

文章编号:1671-6833(2017)06-0074-05

具备直流故障隔离能力的新型 MMC 拓扑研究

张清枝¹, 李志辉²

(1. 新乡学院 机电工程学院,河南 新乡 453003; 2. 郑州大学 电气工程学院,河南 郑州 450001)

摘 要:对柔性直流输电的直流侧短路故障问题,提出了一种新型的能够自我阻断直流故障的子模块拓扑,该拓扑可以通过自身结构特性来阻断故障电流;在此基础上,为了抑制故障时子模块电容电压升高带来的不利影响,提出了具有阻尼电阻的子模块拓扑,该拓扑在阻断故障电流的同时还具有抑制子模块电容电压的作用.在 PSCAD/EMTDC 平台下搭建了 9 电平 MMC-HVDC 仿真模型,并验证了所提出新型拓扑的正确性.

关键词:柔性直流输电;直流故障;MMC;子模块拓扑;子模块电容电压

中图分类号:TM46;TM721.1 文献标志码:A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2017.06.011

0 引言

近年来,随着分布式电源、储能技术的不断发展,直流输电技术受到了人们的广泛关注^[1-3].柔性直流技术可以独立控制功率、没有换向失败,成为目前研究的热点之一.而模块化多电平换流器(multilevel modular converter MMC)由于采用模块化设计,具有可拓展性好,开关频率低等优点^[4-5],目前已成为换流站的首选拓扑.在采用 MMC 的系统中,直流侧的短路故障是目前 MMC 需要研究的一个主要课题^[6-7].实际工程中通常采用 MMC 半桥型子模块(half bridge sub module, HBSM),当换流器直流侧发生双极短路故障时,在 IGBT(insulated gate bipolar transistor)关断的情况下,短路电流会经过并联的反向二极管流入故障点,且无法通过闭锁换流器来阻断短路电流,会造成十分严重的危害^[8].

采用可以自我阻断直流故障电流的 MMC 拓扑是目前较为可行的方法.该方法通过换流器本身的结构特点,通过故障时二极管两端的反向电压来阻断直流故障电流.由于 IGBT 的开关速度很快,因此能够确保切断故障的迅速性.并且系统能够快速恢复非永久性故障,提高了供电可靠性.

笔者利用 SM 换流器拓扑的结构特征提出了一种改进型拓扑,可以在不改变控制/调制方法的前提下,使系统具备处理直流故障的能力,并且对故障时的子模块充电电压加以抑制,减小故障带来的危害^[9-10].根据直流故障的条件,在 PSCAD/EMTDC 环境下进行了时域仿真.

1 MMC 基本结构及子模块拓扑

1.1 MMC 的基本结构

MMC-HVDC 系统主要由 SM 电路装置级联来实现^[11-12].目前广泛采用的是基于半桥型 SM 的 MMC.三相半桥型 MMC 的结构单元拓扑如图 1 所示.

图 1 中,左侧 A、B、C 三相接入交流电网,右侧输出直流电压. MMC 每一相拥有上和下两个桥臂,其桥臂电压和电流分别为 U_{arm_PA} 、 I_{arm_PA} 、 U_{arm_NA} 、 I_{arm_NA} .每一个完整的上桥臂或下桥臂均由 N 个 SM 上下级联再与一个桥臂外端的电抗器 L_0 串联组成, U_{dc} 表示直流侧的输出电压, O 表示电压为 0 的参考点.图 1 的底部为一个 SM 的半桥型拓扑结构,其输出的子模块电容电压为 U_{sm} ;通过子模块的电流为 i_{arm} ;电容器两端的电压为 U_c ; T_1 、 T_2 为控制子模块运行状态的 IGBT; D_1 、 D_2 为与之并联的反向二极管.

收稿日期:2017-04-07;修订日期:2017-07-11
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61473266);2016 年度河南省高等学校重点科研项目(16A470013)
作者简介:张清枝(1970—),女,河南新乡人,新乡学院副教授,主要从事电力电子技术及自动化运行控制方面的研究,E-mail:13937395104@163.com.

