

具有交流源完全阻断能力的混合式 MMC 拓扑

李仲青¹, 何佳伟¹, 李永丽¹, 李 伟²

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072;

2. 中国电力科学研究院 电网安全与节能国家重点实验室, 北京 100192)

摘要:在具有直流故障清除能力的多种模块化多电平换流器(MMC)子模块中, 箝位双子模块投资成本和附加损耗最低, 但是交流源阻断能力相对较弱; 串联双子模块和增强自阻型子模块交流源阻断能力足够强, 但是投资成本和附加损耗较大。结合不同类型子模块所具备的不同优势, 设计了一种混合式 MMC 拓扑结构。以闭锁后交流源完全阻断为约束, 以投资成本、附加损耗最低为目标, 提出了子模块数量的混合配置原则。基于 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建相应的基于不同子模块的柔性直流系统模型, 通过大量的仿真测试验证了理论分析的正确性以及所设计的混合式 MMC 拓扑的可行性。

关键词:柔性直流系统; 模块化多电平换流器; 故障隔离; 交流源阻断; 混合式拓扑

中图分类号: TM 46

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.03.013

0 引言

近年来, 柔性直流系统逐渐成为智能电网发展的主流供电形式之一。与传统交流系统相比, 其优势主要体现在: 对于风力发电、光伏发电这些非工频或直流型分布式电源而言, 直接接入直流系统能够大幅减少所需电力电子换流设备, 降低换流损耗和投资成本^[1]; 笔记本、电动汽车、数据中心等各类直流负荷不断增加, 利用直流系统进行供电可以节省大量的换流设备^[2]; 在传输相同容量的情况下, 直流线路损耗远小于交流线路损耗^[3]; 直流配电系统有利于蓄电池、超级电容的接入, 从而提高配电系统的供电可靠性, 同时便于分布式储能装置的接入, 也有利于提高系统的电能质量^[4]。

柔性直流系统的发展和应用尚存在若干关键技术问题亟待解决, 如直流故障的快速隔离。众所周知, 直流故障电流无自然过零点^[5-7], 使得直流断路器存在熄弧困难的问题, 大容量直流断路器真正应用于工程实际仍存在一定的困难^[8-10]。利用换流器自身实现直流故障清除成为柔性直流系统中故障隔离的可行方法之一^[11]。

近年来, 得益于国内外学者的大量研究成果, 出现了多种具有直流故障清除能力的模块化多电平换流器 MMC (Modular Multilevel Converter) 子模块。本文首先对各类 MMC 子模块的直流故障清除原理进行简单介绍; 然后对故障处理期间交流源馈流的危害进行阐述, 并分析比较各类子模块的交流源阻

断能力; 在此基础上设计了具有交流源完全阻断能力的混合式 MMC 拓扑, 并确定子模块数量的计算原则; 最后在 MATLAB/Simulink 仿真平台上搭建相应的仿真模型, 通过大量的仿真测试验证理论分析的正确性和设计方案的可行性。

1 典型 MMC 子模块工作原理

传统 MMC 基于半桥子模块 HBSM (Half Bridge Sub-Module) 构成换流器, 正常运行时通过对每一个子模块的投入、切除状态 (见图 1(a)、(b)) 进行控制, 实现交流侧电压的整形; 直流故障发生后, 故障电流快速上升, 为了避免对 IGBT 造成损害, 一旦检测到故障的发生就立即闭锁换流器内所有 IGBT, 同时 IGBT 亦配置过流自保护功能, 以防止直流故障检测无法快速动作而对其产生危害^[12]。然而, 由于子模块闭锁时的电流流通路径 (见图 1(c)) 可知, 由于续流二极管的存在, 交流侧电源仍然会通过换流器以不控整流桥的形式向故障点馈入故障电流, 因此传统 MMC 无法实现对直流故障的隔离^[12]。

