

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181298

具有直流故障阻断能力的逆阻型混合子模块拓扑

方辉¹, 宋勇辉², 周敬森¹, 罗永捷², 赵科¹, 朱晟毅¹, 蒋望¹

(1. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401120; 2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 柔性直流输电系统发生直流侧双极短路故障是目前存在较为严重的问题。为了实现故障清除, 在半桥型模块化多电平换流器(Half-bridge modular multilevel converter, HBSM-MMC)的基础上, 基于逆阻型绝缘栅双晶体管(Reverse-blocking insulated gate double transistor, RB-IGBT)设计了具有故障阻断能力的逆阻型混合子模块拓扑结构(Reverse-blocking hybrid submodule, RBHSM)。然后在此基础上, 分析了RBHSM的故障电流阻断机理, 推导了故障电流解析表达式。在故障闭锁阶段, 子模块中所有电容均串入回路, 始终提供 $2U_C$ 的反电动势实现故障电流阻断。最后, 以该子模块拓扑为例, 在PSCAD/EMTDC软件中搭建RBHSM-MMC仿真模型, 验证了所提子模块拓扑的正确性。仿真结果表明, 所提出的新型子模块拓扑结构能够迅速实现故障电流的阻断, 且在故障阻断过程中始终提供 $2U_C$ 的反电动势。

关键词: 直流侧双极短路; RB-IGBT; 直流故障阻断; $2U_C$ 反电动势

An improved RB-hybrid SM with DC fault blocking capability

FANG Hui¹, SONG Yonghui², ZHOU Jingsen¹, LUO Yongjie², ZHAO Ke¹, ZHU Chengyi¹, JIANG Wang¹

(1. State Grid Chongqing Electric Power Company Research Institute, Chongqing 401120, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The occurrence of DC-side bipolar short-circuit faults in flexible DC transmission systems is currently a serious problem. In order to achieve fault clearing, based on the half-bridge modular multilevel converter (half-bridge modular multilevel converter, HBSM-MMC) and the reverse blocking type insulated gate double transistor (reverse-blocking insulated gate double transistor, RB-IGBT), an improved reverse-blocking hybrid sub-module topology with fault blocking capability is designed (reverse-blocking hybrid submodule, RBHSM), referred to as RBHSM. Then, on this basis, the fault current blocking mechanism of RBHSM is analyzed, and the analytical expression of fault current is derived. In the fault blocking phase, all capacitors in the sub-module are connected into the loop, and $2U_C$ back electromotive force (EMF) is always provided to achieve fault current blocking. Finally, taking the sub-module topology as an example, an RBHSM-MMC simulation model is built in PSCAD/EMTDC software to verify the correctness of the proposed sub-module topology. The simulation results show that the novel sub-module topology proposed in this paper can quickly block the fault current and provide $2U_C$ back EMF in the fault blocking process.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 5170070473) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 106112017CDJXY150101).

Key words: DC side double pole short circuit; RB-IGBT; DC fault blocking; $2U_C$ back electromotive force

0 引言

模块化多电平换流器自2002年被Marquardt R.

等人提出后得到了飞速发展。不同于传统两电平VSC, MMC具有开关频率低、损耗小、波形质量好等优点广泛应用于实际柔性直流输电工程中^[1-4]。在系统发生直流侧双极短路故障时, 由于二极管的续流效应从而导致基于传统HBSM的MMC无法阻断故障电流, 对系统造成较大危害^[5-6]。因此, 实现MMC直流故障阻断, 提出具有故障阻断能力的子

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(5170070473); 中央高校基本科研业务费资助(106112017CDJXY150101); 国网重庆电力公司科学技术项目资助(2018 渝电科技 11 #)

模块拓扑结构, 是国内外研究的热门领域, 并相应提出了多种子模块拓扑结构。全桥子模块拓扑结构块(FBSM)虽然能够实现故障电流阻断能力, 但是其输出单位电平所需要的开关器件过多, 导致损耗严重^[7-9]。为解决开关器件数量过多这一问题, 文献[10]提出了一种可以降低开关器件数量的钳位双子模块拓扑结构(Clamped dual submodule, CDSM)并对其故障阻断原理进行了详细分析。文献[11]针对CDSM, 分析了包含交流侧故障的多种故障情况下的故障电流特性, 但是对于如何阻断交流故障电流以及系统保护方法并未提及。文献[12]提出了一种可以有效阻断故障电流的子模块拓扑结构, 该结构可以将子模块数量降为 CDSM 拓扑结构子模块数量的一半, 但其单位输出电平所需的器件数量高, 且正常工作情况下存在始终导通的两个开关器件, 损耗严重。文献[13-15]通过对 CDSM 拓扑结构故障阻断原理进行分析, 尽管 CDSM 能够明显阻断故障电流, 但由于其在故障阻断过程中存在两种不同电容连接方式, 导致电流方向不同时故障阻断能力不同。文献[16]对多端直流输电系统中故障情况下换流阀的电气应力作了深入研究, 为故障阻断拓扑的改进提供了理论依据。文献[17]在文献[16]的基础上针对基于 MMC 的直流电网短路问题, 给出了具备故障自清除能力的换流器直流故障电流计算方法, 并针对不同电网拓扑相应提出了系统检测及故障保护方法, 但针对故障阻断拓扑的改进并未有明确的创新。

