

一种具有故障隔离能力的 MMC-HVDC 换流站子模块拓扑研究

孙 栩¹, 朱 晋², 刘文龙², 尹靖元², 韦统振²

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 中国科学院 电工研究所, 北京 100190)

摘要: 针对典型半桥型模块化多电平换流器(MMC)无法阻断直流短路故障电流的固有缺陷,提出一种串联型双电容箝位型子模块,并结合传统半桥型子模块,设计成混联型桥臂拓扑,采用更低额定工作电压的 IGBT,实现子模块基本功能的同时,增加了故障电流隔离能力。与全桥子模块结构和箝位双子模块结构相比,所提出的子模块拓扑方案进一步降低了器件成本。详细描述了该方案故障电流阻断机理,并通过电磁暂态仿真模型验证了基于该子模块拓扑的换流站方案的可行性。

关键词: 故障隔离型子模块; 拓扑; 柔性直流输电; 模块化多电平换流器; 直流侧故障隔离

中图分类号: TM 721.1; TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.03.020

0 引言

模块化多电平柔性直流输电技术(MMC-HVDC)由于其独有的优势,被国内外学者公认为特别适用于新能源并网、孤岛供电、特大型城市电网输配电、交流电网互联等多种应用场合^[1-5]。目前普遍采用的半桥型模块化多电平换流器(MMC)由于不具备直流侧故障隔离能力,直流侧发生故障时只能依靠交流断路器清除故障,系统恢复时间长,这在一定程度上阻碍了 MMC 在多端直流系统和直流电网中的发展和应用^[6-22]。

通过对换流站自身拓扑结构的改进,使其能通过闭锁实现直流侧故障电流的阻断也是柔性直流输电系统清除直流故障的一种有效方式。这种方案具有故障清除快、系统恢复迅速、对交流系统影响小等优点,适用于故障率较高但故障多为暂态故障的架空线输电线路。目前已提出的具有代表性的直流故障电流自阻断型柔性直流输电换流站拓扑主要有:混合级联多电平换流站 HCMC(Hybrid Cascaded Multilevel Converter)拓扑^[6-9]、变桥臂多电平换流站 AAMC(Alternate-Arm Multilevel Converter)拓扑^[10-11]、交流侧串入全桥子模块型 MMC 拓扑^[12]、双向晶闸管旁路型 MMC 拓扑^[13]和子模块改进型 MMC 拓扑^[14-21]。

子模块改进型 MMC 拓扑是目前最受到认可的换流站拓扑改进方式,该方法能够充分利用目前已经发展成熟的 MMC 站控与阀控技术,以最小的改动使换流站获得直流故障清除能力,目前已有多种拓扑结构涌现^[14-21]。文献[21]较为全面地总结了目前

的多种新型子模块拓扑,并对其拓扑结构进行了详细的对比,将故障隔离型 MMC 分为子模块拓扑优化和桥臂优化 2 种思路,在子模块优化方面,详细介绍了全桥子模块拓扑、箝位型双子模块(CDSM)拓扑、串联双子模块拓扑、交叉连接型子模块拓扑、二极管箝位型子模块拓扑和二极管箝位式双子模块拓扑,对各种拓扑类型的损耗和器件数量进行了对比。上述各种子模块拓扑结构在直流电流阻断能力、器件和子模块数量、器件成本、损耗等方面各有优势。文献[9, 18, 20-21]提出基于这类特殊拓扑结构与半桥型子模块(HBSM)的混联型整体换流站优化解决方案,使换流站具备故障隔离能力的同时,进一步降低损耗与成本。这些拓扑结构的提出,丰富了不同场合和需求背景下故障隔离型 MMC 拓扑的备选方案。

本文提出一种新型故障隔离型子模块拓扑结构,为故障电流阻断型子模块的器件成本优化提供一种新的思路,详细叙述了该拓扑结构的原理,并与其他几种主要子模块拓扑进行了对比分析。

