

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.04.001

# MMC子模块故障后线电压恢复容错控制策略

夏长江<sup>1</sup>, 韩民晓<sup>1</sup>, 耿治<sup>1</sup>, 寇龙泽<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206;

2. 先进输电技术国家重点实验室(全球能源互联网研究院有限公司), 北京 102209)

**摘要:**模块化多电平换流器(MMC)桥臂无冗余子模块(SM)时, SM故障将导致故障相电压输出能力降低, 进而导致 MMC 输出线电压不平衡。为恢复故障后无冗余 MMC 输出线电压特性, 提高非故障桥臂 SM 利用率, 文中基于中性点转移(NT)与直流分量注入(DCCI)控制, 提出应用于无冗余 MMC 的 SM 故障容错控制策略。该容错策略通过 NT 控制, 调整三相电压相角, 确保输出线电压平衡。此外, 文中提出三段式最优 DCCI 幅值计算方法。与现有方法相比, 最优幅值 DCCI 能进一步提升非故障桥臂 SM 利用率, 提高输出线电压幅值。基于 PSCAD/EMTDC 平台搭建三相 MMC 仿真模型, 仿真结果验证了所提容错控制策略的有效性。

**关键词:**模块化多电平换流器(MMC); 无冗余容错控制; 子模块(SM)故障; 中性点转移(NT); 直流分量注入(DCCI)

中图分类号: TM76

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)04-0002-08

## 0 引言

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)应用广泛。提升 MMC 运行可靠性与稳定性, 有利于电能稳定、高质量地汇集、传输与分配<sup>[1-4]</sup>。子模块(sub-module, SM)故障是 MMC 的常见故障, 为避免 SM 故障导致 MMC 退出运行, 通常采用 SM 故障容错控制<sup>[5-6]</sup>。现有容错控制主要分为冗余容错控制和无冗余容错控制 2 类。冗余容错控制中, 通过冗余 SM 替换故障 SM, MMC 能够快速恢复至正常运行状态, 但设置冗余 SM 将增加换流器的成本与体积。故当 MMC 的 SM 数量较少时, 通常不配备或仅配备较少的冗余 SM<sup>[7]</sup>。

当 MMC 桥臂无冗余 SM 或冗余 SM 耗尽(以下简称: 无冗余 MMC)时, SM 故障将导致故障相输出电压能力降低, 进而导致 MMC 输出电压不平衡。为提升无冗余 MMC 应对 SM 故障的能力, 国内外学者开展了大量的容错控制研究。文献[8]提出的容错策略同时采用三次谐波注入与直流分量注入(direct current component inject, DCCI)控制, 通过 DCCI 将三相电压向非故障桥臂侧平移, 提升 MMC 应对 SM 故障的能力。然而, 若 MMC 已采用三次谐波注入方法提高传输容量, 则不能再用于容错控制<sup>[9]</sup>。文献[10—15]采用相电压调制波重叠控制, 可恢复故障后 MMC 输出线电压平衡, 但将造成相电压波形严重畸变。文献[16—19]采用交流电压

中性点转移(neutral point transfer, NT)控制, 通过改变 MMC 输出三相电压相角, 确保 MMC 输出线电压始终平衡。但采用 NT 控制时, 故障相的非故障桥臂 SM 利用率较低。

针对当前无冗余容错策略存在的问题, 文中基于 NT 与 DCCI 控制, 提出应用于无冗余 MMC 的 SM 故障容错控制策略。同时, 文中还提出三段式最优 DCCI 幅值计算方法。通过最优 DCCI 与 NT 控制, 不仅能恢复故障后 MMC 输出线电压平衡, 还能提高非故障桥臂 SM 的利用率与 MMC 输出线电压的幅值。若 MMC 运行于直流电压可提升的系统中, 可通过增大直流母线电压, 完全恢复 MMC 输出线电压特性。与现有文献相比, 文中所提容错策略可提升 MMC 应对多 SM 故障的能力, 提高输出线电压幅值, 平缓容错控制过渡过程。最后, 通过 PSCAD/EMTDC 仿真对文中所提容错策略的线电压恢复能力进行验证。

## 1 无冗余 MMC 的 SM 故障分析

当 MMC 桥臂无冗余 SM 时, SM 故障退出运行将造成故障桥臂的部分电平缺失。如未采取有效的容错控制, 将导致故障相输出电压畸变与环流陡增, 严重时 MMC 退出运行<sup>[20-23]</sup>。

### 1.1 SM 故障影响机理分析

三相 MMC 结构如图 1 所示。每相有上、下 2 个桥臂;  $L, R$  分别为桥臂电感、等效电阻; 每个桥臂包含  $N$  个 SM, SM 为半桥结构;  $C$  为 SM 电容;  $u_{sm}$  为 SM 输出电压; 稳态时 SM 电容额定电压为  $U_{c0}$ ; 直流侧

收稿日期: 2021-02-04; 修回日期: 2021-04-21

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904700)

额定电压  $U_{dcN}$  为  $NU_{c0}$ ;  $Z_L$  为 MMC 等效负载阻抗;  $u_{jn}$ ,  $i_j$  分别为  $j$  相输出电压与电流,  $j = a, b, c$  分别表示 a, b, c 三相。

