DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.6.49 **中图分类号**：TM46 **文献标志码**：A

双桥臂复用型 MMC 拓扑及其调制策略

谈竹奎[1]，李继凯[2]，冯起辉[1]，李 杨[3]，张子亮[2]，刘宗胜[2]
(1.贵州电网有限责任公司电力科学研究院，贵阳 550002；2.许继电气股份有限公司，
许昌 461000；3.贵州送变电有限责任公司，贵阳 550002)

摘要：为满足模块化多电平换流器 MMC (modular multilevel converter)轻型化设计的需求，在单桥臂复用型 MMC 即 SAM-MMC (single-arm multiplexing MMC)的基础上，总结了桥臂复用型 MMC 的统一结构，提出了双桥臂复用型 MMC 即 DAM-MMC (dual-arm multiplexing MMC)，并设计了桥臂切换开关结构、调制策略及复用模式低压切换策略。DAM-MMC 三相共需要 4*N* 个子模块，其子模块利用率为 75%。通过分析桥臂能量波动，DAM-MMC 复用桥臂电容值与 SAM-MMC 相比降低了约 31.9%，上、下桥臂电容容值降低了约 11.5%，进一步减小了换流器的体积、质量及降低了成本。基于样机实验，验证了 DAM-MMC 拓扑结构、参数设计及所提策略的可行性。

关键词：模块化多电平换流器；拓扑结构；轻型化；桥臂复用

Topology of Dual-arm Multiplexing MMC and Its Modulation Strategy

TAN Zhukui[1], LI Jikai[2], FENG Qihui[1], LI Yang[3], ZHANG Ziliang[2], LIU Zongsheng[2]
(1. Electric Power Research Institute, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China; 2. Xuji Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 3. Guizhou Power Transmission and Transformation Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: To meet the requirement of lightweight design for modular multilevel converters (MMCs), the unified structure of arm-multiplexing-type MMCs based on a single-arm multiplexing MMC (SAM-MMC) is summarized. Then, a dual-arm multiplexing MMC (DAM-MMC) is proposed, and the corresponding structure of arm selection switch, modulation strategy and low-voltage switching strategy in multiplexing mode are designed. The DAM-MMC requires a total of 4*N* in three phases, with a submodule utilization rate of 75%. Through the analysis of arm energy fluctuations, the capacitance in multiplexing arms of the DAM-MMC is reduced by about 31.9% compared with that of the SAM-MMC, and the capacitance in upper and lower bridge arms is reduced by about 11.5%, which further reduces the volume, weight and cost of the converter. Based on an experimental prototype, the feasibility of the DAM-MMC topology, parameter design and proposed strategies was verified.

Keywords: Modular multilevel converter (MMC); topology; lightweight; arm multiplexing

模块化多电平换流器 MMC (modular multilevel converter)因具有电能质量高、控制灵活及可扩展性强等优势，成为目前最具应用前景的换流设备之一，且其近年来被广泛应用于大型海上风电场[1-2]。然而，大量的电力电子器件和电容对换流站设备的体积、质量及占地面积均提出了较高要求，故需对 MMC 进行轻型化设计以优化大规模海上工程建设的成本，降低工程难度[3-4]。目前 MMC 的轻型化研究主要集中在 2 个方向：减小子模块的电容值[4-6]和优化换流器的拓扑结构[7]。

换流器拓扑结构的优化设计是当下实现轻型

收稿日期：2024-03-29；**修回日期**：2024-04-30，2024-05-20；
录用日期：2024-05-28；**网络首发日期**：2024-08-07
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2022YFE0205300)；中国南方电网公司重点科技资助项目(GZKJXM20220041)
This work is supported by National Key Research and Development Program of China under the grant 2022YFE0205300; Key Technology Projects of China Southern Power Grid Co., Ltd. under the grant GZKJXM20220041

化的重要突破方向。文献[8]通过结合两电平电压源换流器 VSC(voltage source converter)和 MMC 拓扑的特点，提出了混合多电平换流器拓扑，其由级联子模块和器件串联的开关组成，实现了用更少的子模块获得多电平输出和高耐压能力；文献[9-10]提出并分析了桥臂交替导通多电平换流器 AAC (alternate arm multilevel converter)，其桥臂结构由全桥链式结构 FBCLs (full-bridge chain links)和器件串联开关组成，在相同电压等级及输出电平的条件下，交替导通的开关可以使相单元的子模块配置数量为传统 MMC 的 1/2。然而，AAC 只能在 π/4 的固定调制比下保持能量平衡，并且直流侧需要滤波器来平滑电流中的六脉冲纹波。混合级联多电平换流器 HCMC (hybrid cascaded multilevel converter)是轻型化设计的一种创新型结构，它在换流器的交流侧引入 FBCL 作为有源滤波器来修饰输出的电压，在相同直流侧电压的前提下，子模块和电容的数量仅为传统 MMC 的 1/4[11]。但这类结合了传统 VSC 思想的轻型化拓扑均需要大量串联的全控型器件，对全控电力电子器件本体制造及其在高压大容量场景下的串联能力要求较高，且由于减少了子模块数量，其容量扩展性也同时被降低。单桥臂复用型 MMC 即 SAM-MMC (single-arm multiplexing MMC)[12] 基于分时复用思想，并通过每相引入一组桥臂切换开关的方式，将相单元划分成 3 个桥臂，每个桥臂包含 $N/2$ 个子模块，并通过控制桥臂切换开关的状态，中间桥臂会依据调制需求周期地复用于上桥臂或下桥臂[12]。与传统 MMC 相比，子模块利用率由 50.0%提高到了 66.7%，电容数量减少了 $1.5N$ 个。但文献[12]所提 SAM-MMC 仅提出并分析了单桥臂复用结构，未分析各桥臂内部的能量分布与电容值需求，拓扑存在进一步优化的空间。

本文首先对复用型 MMC 的统一结构进行了描述与定义，给出了复用型 MMC 桥臂数量及对应子模块数的计算方法。其次，针对 SAM-MMC 电容参数难以优化的问题，将复用桥臂数量增至 2 个，提出了双桥臂复用型 MMC 即 DAM-MMC (dual-arm multiplexing MMC)，并设计了满足各种运行模式耐压需求的桥臂切换开关。接着，介绍了相单元复用工作模式，给出了可以减少串联器件开通关断一致性需求的低压切换策略和改进的最近电平逼近调制策略。然后，分析了传统 MMC、SAM-MMC 和 DAM-MMC 桥臂能量波动的特点及最低电容值，并进行了经济性分析。最后，搭建 DAM-MMC 实验样机，对所提拓扑结构及相关控制策略的有效性进行了验证分析。

