

一种具有故障阻断能力的改进混合型半桥MMC

李国庆, 杨 勇, 辛业春, 王 拓, 董 倩

(东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要:为克服半桥模块化多电平换流器(MMC)直流侧短路后无法阻断故障电流这一缺点,提出一种具有故障阻断能力的改进混合型半桥MMC,依靠改进半桥子模块的故障阻断能力配合相应辅助电路实现故障电流转移与阻断。分析了直流双极短路故障下改进混合型半桥MMC故障阻断的动态过程,设计了关键器件的参数选择方法,并对比了该拓扑的经济性,与传统半桥MMC相比,改进混合型半桥MMC无需增加开关器件使用,仅增加晶闸管、二极管和1个机械开关,且通态损耗很低。最后,搭建双端51电平改进混合型半桥MMC直流输电模型对所提拓扑的故障阻断能力进行验证,仿真结果表明,所提改进混合型半桥MMC拓扑能够在几十ms内清除直流故障,具有良好的实用性和经济性。

关键词:MMC; 直流故障; 改进拓扑; 电流转移; 故障阻断

中图分类号:TM 46

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202010017

0 引言

基于模块化多电平换流器(MMC)的柔性直流输电(VSC-HVDC)技术凭借其模块化程度高、开关频率低以及谐波含量少的优点,成为极具竞争力的输电方案^[1-4],在直流输配电领域有着越来越广泛的应用。同时,随着大容量、远距离直流输电发展的迫切需要,运行过程中故障率更高的架空线输电方案成为未来发展的重要方向^[5-6]。然而目前工程上常用的半桥MMC具有无法阻断直流故障的固有缺陷,在应对直流故障时形成的不控整流效应成为其在架空线直流输配电方案中应用的主要障碍。因此采取有效的方法实现直流故障阻断对架空线VSC-HVDC的发展具有重要意义^[6-7]。

对于VSC-HVDC直流短路故障,最理想的故障阻断方法是加装直流断路器^[8-9]。但由于直流系统具有低阻尼特性^[10],直流故障发展快,故障电流上升迅速,故障时要求直流断路器能够在几ms内开断故障电流,避免故障阻断期间换流器因过电流损坏。然而目前能够满足大容量快速开断的直流断路器研制困难,且造价十分昂贵,限制了其大规模应用^[11]。在已建工程中,故障后通过换流器闭锁与交流断路器动作配合进行故障清除。但由于机械开关响应速度慢,动作至少需要2~3个工频周期,故障阻断期间二极管损坏的可能性极高。

同时,针对直流故障阻断,国内外相关学者和研

究机构提出了大量新型具有直流阻断能力的子模块及换流器拓扑。在新型子模块方面,文献[12]提出一种不对称型全桥子模块,依靠二极管续流使半桥子模块(HBSM)电容反向来抑制故障电流;文献[13]提出一种HBSM与类HBSM通过二极管箝位的混合拓扑,降低了对IGBT触发一致性的需求,但所需类子模块混合比例过高;文献[14]利用双向可控开关对HBSM的拓扑进行了改造,并针对构成的混合双子模块电容电压不均衡问题提出了应对策略;文献[15]提出了一种基于三电容箝位型双子模块的混联型桥臂换流站拓扑,实现故障阻断的同时优化了换流站的建设成本;文献[16-17]对各类新型子模块的阻断原理、阻断性能及经济性进行了分析比较后得出,全桥子模块阻断能力最强,控制技术最为成熟简单,但其所采用器件数量是HBSM的2倍。相比之下箝位型双子模块(CDSM)与串联双子模块降低了单位电平所需要的器件数量,但控制和均压问题更加复杂。整体而言,新型子模块拓扑故障阻断的根本原理是通过闭锁将电容电压反极性接入故障电流通路,利用故障电流向电容充电从而实现故障阻断,但其实现过程均需增加开关器件的使用,造成器件投资成本、运行损耗及控制复杂度大幅增加^[12-18]。在新型换流器拓扑方面,文献[19]提出一种具备直流故障清除能力的电流转移型MMC,借助断流开关和辅助支路转移并阻断故障电流;文献[20]提出一种集成直流断路器功能的MMC,避免使用成本高且占地大的电力电子开关转移支路来分断故障电流。改进换流器拓扑充分利用了电力电子开关器件动作速度快的特点实现直流故障电流阻断和系统快速恢复,提高了VSC-HVDC系统处理直流故障的能力,但其在设计过程中增加了IGBT器件的使用,造成了系统建造成本的增加且提高了控制系统

收稿日期:2019-12-12;修回日期:2020-08-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0902400);国家自然科学基金资助项目(51677023)

Project supported by the National Key Research and Development Project of China(2017YFB0902400) and the National Natural Science Foundation of China(51677023)