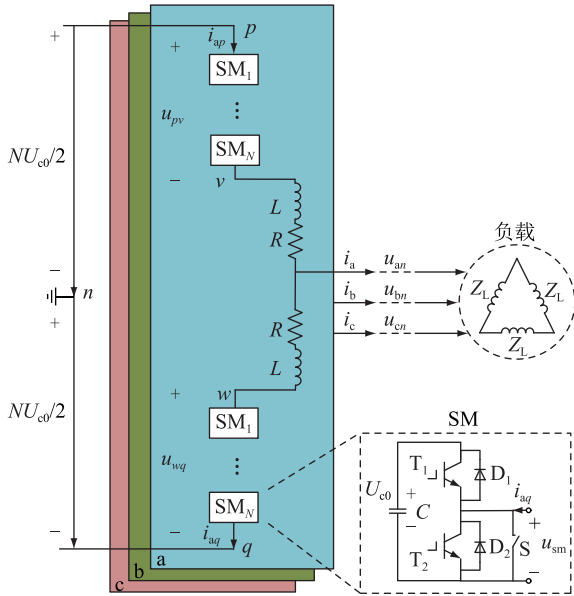


图1 三相 MMC 结构

Fig.1 Structure of three-phase MMC

为便于分析,以 a 相为例,列出该相各点电压。

$$u_{pv} = \frac{1}{2}NU_{c0} - \frac{1}{2}mNU_{c0}\sin(\omega t + \varphi_0) \quad (1)$$

$$u_{wq} = \frac{1}{2}NU_{c0} + \frac{1}{2}mNU_{c0}\sin(\omega t + \varphi_0) \quad (2)$$

$$u_{vn} = \frac{1}{2}NU_{c0} - u_{pv} \quad (3)$$

$$u_{wn} = -\frac{1}{2}NU_{c0} + u_{wq} \quad (4)$$

$$u_{an} = \frac{1}{2}(u_{vn} + u_{wn}) \quad (5)$$

式中:  $m$  为相电压调制比;  $\omega$  为角频率;  $\varphi_0$  为初相角;  $u_{pv}$ ,  $u_{wq}$  分别为上、下桥臂 SM 输出电压;  $u_{vn}$ ,  $u_{wn}$  分别为  $v$ ,  $w$  点电压。

为探讨故障后 MMC 最大电压输出能力,文中对  $m$  为 1 的工况进行讨论。当  $N$  为 6 时,以 a 相上桥臂  $SM_1$  出现故障退出运行为例,该桥臂将仅剩 5 个可运行的 SM。故障情况下,可将 a 相各桥臂输出电压区域分为输出区域、故障区域 (faulty area, FA) 与不可用区域 (unavailable area, UA), 如图 2 所示。输出区域是指 SM 故障后桥臂能够正常输出电压的区域; FA 是指 SM 故障导致桥臂不能输出电压的区域; UA 分为 UA1 与 UA2 两部分, UA1 为保持 SM 电压稳定而不能输出的区域。当需要上桥臂输出  $6U_{c0}$  时,由于上桥臂  $SM_1$  故障退出运行, a 相将仅有 5 个 SM 投入承担全部直流电压,造成 SM 电压与故

障相环流陡增,此时下桥臂必须投入 1 个 SM。UA2 为维持 a 相输出电压波形对称而无法输出电压的区域。若下桥臂输出电压为  $6U_{c0}$ ,此时 a 相输出电压为  $3U_{c0}$ 。但由于上桥臂  $SM_1$  故障, a 相电压无法输出  $-3U_{c0}$ ,为维持 a 相输出电压波形对称,应避免下桥臂投入 6 个 SM。

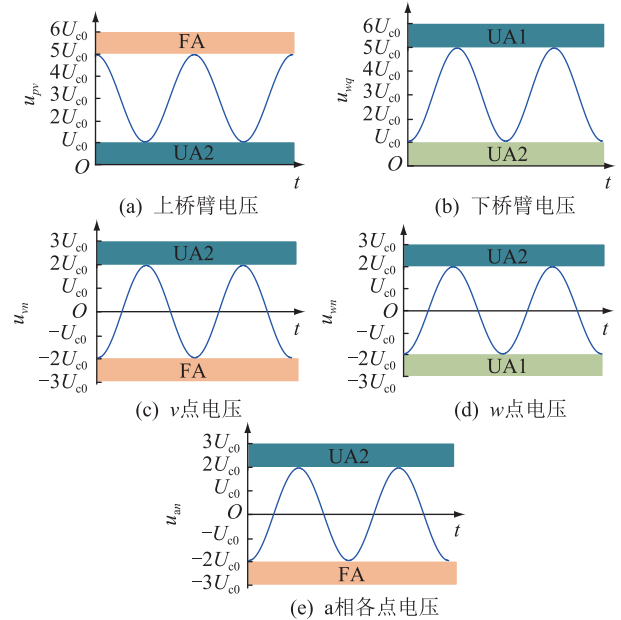


图2 a相各点电压

Fig.2 Each point voltage of phase-a

如图 2(e) 所示,当 MMC 发生 SM 故障时,为保证输出相电压波形对称,故障相输出电压存在 UA2,导致非故障桥臂 SM 未充分利用,降低了非故障桥臂 SM 的利用率,且随着故障 SM 增多,该影响将更甚。若通过有效容错控制减小 UA2 的影响,可以进一步提高故障相输出电压幅值。

## 1.2 无冗余 MMC 容错控制方法

无冗余 MMC 发生 SM 故障后,将导致故障相输出电压幅值降低,进而导致 MMC 输出线电压不平衡。当三相电压不平衡时,通过 NT 控制,改变三相电压相角,可恢复线电压幅值平衡。采用 DCCI 方法,可有效降低 UA2 影响,增大故障相输出电压幅值。