针对上述拓扑故障阻断能力不同等问题, 在 CDSM 拓扑结构的基础上, 本文基于 RB-IGBT^[18-19]提出了一种具有故障阻断能力的逆阻型混合子模块(RB-Hybrid-SM), 简称为 RBHSM。该拓扑采用两个 RB-IGBT 代替了传统 HBSM 中的一个普通的 IGBT, 并通过一个辅助 IGBT, 使得该拓扑在故障阻断过程中始终提供 $2U_C$ 的反电动势。然后, 分析了所提出的子模块故障阻断机理, 推导了故障电流的解析表达式。最后, 在 PSCAD-EMTDC 软件中以该子模块为例搭建 MMC-HVDC 仿真模型, 验证了本文所提出的子模块的正确性。

1 RBHSM-MMC 拓扑结构及工作原理

1.1 RBHSM 拓扑

如图 1 所示为传统的三相 MMC 拓扑结构, 由三相 6 个桥臂组成, 每相上下桥臂由若干功率模块以及一个桥臂电感组成。6 个桥臂具有严格对称性, 每相所有子模块参数均相同。

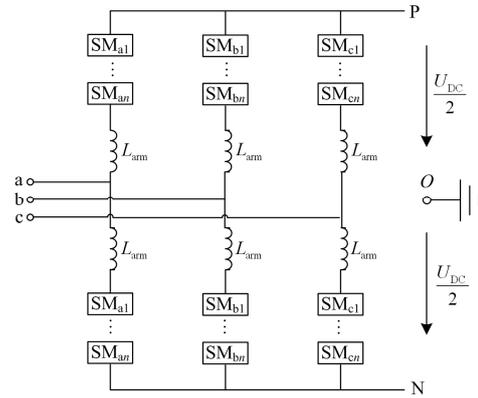


图 1 三相 MMC 拓扑结构

Fig. 1 Topology of three-phase MMC

如图 2 所示为传统半桥子模块串联拓扑结构, 由 2 个 IGBT 和 1 个电容构成。本文提出的 RBHSM 拓扑结构如图 3 所示, 采用 2 个 RB-IGBT 取代了传统串联结构的半桥拓扑中的 1 个普通 IGBT, 并在该子模块中增加了 2 个二极管和 1 个 IGBT。正常运行时, 开关管 T5 始终导通, 二极管 D1、D2 由于电压钳位作用始终处于关断状态, 通过控制开关管 T1-T5 的通断状态可使子模块输出 0 、 U_C 、 $2U_C$ 3 种电平。其工作状态与开关状态如表 1 所示, 正常工作时电流流电路径如图 4 所示。

