

模块化多电平变流器容错运行方法综述

刘泽浩, 赵艳雷, 路茂增, 陈佳佳, 徐丙垠

(山东理工大学电气与电子工程学院, 山东省 淄博市 255000)

Review of Fault-tolerant Operation Methods for Modular Multilevel Converters

LIU Zehao, ZHAO Yanlei, LU Maozeng, CHEN Jiajia, XU Bingyin

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong Province, China)

ABSTRACT: The modular multilevel converter (MMC) is extensively utilized in medium and high-voltage engineering applications due to its modular structure and flexible scalability. However, the power devices and capacitors within the submodules (SMs) are susceptible to failure under high current and voltage conditions, which can compromise the stable operation of the MMC. When an SM is removed due to faults, the asymmetric operation of the MMC can progressively deteriorate its operational status, potentially resulting in system downtime. Fault-tolerant control methods have been extensively studied as effective means to ensure the continuous and reliable operation of MMCs. This paper begins by introducing the MMC topology and analyzing the characteristics of asymmetric operation. It clarifies the primary effects of asymmetric operation on circulating current, DC voltage, and other operational states. Secondly, based on the control objectives and specific execution methods of MMC fault-tolerant operation techniques, a review of both domestic and international literature on fault-tolerant operation methods is conducted. The strengths and weaknesses of various types of fault-tolerant operation methods are summarized. Finally, the primary future research direction for fault-tolerant operation methods in MMCs is discussed. This focuses on key challenges and concepts that need to be addressed, including neutral point offset, fundamental frequency injection, and sub-module voltage control, aiming to enhance voltage utilization and minimize losses.

KEY WORDS: modular multilevel converter (MMC); submodule failures; fault-tolerant operation methods

摘要: 模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC)因其模块化结构和灵活的电平扩展性能而广泛应用

于中高压等工程应用领域。子模块(submodule, SM)中的功率管及电容在大电流、高电压作用下容易发生故障并影响 MMC 的稳定运行。当 SM 因故障而被切除后, MMC 非对称运行将导致其运行状态持续恶化甚至导致系统停机运行。容错运行方法作为保证 MMC 持续容错运行的有效手段而被广泛研究。首先, 介绍 MMC 拓扑并对 MMC 非对称运行特征进行分析, 阐明 MMC 非对称运行对环流电流、直流电压等状态的主要影响; 其次, 根据 MMC 容错运行方法的控制目标和具体执行方式为依据, 对目前国内外容错运行方法文献进行梳理, 总结各类容错运行方法的优缺点; 最后, 对 MMC 容错运行方法未来主要研究方向进行阐述, 重点分析中性点偏移、基频注入及子模块电压控制等容错运行方法在提高电压利用率、降低损耗等方面应重点解决的主要问题及思路。

关键词: 模块化多电平变流器; 子模块故障; 容错运行方法

0 引言

模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC)通过子模块(submodule, SM)串联的方式实现电压等级的灵活调整^[1], 具有电压等级高、扩展性好等优点, 目前已成为特高压直流输电系统送端站或受端站变流器的首选拓扑^[2-3]。光伏、风电等新能源基地也广泛采用 MMC 拓扑以实现电能的集中变换与输送^[4-5]。十四五期间, 我国大力发展柔性直流输电及直流电网, 其中 MMC 作为上述系统中的核心装备而被重点研究, 以实现电能输送和优化配置。目前, 基于 MMC 的电力电子变压器等新型拓扑成为电能直流汇集与传输的首选方案^[6-7]。此外, MMC 在电机驱动^[8]、静态无功补偿^[9]等领域实现了落地应用。可见 MMC 未来仍然是中高压应用领域的主要换流器拓扑, 且可以预见其应用领域将进一步扩展。

MMC 运行过程中面临直流电网系统单极接地

基金项目: 国家自然科学基金项目(52377110); 山东理工大学博士科研启动项目(424008)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52377110); Doctoral Research Start-up Project of Shandong University of Technology (424008).

等故障导致的系统过/欠电压冲击^[10-11],并且需要具备交流侧电网单相接地、相间短路等故障的穿越能力^[12]。此外,MMC 还需要克服自身 SM 故障导致的系统不稳定。MMC 桥臂一般需要配置数十甚至数百个 SM,由于 SM 中的功率器件运行在高电压、大电流等复杂环境下,导致 SM 极易发生故障而被切除,故随着 SM 数量的增加也提高了 MMC 发生故障的概率。相关研究表明,换流器中电容和功率半导体故障约占系统总故障的 51%^[13],因此 SM 故障无法避免且严重影响了 MMC 可靠性。当 SM 故障后需要立即对其进行切除以及时隔离故障并避免引发连锁故障。另外,MMC 检修周期通常为一年左右,在维护之前无法对故障 SM 进行更换,如何保证 MMC 在检修期间持续稳定运行成为亟需解决的问题。国内外学者对 MMC 持续容错运行进行了深入研究并提出了相应的 MMC 容错运行方法,该类方法在提高 MMC 系统的可靠性及安全性方面至关重要。

目前,MMC 容错运行方法主要通过硬件和软件相互配合的方式实现 MMC 容错持续运行。如基于新型 SM 拓扑的容错方法通常需要提出相应的 SM 调制方法以实现 MMC 容错,再如基于软件的容错运行方法需要结合冗余 SM 硬件的切除实现容错。本文根据硬件和软件方法在 MMC 容错运行过程中的主导地位,将现有的容错运行方法主要分为两类:1) 基于硬件主导的容错运行方法;2) 基于软件主导的容错运行方法。其中,基于硬件主导的容错运行方法主要由 3 个方向:1) 基于冗余 SM 配置的容错运行方法;2) 基于新型 SM 拓扑的容错运行方法;3) 新型 SM 拓扑结合 MMC 拓扑修正的容错运行方法。基于软件主导的容错运行方法大多采用 SM 硬件冗余结合软件的容错运行方式,例如桥臂能量平衡控制方法、调制波/载波重构、SM 电容电压修正、中性点偏移等方法。图 1 对 MMC 容错运行方法进行了简要的梳理和概括。

采用模块化结构设计,便于 MMC 通过串联相应数量的 SM 实现结构冗余并进行容错控制,此冗余方案研究最为广泛。然而,基于硬件冗余的方案不仅增加了 MMC 体积、提高了硬件成本,而且使 MMC 控制系统更加复杂,间接地影响了 MMC 的可靠性和安全性。基于软件的容错控制方法能够实现 MMC 非对称运行,但是该类方法通常以牺牲电平数目为前提。以下内容对几种常见的 MMC 容错

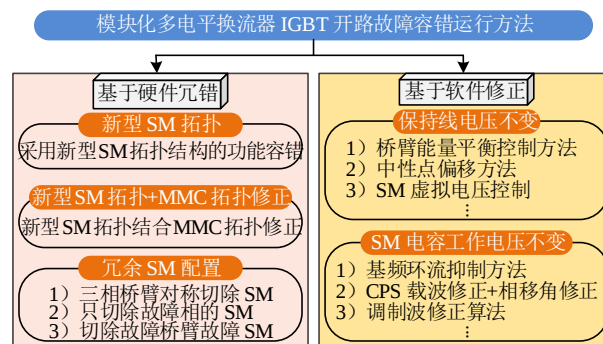


图 1 MMC 容错运行方法分类图

Fig. 1 MMC fault tolerance operation classification chart

运行方法进行了介绍及分析。

基于硬件的容错运行方法通过切除故障 SM 并及时投入冗余 SM 的方式实现 MMC 容错运行。该类方法无需复杂的算法,通过 SM 冗余备用和故障 SM 切除即可实现 MMC 的对称运行,具有简单、快速的优点。但是,该类方法需要配置一定数量的冗余 SM,增加了硬件复杂度和系统成本。其中,基于半桥 SM 冗余的容错运行方法研究最为常见,其主要在 MMC 上、下桥臂中额外配置一定数量的冗余 SM。当 SM 发生故障后,通过三相桥臂对称切除 SM、只对称切除故障相 SM、只切除故障桥臂故障 SM 共 3 种方式实现容错运行。其中,三相对称切除 SM 的方式可使 MMC 在故障 SM 切除后仍能三相对称运行,但是切除非故障相正常 SM 造成了硬件资源的浪费。基于对称切除故障相 SM 和只切除故障桥臂故障 SM 的容错运行方法虽然无需切除正常 SM,但是该类方法导致 MMC 运行在三相不对称模式。

基于新型 SM 拓扑和 MMC 拓扑修正的容错运行方法可弥补切除故障 SM 造成的桥臂电平缺失,但是该类方法需要修改 MMC 的拓扑结构并引入新颖的 SM 拓扑,导致 MMC 的控制系统更加复杂。基于软件修正的容错运行方法在切除故障 SM 后,通过修正控制器中的相关参量实现 MMC 容错运行。主要的控制目标有桥臂能量平衡控制、中性点偏移控制、直流母线电压控制、基频环流抑制控制、调制波修正等。但是,该类方法需要复杂的运算并且对采样数据及 MMC 模型精确程度依赖较高。

文献[14]详细介绍了应用于 HVDC 系统中的 MMC 容错运行控制方法并对其进行了详细的方法分类,基于此本文提出了确定 MMC-HVDC 系统中 SM 故障所允许的最大个数表达式;文献[15]对应用于 MMC 的故障诊断和容错运行方法进行了综述性

分析,对 MMC 容错运行方法进行了详细的介绍和分类。为了进一步介绍 MMC 容错运行领域的最新研究成果,本文根据容错运行方法的控制目标和方式对其进行归纳和分类,并基于上述内容对 MMC 容错运行方法在未来的研究方向和趋势进行展望。

1 MMC 故障运行特性分析

1.1 MMC 拓扑

MMC 通常由 A、B、C 三相构成,每一相由上、下两个桥臂组成,桥臂由 N 个 SM 通过串联桥臂电感 L_r 构成,其拓扑如图 2 所示,其中,半桥 SM 拓扑如图 3 所示。图中: U_{dc} 为直流侧输入电压; I_{dc} 为直流母线电流; i_{pj} 和 i_{nj} 分别为 j 相上桥臂和下桥臂输出电流,其中 p 和 n 分别代表上桥臂和下桥臂, $j=a, b, c$; u_{sj} 和 i_{sj} 分别为 j 相的输出电压和电流;桥臂电感与桥臂等效电阻分别用 L_r 和 R_r 表示。

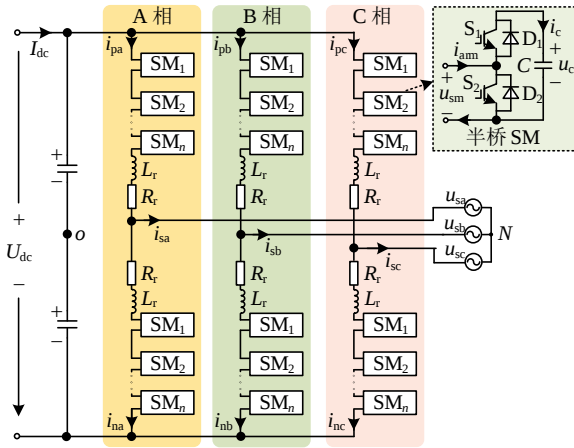


图 2 MMC 拓扑及其半桥 SM

Fig. 2 Topology of MMC and the half-bridge SM

1.2 MMC 非对称运行特性分析

目前, MMC 系统中的 SM 大多采用热备用容错运行的方式。当 SM 发生故障并被直接旁路的情况下,故障 SM 所在相的上、下桥臂将运行在非对称状态。为了定量描述 MMC 非对称运行期间的相关状态,文献[16-18]详细推导了 MMC 容错运行期间 SM 的电容电流 i_{cpj} 和 i_{cnj} 、电容波动电压 $\Delta u_{cpj,x}$ 和 $\Delta u_{cnj,x}$ 、桥臂输出电压波动分量 Δu_{pj} 和 Δu_{nj} 、相单元电压波动成分 $\Delta u_{j,ph}$ 。

首先,假设 MMC 桥臂中的 SM 个数 n 足够多或者开关频率无穷大,则上、下桥臂 SM 的平均开关函数 $S_{pj,av}$ 和 $S_{nj,av}$ 可近似为

$$\begin{cases} S_{pj,av} = 0.5 - 0.5M_v \cos \omega_1 t \\ S_{nj,av} = 0.5 + 0.5M_v \cos \omega_1 t \end{cases} \quad (1)$$