### 1.2.1 NT 控制

MMC 输出交流电压相量图如图 3 所示。  $U_{jn}$ ,  $U_{jnt}$  分别为 SM 故障前、后的相电压幅值,  $j = a, b, c$ ;  $U_{ij}$ ,  $U_{ijt}$  分别为 SM 故障前、后的线电压幅值,  $i \neq j$ ,  $i = a, b, c$ ;  $\alpha, \beta, \gamma$  分别为三相电压相角差值。以  $N$  为 6 的三相 MMC 为例进行分析,当 MMC 未发生 SM 故障时,输出三相电压幅值相等,相位相差  $120^\circ$ ,如图 3(a) 所示,  $O$  为交流中性点。当 a 相上桥臂  $SM_1$  发生故障退出运行时, a 相输出电压幅值将降低,进而

导致输出线电压不平衡,如图 3(b) 所示。采用 NT 控制后,三相电压相角差分别改变为  $\alpha, \beta, \gamma$ , 线电压恢复平衡,但中性点从  $O$  点转移到了  $O'$  点,如图 3(c) 所示。

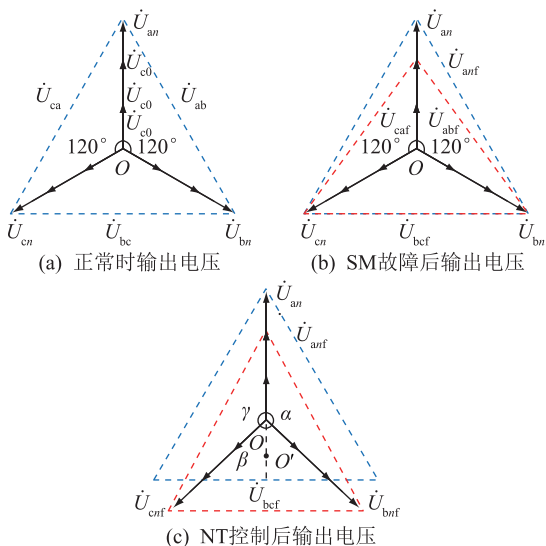


图 3 MMC 输出交流电压相量图

Fig.3 Phasor diagram of MMC AC-side output voltage

中性点转移后线电压幅值为:

$$\begin{cases} U_{anf}^2 + U_{bnf}^2 - 2U_{anf}U_{bnf}\cos\alpha = \\ U_{bnf}^2 + U_{cnf}^2 - 2U_{bnf}U_{cnf}\cos\beta = \\ U_{cnf}^2 + U_{anf}^2 - 2U_{cnf}U_{anf}\cos\gamma \\ \alpha + \beta + \gamma = 360^\circ \end{cases} \quad (6)$$

### 1.2.2 DCCI 控制

由图 2(b) 可知,当 MMC 发生 SM 故障时,该相非故障桥臂输出电压将出现 UA2,进而导致非故障桥臂 SM 利用率降低。若通过 DCCI 控制将相电压向 UA2 所在侧平移,可同时提升非故障桥臂 SM 利用率与 MMC 输出线电压幅值。

以  $N$  为 6 的三相 MMC 为例,假定 a 相上桥臂  $SM_1, SM_2$  及 b 相上桥臂  $SM_1$  发生 SM 故障。故障发生后 a, b 相输出电压幅值分别降低为  $U_{c0}, 2U_{c0}$ , 如图 4 所示。当仅采用 NT 控制时,改变  $\alpha, \beta, \gamma$  分别为  $240.11^\circ, 59.96^\circ, 59.93^\circ$ , 可得此时输出线电压幅值为  $2.65U_{c0}$ 。

为提升非故障桥臂 SM 利用率,向三相电压调制波注入  $0.5U_{c0}$  直流分量。经 DCCI 控制后,三相电压波形均向上平移  $0.5U_{c0}$ , 如图 5 所示,  $N_{UA2,j}$  为  $j$  相 UA2 宽度。

此时, a, b, c 三相输出电压幅值分别为  $1.5U_{c0}, 2.5U_{c0}, 2.5U_{c0}$ 。再经 NT 控制后,调整  $\alpha, \beta, \gamma$  分别为  $132.54^\circ, 94.92^\circ, 132.54^\circ$ , 输出线电压幅值恢复平衡,此时线电压幅值提升至  $3.68U_{c0}$ , 输出线电压幅