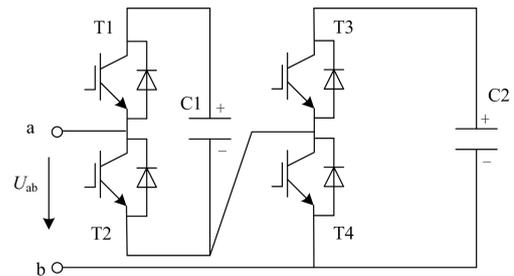


图 2 传统半桥子模块串联拓扑结构

Fig. 2 Traditional HBSM series topology

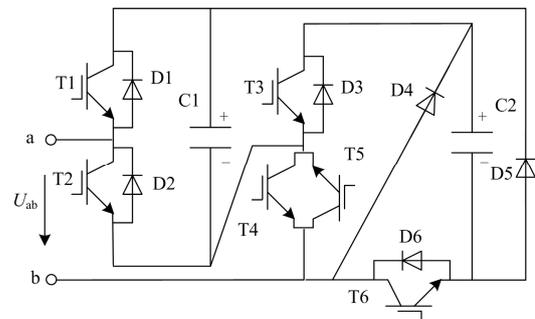


图 3 RBHSM 拓扑结构

Fig. 3 Topology of RBHSM

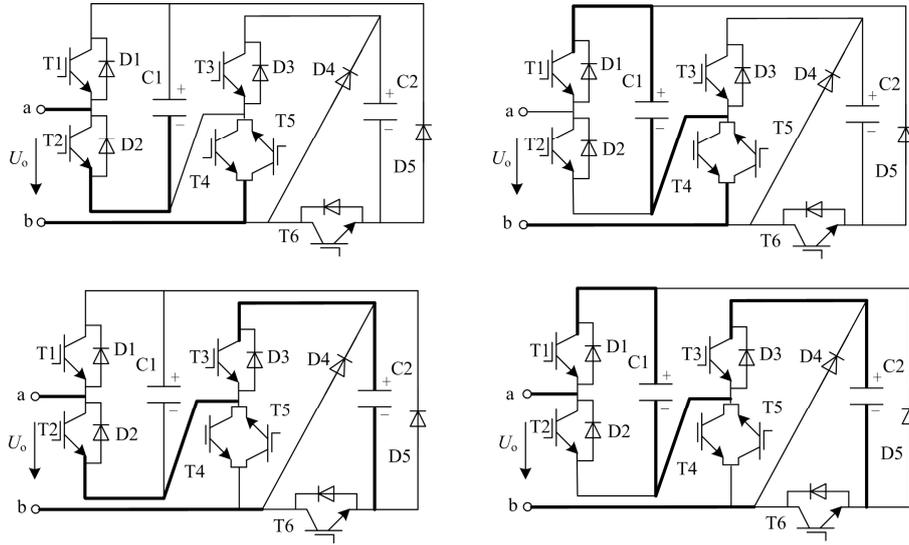


图 4 正常工作时电流流路径
Fig. 4 Current flow path during normal operation

表 1 RBHSM 开关状态

Table 1 Switching states of RBHSM

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	U_o
开关状态 1	0	1	0	1	1	1	0
开关状态 2	1	0	0	1	1	1	U_{C1}
开关状态 3	0	1	1	0	1	1	U_{C2}
开关状态 4	1	0	1	0	1	1	$U_{C1}+U_{C2}$

1.2 RBHSM 数学模型及工作原理

本节针对所提出的新型子模块拓扑结构所构成的 MMC-HVDC 系统,分析其工作原理及数学模型。基于图 1 所示的拓扑结构,将 MMC-HVDC 系统中整流侧进行简化,其等效电路图如图 5 所示。由图可知, RBHSM-MMC 的阀侧电流满足式(1)数学关系。

$$\begin{aligned} i_{pj} &= \frac{1}{3}I_{DC} + \frac{1}{2}i_{sj} + i_{zj} \\ i_{Nj} &= \frac{1}{3}I_{DC} - \frac{1}{2}i_{sj} + i_{zj} \\ i_{sj} &= i_{Nj} - i_{pj} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: i_{pj} 、 i_{Nj} 分别为换流器上、下桥臂电流; i_{sj} 为 j 相交流输出电流; I_{DC} 为直流侧电流; i_{zj} 为桥臂环流。同样, RBHSM-MMC 桥臂电压与交流输出电压满足式(2)。

$$\begin{aligned} u_{pj} &= \frac{U_{DC}}{2} - u_j - L_a \frac{di_{pj}}{dt} - R_a i_{pj} \\ u_{Nj} &= \frac{U_{DC}}{2} + u_j - L_a \frac{di_{Nj}}{dt} - R_a i_{Nj} \end{aligned} \quad (2)$$

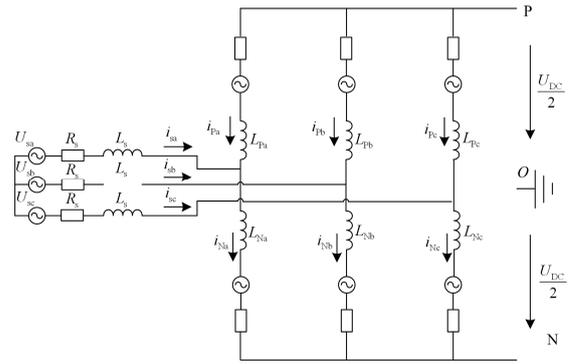


图 5 MMC-HVDC 整流侧等值电路
Fig. 5 Rectification side of the MMC-HVDC system equivalent circuit

由式(2)可得

$$\begin{aligned} u_j &= \frac{u_{Nj} - u_{pj}}{2} - \frac{L_a}{2} \frac{di_j}{dt} - \frac{R_a}{2} i_j \\ U_{DC} &= u_{pj} + u_{Nj} + 2L_a \frac{di_{Cj}}{dt} + 2R_a i_{Cj} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: U_{DC} 为直流母线电压; R_a 为桥臂等效电阻; u_j 为换流器 j 相交流输出电压; u_{pj} 、 u_{Nj} 为上下桥臂电压。

由式(1)一式(3)可得, RBHSM-MMC 在正常工作情况下的上下桥臂电流、输出电流、上下桥臂电压及输出电压均与传统半桥型 MMC 相同,即 RBHSM-MMC 的工作原理类似于与传统 HBSM-MMC,因此,传统 HBSM-MMC 的控制策略均能够适用于 RBHSM-MMC。

2 RBHSM-MMC 故障阻断机理

柔性直流输电系统直流侧短路故障可分为单级接地故障和双极短路故障两类^[20]。本节以对系统危害最严重的直流侧双极短路为例分析 RBHSM-MMC 的故障阻断机理及子模块闭锁后系统故障电流特性。

