

具有直流故障阻断能力的电容嵌位子模块拓扑及其特性

阳莉汶¹, 江伟², 王渝红¹, 陈金祥², 李兴源¹, 黄道姗²

(1. 四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007)

摘要: 针对半桥子模块无法清除直流故障电流的问题, 提出了一种具有直流故障阻断能力的新型电容嵌位子模块拓扑。正常运行时, 子模块中各 IGBT 均衡导通, 无需采用具有特殊通流能力的附加功率器件; 当发生直流故障时, 闭锁子模块中所有 IGBT 通过子模块中的电容提供反向电压来阻断交流系统能量的馈入。IGBT 闭锁后, 利用二极管的单向导通性抑制桥臂电抗器的续流作用, 具有较强的故障电流阻断能力。在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上进行了仿真分析, 验证了提出的电容嵌位子模块比全桥子模块、箝位双子模块具有更好的直流故障阻断能力。

关键词: 模块化多电平换流器; 电容嵌位子模块; 拓扑结构; 直流故障; 架空线

中图分类号: TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.12.024

0 引言

模块化多电平换流器(MMC)采用子模块级联结构, 相比于两电平换流器其具有开关频率较低、损耗较小、波形质量较高等优点。传统的半桥子模块结构造价低、技术成熟, 我国已投运的柔性直流输电工程, 如南汇示范工程、舟山 5 端柔性直流输电工程、厦门柔性直流输电工程等均采用基于半桥子模块结构的 MMC^[1-3]。

为实现大容量远距离输电、降低投资成本, 架空线在柔性直流输电系统中得到越来越多的应用^[4], 但发生直流线路瞬时性故障的概率也大幅增加。直流线路发生短路故障时, 由于子模块电容放电以及交流系统的馈能效应, 故障电流会迅速增大, 威胁换流器等设备的安全, 因此必须迅速切断故障电流。对于半桥子模块, 即使闭锁子模块中的 IGBT, 交流侧也能通过子模块中的二极管向故障点馈流^[5-7]。目前, 处理 MMC 柔直系统直流故障的方法有: 跳开交流断路器, 虽然技术成熟, 但存在响应速度慢、故障恢复时间长等缺点; 采用高压直流断路器, 面临着开断电压等级不够高、容量不够大等技术问题, 尚未在实际工程中应用^[8-9]; 改进子模块拓扑结构, 控制子模块内部电力电子器件的通断来阻断故障电流, 无需机械开关动作, 系统恢复速度快, 具有较大的研究价值和应用前景。

全桥子模块、箝位双子模块都具有直流故障电流阻断能力。全桥子模块具有运行方式灵活、故障穿越能力较强的优点, 但其器件数目为半桥子模块的 2 倍, 初期建设投资较大, 运行损耗较高。箝位双子模块采用类似于 2 个半桥子模块串联的结构, 正常运行

时能输出 3 种电平, 子模块器件利用率高^[10-11]。但子模块中用于连接 2 个半桥结构的 1 对 IGBT 反并联二极管在正常运行时需要一直处于导通状态, 其通流能力、运行损耗、器件结温等参数均高于子模块中其他功率器件^[12]。文献[13]提出的新型三电平交错子模块拓扑器件数相比于全桥子模块较少, 但仍存在附加功率器件运行损耗较大的问题。文献[14]提出的交叉相连子模块中各功率器件能够均衡导通, 不需要附加功率器件, 但由于单个子模块中含有 2 个电容器, 增加了拓扑的复杂性。

本文提出了一种新型的电容嵌位子模块(CESM)结构, 在功率器件的使用数目上较全桥子模块具有一定的优势。稳态运行时, 子模块中各 IGBT 交替均衡导通, 无需采用具有特殊通流能力的附加功率器件; 当发生直流故障时, 通过闭锁子模块中的 IGBT, 能够实现对故障电流的迅速阻断。本文详细分析了采用电容嵌位子模块的 MMC(CE-MMC)、采用全桥子模块的 MMC(F-MMC)、采用箝位双子模块的 MMC(C-MMC)对 IGBT 闭锁后桥臂电抗器续流的阻断过程, 并在 PSCAD/EMTDC 平台上进行了仿真分析, 对比了基于上述 3 种 MMC 的柔性直流输电系统对直流侧故障的清除能力。

