

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200211

基于 LCC 和 FHMMC 的混合多端直流系统 线路保护方案研究

田培涛¹, 吴庆范¹, 黄金海¹, 孙攀磊¹, 李亚锋¹, 岳笑歌¹, 鄂士平²

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430077)

摘要: 混合多端直流线路故障的检测和隔离是一个亟待解决的问题。针对基于电网换相型(Line Commutated Converter, LCC)和混合型模块化多电平换流器(Full Half Bridge Modular Multilevel Converter, FHMMC)的混合多端直流系统拓扑架构, 在分析直流线路故障影响的基础上, 提出了一种多端直流线路保护方案。首先, 通过配置快速线路保护系统, 在模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)换流器过流闭锁前检测出线路故障。其次, 采用在换流站两端配置线路保护系统保护直流线路全长、中间换流站配置线路保护系统分别保护两条线路的配置方案。在此基础上, 提出利用线路故障后汇流母线区两侧电流变化量的不同, 构造线路故障区域识别判据以解决多端线路故障区域识别问题。最后, 通过与控制系统相配合将 MMC 站直流电压控制为零压或负压, 并将 LCC 站快速移相, 实现线路故障的自清除及隔离。仿真结果验证了所提方案的可行性。

关键词: 混合多端; 直流线路故障; 直流线路保护; 故障区域; 快速性

Research on protection strategy of a hybrid multi-terminal DC system based on LCC and FHMMC

TIAN Peitao¹, WU Qingfan¹, HUANG Jinhai¹, SUN Panlei¹, LI Yafeng¹, YUE Xiaoge¹, E Shiping²

(1. XJ Electric Co. Ltd., Xuchang 461000, China; 2. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430077, China)

Abstract: The detection and isolation of hybrid multi-terminal DC line fault is an urgent problem. In this paper, aiming at the topology structure of hybrid multi-terminal DC system based on Line Commutated Converter (LCC) and Hybrid Half Bridge Modular Multilevel Converter (FHMMC), a multi-terminal DC line protection scheme is proposed. First, by configuring fast line protection system, the line fault is detected before the Modular Multilevel Converter (MMC) is over-currently blocked. Secondly, a configuration scheme is proposed in which the two ends of the converter station are configured with a line protection system to protect the full length of the DC line, and the intermediate converter station is configured with a line protection system to protect the two lines. Based on this, a line fault area identification criterion is constructed using the difference in current changes on both sides of the bus bar area after a line fault to solve the problem of multi-terminal line fault area identification. Finally, in cooperation with the control system, the DC voltage of the MMC station is controlled to zero or negative pressure, and the LCC station is quickly phase-shifted to realize self-clearing and isolation of line faults. The feasibility of the proposed strategy is verified by simulation.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900603) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52094017000W).

Key words: hybrid multi-terminal; DC line fault; DC line protection; fault area; rapidity

0 引言

目前基于 LCC 和 VSC 的混合多端直流输电系统是直流输电领域研究的热点。该类型的拓扑结构

同时具备了 LCC 和 VSC 的优点^[1-2], 其整流站采用具备低成本、低损耗的 LCC, 逆变侧采用不存在换相失败问题的 VSC, 在避免传统两端直流输电系统的缺点的同时, 更能体现出直流输电的灵活性与经济性^[3-5]。

由于目前规划的混合多端工程采用高压架空线作为直流输电线路, 在具有功率输送能量大、输送

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900603);
国家电网公司科技项目资助(52094017000W)

距离远、电压等级高等优点的同时,也承受着输电线路故障发生率高的风险。由于逆变站采用 VSC,且含有多条直流线路,一旦发生直流线路故障,其故障电流发展较快,会迅速导致多个 VSC 过流闭锁^[6],造成直流保护缺少选择性。如果为瞬时故障,则 VSC 站失去了通过线路重启清除故障的机会;如果为永久故障,则需要快速判断出故障发生在哪条线路上以便隔离故障线路^[7]。因此,直流线路故障的快速检测和故障线路隔离技术是混合多端直流输电系统的一个亟待解决的问题^[8-9]。

文献[10-11]基于混合型 MMC 架构的柔性直流电网,均通过检测直流线路电压变化量以启动直流故障穿越的控制策略的方案,达到清除故障电流的目的,但该类方案仅依靠单一的电压变化量来判断直流线路故障,其可靠性需要进一步提高。文献[12]提出了基于直流电抗器两侧电压变化率的线路快速识别方案,但误动风险较大。文献[13-14]基于多端柔性直流电网,从直流线路单端量保护原理出发,提出了直流线路快速保护方案。文献[15]提出了一种基于主动检测的保护方案,通过将同频率的正弦故障检测信号注入换流站直流线路中实现故障选线功能。以上文献采用不同的原理解决直流线路保护快速性的问题,为解决直流线路保护问题提供了较好的研究思路,但本质上,以上的保护方案仅适用于具有明确边界元件的两端直流系统,很少涉及多端线路故障区域识别问题。