的复杂性。因此,低损耗、附加造价低、控制方式简单且具有直流故障阻断能力的换流器拓扑具有良好的发展前景^[6,18]。

针对 VSC-HVDC 直流短路故障,本文在半桥 MMC 基础上提出一种基于 HBSM 与改进型 HBSM (M-HBSM)的改进混合型半桥 MMC(MH-HB-MMC),借助桥臂转移支路和直流能量耗散支路,配合相应的协调控制策略,实现故障电流阻断。建立了 MH-HB-MMC 拓扑结构,设计了辅助电路动作时序及参数选择方法,分析了 MH-HB-MMC 故障阻断动态过程,求取了 M-HBSM 与 HBSM 的混合比例,并对拓扑经济性进行了分析,最后搭建双端直流输电模型对 MH-HB-MMC 故障阻断性能进行验证。

1 MH-HB-MMC 工作原理及拓扑结构

1.1 M-HBSM 工作原理

附录图 A1 为 HBSM 和 M-HBSM 的拓扑结构。如图 A1(a)所示,典型 HBSM 由 2 个 IGBT(V_{T1} 、 V_{T2})、2 个二极管(V_{D1} 、 V_{D2})和 1 个直流电容器(C)构成。正常工作状态下,通过 V_{T1} 和 V_{T2} 的开通/关断使子模块投入/切除,此时 HBSM 输出 0 和 U_c 这 2 种状态电平,其中 U_c 为子模块电容电压。当基于 HBSM 的 MMC 直流侧发生极间短路故障时,与 V_{T2} 反并联的 V_{D2} 在换流器闭锁后为交流系统向故障点提供电流通路,无法实现故障隔离。

为克服上述缺点,本文提出在半桥 MMC 的拓扑结构中加入图 A1(b)所示的 M-HBSM。M-HBSM 将 HBSM 中的 V_{T2} 、 V_{D2} 替换为 4 个二极管(V_{D21} — V_{D24})和 1 个 IGBT(V_{T21})组成的 H 桥型拓扑结构,使 M-HBSM 具有直流故障阻断能力。M-HBSM 的工作状态见附录表 A1。正常运行时 M-HBSM 工作原理与 HBSM 完全相同,因此所提出的 MH-HB-MMC 拓扑结构不增加控制和均压程序的复杂度。当直流侧发生短路故障时,关断 M-HBSM 中的 V_{T21} 即可阻断故障电流。

1.2 MH-HB-MMC 拓扑结构

图 1 为 MH-HB-MMC 拓扑结构,图中, u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 为三相交流系统电压; R_s 为桥臂转移支路耗能电阻; L_s 为 MMC 出口处限流电抗器电感值; L_{ac} 、 R_{ac} 分别为交流系统等效电感、电阻; L_0 为桥臂电感; n 为单个桥臂子模块总数。MH-HB-MMC 与传统半桥 MMC 相比将单个桥臂中 m 个 HBSM 替换为 M-HBSM,增加了快速机械开关 K、桥臂转移支路和直流能量耗散支路。桥臂转移支路由旁路开关 T_p 、接地开关 T_d 和 2 个电阻值相同的 R_s 组成, T_p 和 T_d 由若干个开关单元串联而成,每个开关单元由 2 个晶闸管反向并联构成以满足交流电流双向流通。故障后通过 M-HBSM 将桥臂电感电流换流至转移支路,利用晶闸管具有较高的过电流能力保护桥臂中电力电子器件不受损

坏;直流能量耗散支路由续流二极管 V_D 和吸收电阻 R_x 构成,稳态运行时 V_D 承受反向电压不形成导通回路,故障清除期间, L_s 和直流线路上储存的能量通过 R_x 耗散。

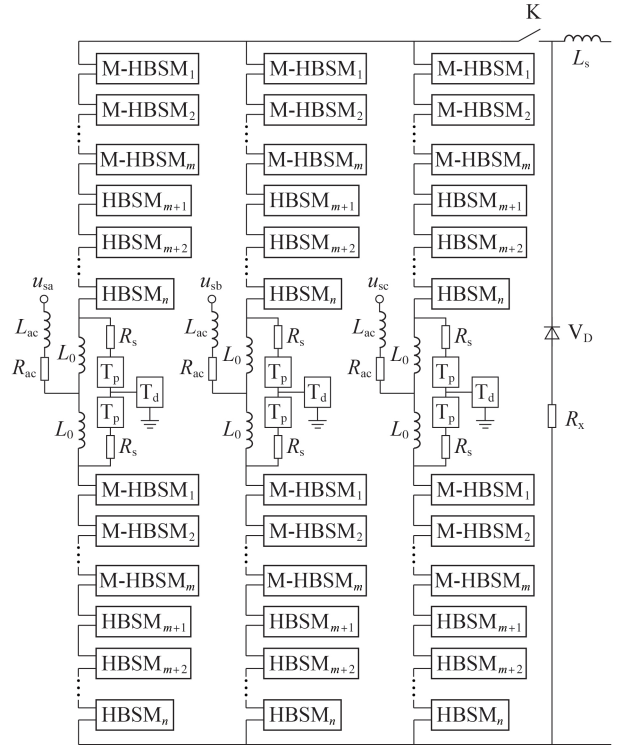


图 1 MH-HB-MMC 拓扑结构

Fig.1 Topology structure of MH-HB-MMC

1.3 MH-HB-MMC 工作方式

MH-HB-MMC 稳态运行时快速机械开关 K 处于闭合状态, T_p 、 T_d 处于关断状态,直流能量耗散支路处于反向阻断状态,其稳态运行方式与传统半桥 MMC 相同。直流侧发生极间短路故障后,系统的故障阻断时序图见图 2。