1 DAM-MMC 拓扑结构

1.1 复用型 MMC 统一结构

桥臂复用型 MMC 基于分时复用思想，根据调制需求控制桥臂切换开关状态，使得公共桥臂周期地归于等效上桥臂或下桥臂，以提供足量的子模块。SAM-MMC 的拓扑结构如图 1(a)所示，桥臂复用的概念可以进一步扩展，构建具有多个复用中桥臂的相单元结构，如图 1(b)所示。

多桥臂复用型 MMC 的相单元由 1 个上桥臂，M 个复用中桥臂及 1 个下桥臂组成，相当于共包含 M+2 个桥臂，桥臂电感串联于上、下桥臂。通过开通其中 1 个桥臂切换开关，可以将相单元划分为等效上、下桥臂，保证桥臂均有足量的子模块完成调制。当 M 个中桥臂全部复用到上桥臂或下桥臂时，共计 M+1 个桥臂组成的等效桥臂中应至少有 N 个子模块，其电容 C 的额定电压 $U_C=U_{dc}/N$，用以生成最大电平 $NU_C=U_{dc}$，其中 U_{dc} 为直流侧电压。因此，每个桥臂需要配置 $N/(M+1)$个子模块，则 M+2 个桥臂共计需要的子模块数量为

$$N_p=\frac{M+2}{M+1}N \tag{1}$$

整体来看，除减少了相单元中闲置的子模块之外，复用型 MMC 可以完全等效为传统 MMC，相单元始终投入 N 个子模块，多桥臂复用型 MMC 的子模块利用率可以表示为

$$\lambda=\frac{N}{N_p}=\frac{M+1}{M+2} \tag{2}$$

根据式(2)，随着复用中桥臂数量的增加，相单

元子模块利用率也会提高。但需要增设更多的桥臂切换开关，其数量为 M+1 个，如图 1(b)所示。且当复用中桥臂数量不同时，单个桥臂的子模块数量及其内部能量形式也存在不同。为了研究不同复用中桥臂数量对复用型 MMC 性能的影响，以 DAM-MMC(M=2)为主要研究对象，在内部能量特性及参数优化设计方面，与现有 SAM-MMC 展开对比分析研究，其拓扑结构如图 1(c)所示。

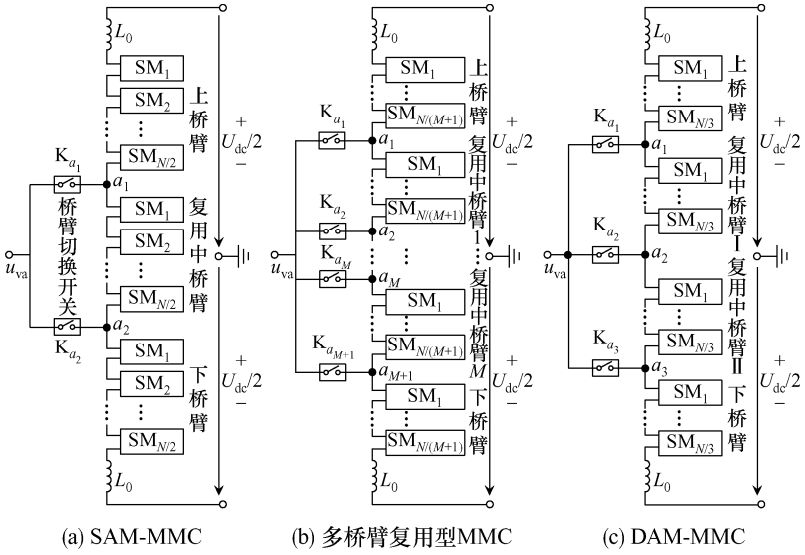


图 1　桥臂复用型 MMC 拓扑结构

Fig. 1 Topology of arm-multiplexing-type MMC

1.2 桥臂切换开关设计

复用工作模式不同，桥臂切换开关所承受的电压大小及方向存在区别。图 2 所示为 DAM-MMC 的 3 种工作模式：模式 1，桥臂切换开关 K_{a_1} 开通，上桥臂单独组成含有 N/3 个子模块的等效上桥臂，复用中桥臂Ⅰ、复用中桥臂Ⅱ及下桥臂共同组成含有 N 个子模块的等效下桥臂；模式 2，桥臂切换开关 K_{a_2} 开通，复用中桥臂Ⅰ和上桥臂组成等效上桥臂，复用中桥臂Ⅱ和下桥臂组成等效下桥臂，2 个等效桥臂中均包含 2N/3 个子模块；模式 3，桥臂切

