

一种能够清除直流故障和减少传感器数量的MMC子模块及其特性研究

马文忠¹, 张子昂¹, 王晓², 古丽帕丽·赛力江¹, 孙鹏¹, 董磊¹

(1. 中国石油大学(华东) 信息与控制工程学院 新能源研究院, 山东 青岛 266580;

2. 国网山东省电力公司东营市垦利区供电公司, 山东 东营 257000)

摘要:针对模块化多电平换流器(MMC)的直流故障清除问题,提出了一种新型的局部自均压组合电容型子模块。该子模块的拓扑结构具备故障自清除能力,并且能够利用不同工作模式的投切,自动实现子模块内部电容电压的均衡,即每一个新型子模块只需一个电压传感器对其进行监控。利用MATLAB/Simulink对基于新型子模块的MMC在正常状态和直流侧短路故障状态进行仿真,仿真结果表明相比于传统的 N 电平 m 相半桥型MMC需要 $2m(N-1)$ 个电压传感器和 $2m$ 个电流传感器,所提出的基于新型子模块的MMC所需电压传感器的数量以及参与控制的电压信号数量均减少一半,降低了系统硬件成本,减少了控制器运算负担,提高了系统稳定性;同时,当系统发生直流侧短路故障时,由于子模块具备故障自清除能力,能够阻断交流系统与故障点的电流通路,实现直流故障的闭锁。

关键词: MMC; MMC子模块; 并联过程分析; 导通损耗; 直流故障闭锁

中图分类号: TM 46

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.201912032

0 引言

模块化多电平换流器 MMC (Modular Multilevel Converter) 电路高度模块化,通过改变接入的换流器子模块数量可满足不同功率和电压等级的要求,有利于实现集成化设计,缩短建设周期,节约项目成本,是未来中高压大功率系统的重要发展方向之一^[1-3]。

目前国内外对基于 MMC 的柔性直流输电系统的研究主要集中于调制技术^[4-6]、谐波分析以及电容电压平衡控制^[7-11]等问题,有关直流故障清除的文献相对较少。实际工程中,基于 MMC 的柔性直流输电系统不可避免地会发生各种直流故障。发生直流侧单相接地故障或断线故障不会对 MMC 内部子模块产生较大冲击,而当发生直流侧双极短路故障时,换流器内部将承受较大的冲击电流,传统的半桥型子模块(HBSM)将闭锁所有绝缘栅双极型晶体管(IGBT),但其续流二极管仍可以为故障电流提供通路,系统近似三相短路,传统半桥型 MMC 无法阻断短路电流,只能依靠交流侧断路器动作来清除故障。此方法动作时间长,系统恢复速度慢,影响系统的可靠性,一定程度上限制了 MMC 在直流电网领域的应用^[12]。

针对传统半桥型 MMC 无法阻断短路电流的问题,许多文献提出具备故障自清除能力的新型拓扑结构。为实现阻断直流故障,文献[13]详细介绍了全桥型子模块(FBSM)的工作模式和故障自清除原理。文献[14]提出了串联双子模块拓扑结构,其子模块由2个HBSM附加1个IGBT反并联二极管和1个二极管组成,正常运行时,2个子模块为串联关系并各自独立工作,其控制策略与HBSM相同。文献[15]介绍了交叉连接型子模块,子模块由2个HBSM通过2个附加的带反并联续流二极管的IGBT背靠背相连接而成,控制6个IGBT的开通关断状态,即可实现子模块输出5种电平。

为了确保子模块的电容电压保持平衡,上述子模块中的每一个电容的电压都要被监控,所需电压传感器的数量与电容个数相同。当 MMC 的电平数很大时,需要用大量的电压传感器来监控所有电容的电压以保证其电压平衡,这无疑增加了控制系统的复杂程度、传感器的数量。同时随着传感器数量的增加,传感器故障概率也将增大,从而降低了系统的可靠性。

针对上述问题,本文设计了一种新型子模块结构。该拓扑结构具备直流故障自清除能力,与此同时,该拓扑相比于其他 MMC 子模块结构所需电压传感器的数量以及参与控制的电压信号数量减少了50%,本文详细介绍了该新型子模块的拓扑结构和工作模式,分析并联模式过程中的损耗和直流侧双极短路故障的清除原理。最后在 MATLAB/Simulink 仿真环境中以该新型子模块拓扑为例,搭建 MMC-