针对上述问题, 国内外学者提出了多种具有直流故障自清除能力的换流器子模块改进拓扑结构。包括全桥子模块 FBSM (Full-Bridge Sub-Module)、串联双子模块 SDSM (Series Double Sub-Module)、二极管箝位型子模块 DCSM (Diode-Clamp Sub-Module) 和增强自阻型子模块 SBSM (Self-Blocking Sub-Module) 等^[13-15]。

具有直流故障清除能力的 MMC (以箝位双子模块 CDSM (Clamp Double Sub-Module) 构成的换流器为例), 在直流故障发生后同样闭锁换流器内所有子模块, 此时每一子模块内的电流流通路径如图 1(d) 所示。

收稿日期: 2017-03-22; 修回日期: 2017-11-07

基金项目: 国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项 (2016-YFB0900600); 国家电网公司科技项目 (52094017000W)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2016YFB0900600) and the Science and Technology Project of SGCC (52094017000W)

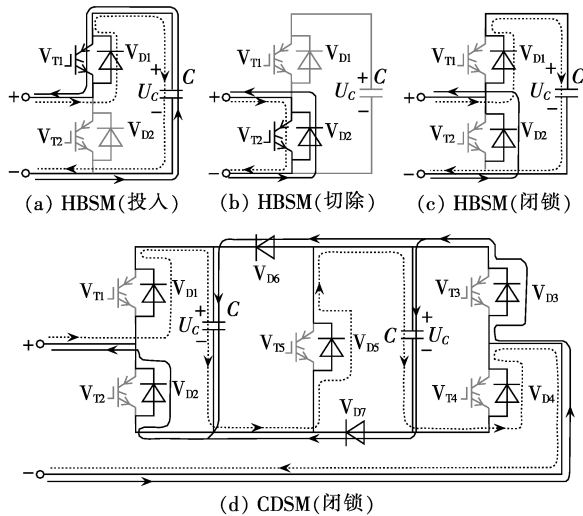


图1 MMC子模块工作原理

Fig.1 Working principle of MMC sub-modules

由图1(d)可知无论桥臂电流方向如何,子模块电容电压均被反极性投入故障电流通路中。反极性电压主要发挥2个作用:①子模块电容电压反极性投入,结合RLC回路的暂态特性可知,此时相当于故障电流向电容充电,因此直流线路中的故障电流将快速衰减至0;②反极性的子模块电容电压还需保证在直流线路故障电流清除期间和清除之后能够完全阻断交流侧电源向故障点馈入故障电流。故障电流清除期间阻断交流源馈流有利于加快故障隔离速度;故障电流清除之后阻断交流源馈流则有利于系统绝缘的恢复以及提高直流开关的使用寿命。

2 具有直流故障清除能力的MMC交流源阻断能力分析

2.1 交流源馈流的危害

仍然以CDSM构成的MMC为例,如果在故障电流清除期间或故障电流清除以后,子模块电容提供的反极性电压无法完全阻断交流源馈入故障电流,则交流源向故障点馈入故障电流的过程如图2所示。图中, N 为换流器每相桥臂的子模块数量; R_1 、 L_1 分别为故障线路的等效电阻和等效电感。

由图2可见,当 t_1 时刻直流场内发生故障,子模块电容向故障点放电,电容电压迅速下降,故障电流快速上升; t_2 时刻闭锁换流器内所有子模块,子模块电容电压反极性投入故障回路,故障电流相当于经RLC回路给电容充电,因此电容电压开始回升,直流线路故障电流衰减下降。

图2中, t_2-t_3 为故障电流清除期,如果 t_2 时刻子模块电容电压处于 $0.866 MU_{C_{nor}}$ ($U_{C_{nor}}$ 为子模块电容额定电压)以下^[16],则在该故障电流清除期间,交流侧电源就有可能突破子模块电容电压的反向箝位而向故障点馈入故障电流,从而导致直流线路故障