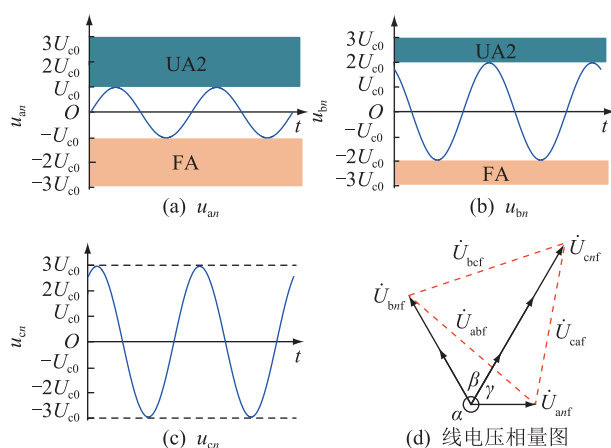


图 4 DCCI 控制后 MMC 输出交流电压

Fig.4 MMC AC-side output voltage after DCCI control

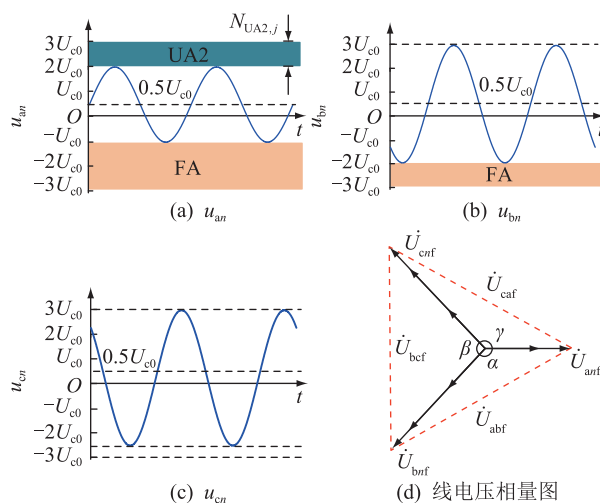


图 5 采用 DCCI+NT 控制后的 MMC 输出交流电压

Fig.5 MMC AC-side output voltage after DCCI+NT control

值有效提升。

## 2 无冗余 MMC 容错策略实现

文中结合 NT 与 DCCI 的控制特点,提出 NT 联合 DCCI 控制的无冗余 MMC 容错控制策略。该策略通过 NT 控制可改变三相电压相角,恢复 MMC 输出线电压平衡。DCCI 控制可将三相电压向故障 SM 较少的一侧平移,提高非故障 SM 利用率与输出线电压幅值。此外,为实现非故障 SM 利用率与输出线电压幅值最大化,文中还提出三段式最优 DCCI 计算方法。该容错策略下,所需容错参数主要为最优 DCCI 幅值与三相电压相角差。根据容错参数调整三相电压,MMC 即可保证线电压输出平衡。若该无冗余 MMC 运行于直流电压允许提升的系统中,可以通过提高直流母线电压,完全恢复输出线电压至无故障水平。

## 2.1 容错控制参数计算

当  $j$  相发生 SM 故障时, 假设其上、下桥臂故障 SM 数量分别为  $N_{uf,j}$ ,  $N_{lf,j}$ , 此时上、下桥臂输出电压范围为:

$$\begin{cases} u_{pof,j} \in [0, (N - N_{uf,j})U_{c0}] \\ u_{wof,j} \in [0, (N - N_{lf,j})U_{c0}] \end{cases} \quad (7)$$

$v, w$  点处电压范围为:

$$\begin{cases} u_{vnf,j} \in [(-0.5N + N_{uf,j})U_{c0}, 0.5NU_{c0}] \\ u_{wnf,j} \in [-0.5NU_{c0}, (0.5N - N_{lf,j})U_{c0}] \end{cases} \quad (8)$$

由式(5)可得  $j$  相电压幅值为:

$$U_{jnf} = \min[|(-0.5N + N_{uf,j})U_{c0}|, |(0.5N - N_{lf,j})U_{c0}|] \quad (9)$$

图 5(a) 中,  $N_{UA2,j}$  表示为:

$$N_{UA2,j} = N - N_{uf,j} - N_{lf,j} - 2U_{jnf}/U_{c0} \quad (10)$$

当 UA2 位于相电压正半轴时, 称为上侧 UA2, 反之称为下侧 UA2。设三相电压全部上侧 UA2 宽之和与全部下侧 UA2 宽之和分别为  $N_{UA2,up}$  与  $N_{UA2,bl}$ 。DCCI 控制的目标为减小 UA2 的宽度, 故选择  $N_{UA2,up}$  与  $N_{UA2,bl}$  最大一侧作为直流分量注入的方向。在直流分量注入方向上, 对  $N_{UA2,j}$  进行排序, 从小至大依次为  $N_{UA2,1}, N_{UA2,2}, N_{UA2,3}$ 。当注入直流分量幅值大于该相 UA2 宽度时, 该相电压幅值降低, 如图 5(c) 所示。因此, 当注入的直流分量幅值等于  $0.5N_{UA2,3}$  时, 三相 UA2 已全部转为输出区域。若继续增大注入幅值, 必将导致三相电压幅值与线电压幅值均降低, 无法满足输出线电压最大化的容错控制目标。设 MMC 注入直流分量的幅值为  $KU_{c0}$ , 则  $K$  的取值范围为:

$$K \in [0, 0.5N_{UA2,3}] \quad (11)$$

为应对各种可能的 SM 故障情况, 根据 DCCI 幅值的不同取值, 注入直流分量后三相电压幅值表达式分为 3 部分进行计算。

(1) 当  $K \in [0, 0.5N_{UA2,1}]$  时。

$$\begin{cases} U_{1nf} = U_{1n} + KU_{c0} \\ U_{2nf} = U_{2n} + KU_{c0} \\ U_{3nf} = U_{3n} + KU_{c0} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $U_{xn}$  ( $x=1, 2, 3$ ) 分别为  $N_{UA2,x}$  所对应相 DCCI 控制前的电压幅值;  $U_{xnf}$  为该相 DCCI 控制后的电压幅值。

此时随着  $K$  增加, 三相 UA2 均逐渐转为输出区域, 因此三相电压幅值均增大。

(2) 当  $K \in (0.5N_{UA2,1}, 0.5N_{UA2,2}]$  时。

$$\begin{cases} U_{1nf} = U_{1n} + (N_{UA2,1} - K)U_{c0} \\ U_{2nf} = U_{2n} + KU_{c0} \\ U_{3nf} = U_{3n} + KU_{c0} \end{cases} \quad (13)$$

当  $K$  取值大于  $0.5N_{UA2,1}$  后, 该对应相的电压幅值将随  $K$  的增大而减小。

(3) 当  $K \in (0.5N_{UA2,2}, 0.5N_{UA2,3}]$  时。

$$\begin{cases} U_{1nf} = U_{1n} + (N_{UA2,1} - K)U_{c0} \\ U_{2nf} = U_{2n} + (N_{UA2,2} - K)U_{c0} \\ U_{3nf} = U_{3n} + KU_{c0} \end{cases} \quad (14)$$

