

# 混合型 MMC 拓扑及应用于 MTDC 直流故障穿越能力分析

孟新涵<sup>1</sup>, 李可军<sup>1</sup>, 王卓迪<sup>1</sup>, 霍雪松<sup>2</sup>, 吴海伟<sup>2</sup>, 张 明<sup>3</sup>

(1. 山东大学电气工程学院, 山东省济南市 250061; 2. 国网江苏省电力公司, 江苏省南京市 210024;

3. 国网南京供电公司, 江苏省南京市 210019)

**摘要:** 模块化多电平换流器(MMC)已成为高压直流输电领域最具前景的换流器技术之一。然而, 与低电平电压源型换流器(VSC)相同, 目前研究较多的半桥型 MMC 缺乏闭锁直流故障的能力。文中分析了不同结构的 MMC 在发生直流故障时短路电流的情况, 提出了一种改进的 MMC 拓扑结构, 基于错位层叠理论和换流器闭锁直流故障的原理, 设计了一种适用于多端柔性直流(VSC-MTDC)输电系统的混合型 MMC 拓扑结构, 并结合 VSC-MTDC 系统直流故障时的“握手原则”详细说明了实现故障线路切除、非故障线路恢复的过程。最后, 以典型的四端直流输电系统为例, 通过 PSCAD/EMTDC 建模仿真, 对故障后果最为严重的直流侧双极短路故障下的系统特性进行了分析验证。结果表明, 基于该拓扑结构的多端直流系统能够在直流侧发生故障时快速闭锁换流器, 并在短时间内恢复非故障线路的正常运行。

**关键词:** 模块化多电平换流器; 多端柔性直流输电; 子模块拓扑; 错位层叠理论; 直流故障闭锁

## 0 引言

随着全控型半导体器件的发展, 电压源型换流器(VSC)在高压直流输电领域的应用不断增多。基于 VSC 的柔性直流输电系统在潮流反转时只需改变直流电流方向, 因而相比于传统直流输电更加适用于构建多端网络<sup>[1]</sup>。多端柔性直流(VSC-MTDC)输电系统最显著的特点在于传输功率灵活可控, 具有动态无功补偿能力, 可连接多个电源与负载, 因而在新能源并网、无源网络供电、构建城市配电网等领域拥有广阔的应用前景<sup>[1-4]</sup>。模块化多电平换流器(MMC)作为一种新型 VSC 结构, 相比于传统的低电平 VSC, 具有开关频率低、开关损耗小、对器件开关一致性要求不高、模块化结构便于扩展、适用于高电压场合等优点<sup>[5-7]</sup>。

目前研究较多的柔性直流输电系统多由半桥型 MMC(HBMMC)构成。由于桥臂中与绝缘栅双极型晶体管(IGBT)反并联的续流二极管可为故障电流提供通路, 因而在直流侧发生短路故障时无法通过闭锁换流器来切断短路电流<sup>[8]</sup>。同时, 高压大功率的直流断路器在目前的工程应用领域还不成熟且造价太高, 因此在发生直流故障时只能通过交流断

路器开断整个直流系统, 增加了故障清除时间, 降低了系统供电的可靠性<sup>[9-10]</sup>。目前较为常用的做法是采用故障率较低的电缆作为传输线路, 但增加了工程成本, 且容易受到铺设环境的制约, 不利于远距离输电和多端直流(MTDC)输电网络的构建<sup>[11-12]</sup>。

针对传统 MMC 的不足, 国内外学者提出了一些改进的拓扑结构。文献[13-14]提出了将全桥型 MMC(FBMMC)结构应用于柔性直流输电, FBMMC 具有闭锁直流故障的能力, 但由于所用的 IGBT 数量增加一倍, 在同等直流电压和功率等级下, FBMMC 工程投资大, 运行费用高, 制约了其在工程实践中的应用。为了降低 IGBT 使用数量同时使换流器具有闭锁直流故障的能力, 文献[11]提出了一种双钳位型 MMC(CDMMC)结构, 当直流侧发生故障时, CDMMC 通过闭锁 IGBT 并利用二极管反相阻断能力完成故障处理过程。CDMMC 的优点在于半导体器件的使用数量介于同等条件下的 FBMMC 和 HBMMC 之间, 具有直流故障闭锁能力的同时较 FBMMC 节约成本; 缺点是由于自身并联结构的特点, 根据短路电流流向的不同, 桥臂电容呈现两种不同的状态, 切断短路电流所需时间较长, 直流故障闭锁能力也没有 FBMMC 强<sup>[15-16]</sup>。

针对以上问题, 本文首先对不同拓扑结构的 MMC 在直流故障情况下的等效状态进行了分析研究, 针对其中的不足提出了一种改进的 MMC 拓扑

收稿日期: 2015-03-07; 修回日期: 2015-05-16。

国家电网公司科技项目“城市核心区输电线路输送能力提升关键技术研究”。

结构。然后基于错位层叠理论和换流器闭锁直流故障的原理,提出了一种适用于 MTDC 系统的混合型 MMC(HMMC-MTDC) 拓扑结构,并结合 MTDC 系统直流故障时的“握手原则”<sup>[17-18]</sup>详细说明了实现故障线路切除、非故障线路恢复的过程。最后,将此拓扑结构应用于典型的四端柔性直流输电系统,在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真模型,对故障后果最为严重的直流侧双极短路故障进行仿真分析,验证了该拓扑结构对 MTDC 系统闭锁直流故障的有效性和可行性。

