DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.4.41 **中图分类号**：TM46 **文献标志码**：A

一种具备自均压和直流故障清除能力的改进型 MMC

刘文君，王怡苗，秦志文，陈根旭，赵蔚桐，王要强
(郑州大学电气与信息工程学院，郑州 450001)

摘要：基于模块化多电平变换器 MMC(modular multilevel converter)的高压直流输电系统，存在半桥子模块拓扑不能清除直流故障电流、子模块电容电压排序计算量过大、对传感器实时性要求高等问题。针对这些问题，提出了 1 种兼具故障电流自清除和模块电容自均压能力的改进型全桥 MMC。通过在相邻全桥子模块的同一侧接入 1 个由 2 个 IGBT 反向串联组成的支路，为相邻子模块电容直接并联提供路径，并分析了其在不同状态下的运行模式，设计了相应的动态分配均压控制策略。通过加入电容并联运行状态，改进型全桥 MMC 可在无需监测子模块电容电压的前提下，实现同一桥臂不同子模块电容之间的电容自均压，有效降低了控制器的计算复杂程度及计算量。同时，电容的并联投入也可减少单个电容的出力，从而降低电容电压波动。RT-LAB 仿真验证表明，采用所提均压控制策略可同时实现直流故障电流自清除和子模块电容自均压。

关键词：模块化多电平变换器；改进型全桥子模块；自均压；直流故障

Improved MMC with Voltage Self-balancing and DC Fault Clearing Capabilities

LIU Wenjun, WANG Yimiao, QIN Zhiwen, CHEN Genxu, ZHAO Yutong, WANG Yaoqiang
(School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001,China)

Abstract: HVDC transmission systems based on modular multilevel converters (MMCs) face many problems, e.g., the DC fault current cannot be cleared by a half-bridge submodule topology, and the submodule capacitor voltage sequencing requires too much computation and high real-time performance of sensors. Aimed at these problems, a modified full-bridge MMC with fault current self-clearing and module capacitor voltage self-balancing capabilities is proposed in this paper. By accessing a branch consisting of two IGBTs in reverse series on the same side of the adjacent full-bridge submodule, a path is provided for directly connecting the capacitors of adjacent submodules in parallel. In addition, its operating modes in different states are analyzed, and the corresponding dynamic distribution voltage balancing control strategy is designed. By adding the parallel operation state of capacitors, the modified full-bridge MMC can realize voltage self-balancing between the capacitors of different submodules on the same bridge arm without monitoring the submodule capacitor voltage, thus effectively reducing the complexity and calculation amount of the controller. Meanwhile, the parallel input of capacitors can also reduce the output from individual capacitors, thereby reducing the capacitor voltage fluctuations. Finally, the simulation results in RT-LAB show that the DC fault current self-clearing and submodule capacitor voltage self-balancing can be realized simultaneously by using the proposed voltage balancing control strategy.

Keywords: Modular multilevel converter (MMC); modified full-bridge submodule; voltage self-balancing; DC fault

模块化多电平变换器 MMC(modular multilevel converter)以其输出电压谐波含量低、电磁干扰少和模块化配置易于扩展等优点，被广泛应用于高压直流输电 HVDC(MMC-high-voltage direct current)领域[1-4]。同时，MMC 特殊的结构也带来了诸多特有的技术问题。

收稿日期：2024-02-02；**修回日期**：2024-03-06；**录用日期**：2024-04-01；**网络首发日期**：2024-05-14

MMC 依靠桥臂内子模块电容的存储能量，实现交直流能量的转换，子模块电容电压的均衡程度直接影响变换器性能，进而决定系统能否平稳运行。现有的子模块均压方法可分为 2 类。一类是改进子模块电容电压的排序算法，文献[5]根据电容电压大小和桥臂电流方向给子模块分配脉冲信号；文献[6]提出了 1 种基于改进冒泡排序算法和平均值法的混合控制策略；文献[7]提出了 1 种基于最大电容电压偏差变化趋势的固定轮换均压策略。这些方法虽不同程度地降低了排序运算量，但仍需对子模块电容电压进行监测，对数据采集的实时性和准确性的要求仍然存在。另一类则是通过对子模块拓扑进行改进，文献[8]提出了具备自均压能力的 MMC 拓扑，使得 MMC 在不依赖于外加均压控制的情况下，自动实现子模块电容电压的均衡；文献[9]通过在相邻子模块的电容上串接钳位二极管完成模块间电容的能量传递，但是带来了相内电压平衡问题；文献[10]通过将 2 个全桥子模块 FBSM(full-bridge submodule)移位组合，推导了 1 种具备自均压能力的新型 MMC 子模块。上述方法无需外加均压控制即可实现模块内的电容电压平衡，但是会导致电路复杂。