M_v 为 MMC 的电压调制系数:

$$M_v = \frac{\sqrt{2}U_{sj}}{0.5U_{dc}} \quad (2)$$

式中 U_{sj} 为 j 相输出电压的有效值。

当 SM 故障而被切除后,故障桥臂的容性阻抗变小且导致上、下桥臂的等效电容不对称,此时交流输出电流不在上、下桥臂之间对称分配。为了表示该状态,文献[17]在桥臂电流的基础上引入了基频电流不平衡系数 β ,此时故障后的上、下桥臂电流 i_{tpj} 和 i_{fnj} 为

$$\begin{cases} i_{tpj} = i_{pj} + \frac{1}{2}\beta I_{sj} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \\ i_{fnj} = i_{nj} - \frac{1}{2}\beta I_{sj} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \end{cases} \quad (3)$$

式中 i_{pj} 、 i_{nj} 为 SM 正常情况下的 MMC 桥臂电流:

$$\begin{cases} i_{pj} = \frac{1}{3}I_{dc} + \frac{1}{2}I_{sj} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + I_{az} \cos(2\omega_1 t + \theta) \\ i_{nj} = \frac{1}{3}I_{dc} - \frac{1}{2}I_{sj} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + I_{az} \cos(2\omega_1 t + \theta) \end{cases} \quad (4)$$

联立式(1)和(3)可获得上、下桥臂 SM 电容平均电流,并通过该电流可获得电容电压的波动分量。其中电容电压波动成分 $\Delta u_{c,x}$ 主要包含基频波动电压 $\Delta u_{c1,x}$ 、二次电压波动分量 $\Delta u_{c2,x}$ 、三次电压波动分量 $\Delta u_{c3,x}$ 。将 $\Delta u_{c,px}$ 、 $\Delta u_{c,nx}$ 分别与 SM 平均开关函数 $S_{pj,av}$ 或 $S_{nj,av}$ 相乘可获得上、下桥臂电压波动:

$$\begin{cases} \Delta u_{pj}(t) = (N - N_f)S_{pj,av}(t)\Delta u_{c,px}(t) \\ \Delta u_{nj}(t) = NS_{nj,av}(t)\Delta u_{c,nx}(t) \end{cases} \quad (5)$$

式中 N_f 为桥臂故障 SM 的个数。

故障相单元的电压波动幅值为

$$\Delta u_{j,ph}(t) = \Delta u_{pj}(t) + \Delta u_{nj}(t) = \Delta u_{j,ph0}(t) + \Delta u_{j,ph}(t, \beta, N_f) \quad (6)$$

由式(6)可知,故障相电压波动成分由稳态分量 $\Delta u_{j,ph0}(t)$ 和故障分量 $\Delta u_{j,ph}(t, \beta, N_f)$ 两部分组成。 $\Delta u_{j,ph}(t, \beta, N_f)$ 主要由直流分量、基频分量、2 次、3 次、4 次分量构成。其中,各分量的具体表达式在文献[17]中给出了详细的介绍,本文不再赘述。

故障相单元上、下桥臂的不对称运行导致总的电压脉动含有基频和 3 次等奇数次谐波分量,且上述成分无法通过三相叠加抵消,进而导致直流侧电压及输出电压波动,其波动成分同样以直流分量、基频分量及偶数次波动分量为。应用于高压直流

输电等系统的 MMC 检修周期为 1 年左右, 期间如果不对上述波动成分进行抑制或主动补偿控制, 将导致 MMC 运行失稳甚至停机。可见, 展开 SM 故障后的 MMC 非对称运行主动补偿控制方法研究具有重要的意义。

2 基于硬件主导的 MMC 容错运行方法

2.1 基于冗余 SM 的容错运行方法

文献[19]首先提出了具有冗余 SM 配置的 MMC 拓扑结构, 其冗余 SM 参与 MMC 运行。同时, 本文对冗余情况下的 SM 电容电压波动进行了分析和建模, 通过桥臂电流控制间接实现了环流电流控制及 SM 电容电压波动抑制。该方法不仅降低了 SM 的开关频率, 而且降低了 SM 的电压纹波。然而, 本文未给出具体的 MMC 容错运行方法。目前, 根据冗余 SM 的工作方式, 可分为 SM 冷备用和热备用两种^[20], 具体配置方式如图 3 所示。冗余 SM 的冷备用和热备用模式可根据旁路开关 K 闭合状态区分。当 K 处于闭合状态时, SM 为冷备用模式, 如图 3(a)~(c)所示。其中: 上下开关管 S_1 和 S_2 分别处于导通和关断模式时, SM 处于冷备用投入模式; S_1 和 S_2 分别处于关断和导通模式时, SM 处于冷备用切除模式; S_1 和 S_2 全处于关断模式时, SM 处于冷备用闭锁模式。当 K 断开时, SM 为热备用模式, 如图 3(d)所示。冷备用的冗余 SM 不参与 MMC 的运行, K 始终处于闭合状态。然而, 当故障 SM 被切除后, 冷备用 SM 投入桥臂后需要对电容进行充电, 该过程会导致桥臂电流畸变, 暂态过程较长。

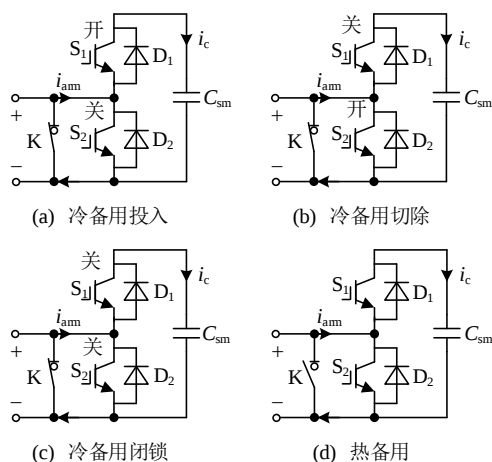


图3 冗余 SM 备用状态

Fig. 3 The redundant SM standby state

1) 基于冗余 SM 冷备用的 MMC 容错运行。

冷备用冗余 SM 在桥臂中配置方式如图 4(a)所示^[21]。MMC 正常运行时, 冗余 SM 处于冷备用状态, 此时冗余 SM 不参与 MMC 的运行; 当 SM 发生故障后, 旁路开关 K 闭合, 将故障 SM 切除, 同时冗余 SM 的旁路开关 K 断开并将其投入桥臂以代替故障 SM, 进而保证 MMC 系统的正常运行。

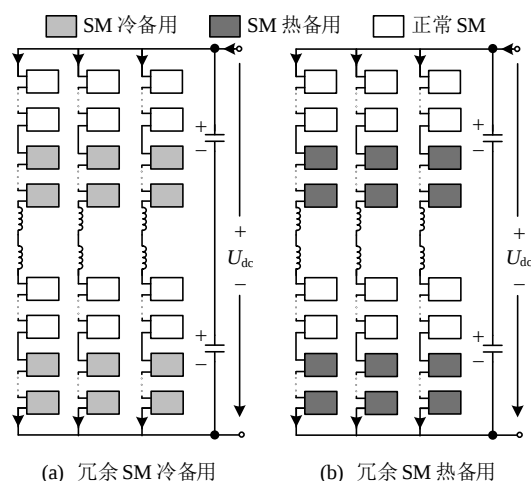


图4 冗余 SM 在 MMC 中的配置方式

Fig. 4 Redundant SM configuration mode in the MMC

通过冗余 SM 替代故障 SM 的方式使 MMC 在故障后仍然处于完全对称运行状态。同时, 该方式在故障前后控制策略无需进行过多的调整, SM 驱动重新配置到投入的冗余 SM 即可。但是, 该方案存在如下缺点: ①正常运行时, MMC 各桥臂必须配置相应数量的冗余 SM, 系统的硬件成本增加; ②处于冷备用的 SM 切入 MMC 系统时, 因为旁路开关固有的开关时间, 会导致 MMC 故障暂态调节时间变长; ③处于冷备用的 SM 切入 MMC 运行时需要对 SM 电容进行充电, 因此会产生暂态电压波动分量。

2) 基于冗余 SM 热备用的容错运行。

热备用 SM 始终参与 MMC 的正常运行, 故 SM 电容不存在充电等暂态过程, 具体配置如图 4(b)所示。该方法具有投切方便、暂态时间短等优点。其中, 热备用切除 SM 的方式分为三相对称切除、相切除和桥臂切除 3 种。

①所有相单元对称隔离的容错运行。

冗余 SM 热备用对称隔离的容错运行方法将故障 SM 切除的同时其它桥臂对应位置的 SM 也进行切除处理^[22], 图 5(a)为 A 相上桥臂 SM_1 发生开路故障时各相切除 SM 的示意图。该方法通过对称切除 SM 以保证 MMC 故障后对称运行, 控制方式简单

且容易实现。但是,该方案切除了各桥臂中大量的非故障 SM,因此导致 MMC 输出功率及输出电平数下降,并造成 SM 硬件资源浪费。

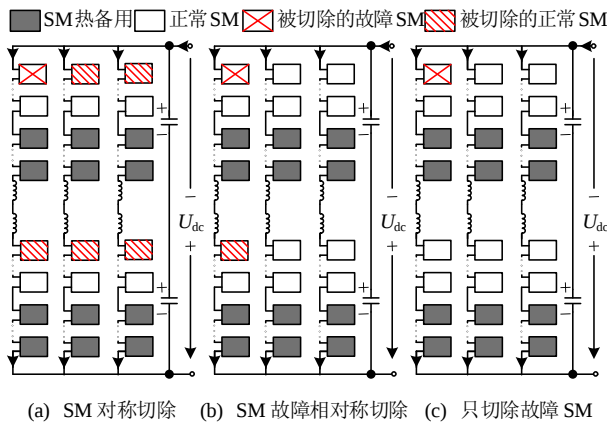


图 5 冗余 SM 热备用切除方式

Fig. 5 Redundant SM hot standby cut-out method

②故障相对称隔离的容错运行。

故障相对称隔离的容错运行方法将故障 SM 切除的同时,所在相单元非故障桥臂对应位置的 SM 同样需要切除。然而此种容错运行方法导致故障相与非故障相输出电平数不同,MMC 各相之间处于非对称运行模式,导致相间环流增加,图 5(b)为 A 相上桥臂 SM₁ 发生开路故障时所在故障相切除 SM 的示意图。

③只切除故障 SM 的容错运行。

该类容错运行仅对故障 SM 进行切除,图 5(c)为 A 相上桥臂 SM₁ 发生开路故障时切除故障 SM 的示意图。该方法避免了硬件资源的浪费,但是故障相上下桥臂之间、各相之间处于非对称运行模式。

基于上述分析可知,SM 热备用的方式可以避免 SM 电容的瞬时充电过程,具有切换迅速、暂态时间短的优点。现有基于硬件的 MMC 容错运行策略大都基于 SM 热备用展开。文献[19]提出了基于 SM 热备用的方法并对该备用方式进行了分析,结果表明,SM 热备用方法不仅可实现 MMC 容错运行,而且可有效降低 SM 电容电压纹波及其开关频率;文献[23]提出了基于桥臂能量平衡控制的容错运行方法,其通过调整故障桥臂 SM 的电容电压使其在故障前后始终保持障桥臂能量恒定,而且该方法仅切除故障 SM,避免因切除正常 SM 而造成硬件资源的浪费。类似地,文献[24]提出了基于切除故障 SM 的 MMC 故障容错运行方法;文献[25]提出了基于模型预测控制的容错运行方法,通过控制

上、下桥臂对称切除相同的 SM 实现故障环流电流控制,该方法不影响交流侧输出电压;文献[26]通过故障清除控制和替代控制两部分实现了 SM 故障的顺利清除并有效降低了 MMC 的导通损耗;文献[27]通过利用冗余 SM 实现了 MMC 的容错稳定运行;文献[28]提出了一种包括故障检测、定位、冗余和恢复的控制策略,在故障容错阶段通过对称隔离 SM 的方式实现 MMC 在 IGBT 开路故障条件下连续运行;文献[29]通过调整 MMC 的电容电压平均值、桥臂电压参考及等效开关频率实现了容错运行,此外,该方法仅切除故障 SM,有效提高了硬件资源的利用率;文献[30]通过容错运行单元对故障子模块及相邻桥臂中对应的健康 SM 进行隔离实现 MMC 的对称容错运行。该方法因切除对应的正常 SM 造成了硬件资源的浪费。

2.2 基于新型 SM 拓扑的容错运行方法

文献[31]提出了多电平模块化电容钳位 DC/DC 冗余 SM(multilevel modular capacitor-clamped DC/DC converter, MMCCC),其结构如图 6 所示,该新型 SM 通过控制 TR、TB、TX 共 3 个 IGBT 的导通与关断配合使其输出 0 V、+V_{c1}、+V_{c2} 以及 V_{c1}+V_{c2} 共 4 个电压等级,其功能类似于多抽头直流自耦变压器,故该新型 SM 可以实现多 SM 故障下的容错运行。MMCCC 结合简单的故障容错方法及修正的调制方案即可实现 MMC 的容错运行。但是,该新型 SM 所需要的 IGBT 较多且控制方式较复杂。