DCCI 控制后, 三相电压幅值虽有提升, 但不能确保 MMC 输出线电压平衡。因此还需采用 NT 控制, 确保输出线电压平衡。经 NT 控制后, 线电压为:

$$\begin{cases} U_{12f}^2 = U_{1nf}^2 + U_{2nf}^2 - 2U_{1nf}U_{2nf}\cos\theta_{12} \\ U_{23f}^2 = U_{2nf}^2 + U_{3nf}^2 - 2U_{2nf}U_{3nf}\cos\theta_{23} \\ U_{31f}^2 = U_{3nf}^2 + U_{1nf}^2 - 2U_{3nf}U_{1nf}\cos\theta_{31} \\ \theta_{12} + \theta_{23} + \theta_{31} = 360^\circ \end{cases} \quad (15)$$

$$U_{12f}^2 = U_{23f}^2 = U_{31f}^2 \quad (16)$$

式中:  $U_{12f}, U_{23f}, U_{31f}$  为容错控制后线电压幅值;  $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{31}$  为三相电压相角差值。

将式(12)一式(14)代入式(15)、式(16)可知, 方程组有 4 个未知数, 分别为  $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{31}, K$ , 但有效方程仅有 3 个。因此求解该方程组时, 应当从 0 至  $0.5N_{UA2,3}$  依次取出  $K$  值, 求得  $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{31}$  与线电压幅值。取线电压幅值最大时的  $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{31}, K$ , 作为该 SM 故障情况下的容错控制参数。当线电压幅值取最大时, 设  $K$  的取值为最优注入幅值  $K_{top}$ 。虽然经 NT 与 DCCI 容错控制后, 恢复了线电压平衡, 且更充分利用了非故障 SM, 提升输出线电压的幅值。但若要恢复线电压幅值至故障前水平, 还需增大直流母线电压, 进而提高 SM 电压。直流母线电压提升, 仅适用于 MMC 运行系统允许直流母线电压提升的情况, 且提升幅值受限于 SM 耐压能力。当 MMC 正常工作时, 额定线电压幅值为  $0.5\sqrt{3}NU_{c0}$ 。若需恢复额定线电压幅值, 则线电压幅值提升比率  $T$  为:

$$T = \frac{0.5\sqrt{3}NU_{c0} - U_{ijf}}{U_{ijf}} \quad i \neq j, i = a, b, c, j = a, b, c \quad (17)$$

由文献[19]可知, MMC 稳定工作状态时, 桥臂电感  $L$  平均电压为 0, 电阻  $R$  电压降可以忽略。因此, 当直流母线电压提升至  $(1+T)NU_{c0}$  时, SM 电压提升至  $(1+T)U_{c0}$ , 线电压幅值提升至  $(1+T)U_{ijf}$ 。由式(17)可知, 线电压幅值将恢复至  $0.5\sqrt{3}NU_{c0}$ 。为确保 MMC 的 SM 安全工作, SM 运行电压应当不超过其最高工作电压  $U_{cmax}$ , 因此直流母线电压应当不超过  $(1+T_{max})NU_{c0}$ 。

$$T_{\max} = \frac{U_{\text{cmax}} - U_{\text{c0}}}{U_{\text{c0}}} \quad (18)$$

根据上述分析,容错控制后三相电压调制波为:

$$\begin{cases} U_{1\text{ref}} = KU_{\text{c0}} + U_{1\text{mf}}m\sin(\omega t + \varphi_0) \\ U_{2\text{ref}} = KU_{\text{c0}} + U_{2\text{mf}}m\sin(\omega t + \varphi_0 + \theta_{12}) \\ U_{3\text{ref}} = KU_{\text{c0}} + U_{3\text{mf}}m\sin(\omega t + \varphi_0 - \theta_{31}) \end{cases} \quad (19)$$

提升直流侧电压后,MMC 正常工作的 SM 电压提升至 $(1+T)U_{\text{c0}}$ 。但调制过程中,SM 电压仍按额定电压  $U_{\text{c0}}$  进行计算,故三相电压调制波也应按  $U_{\text{c0}}$  给出。

## 2.2 容错控制流程

由 2.1 节分析可知,文中所提容错控制策略的容错控制参数均可由离线计算得到,不会增加控制器运算负担,控制流程如图 6 所示。

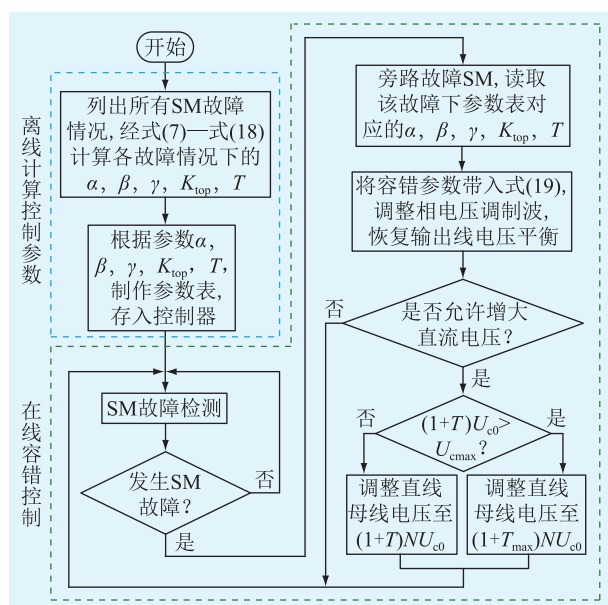


图 6 容错控制流程

Fig.6 Fault-tolerant control flow

MMC 投入运行前,首先列出各种 SM 故障情况。然后,根据式(7)一式(18)求得各故障情况下  $\alpha, \beta, \gamma, K_{\text{top}}, T$  等容错控制参数,同时制作容错控制参数表并存储于 MMC 控制器中。MMC 投入运行后,当检测到 SM 发生故障时,控制器迅速闭锁故障 SM,同时查询容错控制参数表,读取该故障情况下对应的容错控制参数。然后,根据容错控制参数对直流分量注入幅值、三相电压相角差进行相应调整,MMC 输出线电压即可恢复平衡。最后,由上级控制单元判断是否调整直流母线电压,若可以调整则增大直流侧母线电压,至此容错控制完成。