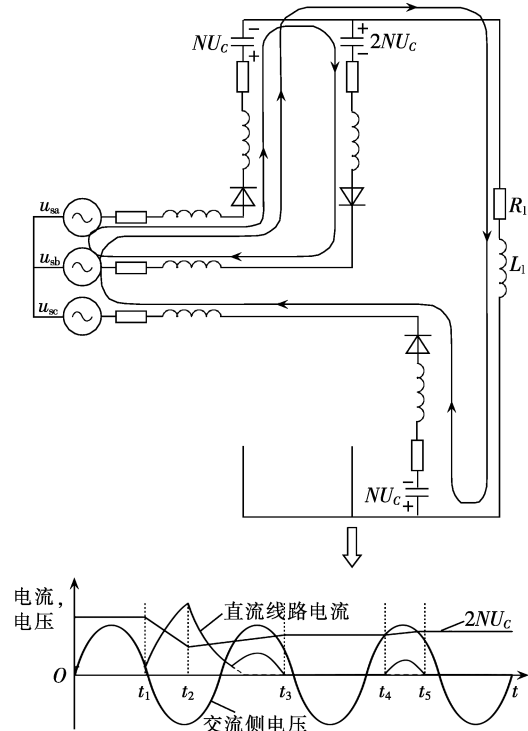


图2 交流源馈流过程

Fig.2 Process of AC-side source feeding fault current

电流无法按照RLC暂态过程快速衰减至0(如图2中直流线路电流虚线所示),而是会出现反复波动(如图2中直流线路电流实线所示),严重影响故障隔离速度。

t_3 时刻(直流线路故障电流清零)以后,若子模块电容电压无法恢复到 $0.866 MU_{C_{nor}}$ 以上,交流侧电源同样会突破电容电压的反向箝位,从而向故障点馈入故障电流,导致电弧复燃,影响系统绝缘的恢复。此外,结合工程实际可知,直流线路故障电流清零以后一般需要直流开关动作实现故障线路的物理切除。但是,直流开关并不具备切除电弧的能力,若在其动作期间出现了这种随机的电弧复燃现象,将对直流开关造成极大的损害,大幅缩短其使用寿命。

2.2 各类MMC的交流源阻断能力

所谓交流源阻断能力是指发生故障并闭锁换流器后,子模块电容提供的反向电压完全阻断交流侧电源向故障点馈入故障电流的能力。

由图2可知,基于CDSM的MMC若要完全阻断交流源馈流,则子模块电容电压平均值在闭锁换流器之后必须满足^[16]:

$$U_c > 0.866 MU_{C_{nor}} \quad (1)$$

其中, U_c 为CDSM电容的平均电压; M 为调制比, $0 < M \leq 1$ 。

同理可得基于FBSM、SDSM、DCSM、SBSM的MMC若要完全阻断交流源馈流,其子模块电容平均电压在换流器闭锁之后必须分别满足^[13-15]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{FBSM}: U_c > \frac{\sqrt{3}}{4} MU_{C_{\text{nor}}} \\ \text{SDSM}: U_c > \frac{\sqrt{3}}{4} MU_{C_{\text{nor}}} \\ \text{DCSM}: U_c > \frac{\sqrt{3}}{2} MU_{C_{\text{nor}}} \\ \text{SBSM}: U_c > \frac{\sqrt{3}}{4} MU_{C_{\text{nor}}} \end{array} \right. \quad (2)$$

为直观比较基于各类子模块的 MMC 交流源阻断能力,本文定义电压阻断系数如下:

$$K = \frac{U_{C_{\text{nor}}} - U_{\text{scr}}}{U_{C_{\text{nor}}}} \quad (3)$$

其中, U_{scr} 为换流器在发生直流线路故障并闭锁子模块后能够完全阻断交流源馈流的临界子模块电容平均电压。

电压阻断系数的物理意义可用图 3 描述: t_1 时刻发生直流故障,电容电压由于放电而快速下降; t_2 时刻,闭锁换流器,故障电流向电容充电导致电容电压回升; t_3 时刻直流线路故障电流下降至 0,电容充电结束,电压维持在 U_c 。因此电压阻断系数的物理意义可以理解为:在保证能够阻断交流源馈入故障电流的前提下,子模块电容在经历闭锁换流器之前的放电过程以后,允许下降的电压值占正常运行电压 $U_{C_{\text{nor}}}$ 的比值。 K 越大,允许下降的电压值越大,即子模块的交流源阻断能力越强; K 越小,则允许下降的电压值越小,子模块的交流源阻断能力越弱。