1 新型子模块工作原理

本文所提出的串联型双电容箝位型子模块 SDSM(Series Double capacitor Sub-Module)拓扑结构如图 1 所示。在稳定运行时, V_{T3} 和 V_{T4} 一直处于开通状态,通过控制 V_{T1} 与 V_{T2} 能够使子模块电容输出 U_C 和 0 这 2 种电平。子模块中的电容 C_1 和电容 C_2 均并联了相等的分压电阻,保证了在稳态运行时 $U_{C1}=U_{C2}=U_C/2$ 。在此前提下,对子模块具体的电平输出原理分析如下。

a. 当 V_{T2} 开通时, V_{T1} 关断,且电流从 B 流入、从 A 流出时,电容 C_1 与 C_2 被充电,子模块输出电压 $U_{SM}=U_C$ 。具体的电流流通过程示意图为 $B \rightarrow V_{D5} \rightarrow C_1 \rightarrow$

收稿日期:2016-03-24;修回日期:2016-12-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51607171)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51607171)

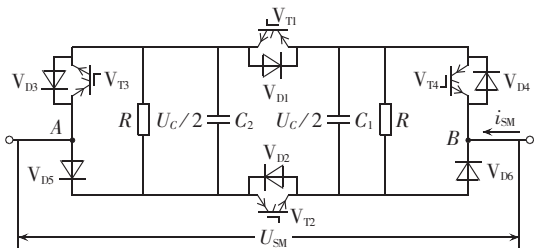


图 1 新型子模块原理图
Fig.1 Schematic diagram of proposed sub-module

$V_{D2} \rightarrow C_2 \rightarrow V_{D3} \rightarrow A$ 。

b. 当 V_{T1} 开通, V_{T2} 关断, 且电流从 B 流入、从 A 流出时, 子模块输出电压 $U_{SM}=0$ 。电容 C_1 和 C_2 被旁路。电流流通路径为 $B \rightarrow V_{D5} \rightarrow V_{T1} \rightarrow V_{D3} \rightarrow A$ 。

c. 当 V_{T2} 开通, V_{T1} 关断, 且电流从 A 流入、从 B 流出时, 电容 C_1 和 C_2 放电, 子模块输出电压 $U_{SM}=U_C$ 。电流流通路径示意图为 $A \rightarrow V_{T3} \rightarrow C_2 \rightarrow V_{T2} \rightarrow C_1 \rightarrow V_{T4} \rightarrow B$ 。

d. 当 V_{T1} 开通, V_{T2} 关断, 且电流方向为从 A 流入、从 B 流出时, 子模块输出电压 $U_{SM}=0$ 。电容 C_1 和 C_2 被旁路。电流流通路径示意图为 $A \rightarrow V_{T3} \rightarrow V_{D1} \rightarrow V_{T4} \rightarrow B$ 。

当发生直流故障时, 所有 IGBT 闭锁, 当电流从 B 端口流入时, 流通路径与情况 a 相同; 当电流从 A 端口流入时, 流通路径为 $A \rightarrow V_{D5} \rightarrow C_2 \rightarrow V_{D1} \rightarrow C_1 \rightarrow V_{D6} \rightarrow B$ 。从 2 种情况的电流流通路径可以看出, 当采用 SDSM 拓扑结构时, 无论故障电流方向如何, 均可将 C_1 和 C_2 同时串入故障电流通路, 通过串联桥臂子模块上所有子模块的电容电压形成反压阻断故障电流, 整个子模块的开关状态如表 1 所示。

表 1 子模块开关状态与输出电压
Table 1 Switching status and output voltage of sub-module

模式	V_{T1}	V_{T2}	V_{T3}	V_{T4}	U_{SM}	i_{SM}	电容充放电状态
正常模式	关断	开通	开通	开通	$U_{C1}+U_{C2}$	>0	充电
	关断	开通	开通	开通	$U_{C1}+U_{C2}$	<0	放电
	开通	关断	开通	开通	0	—	旁路
	开通	关断	开通	关断	0	—	旁路
闭锁模式	关断	关断	关断	关断	$U_{C1}+U_{C2}$	>0	充电
	关断	关断	关断	关断	$U_{C1}+U_{C2}$	<0	充电

