展分为两个阶段,即 MMC 子模块闭锁前故障电流的上升以及闭锁后故障电流的下降。在换流器闭锁前,MMC 的子模块电容经过换流器桥臂向故障点放电,导致直流电流迅速升高,直流电压快速下降,此时的故障电流中电容放电电流占主导地位,交流电源三相短路电流要远低于电容放电电流^[20-22]。当过流、欠压判据检测到故障,换流器被强制进入闭锁状态,与此同时,交流断路器跳闸,切断了交流侧故障电流的馈入。MMC 子模块电容因其放电回路被阻断而不再放电,故障电流以某一特定的时间常数衰减,桥臂电抗通过二极管续流释放能量,直到电流为零。在换流器闭锁后的故障期间,MMC 所采用的控制方式为低电压穿越控制,电网侧换流器将以抑制电流中的负序分量为控制目标。

在 MMC 触发脉冲闭锁前,流过直流断路器的故障电流的流通过程为:故障点、接地极、三个并联的相单元、平波电抗器、直流断路器、直流线路、故障点。其 MMC 拓扑结构及故障电流分布如图 1 所示。

MMC 子模块电容的放电电流与时间的关系如图 2 所示,其故障电流峰值的大小主要是由换流器闭锁的时刻来决定^[23-25]。

2 基于 MMC 的直流输电系统双极短路故障保护方案设计

本文以基于半桥 MMC 的四端柔性直流输电系统为研究对象,设计其输电线路发生双极短路故障时的保护方案,其系统结构图如图 3 所示。

2.1 故障检测原理及判据

由第 1 节的分析可知,当基于 MMC 的直流输电线路发生双极短路故障时,MMC 子模块电容会迅速向短路点放电,产生较大的故障电流,极间电压迅速降为零,所以以此来作为故障检测启动的原理,在半桥模块化换流器(HB-MMC)内部设置相关配置和信号检测点,并结合直流线路的保护点信号,对直流母线进行极间故障保护配置。其启动判据如式(1)所示。

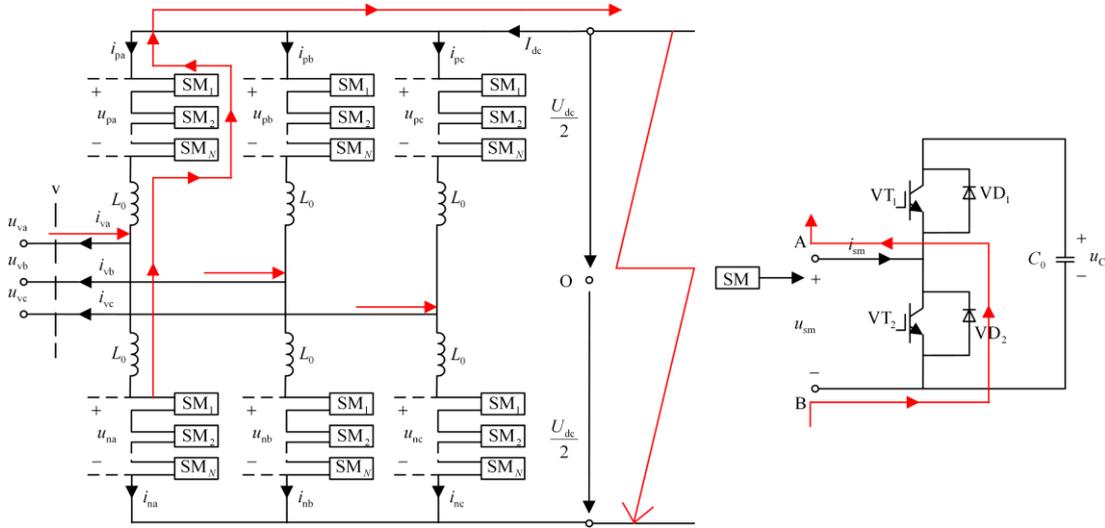


图 1 MMC 拓扑结构及故障电流分布

Fig. 1 MMC topology and fault current distribution

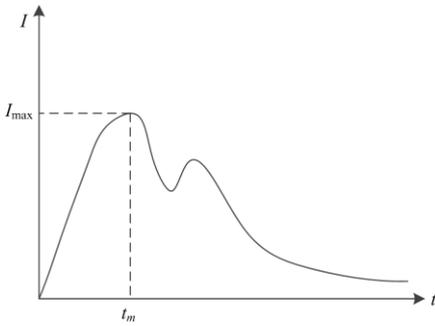


图 2 电容放电与时间的关系

Fig. 2 Relationship between capacitor discharge and time

式中: U_{pt} 、 U_{nt} 为线路正、负极接地电压; I_{pt} 、 I_{nt} 为线路正、负极电流; U_{set} 、 I_{set} 分别为电压、电流的运行阈值, 其定值如式(2)所示。