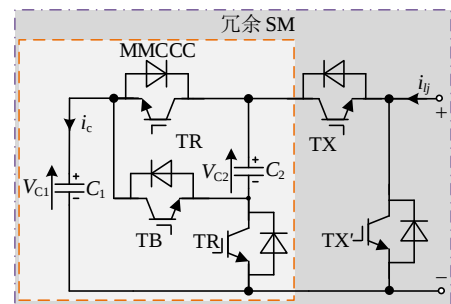


图 6 多电平模块化电容钳位 DC/DC 冗余 SM

Fig. 6 Multilevel modular capacitor-clamped DC/DC converter

类似地,文献[32]提出了一种新的 SM 电路,其工作原理类似于两个级联半桥 SM,能够输出 0 V、+V_c、+2V_c 共 3 种电平,具体结构如图 7 所示。该新型的 SM 在其 IGBT 开路故障方面具有优异的容错性能,例如 T₁ 开路故障使故障 SM 无法产生 +V_c 电平。然而,故障 SM 仍然可以产生 0 和 +2V_c

两种电平。此外, T_2 开路使故障 SM 不能产生 $+2V_c$ 电平, 但故障 SM 仍然能够产生 0 和 $+V_c$ 两种电平工作。文献[33]提出了一种具有容错功能的新型 SM 拓扑, 具体结构如图 8 所示, 该 SM 内部集成了一个工作半桥 SM 和一个备用半桥 SM。两个半桥 SM 通过开关(SW_1)和 IGBT(T_5)可以实现并联。另外, 两个半桥 SM 也可以通过 SW_3 级联。该模块具有内部故障容错和外部故障容错的容错能力, 但是需要额外的开关和 IGBT, 增加了硬件系统的成本。

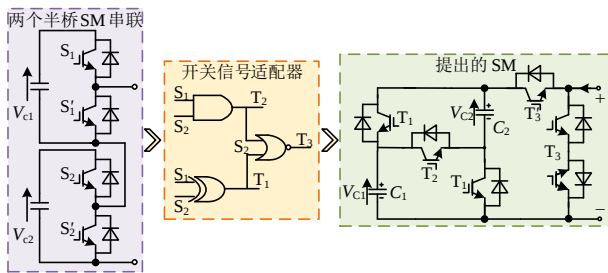


图 7 文献[32]中提出的 SM, 包括开关信号的逻辑电路

Fig. 7 Proposed SM in Ref. [32], including logic circuit for converting the switching signals

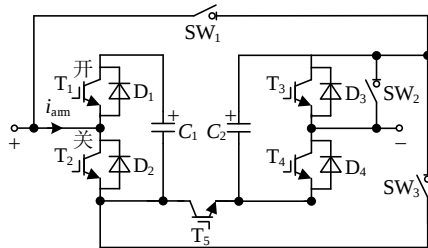


图 8 文献[33]提出的具有容错功能的 SM

Fig. 8 Fault tolerant SM proposed in Ref. [33]

2.3 新型 SM 结合 MMC 拓扑修正的容错运行方法

文献[34]提出了一种适用于中压 MMC 固态变压器的 SM 全局冗余方法, 通过 S_1 — S_6 这 6 个双向开关实现冗余 SM 和 DAB 单元在上、下桥臂中的共享, 该方法仅需要一个冗余 SM, 避免了过多 SM 的冗余配置进而节约了硬件冗余成本, 其全局冗余模式的具体结构如图 9(b)所示。类似地, 文献[35]提出了一种共享冗余 SM 策略, 允许上桥臂或下桥臂使用冗余 SM。首先本文对 MMC 及其冗余 SM 的结构进行了改进, 冗余 SM 没有并联双向晶闸管, 而是根据图 10(a)所示将双向晶闸管 T_{j2N+1} — $T_{j2N+2M+1}$ 嵌入到冗余的 SM 中, 正常情况下, T_{j2N+1} — $T_{j2N+2M+1}$ 接通以旁路所有的冗余 SM。一旦上桥臂的某个 SM 发生故障, 旁路该故障 SM 的同时, T_{j2N+1} 关闭以投入冗余 SM。同理, 一旦下桥臂的某个 SM 发生故障, 旁路该故障 SM 的同时, $T_{j2N+2M+1}$ 关闭

以投入冗余 SM, 具体如图 10(b)所示。上述冗余共享 SM 是在传统半桥 SM 或全桥 SM 的基础上通过改变 MMC 电路拓扑结构实现的冗余。

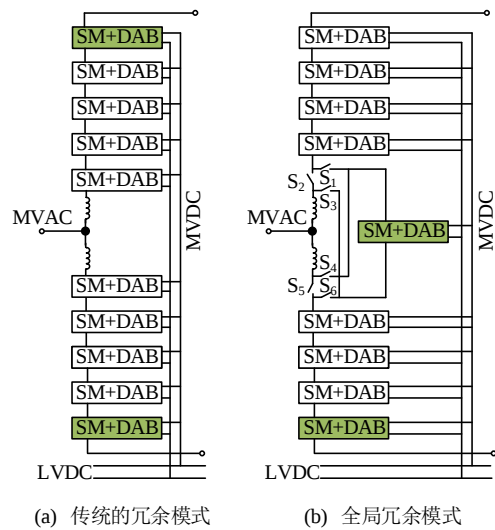


图 9 文献[34]提出的全局冗余模式

Fig. 9 Global redundancy scheme proposed in Ref. [34]

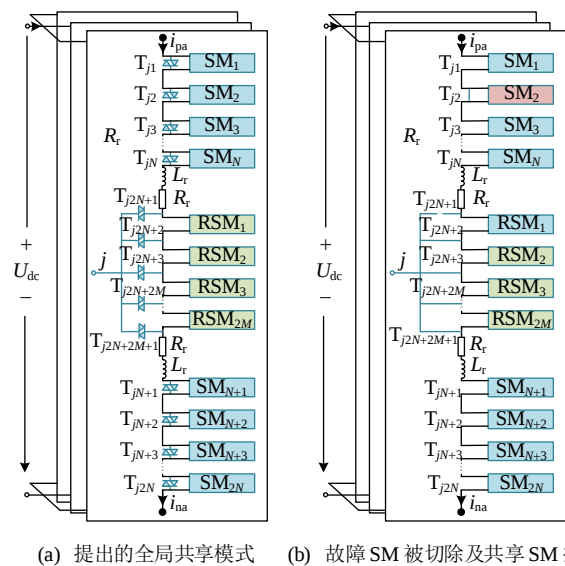


图 10 文献[35]提出的全局冗余模式

Fig. 10 Global redundancy scheme proposed in Ref. [35]

文献[33,36-37]提出了具有降低桥臂 SM 电容电压波动能力的中间 SM 拓扑, 其结构如图 11(a)~(c)所示。然而, 这些中间 SMs 不具有容错能力。在此基础上, 文献[38-39]提出了如图 11(d)所示的新型中间 SM 拓扑, 该中间 SM 不仅具有降低桥臂 SM 电容电压波动的能力, 且在 SM 故障后可以对中间 SM 进行配置实现 MMC 容错运行。例如, 当上桥臂中的任何 SM 出现故障时, 通过开启 S_3 和 S_5 , 关闭 S_4 , 中间 SM 中的开关 S_1 、 S_2 以及电容被配置为一个新的半桥 SM, 进而用于替换故障 SM, 提高了

系统的可靠性。文献[40]提出了基于冷热混合的容错 SM 拓扑，该方案避免了冷备用 SM 电容的充电过程并且通过调整开关信号即可实现容错运行，进一步降低了容错算法的复杂度。

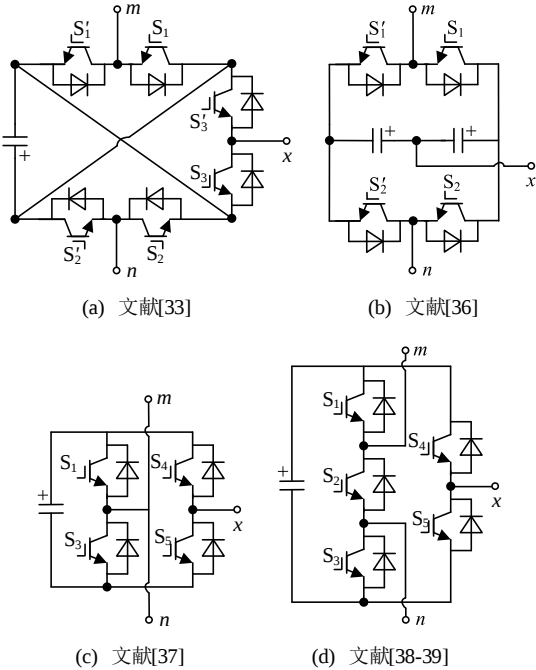


图 11 不同的中间 SM 拓扑

Fig. 11 Circuit diagrams of different middle SMs

为了更客观地分析基于新型 MMC 拓扑及新型 SM 的容错运行方法在工程应用方面的可行性，表 1 从硬件方案、应用场景、验证方式、容错优点及工程可行性共 5 个方面对文献[31-35,38-40]进行了梳理与分析。其中，文献[33-35]进行了相关的硬件实验验证，结果表明其具有工程应用的可行性。文献[31-32,40]进行了仿真和硬件在环实验验证，证明了所提出的新型 SM 拓扑的容错能力及模块化扩展性能。

表 1 MMC 容错运行方法工程可行性分析

Table 1 Engineering feasibility analysis of MMC fault-tolerant operation methods

文献	硬件方案	应用场景	验证方式	容错优点	工程可行性
[31]	新型 SM	MMC	RT-LAB 硬件在环	电压稳定	可扩展
[32]	新型 SM	MMC-HVDC	dSpace1104 硬件在环	多重容错	可扩展
[33]	中间 SM	MMC	仿真+实验验证	降低成本	实验可行
[34]	全局冗余	MMC-SST	仿真实验验证	降低体积	仿真可行
[35]	SM 共享	MMC	仿真+实验验证	多重容错	实验可行
[38]	中间 SM	MMC	仿真实验验证	降低波动	仿真可行
[39]	中间 SM	MMC	仿真+实验验证	降低波动	实验可行
[40]	新型 SM	MMC	仿真+硬件在环	算法降低	实验可行

通过上述分析可知，基于新型 MMC 拓扑方案

在 MMC 容错控制领域是一个新兴的研究方向，上述研究可以作为 MMC 容错运行方面的相关技术储备和方法积累。此外，由于工程应用过程中对系统的可靠性要求较高，所以上述新型 MMC 拓扑方案需要经过充分的实验验证确保其技术成熟度较高的情况下才能应用于工程实践中，故上述研究在工程应用方面具有滞后性。

3 基于软件主导的 MMC 容错运行方法

基于软件主导的容错运行方法主要通过谐波环流抑制、中性点偏移等容错运行方法保证 MMC 故障后仍能保证持续稳定运行，具体内容如下文所述。

3.1 基于调制波/载波重构的容错运行

该类方法主要根据不同 SM 故障类型对调制波或载波进行重新调整或修正进而实现 MMC 的容错稳定运行。文献[41]通过改变载波移相角并结合 SM 电容电压值调整的方式对环流电流进行控制，然而该方法需要对所有 SM 的三角载波角度进行重新调整，计算量及调整方式相对比较复杂。类似地，文献[30]提出了基于 SM 电压及载波移相角修正的容错运行策略，可以有效抑制 MMC 不对称运行导致的环流电流成分，进而保证电流总谐波符合要求；文献[42]提出了基于基频无功环流注入的直流极对地短路故障穿越的控制方法；文献[43]提出了基于载波移相的 MMC 容错运行策略，该方法实现了冗余 SM 的平滑切换。进一步地，文献[44]提出了基于三角载波缩放的故障容错运行方法以保持 MMC 输出电压稳定。

文献[45]提出了基于最优动态表现和最优电压应力的容错运行方法，该方法需要在 MMC 故障容错阶段对三角载波的周期和相移角进行修正，其具体的执行过程如图 12 所示；同时，为了保证故障 SM 在容错运行阶段不再投入桥臂运行，引入符号函数对故障 SM 进行标记。为了抑制不对称谐波电流，文献[46]提出了一种改进的载波移相调制方法。该方法实现了载波频率及其移相角的动态调整，但是该方法成本较高；文献[47]提出了基于正弦调制波修正的 MMC 容错运行控制方法，该方法在探测和故障定位阶段进行容错运行，有效提高了 MMC 在后续容错阶段的无缝切换能力；文献[48]提出了基于过调制运行的 MMC 容错运行方法。该方法将 MMC 运行在过调制区域以替代冗余 SM，可避免使用冗余 SM 并降低 MMC 成本。此外，本文通过建