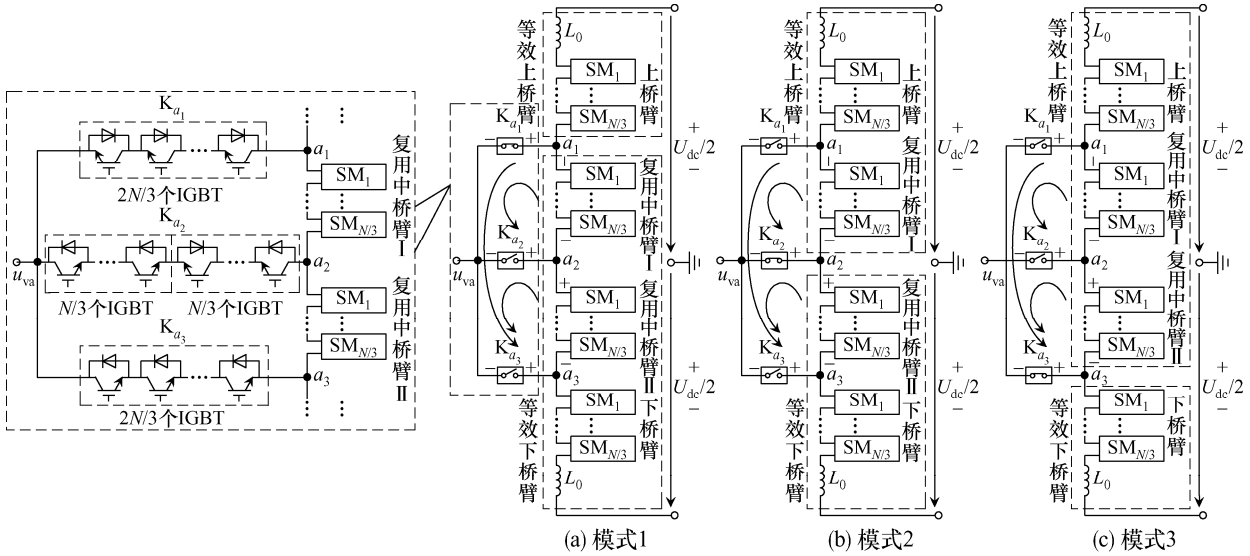


图 2　DAM-MMC 工作模式及开关拓扑结构

Fig. 2 Working modes and switching topology of DAM-MMC

换开关 K_{a_3} 开通，复用中桥臂Ⅰ、复用中桥臂Ⅱ及上桥臂共同组成含有 N 个子模块的等效上桥臂，下桥臂单独组成含有 $N/3$ 个子模块的等效下桥臂。

分析各开关最大承压情况：①开关 K_{a_1}，当相单元工作于模式 3 时，需要单独承担复用中桥臂Ⅰ、复用中桥臂Ⅱ输出的电压；②开关 K_{a_2}，当相单元工作于模式 1 时需要单独承担复用中桥臂Ⅰ输出的电压，当相单元工作于模式 3 时需要单独承担复用中桥臂Ⅱ输出的电压；③开关 K_{a_3}，当相单元工作于模式 1 时，需要单独承担复用中桥臂Ⅰ、复用中桥臂Ⅱ输出的电压。

单个桥臂包含 $N/3$ 个子模块，最大输出电压为 $U_{dc}/3$。结合以上分析：K_{a_1} 需最大承受 $2U_{dc}/3$ 正向电压；K_{a_2} 需承受双向电压，最大值均为 $U_{dc}/3$；K_{a_3} 需最大承受 $2U_{dc}/3$ 反向电压。桥臂切换开关结构如图 2 所示，基于 IGBT 串联的结构满足耐压需求，单个器件的额定电压与子模块 IGBT 参数保持一致，为 U_{dc}/N，所需器件数量如图 2 所示。

2 DAM-MMC 工作原理

2.1 等效电路

DAM-MMC 的 4 个桥臂(上桥臂、下桥臂及复用中桥臂Ⅰ、复用中桥臂Ⅱ)均可以输出 0、U_C、…、$NU_C/3$ 共计 $N/3+1$ 个电平。以 A 相为例，相单元可以视为 4 个相同的可控电压源上桥臂 u_{au}、复用中桥臂Ⅰ u_{aI}、复用中桥臂Ⅱ u_{aII} 和下桥臂 u_{ad} 的串联结构，等效电路如图 3 所示。相单元正、负极性端口与交流端口之间分别为等效上、下桥臂，其电压分别表示为 u_{aeu} 和 u_{aed}，表达式为

$$\begin{cases} u_{aeu}=\dfrac{U_{dc}}{2}-u_{va} \\ u_{aed}=\dfrac{U_{dc}}{2}+u_{va} \end{cases} \tag{3}$$

式中，u_{va} 为期望的调制波电压。

由式(3)可知，以等效桥臂角度分析 MMC 时，其与传统 MMC 的电压表达式保持一致，通过桥臂切换开关的动作切换相单元工作模式，使得等效桥臂包含足量的子模块以满足电压调制需求。

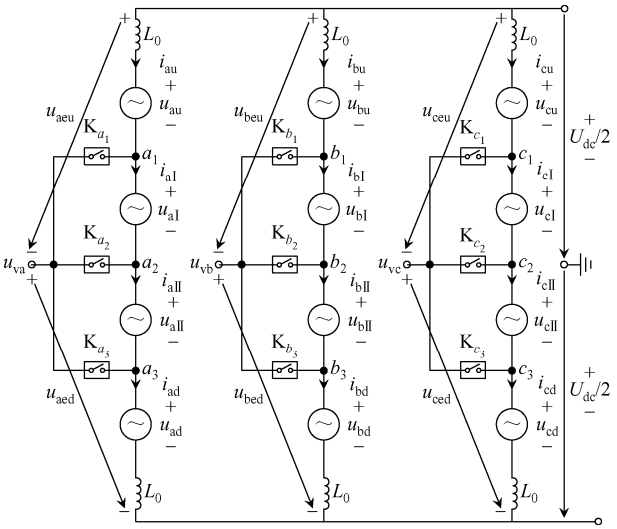


图 3 DAM-MMC 等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of DAM-MMC

2.2 基于复用工作模式的调制策略

本文基于分时复用思想改进传统最近电平逼近调制 NLM (nearest level modulation)策略，以实现 DAM-MMC 的调制功能。由第 1.1 节原理介绍可知，桥臂复用型 MMC 依旧遵循相单元恒定投入 N 个子模块的约束条件，基于其等效电路，通过调制等效上、下桥臂，控制各自的 u_{aeu}、u_{aed} 即可输出 u_{va}。等效上、下桥臂投入的子模块数量 N_{aeu}、N_{aed} 可以表示为

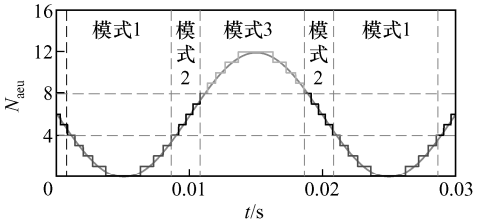
$$\begin{cases} N_{aeu}=\text{round}\left(\dfrac{u_{aeu}^*}{U_C}\right)=\dfrac{N}{2}-\text{round}\left(\dfrac{u_{va}^*}{U_C}\right) \\ N_{aed}=\text{round}\left(\dfrac{u_{aed}^*}{U_C}\right)=\dfrac{N}{2}+\text{round}\left(\dfrac{u_{va}^*}{U_C}\right) \end{cases} \tag{4}$$

