

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.02.012

混合型 MMC 非闭锁型直流故障穿越的故障等效模型

王泽青^{1,2}, 夏成军^{1,2}, 赖胜杰^{1,2}, 纪焕聪^{1,2}, 周月宾³, 蔡海青^{2,3}

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641; 2. 广东省新能源电力系统智能运行与控制企业重点实验室, 广东 广州 510663; 3. 直流输电技术国家重点实验室 (南方电网科学研究院有限责任公司), 广东 广州 510663)

摘要:由半桥子模块和全桥子模块构成的混合型模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)相比于全桥型 MMC 能够在降低成本的同时具备直流故障穿越能力,直流故障暂态分析是混合型 MMC 器件选型和配比设计的基础。为分析混合型 MMC 直流侧故障的暂态特性,文中建立额定运行状态和降压运行状态下发生极间短路的混合型 MMC 非闭锁型直流故障穿越过程的故障等效模型;分析了直流故障穿越期间混合型 MMC 各桥臂子模块的动态投切过程,将非闭锁型直流故障穿越控制策略切换前的暂态过程等效为不可控的子模块电容放电过程,将控制策略切换后的暂态过程等效为带有电感初始储能和反向电压源的限流过程;给出了直流侧短路电流的解析计算方法。最后,基于 PSCAD/EMTDC 搭建仿真模型,验证了文中模型和计算方法的有效性,能够为混合型 MMC 的优化设计提供参考。

关键词:混合型模块化多电平换流器;直流侧故障;非闭锁型故障穿越;暂态分析;故障等效模型;短路电流计算

中图分类号: TM721.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)02-0103-09

0 引言

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)凭借扩展性强,无换相失败风险,不需要无功补偿等优点,在直流输电领域具有广阔的发展前景^[1-4]。直流故障穿越与暂态分析是 MMC 的重要研究内容^[5-10],半桥型 MMC 技术成熟且成本低,但不具备直流故障穿越能力,须依靠外部断路器切除故障,全桥型 MMC 具有直流故障穿越能力,但成本高。由半桥子模块(half bridge sub-module, HBSM)和全桥子模块(full bridge sub-module, FBSM)构成的混合型 MMC 结合了上述 2 种结构的优点,在具备直流故障穿越能力的同时能够降低成本,是目前的研究热点。

直流侧极间短路故障是 MMC 最严重的故障,直流短路故障的暂态分析是器件选型、保护整定以及优化配置的基础,依靠仿真软件进行暂态特性分析面临着耗时长、仿真效率低等问题,因此须开展针对 MMC 直流故障的暂态分析与解析计算。目前针对混合型 MMC 的研究主要围绕混合型 MMC 的结构优化^[11-12]、FBSM 比例配置^[13-14]、故障穿越策略比较^[15-16]等展开。而有关直流故障暂态分析与计算的研究主要集中在半桥型 MMC。文献[17-18]对 MMC 直流侧不同故障类型暂态特性进行分析,指出

极间故障下过电流最为严重。文献[19]将 MMC 直流侧极间短路的暂态过程分为闭锁前和闭锁后 2 个阶段进行分析,并指出子模块电容放电是造成直流侧过电流的主要原因,为后续闭锁前故障电流分析提供了参考。文献[20]进一步研究子模块放电过程中等效放电电容参数的求解,并研究调制比和故障相角对直流短路电流的影响。但相比于半桥型 MMC,混合型 MMC 能够利用 FBSM 输出负电平实现直流侧输出电压连续可调,在非闭锁型直流故障穿越期间,FBSM 在 3 种工作状态间切换,桥臂子模块的投切过程更加复杂,其暂态特性也更加复杂,须进一步深入分析。因此建立混合型 MMC 直流故障的等效模型,揭示混合型 MMC 故障穿越期间的暂态特性,解析获取直流短路电流的表达式,对于混合型 MMC 系统的器件选型,混合比优化配置以及继电保护的整定具有实际工程意义。

文中针对混合型 MMC 直流侧极间短路故障的暂态过程进行系统分析与推导,建立不同工况下混合型 MMC 非闭锁型故障穿越策略切换前后的故障等效模型,并给出直流侧极间故障时直流侧短路电流的计算方法。最后利用 PSCAD/EMTDC 仿真平台验证了所提模型和计算方法的准确性。

1 混合型 MMC 基本结构与运行原理

1.1 混合型 MMC 基本结构

混合型 MMC 的基本结构如图 1 所示,每个桥

收稿日期:2022-09-09;修回日期:2022-11-12

基金项目:广东省重点领域研发计划资助项目“粤港澳大湾区智慧电力柔性互联关键技术研究”(2019B111109001)

臂由 N_{HB} 个 HBSM、 N_{FB} 个 FBSM 和桥臂电抗 L_{arm} 串联而成。图 1 中 i_{pj} 、 i_{nj} ($j = a, b, c$) 分别为 j 相上、下桥臂电流; u_j 、 i_j 分别为交流侧 j 相电压和 j 相电流; I_{dc} 为直流电流; U_{dc} 为直流侧电压。

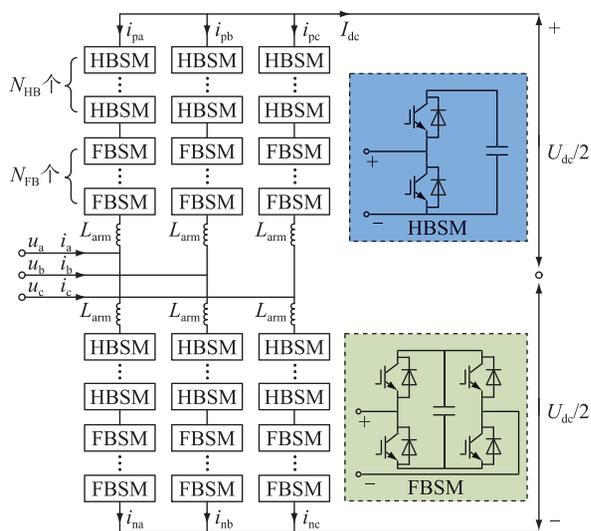


图 1 混合型 MMC 结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of hybrid MMC structure