当 MMC 的  $N$  为 10 时,在不同 SM 故障情况下,MMC 分别采用 NT+DCCI 容错控制与文献[18]提出的容错控制策略。2 种容错策略下的容错控制参

数如表 1 所示。 $U_{\text{lf}}$  为容错控制后 MMC 输出线电压幅值; $\Delta U_{\text{l}}$  为容错控制后线电压幅值下降比率。

表 1 部分容错控制参数

Table 1 Partial fault-tolerance control parameters

控制策略	SM 故障分布 ( $N_{\text{uf,a}}, N_{\text{uf,b}}, N_{\text{uf,c}}$ ), ( $N_{\text{lf,a}}, N_{\text{lf,b}}, N_{\text{lf,c}}$ )					
	(1,1,1), (0,0,0)	(2,1,1), (0,1,0)	(2,2,2), (0,0,0)	(3,2,1), (0,0,0)	(3,2,3), (0,0,0)	(3,2,1), (0,0,2)
$U_{\text{lf}}$	$7.79U_{\text{c0}}$	$7.18U_{\text{c0}}$	$6.63U_{\text{c0}}$	$6.31U_{\text{c0}}$	$6.06U_{\text{c0}}$	$4.96U_{\text{c0}}$
$\alpha, \beta /$ (°)	120.00, 120.00	127.11, 105.77	124.05, 124.05	127.98, 104.05	120.00, 120.00	88.95, 106.57
NT+ DC- CI $\Delta U_{\text{l}} /$ %	10.00	17.13	23.47	27.18	30.00	42.77
$U_{\text{c1}}$	$1.11U_{\text{c0}}$	$1.20U_{\text{c0}}$	$1.30U_{\text{c0}}$	$1.37U_{\text{c0}}$	$1.43U_{\text{c0}}$	$1.75U_{\text{c0}}$
$K_{\text{top}}$	0.5	0.5	1.0	1.0	1.5	1.0
$U_{\text{lf}}$	$6.93U_{\text{c0}}$	$6.31U_{\text{c0}}$	$5.20U_{\text{c0}}$	$4.96U_{\text{c0}}$	$3.92U_{\text{c0}}$	$4.56U_{\text{c0}}$
文献 [18] $\alpha, \beta /$ (°)	120.00, 120.00	127.98, 104.04	120.00, 120.00	164.48, 88.95	157.18, 101.41	130.53, 98.94
方法 $\Delta U_{\text{l}} /$ %	20.00	27.87	40.00	42.77	54.72	47.34
$U_{\text{c1}}$	$1.25U_{\text{c0}}$	$1.37U_{\text{c0}}$	$1.67U_{\text{c0}}$	$1.74U_{\text{c0}}$	$2.21U_{\text{c0}}$	$1.90U_{\text{c0}}$

若 SM 允许过电压能力大于 30%,且系统允许直流母线电压提升。由表 1 可知,当 MMC 共 7 个 SM 发生故障,其分布情况为(2,2,2), (0,1,0)时,采用 NT+DCCI 容错控制策略,则 MMC 能够完全恢复线电压幅值。相较于文献[18]提出的容错控制策略,采用 NT+DCCI 容错控制时,MMC 输出线电压幅值明显增大,且提高了无冗余 MMC 应对多 SM 故障的能力。

## 3 仿真分析

为验证所提无冗余 MCC 容错控制策略,基于 PSCAD/EMTDC 平台搭建如图 1 所示的  $N$  为 10 的三相 MMC 仿真模型,主要参数见表 2,  $U_{\text{sm,max}}$  为 SM 最大工作电压,调制方式采用文献[24]的改进型载波层叠调制。

表 2 仿真模型参数

Table 2 Simulation model parameters

参数	数值
$N$	10
$U_{\text{dcN}} / \text{kV}$	$\pm 5$
$C / \text{mF}$	4
$U_{\text{c0}} / \text{kV}$	1
$U_{\text{sm,max}} / \text{kV}$	1.3
$L / \text{mH}$	10
$R / \Omega$	1
$Z_{\text{L}} / \Omega$	30

假定 a 相上桥臂  $SM_1$ 、 $SM_2$  以及 b 相、c 相上桥臂  $SM_1$  发生故障退出运行,分别采用 NT+DCCI 与文献[18]提出的容错策略进行容错控制。仿真结果分为 6 个时段,如图 7 所示。6 个时段分别为:① 非故障时段:该时段 SM 无故障发生;② SM 故障时段:该时段 SM 发生故障,但系统未进行容错控制;③ NT 控制时段:该时段采用文献[18]提出的 NT 容错控制方法;④ NT+DCCI 控制时段:该时段采用文中所提容错控制策略;⑤ 直流电压提升时段:该时段通过调整直流侧母线电压,恢复线电压额定幅值;⑥ 线电压幅值完全恢复时段:该时段线电压幅值恢复至额定值。