在进行上述理论分析时, 假设了在实际 MMC 换流站控制策略下, 子模块电容 C_1 和 C_2 的电压之和稳定为 U_C , 经过电阻分压, C_1 和 C_2 两端的电压 U_{C1} 和 U_{C2} 均为 $U_C/2$, 则 V_{D1} 、 V_{D2} 、 V_{T3} 和 V_{T4} 的耐压均为 $U_C/2$, V_{T1} 与 V_{T2} 的耐压为 U_C 。

2 SDSM 性能分析

2.1 器件成本分析

与 HBSM 相比, SDSM 拓扑结构多了 2 个 IGBT

和 2 个二极管。但是这些器件的耐压均为标准器件 (V_{T1} 和 V_{T2}) 的 1/2。如果常规器件采用 4500 V 的功率器件, 那么附加器件就可采用 3300 V 甚至 1700 V 的功率器件; 如果常规器件采用 3300 V 的功率器件, 那么附加器件就可以采用 1700 V 甚至 1200 V 的功率器件。这需要根据电压裕量来具体分析。目前 1700 V 以下的低压 IGBT 的价格远低于 3300 V 以上的高压 IGBT 的价格。如对于同电流等级的 IGBT, 通常 1700 V 的 IGBT 器件成本只有 3300 V 器件的 1/3 (包括 IGBT 器件及其驱动电路)。因此虽然增加了 2 个 IGBT, 但是单个子模块的成本增加有限^[19]。

考虑上述价格因素, 与 CDSM 等其他箝位型子模块比较, SDSM 拓扑结构在器件成本方面具有明显优势。

2.2 控制复杂度分析

整个换流站的控制部分包括站控系统、阀控系统和子模块内部控制系统。其中, 无论桥臂结构和子模块结构如何变化, 换流站的站控系统基本相同。MMC 型换流站的阀控系统主要负责按照站控系统下发指令调制输出指定交流电压, 同时控制阀组所有子模块电容电压。主要的控制复杂度在于阀组子模块电容电压的排序算法, 主要和需要控制电压的子模块电容数量相关, 该子模块由于内部电容均为同时投切, 在阀控程序里可视作一个电容进行控制, 因此与半桥型 MMC 结构相比, 阀控复杂度也并未增加, 在子模块内部控制系统里, 由于子模块电容数量有所增多, 电容电压信号的采集和子模块内部中央处理器的数据处理量有所增加。

2.3 损耗分析

通过调研换流站损耗计算方法和英飞凌 IGBT 数据表^[23-26], 本文中每个子模块采用了 2 个耐压为 $U_C/2$ 的 IGBT, 其导通损耗之和约为 1 个耐压为 U_C 的 IGBT 的 1.5 倍。根据上述理论分析, 当采用 SDSM 与 HBSM 混联型桥臂结构时, 由于 SDSM 数量在整个桥臂中占比约为 0.4, 并且仅在导通损耗部分有所增加, 整体损耗约为 CDSM 与 HBSM 混联型桥臂结构损耗的 106%。

2.4 子模块性能对比

根据上述分析, 本文所提出的 SDSM、FBSM 和 CDSM 用于混联型桥臂时的性能对比如表 2 所示。

表 2 3 种子模块性能对比
Table 2 Comparison of performance among three sub-modules

子模块	器件成本	阀控复杂度	损耗
SDSM	++	+	+
FBSM	-	+	-
CDSM	+	+	++

三者均可输出 $2U_c$ 、 U_c 、0 电平时,本文所提出的 SDSM 在器件成本方面具有优势,并未增加阀控复杂度,损耗方面比 CDSM 略高,但是损耗远优于 FBSM。总体而言,SDSM 具有自己独特的优势,为子模块拓扑结构改进提供了一种新的思路。

3 混联型 MMC 桥臂方案

多类型子模块混联型桥臂拓扑能够实现各种子模块优势的结合,提高换流站整体性能。为了进一步降低整个 MMC 换流站的成本,本文基于第 1 节所提出的 SDSM 子模块拓扑和通用的 HBSM 拓扑结构,设计了多类型子模块混联型新型桥臂拓扑方案。新型桥臂拓扑方案结合了 SDSM 的直流侧故障处理能力和 HBSM 损耗小、成本低的优势。