其中 N_{HB} 和 N_{FB} 的取值范围为 $(0, N)$ ，且满足：

$$N_{HB} + N_{FB} = N \quad (1)$$

将桥臂中 FBSM 的占比定义为混合型 MMC 的混合比，记为：

$$h = \frac{N_{FB}}{N} \times 100\% \quad (2)$$

MMC 子模块有 3 种运行状态，依次为投入状态、切除状态和闭锁状态。图 2 为 2 种子模块结构对应 3 种运行状态下的电流流通路径。其中 FBSM 投入状态分为正投入（子模块输出电压为正）和负投入（子模块输出电压为负），图 2 中仅给出负投入状态下的电流流通路径。正常运行条件下，HBSM 在投入和切除 2 种状态间切换，FBSM 通常在正投入和切除 2 种状态间切换，必要时 FBSM 也可以在正投入、负投入和切除 3 种状态间切换^[21]。

对比 HBSM 和 FBSM 的电流流通路径可知：若忽略开关器件损耗，处于投入状态的子模块均可以等效为电容充放电回路，而处于切除状态的子模块可视为旁路；对于闭锁状态，HBSM 根据所流过电流方向不同可以等效为二极管通路或电容充电回路，而 FBSM 在闭锁状态下均可等效为电容充电回路。

1.2 混合型 MMC 的运行原理

混合型 MMC 在正常工作时，每一相桥臂中有 N 个子模块处于投入状态， N 个子模块处于切除状态。假设每个子模块的电容电压 U_{c0} 恒定，全桥混合型 MMC 额定运行时，直流侧电压为：

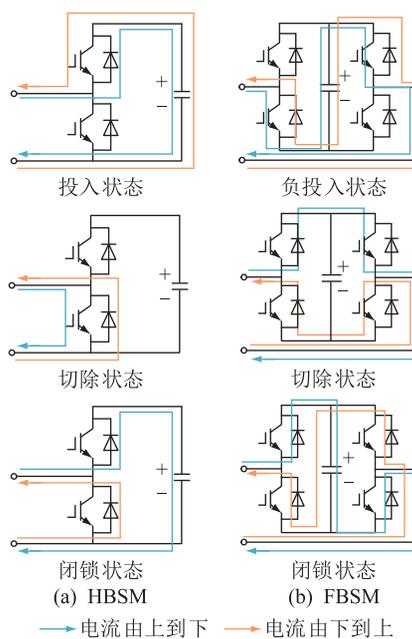


图 2 子模块不同运行状态下的电流流通路径
Fig.2 Current flow paths of sub-modules in different operating states

$$U_{dc} = NU_{c0} = (N_{HB} + N_{FB}) U_{c0} \quad (3)$$

假设换流器出口 a 相电压为：

$$u_a = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (4)$$

式中： U_m 为换流器出口 a 相交流电压峰值； ω 为工频角频率； α 为 a 相电压初始相角。

忽略桥臂电感，可得 a 相上、下桥臂的输出电压分别为：

$$\begin{cases} u_{pa} = \frac{U_{dc}}{2} - u_a \\ u_{na} = \frac{U_{dc}}{2} + u_a \end{cases} \quad (5)$$

降压运行或故障穿越时，FBSM 能够输出负电平，此时每一相仍有 N 个子模块处于投入（负投入）状态， N 个子模块处于切除状态。直流侧输出电压为可变值，其范围与桥臂中投入负电平的 FBSM 数目有关，此时直流电压可调范围为：

$$(N_{HB} - N_{FB}) U_{c0} \leq U'_{dc} \leq (N_{HB} + N_{FB}) U_{c0} \quad (6)$$

由式(2)、式(3)、式(6)可得：

$$(1 - 2h) U_{dc} \leq U'_{dc} \leq U_{dc} \quad (7)$$

由式(5)可知，上、下桥臂输出电压中的直流电压分量可调范围为直流侧输出电压可调范围的一半，当混合比 h 确定时，直流侧输出电压的可调范围相应确定。因此可通过控制桥臂输出参考电压中的直流分量，使直流故障期间直流侧输出电压为负值，以此抑制直流短路电流，实现直流故障穿越。

图 3 为混合型 MMC 桥臂输出电压波形。正常运行时，混合型 MMC 上、下桥臂输出电压分别为

$U_{dc}/2$ 的直流电压分量与一反向的交流电压分量之和,与半桥型 MMC 保持一致,如图 3(a)所示;降压运行时,桥臂中部分 FBSM 输出负电平,此时上、下桥臂输出电压为一可调的直流电压分量与一反向的交流电压分量之和,图 3(b)为混合比 $h = 75\%$,直流侧电压 $U = 0.8U_{dc}$ 降压运行时桥臂的输出电压波形,图中蓝色阴影部分为 $h = 75\%$ 时桥臂输出电压中所含直流分量的可调范围;故障穿越时,为了能够迅速抑制短路电流,在控制策略的作用下,上、下桥臂电压中的直流分量均达到其可调范围的下限,图 3(c)为混合比 $h = 75\%$ 的混合型 MMC 在故障穿越期间上、下桥臂的输出电压波形。