2.1 子模块故障阻断机理

对图 3 所示的 RBHSM 拓扑结构, 当其检测到系统发生双极短路后迅速闭锁子模块中所有开关器件。由于 RB-IGBT 在闭锁后可以实现双向阻断电流, 其等效为开路状态, 剩余的 IGBT 在闭锁后等效为一个二极管。其闭锁后的电流流通过程如图 6 所示。

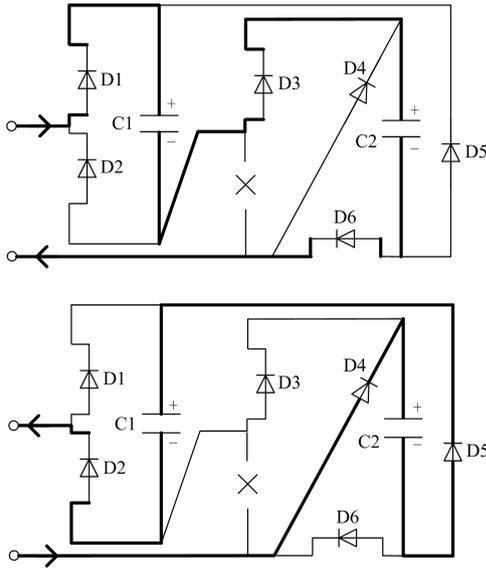


图 6 闭锁后故障电流通路径

Fig. 6 Short-circuit fault currents flow path

当故障电流正向流入子模块时, 故障电流通过 D1、D3、D6 为电容 C1、C2 充电。二极管 D2、D4 仍然承受反向电压呈阻断状态, 子模块对外等效为 2 个电容与 2 个二极管串联, 通过电容在电路中提供反向电动势 $2U_C$ 切断故障电流; 当故障电流反向流入子模块时, 二极管 D4、D5 承受正向电压而开通。故障电流通过 D2、D4、D5 对电容 C1、C2 充电, 子模块对外等效为 2 个电容与 3 个二极管串联, 同样地, 电容为回路提供 $2U_C$ 的反电动势切断故障电流。

2.2 故障特性分析

为了方便分析直流侧双极短路故障电流特性, 将换流器故障过程分为两个阶段: 电容放电阶段与故障清除阶段。电容放电阶段即故障发生后到系统

检测出故障从而闭锁开关器件前, 定义该时间段为 T_1 ; 故障清除阶段即开关器件闭锁后到故障电流完全清除前, 定义该时间段为 T_2 。

2.2.1 电容放电阶段故障特性

在故障发生后到换流器内所有 IGBT 闭锁需要一定时间, 在该时间内, RBHSM-MMC 正常运行, 各相上、下桥臂将按照调制波给定的触发脉冲投入、切除。此时系统内的故障电流主要由各子模块中的电容放电提供。任意时刻内, 每相投入的子模块数量均为 n , 所以每相桥臂可等效为两组电容交替放电, 每组均有 n 个电容。由于三相桥臂具有严格对称性, 以 a 相为例, 电容放电阶段等效电路图如图 7 所示。

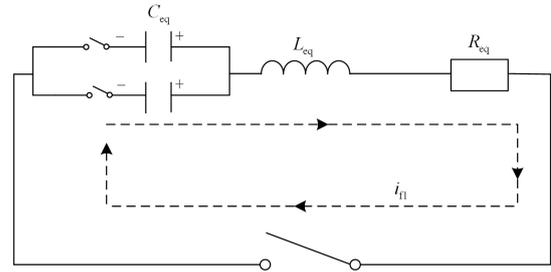


图 7 电容放电阶段等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit of capacitor discharge stage

图 7 中, C_{eq} 为等效电容, 其值为两组子模块电容之和; L_{eq} 为系统等效电感, 其值为系统上下、桥臂电感与直流线路等效电感之和; R_{eq} 为系统等效电阻, 等于直流侧短路阻抗、线路分布式电阻和系统杂散电阻之和。

由图可知, 电容放电阶段可以理解为一个有初值的二阶振荡放电电路, 满足式(4)^[19]。

$$L_{eq}C_{eq} \frac{du_C}{dt} + L_{eq}R_{eq} \frac{du_C}{dt} + u_C = 0 \quad (4)$$