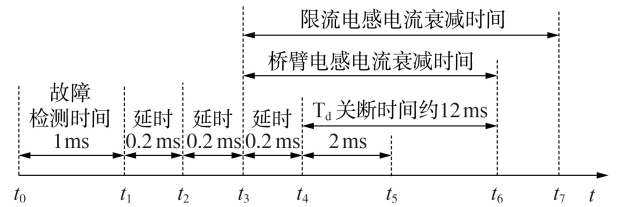


图 2 故障阻断时序图

Fig.2 Sequence diagram of fault blocking

MH-HB-MMC 故障阻断过程如下。

(1) t_0 时刻直流侧发生极间短路故障,由于故障回路阻尼很小,直流电流迅速增加。

(2) t_1 时刻系统检测到故障发生,立即切除桥臂中所有子模块,子模块停止放电,交流电流通过三相桥臂构成交流回路, L_s 中电流通过三相桥臂电感与直流能量耗散支路形成的并联支路构成直流回路,交、直流回路流通示意图如附录图 A2 所示。经过

0.2 ms延时,保证桥臂中的所有子模块全部切除,在 t_2 时刻触发 T_p 、 T_d ,为M-HBSM阻断直流电流做准备。

(3)在 t_3 时刻将换流器闭锁,由于M-HBSM在闭锁情况下具有电流的双向阻断能力,限流电感电流不再流过三相桥臂支路全部转移至直流能量耗散支路;桥臂电感电流通过桥臂转移支路构成回路并衰减为0,电流衰减回路如附录图A3所示。同时,交流电流流至桥臂转移支路中,经 L_0 和 R_s 流入大地。

(4)经过0.2 ms延时保证直流电流被阻断后,在 t_4 时刻拉开K同时将 T_d 的触发脉冲撤除,2 ms后在 t_5 时刻K断开,约12 ms左右 T_d 在电流过零点 t_6 时刻自动关断,交流系统三相短路状态结束,在 t_7 时刻, L_s 中电感电流衰减至0,故障能量耗散结束。

2 子模块混合比例及关键参数计算

2.1 M-HBSM故障开断电压计算

附录图A4为MH-HB-MMC直流阻断过程原理图。由图可知,由于换流器闭锁前桥臂中子模块已全部切除,M-HBSM阻断电流所承受电压 U_T 为:

$$U_T = U_{R_s} + U_{R_x} \quad (1)$$

$$U_{R_s} = i_{dc} R_x \quad (2)$$

$$U_{R_s} = (i_{bu, \max} + i_{bn, \max}) R_s \quad (3)$$

$$i_{bu, \max} + i_{bn, \max} = \sqrt{3} I_m + 2I_{0, \max} / 3 \quad (4)$$

$$U_{T, \max} = (\sqrt{3} I_m + 2I_{0, \max} / 3) R_s + I_{0, \max} R_x \quad (5)$$

其中, U_{R_x} 为直流能量耗散支路中 R_x 两端电压; U_{R_s} 为转移支路中 R_s 两端电压; $i_{bu, \max}$ 、 $i_{bn, \max}$ 分别为故障阻断瞬间上、下桥臂电流最大值; i_{dc} 为直流线路电流; $U_{T, \max}$ 为故障阻断期间M-HBSM承受电压最大值; I_m 为换流器稳态运行时交流相电流的幅值; $I_{0, \max}$ 为故障阻断期间直流电流的最大值。设M-HBSM中二极管额定电压为 U_e ,由 $U_{T, \max}$ 可得MH-HB-MMC所需的M-HBSM个数 $6m$ 为:

$$6m = 3 U_{T, \max} / U_e \quad (6)$$

2.2 桥臂转移支路电阻参数选择

图3为桥臂电感电流和交流电流叠加后的电流回路。设交流系统电压为 $u_s = \sqrt{2} U_s \sin(\omega t)$,其中

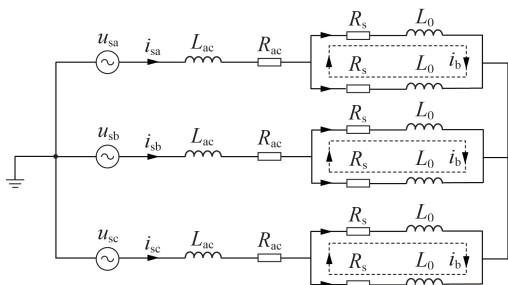


图3 直流故障阻断后电流回路

Fig.3 Current circuit after DC fault blocking

ω 、 U_s 分别为交流系统角频率、电压幅值,则故障阻断后交流电流稳态幅值 I_M 为:

$$I_M = \sqrt{2} U_s / \sqrt{(\omega L_{ac} + \omega L_0 / 2)^2 + (R_{ac} + R_s / 2)^2} \quad (7)$$