根据目前的研究现状,适用于 LCC 和 FHMMC 的混合多端直流输电线路保护方案的相关研究较少,对于该类型的保护方案需要同时兼顾保护动作的快速性、多端线路故障识别的可靠性以及与多端控制系统的配合。

本文以 LCC 和 FHMMC 的混合多端直流输电系统为研究对象,在多端直流线路故障分析的基础上,提出了一种混合多端直流线路保护方案,能够可靠地实现直流线路故障的快速检测与故障线路隔离。通过仿真验证了该方案的有效性。

1 典型混合多端直流系统拓扑结构

图 1 为典型的混合多端直流输电系统,其由 1 个常规换流站(LCC 站)、2 个柔直换流站(MMC1 站、MMC2 站)构成。LCC 与 MMC1 站之间的线路 1、MMC1 站与 MMC2 站之间的线路 2 通过 MMC1 站内的汇流母线连接。

如图 2 所示, FHMMC 的每个桥臂由 M 个全桥功率模块(full-bridge submodule, FBSM)、 N 个半桥功率模块(half-bridge submodule, HBSM)以及 1 个

桥臂电感(L_0)串联组成。由于 FHMMC 采用了全桥功率模块,其具备降直流电压运行能力。

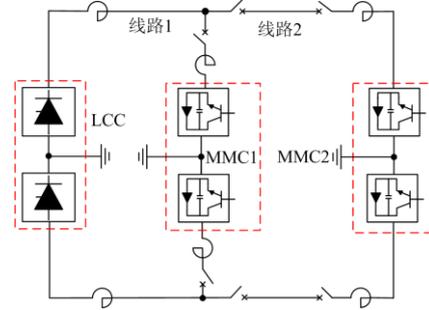


图 1 混合多端直流系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of hybrid multi-terminal DC system

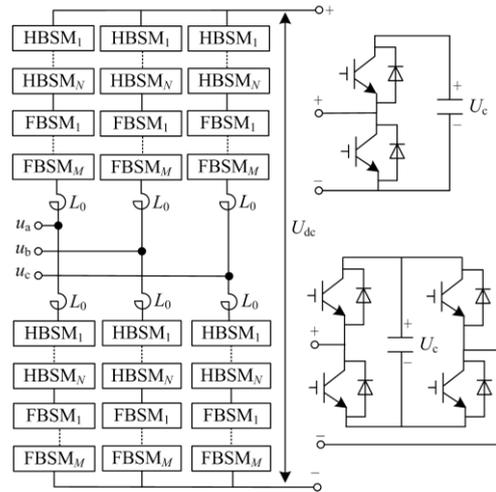


图 2 FHMMC 结构拓扑图

Fig. 2 Topology structure of FHMMC

根据相关文献^[16],只有当子模块数量 M 、 N 同时满足式(1)和式(2)时,才能实现零直流电压运行,从而清除故障。

$$(M + N) \cdot U_c \geq 0.5 \cdot U_{dc} \cdot (1 + m) \quad (1)$$

$$-M \cdot U_c \leq 0.5 \cdot U_{dc} \cdot (1 - m) \quad (2)$$

式中: m 为电压调制比; U_c 为子模块电容电压; U_{dc} 为直流电压。

满足上述约束条件后,由调制比 m 即可得到全桥子模块的占比,实际工程中,该占比至少为 50%。

2 混合多端直流系统直流线路故障分析

发生直流线路接地故障时,系统存在多个故障回路: 1) LCC 站接地点与故障点向故障站点馈流,形成故障回路 1; 2) MMC1 站、MMC2 站接地点分别与故障点形成故障回路 2 和 3,故障点总电流为各故障回路电流之和。多端直流线路接地故障回路如图 3 所示。

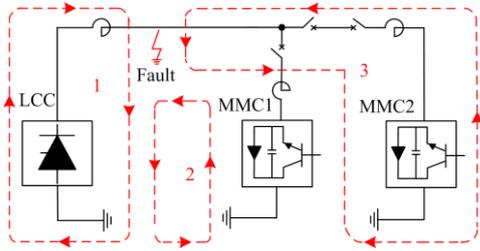


图3 多端直流线路接地故障回路

Fig. 3 Multi-terminal DC line ground fault circuit

对于 LCC 站而言，保护动作后 LCC 可以通过移相消除该站对故障点的馈流影响。

对于 MMC 站而言，在 FHMMC 闭锁之前，子模块电容放电回路可等效为如图 4 所示的二阶 RLC 回路^[17]。其中， R_L 和 L_L 为直流线路阻抗； L_0 为桥臂电抗； C 为子模块电容； R_f 为短路电阻。