MMC 直流输电系统的直流侧短路故障处理是当前亟需解决的另一大问题，常用的半桥子模块 HBSM(half-bridge submodule)拓扑在闭锁后，由于二极管的续流作用，无法切断短路故障电流[11]，解决这一问题的常用方法是采用具有直流故障清除能力的 MMC 子模块拓扑[12-13]。其中，FBSM[14-15]相比于 HBSM 多了 1 个负投入状态，且控制特性灵活，具有工程应用价值。

由上述分析可知，子模块拓扑的改进可以使 MMC 具备直流故障电流自清除能力或模块电容电压自均衡能力。本文通过对 FBSM 进行改进，提出了 1 种改进型全桥子模块 M-FBSM(modified FBSM)，其无需对子模块电容电压进行监测即可实现电容电压的自均衡，同时兼具直流故障清除能力。本文首先分析 M-FBSM 的运行模式及自均压特性，设计动态分配均压控制策略，详细介绍 M-FBSM 桥臂内部的自均压功能流程。接着分析 M-FBSM 故障电流清除机理，最后通过在 RT-LAB 仿真实验平台搭建仿真模型,验证了本文所提 M-FBSM 拓扑兼具故障电流自清除能力和自均压能力。

1 改进的自均压式全桥 MMC 拓扑及其运行模式

全桥 MMC 子模块由 4 个带反并联二极管的绝缘栅双极型晶体管 IGBT(insulated-gate bipolar transistor)和 1 个电容组成。三相 MMC 每相由上、下 2 个桥臂构成，每个桥臂由 N 个子模块与桥臂电感串联而成，每个子模块由电容和开关器件组成，三相 MMC 及 FBSM 拓扑如图 1 所示。图中：U_{dc} 为直流电压；u_A、u_B、u_C 为三相交流侧电压；L 为桥臂电感；u_{pa}、i_{pa}、u_{na} 和 i_{na} 分别为上、下桥臂的电压和电流。MMC 通过桥臂开关执行动作控制子模块的投入和切除，实现交直流输出。

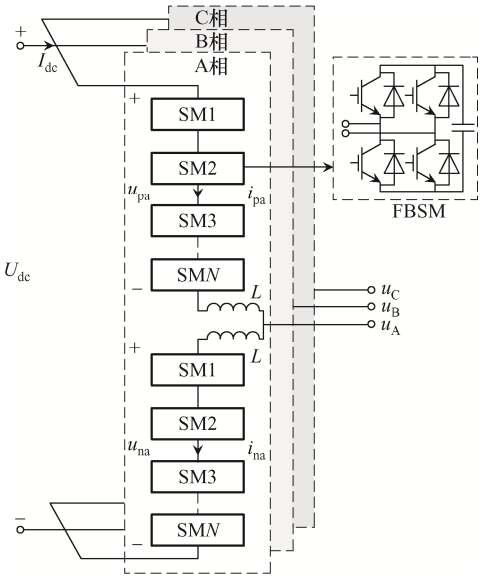


图 1 三相全桥 MMC 拓扑

Fig. 1 Topology of three-phase full-bridge MMC

基于并联 IGBT 开关组型 FBSM，本文提出改进型全桥 MMC 自均压拓扑结构。在相邻 FBSM 中，接入 1 个由 2 个 IGBT 反向串联组成的支路，为相邻子模块电容直接并联提供路径。MMC 中的 1 个桥臂拓扑结构如图 2 所示。

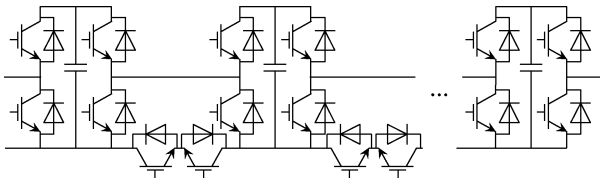
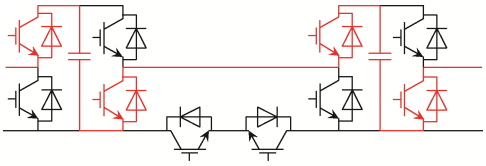


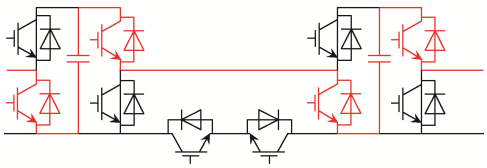
图 2　MMC 中 1 个桥臂的拓扑结构

Fig. 2 Topology of a bridge arm in MMC

并联支路关断，相邻的子模块串联，子模块各开关控制信号与传统全桥型 MMC 完全相同，M-FBSM 可视为 FBSM，但不存在 FBSM 的旁路状态，电流通路如图 3 所示。



