

基于三次谐波电压注入的扩展混合型 MMC 运行区域的控制方法

李冠宏 路茂增 边敦新 赵艳雷 路梅雪
(山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要: 针对低直流电压运行工况下混合型 MMC 全桥子模块及半桥子模块电容电压不均衡问题, 提出了一种基于三次谐波电压注入的改善方法。回顾了子模块电容电压不均衡问题机理, 计算出子模块电容电压不均衡问题发生的边界条件以及混合型 MMC 安全运行区域。定量分析三次谐波电压幅值及初始相位对电容电压的影响规律, 并计算出三次谐波电压注入对混合型 MMC 的运行区域的扩展效果。基于 MATLAB/Simulink 建立了双端仿真模型, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 混合型 MMC; 低直流电压; 运行区域; 三次谐波电压; 电容电压均衡

DOI: 10.19753/j.issn1001-4390.2023.08.027

中图分类号: TM72

文献标识码: A

文章编号: 1001-4390(2023)08-0164-07

Third harmonic voltage injection based control method with expanding the operation area of hybrid MMC

Li Guanhong, Lu Maozeng, Bian Dunxin, Zhao Yanlei, Lu Meixue

(School of Electrical and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, Shandong, China)

Abstract: Aiming at the problem of capacitor voltage imbalance in the full-bridge sub-module and the half-bridge sub-module of hybrid MMC under low DC voltage operation conditions, this paper proposed an improved method based on the third harmonic voltage injection. The mechanism of the capacitor voltage imbalance problem is reviewed, and calculates the boundary conditions for the sub-module capacitor voltage imbalance problem and the safe operating area of hybrid MMC. The influence law of the amplitude and initial phase of the third harmonic voltage on the capacitor voltage is analyzed, and the expansion effect of the third harmonic voltage injection on the expansion of operating area of the hybrid MMC is calculated quantitatively. A double-ended simulation model with MATLAB/Simulink is established, and the simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

Keywords: hybrid MMC, low DC voltage, operating area, third harmonic voltage, capacitor voltage equalization

0 引言

全桥-半桥 1:1 混合型 MMC(简称混合型 MMC)凭借较低的构建成本、较高的运行效率及直流短路故障穿越能力等因素已初步成为柔直换流站的首选方案^[1-3]。在极端天气及森林火灾等场景下,考虑输电线路的绝缘问题,一般会降低混合型 MMC 直流侧电压使其工作在低于额定直流电压(简称低直流电压)工况下以维持运行的可靠性^[4-5],在直流短路故障恢复期间,混合型 MMC 亦运行于低直流电压^[6-8]工况。综上,低直流电压运行场景已成为混合型 MMC 的一种典型工况。

子模块电容电压均衡是保证混合型 MMC 可靠工

作的基础^[9],由于两种子模块充、放电过程的差异性,采用传统排序算法^[10]的混合型 MMC 在低直流电压运行下可能会存在子模块电容电压不均衡问题。当不均衡问题发生时,半桥阀组在一段时间内会持续放电(或充电),全桥阀组会持续充电(或放电),持续放电的子模块会恶化换流器的输出性能;而持续充电的子模块会使电容器和相关器件的电压应力增大,影响换流器安全运行^[10]。

针对上述问题,文献[11]提出在交流侧注入无功电流,但注入无功电流会牺牲换流站的运行区域,不利于高功率因数运行。文献[12]提出增加桥臂中全桥子模块的比例,但增加了换流器的构建成本及运行损耗。文献[9]及文献[13]分别提出基于基频及二倍频环流

基金项目:国家重点研发计划子课题项目(2017YFB092800);山东省自然科学基金青年项目(ZR2020QE215)

注入的均压改善方案。三次谐波电压注入在实现半桥型 MMC 过调制运行^[14]、降低混合型 MMC 电容电压波动^[15-16]等方面的研究已较为成熟,但尚未见三次谐波电压对电容电压均衡问题影响的相关研究报道。

文章研究了三次谐波电压注入对混合型 MMC 电容电压均衡的影响,在文献 [9] 的基础上计算了电容电压不均衡问题发生的条件及混合型 MMC 在低直流电压工况下的运行区域,定量分析了三次谐波注入电压幅值及相位对电容电压均衡问题的影响规律,进一步针对直流侧电压不同跌落程度下,计算分析了三次谐波电压注入对混合型 MMC 运行区域的扩展效果。最后,基于 MATLAB/Simulink 仿真模型验证了分析结论的有效性。