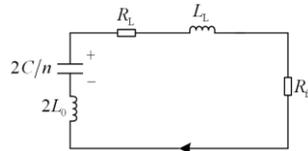


图4 子模块电容放电等效回路

Fig. 4 Sub-module capacitor discharge equivalent circuit

假设线路故障前的直流线路电流为 I_0 ，电容电压为 U_0 ，则 MMC 站向故障点馈入的故障电流经过推导^[18]可表示为

$$i = e^{-\delta t} \left[\sqrt{\frac{2C}{n(2L_0 + L_L)} U_0^2 + I_0^2} \sin(\omega t + \gamma) \right] \quad (3)$$

式中， $\gamma = \arctan\left(\frac{I_0}{U_0} \sqrt{\frac{n(2L_0 + L_L)}{2C}}\right)$ 。

同半桥型 MMC 一样，该故障电流与电容值、桥臂电抗、线路电感、线路阻抗均影响着子模块电容放电电流，这些因素是混合换流器在几个毫秒内过流闭锁的原因。

当 FHMMC 中全桥子模块占比满足式(1)、式(2)的约束条件时，可以采用闭锁方式抑制故障电流。

但通过换流器闭锁实现故障的自清除带来了两方面的问题：第一，减弱了直流线路的故障特征，线路保护可能无法正确动作，因此，故障区域难以判断；第二，与控制系统直接将 MMC 站直流电压控制零压的不闭锁方式^[19-20]相比，闭锁后再重新解锁所用时间较长，不利于功率的快速恢复。

基于以上分析，对于 FHMMC 而言，直流线路故障后，通过快速直流线路保护在换流器闭锁前动作，并与控制系统相配合的方法能够保证线路保护

的选择性的同时，也便于功率的快速恢复。

3 混合多端柔性直流输电线路保护方案

3.1 多端直流线路保护配置

图 5 为多端直流线路保护配置图。从图 5 中可以看出，以 LCC 站、MMC1 站、MMC2 站的平波电抗器为界，将整个直流线路分为三个区域：直流线路 1(LCC 站平波电抗器到测点 I_{dL1})，汇流母线区(即 T 区，包含测点 I_{dL1} 、测点 I_{dL2} 、测点 I_{dL3})，直流线路 2(测点 I_{dL2} 到 MMC2 站平波电抗器)。

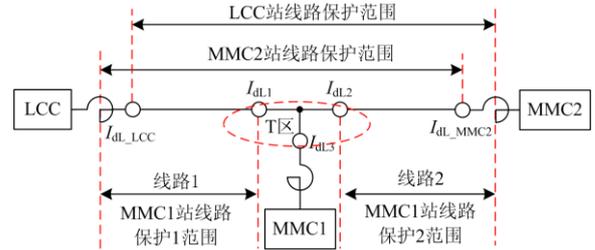


图5 多端直流线路保护配置

Fig. 5 Protection configuration of multi-terminal DC line

各站线路保护配置：

1) LCC 站线路保护配置

根据线路区域的划分，由于平波电抗器是行波保护天然的边界，直流线路上虽然有杂散电感存在，但与平波电抗器电感值相比，可以忽略，很难通过定值区分线路 1 和线路全长，因此，LCC 站配置线路保护只需考虑保护直流线路全长，其保护范围从本站测点 I_{dL_LCC} 到 MMC2 站平波电抗器。

2) MMC2 站线路保护配置

同 LCC 站线路保护配置，MMC2 站只需考虑保护线路全长。即从 MMC2 站测点 I_{dL_MMC2} 到 LCC 站平波电抗器。

3) MMC1 站线路保护配置

MMC1 站为中间站，配置两套保护主机，分别保护线路 1 和线路 2，其中线路 1 保护主机范围从测点 I_{dL1} 到 LCC 站平波电抗器，线路 2 保护主机保护范围从测点 I_{dL2} 到 MMC2 站平波电抗器。

对于汇流母线区，若发生故障，考虑为永久性故障，该区域通过配置快速差动保护迅速闭锁所有在运换流站故障极，并禁止线路重启。

3.2 多端线路故障区域识别

多端线路保护应能够准确检测出故障发生在哪条线路上，以便故障线路的永久隔离。

当发生线路故障时，汇流母线区(T 区)对中低频信号呈现出明显的带阻特性^[21]，即故障后信号经过 T 区后，中低频信号会大幅衰减，如果故障在 T

区内, 则衰减幅度不大。中间站利用这一特征即可判断故障发生在 T 区左侧或 T 区右侧。因此, 通过分别对 T 区两侧电流变化量进行带通滤波处理后, 得到的电流变化量将有显著差异, 即当故障发生在 T 区左侧时, 左侧电流变化量将大于右侧电流变化量; 当故障发生在 T 区右侧时, 右侧电流变化量将显著大于左侧。

进一步将 T 区两侧电流变化量滤波后的值进行时域内积分, 可得到两侧时域能量值, 通过计算时域能量值, 扩大了这种差别, 增加了保护的灵敏性, 据此构造线路故障区域识别判据。