系统零时刻电压、电流初始值如式(5)所示。

$$\begin{cases} u_C(0_+) = u_C(0_-) = U_{DC} \\ i_n(0_+) = i_n(0_-) = I_{DC} \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)得到子模块电容放电阶段电容电压及故障电流解析表达式, 如式(6)和式(7)所示。

$$u_C = e^{-\frac{t}{\tau}} \left[\frac{U_{DC}\omega_1}{\omega_1} \sin(\omega_1 t + \beta_1) - \frac{I_{DC}}{\omega_1 C_{eq}} \sin(\omega_1 t) \right] \quad (6)$$

$$i_n = e^{-\frac{t}{\tau_1}} \left[\frac{U_{DC}}{\omega_1 L_{eq}} \sin(\omega_1 t) - \frac{I_{DC}\omega_1}{\omega_1} \sin(\omega_1 t - \beta_1) \right] \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \tau_1 &= \frac{2}{R_{eq}} \\
 \omega_1 &= \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C_{eq}} - \left(\frac{R_{eq}}{2L_{eq}}\right)^2} \\
 \omega_{01} &= \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C_{eq}}} \\
 \beta_1 &= \arctan \sqrt{\frac{4L_{eq}}{C_{eq}R_{eq}^2} - 1}
 \end{aligned} \right\} (8)$$

由式(7)和式(8)可以看出, 故障后到系统 IGBT 闭锁前这一阶段, 故障电流主要受系统等效电感 L_{eq} 及等效电容 C_{eq} 的影响, 系统等效电容越大, 则故障电流峰值越大, 系统等效桥臂电感越小, 故障电流峰值越大。

2.2.2 电容放电阶段故障特性

在直流侧发生双极短路故障后, 经过一定时间后, 系统会发出闭锁信号, 闭锁换流器内所有 IGBT, 系统进入子模块闭锁阶段, 此时换流器内故障电流通路如图 8 所示。