式中：上标*表示对应参数的测量值；round(·)为取整函数。

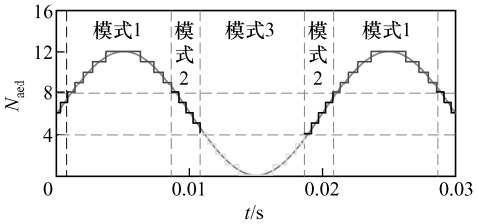
相单元工作模式由等效桥臂投入子模块数量确定。为方便介绍，以如图 4 所示的完整工频周期介绍其工作模式。基于 DAM-MMC 工作原理，式(4)可更新为

$$\begin{cases} N_{\mathrm{aeu}}=\mathrm{round}\left(\dfrac{u^{*}_{\mathrm{aeu}}}{U_C}\right)=\begin{cases} N_{\mathrm{au}} & \text{模式1} \\ N_{\mathrm{au}}+N_{\mathrm{aI}} & \text{模式2} \\ N_{\mathrm{au}}+N_{\mathrm{aI}}+N_{\mathrm{aII}} & \text{模式3} \end{cases} \\ N_{\mathrm{aed}}=\mathrm{round}\left(\dfrac{u^{*}_{\mathrm{aed}}}{U_C}\right)=\begin{cases} N_{\mathrm{aI}}+N_{\mathrm{aII}}+N_{\mathrm{ad}} & \text{模式1} \\ N_{\mathrm{aII}}+N_{\mathrm{ad}} & \text{模式2} \\ N_{\mathrm{ad}} & \text{模式3} \end{cases} \end{cases} \tag{5}$$

式中，N_{au}、N_{aI}、N_{aII}及N_{ad}分别为上桥臂、复用中桥臂Ⅰ、复用中桥臂Ⅱ及下桥臂投入的子模块数。



(a) 等效上桥臂投入子模块数



(b) 等效下桥臂投入子模块数

图 4　DAM-MMC 改进 NLM 策略

Fig. 4 Improved NLM strategy for DAM-MMC

在正常调制过程中，等效桥臂所需投入子模块数量不会跃变，逐个递增至 N 后再逐个递减至 0，且 N_{aeu}与 N_{aed}之和恒为 N，故选取 N_{aeu}用以完成对相单元工作模式的切换。当 N_{aeu}=N/3 且处于递增状态时，相单元需由模式 1 切换至模式 2，即：N_{aeu}更新前为 N/3−1，上桥臂可以独自提供足量的子模块；当前时刻 N_{aeu}为 N/3，模式 1、模式 2 均可满足当前的调制需求；N_{aeu}再次变化后一定为 N/3+1，需要上桥臂与复用中桥臂Ⅰ共同组成等效上桥臂。因此当 N_{aeu}=N/3 时，在保证等效上、下桥臂中均包含足量的子模块的前提下，提前切换相单元的工作模式。同理可得，当 N_{aeu}=2N/3 且处于递增状态时，相单元需由模式 2 切换至模式 3；当 N_{aeu}=2N/3 且处于递减状态时，相单元需由模式 3 切换至模式 2；当 N_{aeu}=N/3 且处于递减状态时，相单元需由模式 2 切换至模式 1。

为均衡子模块电容电压，各桥臂子模块投切状态需要根据相单元工作模式，完成如图 5 所示的电压均衡排序。以相单元工作在模式 1 为例，上桥臂 N/3 个子模块电容电压构成序列 S_1，复用中桥臂Ⅰ、复用中桥臂Ⅱ及下桥臂 N 个子模块电容电压构成序列 S_2。若桥臂电流为正向，子模块电容充电，则优先投入序列中电压较低的子模块；若桥臂电流方向为反向，子模块电容放电，则优先投入序列中电压较高的子模块。相单元工作在模式 2、模式 3 时采用相同的排序逻辑。

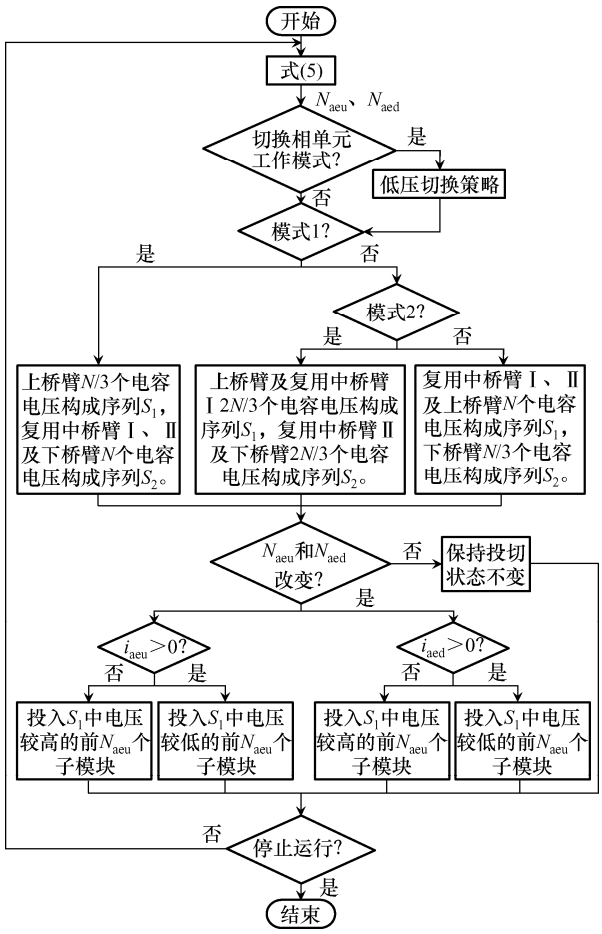


图 5　改进 NLM 的电容电压均衡策略

Fig. 5 Capacitor voltage balancing strategy for improved NLM

为提高 DAM-MMC 在工程中的可行性，进一步优化相单元工作模式的切换流程，提出了低压切换策略。对于由功率开关器件串联组成的桥臂切换开关，在实际动作过程中开通关断的一致性可能存

在偏差，进而导致优先关断和滞后开通的器件会独自承受桥臂电压，使其可能因过压损坏。在 N_{aeu} 等于 $N/3$ 和 $2N/3$ 的时刻，相单元工作模式切换：前者对应开关 K_{a_1} - K_{a_2} 的切换，即切换复用中桥臂Ⅰ所属等效桥臂；后者对应开关 K_{a_2} - K_{a_3} 的切换，即切换复用中桥臂Ⅱ所属等效桥臂。以模式 1 切换到模式 2 为例进行详细介绍，切换策略流程如图 6 所示，其余模式切换原理相同。