收稿日期:2019-04-26;修回日期:2019-10-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777216);山东省自然科学基金资助项目(ZR2018MEE040)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777216) and the Natural Science Foundation of Shandong Province(ZR2018MEE040)

HVDC 仿真模型,验证在正常和直流侧短路故障状态下该新型子模块的有效性。

1 LSCCSM 拓扑结构及控制策略

1.1 LSCCSM 工作模式

图1为本文设计的3电平局部自均压组合电容型子模块 LSCCSM (Local Self-balancing Combined Capacitor SubModule)。该拓扑结构由2个电容器、6个 IGBT 和7个二极管构成。图中, D_1 — D_7 为二极管; T_1 — T_6 为 IGBT; C_1 、 C_2 为电容。

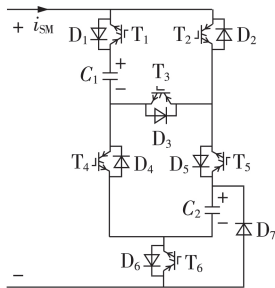


图1 LSCCSM 拓扑结构

Fig.1 Topology structure of LSCCSM

正常工作时,控制其 IGBT 的导通和关断,该新型子模块可以输出 0 、 U_c 和 $2U_c$ 这3种电平状态,其中 U_c 为电容电压。3种工作模式如附录中图 A1 所示,具体分析如下。

(1)旁路模式:如图 A1(a)所示,控制 T_2 — T_4 、 T_6 导通,其余 IGBT 关断, C_1 和 C_2 旁路,子模块输出电压 $V_{SM}=0$ 。

(2)并联模式:如图 A1(b)所示,控制 T_1 、 T_2 、 T_4 — T_6 导通, T_3 关断, C_1 和 C_2 处于并联状态。在这种模式下,子模块电流被分成2个相同的分支,由于 C_1 与 C_2 并联,2个电容的电压相同,子模块输出电压 $V_{SM}=U_{C1}=U_{C2}=U_c$,其中 U_{C1} 、 U_{C2} 分别为电容 C_1 、 C_2 的电压值。

(3)串联模式:如图 A1(c)所示,控制 T_1 、 T_3 、 T_5 、 T_6 导通,其余 IGBT 关断, C_1 和 C_2 处于串联状态。子模块电流 i_{SM} 流经这2个电容器,电容器的初始电压 U_{C0} 与之前的电压状态(并联模式)相等。由式(1)可知,串联模式下, C_1 、 C_2 的电容电压仍然保持相同,子模块输出电压 $V_{SM}=2U_{C1}=2U_{C2}=2U_{C0}$ 。

$$U_c = U_{C0} + \frac{1}{C} \int i_{SM} dt \quad (1)$$

其中, C 为电容,可取为 C_1 或 C_2 的值。

由于2个电容值以及等效串联电阻值不完全相同,子模块的2个电容电压存在微小偏差,但这一偏差将会在下一次并联模式开始时完全消除,从而实现子模块电容电压均衡,每个子模块只需一个电压传感器就可对其进行监控,与传统 HBSM 相比降低了所需电压传感器的数量和控制系统的复杂度,极大地减少了系统的硬件成本,提高了系统的可靠性。

1.2 并联模式过程分析

该新型子模块的2个电容电压之间平衡依赖于2个电容的并联运行模式,然而,在实际中,电容、电路参数的差异可能会导致2个电容的电压在并联前不相等,若直接将两者并联,会产生能量损耗。

假设 C_0 为电容的标称值,考虑到薄膜电容的容差在 $\pm 5\%$ 以内^[16-17],则实际子模块内2个电容值分别为:

$$\begin{cases} C_1 = (1+d)C_0 \\ C_2 = (1-d)C_0 \end{cases} \quad d \in [0, 0.05] \quad (2)$$

其中, d 为电容容差值。电容电压初始值为 $U_1(t_0)$,经过串联模式(时间 Δt)后,2个电容的电压值为:

$$U_{Ck} = U_1(t_0) + \frac{1}{C_k} \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} i_{SM} dt \quad k=1,2 \quad (3)$$