1 混合型 MMC 基本工作原理

图 1 为混合型 MMC 的拓扑结构。换流器共有 6 个桥臂,每个桥臂由 N 个子模块串联组成,含 $N/2$ 个全桥子模块及 $N/2$ 个半桥子模块。 U_{dc} 为直流侧额定电压, I_{dc} 为直流侧电流, $u_{c,f}$ 及 $u_{c,h}$ 分别为全桥及半桥子模块电容电压。 u_{sa} 、 u_{sb} 及 u_{sc} 为三相交流侧电压, i_a 、 i_b 及 i_c 为交流侧电流。 u_{pj} 和 u_{nj} 分别表示 j 相上、下桥臂输出电压, i_{pj} 和 i_{nj} 分别表示 j 相上、下桥臂电流,其中 $j = a, b, c$ 。

定义混合型 MMC 的调制比 m 为:

$$m = U_m / (U_{dc} / 2) \quad (1)$$

其中 U_m 为交流侧相电压幅值。

正常情况下,混合型 MMC 工作于半桥型 MMC 模式。以 a 相为例,混合型 MMC 上、下桥臂的电压可表示为:

$$\begin{cases} u_{pa} = U_{dc} / 2 (1 - m \sin \omega t) - u_{diff a} \\ u_{na} = U_{dc} / 2 (1 + m \sin \omega t) - u_{diff a} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $u_{diff a}$ 为二倍频环流抑制对桥臂输出电压的修正值。

假设二倍频环流得到有效抑制, a 相上、下桥臂电流可表示为:

$$\begin{cases} i_{pa} = [1 + 2 \sin(\omega t - \varphi) / (m \cos \varphi)] I_{dc} / 3 \\ i_{na} = [1 - 2 \sin(\omega t - \varphi) / (m \cos \varphi)] I_{dc} / 3 \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_{dc} 为直流侧电流; φ 为功率因数角。

当混合型 MMC 运行在低直流电压工况下时,随着直流侧电压跌落程度的增加,桥臂输出电压会存在负值^[9-10, 13]。学者们一般在桥臂输出电压为正时,对半桥及全桥子模块一起排序并投切;在桥臂输出电压为负时,仅对全桥子模块电容电压进行排序并投切^[10, 15]。但由于半桥及全桥充放电的差异性,上述排序算法不能保证全桥及半桥子模块电容电压的均衡。考虑电容电压均衡问题,下面将定量计算混合型 MMC 在 $[0, U_{dc}]$ 下的运行区域。

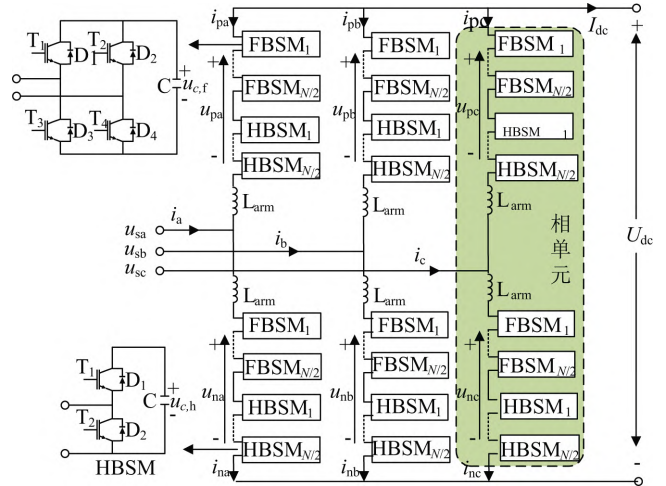


图 1 混合型 MMC 拓扑结构

Fig. 1 Hybrid MMC topology

2 混合型 MMC 运行区域分析

本节首先回顾混合型 MMC 全桥及半桥电容电压不均衡问题的分析方法^[9],然后计算混合型 MMC 的可靠运行区域。

2.1 电容电压不均衡问题机理分析

以整流器模式为例,忽略二倍频环流抑制器对桥臂平均开关函数的影响,低直流电压下稳态 a 相上桥臂的输出电压及桥臂电流为:

$$\begin{cases} u_{pa} = U_m (1/m - \sin \omega t) \\ i_{pa} = - [1 + 2 \sin(\omega t - \varphi) / (m \cos \varphi)] I_{dc} / 3 \end{cases} \quad (4)$$