假设每个桥臂由 m 个 SDSM 与 n 个 HBSM 构成。 m 与 n 应当满足如下关系:

$$U_c(m+n) = U_{DC} \quad (1)$$

其中, U_{DC} 为 MMC 换流站直流侧电压; U_c 为子模块中电容电压之和。

当直流侧检测到故障,假设理想情况下闭锁前各子模块电容电压在阀控策略下完全均衡,闭锁之后电压也在各子模块电容两端均分,其电压值均等于 U_c ,各 SDSM 与 HBSM 中的电容值均为 C_0 ,则换流站闭锁时,根据桥臂电流方向,初始时刻桥臂等值电路的表达式如下所示:

$$U_{Aeq} = \begin{cases} (m+n)U_c & i_b > 0 \\ mU_c & i_b < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$C_{Aeq} = \begin{cases} C_0/(m+n) & i_b > 0 \\ C_0/m & i_b < 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, U_{Aeq} 和 C_{Aeq} 分别为当前桥臂的等效电压与等效电容; i_b 为换流站闭锁后当前桥臂上的电流。

以 AB 间线电压为例分析,当直流侧发生短路故障导致换流站闭锁后,AB 相间故障电流潜在通路分为 3 类,如图 2 所示。

换流站故障电流通路路径等效电路见图 3。图中, i_{block} 为闭锁时换流站等效故障电流; C_{eqx} 为路径 x 等效电容, U_{eqx} 为路径 x 等效电容两端电压, R_{eqx} 为路径 x 等效电阻, L_{eqx} 为路径 x 等效电感, $x=1,2,3$ 。

如果要利用二极管反向阻断能力使故障电流潜在通路阻断,弧道不复燃,使换流站具备直流侧故障自清除能力,需要满足路径中等效电容两端反电势大于 U_{AB} 线电压峰值,即:

$$U_{eqx} > \hat{U}_{AB} \quad (4)$$

其中, $\hat{U}_{AB}$ 为线电压峰值。

根据上述 3 类路径中各桥臂电流正负方向,代入式(2)可得到闭锁后 3 种路径等效电路电容两端电压值。

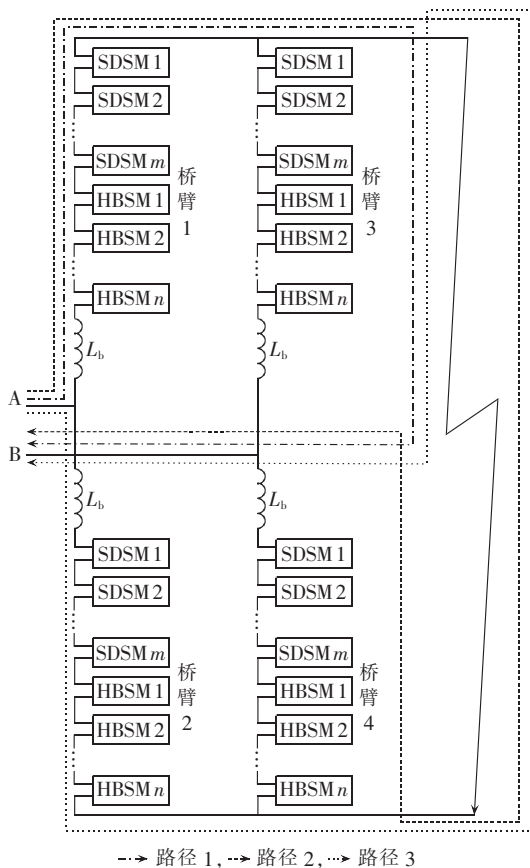


图 2 混联桥臂型 MMC 潜在电流通路

Fig.2 Potential current path of hybrid arm MMC

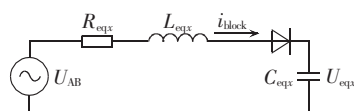


图 3 整个换流站各故障电流通路路径等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of fault current path for whole converter station