同时, 为了提高保护的抗干扰性, 增加启动判据, 启动判据满足后启动故障区域识别。

1) 线路区域识别判据

T 区电流变化量 Δi_1 、 Δi_2 进行二阶带通滤波运算后得到滤波后的数据 $\Delta i_1(s)$ 、 $\Delta i_2(s)$, 滤波参数可通过设计数字 IIR 滤波器获得。

T 区两侧滤波后的电流变化量 $\Delta i_1(s)$ 、 $\Delta i_2(s)$ 的时域能量值分别通过式(4)、式(5)计算。

$$E_{i1} = \sum_{s=N_k}^N \Delta i_1^2(s) \quad (4)$$

$$E_{i2} = \sum_{s=N_k}^N \Delta i_2^2(s) \quad (5)$$

式中: E_{i1} 为 T 区左侧时域能量值; E_{i2} 为 T 区右侧时域能量值; $\Delta i_1(s)$ 为当前时刻 T 区左侧直流电流测量值; $\Delta i_2(s)$ 为当前时刻 T 区右侧直流电流测量值; N_k 为判据启动时刻采样点。

即如果故障发生在 T 区左侧, 则满足:

$$E_{i1}/E_{i2} > k_1 \quad (6)$$

同理, 如果故障发生在 T 区右侧, 则满足:

$$E_{i2}/E_{i1} > k_2 \quad (7)$$

式中, k_1 、 k_2 为动作门槛值。

2) 启动判据

通过直流线路电压梯度值的变化, 判断是否有故障发生。启动判据可表示为

$$|\nabla u(s)| > \Delta_1 \quad (8)$$

$$\nabla u(s) = \sum_{j=1}^3 u(s+j) - \sum_{j=1}^3 u(s-j) \quad (9)$$

式中: $\nabla u(s)$ 为当前时刻电压梯度计算值; $u(s+j)$ 为当前时刻第 j 个采样周期后的电压值; $u(s-j)$ 为当前时刻第 j 个采样周期前的电压值; Δ_1 为启动判据阈值。

该故障区域识别判据具有准确度高、运算量小、识别速度快、便于工程实现等优点, 可作为快速线

路保护的辅助判据, 与线路保护判据同时满足后保护动作最终出口。

3.3 基于行波保护的线路保护判据

行波保护一般作为直流线路保护的主保护, 基于行波幅值的判据如下:

$$\begin{cases} dP_w/dt > \Delta_1 \\ \Delta P_w > \Delta_2 \\ dG_w/dt > \Delta_3 \\ \Delta G_w > \Delta_2 \end{cases} \quad (10)$$

其中, 极波、地波计算公式分别为

$$P_w = Z_p \cdot (I_{dL} - I_{dL_{op}}) - (U_{dL} - U_{dL_{op}}) \quad (11)$$

$$G_w = Z_G \cdot (I_{dL} - I_{dL_{op}}) - (U_{dL} + U_{dL_{op}}) \quad (12)$$

式中: P_w 、 G_w 分别为极波幅值和地波幅值; dP_w/dt 、 dG_w/dt 分别为极波变化率和地波变化率; I_{dL} 、 $I_{dL_{op}}$ 分别为本级和对极直流线路电流; U_{dL} 、 $U_{dL_{op}}$ 分别为本级、对极直流线路电压; Z_p 、 Z_G 分为差模波阻抗和共模波阻抗, 其数值可根据线路参数计算。

极波判据和地波判据分别用来进行检测线路故障及故障选极, 通过逻辑优化及定值调整, 可以实现线路故障准确、快速动作。

3.4 混合多端直流线路保护方案

根据 3.1 节中的各换流站线路保护配置情况, 混合多端直流线路保护方案如图 6 所示。

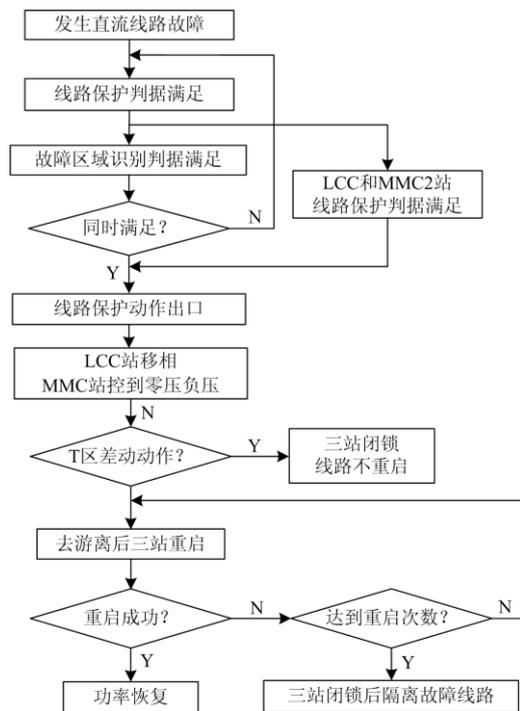


图 6 多端直流线路保护方案

Fig. 6 Multi-terminal DC line protection scheme

具体过程如下:

1) 三个站行波保护均能快速检测的故障, 3 ms 前行波保护判据满足, 两端换流站线路保护用来保护线路全长, 判据满足后直接动作出口, 无需故障区域识别;

2) 中间站配置两套行波保护分别实现两条线路的故障检测, 当行波保护判据和故障线路识别判据同时满足后, 中间站故障线路所在的线路保护最终动作出口(故障线路信息同时送至控制系统), 此时故障电流还未上升到 MMC 站桥臂过流的门限值, 线路保护具备选择性;

3) 线路保护动作后, 两个 MMC 站在控制作用下, 迅速将直流电压降为零压或负压, 同时 LCC 站进行移相, 故障电流得到快速抑制, 在整个过程中, MMC 不会过流闭锁;

4) 如果有 T 区差动保护动作, 则三站闭锁, 同时不再线路重启;

5) 经去游离时间后, 三站进行线路重启, 若为瞬时故障, 则重启成功, 功率恢复至故障前水平; 若达到最大重启次数后仍重启不成功, 则为永久故障, 所有换流站故障极均闭锁后隔离故障线路。

根据以上方案可以实现直流线路故障的快速检测、故障区域识别、故障线路隔离等功能, 满足多端混合柔性直流输电系统对直流线路保护的需求。

4 仿真验证

4.1 仿真模型

搭建基于 LCC 和 FHMMC 的混合三端直流系统仿真模型, 以图 7 中所设置的故障点进行仿真。各换流站采用双极接线方式, 其中 LCC 站容量为 8 000 MW, MMC1 站容量为 3 000 MW, MMC2 站容量为 5 000 MW。MMC2 为定电压站, LCC 站为定电流站, MMC1 站为定功率站。

仿真模型中的主要参数见表 1。仿真中, 模拟量的采样频率为 10 kHz, 仿真中各保护逻辑的执行周期为 100 μ s。

图 7 中, F1、F2、F3 分别为线路 1 的首端、中点、末端故障点; F3、F4、F5 分别为线路 2 的首端、中点和末端故障点。

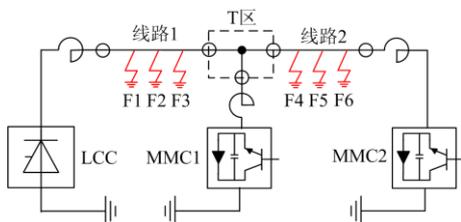


图 7 Multi-terminal DC line failure point

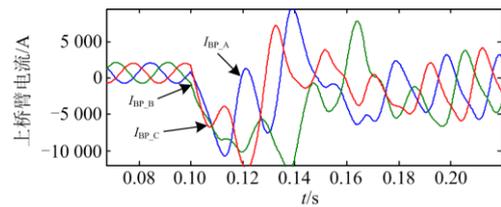
表 1 仿真模型参数

直流线路	LCC	MMC1	MMC2
电抗器电感/mH	150	100	75
中性线电抗器电感值/mH	150	100	75
桥臂电抗器电感值/mH	无	55	40
模块额定电压/V	无	2 100	2 100
模块电容/mF	无	18	12
功率模块数量	无	216	216
半桥比例	无	30%	30%

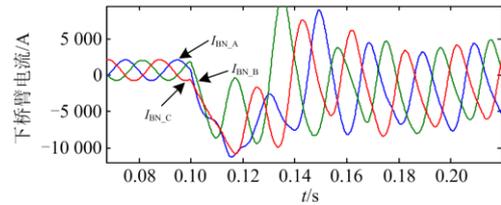
4.2 线路故障仿真

MMC1 站、MMC2 站桥臂过流定值分别为 3 600 A 和 6 000 A, 若超过保护定值, 换流器闭锁。

图 8 为 MMC1 站 F3 故障仿真波形, 仿真中屏蔽阀控中的桥臂过流闭锁功能。故障发生 3 ms 后, 上桥臂电流 I_{BP_B} 达到 3 604 A, 故障发生 3.1 ms 后, 下桥臂电流 I_{BP_A} 达到 3 667 A, 均大于定值 3 600 A, 在不闭锁的情况下, 桥臂电流最大可达到 12 362 A。



(a) 上桥臂电流



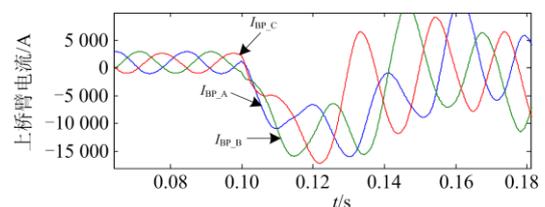
(b) 下桥臂电流

图 8 MMC1 站 F3 故障仿真

Fig. 8 MMC1 station F3 fault simulation

图 9 为相同条件下 MMC2 站 F6 故障仿真波形。故障发生 5 ms 后, 上桥臂电流 I_{BP_A} 达到 6 011 A, 下桥臂电流 I_{BN_A} 达到 6 090 A, 均超过定值。