(a) 正向投入

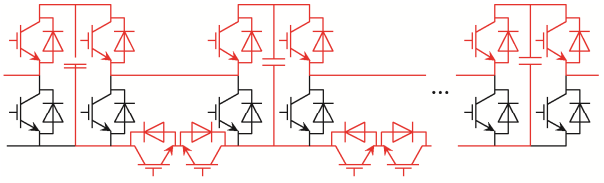


(b) 反向投入

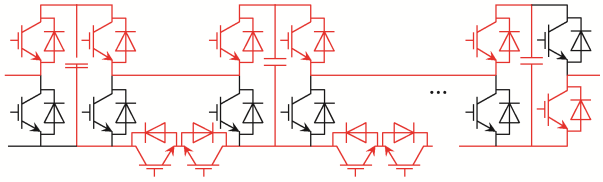
图 3　相邻子模块串联时的电流通路

Fig. 3 Current circuits when adjacent submodules are connected in series

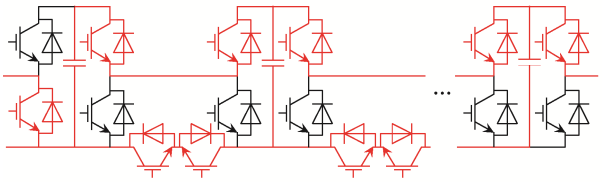
并联支路开通，相邻的子模块并联，并联的子模块定义为 1 个子模块组，同组内外加的 IGBT 即并联支路上的 IGBT 导通，子模块电容并联均压，从而将本来被搁置的电容利用起来，降低单个子模块电容的电压波动。子模块组整体状态由本组首尾 2 个子模块的开关状态决定，分别为旁路、正向投入、反向投入 3 种，其电流通路如图 4 所示。多个子模块组串联组成 MMC 的 1 个桥臂，相邻子模块组之间串联，并联支路关断，通过执行开关动作控制子模块组的投入和切除实现交直流输出，同时并联支路的开关管通断控制着并联支路的开通和关



(a) 旁路



(b) 正向投入



(c) 反向投入

图 4　子模块组的电流通路

Fig. 4 Current circuits of submodule group

断，子模块组的分组方式并不固定。

2　M-FBSM 自均压控制设计

2.1　M-FBSM MMC 桥臂开关函数

设子模块电容投切开关函数为 S，具体为

$$S=\begin{cases}0 & \text{并联/旁路}\\ 1 & \text{正向投入}\\ -1 & \text{反向投入}\end{cases} \tag{1}$$

假设 1 个子模块组中的子模块数为 M，子模块组中间的子模块均为旁路状态，子模块组处于旁路、正向投入、反向投入状态时，其首尾子模块的开关状态分别为

$$\begin{cases}S_1=0,S_2=0,\cdots,S_M=0 & \text{并联/旁路}\\ S_1=0,S_2=0,\cdots,S_M=1 & \text{正向投入}\\ S_1=-1,S_2=0,\cdots,S_M=0 & \text{反向投入}\end{cases} \tag{2}$$

以某一相的 1 个桥臂为例，桥臂电流在每个子模块组内均分，假设第 i 组的子模块数为 $M_i(i=1,2,\cdots,n)$，桥臂电流与子模块电容电压的关系可表 示为

$$i_{\text{arm}}=M_iC\frac{\mathrm{d}U_i}{\mathrm{d}t}\qquad i=1,2,\cdots,n \tag{3}$$

式中：i_{arm} 为桥臂电流；C 为子模块电容；U_i 为电容电压。

由式(3)可知，桥臂电流大小是第 i 组子模块电压微分的 M_i 倍，即每个投入的子模块电容上流过

的电流为桥臂电流的 $1/M_i$，减少了电容电压波动，直接改善了均压效果。

2.2 调制策略和均压控制

与传统 MMC 相比，M-FBSM 仅在子模块级拓扑上有所改动，传统 MMC 的调制策略仍适用于 M-FBSM。最近电平逼近调制 NLM(nearest level modulation)方法是工程中常采用的方法之一，它的工作原理是从变换器所能生成的电平中选择与调制波采样值最接近的作为控制指令，然后触发相应数量的子模块产生所需的电平输出。本文基于 NLM 设计 M-FBSM 的均压控制策略和子模块投切方法。