$$\begin{cases} U_{set} = k_{setU} \times U_{base} \\ I_{set} = k_{setI} \times I_{base} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $k_{setU} = 0.95$; $k_{setI} = 1.9$; U_{base} 、 I_{base} 分别为直流极间电压和电流的参考值。

2.2 基于 Pearson 相关系数的故障区间识别

文中所提出的低压过流检测原理能够迅速判断系统是否发生双极短路故障, 满足 MMC-HVDC 保护的速动性要求, 但并不能判别故障发生在直流线路上(区内)还是发生在线路保护区出口处(区外), 鉴于此, 本文提出了一种基于 Pearson 相关系数的故障区间识别方法, 能够快速可靠地识别出故障所发生的区间, 确保故障定位只在区内故障时有效。当 MMC-HVDC 线路发生区内、区外故障时, 线路两端的电容支路暂态电流和线路入口处的暂态电流具有较为明显的差异。柔直系统线路故障期间, 由于受其低压穿越协调策略的限制, 其出口处电流因被限制在控制范围内而增幅缓慢, 远小于系统侧电流变化趋势, 区别于传统交流电网^[26]。

2.2.1 故障线路的模型分析

以图 3 中直流线路 L_1 的保护为例来分析柔直输电系统线路的故障区间识别, 其系统构成及故障区间划分如图 4 所示。

图 4 中, 直流输电线路全长为 L_1 , CT1 和 CT2 为直流输电线路两端的电流传感器, 用以实时测量直流电流; A_1 、 B_1 为线路两端的直流断路器; 记两

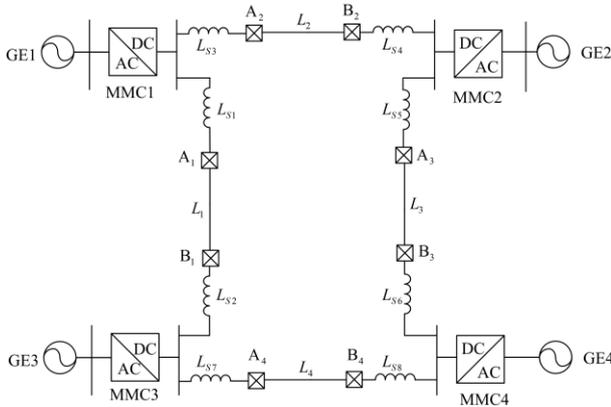


图 3 四端柔性直流电网

Fig. 3 Four-terminal flexible DC grid

$$\begin{cases} |U_{pt} - U_{nt}| \leq U_{set} \text{ 且 } |I_{pt}| \geq I_{set} \\ \text{或} \\ |U_{nt} - U_{pt}| \leq U_{set} \text{ 且 } |I_{nt}| \geq I_{set} \end{cases} \quad (1)$$

个电流传感器 CT1 和 CT2 之间的输电线路所发生的故障为区内故障，其余部分故障为区外故障。

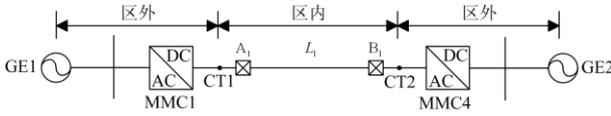


图 4 故障区间划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of fault zone division

当线路 L_1 发生双极短路故障后，简化后的直流输电线路正极故障放电等效电路如图 5 所示。

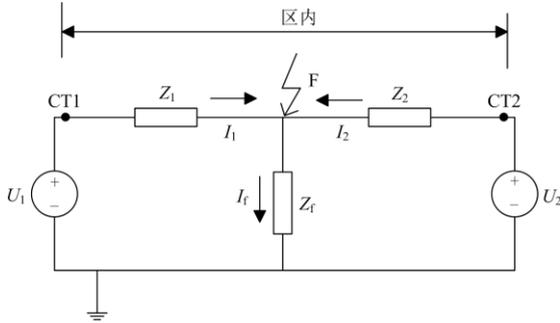


图 5 输电线路正极故障等效回路

Fig. 5 Equivalent circuit of positive fault of transmission line

图 5 中，线路两端的故障电压为 U_1 、 U_2 ；故障电流为 I_1 、 I_2 ； F 表示故障点，等效阻抗为 Z_1 、 Z_2 ；故障电流的总和为 I_f ，故障后的过渡阻抗为 Z_f 。由 KCL 回路方程可得

$$\begin{cases} U_1 = I_1 Z_1 + I_f Z_f \\ U_2 = I_2 Z_2 + I_f Z_f \end{cases} \quad (3)$$