$$U_{eq1} = U_{Aeq1}(i_b < 0) + U_{Aeq3}(i_b > 0) = (2m+n)U_c \quad (5)$$

$$U_{eq2} = U_{Aeq1}(i_b < 0) + U_{Aeq4}(i_b < 0) = 2mU_c \quad (6)$$

$$U_{eq3} = U_{Aeq1}(i_b > 0) + U_{Aeq3}(i_b > 0) = 2(m+n)U_c \quad (7)$$

为了满足式(5),则:

$$\min \{U_{eq1}, U_{eq2}, U_{eq3}\} > \hat{U}_{AB} \quad (8)$$

将式(5) — (7)代入式(8),可以求得使换流站具备直流侧故障自清除能力时各桥臂所需 SDSM 的数量 m 的表达式:

$$m = \frac{\hat{U}_{AB}}{2U_c} \quad (9)$$

通过已知的调制比参数,可以求出 MMC 换流站交流线电压峰值与直流母线电压关系,如下所示:

$$\hat{U}_{AB} = \frac{\sqrt{3}kU_{DC}}{2} \quad (10)$$

其中, k 为调制比。结合式(1)、(9)、(10),桥臂中 SDSM 与 HBSM 的数量与直流母线电压关系如下:

$$m=\frac{\sqrt{3}kU_{DC}}{4U_C} \tag{11}$$

$$n=\frac{4U_{DC}-\sqrt{3}kU_{DC}}{4U_C} \tag{12}$$

4 仿真

本文在 PSIM9.0 仿真软件中建立了该换流站 10 kV 单站 STATCOM 运行模式仿真模型,模拟了三相 SDSM & HBSM 混联型换流站并网稳态运行和直流双极短路故障隔离暂态过程。仿真参数如下:额定功率为 1 MW,额定交流线电压有效值为 10 kV,直流母线电压为 18 kV,每桥臂子模块数量为 3,子模块电容额定电压之和为 3 kV,子模块电容值为 3.3 mF,桥臂电感为 50 mH,直流侧电抗器为 50 mH,频率为 50 Hz,各桥臂 SDSM 数量为 2,各桥臂 HBSM 数量为 4。

将交流侧线电压有效值、直流侧电压代入式(10),可以求出所需要的 k 为 0.9。将 k 的值代入式(11)即可求出 $m=2.3$,为了保证短路电流的阻断能力,向上取整数,令 $m=3$ 。得到该模拟换流站具备直流侧故障自清除能力时所需要的 SDSM 数量为 3,则对应的 HBSM 数量为 3。根据计算结果配置桥臂结构,在 0.6 s 处设置直流侧双极短路故障。

故障清除后,在 0.63 s 处让换流站重新投入运行。图 4 为故障清除暂态的直流电流波形,由于是单站 STATCOM 运行模式,因此 0.6 s 前直流侧电流为 0。当发生直流短路故障时,考虑 3 ms 的传感器及通信延时,在此时间内依靠直流侧电抗器及桥臂电感抑制直流电流上升速度。图 5 为 SDSM 中 2 个子模块电容电压和 HBSM 中的电容电压,由于此时换流站尚未闭锁,直流侧故障电流由交流馈入电流和子模

块电容放电电流组成,因此图 5 中子模块电容电压在 0.6~0.603 s 内呈下降趋势。0.603 s 时系统发出闭锁信号,换流站闭锁。此时 HBSM 在短路电流通路中被旁路,直流电网中储存的短路能量对 SDSM 中电容充电,随着 SDSM 中电容电压之和上升,直流短路能量消耗,交直流侧故障电流均下降到 0,如图 4 和图 6 所示。

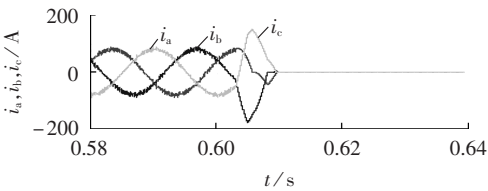


图 6 故障清除暂态三相并网电流波形
Fig.6 Transient waveforms of three-phase grid-connecting current during fault removal