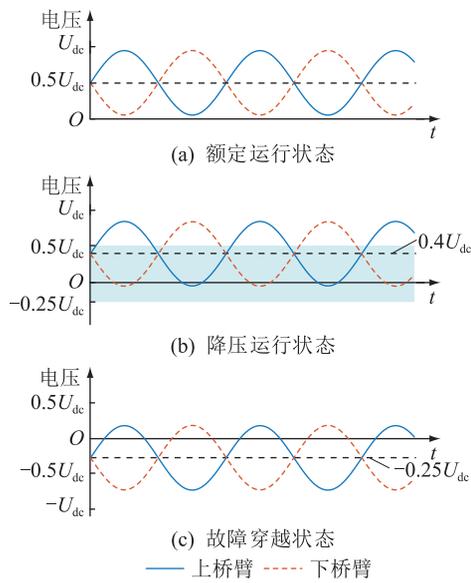


图 3 混合型 MMC 桥臂输出电压波形

Fig.3 The output voltage waveforms of bridge arm of hybrid MMC

2 混合型 MMC 直流故障穿越策略与故障等效模型

2.1 混合型 MMC 直流故障穿越策略

混合型 MMC 的控制采用与常规半桥 MMC 类似的双环控制^[22-23],其基本控制框图如图 4 所示。其中 P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功功率和无功功率的参考值; P_s 、 U_{dc} 、 U_{cavg} 分别为有功类控制量有功功率、输出直流电压、子模块电容平均电压; Q_s 、 U_{ac} 分别为无功类控制量无功功率、交流电压; i_d 、 i_q 分别为阀侧交流电流 i_j 的 d 、 q 轴分量; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为外环控制器输出的 d 、 q 轴电流参考值; u_d 、 u_q 分别为阀侧交流电压的 d 、 q 轴分量; u_d^* 、 u_q^* 分别为内环控制器输出电压 d 、 q 轴参考值; u_j^* 为内环控制器输出交流电压参考值; u_{diff} 为环流抑制器输出环流抑制电压参考值。

混合型 MMC 的直流故障穿越控制策略主要增

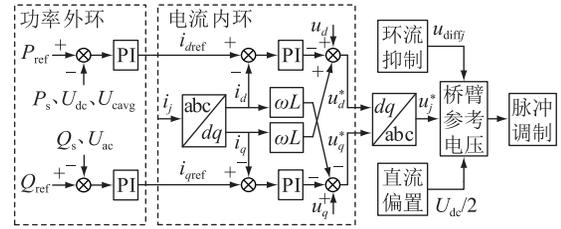


图 4 混合型 MMC 控制系统框图

Fig.4 Block diagram of hybrid MMC control system

加了对图 4 中直流偏置和脉冲调制的控制。闭锁型故障穿越策略直接对脉冲调制环节进行控制,通过闭锁换流器实现直流故障清除^[8]。检测到故障发生后,触发绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 关断信号,闭锁换流器, FBSM 和部分 HBSM 对外输出负电平,使得直流侧故障电流迅速下降,闭锁型直流故障穿越期间各子模块处于不可控状态。

非闭锁型故障穿越控制策略通过控制 FBSM 输出负电平,使直流侧输出负电压,对短路电流进行抑制,故障穿越期间换流器不用闭锁,能够维持无功功率的传输。图 5 为非闭锁型故障穿越控制框图,其中 i_{dc} 为直流短路电流值; U_{dc0} 为正常运行时的直流电压; U_{dc1} 为故障时混合型 MMC 输出的反向电压; C_{Ctrl} 为控制切换信号。系统根据直流电流偏差控制产生一个较大的负直流电压分量,能够在较短时间内将故障电流限制为 0^[24-25]。相比于闭锁型故障穿越,非闭锁型故障穿越控制在直流故障穿越期间换流器不闭锁,能够维持无功功率的输送,为直流故障穿越提供较好的解决方案。

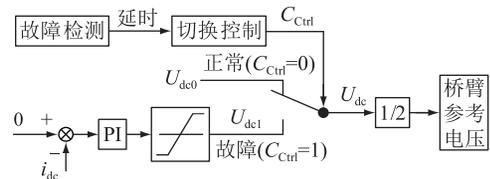


图 5 混合型 MMC 非闭锁型故障穿越策略控制框图

Fig.5 Control block diagram of hybrid MMC non-blocking fault ride-through strategy

2.2 控制策略切换前的暂态过程

直流侧极间短路故障发生后,故障检测需要时间,此时控制策略还未切换,交流侧仍会向桥臂馈入能量,子模块电容储存的能量也会快速释放,造成过电流。在分析桥臂的故障电流时须同时考虑交流侧馈入和子模块电容释放两部分的能量^[19],而在分析直流侧短路电流时,考虑到直流故障下换流器交流侧系统始终三相对称,交流系统的短路电流并不会流入到直流侧,直流故障下换流器交流电流

与直流电流不直接相关,因此在计算直流侧短路电流时可以只考虑子模块电容的放电电流^[22,26]。

假设故障时刻混合型 MMC 运行于额定状态,则每一相桥臂中有 N 个子模块处于(正)投入状态, N 个子模块处于切除状态,此时直流输出电压 $U = U_{dc}$,在故障发生后还未切换至直流故障穿越控制的这一时间段,由于 FBSM 未投入负电平,该暂态过程可以等效为三相桥臂电容的放电暂态过程,考虑到电容放电暂态过程中各子模块的投切是强非线性的,且子模块采用均压排序策略,可将该子模块电容放电的暂态过程等效为一个 RLC 回路的放电过程,三相等效电容值为:

$$C_{eq} = \frac{3\varepsilon C_0}{N} \quad (8)$$

式中: C_0 为单个子模块电容值; N 为每一相投入子模块数目; ε 为等效电容系数,与调制比和故障发生时刻有关^[20],为了简化计算,文中取 $\varepsilon = 1.5$ 。