联立式(2)和式(3)得:

$$\Delta U = U_{C2} - U_{C1} = \frac{2dq}{C_0(1-d^2)} \quad (4)$$

其中, $q = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} i_{SM} dt$; ΔU 为两电容电压差值。进入并联模式后,2个电容的电压值都稳定在 U_2 ,并联模式电荷守恒,即:

$$C_1 U_1 + C_2 U_1 + 2q = C_1 U_2 + C_2 U_2 \quad (5)$$

将式(5)代入式(4),可得:

$$U_2 = U_1 + q / C_0 \quad (6)$$

设并联模式前、后电容总能量 E_1 、 E_2 分别为:

$$\begin{cases} E_1 = \frac{1}{2} C_1 U_1^2 + \frac{1}{2} C_2 U_1^2 \\ E_2 = \frac{1}{2} C_1 U_2^2 + \frac{1}{2} C_2 U_2^2 \end{cases} \quad (7)$$

联立式(2)—(7),并联损失的能量为:

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{d^2 q^2}{C_0(1-d^2)} \quad (8)$$

串联模式下两电容充电之和 E_A 为:

$$E_A = \frac{1}{2} C_1 (U_{C1}^2 - U_1^2) + \frac{1}{2} C_2 (U_{C2}^2 - U_2^2) \quad (9)$$

通过损耗比来反映能量损失的相对大小:

$$\frac{\Delta E}{E_A} = \frac{q d^2}{q + 2U_0 C_0(1-d^2)} \quad (10)$$

其中, $q = C_0(1+\tau)U_1$, τ 为子模块电容电压波动值。工程中,子模块电容电压波动不会太大,即 $\tau \leq 0.05$ 。

式(10)简化为:

$$\frac{\Delta E}{E_A} = \frac{(1+\tau)d^2}{2(1-d^2)+(1+\tau)} \quad (11)$$

图2为损耗比的函数图像,当 $d \leq 0.05$ 、 $\tau \leq 0.05$ 时,损耗比最大,其值为 8.6207×10^{-4} ,可以看出并联过程增加的损耗很小,不会影响正常运行。

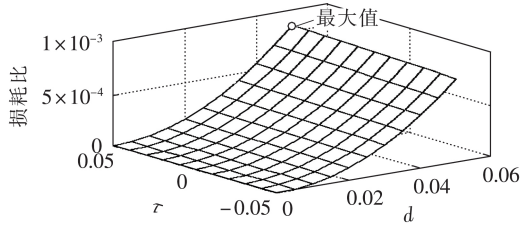


图2 并联损耗比函数图像

Fig.2 Function image of parallel loss ratio

1.3 新型子模块与主流子模块拓扑对比

以 11 电平的 MMC 系统为例,当桥臂输出电压最大时,该桥臂上的所有子模块都需要投入。在由 HBSM 构成的系统中,每个桥臂含 10 个 HBSM,且子模块投入状态下有 1 个开关器件处于开通状态,则桥臂总的导通电压为 $10V_{ON}$ 。

在由 FBSM 构成的系统中,每个桥臂含 10 个子模块,且子模块投入状态下有 2 个开关器件处于开通状态,桥臂总的导通电压为 $20V_{ON}$ 。

在由箝位型双子模块构成的系统中,每个桥臂含 5 个子模块,每个子模块由 5 个 IGBT、2 个额外的二极管和 2 个电容构成,箝位型双子模块投入状态下有 3 个开关器件处于开通状态,桥臂总的导通电压为 $15V_{ON}$ 。

在由 LSCCSM 构成的系统中,每个桥臂含 5 个子模块, V_{dc} 为直流侧电压。当桥臂电压为 0 、 $0.2V_{dc}$ 、 $0.4V_{dc}$ 、 $0.6V_{dc}$ 、 $0.8V_{dc}$ 和 V_{dc} 时,子模块处于串联或旁路模式,这 2 种模式下都为 4 个开关器件处于开通状态,桥臂总的导通电压为 $20V_{ON}$ 。当桥臂电压为 $0.1V_{dc}$ 、 $0.3V_{dc}$ 、 $0.5V_{dc}$ 、 $0.7V_{dc}$ 和 $0.9V_{dc}$ 时,其中一个子模块工作在并联模式,该模式下子模块导通电压为 $3V_{ON}$,其余子模块工作在串联或旁路模式,桥臂总的导通电压为 $19V_{ON}$ 。

