

# 船舶电力系统模块化多电平变换器 改进控制策略

陈玉<sup>1</sup>, 郑钰<sup>1\*</sup>, 王祯<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学 电气与电子工程学院, 武汉 430074; 2. 武汉第二船舶设计研究所, 武汉 430010)

**摘要:** [目的]模块化多电平变换器(MMC)具有波形质量好、具备四象限运行能力,在船舶电力系统中具有广阔应用前景。整流侧交流电压不平衡工况下 MMC 采用传统的双环电流控制方法,需额外增加负序电流抑制器优化环流控制器,控制系统复杂度大大增加。为简化交流电压不平衡工况下 MMC 的控制器设计,对一种基于桥臂电容电压控制的 MMC 交流电压不平衡控制策略进行了研究。[方法]基于交流电压不平衡工况下 MMC 运行机理分析,提出桥臂电容电压控制策略,旨在将各个桥臂的电容电压稳定于指令值;以抑制交流电流中的负序分量和抑制桥臂倍频环流分量为控制目标,提出了桥臂电流指令值计算方法。[结果]在 MATLAB/Simulink 中搭建三相 MMC 仿真系统,验证了所提策略的可行性和有效性。[结论]基于桥臂电容电压的控制策略,简化了交流电压不平衡工况下 MMC 的控制器设计的复杂度。

**关键词:** 船舶电力系统; 模块化多电平变换器; 电压不平衡控制; 桥臂电容电压控制; 负序电流抑制

**中图分类号:** U665.12 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2025.S1.102

## Improved Control Strategy for Modular Multilevel Converters in Marine Power Systems

CHEN Yu<sup>1</sup>, ZHENG Yu<sup>1\*</sup>, WANG Zhen<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Wuhan Second Ship Design & Research Institute, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** [Purpose] Modular multilevel converter (MMC) with good waveform quality and four-quadrant operation capability, has a broad application prospect in marine power systems. The traditional double-loop current control method for MMC under the AC voltage unbalance condition on the rectifier side requires additional negative sequence current suppressor to optimize the loop current controller, and the complexity of the control system is greatly increased. In order to simplify the controller design of MMC under AC voltage unbalance condition, an AC voltage unbalance control strategy of MMC based on bridge arm capacitor voltage control is investigated. [Method] Based on the analysis of the operation mechanism of MMC under AC voltage unbalance condition, a bridge arm capacitance voltage control strategy is proposed, aiming at stabilizing the capacitance voltage of each bridge arm at the commanded value; and with the control objectives of suppressing the negative sequence component in the AC current and suppressing the bridge arm octave circulating component, a method of calculating the commanded value of the bridge arm current is proposed. [Result] A three-phase MMC simulation system is built in MATLAB/Simulink to verify the feasibility and effectiveness of the strategy proposed in this paper. [Conclusion] The control strategy based on the bridge arm capacitor voltage simplifies the complexity of the controller design of the MMC under the AC voltage unbalance condition.

**Key words:** marine power system; modular multilevel converter (MMC); voltage unbalance control; arm capacitor voltage control; negative-sequence current suppression

收稿日期: 2025-02-16; 修回日期: 2025-06-04

作者简介: 陈玉(1991—), 男, 博士、讲师。研究方向: 舰船综合电力系统。

通信作者: 郑钰(2004—), 女, 大学本科。研究方向: 电气工程及其自动化。

## 0 引言

模块化多电平变换器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 同时具备交流端口、直流端口、具有四象限运行能力、输出波形质量高等优越的性能特征, 在船舶电力系统中具有广阔应用前景<sup>[1-3]</sup>。文献[1-2]验证了MMC在船舶电力系统中的适用性和可行性, 但是并没有分析交流端口电压不对称工况的影响; 郭焱等<sup>[3]</sup>提出了用于船舶永磁推进电机驱动控制的MMC模型预测方法。MMC系统的安全稳定运行会受到交流端口工况影响, 交流侧电压不平衡作为最常见的交流端口异常工况, 船舶用MMC控制系统设计过程中需重点关注, 提升船舶电力系统复杂运行工况MMC的控制性能。