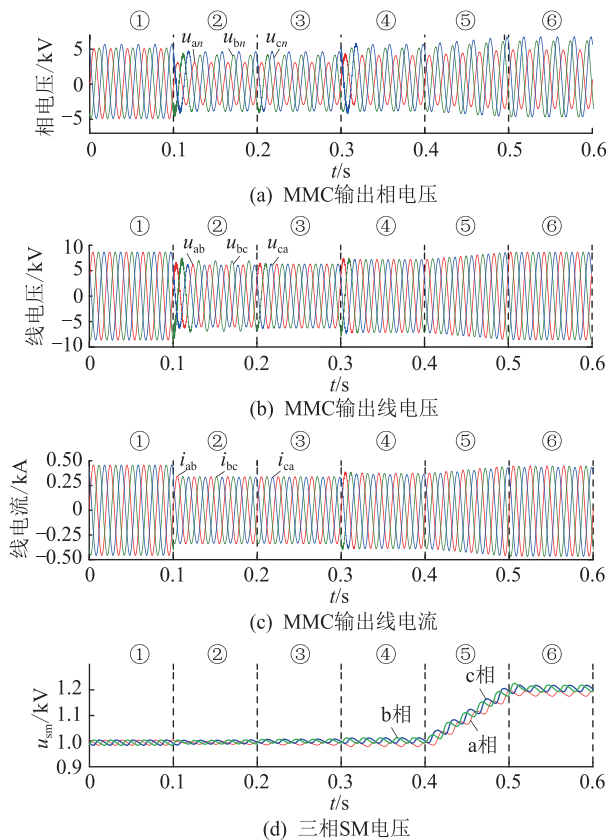


图 7 无冗余 MMC 容错控制仿真结果  
Fig.7 Simulation results of no-redundancy  
MMC fault-tolerant control

$t$  为 0.1 s 时,SM 发生故障,由于故障桥臂 SM 数减少,相电压幅值分别降为 3 kV,4 kV,4 kV,如图 7(a)所示。由于 0.1 ~ 0.2 s 期间未投入容错控制,不平衡相电压产生不平衡线电压,如图 7(b)所示。当负载平衡时,不平衡线电压进一步导致线电流不平衡,如图 7(c)所示。 $t$  为 0.2 s 时,投入文献[18]的容错控制策略,改变  $\alpha, \beta, \gamma$  分别为  $127.98^\circ, 104.04^\circ, 127.98^\circ$ ,此时线电压恢复平衡,其幅值约为 6.31 kV,同时线电流恢复平衡。 $t$  为 0.3 s 时,切换至 NT+DCCI 容错控制,由表 1 获取容错控制参数

$K_{top}, \alpha, \beta, \gamma$  分别为 0.5,  $127.11^\circ, 105.77^\circ, 127.12^\circ$ 。相电压幅值分别提升至 3.5 kV, 4.5 kV, 4.5 kV, 线电压幅值恢复至约 7.18 kV。由图 7(b)可知,相较于文献[18]提出的容错控制,采用 NT+DCCI 容错控制时,输出线电压幅值明显提升,提升比率约为 13.79%。

若该系统直流母线电压允许增大,由表 2 可知 SM 允许过压能力为 30%,则可通过增大直流电压恢复线电压幅值。因此, $t$  为 0.4 s 时,逐渐提升直流侧母线电压至  $\pm 6$  kV,  $t$  为 0.5 s 时,输出线电压幅值完全恢复。直流母线电压提升过程中,电压逐渐增大至 1.2 kV,小于 SM 最大允许工作电压 1.3 kV。由图 7(d)可知,SM 电压提升过程平缓,未出现冲击性的电压波动,不会对 SM 中电力电子器件造成冲击性影响。

为分析该容错控制策略的系统响应速度,当  $t$  为 0.1 s 检测到 SM 发生故障时,直接采用 NT+DCCI 容错控制,MMC 输出相电压与线电压仿真波形分别如图 8(a)、(b)所示。SM 故障发生后,控制器迅速根据容错控制参数表调整三相电压幅值与相位,由图 8(a)、(b)可知,此时相电压与线电压均出现了小幅波动,但该波动持续衰减,并在 0.02 s 内恢复平衡稳定。仿真结果表明,该容错控制系统具有较好的响应速度。

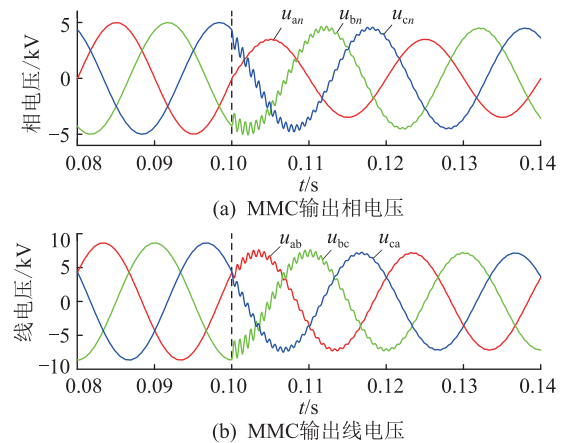


图 8 MMC 输出电压仿真结果  
Fig.8 Simulation results of MMC output voltage

## 4 结语

为提升无冗余 MMC 应对 SM 故障的能力,文中首先分析了 SM 故障对无冗余 MMC 的影响机理,然后提出了 NT+DCCI 容错控制策略以及最优 DCCI 幅值的计算方法。与现有容错策略相比,NT+DCCI 容错控制有效提升了无冗余 MMC 应对多 SM 故障的能力,提高了非故障桥臂 SM 利用率,增大了故障

后 MMC 输出线电压幅值,避免了输出相电压波形的畸变,具有系统响应快、输出电压暂态过程平缓等优点。

在面对多 SM 故障时,NT+DCCI 容错控制能显著提升无冗余 MMC 持续输送电能的能力,从而提高其所处系统的可靠性与稳定性。

本文得到先进输电技术国家重点实验室开放基金项目(GEIRI-SKL-2020-011)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 刘钟淇,宋强,刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统[J]. 电力系统自动化,2010,34(2):53-58.  
LIU Zhongqi, SONG Qiang, LIU Wenhua. VSC-HVDC system based on modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 53-58.