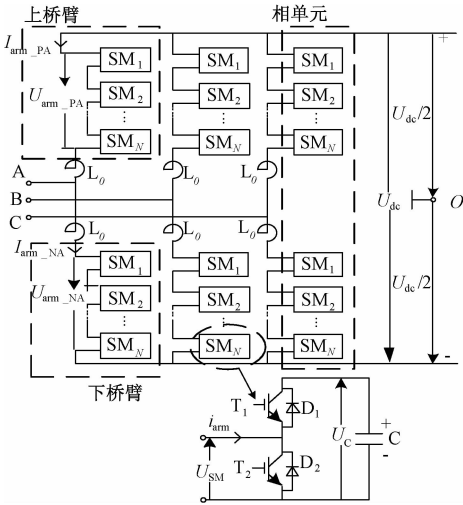


图 1 MMC 的基本结构

Fig.1 MMC basic structure

1.2 直流故障情况下的子模块拓扑分析

在直流侧短路故障期间,半桥型 SM 电路,如图 2 所示.故障发生时,所有的 IGBT 均被阻断,直流故障电流通过与 T_2 并联的反向二极管 D_2 从交流侧流出.由此可见,半桥型 SM 不具有直流故障阻断能力.

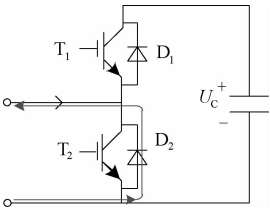


图 2 半桥型 SM 拓扑结构

Fig.2 HBSM topology

全桥型 SM 电路如图 3 所示,全桥的 MMC-HVDC 系统的功率损耗以及成本比半桥型更高.直流故障时,所有 SM 的 IGBT 被阻断,电容器可以产生反向电压阻挡交流侧的电流,从而为全桥型 SM 提供直流故障处理能力.

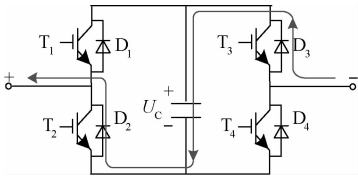


图 3 全桥型 SM 拓扑结构

Fig.3 FBSM topology

2 新型拓扑的结构及故障清除原理

2.1 新型拓扑的基本结构

结合 FBSM 的直流故障处理能力,笔者对传统的 HBSM 进行改进,提出了一种新型子模块拓扑,如图 4 所示.这种子模块拓扑在半桥型和全桥

型子模块拓扑的基础上进行融合,与全桥型 SM 相比,改进的拓扑多用了—个限流电阻 R_1 ,省去了—个 IGBT.

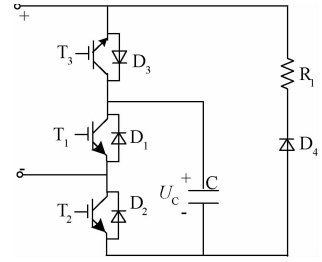


图 4 改进的子模块拓扑结构

Fig.4 The improved SM topology

2.2 新型的故障清除原理

正常运行时, T_3 始终处于导通状态,子模块通过 T_1 和 T_2 的轮换投切来改变其输出的电压为 0 或 U_c .

子模块的电容电压与交流电压满足:

$$\begin{cases} U_{dc} = NU_c; \\ U_{ph} = mU_{dc}/2; \\ U_L = \sqrt{3}U_{ph}, \end{cases} \quad (1)$$

式中, U_{ph} 、 U_L 分别为交流侧的相电压和线电压幅值; m 为调制比; U_c 为子模块电容电压; N 为导通的子模块个数.

如图 5 所示,短路电流经 $D_1 \rightarrow C \rightarrow D_4 \rightarrow R_1$ 流出子模块.同理,MMC-HVDC 发生双极短路故障时,两相之间的短路电流共流过 $2N$ 个 $D_1 \rightarrow C \rightarrow D_4 \rightarrow R_1$ 这样的组合以及 2 个电抗器 L .

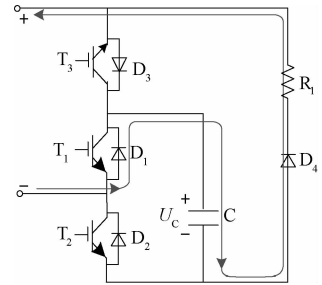


图 5 故障时的短路电流通路

Fig.5 Short-circuit current paths in DC fault

以 A、B 相为例,根据 KVL(基尔霍夫电压定律):

$$u_{ba} = [N(u_{D_1} + u_{D_4} + U_c + u_{R_1}) + u_L] \times 2 = [N(u_{D_1} + u_{D_4} + u_{R_1}) + U_{dc} + u_L] \times 2, \quad (2)$$

式中, u_{ba} 和 u_L 分别为交流线电压和电抗器电压的瞬时值; u_{D_1} 、 u_{D_4} 为二极管的电压瞬时值; u_{R_1} 为限流电阻 R_1 上的电压瞬时值.