由图 5 及式(3)可知，当发生区内故障时，故障回路将正极等效电路分为左回路和右回路，故障点左侧的电流近似相等，故障点右侧的电流近似相等，但由于 U_1 、 U_2 、 Z_1 、 Z_2 均不相等，所以故障点左右两侧的电流值没有相关性。故障发生后，电流传感器 CT1 中测量到的是左回路故障电流，CT2 中测量到的是右回路故障电流，两处电流传感器测量到的电流信号存在较大的差异，且故障电流方向相反。当发生区外故障且输电线路较短时，CT1 和 CT2 处于同一回路中，所测得的故障电流近似相等。

根据上述分析，可以通过 CT1、CT2 所测得的电流信号值来区分故障发生的区间。当 CT1、CT2 所测得的电流近似相等时，则判定为发生区外故障；当 CT1、CT2 测得的电流信号差异较大时，则判定为发生区内故障。

2.2.2 基于 Pearson 相关系数的故障区间识别理论及判据

皮尔逊相关系数(Pearson Correlation Coefficient,

PCC)适用于分析平稳和随机信号，对于两个变量信号 X 、 Y ，将描述信号相关性的皮尔逊系数定义为这两个变量信号的协方差和标准差的商，其表达式^[27]为

$$\rho_{X,Y} = \frac{s(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

式中： $\rho_{X,Y}$ 为 X 、 Y 的 Pearson 相关系数； $s(X,Y)$ 为 X 、 Y 的协方差； σ_X 、 σ_Y 分别为 X 、 Y 的标准差； n 为时间窗口的采样点数。

$\rho_{X,Y}$ 的大小在 $[-1,+1]$ 范围内， -1 表示两个信号完全负相关， $+1$ 表示完全正相关， 0 则表示完全独立。将 Pearson 相关系数运用在此电路系统中，信号 X 、 Y 分别表示电流传感器 CT1、CT2 中实时测得的电流值。当 CT1、CT2 中检测到的电流值计算后得到的 $\rho_{X,Y}$ 接近于 -1 时，说明 CT1、CT2 中测得的电流值呈负相关，结合上一节的分析可知，这两处的电流值不相等，即可得到故障位于区内的结论。相反，若是 $\rho_{X,Y}$ 接近于 1 ，则说明这两处所测量的电流值呈正相关，电流值近似相等，即可得到故障位于区外的结论。由此可得基于 Pearson 相关系数的故障区间识别的判别依据如式(5)所示。

$$\begin{cases} \rho_{X,Y} < 0, \text{ 区内故障} \\ \rho_{X,Y} > 0, \text{ 区外故障} \end{cases} \quad (5)$$

2.3 基于双端故障电流最大值的定位法

2.3.1 测距原理

当系统检测并识别出线路 L_2 发生区内双极短路故障后，MMC 迅速闭锁，直流断路器断开。与此同时，测量 MMC1 及 MMC2 两端的子模块电流及与之对应的电压值^[28]。由第 1 节的双极短路故障暂态特性分析可知：当电容完全放电后，故障电流达到最大值，此时有 $di/dt = 0$ ，可以以此为特征测量 MMC1 及 MMC2 端的故障电流最大值，然后利用双端测量到的非同步电流最大值及电压值来进行故障定位。

测距时 MMC 所投入的子模块数量直接决定了电容电压值及故障电流所能达到的最大值，所以为了提高测量精度，本文所提出的测距方法采用一次仅投入一个子模块，避免了一端 MMC 向另一端 MMC 反向充电的可能。当检测出 MMC1 端第一个子模块故障电流最大值及其对应的电容电压值之后，再投入第二个子模块进行检测，直到第 N 个子模块投入。MMC2 端的测量与 MMC1 端一致，在分别得到两端 MMC 的 N 组故障电流最大值及电压