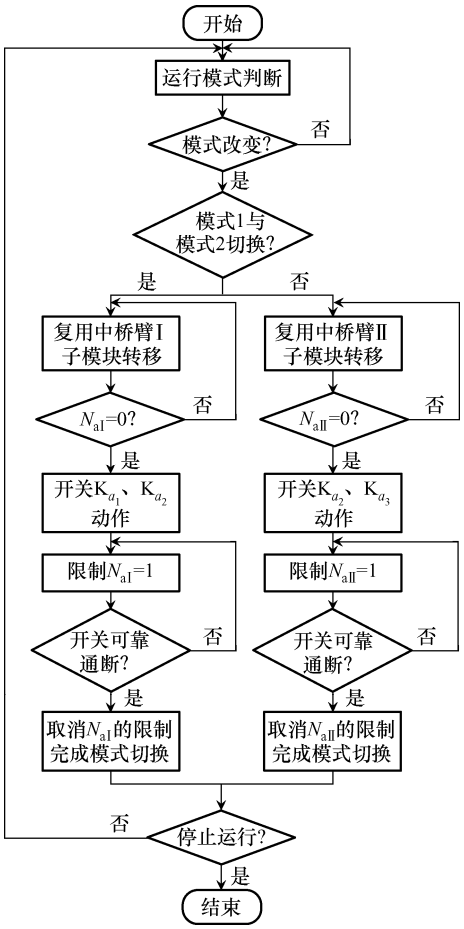


图 6 工作模式低压切换策略

Fig. 6 Low-voltage switching strategy in working mode

切换策略的具体步骤如下。

步骤 1 判断需要切换的工作模式后，将复用中桥臂Ⅰ中的子模块全部旁路，同时将其余桥臂中的子模块全部投入，以满足当前的调制需求，此时开关 K_{a_1} 和 K_{a_2} 两端的电压为 0。

步骤 2 发出开关动作信号，关断 K_{a_1} 的同时开通 K_{a_2}，将复用中桥臂Ⅰ转移至等效上桥臂并转移电流至开关 K_{a_2}。

步骤 3 约束复用中桥臂Ⅰ投入的子模块数量为 1，即使出现由于动作一致性较差导致的优先关断和滞后开通的问题，依然可以保证单个滞后器件承受的电压为 U_C，从而大大降低器件出现过压击穿的风险。

步骤 4 待 K_{a_1} 可靠关断且 K_{a_2} 可靠开通后，不再限制复用中桥臂Ⅰ投入的子模块数量，相单元工作模式完成切换。

2.3 环流抑制方法

目前对桥臂复用型 MMC 的环流抑制研究主要有 2 个方面：基于谐波注入策略的环流抑制方案[13]和桥臂独立调制的环流抑制方案[14]。前者首先通过理论分析确定桥臂内二倍频电流的幅值，通过多目标寻优确定注入谐波的最佳相角，在进一步减小子模块电容值的同时，对环流进行一定程度的抑制；后者通过对每个桥臂独立进行调制并单独进行参数设计，优化相单元能量流动关系，避免传统调制方式中上、下桥臂与复用中桥臂的强能量耦合条件带来的较大二倍频环流。与同等参数下未进行环流抑制的传统 MMC 相比，基于桥臂独立调制策略的 SAM-MMC 有更小的二倍频环流及桥臂电流，在器件选型时具有一定优势。由于桥臂复用型 MMC 的桥臂复用工作模式，二倍频环流的抑制工作与传统 MMC 相比更为复杂，但桥臂复用型的突出优点在于紧凑的设计、较高的能量密度和模块利用率，拓宽了工程应用场景。本文着眼于 DAM-MMC 的结构设计和基础调制策略研究，其环流抑制策略可以采用上述相同的方法进行研究分析。

3 电容优化设计及经济性分析

基于所提出的改进 NLM 方案，假设相单元所有子模块电容电压都被约束在 U_C 附近，且在允许的范围内波动。然而，在某些情况下，由于有限的开关频率、不同的调制策略和模块总数，单个电容电压可能会偏离 U_C。为了避免复杂性，忽略上述因素。电容能量的最大变化 $\Delta E_{C,\max}$ 可表示为

$$\Delta E_{C,\max}=\frac{1}{2}C(U_C+\Delta U_{C,\max})^2-\frac{1}{2}C(U_C-\Delta U_{C,\max})^2=2CU_C\cdot\Delta U_{C,\max} \tag{6}$$

式中，$\Delta U_{C,\max}$ 为电容电压允许波动的最大值，对于传统 MMC 及复用型 MMC，可以设置为 $10\%U_C$[15]。因此对于复用型 MMC，其单个桥臂能量波动的最大值 $\Delta E_{\text{arm,max}}$ 可以表示为

$$\Delta E_{\text{arm,max}}=\frac{2N}{M+1}CU_C\cdot\Delta U_{C,\max} \tag{7}$$

子模块最小额定电容值通常由最大能量波动[16]确定，由式(7)可得，复用型 MMC 桥臂最小额定电容值可以表示为

$$C_{\min}=\frac{(M+1)\Delta E_{\text{arm,max}}}{2NU_C\cdot\Delta U_{C,\max}} \tag{8}$$

基于表 1 给定的系统参数，在保证除桥臂结构外，其余参数均相同的情况下，仿真获得传统 MMC、SAM-MMC 及 DAM-MMC 在额定功率条件下，各桥臂能量波动的最大值，见表 2。当换流器功率条件额定有功功率 P=−1、额定无功功率 Q=1 时，桥臂能量波动最大。基于这一工况下的桥臂能量波动即可确定各桥臂的最小额定电容容值。由表 2 可得，对于传统 MMC，每个桥臂中总计 N 个子模块的最大能量波动为 482.4 kJ。在 SAM-MMC 中，每个桥臂包含 N/2 个子模块的上、下桥臂能量波动的最大值为 272.4 kJ，约为 MMC 桥臂的 56.5%；复用中桥臂的能量波动最大值为 268.6 kJ，约为 MMC 桥臂的 55.7%，基本与上、下桥臂处于同一水平。在 DAM-MMC 中，每个桥臂包含 N/3 个子模块的上、下桥臂能量波动的最大值为 158.4 kJ，约为 MMC 桥臂的 32.8%；复用中桥臂的能量波动最大值为 123.2 kJ，约为 MMC 桥臂的 25.5%。