近些年, 针对交流端口不平衡工况下MMC的稳定运行问题, 专家学者们开展了大量的研究<sup>[4-16]</sup>。LIANG等<sup>[4]</sup>在 $abc$ 坐标系下采用比例积分和矢量比例积分调节器并联方法实现了交流环流控制。为应对传统比例积分微分控制方法参数选取繁杂、动态性能差等不足, 程启明等<sup>[5]</sup>提出了反馈线性化滑模控制策略, 提高系统动态性能和抗干扰性。WANG等<sup>[6]</sup>提出了一种基于零序电压注入的直流环流均衡开环算法, 在交流环流抑制的基础上实现了直流环流均衡, 但控制效果依赖于输入量的准确度, 且开环算法动态性能欠佳。李金科等<sup>[7]</sup>基于交流端口电压不平衡工况下MMC桥臂瞬时功率分析, 提出了基于准PR调节的分相环流控制方法, 有效控制100 Hz的正、负、零序环流分量。林波等<sup>[8]</sup>基于MMC的正、负序数学模型, 设计了正、负序内环电流微分平坦控制器。周诗丁等<sup>[9]</sup>提出了一种基于2阶广义积分器的环流抑制策略, 分别控制环流中的正序、负序和零序2次谐波分量, 设计的控制器。薛花等<sup>[10]</sup>提出了一种稳定性较好的无源一致性控制方法, 实现正、负序 $dq$ 轴电流期望轨迹快速跟踪的同步控制。董鹏等<sup>[11]</sup>提出了一种带有前馈补偿的交流电流、桥臂环流和直流电流的解耦控制策略及子模块电容电压和直流电压的平衡控制策略, 避免由交流电网不对称引起的功率振荡传播到直流系统, 抑制了直流侧电流和电压波动。张臣等<sup>[12]</sup>分析了交流端口不平衡工况下MMC的相单元瞬时能量, 由于相单元环流和环流抑制器输出的调整电压间的相互作用, 环流中的四倍频分量增大。进而提出了一种增强型的双回路环流抑制策略, 以提升环流抑制能力。基于MMC桥臂功率分析, 潘子迅等<sup>[13]</sup>提出了一种零序电压注入的直流环流均衡方法, 但零序电压注入将导致交流电压幅值增大, 可能会引发过调制。LI等<sup>[14]</sup>研究了在不平衡交流电网条件下, 偏置脉宽调制能在给定的限制条件下扩大MMC的工作范围, 因为它能通过利用臂中的所有SM来降低每个相位的电容器电压。在某些条件下, 零序电压注入进一步降低了三相中SM电容器的最大电压。基于

MMC的平均值模型, 喻建瑜等<sup>[15]</sup>提出了一种交流端口不对称工况下MMC的故障穿越控制策略, 通过充分利用MMC的控制自由度实现解耦控制, 将交流端口不对称故障引发的不平衡功率限制于MMC内部, 不影响直流侧输出。陈继开等<sup>[16]</sup>分析了不对称电网电压条件下MMC内部动态特性, 提出了一种利用正向同步旋转坐标变换和具有良好相位跟踪响应的自适应MCCF锁相环设计的MMC控制器, 抑制交流电流失衡、瞬时功率波动以及稳定直流电压、电流。现有的MMC交流端口电压不平衡控制研究大多需要提取交流电流中的负序分量, 设计专门的负序电流控制环, 还需要配置桥臂倍频环流抑制控制器等, 控制器的结构较为复杂。

为简化交流端口电压不平衡工况下MMC的控制器设计, 本文提出一种基于桥臂电容电压控制的MMC交流端口不平衡控制策略。首先, 分析交流端口电压不平衡工况下MMC的运行机理分析; 进而, 提出桥臂电容电压控制策略, 旨在将各个桥臂的电容电压稳定于指令值; 然后, 以抑制交流电流中的负序分量和抑制桥臂倍频环流分量为控制目的, 提出桥臂电流指令值计算方法。最后, 通过仿真验证本文所提策略的可行性和有效性。

## 1 交流端口电压不平衡工况下 MMC 运行机理分析

三相MMC拓扑结构示意图1, 其中:  $U_{dcp}$ 和 $U_{dcn}$ 为正负极母线电压;  $I_{dcp}$ 和 $I_{dcn}$ 为正负极直流母线电流;  $u_{oj}$ 和 $i_{oj}$ 分别为交流端口 $j$ 相的电压和电流 ( $j=a, b, c$ );  $u_{pj}$ 和 $u_{nj}$ 分别表示 $j$ 相的上桥臂电压和下桥臂电压;  $i_{pj}$ 和 $i_{nj}$ 为 $j$ 相的上桥臂电流和下桥臂电流;  $L_f$ 和 $R_f$ 为 $j$ 相桥臂电感和桥臂等效电阻。