若此时混合型 MMC 处于降压运行状态,由图 3 (b)可知,此时上、下桥臂输出电压波形中直流分量降低,当输出电压为负时,相应桥臂子模块对外等效为负电平输出,此时每一相等效投入子模块数发生改变,假设此时直流侧电压 $U = kU_{dc}$,则三相等效电容值更新为:

$$C_{eq} = \frac{3\varepsilon C_0}{kN} \quad (9)$$

式中: k 为降压运行系数,其取值范围受混合比约束。

因此,在故障穿越控制策略切换前,可以将混合型 MMC 换流器直流侧极间短路等效为图 6 所示电容放电回路。图中 C_{eq1} 为三相等效电容; $2R_0/3$ 为三相桥臂开关等效电阻; $2L_{arm}/3$ 为三相桥臂等效电感; L_{dc} 为直流侧出口电抗器电感; R_s 为极间短路电阻。

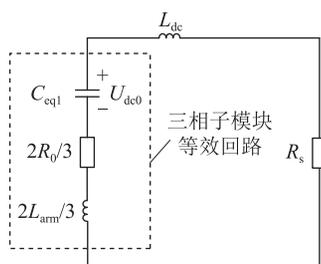


图 6 控制策略切换前的故障等效电路

Fig.6 Fault equivalent circuit before switching of fault ride-through control strategy

由于故障瞬间每一相等效电容具有相同的初始储能,根据电路理论可求得 RLC 回路的放电电流

表达式为:

$$i_{dc,RLC}(t) = \frac{U_{dc0}}{\omega_1(2L_{arm}/3 + L_{dc})} \sin(\omega_1 t) e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} \tau = \frac{2(2L_{arm}/3 + L_{dc})}{2R_0/3 + R_s} \\ \omega_1 = \sqrt{\frac{1}{(2L_{arm}/3 + L_{dc})C_{eq1}} - \left[\frac{2R_0/3 + R_s}{2(2L_{arm}/3 + L_{dc})} \right]^2} \end{cases} \quad (11)$$

式中: t 为放电电流衰减的时间常数; ω_1 为振荡放电电流的角频率。式(10)实际上为电容放电电流表达式,叠加上稳态运行的直流电流 I_{dc0} ,即可得到直流侧短路电流的表达式,即:

$$i_{dc1}(t) = i_{dc,RLC}(t - t_0) + I_{dc0} \quad (12)$$

式中: t_0 为故障发生时刻。

2.3 控制策略切换后的暂态过程

切换至故障穿越控制策略后,根据 i_{dc} 与给定零电流参考值的偏差经比例积分 (proportional integral, PI) 控制器和限幅环节输出直流电压参考电压偏置,限幅环节的上下限可以由式(7)给定。故障穿越期间桥臂参考电压中的直流分量为可调范围的下限值,直流侧输出反向电压。在反向电压的作用下,直流短路电流迅速下降,直流电流偏差不断减小,当直流短路电流下降为 0 时,桥臂输出参考电压中不再含有直流分量,直流故障穿越完成。

图 7 为极间短路后 a 相上桥臂输出电压参考波形和直流侧短路电流波形,图中 t_1 为故障穿越控制策略切换时刻, t_2 为直流电流下降为 0 时刻。

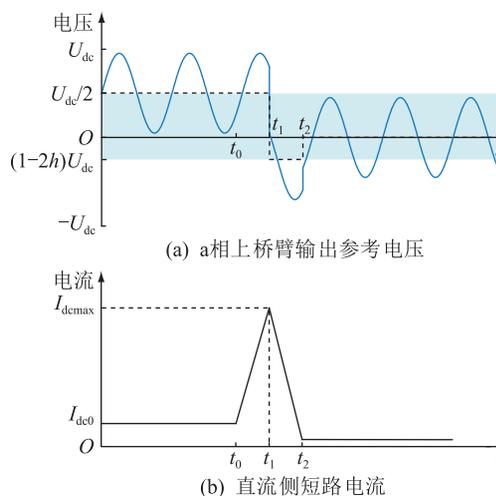


图 7 a 相上桥臂输出参考电压和直流侧短路电流的波形

Fig.7 The waveforms of the output reference voltage of the upper arm of phase a and the short-circuit current at DC side

假设故障穿越控制策略切换在瞬间完成,控制策略切换后,桥臂输出参考电压中的直流分量变为 $(1-2h)U_{dc}/2$, MMC 直流侧输出负压,此时桥臂子模块处于可控状态,每一相桥臂子模块可以等效为一受控的反向电压源,将三相子模块等效为一有源的 RLC 回路,由于桥臂电感和直流电感的存在,此时求解混合型 MMC 故障穿越过程的直流短路电流可以等效为图 8 所示电路。

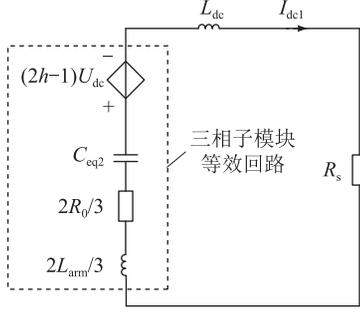


图 8 故障穿越期间的故障等效电路

Fig.8 Fault equivalent circuit during fault ride-through strategy

图 8 中 $(1-2h)U_{dc}$ 为受控的反向电压源电压; I_{dc1} 为控制策略切换时刻的直流短路电流值; C_{eq2} 为此子模块的等效电容值。由于故障穿越期间桥臂输出电压参考值中的直流分量发生变化,此时每一相等效投入的子模块数量由 N 减少为 $(1-2h)N$ (出现负号表示负投入子模块数)。此时等效电容求解如下。