表 1　DAM-MMC 仿真系统参数

Tab. 1 Parameters of DAM-MMC simulation system

参数	数值
额定有功功率 P/MW	80
额定无功功率 Q/Mvar	24
直流侧额定电压 U_{dc}/kV	±35
交流侧额定电压 U_{ac}/kV	35
调制比 m	0.816
桥臂电感 L_0/mH	1.5
MMC 子模块数	$2N$=72
SAM-MMC 子模块数	$3N/2$=54
DAM-MMC 子模块数	$4N/3$=48
MMC 子模块电容/mF	20.0
SAM-MMC 子模块电容/mF	23.0
DAM-MMC 上、下桥臂子模块电容/mF	20.0
DAM-MMC I、II 复用中桥臂子模块电容/mF	15.2
电容额定电压 U_C/kV	1.94

表 2　桥臂能量的最大波动值

Tab. 2 Maximum fluctuations of arm energy

调制策略	桥臂类型	能量最大波动/kJ
MMC	上、下桥臂	482.4
SAM-MMC	上、下桥臂	272.4
	复用中桥臂	268.6
DAM-MMC	上、下桥臂	158.4
	复用中桥臂	123.2

以传统 MMC 电容最小额定容值 $C_{\text{MMC,min}}$ 为基准，计算 SAM-MMC 和 DAM-MMC 各桥臂的最小额定电容值，其表达式分别为

$$C_{\text{MMC,min}}=\frac{482\ 400}{2NU_C\cdot\Delta U_{C,\max}} \tag{9}$$

$$C_{\text{1,up,min}}=C_{\text{1,do,min}}=\frac{2\times272\ 400}{2NU_C\cdot\Delta U_{C,\max}}=1.129\ 4C_{\text{MMC,min}} \tag{10}$$

$$C_{\text{1,mid,min}}=\frac{2\times268\ 600}{2NU_C\cdot\Delta U_{C,\max}}=1.113\ 6C_{\text{MMC,min}} \tag{11}$$

$$C_{\text{2,up,min}}=C_{\text{2,do,min}}=\frac{3\times158\ 400}{2NU_C\cdot\Delta U_{C,\max}}=0.985\ 1C_{\text{MMC,min}} \tag{12}$$

$$C_{\text{2,mid,min}}=\frac{3\times123\ 200}{2NU_C\cdot\Delta U_{C,\max}}=0.766\ 2C_{\text{MMC,min}} \tag{13}$$

式中，$C_{\text{1,up,min}}$、$C_{\text{1,do,min}}$、$C_{\text{1,mid,min}}$ 和 $C_{\text{2,up,min}}$、$C_{\text{2,do,min}}$、$C_{\text{2,mid,min}}$ 分别为 SAM-MMC 和 DAM-MMC 的上桥臂、下桥臂、中间桥臂电容最小额定容值。可以看出，当复用中桥臂数量由 1 个增至 2 个后，能量会主要集中在上、下桥臂，因此可以独立设置复用中桥臂的电容值，进一步提高换流器的轻型化程度并降低成本。桥臂复用型 MMC 显著提高了子模块的利用率，减少了换流器所需子模块数，但引入的桥

臂切换开关需要电力电子器件串联来满足耐压需求。为方便对比，桥臂切换开关与子模块选取同类型 IGBT，额定电压为 U_{dc}/N。选取半桥子模块 HBSM (half-bridge submodule)构建换流器，交流侧输出电平数统一为 N+1，MMC、SAM-MMC 及 DAM-MMC 所需器件数量及参数见表 3。

表 3 3 种拓扑结构器件数量及参数

Tab. 3 Numbers and parameters of devices of three topologies

换流器	电容			IGBT 数量
	数量	最小额定电容 C_{min}	总能量 E_C	
MMC	6.0N	1.00C	E_0	12N
SAM-MMC	4.5N	1.13C	0.847 5E_0	12N
DAM-MMC	2.0N 2.0N	0.99C 0.77C	0.586 7E_0	14N

由表 3 可知，SAM-MMC 所需电容数量较 MMC 减少了 1.5N，但所需 C_{min} 增大了约 13%，所需 IGBT 数量与 MMC 一致，均为 12N，在一定程度上减小了换流器占地体积、降低了建设成本。而 DAM-MMC 所需电容数量较 MMC 减少了 2N，且复用中桥臂的 2N 个 C_{min} 为 0.77C，但所需 IGBT 数量较 MMC 和 SAM-MMC 增加了 2N。因为 MMC 的能量是存储在子模块电容中的，所以存储的 E_C 直接影响电容的大小及子模块的体积和质量，在实际工程中，电容占用阀体 50%以上的体积和 80%的质量[17]。因此，以增加 16.6%(2N)IGBT 数量的代价进一步减少电容数量、减小容值是具备经济性的。

4 实验验证

DAM-MMC 开环实验装置示意如图 7 所示，装置运行于逆变工作模式，基于实时数字控制器 RTU-BOX204 发出子模块控制信号，并采集电压电力等电气量。DAM-MMC 实验样机如图 8 所示，实验装置参数见表 4。

DAM-MMC 的实验结果如图 9~图 13 所示，分别为交流侧输出电压 u_a 及电流 i_a、A 相桥臂电压、A 相桥臂电流、A 相电容电压及 A 相桥臂切换开关电压。

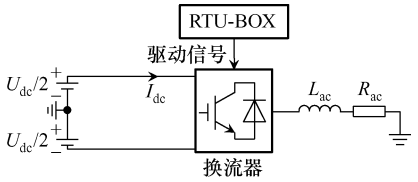


图 7 DAM-MMC 开环实验装置示意

Fig. 7 Schematic of DAM-MMC open-loop experimental setup

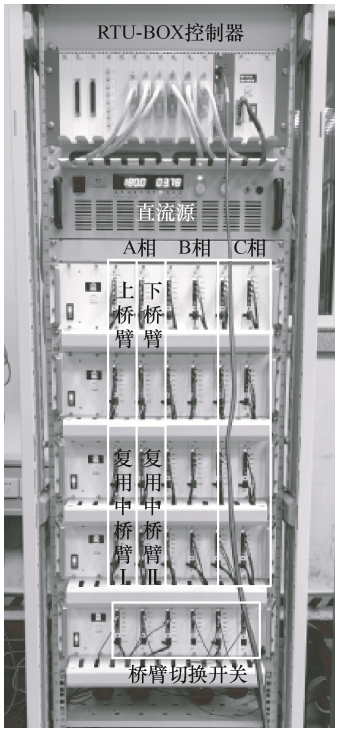


图 8 基于 RTU-BOX204 的 DAM-MMC 实验样机

Fig. 8 Experimental prototype of DAM-MMC based on RTU-BOX204

表 4 实验装置参数

Tab. 4 Parameters of experimental setup

参数	数值
直流侧额定电压/V	±90.0
交流侧额定电压/V	110.2
额定有功功率/kW	2
相单元模块数量	2+2+2+2(N=6)
额定电容电压/V	30.0
子模块上、下桥臂电容/mF	3.0
子模块复用中桥臂电容/mF	2.5
桥臂电感/mH	1.2
交流侧电阻/Ω	10
交流侧电感/mH	50