## 1 MMC 基本原理

MMC 由 6 个桥臂组成,每个桥臂由  $n$  个子模块和 1 个电抗器  $L$  级联而成,每相上下两个桥臂共同构成一个相单元,MMC 结构见附录 A 图 A1。由于采用模块化设计,MMC 能够通过改变接入换流器子模块的数量和参数来满足不同功率、电压等级和谐波参数的要求,便于实现集成化设计,缩短工程周期,节约成本<sup>[6]</sup>。

根据子模块结构的不同,目前 MMC 大体可分为 3 种基本类型:基于半桥型子模块(HBSM)、基于全桥型子模块(FBSM)和基于钳位双子模块(CDSM)的 MMC。其中,基于 FBSM 和 CDSM 的 MMC 具有闭锁直流故障的能力<sup>[15]</sup>。

## 2 直流故障闭锁能力分析

### 2.1 MMC 故障闭锁原理

将换流器各桥臂中级联的子模块用理想电压源等效,可得故障时系统等效电路如图 1 所示,其中各参数均取其标幺值。

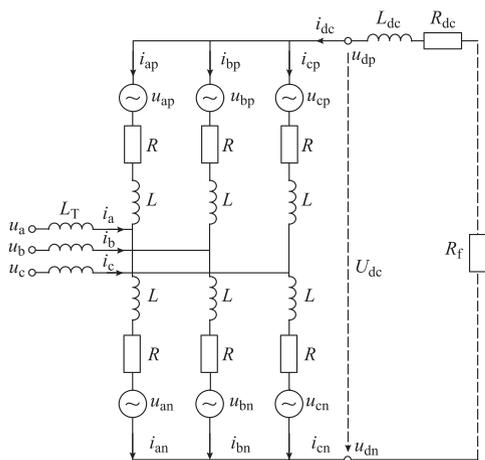


图 1 故障时系统等效电路图

Fig.1 System equivalent circuit under DC fault state

图 1 中: $L$  为桥臂电感; $R$  为桥臂等效电阻; $L_T$

为换流变压器漏感; $u_a, u_b, u_c$  和  $i_a, i_b, i_c$  分别为换流变压器网侧的电压和电流; $L_{dc}$  和  $R_{dc}$  分别为直流线路等效电感和电阻; $R_f$  为故障电阻。

对上、下桥臂应用基尔霍夫电压定律可得:

$$u_k - L_T \frac{di_k}{dt} = -L \frac{di_{kp}}{dt} - R i_{kp} - u_{kp} + u_{dp} \quad (1)$$

$$u_k - L_T \frac{di_k}{dt} = L \frac{di_{kn}}{dt} + R i_{kn} + u_{kn} + u_{dn} \quad (2)$$

式中: $k$  取 a, b, c。

对上、下桥臂应用基尔霍夫电流定律可得:

$$i_k = i_{kn} - i_{kp} \quad (3)$$

$$i_{dc} = \sum_k i_{kp} = \sum_k i_{kn} \quad (4)$$

直流侧电压、电流分别满足:

$$u_{dc} = u_{dp} - u_{dn} = -L_{dc} \frac{di_{dc}}{dt} - (R_{dc} + R_f) i_{dc} \quad (5)$$

$$i_{dc} = C_{eq} \frac{d \sum_k u_{kp}}{dt} = C_{eq} \frac{d \sum_k u_{kn}}{dt} \quad (6)$$

式中: $C_{eq}$  为故障期间桥臂等效电容值。

将以上各式联立可得:

$$\frac{d^2 i_{dc}}{dt^2} + \frac{R_e}{L_e} \frac{di_{dc}}{dt} + \frac{1}{L_e C_e} i_{dc} = 0 \quad (7)$$

式中: $L_e = 2L/3 + L_{dc}$ ;  $R_e = 2R/3 + R_{dc} + R_f$ ;  $C_e = 3C_{eq}$ 。

由式(7)可知故障等值电路是一个二阶振荡放电电路,以故障发生时为零时刻, $U_{dc}$  和  $I_{dc}$  为初值,求解方程可得直流电流  $i_{dc}$  的解析表达式为:

$$i_{dc} = e^{-\frac{t}{\tau}} \left( -\frac{I_{dc} \omega_0}{\omega} \sin(\omega t - \alpha) - \frac{U_{dc}}{\omega L_e} \sin(\omega t) \right) \quad (8)$$

式中: $\tau = 2L_e/R_e$ ;  $\omega = \sqrt{1/(L_e C_e) - [R_e/(2L_e)]^2}$ ;  $\omega_0 = \sqrt{1/(L_e C_e)}$ ;  $\alpha = \arctan(\omega \tau)$ 。