1 电容嵌位子模块的结构特点及运行原理

半桥子模块的拓扑结构如图 1(a)所示, 由于二极管 V_{D2} 的续流效应, 半桥子模块无法阻断直流故障电流。为使 MMC 具有直流故障自清除能力, 本文提出电容嵌位子模块结构。电容嵌位子模块的结构如图 1(b)所示, 结构中包括 3 对 IGBT 及其反并联二极管 (V_{T1}/V_{D1} 、 V_{T2}/V_{D2} 、 V_{T3}/V_{D3}) 和 1 个电容器 C , 电容器嵌位于 V_{T1}/V_{D1} 与 V_{T2}/V_{D2} 之间。通过控制子模块中 IGBT 的通断, 可以得到子模块的 3 种运行模

收稿日期: 2016-12-07; 修回日期: 2017-09-26

基金项目: 国家电网公司科技项目(52130415000M)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(52130415000M)

式。电容嵌位子模块中 IGBT 的开关状态与子模块运行模式的关系如表 1 所示。表中“1”表示 IGBT 导通,“0”表示 IGBT 关断。

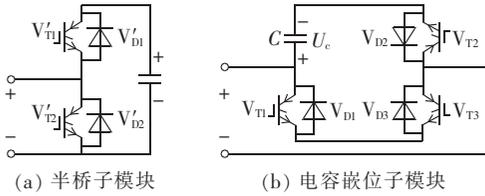


图 1 半桥子模块、电容嵌位子模块拓扑结构图

Fig.1 Topological structure diagram of HBSM and CESM

表 1 电容嵌位子模块运行状态
Table 1 Operating state of CESM

运行模式	开关状态			输出电平
	V_{T1}	V_{T2}	V_{T3}	
投入模式	0	1	0	U_c
切除模式	1	0	1	0
闭锁模式	0	0	0	—

当 MMC 正常运行时,子模块工作于投入和切除 2 种模式。在这 2 种模式下,子模块中的电流通路分别如图 2(a)和(b)所示。可见,子模块处于投入模式时,不同的电流方向下,电容器分别进行充电和放电;子模块处于切除模式时,不论电流方向如何,电容器都被旁路。

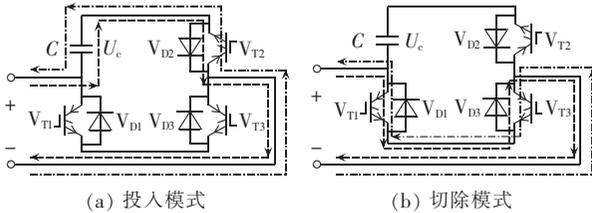


图 2 正常运行时子模块电流通路

Fig.2 Current path of submodule in normal condition

当直流侧发生故障时,同时关断所有 IGBT 器件,子模块进入闭锁状态,利用子模块电容器提供反向电压来阻断交流侧向故障点馈能的通路,从而迅速切断故障电流。

电容嵌位子模块正常工作时,各功率器件交替导通的规律与半桥子模块类似,不需要一直处于导通状态的附加功率器件,且 V_{T1} 和 V_{T3} 的通断情况完全一致,因此可以移植半桥子模块的调制、均压策略。

2 电容嵌位子模块直流故障电流阻断原理及阻断能力分析

2.1 直流故障电流阻断原理

直流线路中常见的故障有单极接地短路、单极断线和双极短路故障。其中,双极短路故障最为严重,且更具一般性,故以双极短路故障为例进行分析。

采用 CE-MMC 柔性直流输电系统中,MMC 含有 3 个相单元,每个相单元由上、下 2 个桥臂组成,每个

桥臂含有 N 个子模块。稳态运行时,MMC 交、直流侧各电气量满足如下关系:

$$\begin{cases} U_{peak} = m U_{dc} / 2, & U_{dc} = N U_c \\ u_{i-1} = \sqrt{3} U_{peak} \sin(\omega t) \end{cases} \quad (1)$$

其中, U_{peak} 为交流相电压幅值; U_{dc} 为直流侧正负极间电压; m 为调制比; u_{i-1} 为任意两相间交流线电压瞬时值; ω 为基波工频对应的角速度; U_c 为子模块额定电容电压。