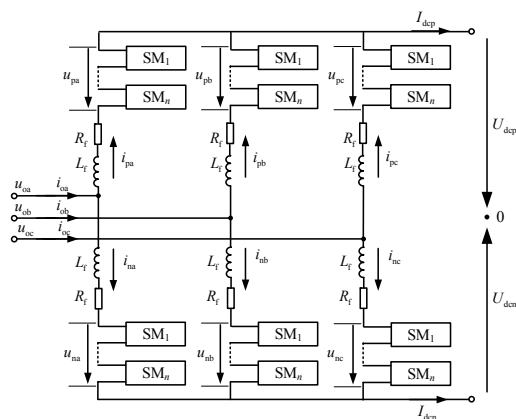


图1 三相 MMC 拓扑结构示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Three-Phase MMC Topology

假设MMC相单元倍频环流分量被抑制, 桥臂电流 ( $i_{pj}$ 和 $i_{nj}$ ) 和电压 ( $u_{pj}$ 和 $u_{nj}$ ) 可表示为

$$\begin{cases} i_{pj} = I_{pj\_dc} + i_{pj\_ac} - i_{cirj} \\ i_{nj} = I_{nj\_dc} + i_{nj\_ac} + i_{cirj} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_{pj} = U_{dcp} - u_{oj} + L_f \frac{di_{pj}}{dt} + R_f i_{pj} \\ u_{nj} = -U_{dcn} + u_{oj} - L_f \frac{di_{nj}}{dt} - R_f i_{nj} \end{cases} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中:  $I_{pj\_dc}$ 、 $I_{nj\_dc}$ 为 $i_{pj}$ 和 $i_{nj}$ 的直流分量;  $i_{pj\_ac}$ 和 $i_{nj\_ac}$ 为 $i_{pj}$ 和 $i_{nj}$ 基频交流分量;  $i_{cij}$ 为 $j$ 相相单元环流分量;  $u_{oj}$ 为交流端口 $j$ 相的电压。

电网电压不平衡时, MMC交流侧电流中会出现负序电流分量, 负序电流引入至船舶电力系统会影响到各类电机的正常运行, 可能会引发船舶电力系统振荡等。因此, 应用至船舶电力系统中的MMC在电网电压不平衡工况下, 通常会采取抑制负序电流控制策略。然而, 当负序电流被抑制后, 交流端口电流只有三相平衡的正序电流, 与不平衡的交流端口电压作用, 将导致MMC不同桥臂内的交流有功功率不相等, 进而导致桥臂之间的子模块电容电压不平衡, MMC无法正常运行。

三相MMC的交直流端口通过6个桥臂进行功率交换, 不计正常运行功率损耗, MMC正常稳定运行时, 各个桥臂内交流侧功率与直流侧功率平衡, 桥臂内各个子模块电容电压均稳定于指令值, 此时子模块电容将不会吸收有功使其电容电压升高, 也不释放有功使其电容电压降低, 见式(3)。

$$u_{oj} i_{kj\_ac} = U_{dc} I_{kj\_dc} \quad (3)$$

式中:  $i_{kj\_ac}$ 为 $i_{kj}$ 基频交流分量,  $k=p, n$ ;  $U_{dc}$ 为正、负极母线电压;  $I_{kj\_dc}$ 为 $i_{kj}$ 的直流分量。

电网电压不平衡工况下, 不同桥臂内的交流有功功率不相等, 对应调整桥臂内的直流有功功率, 保证各桥臂内交流有功功率和直流有功功率平衡, 桥臂内的子模块电容电压也会稳定于指令值。由式(4)可知, 通过调整桥臂电流的直流分量, 调整对应相直流侧有功功率, 实现各桥臂有功功率平衡。

$$I_{kj\_dc} = (u_{oj} i_{kj\_ac}) / U_{dc} \quad (4)$$

基于以上分析, MMC交流端口电压不平衡工况下稳定运行需要解决的问题如下: 1) 设计高性能的子模块电容电压控制器, 实现各桥臂有功功率平衡; 2) 设计改进的桥臂电流指令值计算方法, 以获得各桥臂电流的基频交流分量和直流分量指令值。