由式(8)可以确定故障后短路电流的情况。换流器闭锁前的放电过程是一个已知电路初始条件的振荡放电过程,闭锁后由于桥臂等值电容值发生变化,当且仅当任何回路状态下桥臂级联电容所提供的反向电压始终大于交流线电压幅值时,利用二极管反相阻断特性可使短路电流逐渐下降为零,从而实现对直流故障的闭锁。

### 2.2 FBSM 闭锁分析

当直流侧发生故障时,FBSM 的控制系统对桥臂上所有的 IGBT 发出闭锁信号,由短路电流的路径可知:闭锁后子模块中的电容电压  $U_c$  与交流电压方向相反,因而可阻断交流电流的馈入,从而实现对直流故障的闭锁<sup>[13]</sup>,FBSM 的结构和闭锁模式见附录 A 图 A2。然而,由于 FBSM 所使用 IGBT 及二极管的数量较 HBSM 多一倍,因此基于 FBSM

的 MMC 在工程应用中的经济性欠佳。

### 2.3 CDSM 闭锁分析

CDSM 由 2 个等效 HBSM 通过钳位二极管和 1 个带续流二极管的引导 IGBT 构成<sup>[11]</sup>。当直流侧发生故障时, CDSM 切换到闭锁模式, 闭锁后电容电压能够起到阻断交流电流馈入的作用, CDSM 的结构和闭锁模式见附录 A 图 A3。根据短路电流流向的不同, 单个子模块中的等效电容电压分别为  $2U_c$  和  $U_c$ , 等效电容分别为  $C_0/2$  和  $2C_0$ 。即故障期间, 桥臂上的等效电容存在两种不同状态, 系统对子模块电容反复充电, 导致基于 CDSM 的 MMC 阻断直流故障时间较长<sup>[15]</sup>。

### 2.4 级联双子模块 (SDSM) 闭锁分析

由于 HBSM 结构简单、控制策略成熟、经济性较好, 可以考虑在 2 个 HBSM 之间反向添加 1 个引导型 IGBT 的方法阻断短路电流的流通。基于此想法, 本节介绍的 SDSM 拓扑结构如图 2(a) 所示, 即在 2 个串联 HBSM 之间添加 1 个带续流二极管的引导型 IGBT, 同时在 SM1 顶部和 SM2 底部之间连接 1 个钳位二极管。其特点是具有 HBSM 经济、实用、控制策略成熟的优点, 同时具有较强的直流故障闭锁能力。正常运行时, 引导型 IGBT 处于导通状态, 此时 SDSM 相当于两个独立的 HBSM, 可以参照 HBSM 的控制方式设计 SDSM 的控制策略; 直流线路发生故障时, 控制系统对所有 IGBT 发出闭锁指令, 如图 2(b) 所示, 不论  $i_{sm}$  方向如何, 单个子模块对外电路的等效电压都是  $2U_c$  且方向与交流侧电压相反, 可阻断由交流系统馈入的短路电流, 能够起到闭锁直流故障的作用。

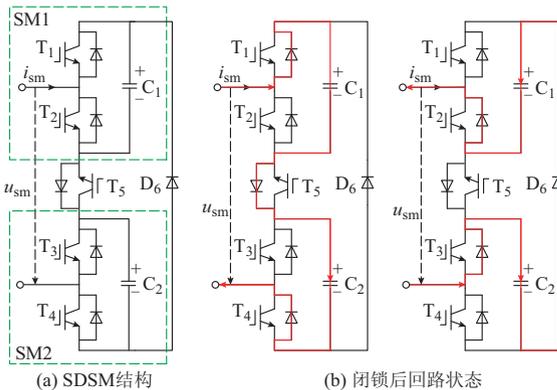


图 2 SDSM 的结构和闭锁模式

Fig.2 Structure and block operation mode of SDSM

## 3 基于错位层叠理论的混合型 MMC 拓扑

### 3.1 错位层叠理论在 MMC 中的应用

错位层叠思想可应用于对阶梯波形的改善, 首

先通过对基本波形产生一些小幅度的错位, 再将不同幅度的错位波形进行叠加, 从而得到一个更为细致、拟合程度更高的波形。基于错位层叠理论的 MMC 拓扑结构是在原电路的基础上添加一个由半桥单元级联而成的错位层叠子模块 (MCSM), 如图 3 所示。

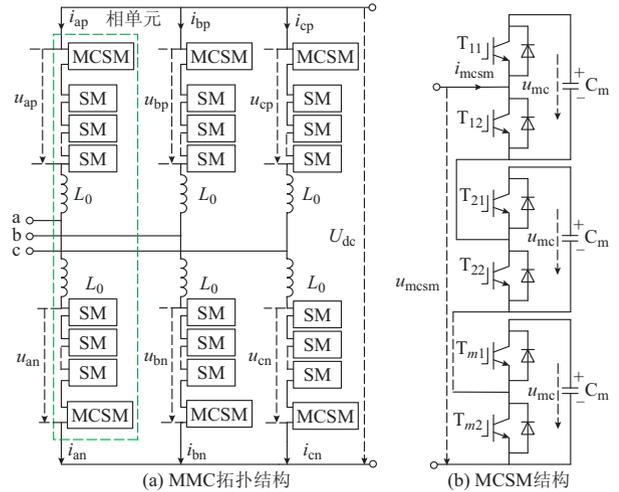


图 3 基于错位层叠理论的 MMC 拓扑结构

Fig.3 Topology of mismatched-cascade mechanism based MMC

图 3 中,  $m$  表示一个 MCSM 中级联的半桥单元的个数。  $U_{mc}$  表示子模块电容额定电压且应满足:

$$U_{mc} = \frac{U_c}{m+1} \quad (9)$$

以  $n=4, m=2$  为例, 此时  $U_{mc} = U_c/3$ , 添加 MCSM 后系统可能输出的电压波形和相应的子模块投切状态分别如图 4 和表 1 所示 (由于上下桥臂具有对称性, 在此仅分析  $u_a > 0$  的情况)。当上下桥臂 MCSM 投入数分别为  $m_p=1$  和  $m_n=1$  时, 电平输出状态与原系统无异; 当  $m_p$  依次增大 (减小)、 $m_n$  依次减小 (增大) 时, 输出电平会产生一个“错位”, 为了便于观察, 这里将改变后的波形适当地左/右平移了一段距离。

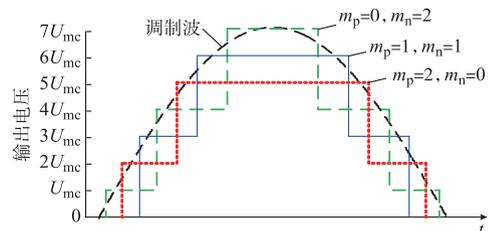


图 4 添加 MCSM 后的电压波形输出示意图

Fig.4 Schematic diagram of voltage waveform output after adding MCSM

表 1 不同输出状态对应的子模块投切模式  
Table 1 Switching mode of sub-modules under different output states

子模块投入数		MCSM 半桥单元投入数		电压 $u_a$
上桥臂	下桥臂	上桥臂	下桥臂	
2	2	1	1	0
2	2	0	2	$U_{mc}$
1	3	2	0	$2U_{mc}$
1	3	1	1	$3U_{mc}$
1	3	0	2	$4U_{mc}$
0	4	2	0	$5U_{mc}$
0	4	1	1	$6U_{mc}$
0	4	0	2	$7U_{mc}$

加入 MCSM 后,换流器输出的电平数由原来的  $n+1$  变为:

$$N_{out} = (n+1)(m+1) \quad (10)$$

由此可见,在 MMC 结构不作大幅变动的情况下,仅需添加一个 MCSM,便可使 MMC 输出的最大电平数成倍提高,从而可以极大地降低 MMC 输出波形的谐波含量。

### 3.2 混合型 MMC 拓扑结构

基于错位层叠理论以及换流器闭锁直流故障的原理,本节提出一种混合型 MMC 拓扑结构。由于 HBSM 具有控制策略简单、方法成熟、所需 IGBT 数量少等优点,SDSM 具有闭锁直流故障的能力,且上节所述的 MCSM 具有优化输出电平、降低谐波含量的作用,因而考虑将三者结合组成混合型 MMC。在混合型 MMC 中,假设  $N_s$  代表故障时单个桥臂所需投入 SDSM 的数量,考虑到直流故障闭锁的约束条件,即在任意回路状态下桥臂级联电容所提供的反向电压始终大于交流线电压幅值,因此  $N_s$  需满足:

$$N_s \geq \frac{\sqrt{3}U_m}{4U_c} \quad (11)$$

式中: $U_m$  为交流侧相电压的最大值; $U_c$  为 SDSM 中单个电容额定电压。

同等条件下, $N_s$  越大,产生的反向电动势越大,阻断直流故障所需的时间越短。因此,混合型 MMC 闭锁故障所需的时间相对于完全由具有故障闭锁能力子模块所构成的 MMC 要长。本节在 PSCAD/EMTDC 中搭建混合型 MMC 仿真模型,选择几组典型的  $N_H$  (单个桥臂上 HBSM 数量)和  $N_s$  组合,测得在不同组合下换流器闭锁直流故障所需时间如表 2 所示。

为了均衡直流故障闭锁性能和经济性两方面的需求,系统在满足故障闭锁时间要求的前提下,应尽可能多地增加 HBSM、减少 SDSM。

表 2 不同  $N_H$  和  $N_s$  组合下的直流故障闭锁时间  
Table 2 DC fault clearing time under different combinations of  $N_H$  and  $N_s$

方案	HBSM 数量 $N_H$	SDSM 数量 $N_s$	故障清除时间/ms	单个桥臂上的 IGBT 数量
1	12	4	25	44
2	8	6	16	46
3	4	8	12	48