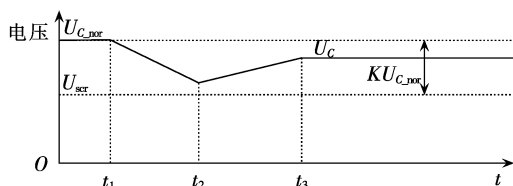


图 3 电压阻断系数定义

Fig.3 Definition of voltage blocking coefficient

对于 CDSM 构成的 MMC 而言, $U_{\text{scr}} = 0.866 MU_{C_{\text{nor}}}$, $K = 1 - 0.866 M$ 。当 $M=1$ 时, K 为最小值 14.4%。即在换流器闭锁以后,最多只允许电容电压低于额定值的 14.4%,否则就可能在故障电流清除期间或故障电流清除后出现交流源馈流现象,对故障隔离速度、系统绝缘恢复和直流开关使用寿命造成不利影响。显然, CDSM 的阻断能力是难以确保在所有故障场景下均能完全阻断交流源馈流的,因为子模块电容在经历换流器闭锁前的放电过程后,电压下降范围很可能超过额定值的 14.4%。

SDSM 和 SBSM 的电压阻断系数 $K = 1 - 0.433 M \geq 56.7\%$,即使 $M=1$,也允许电容电压下降 56.7%。相较于 CDSM, SDSM 和 SBSM 的交流源阻断能力值得信赖。

3 交流源全阻断型 MMC 混合式拓扑

如前文所述, SDSM 和 SBSM 的交流源阻断能力远远强于 CDSM。然而, SDSM 中 V_{T5} 、 V_{D5} 、 V_{D6} 需具备 2 倍电容电压的耐压水平(是其他器件的 2 倍), SBSM 所需 IGBT 数量有所增加,以上原因均会导致投资成本和换流器损耗的大幅增加。而 CDSM 的投资成本和附加损耗是最小的,但其电压阻断系数仅为 $1 - 0.866 M$,无法确保在所有故障场景下均能完全阻断交流源馈流,不利于故障的快速隔离、绝缘恢复以及直流开关的使用寿命。

鉴于以上原因,本文设计如图 4 所示的混合式 MMC 拓扑结构。每个桥臂中的子模块由 CDSM 和 SDSM 混合组成(也可以是 CDSM 和 SBSM 混合)。FBSM 由于投资成本过大,不在设计考虑范围之内。此外,为叙述统一,下文中均以 CDSM 和 SDSM 组成的混合式拓扑为例进行说明,而 CDSM 和 SBSM 组成的混合式拓扑可以类比。通过混合式结构的设计,以尽可能低的投资成本和附加损耗,确保在故障电流清除期间和故障电流清除以后能够完全阻断交流源馈入故障电流。