## 2 基于桥臂电容电压控制的 MMC 电压控制策略

为了实现MMC各桥臂电容电压控制, 平衡各桥臂交、直流侧有功功率, 本节提出了一种基于桥臂电容电压控制的MMC电压控制策略, 见图2。所提电压控制方法包含直流母线电压控制和桥臂电容电压控制两个控制环节。直流母线电压控制器使直流母线电压 $U_{dck}$  ( $k=p, n$ ) 稳定于其指令值 $U_{dckref}$ ; 桥臂电容电压控制器使各桥臂电容电压均值 $u_{kj\_c\_avg}$  ( $k=p, n; j=a, b, c$ ) 稳定于电容电压指令值 $u_{cref}$ 。

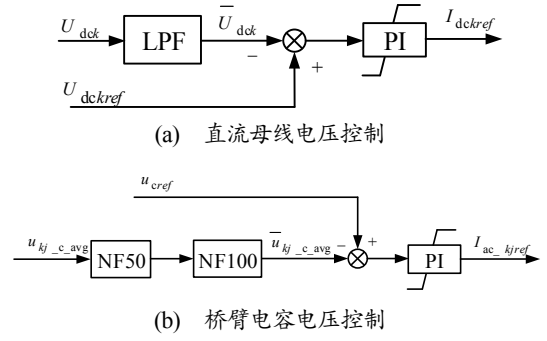


图2 基于桥臂电容电压控制的 MMC 电压控制策略

Fig. 2 MMC Voltage Control Strategy Based on Bridge Arm Capacitor Voltage Control

### 2.1 直流母线电压控制

如图2(a)所示, 直流母线电压实际采样值 $U_{dck}$  ( $k=p, n$ ) 经过低通滤波器 (Low-pass filter, LPF) 处理后, 得到 $\bar{U}_{dck}$ 。直流母线电压指令值 $U_{dckref}$ 与 $\bar{U}_{dck}$ 的差值输入至PI控制器, 最终得到直流母线电流指令值 $I_{dckref}$ 。

$$I_{dckref} = \left( K_{p\_b} + \frac{K_{i\_b}}{S} \right) (U_{dckref} - \bar{U}_{dck}) \quad (5)$$

式中:  $K_{p\_b}$ 和 $K_{i\_b}$ 分别为直流母线电压控制器的比例参数和积分参数。

### 2.2 桥臂电容电压控制

如图2(b)所示, 各桥臂电容电压均值 $u_{kj\_c\_avg}$ 经50 Hz陷波器 (Notch Filter, NF) 和100 Hz陷波器处理后, 得到 $\bar{u}_{kj\_c\_avg}$ 。电容电压指令值 $u_{cref}$ 与 $\bar{u}_{kj\_c\_avg}$ 的差值输入至PI控制器, 最终得到各桥臂电流有功电流分量幅值指令值 $I_{ac\_kjref}$ 。

$$I_{ac\_kjref} = \left( K_{p\_c} + \frac{K_{i\_c}}{S} \right) (u_{cref} - \bar{u}_{kj\_c\_avg}) \quad (6)$$

式中:  $K_{p\_c}$ 和 $K_{i\_c}$ 分别为桥臂电容电压控制器的比例参数和积分参数。

## 3 桥臂电流指令值计算方法

基于桥臂电容电压控制的MMC电压控制器输出, 提出了一种桥臂电流指令值计算方法, 不仅适用于正常运行工况, 还适用于交流电压不平衡工况。以抑制MMC相单元环流分量为控制目标, 桥臂电流指令值 $i_{kjref}$ 中仅包含基频交流分量 $i_{kj\_acref}$ 和直流分量 $I_{kj\_dcref}$ :

$$i_{kjref} = I_{kj\_dcref} + i_{kj\_acref} \quad (7)$$

### 3.1 交流分量指令值 $i_{kj\_acref}$ 计算

交流端口电压不平衡工况下, 以抑制交流侧电流负序电流分量, 保证交流侧电流三相平衡为控制目标。将各桥臂电流有功电流分量幅值指令值 $I_{ac\_kjref}$ 的均值作为桥臂电流有功电流分量幅值指令值 $I_{k\_p\_acref}$ :

$$I_{k\_p\_acref} = \sum_{j=a,b,c} I_{ac\_kjref} / 3 \quad (8)$$

交流分量指令值 $i_{kj\_acref}$ 为有功电流分量指令值与

无功电流分量指令值的和:

$$i_{kj\_acref} = I_{k\_p\_acref} \sin_j(\omega t) + I_{k\_q\_acref} \cos_j(\omega t) \quad (9)$$