设故障阻断时刻桥臂电感中初始电流值为 I_{b0} ,则故障阻断后桥臂电感电流 i_b 为:

$$i_b = I_{b0} e^{-t/\tau_1} \quad (8)$$

其中, $\tau_1 = L_0 / R_s$ 为 $R_s L_0$ 振荡电路的时间常数。由式(7)和式(8)可知,桥臂转移支路中 R_s 除可加速桥臂电感电流衰减速度外还具有限制交流电流大小的作用。 R_s 取值越大,桥臂电感电流衰减速度越快,交流系统承受的过流也越小。对于 $R_s L_0$ 振荡电路,零输入响应下,一般经 $(3 \sim 5) \tau_1$,电流衰减至0。设 t_s 为故障阻断后桥臂电感电流最大允许持续时间,若故障阻断到桥臂电感电流衰减为0的时间小于 t_s ,则 R_s 满足:

$$R_s \geq 5 L_0 / t_s \quad (9)$$

随着 R_s 增大,桥臂电感电流的衰减时间减小,但M-HBSM阻断故障电流时承受的电压增加。因此在进行系统设计时需综合考虑。

2.3 直流能量耗散支路电阻参数选择

换流器闭锁后限流电感及线路电感电流通过二极管 V_D 和 R_x 构成回路,如图4所示。图中, L_1 为故障点至MMC出口线路等值电感。由图可知,限流电感电流的衰减过程与桥臂电感电流的衰减过程一致。设 t_k 为故障阻断后限流电感电流最大允许持续时间,若故障阻断到限流电感电流衰减为0的时间小于 t_k ,则 R_x 需满足:

$$R_x \geq 5 (L_s + L_1) / t_k \quad (10)$$

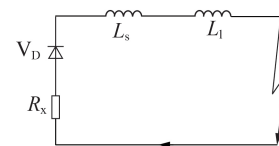


图4 故障阻断后直流能量耗散回路

Fig.4 DC energy dissipation circuit after fault blocking

3 MH-HB-MMC拓扑经济性分析

本文所提MH-HB-MMC拓扑与半桥MMC相比将少量HBSM替换为M-HBSM,增加了快速机械开关、桥臂转移支路和直流能量耗散支路。本节以直流工作电压为320 kV的单端MMC器件的投资成本为研究对象,参照同样电压等级的半桥MMC与基于CDSM的CDSM-MMC,对MH-HB-MMC经济性进行分析。

目前,额定电压为5 kV的IGBT在工程上已投入使用,假定MMC采用额定电压为5 kV的IGBT,子模块电容电压为2.5 kV,则每相桥臂共需256个子模块,每个子模块包含2个IGBT,故采用半桥MMC结

构时三相共需 1 536 个 IGBT。与采用半桥 MMC 相比, MH-HB-MMC 不增加 IGBT 的使用数量, 只少量增加二极管。设 M-HBSM 进行故障阻断时承受的电压不超过额定电压的 20%, 即 64 kV, M-HBSM 中的二极管额定电压与 IGBT 额定电压相同, 则单相上、下桥臂中各需 7 个 M-HBSM, 换流器三相桥臂共需 42 个, 则相较于半桥 MMC, MH-HB-MMC 需增加 126 个二极管。若采用 CDSM, 每相桥臂共需 128 个子模块, 每个子模块包含 5 个 IGBT、7 个二极管, 则单端 CDSM-MMC 需 1 920 个 IGBT, 2 688 个二极管。

相较于半桥 MMC, MH-HB-MMC 增加了部分辅助电路。其中, 桥臂转移支路中 T_p 、 T_d 均由反并联晶闸管构成, 工程设计过程需考虑晶闸管间电压均衡问题。考虑 2 倍安全裕度, 选取额定电压为 5 kV 的晶闸管, 其稳态下可承受电压为 2.5 kV。由于换流器出口加设限流电感, 故障后电流上升率较小, T_p 两端电压不会很高, 设换流器闭锁阻断桥臂电流时 T_p 两端电压最大值为 30 kV, 则需 12 个 T_p 。根据图 1, T_p 在接地支路两侧对称布置, 每侧 T_p 与 T_d 共同承受交流系统相电压峰值, 对于 320 kV 直流系统, 约为 160 kV, 每相需 T_d 的个数为 58, 则共需增加 420 个晶闸管。对于能量吸收支路, 稳态工作下二极管承受的电压为系统额定直流电压, 选取额定电压为 5 kV 的二极管, 共需增加二极管 64 个。