立最小直流电压及 MMC 线性区域极限解析表达式证明了过调制运行具有一定的固有冗余运行功能。

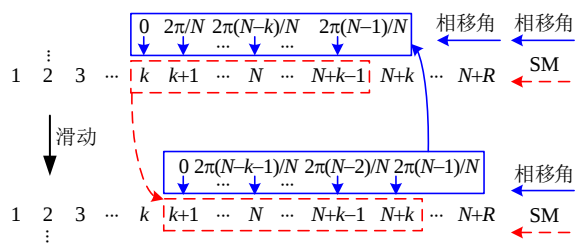


图 12 MMC 中 PSC 调制中角度滑动的选择原则

Fig. 12 Choosing principle of the sliding box in PSC modulation for MMCs

为了提高载波调整的灵活性和容错能力,文献[49]提出了一种基于自适应载波的相位分布脉宽调制方法,该方法仅使用一个载波并结合桥臂能量平衡控制实现了 MMC 故障后 SM 电容电压的再平衡。类似地,文献[50]提出了一种基于自适应载波相位配置脉宽调制的容错运行方法,该调制方法仅使用一个载波,通过载波控制进而控制桥臂之间的能量流动,具有优异的对称和非对称容错能力。

3.2 基于 SM 电容电压修正的容错运行

基于 SM 电容电压修正的容错运行方法通过 SM 电容电压调整并结合控制算法调整、载波修正等方法以达到故障环流电流抑制及 MMC 的稳定运行。针对 MMC 在光伏系统中的应用,文献[51]提出了基于冗余 SM 电容电压控制的 MMC 桥臂功率平衡容错运行方法,通过针对剩余 SM 的开关驱动信号和电容电压控制实现 MMC 容错运行。为了在无冗余 SM 配置的情况下提高 MMC 的故障穿越能力,文献[52]提出了一种基于 SM 电容电压弹性控制的容错运行控制策略,该策略提高了 MMC 在中压应用中的可靠性。

类似地,为了避免因切除正常 SM 而造成硬件浪费并提高硬件的利用率,文献[15]对故障桥臂 SM 的电容电压进行了重新调整,在只切除故障 SM 的前提下,通过提升故障相电容电压值实现对环流电流基频分量的抑制;文献[53]对 MMC 桥臂电压波动成分进行了数学建模,经建模分析可知,MMC 非对称运行使 SM 电容电压波动幅值增大并产生环流基频分量,最终该基频分量会流入 MMC 直流侧并导致基频脉动。为抑制基频环流成分,文献[23,48,53]提出了基于 SM 电容电压升压与开关频率修正的容错运行方法,但是,故障桥臂 SM 电容电压抬升存在电容瞬态充电过程,将导致系统暂态

不稳定;同时 SM 中电容及 IGBT 的耐压等级要求更高。

此外,文献[54]提出了基于冗余 SM 动态调整的容错运行方法,该方法根据 MMC 不同的工作过程动态调整冗余 SM 的个数,实现了硬件设备利用率最大化并且降低了器件的电压应力,同时实现了 SM 电容电压在容错阶段的最小化运行,然而,桥臂之间 SM 工作数量不同将导致 MMC 产生不对称谐波;文献[55]提出了基于虚拟 SM 映射的容错运行方法,该方法在 MMC 无冗余 SM 的情况下,通过采取驱动虚拟映射、输出电压快速修正的方式实现了容错阶段 SM 电容电压均衡控制。

3.3 基于环流抑制的容错运行

由于故障 SM 切除导致 MMC 容错运行期间处于非对称运行状态,导致环流电流中产生了奇次分量,为了对奇次环流成分尤其是基频环流成分进行抑制,文献[18,56-63]提出了基于比例谐振控制器(proportional resonance controller, PR)、重复控制器、比例积分控制器(proportional integral controller, PI)等控制方案的环流抑制方法。

为提高 SM 利用率,文献[56]通过 PR 控制器对基频环流成分进行抑制;文献[57]从单 SM 开关函数模型着手,建立了桥臂 SM 叠加模型、桥臂电压与电流关系模型,同时对 MMC 不对称运行造成的环流基频分量进行了分析,基于此,提出了基于 PR 控制器的容错运行方法,然而,该容错运行方法对高频环流谐波抑制能力较差。文献[18,58]通过二阶广义积分器对电流谐波成分进行提取。其中,文献[18]对不同故障类型的 SM 内部特性进行建模,并针对不同故障特性设计了通用环流抑制器。

文献[58]对 MMC 故障后系统等效桥臂电流及故障状态等效电路进行了建模分析,其等效电路如图 13 所示,通过对调制波进行重构并结合 PR 控制

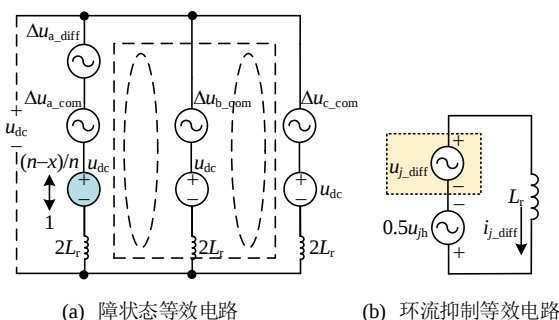


图 13 MMC 子模块故障等效电路及环流抑制等效电路

Fig. 13 MMC submodule fault status equivalent circuit

器对环流电流进行抑制, 实现了 MMC 无冗余 SM 下的容错运行。为了进一步提高 PR 控制器抑制不对称环流的性能, 文献[59]通过准 PR 控制器对容错期间的环流成分进行控制, 通过引入虚拟电阻前馈补偿环节实现控制器性能的提升; 文献[60]利用峰值滤波器对环流中的基频分量进行了提取并通过准 PR 控制器对基频分量进行修正, 该方法实现了 MMC 在非对称运行模式下的稳定控制。

文献[61]对 MMC 输出电流和环流电流进行数学建模, 分析了 MMC 故障后环流成分, 设计了可以抑制奇数次环流谐波的重叠控制器, 实现了 MMC 故障至容错阶段的平滑切换; 文献[62]提出了基于桥臂电流不对称抑制器的环流电流抑制方法; 文献[63]对故障 MMC 进行了数学建模, 在切除故障 SM 后, 故障桥臂与正常桥臂之间的等效电容出现偏差并导致环流电流中产生基频电流成分。为此, 提出了基于基频环流控制器的故障容错运行方法, 结构如图 14 所示, 其通过带通滤波器和二倍频陷波器对环流电流中的基频分量进行提取, 然后通过 PI 控制器对基频环流电流进行控制; 同时利用差分电压对交流输出参考进行修正, 实现了基频环流成分抑制及 MMC 稳定运行。由于该方法控制目标为基频环流, 因此无需关注故障 SM 个数。

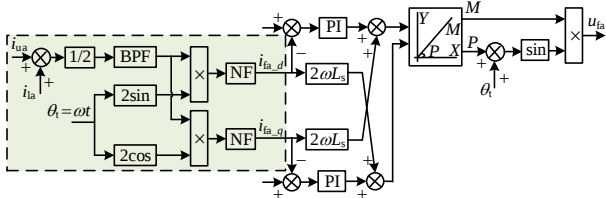


图 14 文献[63]提出的故障容错运行控制方法

Fig. 14 Ref. [63] proposed fault-tolerant approach for MMCs

3.4 基于电压/电流成分注入的容错运行

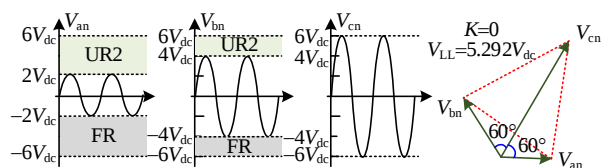
为保证 MMC 输出线电压幅值和相位不变, 文献[64]提出了基于零序电压注入的容错运行方法, 该方法根据故障相输出电压是否超过临界值作为前提条件, 对注入的零序电压及各相参考电压进行调整, 但是, 限幅区间计算方法较为复杂并占用大量的计算资源; 文献[65]通过在调制信号中注入零序电流实现了对系统相电压的重构, 进而保证容错阶段线电压不变, 然而该方法无法抑制输出电流中的谐波成分。为了保证 MMC 在多 SM 故障下的容错运行, 文献[66]提出了基于基波注入的容错运行方法, 但是, 该方法将导致三相有功功率不平衡;

文献[67]提出了一种基于直流分量注入的容错运行方法, 但该方法会干扰电流控制器并导致输出电流发生畸变; 文献[17]对 MMC 故障情况下的等值电路进行了建模, 通过桥臂环流和直流电流波动推导分析, 设计了一种直流电流波动抑制策略, 此外, 通过在正弦调制波中添加相电压参考修正量实现了电流波动抑制。

文献[68]提出了一种基于零序电压注入的容错运行方法, 该方法根据 SM 故障发生的具体情况调整电压注入系数, 进而控制剩余 SM 电容电压并保持 MMC 输出线电压平衡; 文献[69]提出了一种基于 MMC 直流母线电压动态调整及低幅基频零序电压注入的容错运行方法, 该方法通过虚拟能量控制思想简化了桥臂能量平衡控制并且使算法容错能力得到了显著提升。针对 MMC 故障相非对称运行期间会引入奇次环流的问题, 文献[70]提出了基于基频电压分量注入的 MMC 容错优化控制策略, 该方法可有效抑制故障相的基频环流和谐波, 有效提高了 MMC 的可靠性; 文献[71]提出了基于环流检测的故障诊断方法和基于交调补偿分量注入调制信号的 MMC 容错运行方法, 该方法通过无缝快速切换和补偿实现了 MMC 持续稳定运行。为了提高容错的能力, 文献[72]提出了基于零序电压注入与中性点偏移相结合的容错运行方法, 利用直流注入简化算法有效降低了计算量, 并且通过容错方法结合提高了容错能力。

3.5 基于中性点偏移的容错运行方法

为了补偿故障相中缺失的电压, 文献[73]通过调整交直流侧中性点以补偿故障相电压。在此基础上, 文献[74]提出了基于中性点偏移的线电压最大化容错运行方法。文献[75]根据 SM 发生开路故障的情况, 将变换器分为故障区域、安全运行区域、无用区域 3 类, 通过中性点移位控制调整交流相电压之间的角度和幅值, 实现直流母线电压值最优化及线电压最大化。图 15 为该方法中 K 取 0~2 等 5 个不同数值下相电压矢量波形。文献[76]提出了基于 MMC 中性点移位控制的容错运行策略, 该方



(a) 直流分量为零

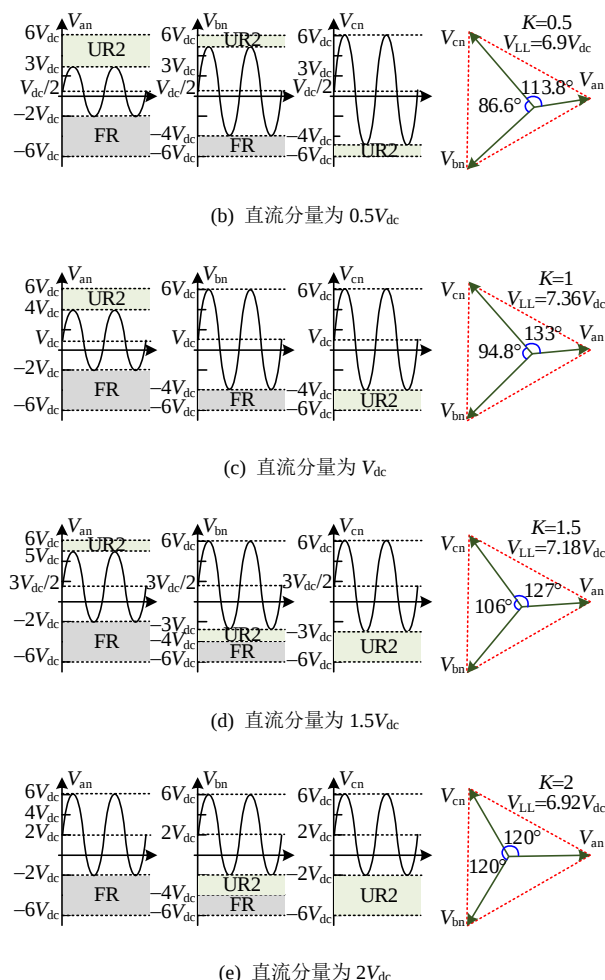


图15 用CDCNS方法得到MMC的相电压和相量图

Fig. 15 Phase voltages and phasor diagram of the MMC using the CDCNS method

法通过修正MMC调制波对中性点进行控制,使中性点在故障相矢量方向移动以保证线电压稳定。

文献[77]针对现有中性点偏移容错运行方法计算复杂、容错能力有限的缺点,提出了基于中性点复合变换控制的MMC容错运行方法,容错运行期间的中性点及其相电压如图16(b)所示。为了降低中性点偏移参数计算复杂度的问题,提出了一种改进的交流侧相电压矢量重构方法,实现了容错期间各相调制波调整参数的在线实时计算。文献[78]提出了基于SM虚拟电压的容错运行方法,该方法与其他方法相比无需对三角载波进行重新配置;文献[79]提出了基于直流母线升压的容错运行策略,其主要对中性点做出偏移调整,并且不切除对应桥臂的故障SM,通过改变角度、调制波形、线电压损失值和直流母线升压等方式弥补线电压值;文献[80]提出了基于修正直流母线电压幅值的容错运行方法,实现了线电压最大化。