式中:  $\sin_j(\omega t)$ 和 $\cos_j(\omega t)$  ( $j=a, b, c$ )分别为交流端口电压正序分量的正弦值和余弦值;  $I_{k\_q\_acref}$ 为桥臂电流中无功电流分量幅值指令值。

### 3.2 直流分量指令值 $I_{kj\_dcref}$ 计算

交流端口电压不平衡工况下, 以交流端口电流三相平衡为控制目标, 由式(4)可知, 通过调整桥臂电流中的直流分量, 调整对应桥臂直流侧有功功率, 保证各桥臂有功功率平衡。各桥臂电流有功电流幅值指令值偏差 $\Delta I_{kj\_p\_acref}$ 由式(10)计算得到。

$$\Delta I_{kj\_p\_acref} = I_{k\_p\_acref} - I_{ac\_kjref} \quad (10)$$

基于桥臂电流有功电流幅值指令值偏差 $\Delta I_{kj\_p\_acref}$ , 计算桥臂电流直流分量调整量 $\Delta I_{kj\_dcref}$ :

$$\Delta I_{kj\_dcref} = \frac{U_o}{\sqrt{2}U_{dck}} \Delta I_{kj\_p\_acref} \quad (11)$$

式中:  $U_o$ 为交流端口电压相电压的有效值。

最终得到桥臂电流直流分量指令值:

$$I_{kj\_dcref} = \frac{I_{dckref}}{3} + \Delta I_{kj\_dcref} \quad (12)$$

基于以上分析, 可得桥臂电流指令值:

$$I_{kjref} = \left( \frac{I_{dckref}}{3} + \Delta I_{kj\_dcref} \right) + \begin{bmatrix} I_{k\_p\_acref} \sin_j(\omega t) + \\ I_{k\_q\_acref} \cos_j(\omega t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

## 4 仿真结果与分析

为了验证所提基于桥臂电容电压控制的MMC交流端口不平衡控制策略的有效性, 在MATLAB/Simulink中搭建如图1所示三相MMC系统仿真模型, 主要仿真参数见表1。电流内环采用文献[17]提出的桥臂电流预测控制方法。

表1 仿真模型主要参数表

Tab. 1 Table of Main Parameters for Simulation Model

参数	数值
交流端口电压 $u_o$ /kV	10 (线电压)
直流母线电压 $U_{dck}$ /kV	$\pm 10$
额定有功功率 P/MW	2
子模块电容 C/mF	3
载波频率 $f_c$ /kHz	5
桥臂电感 $L_f$ /mH	40
桥臂等效电阻 $R_f$ / $\Omega$	0.5
桥臂子模块数量 N	10
子模块电容电压指令值 $u_{cref}$ /kV	2

### 4.1 交流端口电压平衡工况

图3为交流端口电压平衡工况下的仿真结果, MMC向交流端口提供约1.2 MVA无功功率, 为直流负

载提供2 MW有功功率。交流端口电压和电流仿真波形见图3(a)和图3(b), 交流端口电压平衡工况下, 交流端口电流三相平衡且具有较高的波形质量, 交流端口电流幅值约为200 A; 上、下桥臂电流仿真波形分别见图3(c)和图3(d), 桥臂电流中基本只包含直流分量和基频交流分量, 有效抑制了倍频环流分量, 桥臂电流中的直流分量约为33.3 A, 基频交流分量的幅值约为100 A; 图3(e)为各桥臂子模块电容电压均值波形, 交流端口电压平衡工况下, 各桥臂子模块电容电压均值均稳定于指令值2 kV。