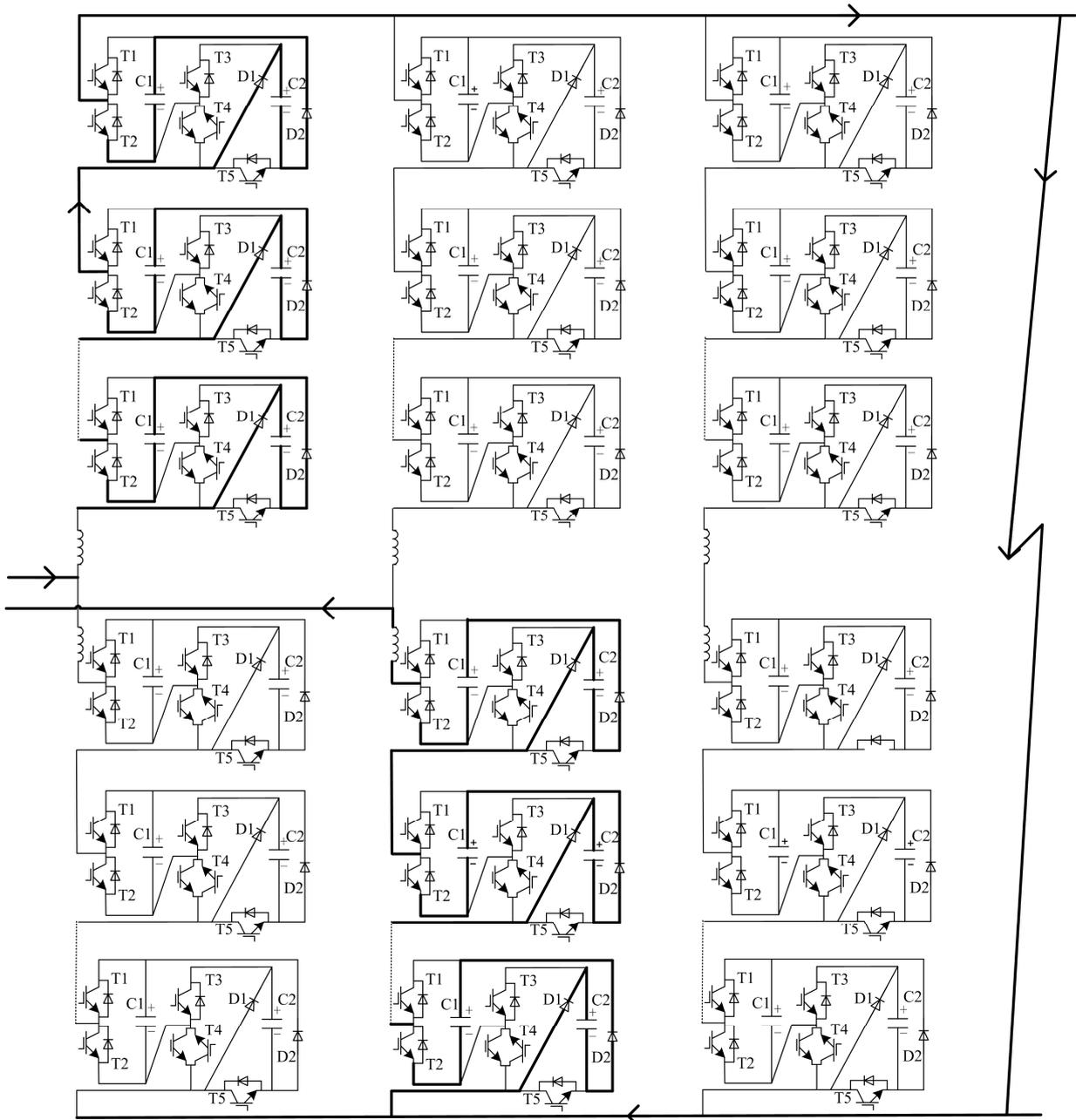


图 8 系统闭锁阶段故障等效电路

Fig. 8 Fault equivalent circuit of system blocking stage

由图 8 可知, 子模块闭锁阶段, 换流器内部子模块均可等效为电容与二极管的串联形式, 并与换流器内等值电阻 R_{eq} 以及等值电感 L_{eq} 组成二阶充电电路, 等效简化电路图如图 9 所示。

由图 9 可知, 子模块闭锁阶段故障特性满足式(9)。

$$L_{eq} C_{eq} \frac{du_{C1}}{dt} + L_{eq} R_{eq} \frac{du_{C1}}{dt} + u_{C1} = 0 \quad (9)$$

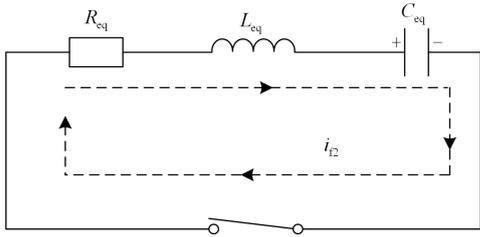


图 9 系统闭锁阶段故障等效电路

Fig. 9 Fault equivalent circuit of system blocking stage

设该阶段系统电压初值为 0, 系统故障电流初值为 I_{f1} , 则子模块闭锁阶段电容充电的电压与故障电流关系满足式(10)和式(11)。

$$u_{C1} = e^{-\frac{t}{\tau_2}} \frac{I_{f1}}{\omega_2 C_{eq}} \sin(\omega_2 t) \quad (10)$$

$$i_{t2} = -e^{-\frac{t}{\tau_2}} \frac{\omega_{02} I_{f1}}{\omega_2} \sin(\omega_2 t - \beta_2) \quad (11)$$

式中, τ_2 、 ω_2 、 ω_{02} 、 β_2 与式(8)类似。故障清除阶段, 故障电流将为电容充电, 通过建立反电动势实现故障电流清除。由式(10)可知, 故障阻断电压与系统初始故障电流及等效电容有关, 且等效电容值越小, 故障阻断电流初始值越大, 故障阻断电压越大。

3 仿真验证

3.1 仿真模型

为验证本文提出的 RBHSM-MMC 拓扑结构的可行性, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建单端 MMC 仿真算例。仿真模型如图 1 所示, 具体参数如表 2 所示。

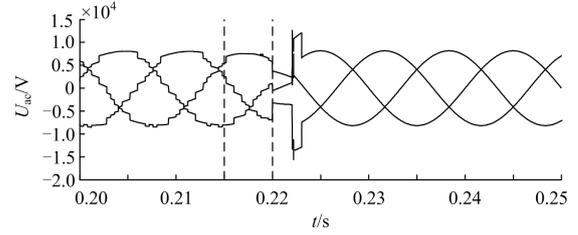
表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

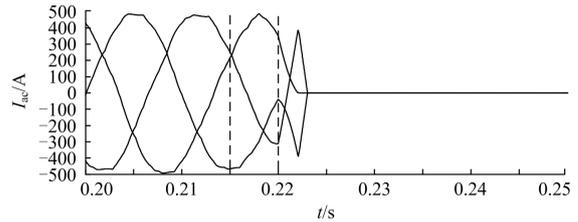
参数	数值
额定容量/MVA	15
直流侧额定电压/kV	±10
交流侧额定电压/kV	10
桥臂子模块数量	5
桥臂电容数量	10
桥臂电感值/H	0.013
桥臂电容值/F	0.008 5
线路等效电阻/ Ω	0.1
线路等效电感/H	0.01

3.2 仿真结果

本文针对系统最严重的直流侧双极短路故障进行仿真分析。设 0.215 s 前, 系统稳定运行, 在 0.215 s 时, 系统发生直流侧双极短路永久性故障, 0.22 s 系统检测出直流故障发生, 闭锁所有 IGBT。其故障情况下换流器电气波形如图 10 和图 11 所示。