表 1 为 MH-HB-MMC 与半桥 MMC 及具有故障阻断能力的 CDSM-MMC 所用器件用量情况对比。可见, 与半桥 MMC 相比, MH-HB-MMC 无需增加 IGBT 用量, 通过增加 420 个晶闸管、190 个二极管、1 个快速机械开关和 7 个电阻, 即可保证换流器具有故障阻断能力; 若采用 CDSM-MMC, 其与典型半桥 MMC 相比增加了 384 个 IGBT 和 1 152 个二极管。另外由表可知, MH-HB-MMC 所增加晶闸管数量少, 在制造工艺方面更加简单, 成本相对较低, 且通过采用更高电压等级的晶闸管可以减小设备的占地面积。总体而言, 所提 MH-HB-HBSM 具有良好的经济性。

表 1 半桥 MMC、CDSM-MMC 及 MH-HB-MMC 所需器件对比

Table 1 Number comparison of required devices of half bridge MMC, CDSM-MMC and MH-HB-MMC

类型	所需器件数				
	IGBT	晶闸管	二极管	快速机械开关	电阻
半桥 MMC	1536	0	1536	0	0
CDSM-MMC	1920	0	2688	0	0
MH-HB-MMC	1536	420	1726	1	7

4 仿真分析

51 电平双端 MH-HB-MMC-HVDC 系统模型见附录图 A5, 系统参数见附录表 A2。设桥臂电感电

流及直流能量耗散支路电流衰减至 0 的时间均小于 60 ms, 根据式 (9) 和式 (10) 分别取 R_s 、 R_x 为 10Ω 。 $t_0 = 3$ s 时 MH-HB-MMC₁ 出口发生极间金属性短路故障, 以 MH-HB-MMC₁ 为例对所提改进混合拓扑直流故障阻断过程进行分析。

故障阻断过程采用图 2 所示动作时序, MH-HB-MMC₁ 中直流电流 i_{dc} 和上、下桥臂子模块电流 i_{bu} 、 i_{bn} 波形见图 5。由图 5 可知, 极间短路故障发生后, 直流电流迅速上升, 故障后 1 ms 在 t_1 时刻系统检测到系统发生故障, 立即切除桥臂中所有子模块, 电容停止放电, 故障电流不再增加。经过短暂延时, t_2 时刻触发 T_p 和 T_d , 为 M-HBSM 阻断直流电流作准备。 t_3 时刻换流器闭锁阻断故障电流, 直流电流及子模块电流均降为 0, 实现故障阻断, 故障发生至故障电流阻断仅需 1.4 ms。

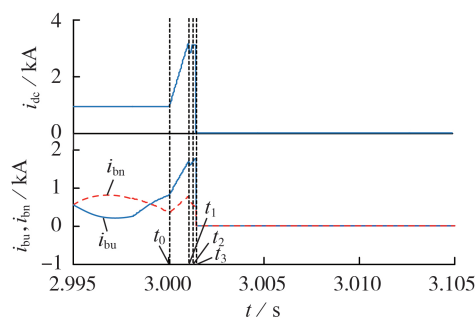


图 5 MH-HB-MMC₁ 中 i_{dc} 、 i_{bu} 、 i_{bn} 仿真波形

Fig.5 Simulative waveforms of i_{dc} , i_{bu} and i_{bn} in MH-HB-MMC₁

MH-HB-MMC₁ 中 a 相上、下桥臂电感电流 (i_{abu} 、 i_{abn})、a 相上、下桥臂转移支路电流 (i_{asu} 、 i_{asn})、a 相接地支路电流 i_{ad} 、M-HBSM 承受电压 U_T 、交流电流 (i_a 、 i_b 、 i_c) 波形见附录图 A6。 t_1 时刻将桥臂中子模块全部切除后, 由于 MH-HB-MMC₁ 交流出口电压下降造成交流电流增加, i_{abu} 和 i_{abn} 开始上升; t_2 时刻 T_p 、 T_d 导通后, i_{abu} 和 i_{abn} 开始向转移支路转移; t_3 时刻换流器闭锁, M-HBSM 将桥臂电感电流换流至转移支路, 直流故障电流被阻断, 交流电流经接地支路构成回路; 故障阻断期间 M-HBSM 两端承受电压峰值为 38 kV; t_3 时刻后流经子模块的电流及线路直流电流降为 0; t_4 时刻撤除 T_d 触发脉冲, 经过约 12 ms 后, 在 t_6 时刻 T_d 在交流电流过零点自然关断, i_{abu} 和 i_{abn} 、 i_{asu} 和 i_{asn} 、 i_{ad} 及 i_a 、 i_b 、 i_c 被阻断; 接地支路关断后, M-HBSM 与 HBSM 共同承受交流系统线电压, 由于桥臂中子模块数量较多, 每个 M-HBSM 所承受电压很小。