发生直流双极短路故障时,故障检测系统会产生一定的时延,在此过程中,子模块电容器会对故障点放电^[15]。目前,故障检测的时延可以控制在 100 μ s 以内,因此由电容器放电造成的电容电压降低可以忽略不计。时延之后,闭锁 MMC 中所有 IGBT。此时,任意两相的上、下桥臂中,子模块电容器 C 将与二极管 V_{D2} 进行串联,提供大于交流线电压的反向电压,以此来阻断故障电流。以 a、c 两相为例,闭锁 IGBT 后,假设交流侧能够向故障点馈入故障电流,那么 MMC 中潜在故障电流回路具体如下。当 $u_{ac} > 0$ 时,故障电流 i_a 经过 a 相下桥臂电抗器 L_{ma} 、故障点、c 相上桥臂电抗器 L_{pc} 以及 $2N$ 个串联的电容器 C 和 $2N$ 个串联的二极管 V_{D2} 形成回路。每个二极管 V_{D2} 两端的电压瞬时值为 u_{d2} 。忽略桥臂电抗器压降以及故障点残压,对于故障电流回路由基尔霍夫电压定律可得:

$$u_{ac} = 2N u_{d2} + 2N U_c \quad (2)$$

由此可得二极管 V_{D2} 两端的电压为:

$$u_{d2} = u_{ac} / (2N) - U_c \quad (3)$$

由式(1)–(3)可得 u_{d2} 与电容电压 U_c 之间的关系为:

$$u_{d2} = \sqrt{3} m U_c \sin(\omega t) / 4 - U_c \quad (4)$$

通常情况下,系统调制比 $m < 1$,因此有:

$$u_{d2} = \sqrt{3} m U_c \sin(\omega t) / 4 - U_c < 0 \quad (5)$$

由式(5)可知,在发生直流双极短路故障后 MMC 中所有 IGBT 闭锁,故障电流回路中的子模块电容电压总和将大于交流线电压的最大值,回路中串联的二极管 V_{D2} 承受反向电压,因此实际上故障电流无法流通,即阻断了交流侧向故障点的能量馈入。当 $u_{ac} < 0$ 时,故障电流 i_a 经过 c 相下桥臂电抗器 L_{mc} 、故障点、a 相上桥臂电抗器 L_{pa} 以及 $2N$ 个串联的电容器 C 和 $2N$ 个串联的二极管 V_{D2} 形成回路,其分析与 $u_{ac} > 0$ 时类似。

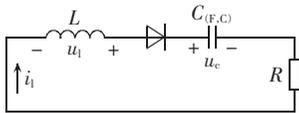
2.2 直流故障电流阻断能力分析

具有直流故障电流阻断能力的子模块结构中,全桥子模块和箝位双子模块的故障阻断原理和本文提出的电容嵌位子模块基本相同,都是利用电容电压与交流线电压的差值使子模块中的二极管承受反向电压来阻断故障电流^[10,16]。但在 IGBT 闭锁后,由

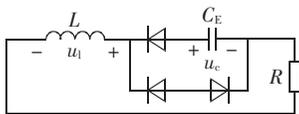
闭锁前电容器放电引起的残余故障电流还会通过桥臂电抗器形成故障电流续流回路。基于上述 3 种子模块的 MMC 柔性直流系统,故障电流续流回路的等效电路参数不同,导致故障电流的续流时长不同,使得 3 种子模块表现出不同的故障阻断能力。

当输出电平数都为 $N+1$ 时,F-MMC 和 CE-MMC 每个桥臂子模块个数为 N (设 N 为偶数),而 C-MMC 每个桥臂子模块个数为 $N/2$ 。设 3 种 MMC 柔性直流输电系统的各运行参数均相等。直流故障发生后,IGBT 闭锁前,3 种 MMC 中每相均有 N 个串联电容器放电。因此,在闭锁延迟时间相同的情况下,IGBT 闭锁瞬间,3 种 MMC 中的子模块电容电压值均相等。

IGBT 闭锁后,子模块电容器停止放电,交流侧向故障点放电的通路也被阻断,但回路中残余的故障电流还会通过桥臂电抗器续流。F-MMC 和 C-MMC 故障电流续流回路中的电流方向与子模块中二极管的正方向一致,其单相等效电路可以统一表示为如图 3(a)所示。CE-MMC 的故障电流续流回路等效电路如图 3(b)所示,其故障电流续流方向与二极管正方向相反,回路呈现高阻状态,故障电流的续流通路被阻断。图中, $L=L_p+L_n+L_l$, L_p 、 L_n 、 L_l 分别为上桥臂、下桥臂、直流线路电感; $R=R_s+R_l$, R_s 、 R_l 分别为故障点残余电阻、换流站直流侧出口到故障点之间的线路电阻; $C_{(F,C)}$ 表示 C_F 或 C_C , C_F 、 C_C 分别为 F-MMC 和 C-MMC 回路的等效电容; C_E 为 CE-MMC 回路的等效电容; u_l 、 u_c 分别为电感电压、电容电压。