每一相桥臂中正、负投入子模块个数之差为 $(2h-1)N$,且每一相仍有 N 个子模块处于投入状态(正投入和负投入), N 个子模块处于切除状态,在子模块的均压排序策略下,每一相电容可以等效为 2 组具有 $(2h-1)N$ 个子模块电容串联的电容器并联,表达式见式(13)。

$$C_{j2} = 2 \frac{C_0}{(2h-1)N} \quad (13)$$

进而得到故障穿越期间的三相等效电容值为:

$$C_{eq2} = \sum_{j=a,b,c} C_{j2} = \frac{6C_0}{(2h-1)N} \quad (14)$$

由上式可知,直流故障穿越控制策略动作后,等效电容值求解与控制策略动作前不同,其主要原因是 FBSM 的工作状态发生变化,增加了负电平投入状态。根据图 8 可以求解出故障穿越期间直流短路电流的表达式:

$$i_{dc2}(t) = \left[\frac{(1-2h)U_{dc} \sin(\omega_2 t)}{\omega_2(2L_{arm}/3 + L_{dc})} - \frac{\omega_0 I_{dc1} \sin(\omega_2 t - \varphi)}{\omega_2} \right] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (15)$$

其中:

$$\begin{cases} \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{(2L_{arm}/3 + L_{dc})C_{eq2}}} \\ \omega_2 = \sqrt{\frac{1}{(2L_{arm}/3 + L_{dc})C_{eq2}} - \left[\frac{2R_0/3 + R_s}{2(2L_{arm}/3 + L_{dc})} \right]^2} \\ \varphi = \arctan\left(\frac{2(2L_{arm}/3 + L_{dc})\omega_2}{2R_0/3 + R_s}\right) \end{cases} \quad (16)$$

式中: $(1-2h)U_{dc}$ 为故障穿越期间的反向电压值,与混合比有关; ω_2 为此时振荡放电电流的角频率; ω_0 为电路的谐振角频率; φ 为初始电流决定的初相角。

由式(15)可知,此时短路电流具有振荡衰减的特性,当故障电流下降为 0 时,完成故障穿越的暂态过程。令 $i_{dc2}(\Delta t) = 0$ 可以得到:

$$\frac{(1-2h)U_{dc}}{\omega_2(L_c + L_{dc})} \sin(\omega_2 \Delta t) = I_{dc1} \frac{\omega_0}{\omega} \sin(\omega_2 \Delta t - \varphi) \quad (17)$$

进而解得切换为故障穿越控制策略后,直流短路电流被抑制为 0 所需要的时间为:

$$\Delta t = \frac{1}{\omega} \arctan\left(\frac{\omega I_{dc1}}{\tau I_{dc1} + (2h-1)U_{dc}/(L_c + L_{dc})}\right) \quad (18)$$

由式(18)可知,当回路中阻感参数恒定时,故障穿越期间直流短路电流的衰减特性受切换时刻短路电流值 I_{dc1} 和混合比 h 的影响,当 I_{dc1} 相同时,混合比 h 越大,短路电流可以更快地被抑制为 0。

3 仿真实验

为验证上述直流短路电流分析方法与计算的准确性,利用 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建单端混合型 MMC 仿真模型,具体参数见表 1。

表 1 混合型 MMC 系统参数

Table 1 Hybrid MMC system parameters

参数	数值
系统容量/(MV·A)	400
交流电网电压/kV	380
额定直流电压/kV	400
额定直流电流/A	1 000
桥臂子模块数量 N	200
混合比 $h/\%$	70~90
桥臂电感值/mH	29
子模块电容值/mF	10
直流侧出口电抗/mH	75

假设混合型 MMC 运行于输送有功功率 400

MW,无功功率 0 Mvar 的初始运行状态,在 $t_0=3.0$ s 时换流器出口处发生极间短路故障,短路电阻 $R_s=0.01 \Omega$ 。图 9 为混合比 $h=75\%$ 的混合型 MMC 系统故障后的暂态响应曲线。

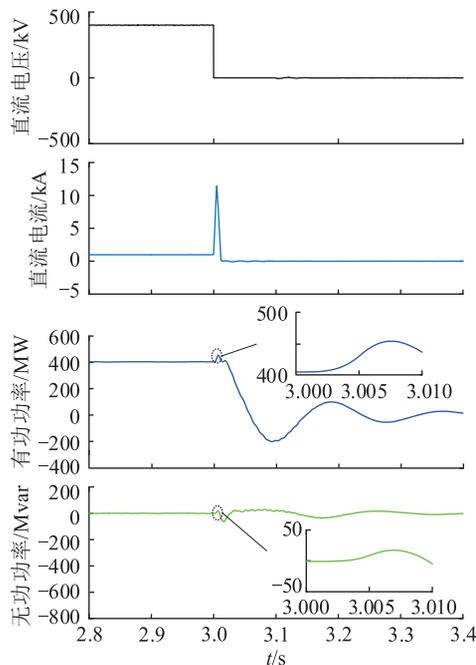


图 9 混合型 MMC 直流侧故障响应曲线

Fig.9 Hybrid MMC fault response curves at DC side

由图 9 可知,直流故障发生后,直流电压跌落为 0,直流电流迅速上升,在直流故障穿越控制策略切换之前有功功率和无功功率发生轻微波动,此时等效为子模块电容的放电过程,可以忽略交流侧对子模块的充电过程。在 $t_1=3.005$ s 故障穿越控制策略切换之后,交流侧输出有功功率增加,其主要原因是此时桥臂中 FBSM 处于受控状态输出负电平,交流系统向 FBSM 充电,导致有功功率上升,而无功功率在较小范围波动,主要原因仍为 FBSM 处于负电平投入状态导致无功功率上升。当直流电流抑制为 0 后,子模块不再向短路点馈入能量,此时对外等效为零电压运行状态,在外环子模块电容电压平衡控制作用下,与交流系统间进行能量交换直至稳态。