整理得:

$$u_{D_1} + u_{D_4} = \left(\frac{u_{ba}}{2} - u_L - U_{dc} \right) / N - u_{R_1}. \quad (6)$$

显然, $u_{D1} + u_{D4} < 0$, 即二极管 D_1 和 D_4 承受反向电压, 因此可以达到切断故障电流的效果。

2.3 新型拓扑的故障控制策略及作用

图 5(b) 所示, 发生直流双极短路故障时, 二极管 D_1 、 D_4 上的压降可以忽略, 因此相当于串联电阻 R_1 与子模块电容 C 进行串联分压, 可得

$$U_c = \frac{U_{dc}}{N} \times \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{1}{j\omega C} + R_1} = \frac{U_{dc}}{N(1 + j\omega CR_1)}. \quad (7)$$

可以看出, 发生直流故障时, 随着阻尼电阻的增大, 子模块电容充电电压随之减小, 故而阻尼电阻起到抑制直流电容电压的效果。

故障时控制策略如图 6 所示, 当系统发生直流故障时, 所有的 IGBT 将要闭锁, 以阻断故障电流. 对于永久性故障, 需要断开交流断路器以隔离故障并进行修复; 对于瞬时性故障, 故障电流被切断之后, 需要解锁 IGBT 以重新建立直流电压, 系统恢复正常运行状态. 由于电力电子器件的动作十分迅速, 且故障清除过程不需要交流断路器的动作, 因而系统能够快速恢复。

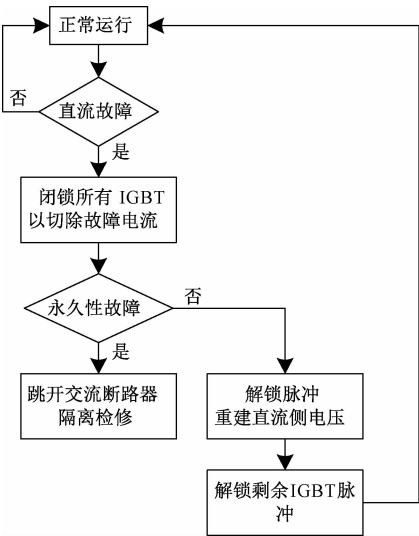


图 6 直流故障的控制策略
Fig. 6 DC-fault control strategy

采用上述控制策略, 故障清除时间能够控制在 10 ms 之内, 可以有效保护子模块中的 IGBT 和二极管. 因此, 所提的新型子模块拓扑能够显著提升柔性直流输电系统的故障阻断及恢复能力。

3 仿真验证与分析

3.1 直流故障阻断能力验证

为了验证 SM 拓扑能够抑制直流故障电流, 在 PSCAD/EMTDC 软件平台下搭建了单端 9 电

平 MMC-HVDC 模型。

模型的具体参数为: 直流电压 ± 320 kV; 传输功率 1 000 MW; 系统运行频率为 50 Hz; 变压器变比为 230/352 kV, 漏抗为 0.15 p.u.; 每个上/下桥臂由 4 个新型子模块和 4 个 HBSM 串联; 桥臂电抗为 112 mH; 子模块电容及电压为 164 μ F 和 80 kV. 系统采用定功率控制, 在直流侧设置了双极短路故障, 进行仿真分析. 设置故障发生在 $t = 1.10$ s, 故障持续时间 1 s.

子模块在 0.2 s 前预充电, 在 0.9 s 之后, 当发生双极短路故障时, 直流电流超过 3.12 kA, 此时所有的 IGBT 闭锁。

MMC-HVDC 的仿真运行逻辑为, 当 1.10 s 发生双极短路故障时, 直流电流迅速冲击到 3.12 kA, 使所有的 IGBT 闭锁, 在故障持续时间内, 若直流电流快速下降为 0, 则说明拓扑具有直流故障阻断能力。

如图 7 所示, 根据时序控制, 0.2 s 时子模块充电完毕, 充电电源断开, 直流电流从 0 开始上升, 0.6 s 到达 1.5 kA, 1.10 s 发生直流侧双极短路故障, 直流电流在 1.1007 s 达到 3.12 kA, 使所有的 IGBT 闭锁, 闭锁后直流电流迅速下降为 0, 说明该模型具有直流故障阻断能力. 图 8 为该系统的直流电压波形, 正常运行时维持在 640 kV, 发生双极短路故障后电压下降为 0. MMC 子模块中的 IGBT 两端电压波形如图 9 所示。