(a) F-MMC 和 C-MMC



(b) CE-MMC

图 3 IGBT 闭锁后桥臂电抗续流等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of after-flow current for bridge arm reactor after IGBT blocking

由 F-MMC 和 C-MMC 等效电路可得:

$$\frac{d^2 u_c}{dt^2} + \frac{R_s+R_l}{L_p+L_n+L_l} \frac{du_c}{dt} + \frac{1}{C_{(F,C)}(L_p+L_n+L_l)} u_c = 0 \quad (6)$$

由于 $R_s+R_l \ll 2\sqrt{(L_p+L_n+L_l)/C_{(F,C)}}$,所以故障电流续流过程为二阶欠阻尼振荡衰减过程;因为回路中存在单向导通的二极管,所以续流过程只能维持到电感电流第一次过零点。设闭锁后的初始条件为:

$$u_c(0+) = u_c(0-) = U_0, \quad i_l(0+) = i_l(0-) = I_0 \quad (7)$$

则电容电压随时间的变化情况为:

$$u_c(t) = \frac{U_0 \omega_0 e^{-\delta t}}{\omega} \sin(\beta + \omega t) + \frac{I_0 e^{-\delta t}}{C_{(F,C)} \omega} \sin(\omega t) \quad (8)$$

$$\delta = (R_s+R_l)/[2(L_p+L_n+L_l)] \quad (9)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{(L_p+L_n+L_l)C_{(F,C)}} - \left[\frac{R_s+R_l}{2(L_p+L_n+L_l)}\right]^2} \quad (10)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\delta^2 + \omega^2} \quad (11)$$

$$\beta = \arctan(\omega/\delta) \quad (12)$$

续流回路的电流随时间的变化情况为:

$$i_l(t) = -\frac{U_0 e^{-\delta t}}{\omega(L_p+L_n+L_l)} \sin(\omega t) - \frac{I_0 \omega_0 e^{-\delta t}}{\omega} \sin(\omega t - \beta) \quad (13)$$

回路电流第一次到达过零点的时间 t_z 为:

$$t_z = \frac{1}{\omega} \arctan\left[-\frac{2(L_p+L_n+L_l)I_0\omega}{(R_s+R_l)I_0-U_0}\right] \quad (14)$$

由式(14)可知,在系统其他参数相同的条件下,回路电流从初始值到第一次过零点的时间与等效电容的大小成正比。F-MMC 和 C-MMC 回路中的等效电容分别为:

$$C_F = C/(2N) \quad (15)$$

$$C_C = 2C/N \quad (16)$$

因此在输出电平数相等的情况下,F-MMC 中残余故障电流比 C-MMC 更快衰减至 0。对于 CE-MMC,由于二极管具有单向导通性,回路呈现高阻状态,故障电流续流通路被阻断,故障电流迅速耗散在线路电阻上。因其没有桥臂电抗器续流过程,CE-MMC 中故障电流比 F-MMC 和 C-MMC 更快衰减至 0,因此其阻断能力比 F-MMC 和 C-MMC 更强。

3 器件耐压分析

CE-MMC 正常运行时,电容嵌位于子模块中各 IGBT 两端的电压都箝位于子模块电容电压 U_c 。发生直流双极短路故障后,子模块 IGBT 迅速闭锁。此时,交流线电压和子模块电容电压由回路中串联的各功率器件承担,因此有必要对器件的耐压水平进行分析。发生直流故障后,闭锁换流器中所有 IGBT,此时,回路中的 $2N$ 个串联的 V_{T2} 需承受交流线电压以及 $2N$ 个串联电容的电压之和。每个 V_{T2} 两端的电压为:

$$u_{VT2} = u_{ac}/(2N) + U_c = \sqrt{3} m U_c \sin(\omega t)/4 + U_c < (\sqrt{3}/4 + 1) U_c \approx 1.4 U_c \quad (17)$$