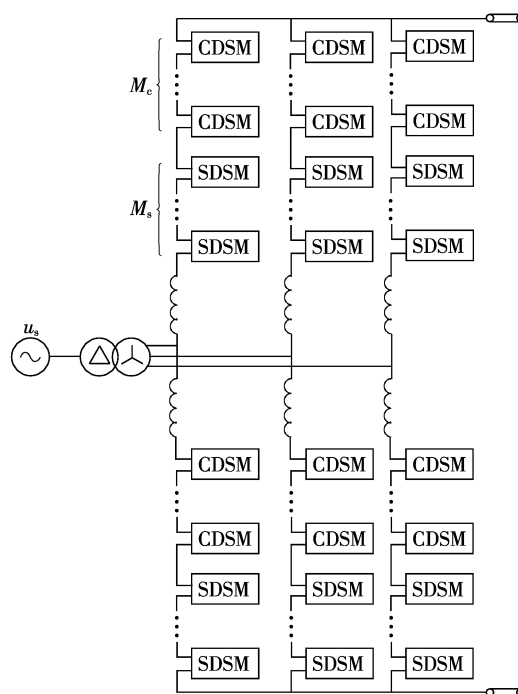


图 4 混合式 MMC 拓扑

Fig.4 Topology of hybrid MMC

混合式 MMC 中各类子模块的个数可根据实际工程中所采用的调制比 M 以及要求达到的电压阻断系数 K 确定。如图 4 所示,假设换流器的电平数为 $2N+1$,设计的混合式 MMC 中每个桥臂由 M_c 个 CDSM 和 M_s 个 SDSM 构成,总数为 N 。则可得:

$$M_c + M_s = N \quad (4)$$

$$U_{\text{scr}} = \frac{\sqrt{3} M N U_{C_{\text{nor}}}}{2(M_c + 2M_s)} = (1 - K) U_{C_{\text{nor}}} \quad (5)$$

求解式(4)、(5)可得每个桥臂中 CDSM 和 SDSM 数量为:

$$\begin{cases} M_c = \text{round} \left[\left(2 - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{M}{1-K} \right) N \right] \\ M_s = \text{round} \left[\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{M}{1-K} - 1 \right) N \right] \end{cases} \quad (6)$$

其中, M 根据换流器互联交、直流侧的直流电压和交流电压即可确定; N 根据电平数即可求得; K 可根据工程实际及仿真测试确定。

由式(6)可知,当调制比 M 较小,即换流器互联交流侧电压较低时,可适当减少混合式 MMC 中的 SDSM 数量,增加 CDSM 数量,以降低投资成本和附加损耗;当调制比较大,即换流器互联交流侧电压较大时,应适当增加混合式 MMC 中的 SDSM 数量,以确保足够的交流源阻断能力。此外,在实际工程中,临界电压在理论计算值的基础上需要留出一定的裕量。因此,在用式(6)计算得到混合式 MMC 子模块配置数量以后,应该考虑适当增加 SDSM 的数量。

4 仿真验证

本文在 MARLAB/Simulink 仿真平台上搭建如图 5 所示的两端 MMC 型直流系统模型,分别用 CDSM、SDSM、SBSM 以及混合式拓扑构成 MMC。系统详细参数如下:直流电压为 $\pm 12 \text{ kV}$,交流线电压为 13.8 kV ,额定容量为 $10 \text{ MV} \cdot \text{A}$,桥臂电抗器为 36 mH ,线路电阻 $r_0 = 0.0139 \Omega/\text{km}$,线路电感 $L_0 = 0.159 \text{ mH}/\text{km}$,子模块电容为 $1000 \mu\text{F}$,电平数为 5。根据系统参数,可计算出调制比 $M \approx 0.94$ 。