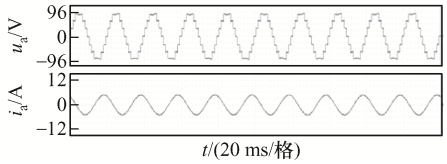


图 9　交流侧输出电压及电流

Fig. 9 Output voltage and current on AC side

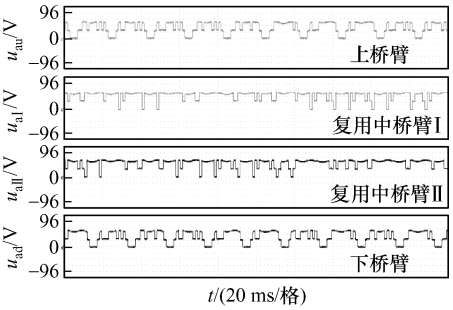


图 10　A 相桥臂电压

Fig. 10 Arm voltage in phase-A

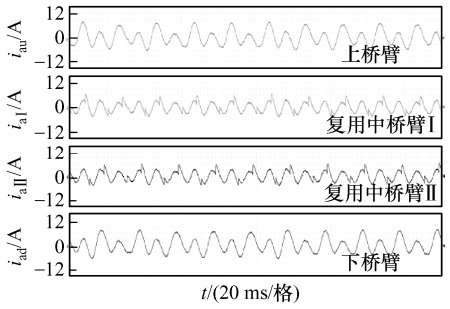


图 11　A 相桥臂电流

Fig. 11 Arm current in phase-A

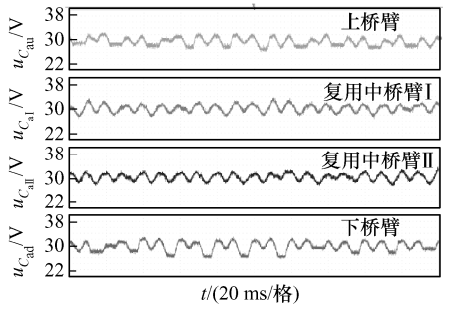


图 12　A 相电容电压

Fig. 12 Capacitor voltage in phase-A

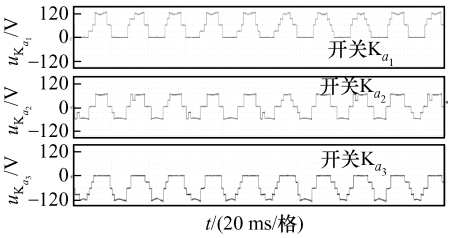


图 13　A 相桥臂切换开关电压

Fig. 13 Voltage of arm selection switch in phase-A

由图可知，交流输出电压为 7 电平阶梯波，交流侧负载呈感性，输出电流平滑且正弦度较好，验证了所提改进 NLM 策略的可行性。桥臂电压实验结果也说明了 DAM-MMC 电容参数优化设计的合理性。因复用中桥臂周期地归属于等效上桥臂或下桥臂，其电流成分也是上、下桥臂的一部分，因此表现出较小的幅值及有效值，允许复用中桥臂采用较小容量的功率器件，进一步提高经济性。

基于所提出的电容电压均衡策略，4 个桥臂的电容电压均较好地约束在 U_C=30 V 附近，波动幅度为 2 V，而中间桥臂采用容值较小的电容也可保证桥臂间的能量均衡及电容电压稳定。桥臂切换开关 K_{a_1} 的最大电压约为 120 V；K_{a_3} 的最小电压约为 −120 V；桥臂切换开关 K_{a_2} 承受双向电压，幅值约为 60 V，说明了 DAM-MMC 桥臂切换开关设计的合理性。

为了验证 DAM-MMC 的动态特性，将实验装置并网进行功率动态调节实验，闭环实验装置示意如图 14 所示，实验结果如图 15~图 17 所示。系统采用双闭环控制，即外环控制功率、内环控制电流。系统前 0.5 s 向电网馈送 0.5 p.u.的有功功率，不传输无功功率；0.5 s 时改变有功功率参考值为 0.8 p.u.，系统传输的有功功率经过约 20 ms 的调整稳定

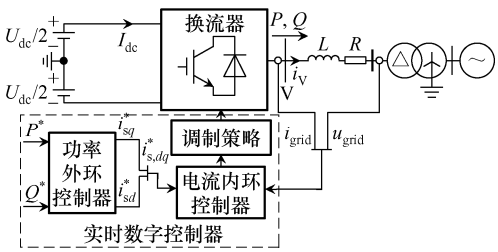


图 14　DAM-MMC 闭环实验装置示意

Fig. 14 Schematic of DAM-MMC closed-loop experimental setup

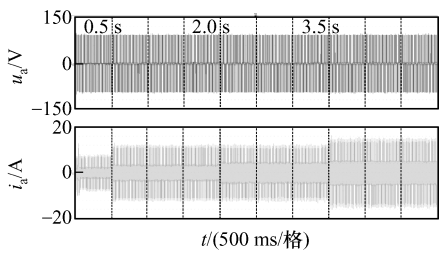


图 15　交流侧输出电压及电流

Fig. 15 Output voltage and current on AC side

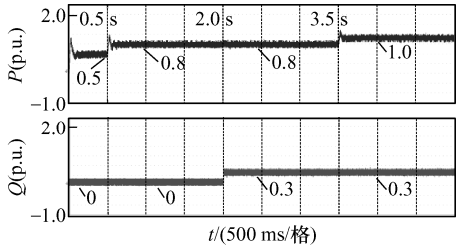


图 16 有功、无功功率波形(标幺值)

Fig. 16 Waveforms of active and reactive power (per unit)