V_{T1} 、 V_{T3} 需轮流承担 V_{T2} 两端电压和子模块电容电压之间的差值,且 $|\sqrt{3} m U_c \sin(\omega t)/4| < 0.4 U_c$ 。因此,不论在正常运行情况还是故障闭锁情况下, V_{T1} 、 V_{T3} 两端电压均不会超过电容电压 U_c 。在正常运行情况下, V_{T2} 两端的电压不会超过 U_c ;在故障闭锁后, V_{T2} 两端承受的电压峰值约为 $1.4 U_c$,且持续时间非常短暂,约为 1 ms。在实际工程中,IGBT 的集电极-发射极电压额定值(U_{CES})一般选为其正常工作电压的 2 倍^[17]。因此, V_{T2} 完全能够承受故障闭锁期间的电压。由上述分析可知,无论在正常运行还是故障闭锁情况下,电容嵌位于子模块中所有 IGBT 两端承受的

电压均不会对器件造成损害。

4 仿真分析

为验证所提出的电容嵌位子模块对直流故障电流的阻断作用,在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建了双端五电平 MMC 柔性直流输电系统,仿真系统的主要参数如下:桥臂子模块数 $N=4$,额定传输容量为 $150 \text{ MV}\cdot\text{A}$,额定直流电压 $U_{dc}=150 \text{ kV}$,额定直流电流 $I_{dc}=0.5 \text{ kA}$,额定交流电压有效值 $U_s=220 \text{ kV}$,桥臂电感为 80 mH ,子模块电容值为 $1000 \mu\text{F}$,子模块电容额定电压 $U_c=75 \text{ kV}$ 。

4.1 电容嵌位子模块直流故障电流阻断仿真

设置系统在 2.5 s 时发生瞬时性正负极短路故障,故障点为直流线路中点。目前实际工程中故障检测系统时延已能控制在 $100 \mu\text{s}$ 以内,但为了更好地体现故障特性,设置故障发生 2 ms 后所有子模块的 IGBT 同时闭锁。系统交、直流侧各物理量的仿真波形如图 4 所示。从图中可以看出,在故障发生之前,直流电压运行在额定值 $\pm 150 \text{ kV}$,系统保持在稳定状态。由图 4(a)可知,故障瞬间,正负极直流电压立即跌落至 0。由图 4(b)可知,IGBT 闭锁前,直流电流迅速增大到额定值的 12 倍左右。故障电流峰值大小会受到换流器闭锁时延、桥臂电抗器大小等因素的影响。因此,为限制故障电流峰值,可采用适当增大桥臂电抗器的取值,在换流器出口处配置平波电抗器,以及缩短故障检测时间等方法^[18-19]。IGBT 闭锁后,直流电流在很短的时间内(约为 0.3 ms)降为 0。与此对应,如图 4(c)所示,IGBT 闭锁后桥臂电流迅速衰减为 0,避免了长时间过电流损坏器件。从图 4(d)可以看出,IGBT 闭锁后,交流电流降为 0,即交流侧不再向故障点馈入能量,故障电流通路被阻断。由图 4(e)可知,IGBT 闭锁前,电容会对故障点进行放电,由于放电时间非常短暂,因此电容电压只有轻微下降;IGBT 闭锁后,电容电压基本保持不变。

图 5 为正常运行和故障闭锁情况下子模块中 IGBT 两端电压波形。由于 V_{T1} 、 V_{T3} 在故障情况下耐压波形互补,峰值相同, V_{T2} 在故障闭锁情况下两端电压峰值大于 V_{T1} 、 V_{T3} 的电压峰值,所以在此选择 u_{VT1} 和 u_{VT2} 波形作为研究对象。

从图 5 可知,稳态运行情况下,IGBT 两端电压最大值为 75 kV ,即被箝位在电容额定电压值;IGBT 因故障闭锁后,在子模块电容电压和交流线电压的共同作用下, V_{T1} 、 V_{T2} 的两端电压分别呈现正弦半波和正弦波的变化; u_{VT1} 、 u_{VT2} 的幅值分别约为 30 kV 、 105 kV ,对应于 $0.4 U_c$ 、 $1.4 U_c$,与前述理论分析相符。