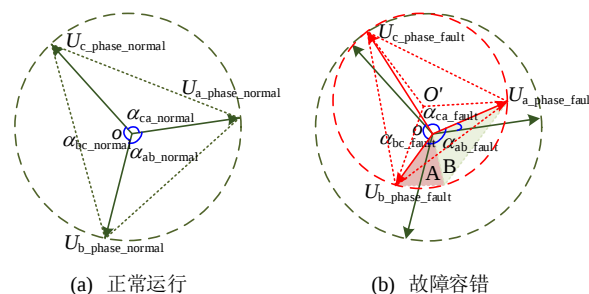


图16 输出相电压的空间矢量

Fig. 16 The vector diagram of output phase voltages

3.6 基于桥臂能量平衡的容错运行

为了保证MMC非对称稳定运行及抑制容错运行期间的基频环流成分,文献[23,81-82]分别提出了基于桥臂能量平衡控制、故障桥臂SM电容电压抬升的容错运行方法;文献[23,81]提出了基于桥臂能量平衡的容错运行策略。文献[81]对MMC容错阶段非对称运行模式进行了建模;根据数学模型可知非对称运行将导致桥臂能量不平衡、直流电流波动。为维持故障前后桥臂能量恒定,上述文献通过抬升故障桥臂剩余SM的电容电压以保证MMC持续稳定运行。但是,随着故障SM个数的增多,正常SM电容工作电压将逐渐增高,功率器件电压应力将增大。文献[82]根据故障SM数量确定桥臂能量再平衡条件,进而保证MMC直流电流稳定并对环流电流基频分量进行抑制。

然而,桥臂能量平衡控制方法将导致故障桥臂的剩余SM的电容电压及其开关频率升高,并导致故障桥臂中的SM损耗增加,降低MMC寿命并影响其可靠性。为了达到故障桥臂中功率器件损耗优化的目的,文献[83]提出了一种基于故障桥臂SM均压执行频率动态调整的优化控制方法,其可以优化并均衡功率器件之间的功率损耗,有效提高MMC寿命并提高其可靠性。

3.7 基它类型的容错运行方法

为了提高容错运行方法的容错能力,相关学者结合不同控制方案的优点提出了相应的容错运行方法。该类方法各有利用了相关策略的优点并实现了MMC的稳定运行。

1) 基于模型预测的容错运行。

为了实现MMC容错运行期间的多目标优化控制及MMC持续稳定运行,相关学者提出了基于模型预测的容错运行方法。文献[31,84]提出了基于模型预测控制算法的MMC容错运行方法,其环流电流直流分量控制图如图17所示。故障穿越阶段,

该方法分别对输出电流、环流电流、SM 电容电压参考及代价函数进行调整,保证了 MMC 稳定运行。文献[85]将所提出的容错运行方法集成到 MMC 模型预测控制算法的代价函数中,通过对 MMC 输出电流、环流电流及 SM 电容电压的自适应控制实现 MMC 容错运行,该方法可以在几 ms 内完成故障隔离和系统重构,并且可以实现多个 IGBT 开路故障的无缝穿越。

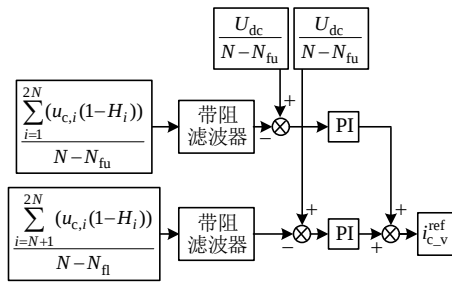


图 17 直流分量的环流电流控制图

Fig. 17 DC component of the circulating current control diagram

类似地,文献[86]提出了一种基于模型预测控制的无冗余 SM 容错运行方法,该方法通过交流电流最优控制、循环电流和交流电流多目标优化控制实现了桥臂不对称情况下的 MMC 容错运行;文献[25]对桥臂电压与桥臂电流基频分量进行了分析,提出了基于模型预测控制的容错运行方法,该方法对基频环流、二倍频环流进行抑制以保证 MMC 持续稳定运行;文献[87]对故障后剩余健康 SM 的电容电压进行了数学建模,通过 SM 电容能量预测算法对调制信号及 SM 电容电压进行动态调整以抑制环流成分,该方法在 MMC 正常和容错状态下均适用且无需附加额外的环流抑制器,具有算法简单的优点。为了提高容错运行方法的动态响应能力,降低控制计算量,文献[88]建立了基于预测算法的固定计算次数数学模型,通过该模型结合预测算法实现了故障提前预测及不对称 SM 故障后的 MMC 持续容错运行。

2) 基于 SM 半热冗余的容错运行方法。

SM 半热冗余的容错运行方法可快速实现备用 SM 的无缝切换,减少切换时间并降低系统震荡的风险。文献[89]提出了一种基于备用 SM 半热冗余切换的容错运行方法,该方法首先将备用 SM 进行不可控充电并控制该电容电压处在恒定状态,当有 SM 出现故障并被旁路后,备用 SM 将进行受控二次充电至额定电压并迅速替换故障 SM,可快速降

低环流振荡,保证 MMC 在 SM 故障情况下正常运行;文献[90]提出了一种适用于 MMC-HVDC 系统的 SM 半热冗余容错运行方法,在该容错运行方法将 SM 控制在较低的电压范围内且无需频繁充放电,从而降低了开关损耗,当 SM 故障被旁路后,相应数量的冗余 SM 可及时充电到额定电压,以替代故障 SM。该冗余容错运行控制策略可以有效缩短容错期间状态切换的暂态过程。

3) 基于空间矢量调制的容错运行方法。

为了提高 SM 电压利用率并通过新空间矢量的方式保证 MMC 的稳定运行,文献[91]提出了基于空间矢量脉宽调制的新型容错运行方法,该方法利用新的电压矢量对 MMC 进行容错控制,实现了更高的电压利用率;但是,该方法存在计算量大的缺点,仅适用于 SM 数量较少的 MMC 系统。文献[92]受两电平 SVPWM 的启发,提出了基于旋转选择框架的容错运行方法,该方法将所有 SM 均匀投入工作实现了各 SM 电容电压均衡控制;但是,当冗余 SM 全部投入运行时,SM 等效开关频率会升高。文献[93]提出了基于空间矢量调制的容错运行方法。在故障容错阶段,该方法通过产生新的电压矢量对 MMC 进行容错控制;然而,该方法计算量将随着 MMC 输出电平数的增加而逐渐增大。

4) MMC 不同应用场景下的容错运行方法。

由于 MMC 广泛应用于电池储能、中压电机驱动等不同的领域,针对 MMC 特定的应用场景相关学者提出了相应的容错运行方法。文献[94]针对应用于集成电池储能系统的 MMC 容错运行方法进行了分析,提出了一种基于电容电压平均值的控制方法,该方法适用于 MMC 正常运行及容错运行,具有控制灵活性;文献[95]提出了一种适用于混合型 MMC 系统的故障相备用 SM 插入数量动态调整的容错策略,该方法分析了 SM 电容电压波动与故障相投入冗余 SM 数量之间的关系,并基于此设计出与容错策略相匹配的 SM 电容电压控制方法,该方法利用全桥 SM 的负电压输出特性显著提高了混合型 MMC 的容错能力。

文献[96]提出了一种针对直流/直流 MMC 的故障容错运行策略,该方法利用了直流/直流 MMC 始终有一个桥臂具有冗余 SM 特性的能力,使故障后 MMC 无需增加冗余 SM,使 MMC 能够灵活地运行在不同的工作点。这一特性使 MMC 可以减少每个桥臂所需的 SM 数量,但是导致 MMC 性能下降并

且传输功率下降。文献[97]提出了基于飞跨电容 MMC 驱动转换器结构重新配置的容错运行方法,如图 18 所示,通过 SM 结构重新配置实现驱动器的不间断运行;文献[98]提出了适用于级联 H 桥的 STATCOM 容错运行方法。为了避免切除故障 SM 导致的资源浪费,通过将故障全桥 SM 工作模式切换为半桥 SM 工作模式进行容错运行。

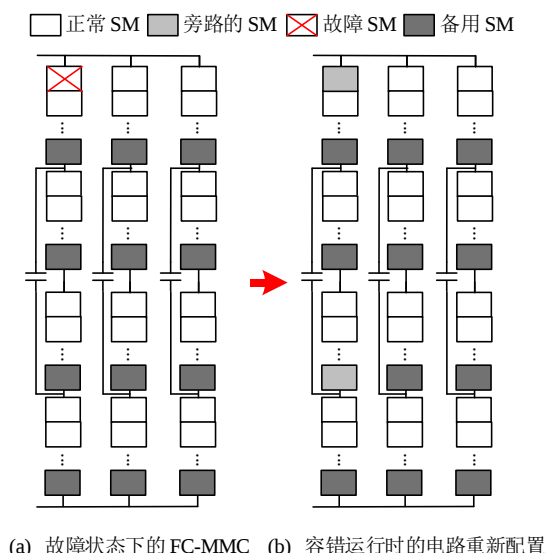


图 18 FC-MMC 的电路重新配置

Fig. 18 Circuit reconfiguration of FC-MMC

5) MMC 其它的容错运行方法。

相关学者提出了分散容错运行、选择性谐波消除、输出电压修正等容错运行方法以提高 MMC 的容错运行能力。

①基于分散控制的容错运行方法。

为了减少 MMC 主控制器计算负担和系统通信成本,提高 MMC 的可扩展性和容错的灵活性,文献[99]提出了一种应用于中高压 MMC 的 SM 级容错方法,该方法将桥臂中的 SM 进行分组并为每组分配一个本地控制器,用于进行电容电压平衡控制和驱动控制。该本地控制器可以实现 SM 组间数量不等情况下的电压均衡控制。文献[100]提出了一种分散式 SM 容错运行方法,该方法将 SM 进行分组并配置专用的容错控制器用于 SM 故障容错运行期间的 SM 电容电压控制。与传统的冗余控制器相比,该方法大大降低了本地控制器的计算和通信要求。针对 MMC 不对称运行,文献[101]基于 MMC 分布式控制架构提出了分布式容错运行方法,有效节省了主控制器的计算资源。

②基于选择性谐波消除的容错运行方法。

为了实现对特定谐波进行消除,文献[102]提出了一种基于选择性谐波消除的 MMC 容错运行方法,该方法在 SM 故障后通过修改 MMC 相桥臂的调制基准并利用不平衡相电压实现最大线电压输出。该方法不仅降低了谐波,而且还具有降低共模电压峰值和滤除共模电压高频成分的作用。类似地,文献[103]提出了一种选择性谐波消除脉宽调制方法,该方法在单个 SM 故障期间保持故障相电压基波维持恒定以保持线电压平衡。

③基于虚拟循环映射的容错运行。

为提高备用 SM 投入的速度,文献[104]提出了一种基于虚拟循环映射的冗余 SM 备用方法。该方法通过热备用 SM 快速替换故障 SM、冷备用 SM 转热备用 SM 的替换模式加快了备用 SM 的投入速度;同时为保证 MMC 输出线电压恒定,提出了 MMC 缺电平运行策略和线电压恒定故障容错运行方法。