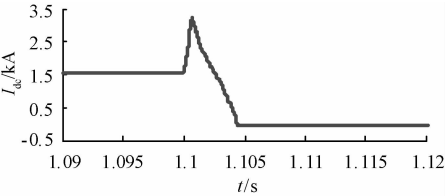


图 7 直流电流波形
Fig. 7 DC current waveform

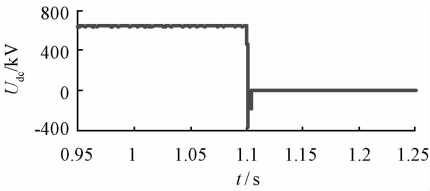


图 8 直流电压波形
Fig. 8 DC voltage waveform

3.2 子模块电容充电过程分析

首先在工频情况下, 设置 $R_1 = 0$, 得到短路故障发生时三相桥臂电流如图 10 所示. 由图 10 可以看出, 1.1007 s 时, IGBT 闭锁, 经过 $T_{f1} = 0.8$ ms, A、B 两相的上桥臂电流衰减至零. 后经过 $T_{f2} =$

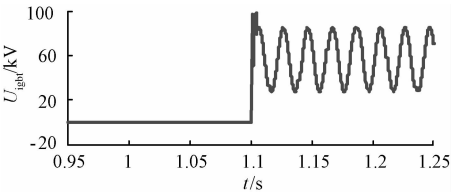


图 9 IGBT 两端的电压波形

Fig. 9 IGBT voltage waveform

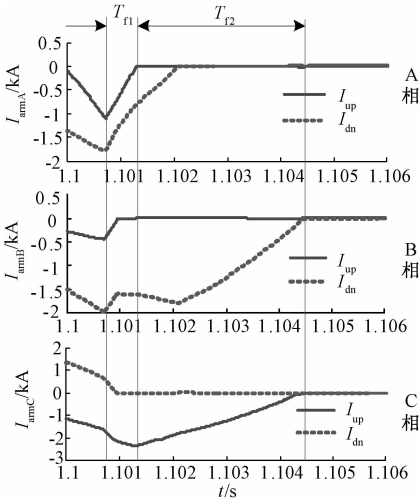


图 10 三相桥臂电流波形(0 Ω)

Fig. 10 Three-phase arm current waveform(0 Ω)

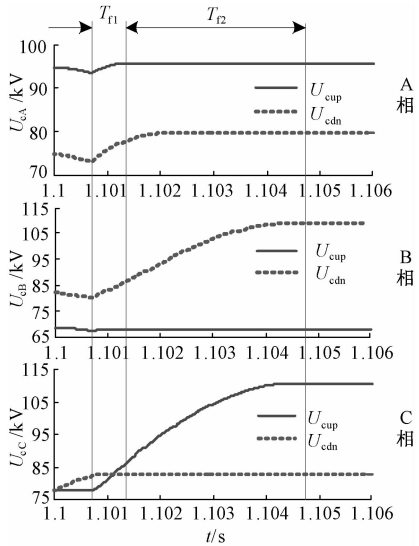


图 11 三相子模块平均电容电压波形(0 Ω)

Fig. 11 Three-phase SM average capacitance voltage waveform(0 Ω)

3.2 ms,三相所有的桥臂电流均降为零,故障电流完全被阻断.在 T_n 所对应的故障时间内,A相的上下桥臂、B相下桥臂及C相上桥臂子模块开始充电,如图11所示.当A、B相不再有短路电流通过后,A相上桥臂子模块电容充电完成.在三相短路电流均被阻断后,所有的子模块电容充电完成.可以看出,B相下桥臂和C相上桥臂的子模块电

容电压从80 kV 上升到近115 kV,上升率过高,从而会导致系统的不稳定.

3.3 阻尼电阻对充电电压的抑制仿真验证

为解决上述问题,采用具有阻尼电阻的改进新型拓扑来抑制子模块电容电压的升高.由于直流线路电感的储能,在故障时会使 U_{dc} 产生反向衰减电压,考虑故障时直流电压的反向冲击不大于额定值的2倍,因此设定 $R_1 = 150\ \Omega$,得到三相桥臂电流和子模块电容电压如图12~13所示.