假设单个桥臂上 HBSM 数量为  $N_H$ ,SDSM 数量为  $N_s$ ,在总电平数  $N_P$  不变的情况下应满足:

$$N_H + 2N_s + 1 = N_P \quad (12)$$

若加入 MCSM,且 MCSM 中半桥单元数为  $N_M$ ,则改善后的总电平数  $N_P'$  满足:

$$N_P' = (N_H + 2N_s + 1)(N_M + 1) \quad (13)$$

由此可见,MCSM 的加入可使输出的总电平数成倍提高。

由表 2 可得,在系统对故障闭锁时间要求不高的情况下,方案 1 给出的 HBSM 与 SDSM 之间的组合关系完全可以满足一般情况下系统对直流故障闭锁时间的要求,此时所需 IGBT 数量较少。

## 4 HMMC-MTDC 系统直流故障穿越能力分析

VSC-MTDC 系统的接线方式可以分为串联式、并联式和混合式 3 种。并联接线的 VSC-MTDC 系统由于控制方式简单灵活、便于扩展,因此应用较广<sup>[5]</sup>。本节以典型的四端并联柔性直流输电系统为例,具体分析 HMMC-MTDC 系统对直流故障的处理过程。

文献[17]提出了一种适用于两电平 VSC-MTDC 系统在直流故障恢复过程中的“握手原则”,以及相应的故障线路检测与隔离方法。此方法可确保输电系统直流电压的稳定和故障后传输功率的恢复。但由于需要使用三相交流断路器开断整个系统,因而系统切断故障与恢复供电的时间均较长,而混合型 MMC 自身具有闭锁直流故障的能力,因此 HMMC-MTDC 系统可对直流故障进行较快处理。

图 5 为典型的四端 MMC-MTDC 系统,其中 S1 至 S8 为直流线路上的隔离开关。

基于图 5 所示系统,本文提出的 HMMC-MTDC 系统在直流侧发生故障时实现故障线路切除、非故障线路恢复过程的具体步骤如下。

步骤 1:换流站实时监测母线上的电压和电流,应用文献[17]中直流故障检测的方法,结合已知的 HMMC-MTDC 系统参数,设定相应的故障检测阈值,完成对直流线路故障时刻及故障类型的确定。

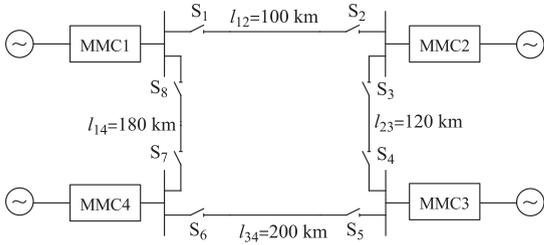


图 5 四端 MMC-MTDC 系统结构

Fig.5 Structure of four-terminal MMC-MTDC system

步骤 2:系统检测到直流故障发生后,根据换流站直流侧出口处电流、电压的变化以及与直流母线相连的各支路上的潮流方向确定潜在故障线路<sup>[18]</sup>。

步骤 3:对潜在故障线路上的隔离开关进行标记,以便对闭锁后的故障线路进行可靠的隔离。

步骤 4:对混合型 MMC 中具有直流故障闭锁能力的子模块发出闭锁信号,同时闭合与其他子模块并联的旁路开关,以保护无闭锁功能子模块中的半导体器件。计及检测装置的延时和保护装置动作的时间,从故障发生到换流器接到闭锁信号并可靠闭锁需 5~10 ms。

步骤 5:闭锁完毕后断开步骤 3 中标记的隔离开关。由仿真结果结合表 2 中混合型 MMC 闭锁时间,为确保故障电流完全消除,可设定换流站闭锁后 30 ms 时断开已标记的隔离开关。

步骤 6:对换流站发出解锁信号,解锁换流器中所有 IGBT 模块,同时断开步骤 4 中闭合的旁路开关。

步骤 7:设定换流站运行在定直流电压控制方式下,待直流母线电压上升至额定值,此时步骤 5 中断开的非故障线路上的隔离开关能够感应到两端预设的直流电压,实现“握手”后闭合。

步骤 8:非故障线路隔离开关闭合后将换流站设定回额定运行方式,从而完成故障线路隔离、非故障线路恢复运行,整个系统在预设的运行条件下达到一个新的稳定状态。

### 5 仿真分析

为了验证本文提出的 HMMC-MTDC 系统的可靠性,以及其对直流故障的闭锁能力,在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建了如图 5 所示的四端柔性直流输电系统。其中 MMC1 采用定直流电压和定交流电压的控制方式,MMC2 采用直流电压下降和定交流电压的控制方式,MMC3 和 MMC4 均采用定有功功率和定无功功率的控制方式。换流站每个桥臂由 12 个 HBSM、4 个 SDSM 和 1 个 MCSM 级联而成,其中每个 MCSM 由 4 个半桥单元串联组成。根据式(13),MCSM 加入后系统输出的最大电平数由 21 电平变为 105 电平,从而可极大地降低系统的谐波含量<sup>[19]</sup>。

仿真系统中各个换流站及与其相连的交流系统参数见表 3,规定输入换流站的交流功率为正。换流变压器采用 YNd 型接线方式。换流站之间通过直流电缆连接,设定电缆的单位距离阻抗为 0.01 Ω/km,长度已在图 5 中标出。