值之后, 便可进行故障的定位计算。

2.3.2 测距方法

当线路 L_1 发生双极短路后, 其故障电流主要由电容放电造成。MMC 闭锁前子模块在任一时刻其上下桥臂共投入 N 个子模块, 所以其闭锁前故障等效电路如图 6 所示。

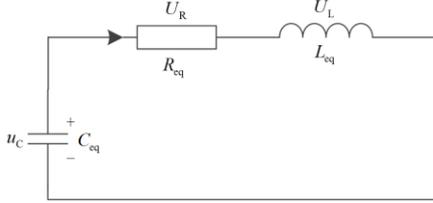


图 6 闭锁前故障等效电路

Fig. 6 Fault equivalent circuit before blocking

其中, 电容等效值 C_{eq} 、电感等效值 L_{eq} 、电阻等效值 R_{eq} 如式(6)所示。

$$\begin{cases} C_{eq} = \frac{6C}{N} \\ L_{eq} = \frac{2}{3}L_{s1} + 2L_{s2} + 2xl_0 \\ R_{eq} = \frac{2}{3}R_1 + 2xr_0 + R_f \end{cases} \quad (6)$$

式中: L_{s1} 、 L_{s2} 分别为桥臂电抗器与平波电抗器; R_1 、 R_f 为桥臂电阻与故障回路过渡电阻; x 为故障点距 MMC1 端的距离; l_0 、 r_0 分别为单位长度线路的电感、电阻值。

由图 6 所示故障等效电路可知, 两端 MMC 等效电路构成了经典的 RLC 串联电路, 由于电容具有初始电压, 因此电路的放电过程即是二阶电路的零输入响应。则 MMC1 端根据 KVL 可得式(7)。

$$L_{eq}C_{eq} \frac{d^2U_C}{dt^2} + R_{eq}C_{eq} \frac{dU_C}{dt} + U_C = 0 \quad (7)$$

当 MMC-HVDC 输电线路发生双极短路时电容处于欠阻尼放电状况。令:

$$\begin{cases} \delta = \frac{R_{eq}}{2L_{eq}} \\ \omega^2 = \frac{1}{L_{eq}C_{eq}} - \left(\frac{R_{eq}}{2L_{eq}}\right)^2 \\ \omega_0 = \sqrt{\delta^2 + \omega^2} = \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C_{eq}}} \\ \beta = \arctan \frac{\omega}{\delta} \end{cases} \quad (8)$$

则通过求解 RLC 串联电路放电过程的微分方程可得

$$p_{1,2} = -\delta \pm j\omega \quad (9)$$

$$u_c = \frac{U_C \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta) \quad (10)$$

$$i_c = \frac{U_C}{\omega L_{eq}} e^{-\delta t} \sin(\omega t) \quad (11)$$

$$u_L = -\frac{U_C \omega_0}{\omega} e^{-\delta t} \sin(\omega t - \beta) \quad (12)$$

式中: δ 为衰减系数; ω 为衰减振荡的角频率; $p_{1,2}$ 为微分方程的特征值; u_c 为 MMC1 端电容瞬间电压; i_c 为电容瞬间电流; u_L 为电感瞬间电压。

双端等效 RLC 电路分别在其电容电流最大时刻电感电压为零, 再根据以上的分析可知, 利用 MMC 子模块电容放电过程中所测得电流最大值及电压值得如下的测距公式:

$$\frac{U_{C1}}{I_{max1}} = \frac{2}{3}R_1 + R_f + 2xr_0 \quad (13)$$

$$\frac{U_{C2}}{I_{max2}} = \frac{2}{3}R_1 + R_f + 2(L_1 - x)r_0 \quad (14)$$

其中, U_{C1} 、 I_{max1} 、 U_{C2} 、 I_{max2} 分别是 MMC1、MMC2 端测得的电压值及电流最大值。联立式(2)、式(3)可得故障距离 x 与过渡电阻 R_f 分别为

$$x = \frac{U_{C1}}{4r_0 I_{max1}} - \frac{U_{C2}}{4r_0 I_{max2}} + \frac{L_1}{2} \quad (15)$$

$$R_f = \frac{U_{C1}}{2I_{max1}} + \frac{U_{C2}}{2I_{max2}} - L_1 r_0 - \frac{2}{3}R_1 \quad (16)$$