从直流侧短路故障发生至闭锁耗时不到 10 ms,进一步验证了 SDSM 拓扑方案的直流侧故障阻隔能力和本文的子模块配置公式推导的正确性。

为了检测本文拓扑方案闭锁之后自启动从而实现直流侧暂态故障穿越的能力,本文在 0.63 s 向换流站发出解闭锁指令。如图 7 所示,当换流站重新启动后,各子模块电容电压在电容电压均衡控制策略作用下,迅速恢复均衡。图 8 所示三相并网交流电流波形迅速恢复正常,由于闭锁导致的 SDSM 与 HBSM 中电容电压之间的不平衡,经过几个周期的阀控均衡调制策略之后,在 0.75 s 迅速达到均衡。换流站平稳过渡到正常工作模式,进一步验证本文拓扑方案的暂态直流短路故障穿越性能。

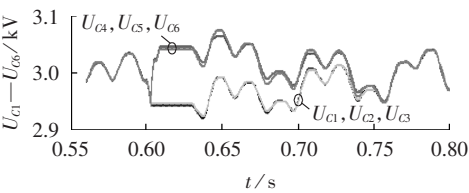


图 7 故障穿越过程某桥臂子模块电容电压波形
Fig.7 Voltage waveforms of sub-module capacitors during fault crossing,for one bridge

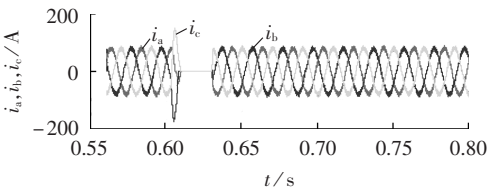


图 8 故障穿越过程三相并网电流波形
Fig.8 Waveforms of three-phase grid-connecting current during fault crossing

图 9—11 为本文子模块故障穿越期间各二极管承受电压。从图中可以看出,0.6 s 之前和 0.63 s 之后,换流站正常运行,由于正常调制的作用, V_{Di} 与

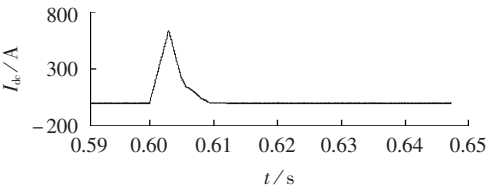


图 4 故障清除暂态直流电流波形
Fig.4 Waveform of transient DC current during fault removal

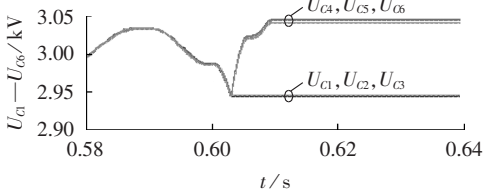


图 5 故障清除暂态某桥臂子模块电容电压波形
Fig.5 Transient voltage waveforms of sub-module capacitors during fault removal,for one bridge

V_{D2} 由于 IGBT 的交替导通,承受的电压在 0 和 3 kV 之间波动,此时 V_{D3} 与 V_{D4} 由于并联的 IGBT 在稳态运行时持续导通,承受电压一直为 0, V_{D5} 和 V_{D6} 承受电压则为 $(U_{C1} + U_{C2})/2$, 即 1.5 kV。在换流站闭锁初期,由于残余能量被子模块电容吸收, $V_{D1} - V_{D4}$ 承受的最高电压略有升高,但是维持在基本值附近,各器件电压应力与理论分析一致。 $V_{D3} - V_{D6}$ 及 V_{D3} 、 V_{D4} 并联的 IGBT 均可采用耐压减半的 IGBT。