④基于 MMC 输出电压修正的容错运行。

为了保证 MMC 容错运行期间三相输出电压对称运行,文献[105]提出了基于三相输出电压矢量修正的容错运行方法,该方法通过修正相电压之间的幅值和相角保证 MMC 持续稳定运行;然而,该方法仅适用于单个 SM 故障。文献[106]分析和推导了 SM 故障下对 MMC 环流电流和电容电压的模型,并基于此提出了两种保持 MMC 输出电压平衡的调制重构方法,并详细分析了两种调制算法的容错能力;文献[107]详细分析了 MMC 交流输出的具体成分并建立了详细的数学模型,分析了 MMC 交流分量均分的原因,利用 MMC 交流侧和直流侧数学模型设计了 MMC 桥臂电压参考信号及 MMC 非对称容错控制器,实现了 MMC 容错运行。

⑤基于电容电压排序的容错运行方法。

为了降低 MMC 的体积和成本,文献[108]提出了一种基于半桥 MMC 电容电压排序算法的容错运行方法,该方法不需要配置冗余 SM,避免了硬件资源浪费;文献[109]在 SM 电压再分配方法基础上提出了一种图形化方法对 MMC 容错控制进行系统研究,该方法具有较高的容错性,但是该方法受电池参数、功率因数及电容电压平衡控制方法的影响;文献[110]分析了 MMC 桥臂独立运行的机理,基于此提出了 MMC 不完整运行方法及其控制策略;文献[111]基于 MMC 提出了一种简单而稳健的控制方案,所提出的控制方法可确保在线和/或离线

工作模式下的高质量输出电压/电流波形，所提出的控制方法还能实现从单机到并网的无缝快速转换。文献[112]提出了不同冗余方案对 MMC 可靠性的分析方法，通过马尔可夫链和迭代方法建立了不同冗余方案下 MMC 的可靠性模型，基于所提出的模型，从 MMC 可靠性角度评估了不同冗余方案的优缺点；文献[113]提出了基于二极管开路故障下的 MMC 保护方法，该方法不仅能有效消除二极管开路故障导致的高压，还能快速检测出故障的 SM，从而有效保护了 MMC。

4 比较分析

表 2 针对几种典型的 MMC 容错运行方法进行总结与对比分析，介绍了各自的优缺点并为后续的研究方向提供了参考。由表 2 可知，基于硬件的容错运行方法通过切除故障 SM 并投入相应数量的冗余 SM，并通过调整故障桥臂剩余 SM 的载波移相比较等即可实现 MMC 的容错运行。该类 MMC 容错运行方法具有简单、直接及容错能力强的优点。然而，基于硬件的容错运行方法通常需要配置一定数量的冗余 SM，这增加了 MMC 系统的硬件成本。

表 2 MMC 容错运行方法对比
Table 2 Comparison of fault-tolerant methods

文献	方法类型	冗余 SM 及方法	母线容错电压能力	工程实用性	应用对象
[21]	硬件	配置，冷备用	恒定 强	强(可靠)	MMC
[22]	硬件	冷备用，对称切除	恒定 强	高(可靠)	MMC
[23]	硬件	热备用，仅切除故障 SM	恒定 中	高(可靠)	MMC
[31]	硬件	热备用，新型 SM	恒定 中	中(待验证)	MMC
[33]	硬件	热备用，新型 SM	恒定 中	中(待验证)	MMC
[35]	硬件	冷备用，共享冗余 SM	恒定 强	中(待验证)	MMC
[39]	硬件	热备用，新型 SM	恒定 强	中(待验证)	MMC
[41]	软件	热备用，调制波重构	恒定 中	高(可应用)	MMC
[43]	软件	热备用，载波移相	恒定 中	高(可应用)	MMC
[45]	软件	热备用，载波修正	恒定 中	高(可应用)	MMC
[58]	软件	PR 控制+环流抑制	恒定 中	高(可应用)	MMC
[66]	软件	零序电压注入	恒定 强	高(可应用)	MMC
[68]	软件	基波注入	恒定 中	高(可应用)	MMC
[69]	软件	直流母线电压调整	调整 中	中(待验证)	MMC
[75]	软件	中性点偏移	恒定 中	中(待验证)	MMC
[84]	软件	模型预测控制	恒定 中	高(可应用)	MMC
[89]	软件	SM 半热冗余	恒定 中	高(待验证)	MMC
[97]	软件	驱动重配	恒定 中	高(可应用)	飞跨电容 MMC
[98]	软件	全桥 SM 切换为半桥	恒定 中	高(待验证)	MMC-STATCOM

此外，故障容错阶段需要对称切除相应的正常 SM，造成了硬件资源的浪费。基于新型 SM 拓扑的容错运行方法需要改变 MMC 系统的拓扑结构及其控制方式，增加了容错运行的难度和硬件的复杂度。

目前，基于软件的容错运行方法在 SM 热备用的基础上，通过切除故障 SM 并结合 SM 电容电压抬升、直流母线电压动态调整、中性点偏移等方式可以实现 MMC 三相出线电压对称运行。但是该类方法仅切除故障 SM 或对故障相进行对称切除，这导致 MMC 的故障相上下桥臂之间、故障相与非故障相之间运行在非对称模型。这不仅增加了容错控制的难度，而且在提取故障环流电流、三相输出相电压中性点偏移及角度调整等方法需要实时进行大量的计算，增加了算法的复杂性和控制器的计算负担。

目前，MMC 在工程领域如高压直流输电系统中多采用 SM 冗余配置的方式进行容错运行，其具有高可靠和成本底的优点^[2,8]。如表 2 所示，其中文献[31,33,35,39]等提出的新型 SM 拓扑及 MMC 拓扑在容错能力方面具有较强的优势，但是其技术成熟度有待进一步提高且需要进一步的工程实用性验证以促进其在工程中落地应用。例如新型 SM 及 MMC 拓扑需进一步综合考虑工程实用性、成本效益以及与现有系统的兼容性等因素，以便进一步寻求更高效和更经济的解决方案。

5 结论与展望

5.1 结论

本文结合 MMC 应用场景分析了其在故障 SM 被切除后非对称运行期间的相关状态，并进一步指出展开 MMC 容错运行方法研究对提高其可靠性至关重要。接着本文根据容错方法主导类型对国内外学者提出的 MMC 容错运行方法进行了梳理和归类，结论如下：

1) 基于硬件主导的 MMC 容错运行方法主要分为 3 大类：SM 冗余配置、新型 SM 拓扑及新型 MMC 拓扑修正。其中，冗余 SM 冷备用和热备用的方式在工程实践中广泛应用；基于新型 SM 拓扑的硬件方案主要以多电平输出、提高 SM 的容错能力为目标进行设计；新型 MMC 拓扑主要通过桥臂冗余 SM 及中间 SM 共享的方式提高容错能力及器件的利用率。但是基于新型 SM 及新型 MMC 拓扑修正的容错运行方法在工程实用性方面需要进一

步进行实验验证。

2) 基于软件主导的 MMC 容错运行方法是现有方法中的主流方法。该类方法通常在 SM 热备用的基础上利用桥臂能量平衡控制、SM 电容电压调整、环流抑制、调制波或载波修正、电压或电流成分注入等方式实现 MMC 的容错运行。该类方法避免了正常 SM 的切除,有效提高了硬件利用率;同时,该类方法根据具体控制目标可以对控制参量进行灵活调整。但是,该类方法导致正常 SM 电容工作电压升高、MMC 输出线电压幅值降低,使 MMC 的直流电压利用率及输出线电压降幅运行。此外,该类方法往往针对特定的故障状态,在多故障情况下容错能力有待进一步提高。

5.2 展望

随着对 MMC 可靠性要求的不断提高,针对 MMC 容错运行方法的研究越来越受到重视。目前,相关学者在 SM 冷热备用的基础上展开了相关容错方法、新型 MMC 及 SM 容错拓扑等方面展开了研究。其朝着降低电压波动、提高容错能力、降低成本及降低容错方法复杂度方向不断推进。当前的研究工作已经取得了大量的进展,但是仍然有许多研究领域及关键技术需要进一步研究和突破。MMC 容错运行方法在未来的研究方向和改进之处主要包括且不限于以下内容:

1) 随着 MMC 相关应用场合对其可靠性要求越来越高,研究基于数据驱动的 MMC 状态监测及故障预测方法成为亟待进一步解决的重点。尤其是展开基于易损器件 IGBT、SM 电容状态感知的寿命评估方法及 MMC 故障提前预判方法研究显得尤为重要,该项研究在故障预判的基础上可以针对预故障点位展开提前容错控制算法设计及模拟,以保证 MMC 在故障后实现快速的过渡并实现容错运行。

2) MMC 由正常运行状态切换至 IGBT 开路故障或 SM 故障运行状态,再由故障运行状态切换至容错运行状态过程中涉及到 3 种运行状态。状态切换过程的动态建模及稳定性分析目前在 MMC 容错运行的领域研究较少,然而切换系统建模理论和方法已经相对成熟。因此,若将相关切换系统建模研究真正应用到 MMC 容错的工程实践中需要探索相关的建模及状态分析方法,其对 MMC 的容错控制具有理论研究价值和指导意义。

3) 基于硬件的容错运行方法方面,目前的新

型 SM 拓扑主要集中于提高输出电平数以提高容错运行能力。然而该类方法往往需要更多的 IGBT 器件和更复杂的调制方式。基于 MMC 拓扑修正的容错方法在技术尚未成熟的背景下很难在工程领域的到应用。未来,如何进一步通过实验验证及工程应用提高其工程适用可行性成为研究的重点。此外,通过设计具有多电平输出能力的新型 SM 拓扑的过程中,提出统一的、模块化的、系统性的硬件理论设计方法对硬件设计容错应用领域的发展则显得尤为重要。

4) 基于软件的容错运行方法未来需要进一步提高 MMC 容错运行期间的状态建模精度。通过对 MMC 容错运行状态的精准建模可以实现相关状态的精准分析及补偿控制,进一步提高 MMC 容错运行期间的稳定性。此外,为了提高电压利用率及降低剩余 SM 的工作电压应力,新型容错控制机制是进一步需要研究的方向。

5) 随着人工智能技术在 MMC 故障诊断领域的不断应用,未来研究人工智能算法在 MMC 容错运行中的适用性有待进行探索性研究。尤其是 MMC 容错运行具有多 SM 协同工作、控制算法复杂、实时性强等特点,这使人工智能算法在 MMC 容错控制中面临庞大数据处理、快速决策、可靠实时执行等不同方面的挑战。在人工智能应用至 MMC 容错控制之前需要对其进行深入的研究并测试其在该领域的可行性。

参考文献

- [1] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C]//Proceedings of 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. Bologna, Italy: IEEE, 2003: 6.
- [2] 郭铭群,梅念,李探,等. ± 500 kV 张北柔性直流电网工程系统设计[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 4194-4204. GUO Mingqun, MEI Nian, LI Tan, et al. System design of ± 500 kV Zhangbei VSC-based DC grid project[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 4194-4204(in Chinese).
- [3] 薛英林,徐政,张哲任,等. MMC-HVDC 换流器阻抗频率特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(24): 4040-4048. XUE Yinglin, XU Zheng, ZHANG Zheren, et al. Analysis on converter impedance-frequency characteristics of the MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(24): 4040-4048(in Chinese).