一个周期内桥臂导通电压的变化情况如图 3 所示,在由 LSCCSM 构成的系统中,桥臂平均导通电压为 $19.5V_{ON}$ 。上述子模块构成的系统中桥臂电流相同,导通损耗由桥臂总的导通电压决定。可以看出,

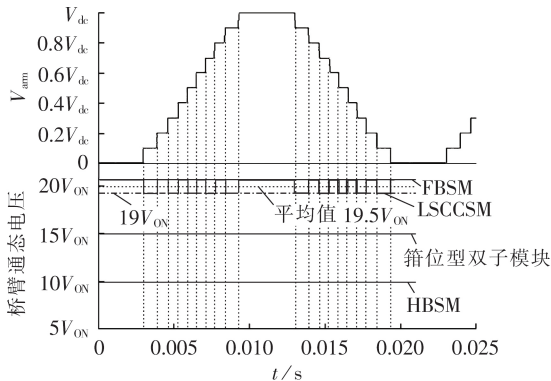


图3 一个周期内上述子模块对应的桥臂导通电压

Fig.3 Total on-state voltage of arm corresponding to presented submodules in one cycle

11 电平的 LSCCSM MMC 系统的导通损耗是 HBSM 的 MMC 系统导通损耗的 1.95 倍,该比值随着电平数的增加而增加,但其导通损耗低于 FBSM 的 MMC 系统的导通损耗。

上述子模块构成的 11 电平 MMC 系统半导体器件使用数量见表 1。由表 1 可知,相比于 FBSM,本文所提的新型子模块导通损耗小,且需要的半导体器件数目和电压传感器的数目少。相比于箝位型双子模块,该新型子模块的导通损耗大,使用的半导体器件数目相同,但所需的电压传感器数目减少一半,减少系统硬件成本,提高了系统的可靠性。

表 1 不同子模块的 11 电平 MMC 对比

Table 1 11-level MMC comparison of different submodules

子模块结构	桥臂通态电压	IGBT 数	额外二极管数	半导体器件数	电压传感器数
HBSM	$10V_{ON}$	20	0	20	10
FBSM	$20V_{ON}$	40	0	40	10
箝位型双子模块	$15V_{ON}$	25	10	35	10
LSCCSM	$19.5V_{ON}$	30	5	35	5

1.4 电容电压排序策略

在传统电容电压排序的基础上设计 LSCCSM 电容电压排序策略,如图 4 所示。图中, n 为桥臂内子模块个数; N 为桥臂需要投入的电容个数; T_{sort} 代表子模块电容电压排序和确定每个子模块投切状态的过程; $\text{floor}(x)$ 为向下取整函数,即取不大于 x 的最大整数; $\text{mod}(N/2)$ 为 N 除以 2 所得的余数。首先输入各子模块的电容电压 $V_1, V_2, \dots, V_n$, 该新型子模块内 2 个电容的电压相同,因此只需将桥臂上各子模块的电容 C_{SM} 的电容电压 U_{CSM} 传至传感器参与排序。由最近电平逼近控制法计算出需要投入的电容个数 N , 当 $N < n$ 时,对桥臂上各子模块的 U_{CSM} 进行排序,选择合适的 N 个子模块处于并联模式; 当 $N \geq n$ 时,先对各子模块的 U_{CSM} 排序,将合适的 $\text{floor}(N/2)$ 个子模块处于串联状态,再对 N 判断奇偶。若 N 为偶数时,则 $\text{mod}(N/2)=0$, 算法结束; 若 N 为奇数时, $\text{mod}(N/2)=1$,

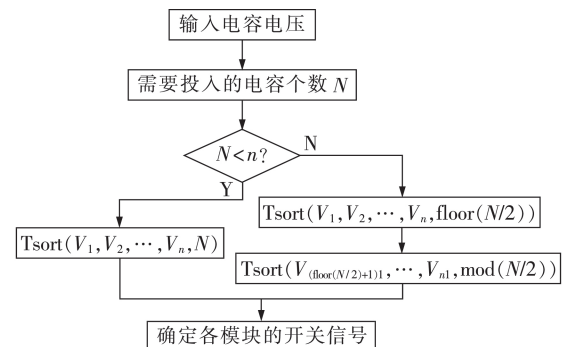


图4 LSCCSM 子模块电容电压排序

Fig.4 Sorting of LSCCSM capacitance voltage

对剩下未参与投入的子模块重新排序,根据桥臂电流方向,选择其中电压最高或最低的子模块将其处于并联模式。改进的排序算法会根据 N 的大小进行分类排序,且每次排序数量不会超过 n ,这将有效减少桥臂电容电压排序次数。