由此可知, 为避免故障后桥臂过流闭锁换流器, 两个 MMC 站直流线路保护均需要在 3 ms 内动作。



(a) 上桥臂电流

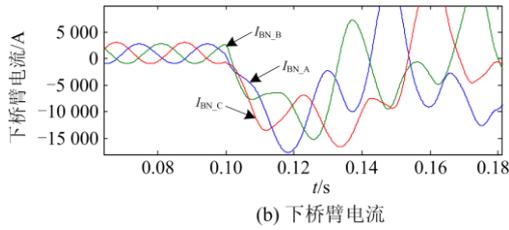


图 9 MMC2 站 F3 故障仿真波形

Fig. 9 MMC2 station F3 fault simulation waveform

图 10 为线路 1 故障时(故障点 F3), 故障区域识别判据动作情况。故障发生后, 直流电压迅速下降, 故障 0.1 ms 后启动判据满足, 启动汇流母线两侧电流能量积分, 左侧电流能量积分值 INT1 明显大于右侧电流能量积分值 INT2, 故障发生 1.2 ms 后, 二者比值大于门槛值 K1(典型值取 2), 即判断出故障发生在线路 1。

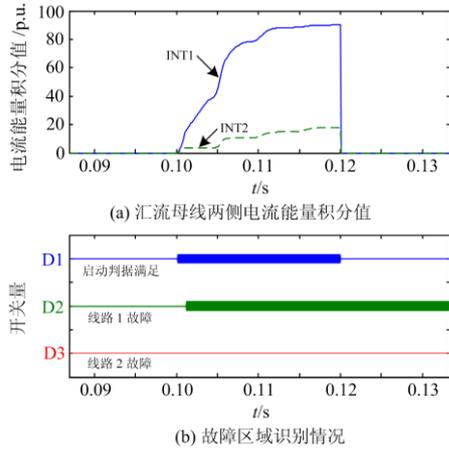


图 10 线路 1 故障仿真

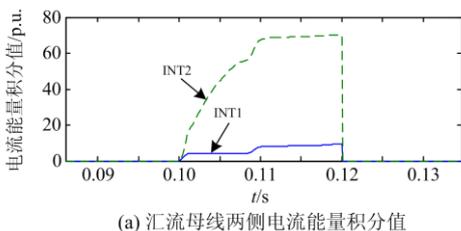
Fig. 10 Fault simulation of line 1

4.3 多端线路保护动作仿真

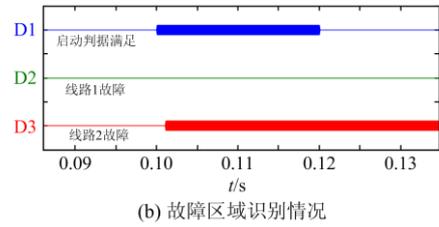
分别对图 7 中不同故障位置进行仿真。

图 11 为线路 2 故障时(故障点 F4), 故障区域识别判据动作情况。故障发生 1.2 ms 后, 右侧电流能量积分值 INT2 明显大于左侧电流能量积分值 INT1, 二者比值远大于门槛值 K2(典型值取 2), 即故障发生在线路 2。

表 2 为直流线路不同故障位置各线路保护动作情况。根据仿真结果, 故障发生在线路 1 或线路 2



(a) 汇流母线两侧电流能量积分值



(b) 故障区域识别情况

图 11 线路 2 故障仿真

Fig. 11 Fault simulation of line 2

表 2 不同故障位置时保护动作时间

Table 2 Operating time at different fault positions

故障位置	LCC 动作时间	MMC1 线路 1 动作时间	MMC1 线路 2 动作时间	MMC2 动作时间
F1	1.6 ms	1.9 ms	正确不动作	1.9 ms
F2	1.7 ms	1.7 ms	正确不动作	1.8 ms
F3	1.8 ms	1.6 ms	正确不动作	1.7 ms
F4	1.8 ms	正确不动作	1.6 ms	1.7 ms
F5	1.9 ms	正确不动作	1.6 ms	1.6 ms
F6	1.9 ms	正确不动作	1.7 ms	1.6 ms

任何位置, 该故障区域识别判据均能在 1.2 ms 左右识别出故障线路, 适合作为行波保护的辅助判据。

图 12 为 F3 故障保护动作后三个站电压、电流变化情况。三个站线路保护动作后, LCC 站移相, 线路电流 I_{dl1} 迅速下降, 约 33 ms 后降到零; MMC1、MMC2 站将直流电压基本控制在零压下, 对应的直流电流基本上在 30 ms 后降到零, 实现了故障电流的自清除, 无桥臂过流闭锁。