- [4] RONG Fei, GONG Xichang, HUANG Shoudao. A novel grid-connected PV system based on MMC to get the maximum power under partial shading conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(6): 4320-4333.
- [5] 唐英杰, 张哲任, 徐政. 基于有源型 M3C 矩阵变换器的海上风电低频送出方案[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 113-122.
TANG Yingjie, ZHANG Zheren, XU Zheng. Low-frequency transmission scheme for offshore wind power based on active modular multilevel matrix converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 113-122(in Chinese).
- [6] 郑通, 王奎, 郑泽东, 等. 基于 MMC 拓扑的电力电子变压器研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5630-5648.
ZHENG Tong, WANG Kui, ZHENG Zedong, et al. Review of power electronic transformers based on modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5630-5648(in Chinese).
- [7] 魏辰阳, 汤广福, 吴奕霖, 等. 高压大容量直流变压器拓扑研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17): 6940-6958.
WEI Chenyang, TANG Guangfu, WU Yilin, et al. Overview and prospect of topology research on high voltage and large capacity DC transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6940-6958(in Chinese).
- [8] KUMAR Y S, PODDAR G. Balanced submodule operation of modular multilevel converter-based induction motor drive for wide-speed range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 3918-3927.
- [9] PIROUZ M H, BINA M T. A transformerless medium-voltage STATCOM topology based on extended modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(5): 1534-1545.
- [10] 李再男, 贾科, 毕天姝, 等. 多端柔性直流电网故障恢复过/欠电压机理及抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(S1): 29-38.
LI Zainan, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Over/under-voltage mechanism and suppression method for fault recovery in multi-terminal flexible DC grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(S1): 29-38(in Chinese).
- [11] 白璐瑶, 赵西贝, 黄勇, 等. 低全桥比例混合 MMC 的直流故障穿越方法及过电压抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(7): 2744-2755.
BAI Luyao, ZHAO Xibei, HUANG Yong, et al. DC fault ride through scheme of hybrid MMC with low FBSM proportion and overvoltage suppression strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(7): 2744-2755(in Chinese).
- [12] 贾科, 董学正, 毕天姝, 等. 功率精准匹配的海上风电柔直并网系统电网侧故障穿越方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(S1): 84-93.
JIA Ke, DONG Xuezheng, BI Tianshu, et al. A grid side fault ride-through method based on precise matching power for offshore wind farms connected MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(S1): 84-93(in Chinese).
- [13] 郭华, 王德付, 陈凌云, 等. 昆柳龙直流不同运行方式下广西电网安全稳定分析[J]. 电力科学与工程, 2019, 35(8): 67-72.
GUO Hua, WANG Defu, CHEN Lingyun, et al. Safety and stability analysis of Guangxi power grid under different operation modes of Kun-Liu-Long HVDC[J]. Electric Power Science and Engineering, 2019, 35(8): 67-72(in Chinese).
- [14] FARIAS J V M, CUPERTINO A F, PEREIRA H A, et al. On converter fault tolerance in MMC-HVDC systems: a comprehensive survey[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(6): 7459-7470.
- [15] XIAO Qian, JIN Yu, JIA Hongjie, et al. Review of fault diagnosis and fault-tolerant control methods of the modular multilevel converter under submodule failure[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(10): 12059-12077.
- [16] 马文忠, 江丽丽, 李林欢, 等. 模块化多电平变流器容错运行环流抑制策略[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3513-3518.
MA Wenzhong, JIANG Lili, LI Linhuan, et al. Circulating current suppressing strategy of modular multilevel converter in fault-tolerant control mode[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3513-3518(in Chinese).
- [17] 薛英林, 赵峥, 葛风雷, 等. 故障子模块切除后 MMC 运行特性分析和直流电流波动抑制[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1336-1344.
XUE Yinglin, ZHAO Zheng, GE Fenglei, et al. Operation characteristic analysis and DC ripple current suppressing for the modular multilevel converter after bypassing faulty sub-modules[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1336-1344(in Chinese).
- [18] 吴学智, 武文, 荆龙, 等. MMC 子模块故障运行特性分析与容错控制策略研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3083-3091.
WU Xuezhi, WU Wen, JING Long, et al. Operation characteristics and the fault-tolerant control strategy of

- modular multilevel converter under sub-module faults[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3083-3091(in Chinese).
- [19] KONSTANTINOU G, POU J, CEBALLOS S, et al. Active redundant submodule configuration in modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2333-2341.
- [20] FARIAS J V M, CUPERTINO A F, PEREIRA H A, et al. On the redundancy strategies of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 851-860.
- [21] SONG T, LEE H J, NAM T S, et al. Design and control of a modular multilevel HVDC converter with redundant power modules for noninterruptible energy transfer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1611-1619.
- [22] ABDELSALAM M, MAREI M I, TENNAKOON S B. An integrated control strategy with fault detection and tolerant control capability based on capacitor voltage estimation for modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(3): 2840-2851.
- [23] HU Pengfei, JIANG Daozhuo, ZHOU Yuebin, et al. Energy-balancing control strategy for modular multilevel converters under submodule fault conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9): 5021-5030.
- [24] LI Kai, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang, et al. Fault detection and tolerant control of open-circuit failure in MMC with full-bridge sub-modules[C]//Proceedings of 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Milwaukee, WI, USA: IEEE, 2016: 1-6.
- [25] 刘英培, 杨海悦, 梁海平, 等. MMC-HVDC 系统冗余容错模型预测控制[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2443-2454.
- LIU Yingpei, YANG Haiyue, LIANG Haiping, et al. Redundancy fault-tolerant based model predict control of MMC-HVDC system[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2443-2454(in Chinese).
- [26] WANG Meiyang, LI Kejun, SUN Kaiqi, et al. A fault-tolerant control strategy for MMC with smooth clearance of sub-module fault[C]//Proceedings of 2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS). Portland, OR, USA, 2018: 1-7.
- [27] LI Wei, LI Gengyin, ZENG Rong, et al. The fault detection, localization, and tolerant operation of modular multilevel converters with an insulated gate bipolar transistor (IGBT) open circuit fault[J]. Energies, 2018, 11(4): 837.
- [28] WANG Jun, MA Hao, BAI Zhihong. A submodule fault ride-through strategy for modular multilevel converters with nearest level modulation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1597-1608.
- [29] LI Binbin, XU Zigao, DING Jian, et al. Fault-tolerant control of medium-voltage modular multilevel converters with minimum performance degradation under submodule failures[J]. IEEE Access, 2018, 6: 11772-11781.
- [30] ABDELSALAM M, MAREI M I, DIAB H Y, et al. A fault tolerant control technique for hybrid modular multi-level converters with fault detection capability[J]. Journal of Power Electronics, 2018, 18(2): 558-572.
- [31] GHAZANFARI A, MOHAMED Y A R I. A resilient framework for fault-tolerant operation of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5): 2669-2678.
- [32] GHAZANFARI A, MOHAMED Y A R I. New submodule improving fault-tolerant capability of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(2): 662-671.
- [33] LE D D, LEE D C. A modular multilevel converter topology with novel middle submodules to reduce capacitor voltage fluctuations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(1): 70-75.
- [34] ZANG Jiajie, WANG Jiacheng, ZHANG Jianwen, et al. A global redundancy scheme for medium-voltage modular multilevel converter based solid-state transformer[C]//Proceedings of 2019 IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). Vancouver, BC, Canada: IEEE, 2019: 2329-2334.
- [35] FARZAMKIA S, RIZI H S, HUANG A Q, et al. Shared redundancy strategy to improve the reliability and fault-tolerant capability of modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(4): 3326-3336.
- [36] HUANG Ming, ZOU Jianlong, MA Xikui, et al. Modified modular multilevel converter to reduce submodule capacitor voltage ripples without common-mode voltage injected[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 2236-2246.
- [37] HUANG Ming, KANG Zhen, LI Weilin, et al. Modified modular multilevel converter with third-order harmonic voltage injection to reduce submodule capacitor voltage ripples[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(6): 7074-7086.
- [38] LE D D, LEE D C. A modified modular multilevel converter with features of reduction of submodule

- capacitor fluctuation and fault-tolerant operation[C]// Proceedings of 2021 IEEE 12th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). Chicago, IL, USA: IEEE, 2021: 1-6.
- [39] LE D D, LEE D C, NHO E C. Fault-tolerant capability of MMC with novel structure of middle submodules[J]. Journal of Power Electronics, 2023, 23(9): 1342-1352.
- [40] GENG Zhi, YANG Yong, XIAO Yang, et al. A submodule fault-tolerant operation scheme of modular multilevel converters through novel cold and hot mixed topology[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(4): 2470-2481.
- [41] 刘一琦, 李丹华, 王庆博, 等. 模块化多电平光伏并网逆变器的不对称容错控制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 126-132, 138.
- LIU Yiqi, LI Danhua, WANG Qingbo, et al. Unbalance fault-tolerant control strategy of modular multilevel photovoltaic grid-connected inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 126-132, 138(in Chinese).
- [42] LU Maozeng, HU Jiabing, ZENG Rong, et al. Fundamental-frequency reactive circulating current injection for capacitor voltage balancing in Hybrid-MMC HVDC systems during riding through PTG faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1348-1357.
- [43] CHOI J Y, HAN B M, KIM H J. New scheme of phase-shifted carrier PWM for modular multilevel converter with redundancy submodules[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 407-409.
- [44] YANG Shunfeng, TANG Yi, TU Pengfei, et al. A fault-tolerant operation scheme for a modular multilevel converter with a distributed control architecture[C]// Proceedings of 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Cincinnati, OH, USA: IEEE, 2017: 4163-4170.
- [45] WANG Jinyu, TANG Yi. A fault-tolerant operation method for medium voltage modular multilevel converters with phase-shifted carrier modulation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(10): 9459-9470.
- [46] XIONG Liansong, ZHUO Fang, LIU Xiaokang, et al. Fault-tolerant control of CPS-PWM-based cascaded multilevel inverter with faulty units[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(4): 2486-2497.
- [47] LI Binbin, SHI Shaolei, WANG Bo, et al. Fault diagnosis and tolerant control of single IGBT open-circuit failure in modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(4): 3165-3176.
- [48] CUPERTINO A F, PEREIRA H A, SELEME S I, et al. On inherent redundancy of MMC-based STATCOMs in the overmodulation region[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1169-1179.
- [49] HASHFI T B, MEKHILEF S, MUBIN M, et al. Adaptive carrier-based PDPWM control for modular multilevel converter with fault-tolerant capability[J]. IEEE Access, 2020, 8: 26739-26748.
- [50] ELSANABARY A, HASHFI T B, MEKHILEF S, et al. Submodule fault-tolerant control based adaptive carrier-PDPWM for modular multilevel converters[J]. Energy Reports, 2021, 7: 7288-7296.
- [51] COLQUE J C, RUPPERT E, DELGADO-HUAYTA I, et al. Fault-tolerant strategy for the MMC-based PV system with faults detection and converter reconfiguration using permutation algorithms[J]. IEEE Access, 2023, 11: 126119-126134.
- [52] WANG Zhen, YIN Xianggen, CHEN Yu. A novel non-redundant submodules fault-tolerant control strategy for MMC in medium voltage application[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 139: 108048.
- [53] 江丽丽, 马文忠, 李林欢, 等. 模块化多电平换流器的容错控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2497-2503.
- JIANG Lili, MA Wenzhong, LI Linhuan, et al. A fault-tolerant control strategy of modular multi-level converters[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2497-2503(in Chinese).
- [54] LIU Gaoren, XU Zheng, XUE Yinglin, et al. Optimized control strategy based on dynamic redundancy for the modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 339-348.
- [55] 胡鹏飞, 江道灼, 周月宾, 等. 模块化多电平换流器子模块故障冗余容错控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 66-70.
- HU Pengfei, JIANG Daozhuo, ZHOU Yuebin, et al. Redundancy fault-tolerated control strategy for sub-module faults of modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 66-70(in Chinese).
- [56] HONG Lerong, XU Qianming, HE Zhixing, et al. Fault-tolerant oriented hierarchical control and configuration of modular multilevel converter for shipboard MVdc system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(8): 4525-4535.
- [57] 李探, 赵成勇. MMC 子模块故障下桥臂不对称运行特性分析与故障容错控制[J]. 中国电机工程学报, 2015,