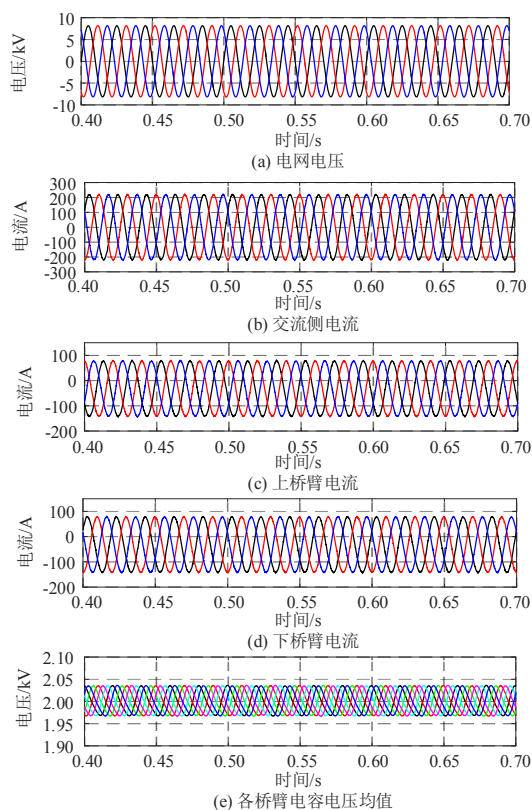


图3 交流端口电压平衡工况下所提控制方法的仿真结果  
Fig. 3 Simulation Results of the Proposed Control Method Under Balanced AC-Side Voltage Conditions

### 4.2 交流端口电压单相跌落工况

图4为交流端口电压单相跌落工况下的仿真结果。交流端口电压仿真波形见图4(a), 0.45 s时,  $a$ 相电压跌落50%。图4(b)为交流端口电流仿真波形, 0.45 s后, 经过一个暂态过程, 交流端口电流仍三相平衡, 电流幅值由约200 A增大至约240 A; 上、下桥臂电流仿真波形分别见图4(c)和图4(d), 桥臂电流中基本只包含直流分量和基频交流分量, 有效抑制了倍频环流分量,  $a$ 相上、下桥臂电流中的直流分量由约33.3 A减小为约20 A,  $b, c$ 相上、下桥臂电流中的直流分量由约33.3 A增加至约40 A, 基频交流分量的幅值由约100 A增大至约120 A; 图4(e)为各桥臂子模块电容电压均值波形,

0.45 s后, 经过一个暂态过程, 各桥臂子模块电容电压均值仍稳定于指令值2 kV。

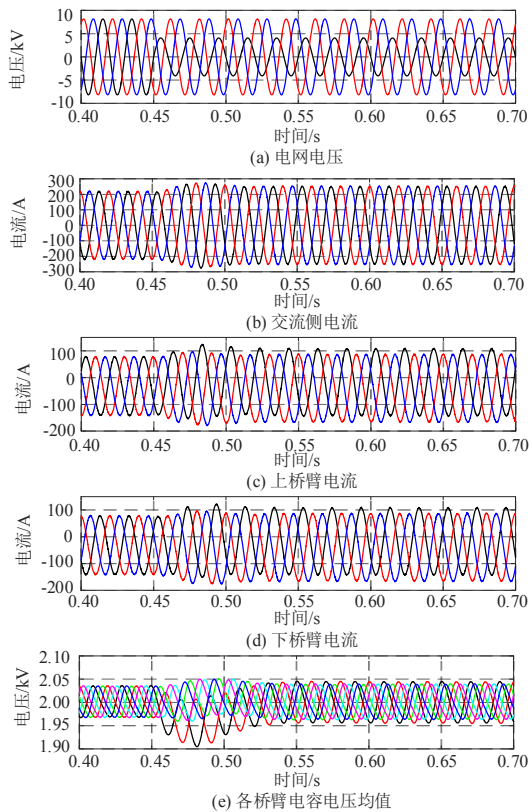


图4 交流端口电压单相跌落工况下所提控制方法的仿真结果

Fig. 4 Simulation Results of the Proposed Control Method Under Single-Phase Voltage Sag at the AC Port