表 3 HMMC-MTDC 仿真系统主要参数  
Table 3 Main parameters of the HMMC-MTDC simulation system

换流器	换流站额定容量/ MVA	网侧交流 母线电压/ kV	直流电 压/kV	换流变压器参数			桥臂电 抗/mH	桥臂 HBSM 数量	桥臂 SDSM 数量	桥臂 MCSM 数量	子模块 电容/ $\mu$ F
				额定容 量/MVA	电压比	漏抗					
MMC1	400	220	±200	400	220/230	0.1	32	12	4	1	3 400
MMC2	300	220	±200	320	220/230	0.1	55	12	4	1	2 550
MMC3	100	110	±200	120	110/230	0.1	165	12	4	1	850
MMC4	100	110	±200	120	110/230	0.1	165	12	4	1	850

#### 5.1 系统稳态控制仿真及分析

HMMC-MTDC 系统进入稳态运行之后,在仿真时间为 0.6 s 时,将换流站 3 的有功功率参考值由 80 MW 调整为 100 MW,换流站 4 的有功功率参考值由 100 MW 调整为 50 MW;在仿真时间为 0.8 s 时,将换流站 3 的有功功率参考值反转调整为 -20 MW;在仿真时间为 1.0 s 时,将换流站 4 的无功功率参考值由 -50 Mvar 反转调整为 50 Mvar;在仿真时间为 1.2 s 时,将换流站 3 的有功功率参考值恢复到 80 MW,换流站 4 的有功功率参考值恢复

到 100 MW。仿真波形如图 6 所示。

如图 6 所示,0.6 s 时,换流站 3 和 4 的功率发生变化,由于换流站 1 采用定直流电压控制方式,且功率变化部分在其可调范围之内,换流站 1 的有功功率由 -73.22 MW 变为 -46.34 MW,以便对系统功率不平衡进行补偿;0.8 s 时,换流站 3 的功率发生大幅变化,且潮流反转,由于换流站 2 采用直流电压下降控制方式,换流站 1 和 2 同时调整输出功率,有功功率分别由 -46.34 MW 和 -96.17 MW 变为 33.53 MW 和 -58.61 MW,以补偿功率缺额,稳定

直流电压,对应换流站 3 直流侧电压由 402.23 kV 下降至 399.26 kV,以便换流站 3 从系统中吸收有功功率;1.0 s 时,换流站 4 无功功率发生突变,直流侧电压经过小幅振荡后稳定在 400.58 kV 附近,其余换流站直流电压不变,即无功功率变化对系统的电压稳定性影响较小;1.2 s 时,换流站 3 和 4 的功率恢复,换流站 1 和 2 再次通过调节输出维持系统稳定,此后换流站 1 和 2 的有功功率分别变为  $-74.92$  MW 和  $-97.29$  MW。整个过程中,系统参数改变后经历了短时间调整(小于 50 ms)重新恢复到一个稳定状态,且直流电压波动值始终保持在  $\pm 1\%$  以内,满足电压稳定的要求。因此,本文所设计的 HMMC-MTDC 系统,在稳态运行时,可以应对一般情况下的功率潮流变化,保持直流电压稳定,满足系统稳定性的要求。

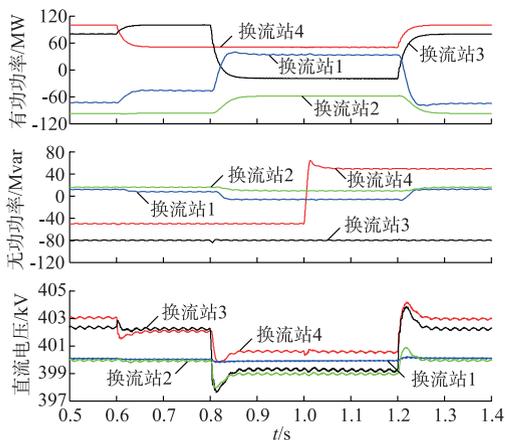


图 6 稳态仿真波形

Fig.6 Waveforms of steady state simulation

## 5.2 直流侧永久性双极短路故障仿真及分析

为了验证 HMMC-MTDC 系统对直流侧故障的闭锁能力,以及非故障部分在故障闭锁后的恢复特性,在直流线路  $l_{12}$  靠近换流站 1 的端口处引入直流故障。直流故障主要分为 3 种类型:单极接地故障、断线故障、双极短路故障,且在所有的直流故障类型中以永久性双极短路故障最为严重,因此为了突出重点且不失一般性,本节对永久性双极短路故障下系统状态变化情况进行了分析验证。结合第 4 节给出的控制策略,设定故障于 2 s 时引入,得到仿真波形图如图 7 所示,详细结果见附录 A 图 A4。

如图 7(a)所示,直流故障发生后换流站闭锁,有功功率经过 35~40 ms 后下降为零;故障线路隔离后,换流站解锁,直流电压恢复,换流站有功功率在各自控制策略下达到一个新的稳定状态。由于故障线路已被隔离,系统网络参数发生改变,换流站 1 和 2 的有功功率较初始状态发生明显变化,分别由