- 35(15): 3921-3928.
- LI Tan, ZHAO Chengyong. Operation characteristics of the MMC with asymmetrical arms under sub-module faults and the fault-tolerant control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3921-3928(in Chinese).
- [58] 李金科, 金新民, 吴学智, 等. 无冗余模块的故障环流分析及抑制策略研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 32-39.
- LI Jinke, JIN Xinmin, WU Xuezhi, et al. Analysis of fault circulating current without redundant sub-module and its suppression strategy[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 32-39(in Chinese).
- [59] 武文, 吴学智, 荆龙, 等. 基于虚拟电阻的 MMC 子模块故障容错环流抑制策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 161-168.
- WU Wen, WU Xuezhi, JING Long, et al. Circulating current suppressing strategy of modular multilevel converter in sub-module fault-tolerant control mode based on virtual resistor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 161-168(in Chinese).
- [60] 李可军, 张正发, 刘智杰, 等. MMC 桥臂不对称运行特性分析及子模块故障下的控制策略[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3059-3067.
- LI Kejun, ZHANG Zhengfa, LIU Zhijie, et al. Characteristics analysis of MMC in arm asymmetrical operation and control strategy under submodule fault[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3059-3067(in Chinese).
- [61] 李凯, 赵争鸣, 袁立强. 模块化多电平变流器上、下桥臂不对称运行环流重复控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 122-129.
- LI Kai, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang. Repetitive control of circulating current in MMC with asymmetrical operation of upper and lower arms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 122-129(in Chinese).
- [62] 徐谦, 孙黎滢, 徐晨博, 等. 模块化多电平换流器桥臂不平衡运行特性及冗余保护策略[J]. 南方电网技术, 2016, 10(11): 1-8.
- XU Qian, SUN Liying, XU Chenbo, et al. Bridge-arm asymmetric operation characteristic and redundant protection strategy of modular multilevel converter[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(11): 1-8(in Chinese).
- [63] DENG Fujin, TIAN Yanjun, ZHU Rongwu, et al. Fault-tolerant approach for modular multilevel converters under submodule faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(11): 7253-7263.
- [64] 申科, 王建骥, 班明飞, 等. 基于零序电压注入的模块化多电平变流器故障容错控制[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 96-102.
- SHEN Ke, WANG Jianze, BAN Mingfei, et al. Fault-tolerant control for modular multilevel converter based on zero-sequence voltage injection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 96-102(in Chinese).
- [65] 李爽, 王志新, 吴杰. 采用基频零序分量注入的 MMC 换流器故障容错控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 1-7.
- LI Shuang, WANG Zhixin, WU Jie. Study on fault-tolerant operation control strategy of modular multilevel converters injected with fundamental-frequency zero-sequence voltage component[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 1-7(in Chinese).
- [66] ALEENEJAD M, MAHMOUDI H, AHMADI R. Multifault tolerance strategy for three-phase multilevel converters based on a half-wave symmetrical selective harmonic elimination technique[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(10): 7980-7989.
- [67] KIM S M, LEE J S, LEE K B. A modified level-shifted PWM strategy for fault-tolerant cascaded multilevel inverters with improved power distribution[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(11): 7264-7274.
- [68] LI Jinke, WU Xuezhi, YAO Xiuyuan, et al. A zero-sequence voltage injection control scheme for modular multilevel converter under submodule failure [C]//Proceedings of 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Milwaukee, WI, USA: IEEE, 2016: 1-6.
- [69] JIN Yu, XIAO Qian, POUL J, et al. A novel fault-tolerant operation approach for the modular multilevel converter-based STATCOM with the enhanced operation capability[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(5): 5541-5552.
- [70] JIANG Yaoxi, SHU Hongchun, LIAO Mengli. Fault-tolerant control strategy for sub-modules open-circuit fault of modular multilevel converter[J]. Electronics, 2023, 12(5): 1080.
- [71] XIAO Huangqing, GAN Huichen, YANG Ping, et al. Robust submodule fault management in modular multilevel converters with nearest level modulation for uninterrupted power transmission[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(2): 931-946.
- [72] LI Mengwei, JIANG Xiangyu, CHEN Canfeng, et al. Fault-tolerant strategy for modular multilevel converters with combined zero-sequence voltage injection[J]. IEEE

- Transactions on Power Electronics, 2024, 39(7): 8101-8113.
- [73] KUCKA J, KARWATZKI D, MERTENS A. Enhancing the reliability of modular multilevel converters using neutral shift[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(12): 8953-8957.
- [74] YANG Qichen, QIN Jiangchao, SAEEDIFARD M. A postfault strategy to control the modular multilevel converter under submodule failure[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(6): 2453-2463.
- [75] FARZAMKIA S, IMAN-EINI H, NOUSHAK M, et al. Improved fault-tolerant method for modular multilevel converters by combined DC and neutral-shift strategy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 2454-2462.
- [76] 武文, 吴学智, 荆龙, 等. 模块化多电平换流器子模块故障时中性点移位容错控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 20-26.
- WU Wen, WU Xuezhi, JING Long, et al. Fault-tolerant control strategy of neutral point shift for sub-module faults of modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 20-26(in Chinese).
- [77] ZHU Qinyue, DAI Wei, GUAN Lei, et al. A fault-tolerant control strategy of modular multilevel converter with sub-module faults based on neutral point compound shift[J]. Energies, 2019, 12(5): 876.
- [78] XIAO Qian, WANG Jinyu, JIN Yu, et al. A novel operation scheme for modular multilevel converter with enhanced ride-through capability of submodule faults[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(2): 1258-1268.
- [79] FARZAMKIA S, NOUSHAK M, IMAN-EINI H, et al. Fault-tolerant method to reduce voltage stress of submodules in postfault condition for regenerative MMC-based drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(6): 4718-4726.
- [80] FARZAMKIA S, IMAN-EINI H, KHOSHKBAR-SADIGH A, et al. A software-based fault-tolerant strategy for modular multilevel converter using DC bus voltage control[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(3): 3436-3445.
- [81] 吉宇, 梅军, 卢宇, 等. 基于电流滞环型调制的模块化多电平变换器容错策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 269-277.
- JI Yu, MEI Jun, LU Yu, et al. Research on the hysteresis-band current tracking strategy based on fault-tolerant control for modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 269-277(in Chinese).
- [82] 杨立敏, 李耀华, 李子欣, 等. MMC 子模块故障下能量再平衡控制与安全运行域分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 52-59.
- YANG Limin, LI Yaohua, LI Zixin, et al. Energy rebalance control and safe operation region analysis of MMC with sub-module fault[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 52-59(in Chinese).
- [83] 赵纪峰, 谷超越, 杭俊, 等. 子模块故障下基于变执行频率的 MMC 功率损耗优化控制[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(3): 1133-1143.
- ZHAO Jifeng, GU Chaoyue, HANG Jun, et al. Variable execution frequency-based power losses optimization control for MMCs under SM faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(3): 1133-1143(in Chinese).
- [84] ZHOU Dehong, TU Pengfei, QIU Huan, et al. Finite-control-set model predictive control of modular multilevel converters with cascaded open-circuit fault ride-through[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(3): 2943-2953.
- [85] ZHOU Dehong, TU Pengfei, QIU Huan, et al. Cascaded open-circuit fault ride-through of modular multilevel converters with model predictive control[C]//Proceedings of 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Portland, OR, USA: IEEE, 2018: 113-118.
- [86] XU Kunshan, XIE Shaojun, WANG Xincheng, et al. Model predictive-based fault-tolerant control for modular multilevel converters without redundant submodules [C]//Proceedings of 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC). Shenzhen, China: IEEE, 2018: 1-5.
- [87] 郝亮亮, 张静, 顾亚旗, 等. 基于桥臂能量预测的模块化多电平换流器子模块故障优化容错控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 3697-3706.
- HAO Liangliang, ZHANG Jing, GU Yaqi, et al. Sub-module fault tolerant optimal control strategy of modular multilevel converter based on estimation of bridge energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(16): 3697-3706(in Chinese).
- [88] 杨成顺, 张晨曦, 许德智, 等. 基于无冗余子模块 MMC 变换器的固定计算次数模型预测容错控制策略[J/OL]. 电源学报, 2024[2024-12-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20241129.0903.002.html>.
- YANG Chengshun, ZHANG Chenxi, XU Dezhi, et al. A predictive fault-tolerant control strategy based on fixed number of calculations model of MMC converter without redundant submodules[J/OL]. Journal of Power Supply,

- 2024[2024-12-03] . <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20241129.0903.002.html>(in Chinese).
- [89] YANG Lixia, JIA Lixin, LUO Longfei, et al. A novel fault-tolerant control method for modular multilevel converters[C]//Proceedings of 2019 IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC). Singapore, Singapore: IEEE, 2019: 1-6.
- [90] YANG Lixia, JIA Lixin, ZOU Yabin, et al. Semi-hot redundant control method for modular multilevel converter-based high-voltage direct current systems under submodule fault[J]. IET Power Electronics, 2023, 16(8): 1367-1381.
- [91] ALEENEJAD M, MAHMOUDI H, AHMADI R. Unbalanced space vector modulation with fundamental phase shift compensation for faulty multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 7224-7233.
- [92] LI Kai, YUAN Liqiang, ZHAO Zhengming, et al. Fault-tolerant control of MMC with hot reserved submodules based on carrier phase shift modulation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(9): 6778-6791.
- [93] ALEENEJAD M, MAHMOUDI H, JAFARISHIADEH S, et al. Fault-tolerant space vector modulation for modular multilevel converters with bypassed faulty submodules[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(3): 2463-2473.
- [94] ZE Zuyao, LIN Hua, MA Yajun, et al. Submodules fault-tolerant control and analysis of modular multilevel converter with integrated battery energy storage system[C]//Proceedings of 2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe). Riga, Latvia: IEEE, 2018: 1-8.
- [95] LIU Yiqi, JIN Yonglin, CHEN Jianlong, et al. A fault-tolerant strategy of hybrid modular multilevel converter based on level adjusting method[J]. Energy Reports, 2020, 6(S9): 312-320.
- [96] RAZANI R, MOHAMED Y A R I. Fault-tolerant operation of the DC/DC modular multilevel converter under submodule failure[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(5): 6139-6151.
- [97] LE D D, HONG S, LEE D C. Fault detection and tolerant control for flying-capacitor modular multilevel converters feeding induction motor drives[J]. Journal of Power Electronics, 2022, 22(6): 947-958.
- [98] XIAO Qian, CHEN Linglin, JIN Yu, et al. An improved fault-tolerant control scheme for cascaded H-bridge STATCOM with higher attainable balanced line-to-line voltages[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(4): 2784-2797.
- [99] ALHARBI M, ISIK S, BHATTACHARYA S. A novel submodule level fault-tolerant approach for MMC with integrated scale-up architecture[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics, 2021, 2(3): 343-352.
- [100] ALHARBI M, ISIK S, BHATTACHARYA S. Submodule fault-tolerant strategy for modular multilevel converter with scalable control structure[J]. Sustainability, 2022, 14(24): 16445.
- [101] YANG Shunfeng, TANG Yi, WANG Peng. Seamless fault-tolerant operation of a modular multilevel converter with switch open-circuit fault diagnosis in a distributed control architecture[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 7058-7070.
- [102] ASLANIAN M, NEYSHABOURI Y, RAKI A, et al. A fault-tolerant method based on a modified selective harmonic mitigation technique for modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(10): 12890-12899.
- [103] MOHAMMADHASSANI A, MEHRIZI-SANI A. A fault tolerant selective harmonic elimination method for modular multilevel converters[C]//Proceedings of 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2020: 1-5.
- [104] 杜晓舟, 梅军, 田杰, 等. 模块化多电平子模块冗余与带故障运行策略[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 19-25.
- DU Xiaozhou, MEI Jun, TIAN Jie, et al. Redundancy protection and running-with-fault method for sub-module faults in modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 19-25(in Chinese).
- [105] ALEENEJAD M, MAHMOUDI H, MOAMAEI P, et al. A new fault-tolerant strategy based on a modified selective harmonic technique for three-phase multilevel converters with a single faulty cell[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(4): 3141-3150.
- [106] LI Jinke, YIN Jingyuan. Fault-tolerant control strategies and capability without redundant sub-modules in modular multilevel converters[J]. Energies, 2019, 12(9): 1726.
- [107] 王初秋, 李振兴, 杨卫东, 等. MMC 不完整运行方式及其控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1631-1641.
- WANG Renqiu, LI Zhenxing, YANG Weidong, et al. Research on incomplete operation mode and control strategy of modular multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1631-1641(in Chinese).

- [108]KIM S M, LEE K B, LEE J S. Fault-tolerant control scheme for modular multilevel converter based on sorting algorithm without reserved submodules[C]//Proceedings of 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). San Antonio, TX, USA: IEEE, 2018: 223-227.
- [109]MA Yajun, LIN Hua, WANG Xingwei, et al. Analysis of battery fault tolerance in modular multilevel converter with integrated battery energy storage system[C]//Proceedings of 2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe). Riga, Latvia, 2018: 1-8.
- [110]王韧秋, 赵彩萍, 闻福岳, 等. MMC 不完整运行方式的有功功率传输研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(20): 8048-8059.
- WANG Renqiu, ZHAO Caiping, WEN Fuyue, et al. Research on power transmission of MMC incomplete operation mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(20): 8048-8059(in Chinese).
- [111]MAHMOUD A A, HAFEZ A A, YOUSEF A M, et al. Fault - tolerant modular multilevel converter for a seamless transition between stand - alone and grid - connected microgrid[J]. IET Power Electronics, 2023, 16(1): 11-25.
- [112]GUO Jingli, WANG Xiuli, LIANG Jun, et al. Reliability modeling and evaluation of MMCs under different redundancy schemes[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2087-2096.
- [113]DENG Fujin, ZHU Rongwu, LIU Dong, et al. Protection scheme for modular multilevel converters under diode open-circuit faults[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(4): 2866-2877.



刘泽浩

在线出版日期: 2025-03-10。

收稿日期: 2024-08-23。

作者简介:

刘泽浩(1990), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为模块化多电平变流器控制与故障诊断, liuzehao@sdut.edu.cn;

赵艳雷(1976), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子、微电网运行与控制等, zhaoyanlei@sdut.edu.cn;

路茂增(1988), 男, 博士, 讲师, 研究方向为柔性直流输电换流器的建模及控制、大功率变换器可靠性, lumaoz@sdut.edu.cn。

(责任编辑 吕鲜艳)