图 6 为直流能量耗散支路电流 i_x 及耗散电阻两端电压 v_x 波形。当桥臂转移支路、接地支路电流降低为 0 时, 限流电感和线路中电感的续流能量尚未完全耗散, 故障发生后约 60 ms 时, 在 t_7 时刻 i_x 降为 0, 直流故障被完全清除。

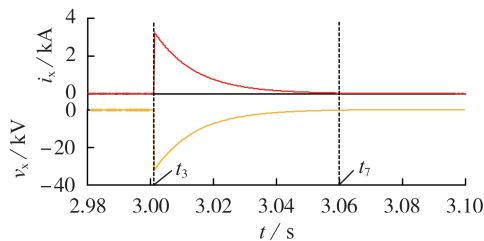


图6 MH-HB-MMC₁中 i_x 、 v_x 仿真波形

Fig.6 Simulative waveforms of i_x 、 v_x in MH-HB-MMC₁

5 结论

本文利用M-HBSM的电流阻断能力配合相应的辅助电路,提出一种具有故障阻断能力的MH-HB-MMC拓扑,通过在传统半桥MMC桥臂中加入部分M-HBSM将故障后桥臂电流换流至转移支路,实现故障电流转移与阻断,解决了半桥MMC直流短路后故障难以清除的缺陷。基于MATLAB/Simulink平台进行仿真验证,仿真结果表明,MH-HB-MMC能够在故障发生几ms内迅速阻断直流电流,并在几十ms内完成故障能量的耗散,保证了桥臂中子模块的安全,提高了传统半桥MMC的故障处理能力。在经济性方面,MH-HB-MMC拓扑不增加IGBT器件的使用,所需附加器件的成本较低,且具有通态损耗小的优势,具有良好的经济性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 赵成勇,胡静,翟晓萌,等. 模块化多电平换流器桥臂电抗器参数设计方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(15):89-94.
ZHAO Chengyong, HU Jing, ZHAI Xiaomeng, et al. A parameter design method of bridge arm reactor in modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15):89-94.
- [2] 薛英林,徐政. 适用于架空线路输电的新型双极MMC-HVDC拓扑[J]. 高电压技术,2013,39(2):481-487.
XUE Yinglin, XU Zheng. New breed of bipolar MMC-HVDC topology for overhead line transmission[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2):481-487.
- [3] 刘钟淇,宋强,刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):53-58.
LIU Zhongqi, SONG Qiang, LIU Wenhua. VSC-HVDC system based on modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2):53-58.
- [4] 张建坡,田新成,尹秀艳. 模块化多电平换流器直流输电控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):103-108.
ZHANG Jianpo, TIAN Xincheng, YIN Xiuyan. Control strategy of MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11):103-108.
- [5] 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.
- [6] 刘剑,邵能灵,范春菊,等. 柔性直流输电线路故障处理与保护技术评述[J]. 电力系统自动化,2015,39(20):158-167.
LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Comments on fault handling and protection technology for VSC-HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20):158-167.
- [7] XUE Y L, XU Z. On the bipolar MMC-HVDC topology suitable for bulk power overhead line transmission configuration, control, and DC fault analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(6):2420-2429.
- [8] 李帅,赵成勇,许建中,等. 一种新型限流式高压直流断路器拓扑[J]. 电工技术学报,2017,32(17):102-110.
LI Shuai, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong, et al. A new topology for current-limiting HVDC circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(17):102-110.
- [9] 张猛,赵杨,王国金,等. 535 kV耦合负压式直流断路器短路电流开断试验研究[J]. 高电压技术,2019,45(8):2451-2458.
ZHANG Meng, ZHAO Yang, WANG Guojin, et al. Research on short-circuit current breaking test of 535 kV DC circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(8):2451-2458.
- [10] 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.
- [11] 周猛,向往,林卫星,等. 柔性直流电网直流线路故障主动限流控制[J]. 电网技术,2018,42(7):2062-2072.
ZHOU Meng, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Active current-limiting control to handle overhead line fault in DC grid[J]. Power System Technology, 2018, 42(7):2062-2072.
- [12] 李国庆,宋祯子,王国友. 具有直流故障阻断能力的MMC不对称全桥子模块拓扑[J]. 高电压技术,2019,45(1):12-20.
LI Guoqing, SONG Zhenzi, WANG Guoyou. Asymmetric full bridge sub-module topology of MMC with DC fault blocking capability[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1):12-20.
- [13] 许义佳,罗映红,史彤彤,等. 具有直流故障清除能力的新型MMC子模块及其混合拓扑[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(7):129-137.
XU Yijia, LUO Yinghong, SHI Tongtong, et al. A new MMC sub-module with DC fault self-clearing ability and its hybrid topology[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7):129-137.
- [14] 张建坡,蒋畅,田新成. 模块化多电平换流器子模块拓扑设计及其控制[J]. 电力自动化设备,2019,39(7):78-83.
ZHANG Jianpo, JIANG Chang, TIAN Xincheng. Design of sub module topologies and their control for modular multilevel converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(7):78-83.
- [15] 庞玉彬,朱大宾,霍群海,等. 具有故障隔离能力的新型MMC子模块及混联桥臂拓扑[J]. 电力系统自动化,2018,42(18):131-142,191.
PANG Yubin, ZHU Dabin, HUO Qunhai, et al. A new type of MMC sub-module and hybrid arm topology with capability of fault isolation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(18):131-142, 191.
- [16] 李斌,李晔,何佳伟. 具有直流故障清除能力的MMC子模块关键性能研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(8):2114-2122.
LI Bin, LI Ye, HE Jiawei. Research on key properties of MMC sub-modules with DC fault eliminating capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8):2114-2122.
- [17] 孙棚,朱晋,刘文龙. 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. Fault-isolated sub-module