图 10 和图 11 分别为 $h=75\%$ 的混合型 MMC 在额定运行状态和降压运行状态下 ($U=0.8U_{dc}$) 发生极间短路后文中方法计算的直流电流与仿真值的对比。由图可知,在故障穿越控制切换前,直流短路电流迅速上升,并在 $t=3.005$ s,即故障穿越控制策略切换时刻达到最大,且降压运行状态下故障短路电流小于额定运行状态下故障短路电流,因此降压运行状态下短路电流被抑制为 0 所需时间更短。

表 2 为额定运行状态和降压运行状态下发生故障时不同时刻所对应的直流侧电流理论计算值与

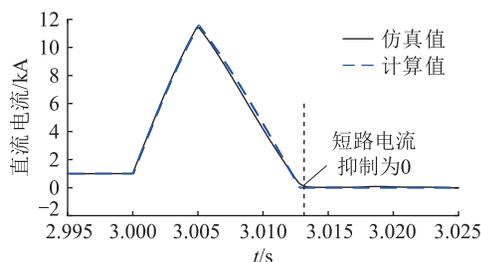


图 10 额定运行状态下发生极间短路的直流电流
Fig.10 DC current for pole-to-pole fault under rated operation condition

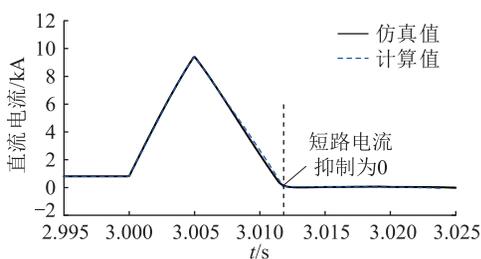


图 11 降压运行状态下发生极间短路的直流电流
Fig.11 DC current for pole-to-pole fault under step-down operating condition

仿真值。可以看出,在控制策略动作 ($t=3.005$ s 动作) 前后的 5 ms 内,各个时刻的计算值与仿真值较为接近,最大误差为 -7.27% ,验证了文中计算方法的准确性。当直流电流下降至 0 附近时,计算误差偏大(表中带括号的误差数据为绝对误差),这是由于文中的故障穿越控制采用直流偏差控制,当直流电流接近于 0 时,桥臂中的直流分量相应发生改变,该过程是一个逐渐逼近为 0 的过程而非理想阶跃,但并不影响直流电流下降为 0 的整体趋势分析。

表 2 不同运行工况下短路电流计算值与仿真值

Table 2 Calculated and simulated values of short-circuit current under different operating conditions

t/s	额定运行状态			降压运行状态		
	仿真值/ kA	计算值/ kA	误差/ %	仿真值/ kA	计算值/ kA	误差/ %
3.001	3.398	3.350	1.44	2.716	2.681	1.26
3.002	5.683	5.633	0.88	4.555	4.520	0.77
3.003	7.841	7.791	0.64	6.318	6.277	0.65
3.004	9.823	9.767	0.56	7.973	7.915	0.73
3.005	11.485	11.510	-0.22	9.403	9.402	0.01
3.006	10.225	10.253	-0.27	8.128	8.160	-0.39
3.007	8.788	8.898	-1.25	6.733	6.839	-1.58
3.008	7.264	7.458	-2.67	5.279	5.455	-3.33
3.009	5.706	5.948	-4.25	3.811	4.019	-5.46
3.010	4.172	4.382	-5.03	2.374	2.547	-7.27
3.011	2.701	2.776	-2.78	0.990	1.052	-6.26
3.012	1.305	1.146	12.21	0.088	0	(0.088)
3.013	0.177	0	(0.177)			

为进一步比较故障穿越暂态过程中直流电流的衰减过程受混合比和故障切换时刻短路电流值的影响,图 12 给出同一切换时刻短路电流值 I_{dc1} 不同混合比 h 下混合型 MMC 的故障穿越响应曲线。

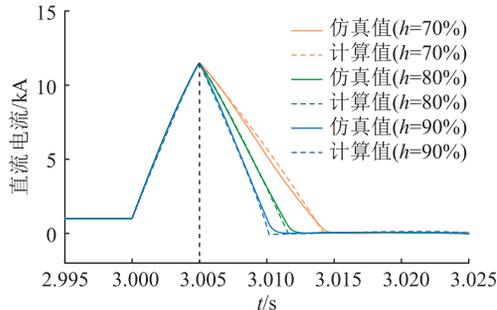


图 12 不同 h 下的故障穿越响应曲线

Fig.12 Fault ride-through response curves under different h

由图 12 可知,故障策略切换之前直流电流曲线保持一致,即混合型 MMC 在故障穿越前的故障暂态过程不受混合比 h 的影响,混合比 h 只影响故障穿越策略动作后的响应曲线,混合比越高,直流短路电流的衰减速度加快,短路电流抑制为 0 所需时间越短。

图 13 为 $h=75\%$ 时不同切换时刻短路电流值 I_{dc1} 下的故障穿越响应曲线。由图 13 可知,通过提高控制策略的响应速度能够减小限流过程的短路电流初值,进而减少故障电流抑制为 0 的时间,图中不同 I_{dc1} 的故障电流抑制曲线近似平行,说明相同混合比 h 下短路电流的抑制效果基本相同。