设电平数指令为 n，当 $0<n<N$ 时，为改善均压效果，应实现尽量多的子模块电容并联，因而优先将所有子模块分组并使每组包含的子模块数尽可能相等。基于平均化的思想[16]，本文设计了 M-FBSM MMC 的均压控制策略，流程如图 5 所示。

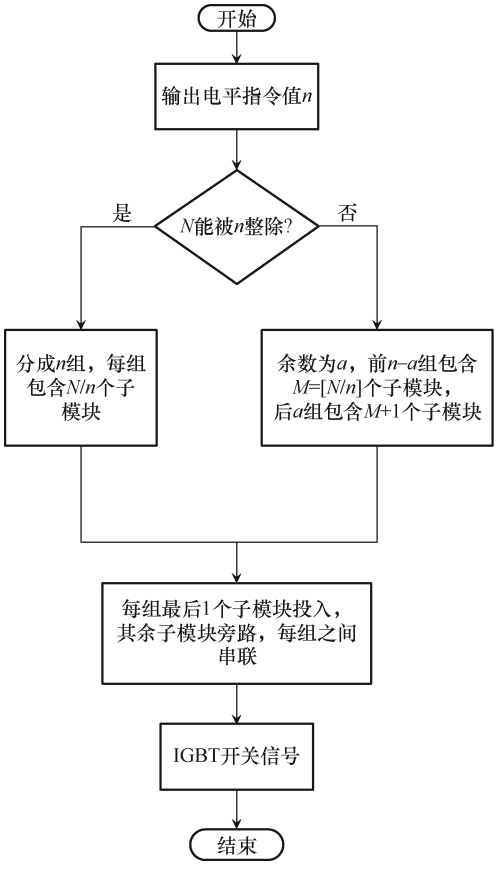


图 5 均压控制流程

Fig. 5 Flow chart of voltage-balancing control

根据电平数指令 n 的变化，动态分配均压控制方法的具体步骤如下。

(1)检测 n 的变化，n 即为应分成的组数，每组应包含的子模块个数为 M，$M=\lfloor N/n \rfloor$，式中，$\lfloor\ \rfloor$ 为向下取整函数。

(2)判断 N 是否能被 n 整除。

(3)若能整除，则从桥臂首端起每 M 个子模块分为 1 组，每组输出 1 个电平；若不能整除，则设余数为 a，n 组中有 a 组的子模块个数应加 1，即 a 组的子模块个数为 $M+1$，$n-a$ 组的子模块个数仍为 M。

(4)每组最后 1 个子模块投入运行，其余子模块旁路运行，每组之间串联，得到子模块的开关触发信号。

上述动态分配均压是在 $n>0$ 的情况下，而当 $n<0$ 时，子模块的分组由其绝对值$|n|$决定，将子模块原本的正向投入改为负向投入(如图 3 所示)，其余过程仍如上述步骤，桥臂即可输出负电平。同时由于 n 的动态变换，1 个周期内，子模块的分组方式处于动态变化中，并联的子模块电容个数在不断变化，1 个桥臂内的各子模块电容均有可能并联，因此可达到桥臂内电容均压的效果。

下面以 13 电平(N=12)MMC 为例进行解释。如图 5 所示，n=2 时，N 可被整除，$M=\lfloor 12/2 \rfloor=6$，子模块分成 2 组，每组 6 个子模块；n=3 时，$M=\lfloor 12/3 \rfloor=4$，可被整除，子模块分成 3 组，每组 4 个子模块；n=4 时，$M=\lfloor 12/4 \rfloor=3$，可被整除，子模块分成 4 组，每组 3 个子模块；n=5 时，$M=\lfloor 12/5 \rfloor=2$，不可被整除，a=2，子模块分成 5 组，其中 2 组包含 3 个子模块，剩余 3 组包含 2 个子模块；n=6 时，$M=\lfloor 12/6 \rfloor=2$，可被整除，子模块分成 6 组，每组 2 个子模块；以此类推，最后子模块的分组示例如图 6 所示。

由图 5 可知，1 个控制周期内，子模块开关次数为 N，电平指令数为 n，即分组标记次数为 n，处理器最多执行 3 次命令，包括 1 次判断、2 次四则运算，设 T 为动态分配均压的计算复杂度的综合指标，其计算公式为