[2] DEKKA A, WU B, FUENTES R L, et al. Evolution of topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(4): 1631-1656.

[3] DEBNATH S, QIN J, BAHrani B, et al. Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: a review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 37-53.

[4] 杨晓峰,郑琼林,薛尧,等. 模块化多电平换流器的拓扑和工业应用综述[J]. 电网技术,2016,40(1):1-10.  
YANG Xiaofeng, ZHENG Qionglin, XUE Yao, et al. Review on topology and industry applications of modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 1-10.

[5] 管敏渊,徐政. 模块化多电平换流器子模块故障特性和冗余保护[J]. 电力系统自动化,2011,35(16):94-98,104.  
GUAN Minyuan, XU Zheng. Redundancy protection for sub-module faults in modular multilevel converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 94-98, 104.

[6] 林周宏,刘崇茹,林雪华,等. 基于载波移相调制的模块化多电平换流器冗余保护策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(20):109-115.  
LIN Zhouhong, LIU Chongru, LIN Xuehua, et al. Redundant protection strategy based on CPS-SPWM for modular multilevel converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 109-115.

[7] 王朝亮,赵成勇,许建中. 模块化多电平换流器的子模块冗余配置计算方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(16):103-107.  
WANG Chaoliang, ZHAO Chengyong, XU Jianzhong. A method for calculating sub-module redundancy configurations in modular multilevel converters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 103-107.

[8] LI J K, WU X Z, YAO X Y, et al. A zero-sequence voltage injection control scheme for modular multilevel converter under submodule failure [C]//2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Milwaukee, WI, USA. IEEE, 2016:1-6.

[9] 苑宾,梅念,陈东,等. 三次谐波注入对 MMC 运行特性的影响[J]. 高电压技术,2020,46(3):1060-1068.  
YUAN Bin, MEI Nian, CHEN Dong, et al. Influences of third harmonic injection on the operation characteristics of MMC system [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 1060-1068.

[10] LI M, GONG Z, WANG H Z, et al. A fault tolerant control for modular multilevel converter under submodule fault conditions [C]//IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing, China. IEEE, 2017:3155-3160.

[11] 申科,王建勋,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.

[12] 李敏. 模块化多电平变流器的子模块故障容错控制研究[J]. 电力电子技术,2018,52(2):96-100.  
LI Min. Fault tolerant control for sub-module fault of modular multilevel converter [J]. Power Electronics, 2018, 52(2): 96-100.

[13] 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.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.

- [18] YANG Q C, QIN J C, 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.
- [19] FARZAMKIA S, NOUSHAK M, IMAN-EINI H, et al. Fault-tolerant method to reduce voltage stress of sub-modules in post-fault condition for regenerative MMC-based drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68 (6): 4718-4726.
- [20] WANG J, MA H, BAI Z H. 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] LI G, AN T, LIANG J, et al. Studies of commutation failures in hybrid LCC/MMC HVDC systems [J]. Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 193-204.
- [24] 白志红, 周玉虎. 模块化多电平换流器的载波层叠脉宽调制策略分析与改进[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 139-144.  
BAI Zhihong, ZHOU Yuhu. Analysis and improvement on carrier level-shifted pulse width modulation strategy for modular multilevel converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 139-144.

作者简介:



夏长江

夏长江(1995),男,硕士在读,研究方向为柔性直流输电技术(E-mail: 916912175@qq.com);

韩民晓(1963),男,博士,教授,研究方向为电力电子技术 in 电力系统中的应用;

耿治(1990),男,博士在读,研究方向为模块化多电平变换器运行与控制。

## Fault-tolerant control strategy of line voltage recovery after MMC sub-modules fault

XIA Changjiang<sup>1</sup>, HAN Minxiao<sup>1</sup>, GENG Zhi<sup>1</sup>, KOU Longze<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology (Global Energy Interconnection Research Institute Co., Ltd.), Beijing 102209, China)

**Abstract:** When the modular multilevel converter (MMC) arms do not have redundant sub-modules, the fault of the sub-modules decreases the output voltage capability of the faulty phase, which leads to the unbalanced output line voltage of the MMC. In order to restore the post-fault output line voltage characteristics of the no-redundant MMC and improve the utilization rate of the non-faulty arm's sub-modules, a sub-module fault-tolerant control strategy which is suitable for non-redundant MMC is proposed based on neutral point transfer (NT) and direct current component injection (DCCI) control. The fault-tolerant strategy adjusts the phase angle of the three-phase voltage through NT control for ensuring the balance of the output line voltage. In addition, a three-stage optimal DCCI amplitude calculation method is proposed. Compared with the existing methods, the optimal amplitude DCCI further improves the utilization rate of the non-faulty arm's sub-modules and increases the output line voltage amplitude. A three-phase MMC simulation model based on the PSCAD/EMTDC platform is built, and the effectiveness of the proposed no-redundant fault-tolerant control strategy is verified through the simulation results.

**Keywords:** modular multilevel converter (MMC); no-redundancy fault-tolerant control; sub-module (SM) fault; neutral point transfer (NT); direct current component injection (DCCI)

(编辑 吴楠)