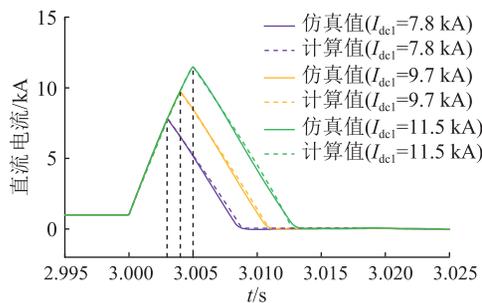


图 13 不同 I_{dc1} 下的故障穿越响应曲线

Fig.13 Fault ride-through response curves under different I_{dc1}

4 结论

文中针对全半桥混合型 MMC 直流侧极间短路故障的暂态过程进行了深入分析,建立了混合型 MMC 非闭锁型直流故障穿越下的故障等效模型。根据故障穿越控制动作前后依次将直流故障后的暂态过程等效为不可控的子模块电容放电过程和带有电感初始储能和反向电压源的限流过程,计算

得到直流侧短路电流的解析表达式,仿真验证了理论分析的准确性。同时得到以下结论:

(1) 额定运行状态下发生故障,在故障穿越控制动作前,混合型 MMC 未触发 FBSM 的负电平投入,此时的暂态过程与半桥型 MMC 保持一致,等效为具有初始电容储能的 RLC 回路的放电过程;降压运行状态下发生故障,仍可等效为 RLC 回路的放电过程,但此时由于每相桥臂等效输出的子模块数发生变化,等效电容须进行调整。

(2) 故障穿越控制动作后,由于负电平的投入,混合型 MMC 子模块电容等效为一受控的反向电压源,能够对短路电流进行抑制,在故障穿越期间可以近似等效为有源的 RLC 回路限流过程,当电流限制到 0 附近时,直流侧等效输出零压,完成整个故障穿越暂态过程。

(3) 混合型 MMC 的混合比通过改变故障穿越暂态过程中的负压输出能力和等效电容参数对限流过程产生重要影响,而在控制切换时刻改变限流过程的电流初始值也会对限流时间产生影响。在工程实际中应在综合考虑控制策略切换的响应速度以及初始故障电流值的基础上,确定混合型 MMC 桥臂中 FBSM 的比例。

参考文献:

- [1] 辛保安,郭铭群,王绍武,等. 适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J]. 电力系统自动化,2021,45(22):1-8.
XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8.
- [2] 邹常跃,韦嵘晖,冯俊杰,等. 柔性直流输电发展现状及应用前景[J]. 南方电网技术,2022,16(3):1-7.
ZOU Changyue, WEI Ronghui, FENG Junjie, et al. Development status and application prospect of VSC-HVDC [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(3): 1-7.
- [3] 杨晓峰,郑琼林,薛尧,等. 模块化多电平换流器的拓扑和工业应用综述[J]. 电网技术,2016,40(1):1-10.
YANG Xiaofeng, ZHENG Trillion Q, XUE Yao, et al. Review on topology and industry applications of modular multilevel converter [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 1-10.
- [4] 饶宏,洪潮,周保荣,等. 乌东德特高压多端直流工程受端采用柔性直流对多直流集中馈入问题的改善作用研究[J]. 南方电网技术,2017,11(3):1-5.
RAO Hong, HONG Chao, ZHOU Baorong, et al. Study on improvement of VSC-HVDC at inverter side of Wudongde multi-terminal UHVDC for the problem of centralized multi-infeed HVDC [J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(3): 1-5.
- [5] HALEEM N M, RAJAPAKSE A D, GOLE A M, et al. Investiga-