$$T = N+n+3 \tag{4}$$

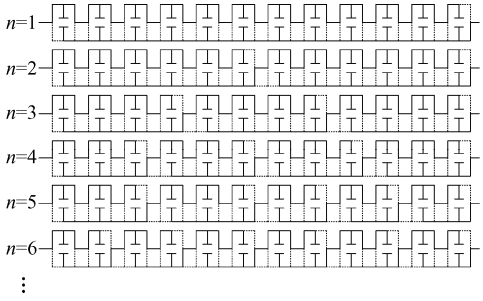


图 6　均压控制示例

Fig. 6 Example of voltage-balancing control

每个工频周期内 n 的平均值为 $0.5N$，则平均计算复杂度为

$$T = 1.5N + 3 \tag{5}$$

由式(5)可知，基于 M-FBSM 的均压控制计算复杂度是与电平数有关的一次函数，与电平数呈线性关系，与传统排序均压计算复杂度的非线性增长相比，具有显著优势。

本文所提出的动态分配均压方法无需对电容电压进行排序，依靠控制 IGBT 的通断可使并联支路开通和关断，从而达到使子模块电容并联均压的目的，因而无需监测电容电压，可减少对传感器的实时性要求。子模块分组方式随着电平数 n 的变化而动态变化，1 个桥臂内的各子模块电容均有机会并联，这实现了整个桥臂内的电容均压。然而，研究主要集中在桥臂内部的自动均压，桥臂间的电压均衡需进一步研究，所提动态分配均压方法具有一定的局限性。

3　直流故障清除及经济性分析

3.1　直流故障电流自清除

发生直流双极短路故障时，子模块闭锁，电流只能通过二极管续流，M-FBSM 并联支路的 2 个二极管反向串联，无法导通，M-FBSM 旁路状态不再存在，M-FBSM 可视为 FBSM。交流系统通过二极管向直流侧馈入能量。以闭锁后 A 相电压最高、C 相电压最低为例，故障电流流过 A 相上桥臂和 C 相下桥臂，该过程如图 7 所示，故障回路电压方程可表示为

$$u_{AC} = 2N(U_d + U_0) + 2u_z \tag{6}$$

式中：u_{AC} 为交流侧 AC 两相线电压的瞬时值；U_d 为二极管电压之和；U_0 为子模块电容电压；u_z 为桥臂阻抗电压。

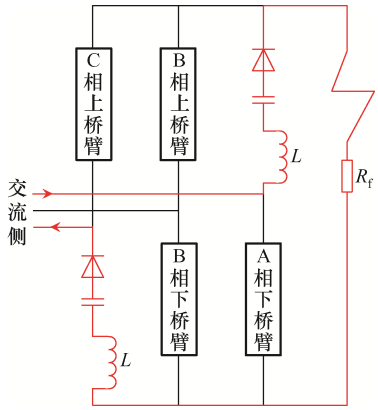


图 7　MMC 闭锁后故障电流通路

Fig. 7 Circuit of fault current after MMC blocking

正常运行状态下，设置调制度为 1，子模块电容电压与交直流电压关系可表示为

$$U_{dc} = 2NU_0 \tag{7}$$

$$U_{ac} = \frac{1}{2}U_{dc} \tag{8}$$

式中：U_{dc} 为 MMC 直流电压；U_{ac} 为交流相电压峰值。

由式(6)、式(7)和式(8)可得

$$U_d = \frac{1}{2N}(u_{AC} - U_{dc} - 2u_z) \tag{9}$$

分析式(9)可知 U_d<0，子模块中的二极管承受反向电压而截止，故障电流衰减为 0，交流侧停止向直流侧馈入能量。

3.2　经济性

如图 2 所示，M-FBSM 是通过在相邻 FBSM 中接入 1 个由 2 个 IGBT 反向串联组成的支路改进而来。变换器的运行损耗主要由各个子模块的 IGBT 和二极管产生，包括器件的开关及恢复损耗和器件导通时的通态损耗[17]。

设单个 IGBT 的损耗为 p_1，单个二极管的损耗为 p_2，则有

$$p_1 = a_1 I + b_1 I^2 \tag{10}$$

$$p_2 = a_2 I + b_2 I^2 \tag{11}$$

式中，a_1、b_1、a_2 和 b_2 分别为参量的权重系数，根据不同情况取不同的值。

M-FBSM 虽然较之 FBSM 增加了由 2 个 IGBT 组成的并联支路，但是由于并联支路的分流作用，使得流过并联回路开关器件的电流减小，设流过并联支路的电流为 $kI(0<k<1)$，则并联回路如图 8 所示。