- topology of MMC-HVDC converter station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 120-125.
- [18] 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.
- [19] 王振浩, 刘婕, 肖壮, 等. 具备直流故障清除能力的电流转移型模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5795-5803.
- WANG Zhenhao, LIU Jie, XIAO Zhuang, et al. A current-transferring MMC topology with DC fault clearance capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5795-5803.
- [20] 宋强, 杨文博, 李笑倩, 等. 集成直流断路器功能的模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 6004-6013.

SONG Qiang, YANG Wenbo, LI Xiaoqian, et al. An MMC topology integrated with DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 6004-6013.

作者简介:



李国庆

李国庆(1963—),男,吉林长春人,教授,博士,主要研究方向为电力系统安全性分析与控制、电力系统继电保护和柔性直流输电技术;

杨勇(1995—),男,河南漯河人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为柔性直流输电技术(E-mail: 244034671@qq.com);

辛业春(1982—),男,河南信阳人,副教授,博士,主要研究方向为柔性直流输电技术、输变电设备运行状态在线检测与诊断技术。

(编辑 王欣竹)

Modified hybrid half bridge MMC with fault blocking capability

LI Guoqing, YANG Yong, XIN Yechun, WANG Tuo, DONG Qian

(School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China)

Abstract: In order to overcome the shortcoming of traditional half bridge MMC (Modular Multi-level Converter) that cannot block fault current after DC side short circuit, a MH-HB-MMC (Modified Hybrid Half Bridge MMC) with fault blocking capability is proposed, which relies on the fault blocking capability of the M-HBSM (Modified Half Bridge Sub Module) and the corresponding auxiliary circuit to realize fault current transfer and blocking. The dynamic process of MH-HB-MMC fault blocking under the condition of DC bipolar short circuit is analyzed, the parameter selection method of key device is designed, and the economy of the topology is compared. Compared with the traditional half bridge MMC, MH-HB-MMC does not need to add switching devices, but only adds some thyristors, diodes and a mechanical switch, and the on-state loss is very low. Finally, the bipolar 51-level MB-HB-MMC DC transmission model is built to verify the fault blocking ability of the proposed topology. The simulative results show that the proposed MB-HB-MMC topology can clear DC fault within tens of ms, which has good practicability and economy.

Key words: MMC; DC fault; modified topology; current transfer; fault blocking

(上接第165页 continued from page 165)

Accuracy verification of transient instability criterion based on concavity and convexity of phase trajectory

FAN Xinkai, YANG Songhao, ZHAO Yiming, ZHANG Baohui

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Previous studies have proved that the transient instability criterion based on concavity and convexity of phase trajectory is strictly established in a second-order single-machine infinite-bus system, but it is difficult to prove the correctness when extends this criterion to a multi-machine non-autonomous time-varying system. Therefore, numerous transient examples are used to verify the accuracy and applicability of the concave-convex criterion in multi-machine system. The process of transient instability identification based on concavity and convexity of phase trajectory is presented and described, which enhances the previous real-time clustering method and adds two auxiliary criterions. Then a total of 64566 examples are scanned respectively at different power flow modes, fault locations and durations under IEEE 39-bus system and IEEE 145-bus system. The results indicate that the accuracy of concavity and convexity of phase trajectory is higher than 99.9%, so the emergency control can be started reliably, accurately and quickly.