2 直流故障闭锁机制

当发生直流侧双极短路故障时,半桥型 MMC 闭锁换流器,但子模块下部的反并联续流二极管仍可以为故障电流提供通路,此时系统相当于三相短路,传统半桥型 MMC 无法阻断短路电流,因此只能依靠断开交流侧断路器来清除故障。但此方法动作时间长,系统恢复速度慢,影响系统的可靠性,一定程度上限制了 MMC 在直流电网领域的应用。

本文设计的 LSCCSM 拓扑,当发生直流侧故障时,闭锁所有 IGBT,能够将交流侧向故障点提供短路电流的路径迅速切断,从而使基于 MMC 的柔性直流输电系统具备直流故障阻断能力。

LSCCSM 所有 IGBT 闭锁后的电流流路径如附录中图 A2 所示。根据初始状态下电流的方向,如果桥臂电流为正时,如图 A2(a)所示,电流流经 D_1 、 D_3 、 D_5 与 D_6 向 C_1 和 C_2 充电,桥臂等效为 $4n$ 个二极管和 $2n$ 个电容串联。如果桥臂电流为负,如图 A2(b)所示,电流流经 D_7 、 D_4 — D_2 对 C_2 进行充电,桥臂等效为 $4n$ 个二极管与 n 个电容串联。

当发生直流侧双极短路故障,系统相当于三相短路,以其中 AB 相为例,闭锁所有 IGBT 后桥臂相当于电容与二极管串联结构,等效电路如图 5 所示。图中, L_o 为桥臂等效电感; L 为交流电源与换流器间的等效电感; R 为交流电源与换流器间的等效电阻; U_{AB} 为 A、B 两相间的线电压; D_{up} 代表故障电流流经的上桥臂所有子模块中的二极管; D_{down} 代表故障电流流经的下桥臂所有子模块中的二极管。AB 两相的上下桥臂与直流短路点构成的回路组成了交流侧向故障点馈流的潜在通路。在通路中,二极管在级联电容反电势的作用下处于反向截止状态,从而阻断故障电流。同时还需要保证交流侧线电压幅值小于级联电容的反电势,以实现换流站的完全闭锁,即:

$$\sqrt{3}U < 2nU_c \quad (12)$$

其中, U 为交流侧电压幅值。

一般每相上、下桥臂投入电容的电压之和等于

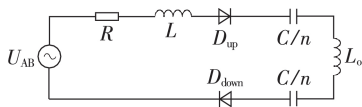


图5 LSCCSM MMC 闭锁后等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of LSCCSM MMC after locking

直流电压:

$$(n_{pj} + n_{nj})U_c = V_{dc} \quad (13)$$

$$n_{pj} + n_{nj} = n \quad (14)$$

$$K = \frac{U}{V_{dc}/2} \leq 1 \quad (15)$$

其中, n_{pj} 为上桥臂子模块个数; n_{nj} 为下桥臂子模块个数; K 为电压调制比。

将式(14)、式(15)代入式(13)中,得:

$$nU_c \geq 2U > \sqrt{3}U \quad (16)$$

式(16)恒成立,证明了在故障时换流站能够完全闭锁。

3 仿真分析

为了验证所提新型子模块的有效性,本文在 MATLAB/Simulink 环境下搭建 11 电平 MMC 单端整流系统,具体仿真参数为:桥臂电感为 0.006 H, $C_1 = 0.0029$ F, $C_2 = 0.0027$ F,电平数为 11,输出电压为 10 kV,模块初始电压为 0,系统功率因数为 1。

3.1 稳态运行

稳态运行下的仿真结果如图 6 所示。考虑到电容器在实际参数上存在差异,仿真中设置 2 个电容值不相等,由子模块中 C_1 、 C_2 的电压波形图可知,即使电容值存在偏差,但 C_1 、 C_2 的电压波形保持一致,验证了并联模式会使电容电压间偏差完全消除,从而自发地均衡子模块电容电压。