根据上式,图 2 为低直流电压运行工况时一个基频周期内半桥及全桥子模块充、放电示意图。

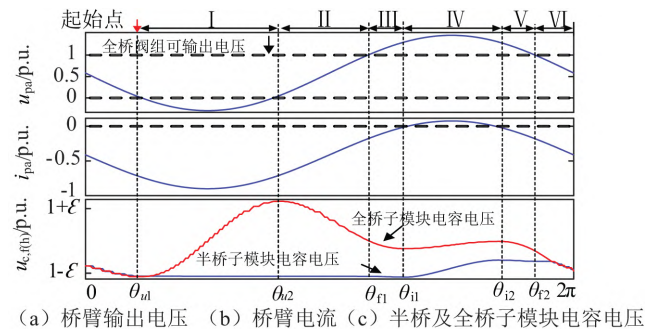


图 2 半桥及全桥子模块充、放电示意图

Fig. 2 Schematic diagram of half-bridge and full-bridge sub-module charging and discharging

由图 2 可知,其基准值依次为桥臂中全桥阀组可输出电压 $NU_c / 2$ 、 $I_{dc} / 3$ 及 U_c ,其中 U_c 为子模块额定电容电压。根据桥臂输出电压的正/负、桥臂电流的正/负及桥臂输出电压是否超过全桥阀组可输出电压,将一个基频周期分为六个区间。其中 θ_{u1} 和 θ_{u2} 为桥臂输出电压指令为零时的电角度; θ_{i1} 和 θ_{i2} 为桥臂输出电压

指令与桥臂中全桥阀组输出电压相等时的电角度; θ_{11} 和 θ_{12} 为桥臂电流为零时的电角度。 θ_{11} 至 θ_{12} 可表示为:

$$\begin{cases} \theta_{11} = \pi + \arcsin(NU_c/2U_m - 1/m), & m \geq 1 \\ \theta_{11} = \pi + \arcsin(m\cos\varphi/2) + \varphi, & 1 \leq m \leq 2 \\ \theta_{12} = 2\pi - \arcsin(m\cos\varphi/2) + \varphi, & 1 \leq m \leq 2 \\ \theta_{12} = 2\pi - \arcsin(NU_c/2U_m - 1/m), & m \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

根据文献 [9] 中的推导过程, 电容电压不均衡问题是否发生等价于半桥子模块在区间 III 及区间 V 内被动放电所释放的最少能量 (分别记为 $\Delta W_{h, \text{decrease}1}$ 及 $\Delta W_{h, \text{decrease}2}$) 及区间 IV 内主动充电所吸收的最大能量 (记为 $\Delta W_{h, \text{increase}}$) 是否满足:

$$\Delta W_h = \Delta W_{h, \text{increase}} - (\Delta W_{h, \text{decrease}1} + \Delta W_{h, \text{decrease}2}) < 0 \quad (6)$$

其中, $\Delta W_{h, \text{decrease}1}$ 、 $\Delta W_{h, \text{decrease}2}$ 及 $\Delta W_{h, \text{increase}}$ 可进一步表示为:

$$\begin{cases} \Delta W_{h, \text{decrease}1} = - \int_{\theta_{11}}^{\theta_{12}} (u_{pa} - N/2u_{c, f}) \times i_{pa} d\omega t \\ \Delta W_{h, \text{decrease}2} = - \int_{\theta_{12}}^{\theta_{11}} (u_{pa} - N/2u_{c, f}) \times i_{pa} d\omega t \\ \Delta W_{h, \text{increase}} = \int_{\theta_{11}}^{\theta_{12}} N/2u_{c, h} \times i_{pa} d\omega t \end{cases} \quad (7)$$

若式 (6) 成立, 子模块电容电压不均衡问题将会发生。一个基频周期后, 半桥阀组电容电压因持续放电而降低; 全桥阀组电容电压因持续充电而升高 (对于逆变器则相反)。