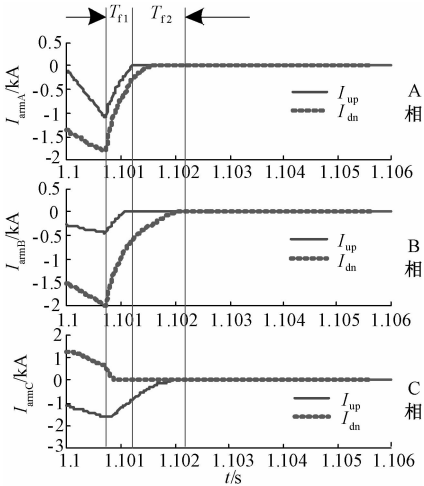


图 12 三相桥臂电流波形(150 Ω)

Fig. 12 Three-phase arm current waveform(150 Ω)

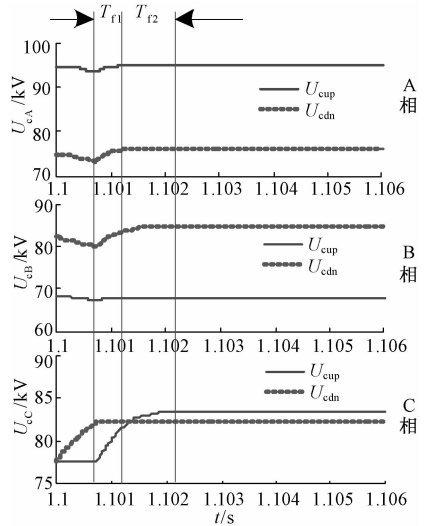


图 13 三相子模块平均电容电压波形(150 Ω)

Fig. 13 Three-phase SM average capacitance voltage waveform(150 Ω)

对比图10,12可以看出, $R_1 = 150\ \Omega$ 的改进拓扑在故障发生后,其短路电路的阻断时间由4 ms减小为1.5 ms,反应更为迅速;对比图11、13可以看出,各相子模块的电容充电电压上升的趋势得到了有效减缓,尤其B、C两相的充电电压由原先的110 kV降低为85 kV左右,得到了很好的抑制.

4 结论

针对传统 HBSM 不能解决直流故障的问题,笔者结合半桥型和全桥型 SM 的特点,提出了一种新型的子模块拓扑.该拓扑具备阻断直流故障电流能力的同时还能够抑制子模块电容过电压.相比于其他能够阻断直流故障短路电流的拓扑,新型改进拓扑结构简单,应用电力电子器件数量少,还能够有效减小短路瞬间造成的危害.

最后在单端 9 电平 MMC-HVDC 混合仿真模型中,对不同 R 值的直流侧双极短路故障下的子模块电流及电压进行对比.仿真结果表明所提出的 SM 拓扑能迅速切断故障电流,并且能够很好地抑制故障时子模块电容的充电电压.

参考文献:

[1] QIN J, 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.

[2] 刘军会. 轻型高压直流输电仿真研究与实验装置设计[D]. 郑州: 郑州大学电气工程学院, 2014.

[3] 张灵娟. 灵宝换流站交直流侧故障仿真分析[D].

郑州: 郑州大学电气工程学院, 2012.

[4] 蔡新红, 赵成勇, 庞辉, 等. 向无源网络供电的 MMC-HVDC 系统控制与保护策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 405 - 414.

[5] 仇雪娜, 赵成勇, 庞辉, 等. 基于 MMC 的多端直流输电系统直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 140 - 145.

[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.

[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 power system, 2013, 28(1): 335 - 346.

[8] 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.

[9] 汪波, 胡安, 唐勇, 等. IGBT 电压击穿特性分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 145 - 150.

[10] 刘建平, 侯凯, 李伟邦, 等. 串联 IGBT 保护模块设计和故障诊断分析[J]. 电气传动, 2015, 45(10): 76 - 80.

[11] 向往, 林卫星, 文劲宇, 等. 一种能够阻断直流故障电流的新型子模块拓扑及混合型模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5171 - 5179.

[12] 丁云芝, 苏建徽, 周建. 基于钳位双子模块的 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.

Reaseach on the Topology of MMC with DC Fault Isolating Capability

ZHANG Qingzhi¹, LI Zhihui²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinxiang University, Xinxiang 453003, China; 2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To solve the MMC-HVDC dc-fault, a new sub-module topology with DC faults blocking capability was proposed, which could be used to block the fault current by its structure characteristic. On this basis, in order to restrain the adverse effects of sub-module capacitor voltage rising during the fault time, a new sub-module topology with a damping resistor was proposed. The topology not only could block fault current, but also had sub-module capacitor voltage suppression effect. An 9 level SBMMC-HVDC simulation model was built in PSCAD/EMTDC platform, and the simulation proved the proposed new topology was correct.

Key words: flexible HVDC; dc faults; MMC; sub module topology; sub module capacitor voltage