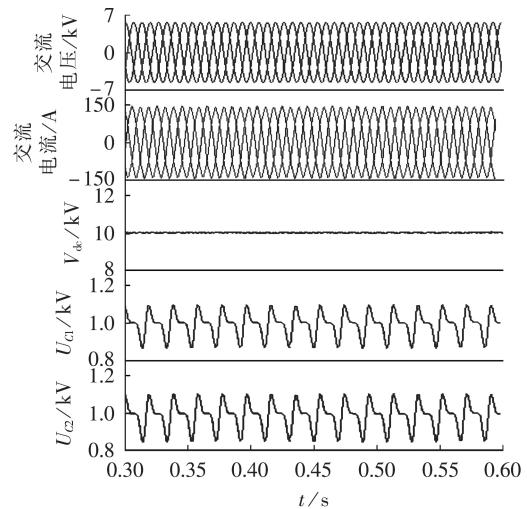


图6 稳态运行时仿真结果

Fig.6 Simulative results during steady-state operation

3.2 暂时性直流双极短路故障

为验证 LSCCSM 具备故障自清除能力,设定系统在 0.6 s 时发生直流侧双极短路故障,0.8 s 故障清除。暂时性故障仿真结果如图 7 所示,当检测到发生直流故障后,闭锁所有的 IGBT。由 A 相桥臂电流波形图可知,故障时交流侧向故障点提供的电流为

0,具备阻断故障电流的能力。由子模块电容电压波形图可知,故障时由于电流为0,电容既不充电也不放电,电容电压保持常值。0.8 s故障清除后,换流站成功恢复正常运行。