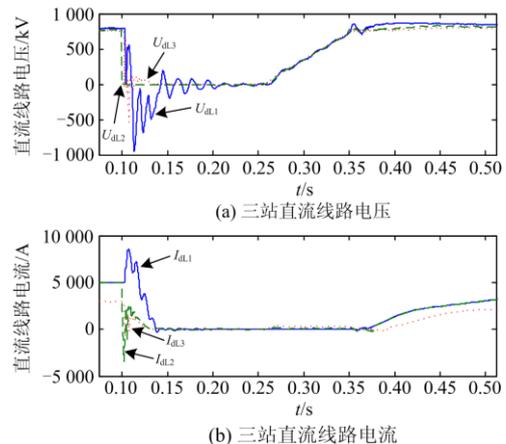


图 12 直流线路区内故障三站电气量变化

Fig. 12 Electrical change of DC line inner-area fault

图 13 为 MMC2 站 F3 瞬时故障仿真波形。MMC2 站线路保护在故障 1.7 ms 后动作, 直流电压控为零后, 经游离后(去游离时间设为 200 ms), 直流电压恢复, 线路重启成功, 直流功率恢复。

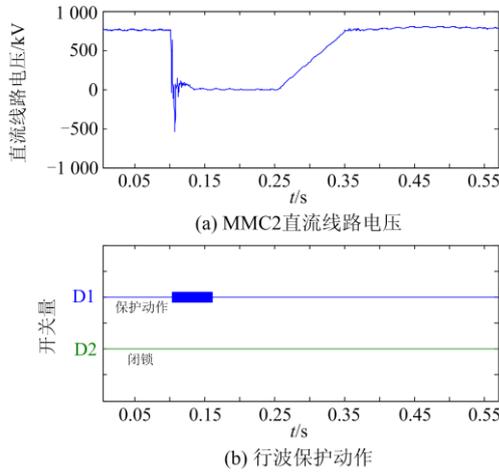


图 13 直流线路区内瞬时故障仿真

Fig.13 Instantaneous fault simulation of DC line area

图 14 为 MMC2 站 F3 永久故障仿真波形。该站线路保护在故障 1.7 ms 后动作，同样在直流电压控为零后，经过去游离时间后重启，在达到仿真中设定的 3 次最大重启次数后，由控制系统重启不成功闭锁各换流站故障极。由于故障线路已确定，可通过拉开故障线路隔离刀闸实现故障线路永久隔离。

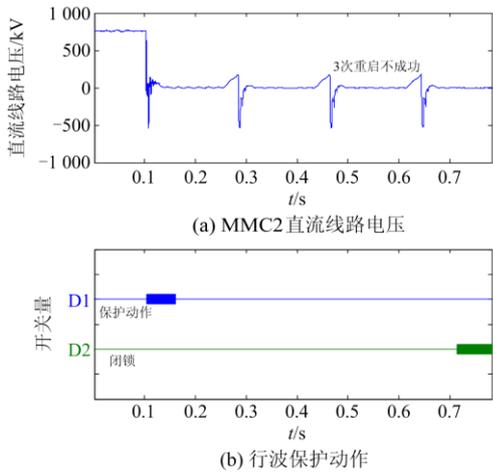


图 14 直流线路区内永久故障仿真

Fig. 14 Permanent fault simulation of DC line area

5 总结

本文基于 LCC 和 FHMMC 的混合多端直流输电系统架构，提出了一种多端直流线路保护的配置方案，得出以下结论：

1) 对于基于 LCC 和 FHMMC 的混合多端直流输电系统，发生线路故障后，桥臂电流仍会很快过流，直流线路保护仍需要在桥臂过流闭锁前先动作，以保证线路保护的选择性；

2) 通过在中间站配置两套直流线路保护系统分别实现对两段直流线路的保护配置方法，并利用快速故障区域识别判据能够准确地识别故障区域，能够满足线路保护对快速性、选择性的需求；

3) 所提的直流线路故障清除策略，能够快速、可靠地清除故障。对于瞬时故障，线路保护动作后，利用 LCC 站移相、MMC 站控直流电压到零压清除故障电流，并通过线路重启恢复功率；对于永久故障，由线路重启不成功闭锁各换流站故障极后，通过拉开线路隔离刀闸可实现故障线路的永久隔离。