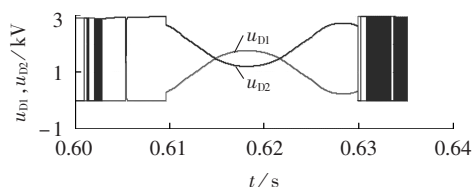


图 9 故障穿越期间 V_{D1} 与 V_{D2} 承受电压波形

Fig.9 Waveforms of u_{D1} and u_{D2} during fault crossing

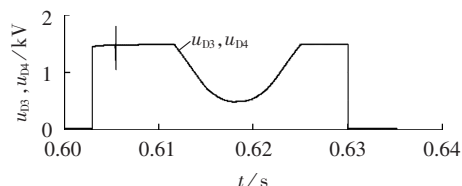


图 10 故障穿越期间 V_{D3} 与 V_{D4} 承受电压波形

Fig.10 Waveforms of u_{D3} and u_{D4} during fault crossing

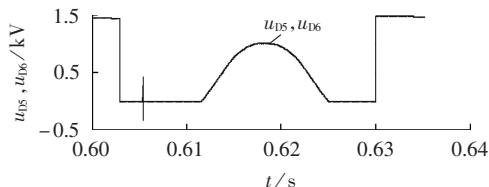


图 11 故障穿越期间 V_{D5} 与 V_{D6} 承受电压波形

Fig.11 Waveforms of u_{D5} and u_{D6} during fault crossing

5 结论

本文提出了一种新的故障隔离型子模块拓扑结构和基于这种类型子模块结构的混联桥臂拓扑,使换流站具备直流侧故障自清除能力,突破国外箝位双子模块型 MMC 专利壁垒。通过理论分析与仿真验证表明,本文所提出的拓扑结构能够有效快速地清除直流侧故障,降低了架空线柔性直流输电换流站的器件成本,为架空线柔性直流输电换流站子模块拓扑提供了一种新的选择。

参考文献:

- [1] 朱晋,韦统振,霍群海. 一种新型全桥变桥臂型 VSC-HVDC 变流拓扑[J]. 中国电机工程学报,2013,33(3):52-61.
- ZHU Jin,WEI Tongzhen,HUO Qunhai. A new full-bridge alternative arm based VSC-HVDC converter[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(3):52-61.
- [2] 朱晋,韦统振,李东,等. 全桥变桥臂电压源变流器拓扑参数及恒

压策略研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(21):26-35.