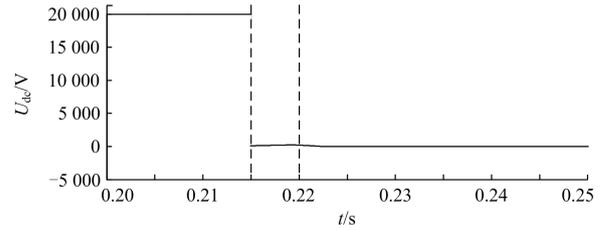
(a) 阀侧出口电压波形



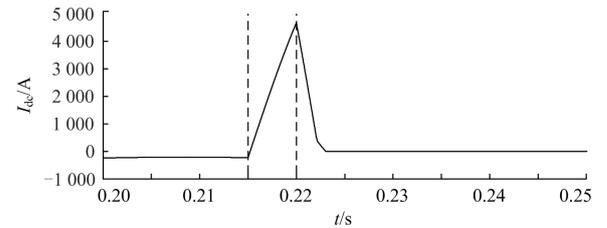
(b) 交流侧电流波形

图 10 永久性直流侧双极短路下交流侧仿真波形

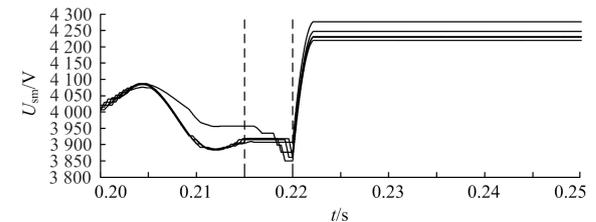
Fig. 10 AC side simulation waveform under the permanent DC-side bipolar short-circuit



(a) 直流侧电压波形



(b) 直流侧电流波形



(c) 子模块电压波形

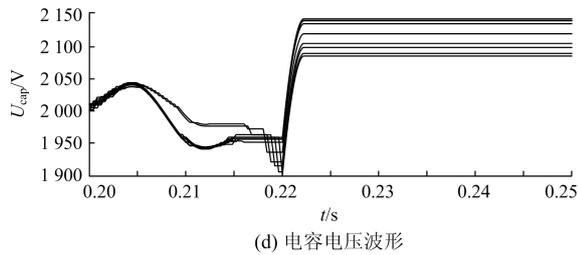


图 11 永久性直流侧双极短路下直流侧仿真波形

Fig. 11 DC side simulation waveform under the permanent DC-side bipolar short-circuit

图 10 为永久性直流侧双极短路下,采用本文所提出的拓扑结构和保护方法的交流侧电压波形、电流波形。

由图 10 可得,短路故障发生时至系统闭锁所有 IGBT 这段时间,即 0.215~0.22 s,阀侧出口电压、电流并未受太大影响,基本与稳态情况下相同;当 IGBT 全部闭锁后,阀侧出口电压段时间波动后与交流网侧电压相同,交流电流迅速下降为零。

由图 11(a)可得,故障发生后,直流侧电压由原来稳定的 20 kV 迅速下降为 0;由图 11(b)可得,在系统闭锁前,直流侧故障电流上升,当系统闭锁 IGBT 后,经 0.002 s 后,故障电流降为 0,故障电流已清除;由图 11(c)和图 11(d)可得,故障发生前,即 0.215 s 前,各子模块按照正常工作情况分别投入或切除,各子模块电压稳定在 4 kV 附近。0.215 s 至 0.22 s,故障仍然存在,其系统并未闭锁,此时,各子模块中电容放电,电容电压下降;0.22 s 时,系统闭锁所有 IGBT,此时短路电流为电容充电,电容电压上升并稳定。

因此,在故障阻断过程中,本文提出的子模块拓扑结构可在故障阻断过程中始终提供 $2U_C$ 的反电动势来切断故障电流,且对交流侧电压影响不大。由于直流电流被清除,电容从直流侧吸收了能量,因此子模块中电容电压有所上升。

4 结论

本文基于 RB-IGBT 提出了一种具有直流故障电流阻断能力的新型子模块拓扑结构,该子模块在故障电流阻断过程中,所有子模块均被串联入回路,始终可以为回路提供 $2U_C$ 的反电动势。相比于 CDSM 结构,该子模块在不增加子模块器件成本和开关损耗的基础上,能够提供较为优秀的电流阻断能力。

参考文献

[1] XU Jianzhong, GOLE A M, ZHAO Chengyong. The use

of averaged-value model of modular multilevel converter in DC grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 519-528.

[2] MARQUARDT R. Modular multilevel converter: a universal concept for HVDC-Networks and extended DC-bus applications[C] // 9th International Power Electronics Conference (IPEC), June 21-24, 2010, Sapporo, Japan: 502-507.

[3] 陆地, 李玉, 武文广, 等. 大功率电力电子技术在我国直流输电领域的应用[J]. 智慧电力, 2017, 45(8): 1-8.

LU Di, LI Yu, WU Wenguang, et al. Application of high power electronic technology in DC transmission and distribution[J]. Smart Power, 2017, 45(8): 1-8.

[4] 曹乐萌, 赵巧娥, 高金城, 等. HVDC 系统中 MMC 换流器控制策略研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(10): 31-36.

CAO Yuemeng, ZHAO Qiao'e, GAO Jincheng, et al. Research on control strategy of MMC converter in HVDC system[J]. Smart Power, 2017, 45(10): 31-36.