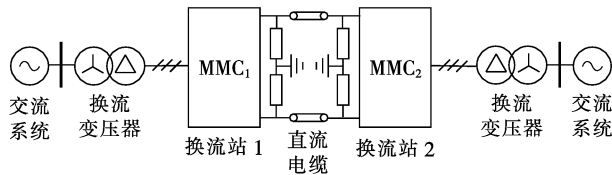


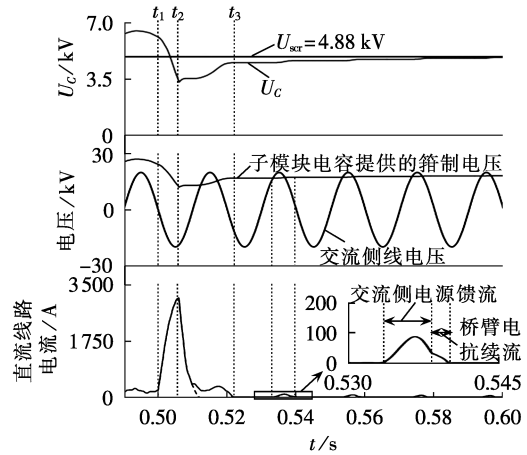
图 5 MMC 直流系统仿真模型

Fig.5 Simulation model of MMC-based DC system

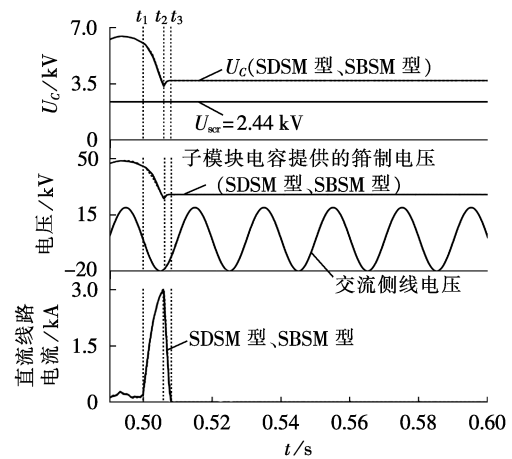
4.1 CDSM、SDSM、SBSM 的交流源阻断能力比较

分别在基于 CDSM、SDSM 和 SBSM 的直流系统中,假设 $t_1 = 500 \text{ ms}$ 时刻,在距换流站 2 出口 5 km 处发生两极经 2Ω 过渡电阻短路故障,直流保护在 $t_2 = 505 \text{ ms}$ 时刻闭锁换流器。比较基于不同类型子模块的 MMC 交流源阻断能力,仿真结果如图 6 所示。

图 6(a)是 CDSM 型 MMC 的交流源阻断能力仿真结果。由仿真结果可知:在 t_1 时刻发生故障以后,子模块电容因为放电而快速下降;直到 t_2 时刻闭锁换流器以后,子模块电容电压才由于故障电流的反向充电开始回升。根据仿真参数可以计算得到其对应的临界电压 $U_{scr} = 4.88 \text{ kV}$,即子模块电容平均电压在闭



(a) 基于 CDSM 的 MMC 交流源阻断效果



(b) 基于 SDSM/SBSM 的 MMC 交流源阻断效果

图 6 交流源阻断能力比较

Fig.6 Comparison of capability to prevent AC-side source from feeding fault current

锁换流器后必须保持在 4.88 kV 以上才能保证完全阻断交流源馈入故障电流。

然而,由图 6(a)可知,在 t_2 时刻闭锁换流器时,子模块电容电压平均值下降到了 3.3 kV 左右,远低于临界电压值 4.88 kV ;因此在故障电流清除期间($t_2 - t_3$),出现了交流线电压超越子模块电容提供的箝制电压的现象,从而导致交流源向故障点供给故障电流;此后,直流线路故障电流无法按虚线呈阻尼特性快速衰减,而是出现反复波动,使得故障隔离速度大幅降低。

t_3 时刻,直流线路故障电流衰减至 0,但是如图 6(a)所示,此时子模块电容电压平均值尚未恢复至 4.88 kV 以上。因此在故障电流清零以后,仍然会出现交流线电压突破电容电压反向箝位而向故障点馈流,导致电弧复燃的现象,对系统绝缘的恢复以及直流开关的使用寿命均会造成不利影响。

图 6(b)展示了 SDSM 型 MMC 的交流源阻断能力仿真结果。通过计算可以得到 SDSM 型 MMC 的临界电压为 2.44 kV 。由图 6(b)可知,在 t_2 时刻闭锁换流器时,尽管子模块电容平均电压同样下降到了

3.3 kV 左右,但由于临界电压大幅降低,使得电容电压平均值保持在了临界电压以上;因此子模块电容提供的反向箝制电压始终保持在交流侧线电压之上,完全阻断了交流侧电源向故障点馈入故障电流;从而使得直流线路故障电流能够直接呈阻尼特性快速衰减,而且在故障电流清零以后不会出现电弧复燃现象。同样由图 6(b)可以知道,基于 SBSM 的 MMC 交流源阻断能力与 SDSM 型 MMC 基本一致,本文不再赘述。