2.2 混合型 MMC 运行区域的计算

根据式 (4) ~ 式 (6), 以正常稳态运行时 $m = 0.9$ 为例, 可作混合型 MMC 的运行区域, 如图 3 所示。其中, ΔW_h 为桥臂中半桥子模块在区间 III 至区间 V 能量的变化值, 其基准值为 $U_m I_{dc} / \omega$ 。

当直流电压跌落深度为 30%、40%、50%、52.6% 及 55% 时, 调制比分别为 1.3、1.5、1.8、1.9 及 2。图 3 给出了上述跌落深度下的 ΔW_h 曲线。

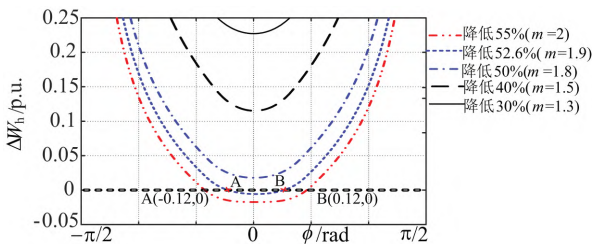


图 3 混合型 MMC 运行区域

Fig. 3 Hybrid MMC operating area

聚焦图 3 中 ΔW_h 为负的区域, 可以发现当直流侧电压跌落深度为 52.6% ($m = 1.9$) 及以上时, 会出现电

容电压不均衡问题。由图 3 可发现, 直流电压跌落程度与功率因数均会影响电容电压均衡问题, 且功率因数越高不均衡问题发生的概率越大。以直流侧电压降低 52.6% ($m = 1.9$) 为例, $|\varphi|$ 小于 0.12 时, 会出现电容电压不均衡现象, 影响混合型 MMC 的可靠运行。

需要说明上述分析聚焦桥臂电流双方向 ($m < 2$) 的运行工况。当桥臂电流单方向 ($m \geq 2$) 且桥臂输出电压指令超过桥臂中全桥阀组可输出电压时, 亦会存在电容电压不均衡问题, 影响混合型 MMC 的可靠运行。此时需要降低功率因数或者注入基频^[9]或二倍频环流^[13]以增加半桥阀组的充放电时间。本文主要聚焦三次谐波电压注入对电容电压均衡问题的影响, 因此仅考虑桥臂电流双方向的运行工况。

3 三次谐波电压注入对混合型 MMC 运行区域的扩展效果分析

低直流电压运行工况下, 三次谐波电压注入通过塑造桥臂输出电压波形影响半桥子模块在一个基频周期内的充放电过程。本节首先介绍三次谐波电压注入的原理, 然后定量分析三次谐波电压幅值及相位对全桥及半桥电容电压不均衡问题的影响。最后, 考虑桥臂中全桥及半桥阀组的输出能力, 分析了不同跌落程度下三次谐波电压注入对混合型 MMC 运行区域的改善。

3.1 三次谐波电压注入对电容电压均衡问题影响定性分析

图 4(a) 为考虑三次谐波电压注入的混合型 MMC 的控制框图。相比传统的混合型 MMC 的控制策略, 在桥臂输出电压指令上加入三次差模分量 Δu_{3rd} 。以 a 相为例, $\Delta u_{3rd, a}$ 满足:

$$\Delta u_{3rd, a} = U_{3m} \sin(3\omega t + \theta_3) \quad (8)$$

其中, U_{3m} 及 θ_3 分别为三次谐波注入电压的幅值和初始相位。

定义三次谐波电压幅值与直流侧电压满足:

$$k = U_{3m} / (U_{dc} / 2) \quad (9)$$

其中, k 为三次谐波电压的注入系数, u_{dc} 为当前工况下直流侧电压。

联立式 (2)、式 (8) 及式 (9), 可推出三次谐波电压注入后 a 相桥臂输出电压满足:

$$\begin{cases} u'_{pa} = U_m [1/m - \sin\omega t - k/m(\sin 3\omega t + \theta_3)] \\ u'_{na} = U_m [1/m + \sin\omega t + k/m(\sin 3\omega t + \theta_3)] \end{cases} \quad (10)$$