- tion of fault ride-through capability of hybrid VSC-LCC multi-terminal HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1):241-250.
- [6] 和敬涵,黄威博,李海英,等. FBMMC 直流故障穿越机理及故障清除策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10):1-7.
HE Jinghan, HUANG Weibo, LI Haiying, et al. FBMMC DC fault ride-through mechanism and fault clearing strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10):1-7.
- [7] 张建忠,陈桂,张雅倩,等. 混合型 MMC 非闭锁型直流短路故障穿越策略分析和比较[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4):41-47, 63.
ZHANG Jianzhong, CHEN Gui, ZHANG Yaqian, et al. Analysis and comparison of non-blocking DC short circuit fault ride-through strategies for hybrid MMC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4):41-47, 63.
- [8] 蔡洋,郭文勇,赵闯,等. 模块化多电平换流器直流故障过电流精确计算与分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(7):1526-1536.
CAI Yang, GUO Wenyong, ZHAO Chuang, et al. The accurate calculation and analysis of overcurrent under modular multilevel converter DC fault[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(7):1526-1536.
- [9] 朱铭炼,姜田贵,欧阳有鹏,等. 模块化多电平换流器直流双极短路故障耐受能力研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2):44-48, 60.
ZHU Minglian, JIANG Tiangui, OUYANG Youpeng, et al. Current distribution and junction temperature calculation of protective thyristor for MMC valve[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(2):44-48, 60.
- [10] XU S K, SONG Q, ZHOU Y B, et al. Dynamic model of the DC fault clearing process of a hybrid modular multilevel converter considering commutations of the fault current[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7):6668-6672.
- [11] 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, 30(3):1298-1306.
- [12] 王琛,陶建业,王毅,等. 半桥-全桥子模块混合型桥臂复用 MMC 的拓扑及故障穿越策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22):8297-8309.
WANG Chen, TAO Jianye, WANG Yi, et al. Research on topology and fault ride-through strategy of hybrid arm multiplexing MMC composed of HBSMs and FBSMs[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(22):8297-8309.
- [13] 冯漠可,郭裕群,许建中,等. 混合型 MMC 启动策略及全桥子模块数目配置研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2017, 44(6):28-35.
FENG Moke, GUO Yuqun, XU Jianzhong, et al. Start-up control strategies of hybrid MMC and configuration of FBSM[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2017, 44(6):28-35.
- [14] 邓帅荣,周念成,王月月,等. 基于混合型 MMC 全桥子模块比例的直流侧故障隔离电压研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(10):3250-3257.
DENG Shuirong, ZHOU Niancheng, WANG Yueyue, et al. Research on DC fault isolation voltage based on proportions of full bridge sub-modules of hybrid MMC[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10):3250-3257.
- [15] 许树楷,周月宾,杨柳,等. 应用于远距离架空线直流输电的混合 MMC 直流故障清除方式比较分析[J]. 南方电网技术, 2022, 16(2):3-13.
XU Shukai, ZHOU Yuebin, YANG Liu, et al. Analysis and comparison of the fault-clearing approaches for hybrid MMCs in HVDC system with long-distance overhead lines[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(2):3-13.
- [16] 尹太元,王跃,段国朝,等. 基于零直流电压控制的混合型 MMC-HVDC 直流短路故障穿越策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(S1):343-351.
YIN Taiyuan, WANG Yue, DUAN Guozhao, et al. Zero DC voltage control based DC fault ride-through strategy for hybrid modular multilevel converter in HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(S1):343-351.
- [17] 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.
- [18] 杨景刚,刘洋,苏伟,等. 苏州同里±10 kV 柔性直流配电系统直流故障特性研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(6):113-120.
YANG Jinggang, LIU Yang, SU Wei, et al. Grounding fault on DC side of Suzhou Tongli ±10 kV flexible DC distribution system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(6):113-120.
- [19] 王姗姗,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 overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1):1-7.
- [20] 段国朝,王跃,尹太元,等. 模块化多电平变流器直流短路故障电流计算[J]. 电网技术, 2018, 42(7):2145-2152.
DUAN Guozhao, WANG Yue, YIN Taiyuan, et al. DC short circuit current calculation for modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2018, 42(7):2145-2152.
- [21] 赵建宁,陈兵. 特高压多端混合柔性直流输电工程技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2022:91-102.
ZHAO Jianning, CHEN Bing. UHV multi-terminal hybrid flexible DC transmission engineering technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2022:91-102.
- [22] 徐政,肖晃庆,张哲任. 柔性直流输电系统[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社, 2017:101-136.
XU Zheng, XIAO Huangqing, ZHANG Zheren. Flexible DC

- transmission system [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2017; 101-136.
- [23] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于半桥型 MMC 的柔性直流电网故障限流方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 175-186.
- CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Review of the fault current limiting approaches for a flexible DC grid based on a half-bridge MMC [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 175-186.
- [24] 林卫星, 文劲宇, 刘伟增. 架空柔性直流输电系统全桥模块比例设计与无闭锁控制[J]. 南方电网技术, 2018, 12(2): 3-11.
- LIN Weixing, WEN Jinyu, LIU Weizeng. Full bridge sub-module proportion design and non-blocking control of overhead MMC-HVDC transmission system [J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(2): 3-11.
- [25] 崔梅. 子模块混合型 MMC 过调制运行研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- CUI Mei. Research on overmodulation operation of sub-module hybrid MMC [D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [26] 汤兰西, 董新洲. MMC 直流输电线路短路故障电流的近似计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 490-498, 646.
- TANG Lanxi, DONG Xinzhou. An approximate method for the calculation of transmission line fault current in MMC-HVDC grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 490-498, 646.

作者简介:



王泽青

王泽青(1997), 男, 硕士在读, 研究方向为柔性直流输电技术 (E-mail: 837008409@qq.com);

夏成军(1974), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统稳定分析与控制;

赖胜杰(1995), 男, 硕士在读, 研究方向为电力系统分析运行与控制。

Fault equivalent model for non-blocking DC fault ride-through of hybrid MMC

WANG Zeqing^{1,2}, XIA Chengjun^{1,2}, LAI Shengjie^{1,2}, JI Huancong^{1,2}, ZHOU Yuebin³, CAI Haiqing^{2,3}

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Guangdong Province Key Laboratory of Intelligent Operation and Control for New Energy Power System,

Guangzhou 510663, China; 3. State Key Laboratory of HVDC (Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid), Guangzhou 510663, China)

Abstract: Compared with full-bridge modular multilevel converter (MMC), the hybrid MMC composed of half bridge sub-module and full bridge sub-module has the low cost and high DC fault ride-through capability. The DC fault transient analysis is the basis of device selection and proportioning design of hybrid MMC. In order to analyze the transient characteristics of hybrid MMC after DC side fault, the equivalent fault models of DC pole-pole short circuit during the non-blocking DC fault ride-through in rated operation and step-down operation are established. The dynamic switching process of each bridge arm sub-module of hybrid MMC during DC fault ride-through is analyzed. The transient process before the switching of the non-blocking DC fault ride-through control strategy is equivalent to the uncontrollable sub-module capacitor discharge process, while the transient process after switching the control strategy is equivalent to the current limiting process with the initial energy storage of the inductor and the reverse voltage source. The analytical calculation method of the short-circuit current on the DC side of hybrid MMC is also given in this paper. Finally, the effectiveness of the model and calculation method proposed in this paper is verified by the PSCAD/EMTDC simulation platform, which can provide a reference for the optimal design of hybrid MMC.

Keywords: hybrid modular multilevel converter; DC side fault; non-blocking fault ride-through; transient analysis; fault equivalent model; short circuit current calculation

(编辑 方晶)