### 4.3 交流端口电压两相跌落工况

图5为交流端口电压两相跌落工况下的仿真结果。交流端口电压仿真波形见图5(a), 0.45 s时, *b*相、*c*相电压各跌落25%。图5(b)为交流端口电流仿真波形, 0.45 s后, 经过一个暂态过程, 交流端口电流仍三相平衡, 电流幅值由约200 A增大至约240 A; 上、下桥臂电流仿真波形分别见图5(c)和图5(d), 桥臂电流中基本只包含直流分量和基频交流分量, 有效抑制了倍频环流分量, *a*相上、桥臂电流中的直流分量由约33.3 A增加至约40 A, *b*、*c*相上、下桥臂电流中的直流分量由约33.3 A减小至约30 A, 基频交流分量的幅值由约100 A增大至约120 A; 图5(e)为各桥臂子模块电容电压均值波形, 0.45 s后, 经过一个暂态过程, 各桥臂子模块电容电压均值仍稳定于指令值2 kV。

## 5 结论

为简化交流端口电压不平衡工况下MMC的控制策略设计, 本文提出了一种基于桥臂电容电压控制的MMC改进控制策略。基于所提桥臂电容电压控制策

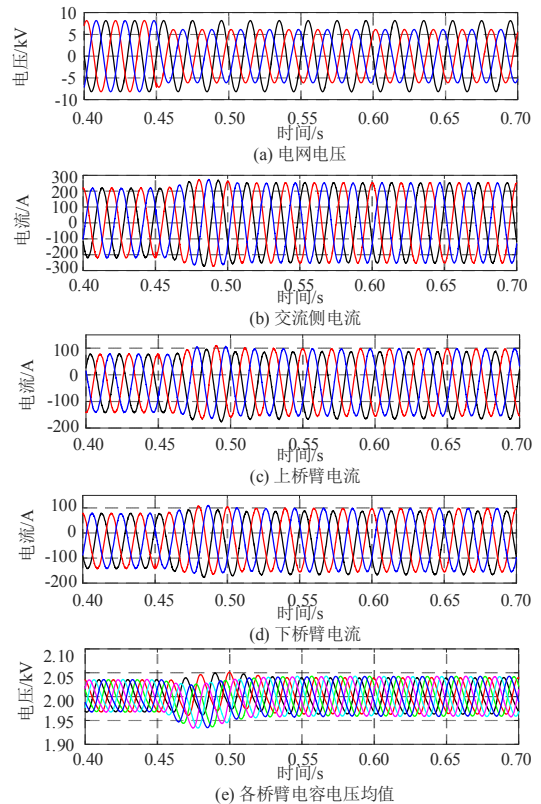


图5 交流端口电压两相跌落工况下所提控制方法的仿真结果

Fig. 5 Simulation Results of the Proposed Control Method Under Two-Phase Voltage Sag at the AC Port

略, 各个桥臂的电容电压均值稳定于指令值; 基于所提桥臂电流指令值计算方法, 通过调整桥臂电流直流分量, 无需配置交流负序电流抑制器, 即可实现交流电流中负序分量抑制和桥臂倍频环流分量抑制, 大大简化控制器结构。仿真结果表明所提控制方法在MMC正常运行工况和交流端口电压不平衡工况均具有良好的控制性能, 可适应船舶电力系统复杂运行工况。

### 参考文献:

- [1] 郭隼, 邵德东, 郭将驰, 等. 船舶中压直流电力系统中模块化多电平逆变器的谐波性能仿真研究[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(1): 134-143.  
GUO Y, SHAO D D, GUO J C, et al. Simulation Study on Harmonic Performance of Modular Multilevel Converters in Ship Medium-Voltage DC Power Systems[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(1): 134-143.
- [2] 曹穆, 许嘉沄, 任晓平. 模块化多电平有源前端变频器在电力推进系统中的应用[J]. 船舶工程, 2022, 44(9): 121-125.  
CAO M, XU J Y, REN X P. Application of Modular Multilevel Active Front-End Converters in Electric