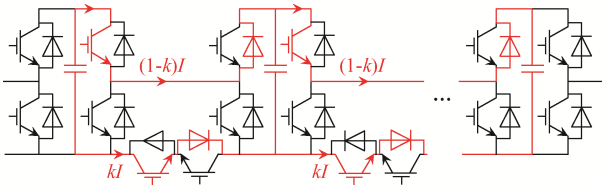


图 8 M-FBSM 并联回路电流通路

Fig. 8 Current circuit of M-FBSM parallel loop

由第 1 节子模块运行方式分析可知，当子模块数 $N>1$、相邻子模块串联运行时，开关信号与 FBSM 完全相同，因而器件损耗也完全相同；相邻子模块并联运行时，并联支路开通，并联回路的开关器件损耗为

$$\begin{aligned}\Delta E_1 = {} & p_1 kI + p_1[(1-k)I] + p_2 kI + \\ & p_2[(1-k)I] = a_1 I + b_1(2k^2 - 2k + 1)I^2 + \\ & a_2 I + b_2(2k^2 - 2k + 1)I^2\end{aligned} \tag{12}$$

M-FBSM 相邻模块并联时对应 FBSM 的子模块旁路时的运行状态，其损耗为

$$\Delta E_2 = p_1 + p_2 \tag{13}$$

分析式(12)和式(13)可知，$2k^2-2k+1<1$，$\Delta E1<\Delta E2$，因此并联回路的开关器件损耗小于 1 个 IGBT 和 1 个二极管的损耗。输出相同电平数时，M-FBSM 的器件损耗小于 FBSM 的器件损耗。

4 仿真验证

为了验证本文所提出的 M-FBSM 自均压的有效性及其直流故障自清除能力，本文在 RT-LAB 仿真实验平台搭建了十一电平基于 M-FBSM 的 MMC-HVDC 系统仿真模型，系统设置的具体仿真参数见表 1。

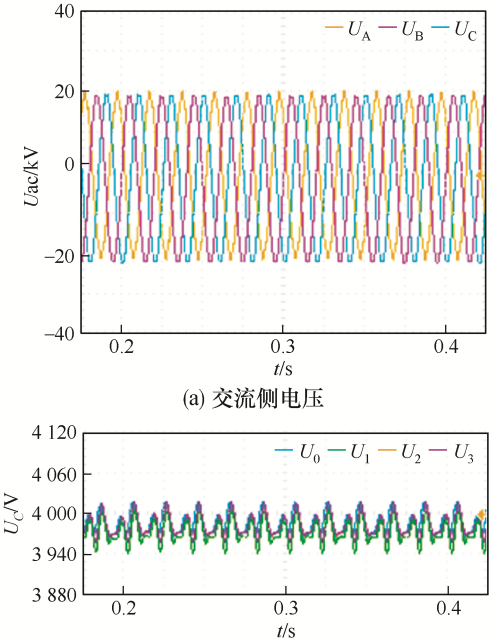
表 1 MMC-HVDC 系统参数

Tab. 1 Parameters of MMC-HVDC system

参数	数值
直流侧电压/kV	40
子模块电容额定电压/kV	4
子模块电容/mF	6
变换器桥臂电感/mH	1
桥臂子模块数	10

4.1 正常运行模式

正常运行时，交流侧输出电压波形为十一电平阶梯波，如图 9(a)所示，所提出子模块能够有效完成交直流能量变换。图 9(b)为 M-FBSM MMC 一相上桥臂中 5 个子模块的电容电压。



(a) 交流侧电压

(b) M-FBSM子模块电容电压

图 9 M-FBSM 正常运行时波形

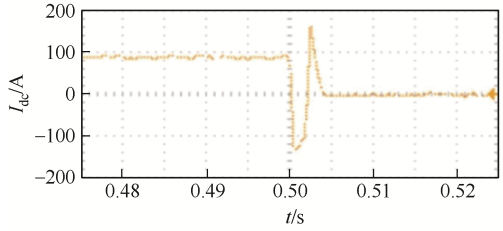
Fig. 9 Waveforms of M-FBSM during normal operation

由图 9(b)可知，子模块电容电压在 4 kV 上下波动，电容有效地平衡到其额定值，纹波约为 1 %，验证了 M-FBSM 具备自均压的特性。在动态分配均压控制下，通过相对简单的计算及无需对子模块电容电压进行监测，能够达成良好的均压效果，有效降低了控制器的计算复杂度，节省了均压造成的二次成本。