- ZHU Jin,WEI Tongzhen,LI Dong,et al. A parameter and voltage balancing scheme for full-bridge alternate arm voltage source converters[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(21):26-35.
- [3] LI Zixin,WANG Ping,ZHU Haibin,et al. An improved pulse width modulation method for chopper-cell-based modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2012,27(8):3472-3481.
- [4] LI Zixin,WANG Ping,CHU Zunfang,et al. An inner current suppressing method for modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(11):4873-4879.
- [5] 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):3-11.
- TANG Guangfu,HE Zhiyuan,PANG Hui. Research,application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(15):3-11.
- [6] DAVIDSON C C,TRAINER D R. Innovative concepts for hybrid multi-level converters for HVDC power transmission[C]//Proceedings of the AC and DC Power Transmission. London,UK:IET,2010:1-5.
- [7] ADAM G P,AHMED K H,FINNEY S J,et al. New breed of network fault-tolerant voltage-source-converter HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(1):335-346.
- [8] ADAM G P,FINNEY S J,WILLIAMS B W,et al. Network fault tolerant voltage-source-converter for high-voltage applications [C]//9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. London,UK:IET,2010:1-5.
- [9] 薛英林,徐政,唐庚,等. 新型混合级联多电平换流器调制策略[J]. 电力系统自动化,2012,36(22):108-114.
- XUE Yinglin,XU Zheng,TANG Geng,et al. New modulation strategies for hybrid cascade multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(22):108-114.
- [10] CROSS A M,TRAINER D R,CROOKES R W. Chain-link based HVDC voltage source converter using current injection [C]//Proceedings of the AC and DC Power Transmission. London,UK:IET,2010:1-6.
- [11] MERLIN M M C,GREEN T C,MITCHESON P D,et al. A new hybrid multi-level voltage-source converter with DC fault blocking capability[C]//Proceedings of the AC and DC Power Transmission. London,UK:IET,2010:1-5.
- [12] LI R,ADAM G P,HOLLIDAY D,et al. Hybrid cascaded modular multilevel converter with DC fault ride-through capability for the HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2015,30(4):1853-1862.
- [13] LI Xiaoqian,SONG Qiang,LIU Wenhua,et al. Protection of nonpermanent faults on DC overhead lines in MMC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2013,28(1):483-490.
- [14] 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]. Scientia Sinica Technologica, 2013, 43(1): 106-114.
- [15] XUE Yinglin, XU Zheng, TANG Geng. Self-start control with grouping sequentially precharge for the C-MMC-based HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 187-198.
- [16] MARQUARDT R. Modular multilevel converter topologies with DC-short circuit current limitation[C]//2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE & ECCE). Jeju, Korea: IEEE, 2011: 1425-1431.
- [17] MODEER T, NEE H P, NORRGA S. Loss comparison of different sub-module implementations for modular multilevel converters in HVDC applications[C]//Proceedings of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications. Birmingham, UK: IEEE, 2011: 1-7.
- [18] 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.
- [19] 李笑倩, 刘文华, 宋强, 等. 一种具备直流清除能力的 MMC 换流器改进拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(36): 6389-6397.
- LI Xiaoqian, LIU Wenhua, SONG Qiang, et al. An enhanced MMC topology with DC fault clearance capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6389-6397.
- [20] 王朝亮, 许建中, 赵成勇, 等. 基于单箝位型子模块的 MMC 及拓扑改进方案[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 74-80.
- WANG Chaoliang, XU Jianzhong, ZHAO Chengyong, et al. MMC based on single-clamp sub-module and improved topology schemes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 74-80.
- [21] 吴婧, 姚良忠, 王志冰, 等. 直流电网 MMC 拓扑及其直流故障电流阻断方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2681-2694.
- WU Jing, YAO Liangzhong, WANG Zhibing, et al. The study of MMC topologies and their DC fault current blocking capacities in DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2681-2694.
- [22] 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.
- [23] 张明元, 沈建清, 李卫超, 等. 一种快速 IGBT 损耗计算方法[J]. 船电技术, 2009, 29(1): 33-36.
- ZHANG Mingyuan, SHEN Jianqing, LI Weichao, et al. Calculation method of a fast power loss for IGBT modules[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2009, 29(1): 33-36.
- [24] Infineon. Infineon-FZ1200R12HE4-DS-v02_03-en_cn[EB/OL]. [2015-10-21]. <http://www.infineon.com/cms/cn>.
- [25] Infineon. Infineon-FZ1200R17HE4-DS-v02_03-en_cn[EB/OL]. [2015-10-21]. <http://www.infineon.com/cms/cn>.
- [26] Infineon. Infineon-FZ1200R33HE4-DS-v02_03-en_cn[EB/OL]. [2015-10-21]. <http://www.infineon.com/cms/cn>.

作者简介:



孙 栩

孙 栩(1978—),男,天津人,高级工程师,博士,研究方向为高压直流输电、电力系统分析与仿真;

朱 晋(1987—),男,湖北武汉人,助理研究员,博士,通信作者,研究方向为大功率电力电子技术在电力系统中的应用(E-mail: zhujin@mail.iee.ac.cn)。

Fault-isolated sub-module topology of MMC-HVDC converter station

SUN Xu¹, ZHU Jin², LIU Wenlong², YIN Jingyuan², WEI Tongzhen²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: As the MMC (Modular Multilevel Converter) based on the typical half-bridge sub-module cannot block the fault current of DC short circuit, a series-type dual capacitor-clamped sub-module is proposed, which, combined with the traditional half-bridge sub-module, adopts the hybrid arm structure and applies the IGBT working at lower rated voltage to enhance the DC fault isolation capability while achieve the basic functions of MMC station. Compared with the topology of full-bridge sub-module or dual capacitor-clamped sub-module, the proposed sub-module topology further reduces the device cost. The mechanism of fault current blocking is described in detail and an electromagnetic transient simulation model is applied to verify the feasibility of the converter station scheme based on the proposed sub-module topology.

Key words: fault-isolated sub-module; topology; VSC-HVDC; modular multilevel converter; DC-side fault isolation