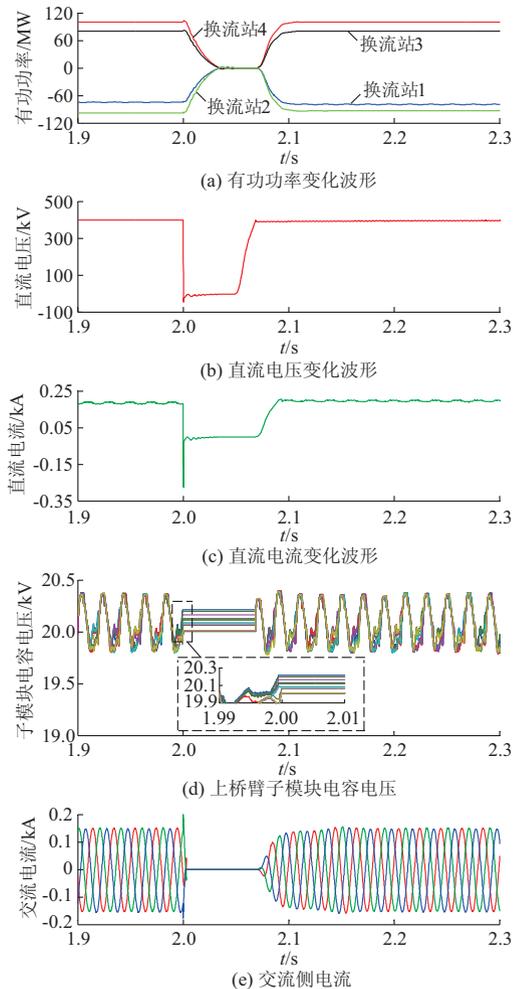


图 7 故障仿真波形

Fig.7 Waveforms of fault state simulation

原稳态值  $-73.22$  MW 和  $-96.17$  MW 变为  $-77.31$  MW 和  $-93.51$  MW。图 7(b)和(c)分别为换流站 1 直流侧的电压和电流变化波形,直流故障在 2 s 时引入,由于子模块电容放电和交流系统馈入,故障电流值急剧上升,直流电流由 0.184 kA 突变至  $-0.275$  kA,直流电压由 399.87 kV 迅速下降为零,触发检测机制动作对换流器发出闭锁信号,闭锁后短路电流迅速下降为零;隔离开关可靠断开后,换流站发出解锁信号,各换流站调整为定直流电压控制方式,直流电压恢复到 392.94 kV,非故障线路上的隔离开关感应两端预设的电压值,实现“握手”后闭合,同时各换流站的控制模式恢复预设,直流电流逐渐上升至新的稳态值 0.196 kA。图 7(d)为换流站 1 的 a 相上桥臂子模块电容电压变化波形,故障闭锁期间,上桥臂子模块电容电压始终保持在 20.01~20.21 kV,因此故障线路切除后子模块可以直接投入使用,无需再次充电,缩短了系统恢复供电所需时间。图 7(e)为换流站 1 交流侧电流变化波

形,故障期间交流电流经短暂上升后下降为零,系统恢复运行后逐渐上升至稳态值 0.106 kA,过程中没有出现交流电流越限的情况,且交流电压变化保持在 $\pm 5\%$ 以内,即故障处理过程对交流系统的稳定性影响较小。

## 6 结论

1)本文分析了 MMC 闭锁直流故障的机理,基于错位层叠理论提出了一种混合型 MMC 拓扑结构。新型拓扑结构的 MMC 具有自清除直流故障能力,且在降低谐波含量与半导体器件使用数量等方面相对传统拓扑具有一定的优势。

2)本文将提出的新型 MMC 拓扑应用于 MTDC 系统,结合多端系统直流故障处理原则,在典型的四端 MTDC 系统中仿真验证,仿真结果较好地印证了本文提出的故障切除与系统恢复方案的有效性。

3)本文提出的混合型 MMC 保留了传统 MMC 的优点,模块化结构有助于系统扩展,直流故障闭锁功能克服了传统 VSC-MTDC 系统的不足,为柔性直流输电更好地适应传统的架空线路提供了一种可行的解决方案,在构建 MTDC 网络、新能源并网等方面具有一定的参考价值。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