- Propulsion Systems[J]. *Ship Engineering*, 2022, 44(9): 121-125.
- [3] 郭焱, 王超, 解文祥. 用于船舶永磁推进电机驱动控制的 MMC 模型预测方法[J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(4): 179-189.
- GUO Y, WANG C, XIE W X. MMC Model Predictive Control Method for Ship Permanent Magnet Propulsion Motor Drives[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(4): 179-189.
- [4] LIANG Y Y, LIU J Z, ZHANG T, et al. Arm Current Control Strategy for MMC-HVDC Under Unbalanced Conditions[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 32(1): 125-134.
- [5] 程启明, 陈颖, 孙英豪, 等. 电网电压不平衡下 MMC-SST 反馈线性化滑模控制策略 [J]. *南方电网技术*, 2024, 18(3): 129-137.
- CHENG Q M, CHEN Y, SUN Y H, et al. Feedback Linearization Sliding-Mode Control Strategy for MMC-SST Under Unbalanced Power Grid Voltage[J]. *Southern Power System Technology*, 2024, 18(3): 129-137.
- [6] WANG J Y, TANG Y, LIU X. Arm Current Balancing Control for Modular Multilevel Converters Under Unbalanced Grid Conditions[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(3): 2467-2479.
- [7] 李金科, 金新民, 吴学智, 等. 不平衡交流电网模块化多电平变流器特性分析及环流抑制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(12): 3535-3544.
- LI J K, JIN X M, WU X Z, et al. Characteristic Analysis and a Circulating Current Control Method in Modular Multilevel Converters Under Unbalanced Grid Conditions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(12): 3535-3544.
- [8] 林波, 王斌, 程启明, 等. 不对称故障下向无源网络供电的 MMC-HVDC 微分平坦控制策略[J]. *高电压技术*, 2021, 47(11): 4023-4032.
- LIN B, WANG B, CHENG Q M, et al. Differential Flatness Controller Strategy of MMC-HVDC to Supply Power to Passive Network Under Asymmetric Faults[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(11): 4023-4032.
- [9] 周诗丁, 王顺亮, 张英敏, 等. 电网不平衡下基于 SOGI 的 MMC 环流抑制策略[J]. *工程科学与技术*, 2023, 55(1): 59-69.
- ZHOU S D, WANG S L, ZHANG Y M, et al. Circulating Current Suppression Method of Modular Multilevel Converter Based on SOGI Under Unbalanced Grid Conditions[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2023, 55(1): 59-69.
- [10] 薛花, 田广平, 扈曾辉, 等. 电网不平衡下模块化多电平变换器无源一致性控制方法[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(3): 85-95.
- XUE H, TIAN G P, HU Z H, et al. Passivity-Consensus Based Control Method for Modular Multilevel Converter in Unbalanced Power Grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(3): 85-95.
- [11] 董鹏, 蔡旭, 吕敬. 不对称交流电网下 MMC-HVDC 系统的控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(16): 4646-4657.
- DONG P, CAI X, LYU J. Control Strategy of MMC-HVDC System Under Asymmetric AC Grid Conditions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(16): 4646-4657.
- [12] 张臣, 叶华, 韦凌霄, 等. 不平衡状态下 MMC 双回路环流抑制策略[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(9): 1924-1933.
- ZHANG C, YE H, WEI L X, et al. Double-Loop Circulating Current Suppressing Strategy for Modular Multilevel Converter Under Unbalanced Conditions[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(9): 1924-1933.
- [13] 潘子迅, 杨晓峰, 赵锐, 等. 不平衡电网下模块化多电平换流器的直流环流均衡策略[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(2): 541-553.
- PAN Z X, YANG X F, ZHAO R, et al. DC Circulating Current Balancing Control of Modular Multilevel Converter Under Unbalanced Power Grid[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(2): 541-553.
- [14] LI J, KONSTANTINOU G, WICKRAMASINGHE H R, et al. Capacitor Voltage Reduction in Modular Multilevel Converters Under Grid Voltages Unbalances[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, 35(1): 160-170.
- [15] 喻建瑜, 刘崇茹, 王洁聪. 不对称工况下 MMC-HVDC 的故障穿越控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(17): 5653-5665.
- YU J Y, LIU C R, WANG J C. Fault Ride-Through Control Strategy of MMC-HVDC System Under Asymmetric Grid Conditions[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(17): 5653-5665.
- [16] 陈继开, 李林, 张程, 等. 不对称电网电压下 MMC-HVDC 系统控制优化方法 [J]. *电网技术*, 2020, 44(9): 3525-3532.
- CHEN J K, LI L, ZHANG C, et al. Optimization Control Method of MMC-HVDC System Under Asymmetrical Network Voltage[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(9): 3525-3532.
- [17] WANG Z, YIN X G, CHEN Y. Model Predictive Arm Current Control for Modular Multilevel Converter[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 54700-54709.