4.2 混合式拓扑结构

图 6 结果表明,基于 CDSM 的 MMC 交流源阻断能力在某些故障情况下,不足以完全阻断交流源馈流,对故障隔离速度、系统绝缘恢复和直流开关使用寿命造成不利影响;基于 SDSM 或 SBSM 的 MMC 较 CDSM 型 MMC 而言交流源阻断能力大幅提高,足以在故障电流清除期间和清除之后完全阻断交流源馈流。但是,如果完全使用 SDSM 或 SBSM 构成 MMC,在投资成本和附加损耗上浪费明显。因此,设计混合式拓扑结构。当利用 CDSM 和 SDSM 构成 MMC 时,由系统参数以及式(5)可得每个桥臂所需的 CDSM 和 SDSM 个数分别为: $M_c=1, M_s=1$ (假设需要的电压阻断系数 $K=40\%$)。类似地,当利用 CDSM 和 SBSM 构成 MMC 时,每个桥臂需要的子模块数量为: $M_c=1, M_s=2$ 。由此,分别搭建基于 CDSM 和 SDSM 混合以及 CDSM 和 SBSM 混合的 MMC 直流系统。相应的仿真结果如图 7 所示。

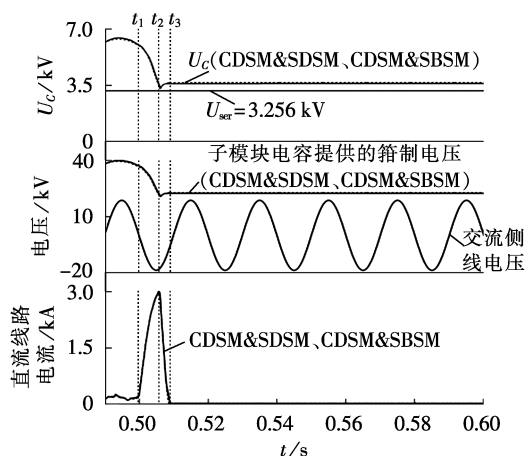


图 7 混合式 MMC 交流源阻断能力仿真结果

Fig.7 Simulative results of hybrid MMC about capability to prevent AC-side source from feeding fault current

由图 7 可见,对于混合式 MMC 而言,虽然其临界电压较 SDSM 型或 SBSM 型 MMC 都有所升高,但是式(5)所示的子模块数量确定原则确保了子模块电容平均电压能够始终保持在临界电压值以上;且混合式 MMC 亦能够完全阻断交流源馈流。但由于只增加部分 SDSM 或 SBSM 保证交流源阻断能力,其

余子模块仍为 CDSM,因此较完全由 SDSM 或 SBSM 构成的 MMC 而言,混合式拓扑做到了投资成本和附加损耗的最小化。

5 结论

利用换流器自身实现直流故障清除是未来柔性直流系统中理想的直流故障隔离方式。通过本文分析发现:基于 CDSM 的 MMC 投资成本和附加损耗最低,但是其交流源阻断能力不足以确保在直流故障以后完全阻断交流源馈流,对故障隔离速度、系统绝缘恢复和直流开关的使用寿命造成不利影响;基于 SDSM 或 SBSM 的 MMC 交流源阻断能力足以完全阻断交流源馈流,但是其投资成本和附加损耗较大。鉴于以上原因,本文设计了基于 CDSM 和 SDSM 混合或 CDSM 和 SBSM 混合的 MMC 拓扑,并以交流源完全阻断为约束,以投资成本、附加损耗最小为目标,提出了子模块数量的混合配置计算方法。在确保完全阻断交流源馈流的前提下,使换流器具有最小的投资成本和附加损耗。

参考文献:

- [1] 宋强,赵彪,刘文华,等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(25):9-19.
SONG Qiang,ZHAO Biao,LIU Wenhua,et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(25):9-19.
- [2] BARAN M E,MAHAJAN N R. DC distribution for industrial systems:opportunities and challenges [J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2003,39(6):1596-1601.
- [3] 李斌,何佳伟. 柔性直流配电系统故障分析及限流方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(12):3026-3036.
LI Bin,HE Jiawei. DC fault analysis and current limiting technique for VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(12):3026-3036.
- [4] 唐庚,徐政,薛英林. LCC-MMC 混合高压直流输电系统[J]. 电工技术学报,2013,28(10):301-310.
TANG Geng,XU Zheng,XUE Yingling. A LCC-MMC hybrid HV-DC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(10):301-310.
- [5] YANG J,FLETCHER J E,O'REILLY J,et al. Multiterminal DC wind farm collection grid internal fault analysis and protection design[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2010,25(4):2308-2316.
- [6] YANG J,FLETCHER J E,O'REILLY J,et al. Short-circuit and ground fault analyses and location in VSC-based DC network cables[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2012,59(10):3827-3837.
- [7] 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. Simulation and analysis of DC-link fault characteristics for MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(7):32-37.
- [8] FRANCK C M. HVDC circuit breakers;a review identifying fu-

- ture research needs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 998-1007.
- [9] 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): 142-147, 154.
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): 142-147, 154.
- [10] 荣命哲,杨飞,吴翊,等. 直流断路器电弧研究的新进展[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 1-9.
RONG Mingzhe, YANG Fei, WU Yi, et al. New development in switching arc research in DC circuit breaker [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 1-9.
- [11] MARQUARDT R. Modular multilevel converter topologies with DC-short circuit current limitation[C]//8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia. Jeju, Korea: IEEE, 2011: 1425-1431.
- [12] SCHMITT D, WANG Y, WEYH T, MARQUARDT R. DC-side fault current management in extended multiterminal-HVDC-grids [C]//9th International Multi-Conference on Systemics, Signals and Devices. Chemnitz, Germany: IEEE, 2012: 1-5.
- [13] LI Xiaoqian, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. Protection of non-permanent faults on DC overhead lines in MMC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 483-490.
- [14] 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.
- [15] LI Xiaoqian, LIU Wenhua, SONG Qiang, et al. An enhanced MMC topology with DC fault ride-through capability [C]//39th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. Vienna, Austria: IEEE, 2013: 6182-6188.
- [16] 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 Zhaoliang, XU Jianzhong, et al. A sub-module topology of MMC with DC fault ride-through capability [J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3441-3446.
- [17] 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-tough mechanism and improved topology scheme of C-MMC [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21): 63-70.

作者简介:



李仲青

李仲青(1978—),男,黑龙江鸡西人,高级工程师,博士研究生,研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: lzqing@epri. sgcc.com.cn);

何佳伟(1991—),男,浙江绍兴人,博士研究生,研究方向为柔性直流电网控制保护(E-mail: hejiawei_tju@126.com);

李永丽(1963—),女,河北石家庄人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统故障分析与微机保护技术(E-mail: lytju@163.com);

李伟(1983—),男,湖南浏阳人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail: liwei2@epri. sgcc.com.cn)。

Hybrid MMC topology with complete AC-side source blocking capability

LI Zhongqing¹, HE Jiawei¹, LI Yongli¹, LI Wei²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In several kinds of MMC (Modular Multilevel Converter) sub-modules with DC fault eliminating capability, the clamp double sub-module has the lowest investment cost and additional power loss but relatively weaker AC-side source blocking capability, nevertheless, the series double sub-module and self-blocking sub-module have strong enough AC-side source blocking capability but high investment cost and additional power loss. According to the different advantages of different sub-modules, a hybrid MMC topology is designed. Taking the requirement of the complete AC-side source blocking as the constraints and the lowest investment cost and additional power loss as the objectives, the sub-module number calculation principle is proposed. The simulation models of flexible DC system based on different sub-modules are built with MATLAB/Simulink, and the simulative results verify the correctness of theoretical analysis and the feasibility of the proposed hybrid MMC topology.

Key words: flexible DC system; modular multilevel converter; fault isolation; AC-side source blocking; hybrid topology