2.4 故障清除策略

目前柔性直流输电系统的故障清除策略主要有三种: 第一种是交流断路器和快速隔离开关的组合, 但由于柔性直流输电系统要求在几毫秒内清除故障, 而交流断路器动作周期较长, 会影响系统的供电可靠性, 所以此策略不会大量用于未来的直流输电系统; 第二种是采用具有直流侧故障自清除模式的 MMC 拓扑结构, 此种策略无需机械动作开关, 能够迅速地清除故障并恢复系统运行, 但此法会导致整个系统停运, 且运行成本较大, 仅适用于小规模直流电网; 第三种是限流电抗器和直流断路器的组合, 此法能够满足直流电网速动性、可靠性、经济性要求, 应用前景较为广阔^[29-30], 本文的故障清除策略便是基于此种方法上。

本文采用基于半桥子模块的 MMC 配合混合式直流断路器来清除直流侧故障。混合式直流断路器结合了固态断路器和机械式断路器的优点, 在保证故障切除速度和切除容量的提前下, 大大地减少了故障切除的通态损耗。混合式直流断路器的基本结构如图 7 所示。

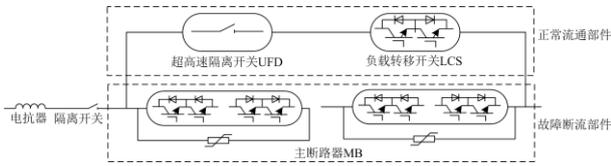


图 7 混合式直流断路器基本结构

Fig. 7 Basic structure of hybrid DC circuit breaker

混合式直流断路器主要由三部分构成：主断路器(MB)、负载转移开关(LCS)、超高速隔离开关(UFD)。当在稳态运行时，MB 处于关断状态，LCS 和 UFD 处于闭合状态，直流电流通过正常流通部件流通。当直流线路发生故障，首先对 LCS 施加关断信号，电流被转移到故障断流部件中。其次断开 UFD，经过 2 ms 的开断动作延迟后，再对 MB 施加关断信号，MB 断开瞬间相当于其各分段的避雷器接入到故障线路中，避雷器的接入使流过故障线路的电流振荡衰减到零。

2.5 整体保护方案流程图

线路 L_1 发生双极短路故障后整体保护方案流程图如图 8 所示。

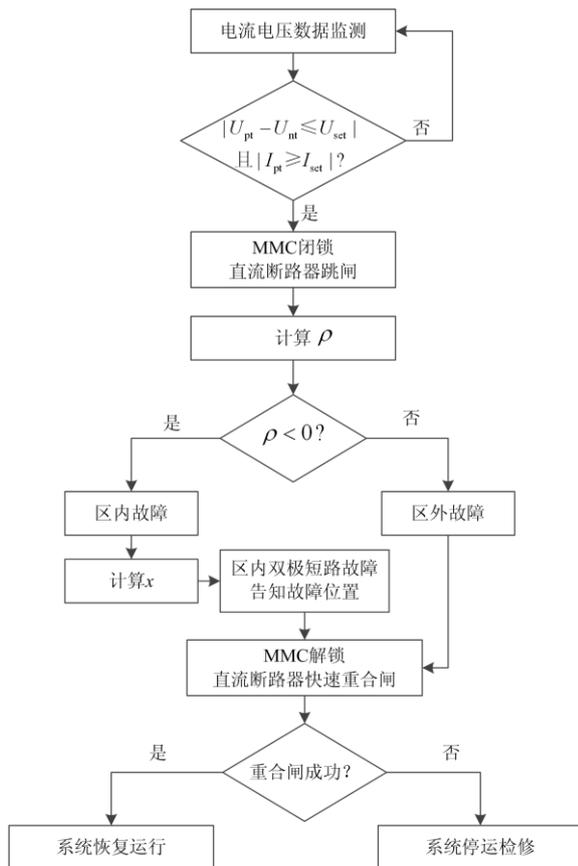


图 8 整体保护方案流程图

Fig. 8 Flow chart of overall protection plan

3 仿真验证

在 PSCAD 上搭建如图 3 所示的四端柔性直流电网，其参数如表 1 所示。直流系统主接线采用双极结构，换流站 1、3、4 采用定有功功率和定无功功率控制，换流站 2 采用定无功功率和定直流电压控制。直流线路为架空线的依频模型，输电线路两端设置了平波电抗器，抑制短路电流的增大，提高系统的故障穿越能力^[31]。