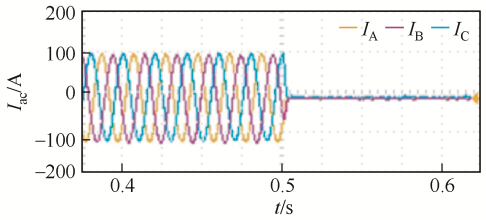
4.2 故障电流清除特性

设置 t=0.5 s 时发生直流侧双极短路故障，考虑

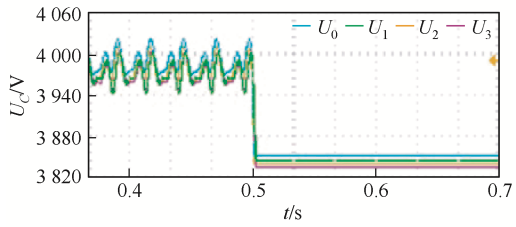
系统检测延时，在 2 ms 后闭锁所有 IGBT，图 10 为 M-FBSM MMC 系统故障后仿真结果。由图 10(a)可知，发生直流侧短路故障后，电流方向迅速改变，由原来的直流侧流向交流侧变为由交流侧流向直流侧故障处，子模块电容放电，交流侧会向直流侧馈入能量，直流侧电流急剧上升，子模块电容电压迅速下降。当 t=0.502 s 时，闭锁所有 IGBT，交流侧三相电流降为 0，子模块电容通过二极管反向投入，电容处于充电状态，由于二极管的钳位作用及 M-FBSM 的均压特性，子模块电容电压同步保持定值，同时故障电流迅速下降为 0，验证了 M-FBSM 具有直流故障电流自清除能力。



(a) 直流侧电流



(b) 交流侧电流



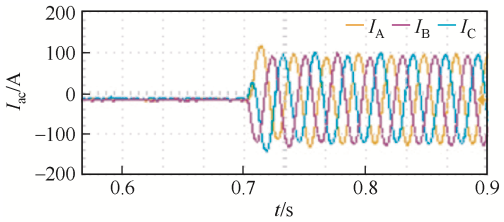
(c) M-FBSM子模块电容电压

图 10　M-FBSM MMC 系统故障时波形

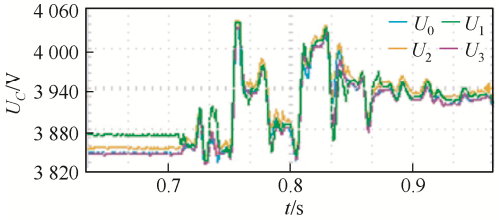
Fig. 10 Waveforms of M-FBSM MMC system when fault occurs

直流故障持续 0.2 s 后，在 t=0.7 s 时解锁变换器。系统恢复运行后的仿真结果如图 11 所示。

由图 11 可知，在解锁后故障恢复过程中，交流侧电流短暂振荡后迅速恢复；子模块电容电压在 0.1 s 后恢复到正常运行状态，恢复过程中，多个子模块电容电压保持均衡，变化趋势同步，验证了本文所提出均压控制方法在暂态过程中具有良好的适用性。



(a) 交流侧电流



(b) 子模块电容电压

图 11　M-FBSM MMC 系统故障恢复后的波形

Fig. 11 Waveforms of M-FBSM MMC system after fault recovery

5　结语

本文针对 MMC-HVDC 面临的两大问题，即直流故障和电容电压不均衡，在传统 FBSM 的基础上进行改进，提出了 1 种具备直流故障自清除能力和自均压能力的改进 MMC 拓扑。通过增加少量开关器件，相比 FBSM 增加了并联支路，针对其并联运行模式，设计了动态分配均压策略。与采用排序均压控制或修改拓扑电路的 MMC 拓扑相比，其能在无需对电容电压信息进行监测排序、拓扑修改简单不会造成复杂电路的基础上，保证子模块电容良好的均压效果，提高系统可靠程度，具有较高的研究价值。

参考文献：

[1] Tavakoli S D, Prieto-Araujo E, Gomis-Bellmunt O. AC fault ride through in MMC-based HVDC systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(4):

2775-2786.

[2] Lin Hongfei, Xue Tao, Lü Jing, et al. Impact of different AC voltage control modes of wind-farm-side MMC on stability of MMC-HVDC with offshore wind farms [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(5): 1687-1699.

[3] Yin Taiyuan, Wang Yue, Sun Jie, et al. Impedance-based characterization of positive-negative sequence separation and its effects on MMC-HVDC stability [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(4): 4395-4412.

[4] Zeng Wu, Li Rui, Huang Lei, et al. Approach to inertial compensation of HVDC offshore wind farms by MMC with ultracapacitor energy storage integration [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(12): 12988-12998.