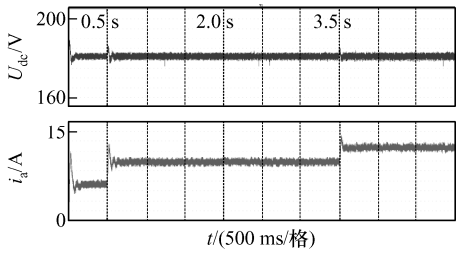


图 17 直流侧输出电压及电流

Fig. 17 Output voltage and current on DC side

于 0.8 p.u.，后续每 150 ms 调整有功功率或无功功率参考值。实验过程中将无功功率的最大值设定为 0.3 p.u.，对应实际工程的无功功率占比。实验结果显示，DAM-MMC 并网闭环运行具有较好的动态特性。

5 结语

本文基于 SAM-MMC，总结了桥臂复用型 MMC 的统一结构。为进一步提高换流器的轻型化程度，研究不同复用桥臂数量对于桥臂能量特点及参数设计的影响，选取 DAM-MMC 为研究对象，设计了满足耐压需求的桥臂切换开关，并提出了适用于 DAM-MMC 的调制策略及复用模式低压切换策略。通过能量分析，与传统 MMC 相比，以增加 16.6%(2*N*)IGBT 数量的代价减少总电容约 41.3%的存储能量，对于优化换流器占地面积、体积及质量的效果极其显著。DAM-MMC 的紧凑性可以显著降低平台建设及运输成本，有利于海上应用的 HVDC 系统。但基于当前的调制及控制策略，DAM-MMC 仍存在一定的二倍频环流，在后续的研究中将继续优化相关内容。

参考文献：

[1] 余祖泳, 张振, 王毅, 等. 轻型化 MMC 子模块配置方法及其控制策略[J]. 电源学报, 2026, 24(1): 61-71.
Yu Zuyong, Zhang Zhen, Wang Yi, et al. Submodule configuration method and control strategy for MMC lightweight [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(1): 61-71. (in Chinese)

[2] 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)

[3] 罗永捷, 宋勇辉, 熊小伏, 等. 高压大容量 MMC 换流阀损耗精确计算[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7730-7741.
Luo Yongjie, Song Yonghui, Xiong Xiaofu, et al. Accurate loss calculation method for bulk-power MMCs [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2020, 40(23): 7730-7741. (in Chinese)

[4] Tu Qingrui, Xu Zheng, Xu Lie. Reduced switching-frequency modulation and circulating current suppression for modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3): 2009-2017.

[5] Picas R, Pou J, Ceballos S, et al. Minimization of the capacitor voltage fluctuations of a modular multilevel converter by circulating current control [C]// IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Montreal, QC, Canada, 2012: 4985-4991.

[6] 曹赛，王毅，余欣洋，等. 基于储能型 MMC 的 SOC 自适应均衡控制策略[J]. 电源学报, 2026, 24(3): 161-169.
Cao Sai, Wang Yi, Yu Xinyang, et al. Adaptive balance control strategy of SOC based on MMC-BESS [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(3): 161-169. (in Chinese)

[7] 王朝亮, 吕文韬, 许烽, 等. 柔性直流配电网 MMC 子模块级联数量优化设计[J]. 浙江电力, 2019, 38(4): 8-12.
Wang Chaoliang, Lyu Wentao, Xu Feng, et al. Optimum design of cascading number of MMC sub-modules in intelligent flexible DC distribution network [J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(4): 8-12. (in Chinese)

[8] 朱晋, 韦统振, 霍群海. 一种新型全桥变桥臂型

VSC-HVDC 变流拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 52-61, 15.

Zhu Jin, Wei Tongzhen, Huo Qunhai. A new full-bridge alternative arm based VSC-HVDC converter [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2013, 33(3): 52-61, 15. (in Chinese)

[9] Merlin M M C, Soto-Sanchez D, Judge P D, et al. The extended overlap alternate arm converter: A voltage-source converter with DC fault ride-through capability and a compact design [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 3898-3910.

[10] 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 on Power Systems, 2013, 28(1): 335-346.

[11] 胡鹏飞, 江道灼, 郭捷, 等. 基于混合型多电平换流器的柔性直流输电系统[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 33-38.

Hu Pengfei, Jiang Daozhuo, Guo Jie, et al. VSC-HVDC system based on hybrid multilevel voltage sourced converters [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 33-38. (in Chinese)

[12] 王琛, 陶建业, 王毅, 等. 桥臂复用型模块化多电平换流器的拓扑及控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3373-3384.

Wang Chen, Tao Jianye, Wang Yi, et al. Research on topology and control of arm multiplexing modular multilevel converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3373-3384. (in Chinese)

[13] 樊强, 赵成勇, 许建中. 桥臂复用型 MMC 拓扑启动及降容策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 7150-7159.

Fan Qiang, Zhao Chengyong, Xu Jianzhong. Research on startup and capacitance reduction strategy of bridge arm reusing MMC topology [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 7150-7159. (in Chinese)

[14] Zhang Zhen, Wang Yi. An independent arm modulation strategy of the AM-MMC for circulating current suppression [C]// 2023 Power Electronics and Power System Conference (PEPSC). Hangzhou, China, 2024: 73-78.

[15] Ilves K, Norrga S, Harnefors L, et al. On energy storage requirements in modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(1): 77-88.

[16] Merlin M M C, Green T C. Cell capacitor sizing in multilevel converters: Cases of the modular multilevel converter and alternate arm converter [J]. IET Power Electronics, 2015, 8(3): 350-360.

[17] Zhao Cong, Hu Yujie, Luan Kedong, et al. Energy storage requirements optimization of full-bridge MMC with third-order harmonic voltage injection [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(12): 11661-11678.



谈竹奎

作者简介：

谈竹奎(1975—)，男，硕士，正高级工程师。研究方向：能源互联网，柔性直流配网运行与控制。E-mail：tanzk@163.com。

李继凯(1989—)，男，本科，工程师。研究方向：电力电子技术。E-mail：lijikai1989@126.com。

冯起辉(1994—)，男，硕士，工程师。研究方向：电力系统自动化，电力电子技术。E-mail：fonqeeh@163.com。

李杨(1996—)，女，本科，助理工程师。研究方向：电力系统自动化。E-mail：1043735832@qq.com。

张子亮(2000—)，男，本科，助理工程师。研究方向：电力系统自动化。E-mail：zhangziliang@xj.cee-group.cn。

刘宗胜(1992—)，男，通信作者，硕士，助理工程师。研究方向：控制工程。E-mail：lzs919816@sina.com。

(责任编辑：郭凯凯)