Key words: phase trajectory; concavity and convexity; transient instability identification; fault scanning; emergency control

附录

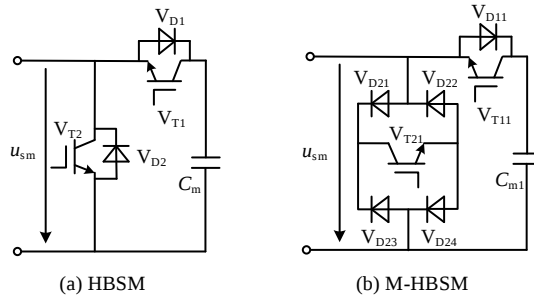


图 A1 子模块拓扑结构

Fig.A1 Topology structure of MMC sub-module

表 A1 M-HBSM 工作状态

Table A1 Working states of M-HBSM

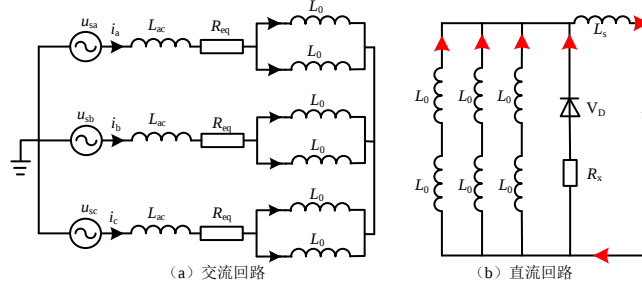
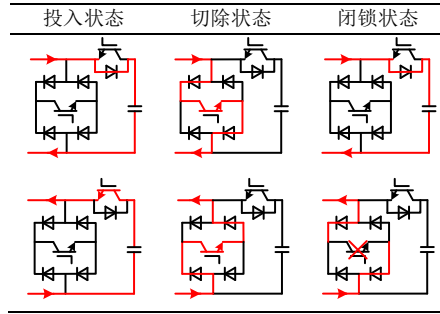


图 A2 子模块切除后交、直流回路

Fig.A2 AC and DC circuit after bypassing sub-module

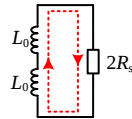


图 A3 三相桥臂电感电流衰减回路

Fig.A3 Attenuation circuit of three phase current of bridge arm inductance

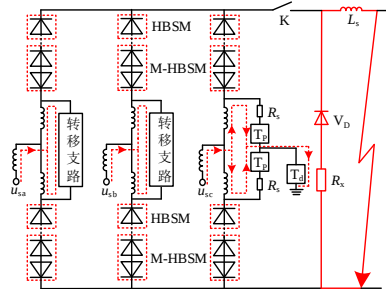


图 A4 MH-HB-MMC 直流阻断过程原理图

Fig.A4 Principle diagram of DC blocking process of MH-HB-MMC

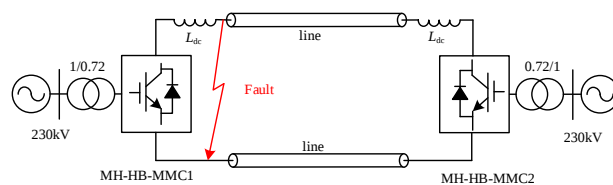


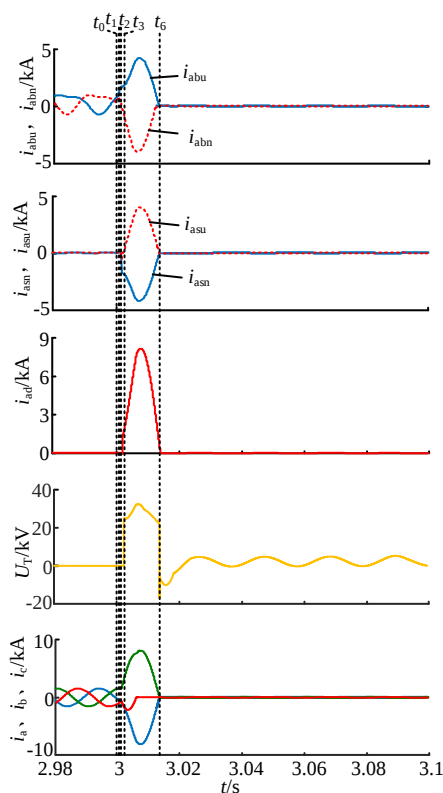
图 A5 双端 MH-HB-MMC-HVDC 仿真系统

Fig.A5 Simulative system of two-terminal MH-HB-MMC-HVDC

表 A2 51 电平 MH-HB-MMC-HVDC 系统主要参数

Table A2 Main parameters of 51 level MH-HB-MMC-HVDC system

参数	数值	参数	数值
交流电压 RMS/kV	166	桥臂子模块电容/ μF	6 000
额定频率/Hz	50	桥臂电感/mH	24
额定直流电压/kV	320	限流电抗器/mH	130
额定有功功率/MW	500	直流线路电阻/ Ω	0.05
桥臂子模块数量	50	直流线路电感/mH	100



图A6 MH-HB-MMC₁中 i_{abu} 、 i_{abn} 、 i_{asu} 、 i_{asn} 、 i_{ad} 、 U_T 、 i_a 、 i_b 、 i_c 仿真波形

Fig.A6 Simulative waveforms of i_{abu} 、 i_{abn} 、 i_{asu} 、 i_{asn} 、 i_{ad} 、 U_T 、 i_a 、 i_b 、 i_c in MH-HB-MMC₁