[5] 谢佩韦, 黎曙, 朱磊. 一种基于电容电压排序的 MMC 均压策略[J]. 船电技术, 2023, 43(8): 65-68.
Xie Peiwei, Li Shu, Zhu Lei. A voltage balancing scheme of MMC based on capacitor voltage sequencing [J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2023, 43(8): 65-68. (in Chinese)

[6] 张婕, 曾国辉, 赵晋斌, 等. 基于改进冒泡排序的模块化多电平换流器电容电压均衡策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 92-99.
Zhang Jie, Zeng Guohui, Zhao Jinbin, et al. Modular multilevel converter capacitor voltage balancing strategy based on improved bubble sorting [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 92-99. (in Chinese)

[7] 肖强, 朱晟毅, 蒲羿, 等. 一种模块化多电平换流器电压均衡改进策略[J]. 电源学报, 2021, 19(5): 59-66.
Xiao Qiang, Zhu Chengyi, Pu Yi, et al. Improved voltage balancing strategy for modular multilevel converter [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(5): 59-66. (in Chinese)

[8] Goetz S M, Peterchev A V, Weyh T. Modular multilevel converter with series and parallel module connectivity: Topology and control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 203-215.

[9] Gao Congzhe, Jiang Xinjian, Li Yongdong, et al. A DC-link voltage self-balance method for a diode-clamped modular multilevel converter with minimum number of voltage sensors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2125-2139.

[10] 王琛, 谭开东, 王毅, 等. 具备直流故障清除和自均压能力的 MMC 移位全桥子模块拓扑[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(24): 151-160.
Wang Chen, Tan Kaidong, Wang Yi, et al. Topology of MMC oblique-connection full-bridge sub-module with capability of DC fault clearing and voltage self-balancing [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(24): 151-160. (in Chinese)

[11] Li Bin, Liu Haijin, Wen Weijie, et al. DC faults ride-through and fast recovery of MVDC system based on improved HB-MMC [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(3): 3056-3066.

[12] 张熙, 姚江, 钟启濠, 等. 新型串联式混合桥臂 MMC 分析研究[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 88-95.
Zhang Xi, Yao Jiang, Zhong Qihao, et al. Analysis of novel series-connected hybrid-leg MMC [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 88-95. (in Chinese)

[13] 束洪春, 邵宗学, 江耀曦, 等. 具备闭锁和非闭锁模式抑制直流故障电流的新型模块化多电平变换器拓扑[J]. 电工技术学报, 2022, 37(21): 5526-5540.
Shu Hongchun, Shao Zongxue, Jiang Yaoxi, et al. A new modular multilevel converter topology with capability of DC faults clearing under blocking and non-blocking mode [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(21): 5526-5540. (in Chinese)

[14] 李博通, 刘涛, 杨昕陆, 等. 故障自清除型直流配电网新型双极短路故障元件识别方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(17): 4423-4434.
Li Botong, Liu Tao, Yang Xinlu, et al. New fault element identification method of bipolar short-circuit fault in DC distribution network with fault self-clearing [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(17): 4423-4434. (in Chinese)

[15] 杨光源, 周诗嘉, 彭光强, 等. 一种增加辅助子模块的

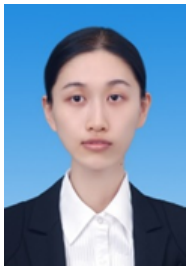
MMC 改进混合调制控制策略[J]. 电源学报，2024, 22(1): 74-82.

Yang Guangyuan, Zhou Shijia, Peng Guangqiang, et al. Improved hybrid modulation strategy for MMC with auxiliary sub-modules [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(1): 74-82. (in Chinese)

[16] 石璐, 赵成勇, 许建中, 等. 并联全桥子模块 MMC 的自均压运行特性研究[J]. 中国电机工程学报，2018, 38(8): 2419-2428.

Shi Lu, Zhao Chengyong, Xu Jianzhong, et al. Research on voltage self-balancing operating characteristics of paralleled full-bridge sub-modules based MMC [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(8): 2419-2428. (in Chinese)

[17] Chen Lvyang, Zhang Xiangyu, Shi Yan, et al. A novel mixture-devices-based submodule for MMC by using low on-state voltage IGCT and high d*i*/d*t* ability IGBT [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(3): 2375-2384.



刘文君

作者简介：

刘文君(1990—)，女，博士，副教授。研究方向：级联多电平变换器，直流微电网暂态分析。E-mail：lwenjun1990@zzu.edu.cn。

王怡苗(1998—)，女，硕士研究生。研究方向：级联多电平变换器。E-mail：wangyimiao@gs.zzu.edu.cn。

秦志文(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：级联多电平变换器。E-mail：qzw @gs.zzu.edu.cn。

陈根旭(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：级联多电平变换器。E-mail：chengenxu@gs.zzu.edu.cn。

赵蔚桐(2003—)，女，本科。研究方向：级联多电平变换器。E-mail：zwt3058744144 @stu.zzu.edu.cn。

王要强(1982—)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：电力电子与电力传动，可再生能源发电，新能源电力系统，电力系统分析与控制，综合能源运行与优化。E-mail：WangyqEE@zzu.edu.cn。

(责任编辑：孙美菊)