4.2 直流故障电流阻断能力对比仿真

为对比电容嵌位子模块、全桥子模块以及箝位双

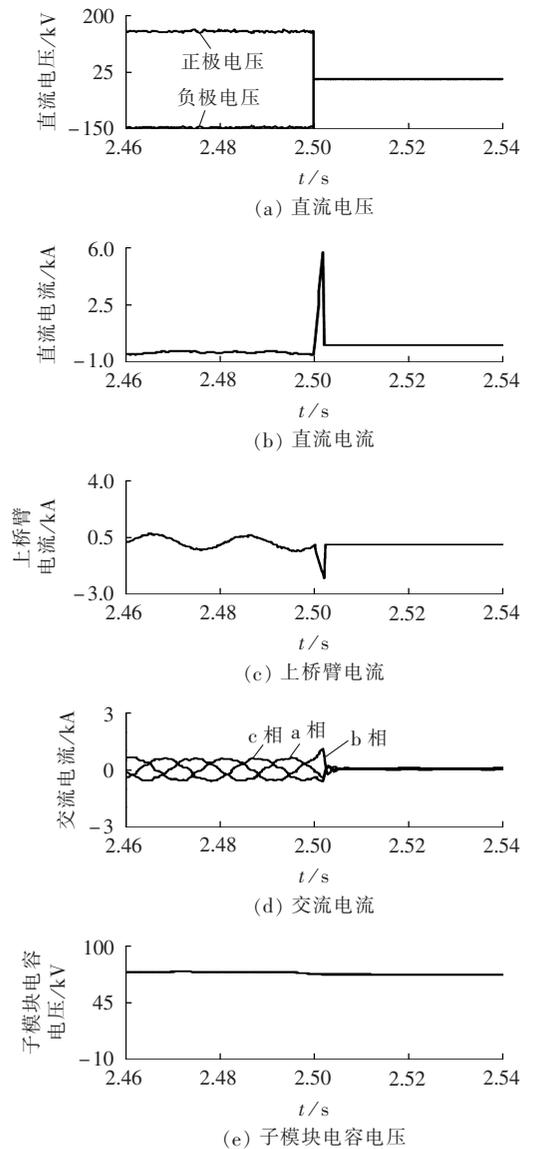


图 4 CE-MMC 直流双极短路故障仿真波形
Fig.4 Simulative waveforms under pole to pole fault of CE-MMC

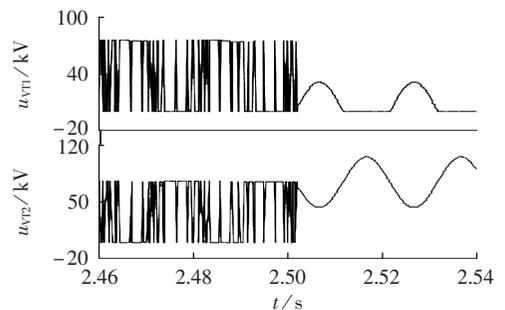


图 5 电容嵌位子模块中 IGBT 两端电压波形
Fig.5 Simulative waveforms of IGBT voltage in CESM

子模块的故障电流阻断能力,又分别搭建了 F-MMC、C-MMC 模型,其系统参数、故障设置均与 CE-MMC 相同。通过故障仿真,3 种 MMC 系统对应的直流故障电流波形对比如图 6 所示。可见,由于系统参数相同,IGBT 闭锁前电容放电的等效电路相同,3 种 MMC

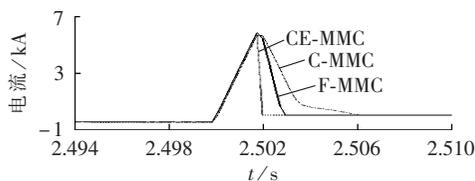


图 6 故障电流阻断能力对比

Fig.6 Comparison of fault current blocking ability

的电流曲线基本重合;闭锁瞬间,电流达到的峰值也基本相同;IGBT 闭锁后,CE-MMC 的直流故障电流最快衰减至 0,其次为 F-MMC,最后为 C-MMC。

在波形分析的基础上,采用文献[20-21]中提出的直流故障电流清除能力指标(DFRTI)对 3 种拓扑的故障清除能力做进一步检验。DFRTI 的定义和原理图分别如式(18)和图 7 所示。

$$f_{\text{DFRTI}} = \frac{S_1}{S_2} = \frac{\int_{t_F}^{t_T} F(t) dt}{\int_{t_F}^{t_T} G(t) dt} \quad (18)$$

其中, $F(t)$ 为发生直流故障后, MMC 不闭锁情况下的故障电流曲线; $G(t)$ 为发生直流故障后, MMC 闭锁情况下的故障电流曲线。图 7 中 I_B 为 MMC 闭锁时刻的故障电流大小, I_M 为 MMC 不闭锁情况下故障电流达到的最大值, t_F 、 t_B 、 t_M 、 t_T 分别为直流故障发生时刻、MMC 闭锁时刻、MMC 不闭锁情况下故障电流达到最大的时刻和交流断路器开断时刻, S_1 、 S_2 分别为曲线 $F(t)$ 、 $G(t)$ 从 t_F 到 t_T 时间段对应的面积。