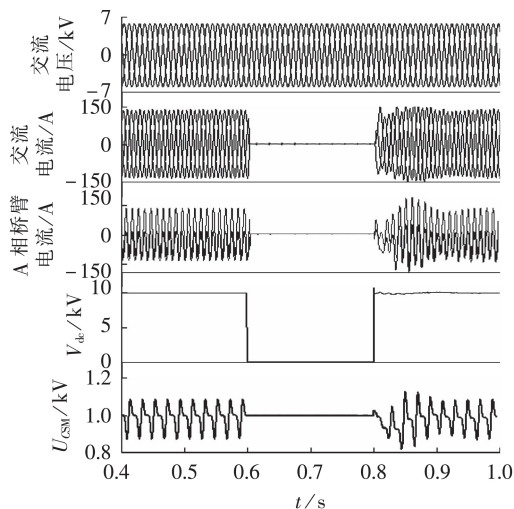


图7 直流侧暂时性故障仿真结果

Fig.7 Simulative results of temporary fault at DC side

4 结论

本文设计了一种新型子模块结构,该新型子模块相比于其他MMC子模块结构所需电压传感器的数量减少了一半,因此降低了系统硬件成本,减小了控制器运算量,增加了系统的可靠性。该新型子模块同时还具备直流故障阻断能力。在半导体器件使用数量、所需电压传感器的数量和传导损耗方面,将该子模块与现有子模块进行比较。利用MATLAB/Simulink在稳态运行条件下和直流侧双极短路故障条件下进行建模仿真验证。仿真结果验证了该新型子模块的有效性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 韦延方,卫志农,孙国强,等.一种新型的高压直流输电技术——MMC-HVDC[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):1-9.
WEI Yanfang, WEI Zhihong, SUN Guoqiang, et al. New HVDC power transmission technology: MMC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 1-9.
- [2] 杨晓峰,林智钦,郑琼林,等.模块组合多电平变换器的研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(6):1-14.
YANG Xiaofeng, LIN Zhiqin, ZHENG Trillion Q, et al. A review of modular multilevel converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 1-14.
- [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 application of modular multilevel converter [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 1-10.
- [4] 王楚,宋平岗,李云丰.模块化多电平变流器的最近电平逼近调制策略[J]. 大功率变流技术,2012(4):20-22.
WANG Chu, SONG Pinggang, LI Yunfeng. The nearest level modulation strategy for modular multilevel converter [J]. High Power Converter Technology, 2012(4): 20-22.
- [5] LIN Lei, LIN Yizhe, HE Zhen, et al. Improved nearest-level modulation for a modular multilevel converter with a lower submodule number [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8): 5369-5377.
- [6] 朱益华,郭琦,李成翔,等.柔性直流和常规直流并系统功率调制策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(9):130-135.
ZHU Yihua, GUO Qi, LI Chengxiang, et al. Power modulation strategy for parallel system of MMC-HVDC and LCC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 130-135.
- [7] ROSHEILA D, JOSEP P, GEORGIOS K, et al. A modified voltage balancing algorithm for the modular multilevel converter: evaluation for staircase and phase-disposition PWM [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(8): 4119-4127.
- [8] 屠卿瑞,徐政,郑翔,等.一种优化的模块化多电平换流器电压均衡控制方法[J]. 电工技术学报,2011,26(5):15-20.
TU Qingrui, XU Zheng, ZHENG Xiang, et al. An optimized voltage balancing method for modular multilevel converter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 15-20.
- [9] 薛畅,申科,纪延超,等.模块化多电平换流器的电容电压平衡方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):27-31.
XUE Chang, SHEN Ke, JI Yanchao, et al. Capacitor voltage balancing of modular multilevel converter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 27-31.
- [10] 郝亮亮,张静,黄银华,等.模块化多电平换流器的分频均压控制策略[J]. 电力自动化设备,2018,38(6):195-200.
HAO Liangliang, ZHANG Jing, HUANG Yinhua, et al. Frequency dividing control of capacitor voltage balance for modular multilevel converter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(6): 195-200.
- [11] 孙谦浩,李亚楼,宋强,等.基于桥臂基波平均开关函数的MMC模型在直流电网仿真中的应用[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):24-30.
SUN Qianhao, LI Yalou, SONG Qiang, et al. Application of MMC model based on arm fundamental wave average switching function in DC grid simulation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(8): 24-30.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
DING Yunzhi, SU Jianhui, ZHOU Jian. Analysis on fault current limitation and self-recovery of MMC based on clamp double sub-module [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 97-103.
- [15] QIN J, SAEEDIFARD M, ROCKHILL A, et al. Hybrid design of modular multilevel converters for HVDC system based on various submodule circuits [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 385-394.

- [16] 石璐,李嘉龙,赵成勇,等. 双半桥与并联全桥子模块混合MMC均压与直流故障控制研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(21):1-9.
SHI Lu,LI Jialong,ZHAO Chengyong,et al. Research on control method of voltage balance and DC fault clearance of hybrid MMC composed of D-HBSM and P-FBSM [J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(21):1-9.
- [17] 张帆,杨旭,任宇,等. 一种适用于固态直流断路器的IGBT串联均压电路[J]. 中国电机工程学报,2016,36(3):656-663.
ZHANG Fan,YANG Xu,REN Yu,et al. Voltage balancing circuit for series-connected IGBTs in solid-state breaker[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(3):656-663.

作者简介:



马文忠

马文忠(1968—),男,山东东营人,教授,博士,主要研究方向为电力电子与智能电网技术(**E-mail**:mawenzhong@163.com);

张子昂(1994—),男,山东东营人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子与智能电网技术(**E-mail**:sd-zza@163.com);

董磊(1979—),男,山东青岛人,讲师,博士,通信作者,主要研究方向为电力电子与电力拖动(**E-mail**:casper10@263.net)。

(编辑 王欣竹)

Research on MMC submodule which can clear DC fault and reduce number of sensors and its characteristics

MA Wenzhong¹,ZHANG Ziang¹,WANG Xiao²,GULIPALI·Sailijiang¹,SUN Peng¹,DONG Lei¹

(1. Institute of New Energy,College of Information and Control Engineering,
China University of Petroleum(East China),Qingdao 266580,China;