参考文献

- [1] 张文亮, 汤涌, 曾南超. 多端高压直流输电技术及应用前景[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 1-6.
ZHANG Wenliang, TANG Yong, ZENG Nanchao. Multi-terminal HVDC transmission technologies and its application prospect in China[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 1-6.
- [2] 吴博, 李慧敏, 别睿, 等. 多端柔性直流输电的发展现状及研究展望[J]. 现代电力, 2015, 32(2): 9-15.
WU Bo, LI Huimin, BIE Rui, et al. Current development and research prospect of VSC-MTDC[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(2): 9-15.
- [3] 许烽, 徐政. 基于 LCC 和 FHMMC 的混合型直流输电系统[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2520-2530.
XU Feng, XU Zheng. Hybrid HVDC system based on LCC and FHMMC[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2520-2530.
- [4] HERTEM D V, GHANDHARI M. Multi-terminal VSC HVDC for the European supergrid obstacles[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(9): 3156-3163.
- [5] BOULANGER A G, CHU A C, MAXX S, et al. Vehicle electrification: status and issues[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(6): 1116-1138.
- [6] 姚为正, 行登江, 吴金龙, 等. 柔性直流电网超高速保护方案研究[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1710-1718.
YAO Weizheng, XING Dengjiang, WU Jinlong, et al. Study on ultra-high-speed protection method of flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1710-1718.
- [7] DESCLOUX J, RAULT P, NGUEFEU S, et al. HVDC meshed grid: control and protection of a multi-terminal HVDC system[C] // 2012 CIGRE Session, August 26-31, 2012, Paris, France: 10p.
- [8] 李斌, 何佳伟, 冯亚东, 等. 多端柔性直流电网保护关键技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 1-12.
LI Bin, HE Jiawei, FENG Yadong, et al. Key techniques for protection of multi-terminal flexible DC grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 1-12.

- [9] 曹润彬, 李岩, 许树楷, 等. 特高压混合多端直流线路保护配置与配合研究[J]. 南方电网技术, 2018, 12(11): 52-58.
CAO Runbin, LI Yan, XU Shukai, et al. Research on configuration and coordination of multi-terminal hybrid UHVDC line protection[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(11): 52-58.
- [10] 张峻樾, 向往, 林卫星, 等. 基于混合型 MMC 和直流开关的柔性直流电网直流故障保护研究[J]. 电力建设, 2017, 38(8): 52-58.
ZHANG Junjie, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. DC fault protection of VSC-HVDC grid based on hybrid MMC and DC switch[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(8): 52-58.
- [11] 徐雨哲, 徐政, 张哲任, 等. 基于 LCC 和混合型 MMC 的混合直流输电系统控制策略[J]. 广东电力, 2018, 31(9): 13-25.
XU Yuzhe, XU Zheng, ZHANG Zheren, et al. Control strategy for hybrid HVDC transmission system based on LCC and hybrid MMC[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9): 13-25.
- [12] LI R, XU L, YAO L Z. DC fault detection and location in meshed multi-terminal HVDC systems based on DC reactor voltage change rate[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 32(3): 1516-1526.
- [13] 田培涛, 陈勇, 吴庆范, 等. 基于柔直电网的暂态量保护方案及配合策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 71-78.
TIAN Peitao, CHEN Yong, WU Qingfan, et al. Study on transient-based protection scheme and cooperation strategy based on flexible DC grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 71-78.
- [14] 王艳婷, 张保会, 范新凯. 柔性直流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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 王珊珊, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 1-7.
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Analysis of submodule over current caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 1-7.
- [18] 王振浩, 刘婕, 李国庆, 等. 采用桥臂电抗器耦合的 MMC 直流侧故障过电流抑制新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 9-15.
WANG Zhenhao, LIU Jie, LI Guoqing, et al. A new method of over current suppression based on coupled bridge arm reactors for DC faults of modular multilevel converters[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 9-15.
- [19] 熊岩, 饶宏, 许树楷, 等. 特高压多端混合直流输电系统启动与故障穿越研究[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(4): 478-486.
XIONG Yan, RAO Hong, XU Shukai, et al. Research on start and fault ride-through strategy for ultra-high voltage multi-terminal hybrid DC transmission system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 478-486.
- [20] 李少华, 王秀丽, 彭忠, 等. LCC 型双端直流中引出并联 FB-MMC 功率分支站的混合多端直流输电系统[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2754-2802.
LI Shaohua, WANG Xiuli, PENG Zhong, et al. Hybrid multi-terminal integration of parallel FB-MMC tapping station into LCC-HVDC transmission link[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2754-2802.
- [21] 李海锋, 张坤, 王钢, 等. 并联型多端混合高压直流线路故障区域判别方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 29(14): 1-7.
LI Haifeng, ZHANG Kun, WANG Gang, et al. Fault area discrimination method for parallel multi-terminal hybrid HVDC line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 29(14): 1-7.

收稿日期: 2020-03-04; 修回日期: 2020-06-05

作者简介:

田培涛(1985—), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事高压直流输电保护软件设计及研究工作; E-mail: tpt850924@163.com

吴庆范(1982—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 长期从事高压直流输电保护软件设计及研究工作;

黄金海(1975—), 男, 高级工程师, 长期从事高压直流输电保护软件设计及研究工作。

(编辑 魏小丽)