## 参考文献

- [1] 徐政,陈海荣.电压源换流器型直流输电技术综述[J].高电压技术,2007,33(1):1-10.  
XU Zheng, CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10.
- [2] 汤广福,贺之渊,庞辉.柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J].电力系统自动化,2013,37(15):3-14.  
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [3] CHAUDHURI N R, MAJUMDER R, CHAUDHURI B, et al. Stability analysis of VSC MTDC grids connected to multimachine AC systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(4): 2774-2784.
- [4] COLE S, BEERTEN J, BELMANS R. Generalized dynamic VSC MTDC model for power system stability studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(3): 1655-1662.
- [5] 胡静.基于 MMC 的多端直流输电系统控制方法研究[D].北京:华北电力大学,2013.
- [6] 管敏渊,徐政,屠卿瑞,等.模块化多电平换流器型直流输电的调制策略[J].电力系统自动化,2010,34(2):48-52.  
GUAN Minyuan, XU Zheng, TU Qingrui, et al. Nearest level modulation for modular multilevel converters in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 48-52.
- [7] 杨晓峰,林智钦,郑琼林,等.模块组合多电平变换器的研究综述[J].中国电机工程学报,2013,33(6):1-14.  
YANG Xiaofeng, LIN Zhiqin, ZHENG T Q, et al. A review of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 1-14.
- [8] 赵成勇,陈晓芳,曹春刚,等.模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略[J].电力系统自动化,2013,35(23):82-87.  
ZHAO Chengyong, CHEN Xiaofang, CAO Chungang, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC under DC faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 35(23): 82-87.
- [9] LI Xiaoqian, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. Protection of nonpermanent faults on DC overhead lines in MMC-based HVDC systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2013, 28(1): 483-490.
- [10] 徐政,薛英林,张哲任.大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5051-5062.  
XU Zheng, XUE Yinglin, ZHANG Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062.
- [11] 薛英林,徐政.C-MMC 直流故障穿越机理及改进拓扑方案[J].中国电机工程学报,2013,33(21):63-70.  
XUE Yinglin, XU Zheng. DC fault ride-through mechanism and improved topology scheme of C-MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21): 63-70.
- [12] 张建坡,赵成勇,郭丽.模块化多电平换流器子模块拓扑仿真分析[J].电力系统自动化,2015,39(2):106-111.  
ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong, GUO Li. Simulation analysis on submodule topology of modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2): 106-111.
- [13] 赵成勇,许建中,李探.全桥型 MMC-MTDC 直流故障穿越能力分析[J].中国科学:技术科学,2013,43(1):106-114.  
ZHAO Chengyong, XU Jianzhong, LI Tan. DC faults ride-through capability analysis of full-bridge MMC-MTDC system[J]. Science China: Technological Sciences, 2013, 43(1): 106-114.
- [14] GRAIN A, AHMED K, SINGH N, et al. H-bridge modular multilevel converter for high-voltage applications[C]// 21st International Conference on Electricity Distribution, June 6-9, 2011, Frankfurt, Germany.
- [15] 赵成勇.柔性直流输电建模和仿真技术[M].北京:中国电力出版社,2014.
- [16] QIN Jiangchao, SAEEDIFARD M, ROCKHILL A, et al. Hybrid design of modular multilevel converters for HVDC systems based on various submodule circuits[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2015, 30(1): 385-394.
- [17] TANG Lianxiang, OOI B T. Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(3): 1877-1884.
- [18] TANG Lianxiang, OOI B T. Protection of VSC multi terminal HVDC against DC faults [C]// IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, June 23-27, 2002, Cairns, Australia: 719-724.
- [19] MARQUARDT R. Modular multilevel converter: an universal concept for HVDC-networks and extended DC-bus-applications

[C]// International Power Electronics Conference, June 21-24, 2010, Sapporo, Japan: 502-507.

孟新涵(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向:基于电压源型换流器的高压直流输电系统控制与应用。E-mail: xinhanme@126.com

李可军(1972—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师

师,主要研究方向:柔性直流输电技术、输变电设备状态检修、智能配电网。E-mail: lkjun@sdu.edu.cn

王卓迪(1986—),男,博士研究生,主要研究方向:多端直流输电、高压直流输电系统控制策略。E-mail: wangzhuodi120@126.com

(编辑 蔡静雯)

## A Hybrid MMC Topology and Its DC Fault Ride-through Capability Analysis When Applied to MTDC System

MENG Xinhan<sup>1</sup>, LI Kejun<sup>1</sup>, WANG Zhuodi<sup>1</sup>, HUO Xuesong<sup>2</sup>, WU Haiwei<sup>2</sup>, ZHANG Ming<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

3. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China)

**Abstract:** The modular multilevel converter (MMC) has become one of the most promising converter technologies in the high voltage direct current transmission system. However, like the low level voltage source converter (VSC), the half bridge MMC, a topical subject at present, is unable to block the direct current (DC) fault. In light of the short-circuit situations of different MMC structures under the DC fault, an improved MMC topology is proposed. A hybrid MMC topology based on mismatched-cascade mechanism and the DC fault blocking principle of converter is designed, which is very suitable for the VSC based multi-terminal DC (VSC-MTDC) transmission system. The process of switching off the faulty line and recovering the normal line is explained with the “handshaking method” when a DC fault happens in the VSC-MTDC transmission system. Finally, a typical four-terminal DC system is introduced and simulations are performed in PSCAD/EMTDC to verify the system characteristics under a bipolar short-circuit fault which is the most serious DC fault. The results show that the multi-terminal DC system based on the topology proposed is able to quickly block the converter under a DC fault and recover the normal line within a short time.

This work is supported by State Grid Corporation of China.

**Key words:** modular multilevel converter (MMC); voltage source converter based multi-terminal direct current (VSC-MTDC) transmission; sub-module topology; mismatched-cascade mechanism; DC fault blocking