2. State Grid Shandong Electric Power Company Dongying Kenli District Power Supply Company,
Dongying 257000,China)

Abstract: Aiming at the problem of DC(Direct Current) fault clearing of MMC(Modular Multilevel Converter),a novel LSCSM(Local Self-balancing Combined Capacitor SubModule) is proposed. The topology of SM(SubModule) not only has the ability of fault self-clearing,but also can automatically realize the balance of internal capacitance voltage of SM by using the switching of different working modes,that is,each novel SM only needs one voltage sensor to monitor it. The MMC based on the novel SM in both normal state and DC side short circuit fault state is simulated on MATLAB/Simulink platform. The simulative results show that compared with the traditional N -level m -phase half-bridge MMC,which needs $2m(N-1)$ voltage sensors and $2m$ current sensors,the number of voltage sensors and the number of voltage signals involved in the control based on MMC with the proposed novel SM are reduced by half,which decreases the system hardware cost, reduces the computational burden of controller and improves the stability of power system. Meanwhile when short circuit fault occurs in DC side,the novel SM can not only block the current path between AC side and the fault point because of the ability of fault self-clearing,but also realize the DC fault blocking.

Key words: MMC;MMC SM;analysis of parallel process;conduction loss;DC fault blocking

附录

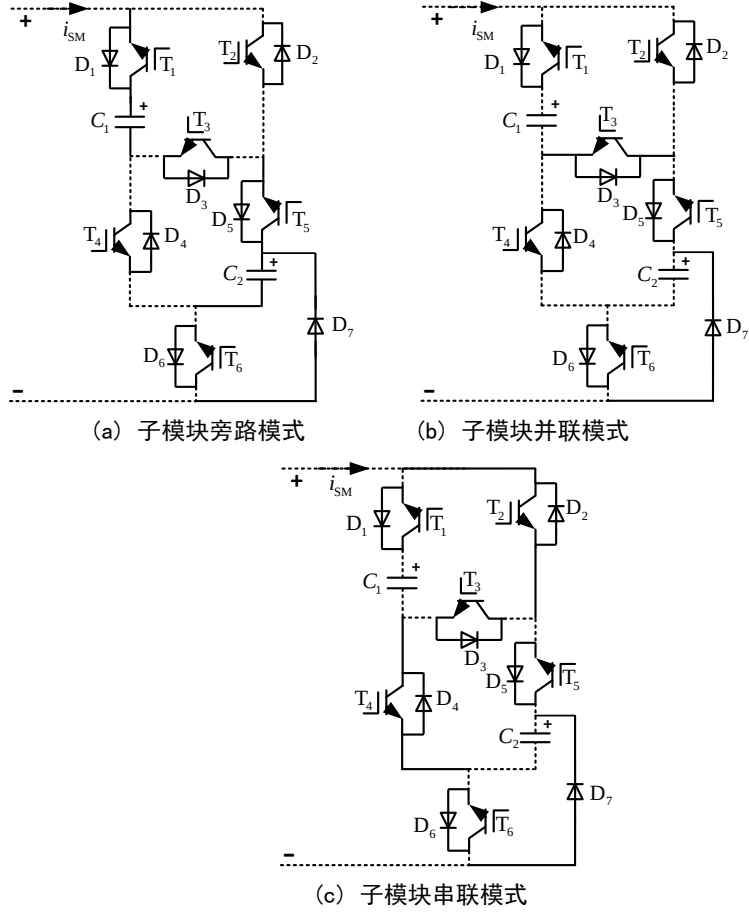


图 A1 正常运行子模块 3 种工作模式

Fig.A1 Three operation modes of SM during normal conditions

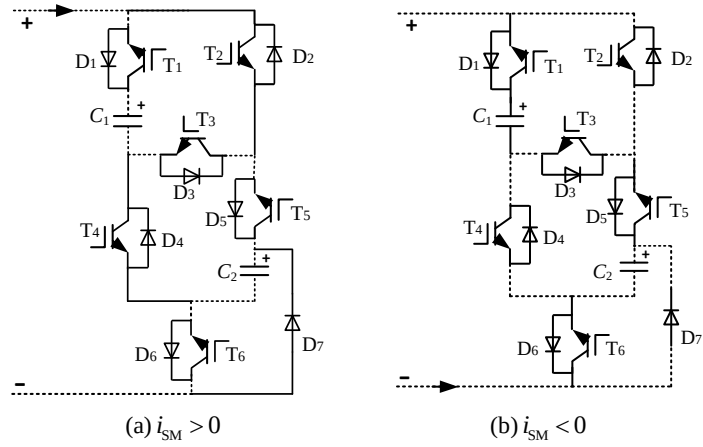


图 A2 故障期间子模块电流流向

Fig.A2 Current path of LSCCSM during fault period