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

系统参数	数据
线路长度/km	L_1 : 50
	L_2 : 208
	L_3 : 180
	L_4 : 205
直流输电线路电压/kV	±500
换流站 1 有功功率/MW	800
换流站 2 有功功率/MW	1 000
换流站 3 有功功率/MW	1 200
换流站 4 有功功率/MW	500
桥臂子模块数 N	100
子模块电容/ μF	1 000
平波电抗器/mH	100

3.1 基于 Pearson 相关系数的故障区间识别仿真验证

在线路 L_1 上距离 MMC1 端 18 km 处设置过渡电阻为 50Ω 的双极短路故障，故障时刻为 $t=1 \text{ s}$ ，电流传感器 CT1、CT2 处测得的故障电流如图 9、图 10 所示。由图 9、图 10 可以看出，当发生区内故障时，两端电流差异较大，且电流方向相反。设置电流采样频率为 10 kHz，记录 1.00~1.15 s 之间的故障电流值，代入式(4)的 Pearson 相关系数计算式

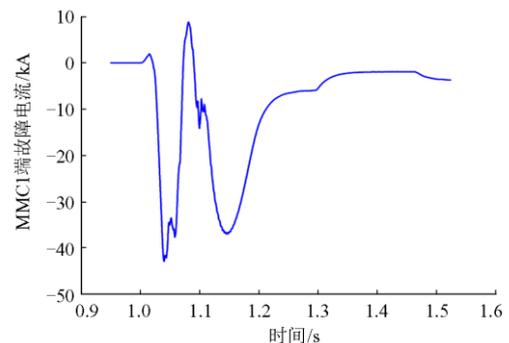


图 9 MMC1 侧故障电流

Fig. 9 Fault current on MMC1 side

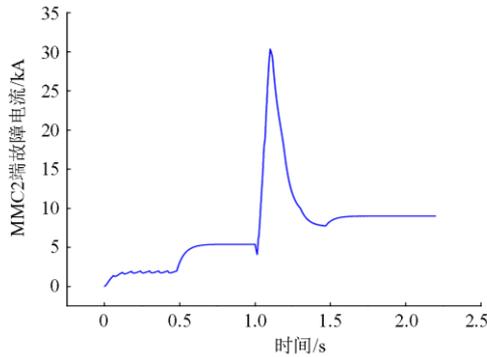


图 10 MMC2 侧故障电流

Fig. 10 Fault current on MMC2 side

中, 得到 $\rho = -0.7862$, 表明两处电流呈负相关, 根据 2.2 节分析可知, 故障位于区内, 与事实相符。

在 MMC1 端保护出口处, CT1 左侧设置过渡电阻为 50Ω 的双极短路故障, 故障时刻为 $t=1 \text{ s}$, CT1 与 CT2 处测得的故障电流如图 11 所示。由图 11 可以看出, 当发生区外故障且输电线路较短时, 两端故障电流基本一致。将故障电流值代入式(4)所示的 Pearson 相关系数计算式中, 得到 $\rho=0.9655$, 表明两处电流呈正相关, 根据 2.2 节分析可知, 故障位于区外, 与事实相符。

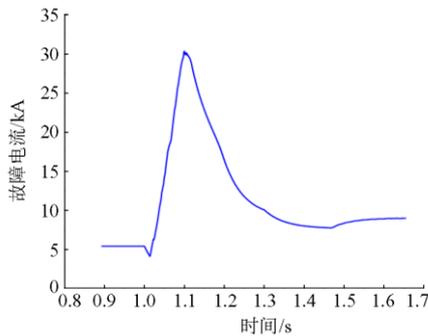


图 11 两端 MMC 故障电流

Fig. 11 MMC fault current at both ends

3.2 基于双端故障电流最大值定位法仿真验证

在线路 L_1 上距离 MMC1 端 10、20、30、40 km 处分别设置过渡电阻为 30、50、100、300 Ω 的双极短路故障, 仿真结果如表 2 所示。由仿真结果可以看出, 本文所提出的双极短路故障定位方法所产生的误差在 2%之内, 能够较好地进行故障定位。

4 结论

本文针对双极短路故障, 利用本地电气量, 提出了一种新的故障区间识别方法和故障定位方法, 结论如下:

表 2 双极短路故障测距结果

Table 2 Location results of bipolar short circuit fault				
过渡电阻/ Ω	故障距离/km	距离测量值/km	定位误差/%	过渡电阻测量值/ Ω
30	10	9.856	1.44	29.985
	20	20.254	1.27	29.955
	30	29.584	1.39	28.647
	40	40.347	0.88	29.669
50	10	10.187	1.87	48.887
	20	19.758	1.21	49.658
	30	30.425	1.42	49.698
	40	39.596	1.01	48.898
100	10	9.862	1.35	97.895
	20	20.356	1.19	99.882
	30	29.487	1.71	98.689
	40	39.589	1.03	99.978
300	10	9.958	0.42	299.995
	20	19.882	0.59	299.478
	30	30.248	0.83	298.254
	40	40.378	0.95	298.375

1) 利用双极短路故障时的电气特征量, 可以直接忽略直流线路正常负荷电流对故障区间识别和故障定位的影响, 而且无需复杂的算法提取特征量, 计算量较小。

2) 利用线路双端计算的 Pearson 相关系数实现故障区间判别, 传递的信息仅为对端的电流特征值, 与传统的电流差动判别方法相比, 该方法故障判别原理简单可靠, 能准确地判别区内外故障。

3) 利用 MMC 子模块为 RLC 电路提供初始电压, 原理简单, 不受过渡电阻和传输功率的影响, 且采用双端非同步测量数据, 无需时间同步设备, 易于实现。

参考文献

- [1] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [2] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [3] 姚良忠, 吴婧, 王志冰, 等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020.
YAO Liangzhong, WU Jing, WANG Zhibing, et al. Analysis of the future development of high-voltage DC power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020.
- [4] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17, 24.

- TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal DC transmission and DC grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17, 24.
- [5] 刘建锋, 张科墨, 高亮, 等. 基于继电保护信息与改进谱聚类分析的电网故障区域识别算法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 37-43.
- LIU Jianfeng, ZHANG Kezhao, GAO Liang, et al. Power grid fault region identification algorithm based on relay protection information and improved spectral clustering analysis[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 37-43.
- [6] 胡竞竞, 徐习东, 裘鹏, 等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 844-851.
- HU Jingjing, XU Xidong, QIU Peng, et al. A review of the protection methods in DC distribution system[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 844-851.
- [7] 萧展辉, 蔡微, 黄剑文, 等. MMC 型多端柔性直流配电系统协同控制与故障电流抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 103-110.
- XIAO Zhanhui, CAI Wei, HUANG Jianwen, et al. Coordinate control scheme for modular multilevel converter based multi-terminal DC distribution power systems and circuit suppression during faults[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 103-110.
- [8] 吕煜, 朱思丞, 汪楠楠, 等. 基于电流突变量的直流电网区内双极短路故障定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4686-4694, 4971.
- LÜ Yu, ZHU Sicheng, WANG Nannan, et al. Internal pole-to-pole short-circuit fault location of bipolar HVDC grid using sudden-change current information[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4686-4694, 4971.
- [9] TANG L, OOI B. Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1877-1884.
- [10] 孙刚, 时伯年, 赵宇明, 等. 基于 MMC 的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 127-133.
- SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Yuming, et al. Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 127-133.
- [11] 王少荣, 赵妍卉. 双极 HVDC 输电线路行波故障定位[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 124-128.
- WANG Shaorong, ZHAO Yanhui. Traveling-wave fault location of double-pole HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(7): 124-128.
- [12] ZHANG M, WANG H. Fault location for MMC-MTDC transmission lines based on least squares-support vector regression[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16): 2125-2130.
- [13] JUNIOR LACERDA V A, MONARO R M, et al. Selective non-unit protection technique for multi-terminal VSC-HVDC grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 33(5): 2106-2114.
- [14] YANG S, XIANG W, LI R, et al. An improved DC fault protection algorithm for MMC HVDC grids based on modal domain analysis[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(4): 4086-4099.
- [15] 程宏波, 高雅琦, 王勋, 等. 基于故障类型识别的输电线路自适应测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 131-138.
- CHENG Hongbo, GAO Yaqi, WANG Xun, et al. Adaptive fault location method for transmission line based on fault type recognition[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 131-138.
- [16] WANG B, LIU Y, LU D, et al. MMC-HVDC transmission line protection based on Bergeron model and state estimation[C] // 8th Renewable Power Generation Conference (RPG 2019), October 24-25, 2019, Shanghai, China.
- [17] FARSHAD M. A pilot protection scheme for transmission lines of half-bridge MMC-HVDC grids using cosine distance criterion[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 1089-1096.
- [18] FARSHAD M. Ultra-high-speed non-unit non-differential protection scheme for buses of MMC-HVDC grids[J]. IET Renewable Power Generation, 2020, 14(9): 1541-1549.
- [19] 李斌, 何佳伟, 冯亚东, 等. 多端柔性直流配电网保护关键技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 2-12.
- LI Bin, HE Jiawei, FENG Yadong, et al. Key techniques for multi-terminal flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 2-12.
- [20] 时伯年, 李岩, 孙刚, 等. 基于全过程故障电流的多端柔直配电网直流故障保护策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3076-3083.
- SHI Bonian, LI Yan, SUN Gang, et al. DC fault protection strategy for multi-terminal flexible DC distribution network based on full fault current information[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3076-3083.
- [21] 张峻嶲, 向往, 饶宏, 等. 含直流断路器的架空柔性直流配电网直流故障保护方案研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4631-4645, 4969.
- ZHANG Junjie, XIANG Wang, RAO Hong, et al. Research on DC fault protection scheme of overhead MMC based DC grid with DC circuit breaker[J]. Proceedings of