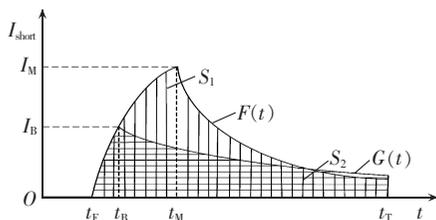


图 7 DFRTI 的原理图

Fig.7 Principle diagram of DFRTI

DFRTI 的值表明了相对于 MMC 不闭锁的情况,在 MMC 采取闭锁措施的情况下,直流故障电流对系统总冲击减小的倍数。对于采用不同种类子模块的 MMC,DFRTI 的值越大,这种 MMC 对直流故障电流的阻断能力越强。

经计算可得: $f_{\text{DFRTI(CE-MMC)}} > f_{\text{DFRTI(F-MMC)}} > f_{\text{DFRTI(C-MMC)}}$ 。仿真波形对比和 DFRTI 计算结果均表明,电容嵌位子模块的故障清除能力在 3 种子模块结构中最强,其次为全桥子模块,最后为箝位双子模块。

5 结论

传统的半桥子模块被广泛应用于 MMC 柔性直流输电系统中,但由于其自身结构的问题,不具备清除直流故障电流的能力。本文在半桥子模块的基础

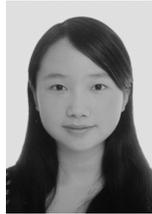
上,提出了具有直流故障电流阻断能力的电容嵌位子模块拓扑,分析了其结构特点和运行原理,并对故障闭锁期间电容嵌位子模块中 IGBT 的耐压情况进行了分析和说明。在此基础上,本文详细分析了采用 CE-MMC 柔性直流输电系统阻断直流故障电流的原理,并通过对比分析得出本文提出的 CE-MMC 对桥臂电抗器续流的阻断能力比 F-MMC 及 C-MMC 更强。在 PSCAD/EMTDC 仿真软件中进行了仿真验证,结果表明电容嵌位子模块能有效阻断直流故障电流,并且其对桥臂电抗器续流的阻断能力较全桥子模块、箝位双子模块更强。

参考文献:

- [1] 韦延方,卫志农,孙国强,等. 一种新型的高压直流输电技术——MMC-HVDC[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):1-9.
WEI Yanfang,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. New HVDC power transmission technology: MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):1-9.
- [2] 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 Qionglin,et al. A review of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013,33(6):1-14.
- [3] 董云龙,凌卫家,田杰,等. 舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J]. 电力自动化设备,2016,36(7):169-174.
DONG Yunlong,LING Weijia,TIAN Jie,et al. Control & protection system for Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(7):169-174.
- [4] 孙翔,王伟伟,雷霄,等. 架空线柔性直流电网的直流短路电流限制研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(2):219-223.
SUN Xu,WANG Huawei,LEI Xiao,et al. Restriction of DC short circuit current for overhead lines of flexible DC grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(2):219-223.
- [5] 赵鹏豪,王朝亮,许建中,等. 一种具有直流故障穿越能力的 MMC 子模块拓扑[J]. 电网技术,2014,38(12):3441-3446.
ZHAO Penghao,WANG Chaoliang,XU Jianzhong,et al. A submodule topology of MMC with DC fault ride-through capability[J]. Power System Technology,2014,38(12):3441-3446.
- [6] 张建坡,赵成勇. MMC-HVDC 直流侧故障特性仿真分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):32-37.
ZHANG Jianpo,ZHAO Chengyong. A simulation and analysis of DC-link fault characteristics for MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(7):32-37.
- [7] 徐政,肖晔庆,张哲任. 模块化多电平换流器主回路参数设计[J]. 高电压技术,2015,41(8):2514-2527.
XU Zheng,XIAO Huangqing,ZHANG Zheren. Design of main circuit parameters of modular multilevel converters[J]. High Voltage Engineering,2015,41(8):2514-2527.
- [8] 谢晔源,曹冬明,李继红,等. 一种实现柔直系统快速恢复的自取能故障阻尼器[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):142-149.
XIE Yeyuan,CAO Dongming,LI Jihong,et al. Self-powered fault damper for realizing fast recovery of VSC-HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(7):142-149.
- [9] 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.
- [10] ZENG R,XU L,YAO L Z,et al. Precharging and DC fault ride-through of hybrid MMC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2015,3(3):1298-1306.
- [11] 丁云芝,苏建徽,周建. 基于箝位双子模块的 MMC 故障清除和重启能力分析[J]. 电力系统自动化,2014,38(1):97-103.
- DING Yunzhi,SU Jianhui,ZHOU Jian. Analysis on fault current limitation and self-recovery of MMC based on clamp double sub-module[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(1):97-103.
- [12] ZHANG J P,ZHAO C Y. The research of SM topology with DC fault tolerance in MMC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2015,30(3):1561-1568.
- [13] 薛英林. 适用于大容量架空线的 C-MMC 型柔性直流技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- XUE Yinglin. On C-MMC based HVDC technology for bulk power overhead line transmission[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2014.
- [14] QIN J C,SAEEDIFARD M,ROCKHILL A,et al. Hybrid design of modular multilevel converters for HVDC systems based on various submodule circuits[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2015,30(1):385-394.
- [15] NAMI A,WANG L W,DIJKHUIZEN F,et al. Five level cross connected cell for cascaded converters[C]//15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). Lille, France:IEEE,2013:1-9.
- [16] 张国驹,祁新春,陈瑶,等. 模块化多电平换流器直流双极短路特性分析[J]. 电力系统自动化,2016,40(12):151-157.
- ZHANG Guoju,QI Xinchun,CHEN Yao,et al. Characteristic analysis of modular multilevel converter under DC pole-to-pole short circuit fault[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(12):151-157.
- [17] 孙桐,朱晋,刘文龙,等. 一种具有故障隔离能力的 MMC-HVDC 换流站子模块拓扑研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(3):120-125.
- SUN Xu,ZHU Jin,LIU Wenlong,et al. Fault-isolated sub-module topology of MMC-HVDC converter station[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(3):120-125.
- [18] 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.
- [19] 张帆,许建中,苑宾,等. 基于虚拟阻抗的 MMC 交、直流侧故障过电流抑制方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(8):2103-2112.
- ZHANG Fan,XU Jianzhong,YUAN Bin,et al. Over current suppression control for AC and DC faults of modular multilevel converters based on virtual impedance[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(8):2103-2112.
- [20] XU J Z,ZHAO P H,ZHAO C Y. Reliability analysis and redundancy configuration of MMC with hybrid submodule topologies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2016,31(4):2720-2729.
- [21] ROHNER S,BERNET S,HILLER M,et al. Modulation,losses, and semiconductor requirements of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2010,57(8):2633-2642.

作者简介:



阳莉汶

阳莉汶(1993—),女,四川眉山人,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制(**E-mail**:liwen_young@163.com);

江伟(1974—),男,福建福州人,高级工程师,博士,主要研究方向为柔性直流输电控制与保护(**E-mail**:jiangwei_8848@sina.com);

王渝红(1970—),女,重庆人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制(**E-mail**:yuhongwang@scu.edu.cn)。

Capacitor-embedded submodule topology with DC fault blocking capability and its characteristics

YANG Liwen¹,JIANG Wei²,WANG Yuhong¹,CHEN Jinxiang²,LI Xingyuan¹,HUANG Daoshan²

(1. School of Electrical Engineering and Information,Sichuan University,Chengdu 610065,China;

2. State Grid Electric Power Research Institute of Fujian Electric Power Company,Fuzhou 350007,China)

Abstract: Considering the fact that HBSMs(Half-Bridge SubModules) cannot eliminate DC fault current,a novel CESM(Capacitor-Embedded SubModule) topology with DC fault blocking capability is proposed. Under normal conditions,there is no extra requirement for equipments with special flow capacity because of IGBTs' equilibrium conduction. When a DC fault happens,all IGBTs of CESMs block,and submodule capacitors are inserted in series,which can provide a reverse voltage to block the fault current feeding from AC side. When IGBTs block,the after-follow current caused by bridge arm reactor can be suppressed by the unidirectional conductivity of submodule diodes. The simulative results based on PSCAD/EMTDC platform demonstrate that CESMs exhibit superior performance than FBSMs(Full-Bridge SubModules) and CDSMs(Clamp Double SubModules) in aspects of blocking the DC fault current.

Key words: modular multilevel converter; capacitor-embedded submodule; topology; DC fault; overhead lines