[5] 蔡新红, 赵成勇. 模块化多电平换流器型高压直流输电系统控制保护体系框架[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 157-163.

CAI Xinhong, ZHAO Chengyong. Framework of control and protection system for MMC-HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 157-163.

[6] 唐立, 袁旭峰, 李宁, 等. MMC 系统级拓扑及其直流故障电流阻断能力研究[J]. 高压电器, 2017, 53(6): 96-104.

TANG Li, YUAN Xufeng, LI Ning, et al. MMC system topology and its DC fault current blocking capability[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(6): 96-104.

[7] 杨洋, 王瑶, 李浩涛, 等. 子模块混合型 LCC-MMC 混合直流输电系统的启动控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 58-64.

YANG Yang, WANG Yao, LI Haotao, et al. Start-up control strategies for the cell-hybrid LCC-MMC hybrid HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 58-64.

[8] 常非, 杨中平, 林飞. 具备直流故障清除能力的 MMC 多电平子模块拓扑[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 44-49.

CHANG Fei, YANG Zhongping, LIN Fei. Multilevel sub-module topology of MMC with DC fault clearance capability[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 44-49.

[9] 赵成勇, 许建中, 李探. 全桥型 MMC-MTDC 直流故障穿越能力分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(1):

- 106-114.
ZHAO Chengyong, XU Jianzhong, LI Tan. DC faults ride-through capability analysis of Full-Bridge MMC-MTDC system[J]. Chinese Science: Technical Science, 2013, 43(1): 106-114.
- [10] 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-through mechanism and improved topology scheme of C-MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21): 63-70.
- [11] 戴志辉, 朱惠君, 严思齐, 等. 钳位双子模块型模块化多电平换流器交流侧故障对直流侧的影响分析[J/OL]. 中国电机工程学报, 2018: 1-10[2018-02-23]. <http://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.171434>.
DAI Zhihui, ZHU Huijun, YAN Siqi, et al. Influence of clamp double submodule-modular multilevel converter AC-side faults on DC-side quantities[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2018: 1-10[2018-02-23]. <http://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.171434>.
- [12] 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.
LI Xiaoqian, LIU Wenhua, SONG Qiang, et al. An enhanced MMC topology with DC fault clearance capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(36): 6389-6397.
- [13] 许义佳, 罗映红, 史彤彤, 等. 具有直流故障自清除能力的新型 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 submodule with DC fault self-clearing ability and its hybrid topology[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 129-137.
- [14] ZUNIGA-GARCIA L, ZARAGOZA-HERNANDEZ A, NADAL-MARTINEZ J M, et al. MMC technology and its participation in the integration of variable renewable energies and implementation of DC grids[C] // 2014 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), 2014, Itapúa: 1-6.
- [15] 李红梅, 行登江, 高扬, 等. 子模块混联 MMC-HVDC 系统直流侧短路故障电流抑制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 57-64.
LI Hongmei, XING Dengjiang, GAO Yang, et al. A DC pole-to-pole fault current suppression strategy of the half-and full-bridge based cell-hybrid modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 57-64.
- [16] 王先为, 张军, 杨美娟, 等. 混合多端直流输电系统柔直换流阀电气应力抑制策略研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(8): 32-38.
WANG Xianwei, ZHANG Jun, YANG Meijuan, et al. Control strategy of suppressing sub-module hybrid MMC valve electrical stress on multi-terminal hybrid-HVDC system[J]. Smart Power, 2018, 46(8): 32-38.
- [17] 张浩, 王先为, 马焕, 等. 基于 MMC 的直流电网短路电流分析及保护策略[J]. 智慧电力, 2019, 47(2): 93-100.
ZHANG Hao, WANG Xianwei, MA Huan, et al. Short circuit current analysis in DC grid and its protection strategy based on modular multilevel converter[J]. Smart Power, 2019, 47(2): 93-100.
- [18] IGARASHI S, MIYASHITA S, WAKIMOTO H, et al. Advanced three-level converter with newly developed 1200 V reverse blocking IGBTs[C] // 14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), August 30 – September 1, 2011, Birmingham, UK: 1-7.
- [19] 杨晓峰, 薛尧, 郑琼林, 等. 采用逆阻型子模块的新型模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1885-1891.
YANG Xiaofeng, XUE Yao, ZHENG Qionglin, et al. Novel modular multilevel converter with reserve blocking sub-modules[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1885-1891.
- [20] SCHMITT D, WANG Y, WEYH T, et al. DC-side fault current management in extended multiterminal-HVDC-grids[C] // 2012 9th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, 2012, Chemnitz, German: 1-5.

收稿日期: 2018-10-08; 修回日期: 2019-05-27

作者简介:

方 辉(1988—), 女, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统分析; E-mail: fanghui99@126.com

宋勇辉(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性直流输电保护与控制等; E-mail: 775426517@qq.com

周敬森(1988—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统分析。E-mail: zhoujingsen@whu.edu.cn

(编辑 周金梅)