- the CSEE, 2018, 38(16): 4631-4645, 4969.
- [22] 杨海倩, 王玮, 荆龙, 等. MMC-HVDC 系统直流侧故障暂态特性分析[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 40-46.
YANG Haiqian, WANG Wei, JING Long, et al. Analysis on transient characteristic of DC transmission line fault in MMC based HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 40-46.
- [23] 葛雪峰, 张亮, 李丹栋, 等. 交直流混合配电网直流故障限流器拓扑及工作原理综述[J]. 广东电力, 2020, 33(12): 102-108.
GE Xuefeng, ZHANG Liang, LI Dandong, et al. Review on topology and working principle of DC fault current limiter for AC-DC hybrid distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(12): 102-108.
- [24] 蒋原, 李擎, 冯茜, 等. 基于 BP 神经网络的直流电网故障定位与保护方法[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 23-28.
JIANG Yuan, LI Qing, FENG Qian, et al. Fault location and protection method for DC power grid based on BP neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 23-28.
- [25] 朱鹏, 夏向阳, 李明德, 等. 基于能量比值分析的直流输电线路故障判别[J]. 中国电力, 2020, 53(8): 85-90, 99.
ZHU Peng, XIA Xiangyang, LI Mingde, et al. Fault identification of DC transmission lines based on energy ratio analysis[J]. Electric Power, 2020, 53(8): 85-90, 99.
- [26] 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 Danchao, 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.
- [27] 刘剑, 邵能灵, 范春菊, 等. 基于暂态电流 Pearson 相关性的两电平 VSC-HVDC 直流线路故障判别[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 74-85.
LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. A fault identification method for two-level VSC-HVDC DC line based on Pearson correlation of transient current[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 74-85.
- [28] 武建卫, 邵剑峰. 计及波速变化的反行波直流输电线路故障测距方法[J]. 中国电力, 2021, 54(5): 121-128.
WU Jianwei, SHAO Jianfeng. Fault location of DC transmission lines based on backward waves considering wave speed changes[J]. Electric Power, 2021, 54(5): 121-128.
- [29] 黄强, 邹贵彬, 高磊, 等. 基于 HB-MMC 的直流电网直流线路保护技术研究综述[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2830-2840.
HUANG Qiang, ZOU Guibin, GAO Lei, et al. Review on DC transmission line protection technologies of HB-MMC based DC grids[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2830-2840.
- [30] 徐政, 刘高任, 张哲任. 柔性直流输电网的故障保护原理研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 1-8.
XU Zheng, LIU Gaoren, ZHANG Zheren. Research on fault protection principle of DC grids[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 1-8.
- [31] 蔡巍, 赵媛, 胡应宏, 等. 张北柔性直流电网变电站能耗装置系统仿真研究[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 212-220.
CAI Wei, ZHAO Yuan, HU Yinghong, et al. Simulation study on energy consumption device in power substation of Zhangbei flexible HVDC power grid[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 212-220.

收稿日期: 2020-08-16; 修回日期: 2020-10-22

作者简介:

王思华(1968—), 男, 教授, 研究生导师, 研究方向为高电压与绝缘技术; E-mail: ws_h@163.com

赵磊(1996—), 男, 通信作者, 硕士, 研究方向为柔性直流输电。E-mail: 2396332472@qq.com

(编辑 魏小丽)