考虑桥臂中全桥及半桥阀组的电压输出能力, 注入的三次谐波电压应满足:

$$\begin{cases} \max\{U_m [1/m - \sin\omega t - k/m(\sin 3\omega t + \theta_3)]\} \leq NU_c \\ \min\{U_m [1/m + \sin\omega t + k/m(\sin 3\omega t + \theta_3)]\} \geq -NU_c/2 \end{cases} \quad (11)$$

根据式(10),图4(b)、图4(c)为注入不同相位的三次谐波后的桥臂输出电压波形。其中,图4(b)中三次谐波电压初始相位 θ_3 为零,图4(c)为相同幅值但初始相位 $\theta_3 = \pi$ 的桥臂输出电压波形。由图4(b)、图4(c)可发现,三次谐波电压注入通过塑造桥臂输出电压影响桥臂输出电压与全桥阀组输出电压相等时的电角度(即图中的 θ_{11}' 、 θ_{12}')。根据电容电压不均衡问题的分析过程,上述电角度的改变会影响半桥阀组被迫释放的能量(整流器,见式(6)),进而影响全桥及半桥子模块电容电压均衡情况。例如图4(b),当注入初始相位 θ_3 为零的三次谐波电压时可能会增加半桥阀组被迫释放的能量,而恶化电容电压均衡问题;反之当注入初始相位 θ_3 为 π 的三次谐波电压时,会减小半桥阀组被迫释放的能量,进而改善电容电压均衡情况。

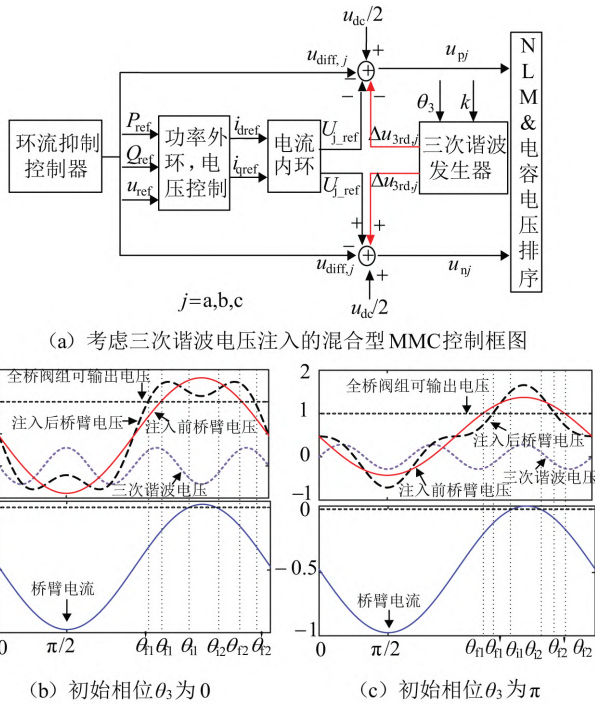


图 4 三次谐波电压注入控制框图及注入后桥臂输出电压

Fig. 4 Third harmonic voltage injection control block diagram and the output voltage of the bridge arm after injection

3.2 三次谐波电压幅值及初始相位选取原则

类似 2.1 节中的分析过程,三次谐波电压注入后的电容电压满足均衡的判据应修正为:

$$\Delta W_h' = \int_{\theta_{11}}^{\theta_{12}} N/2u_{c,j} \times i_{pa} d\omega + \int_{\theta_{11}}^{\theta_{12}} (u'_{pa} - N/2u_{c,j}) \times i_{pa} d\omega + \int_{\theta_{12}}^{\theta_{11}} (u'_{pa} - N/2u_{c,j}) \times i_{pa} d\omega \geq 0 \quad (12)$$

式中 u'_{pa} 为注入后的 a 相上桥臂输出电压; θ_{11}' 、 θ_{12}' 为三次谐波电压注入后桥臂输出电压等于桥臂中全桥阀

组可输出电压时的电角度。

以单位功率因数下,直流侧电压降低 52.6% ($m = 1.9$) 为例,通过遍历的方式对初始相位及幅值对电容电压均衡问题的影响进行定量分析,结果如图 5 所示。其中,图 5(a) 中三次谐波电压的初始相位满足 $\theta_3 \in (0, \pi/2)$,图 5(b) 中三次谐波电压的初始相位满足 $\theta_3 \in (\pi/2, \pi)$ 。图中阴影部分表示桥臂输出电压指令超过桥臂可输出电压的情况。

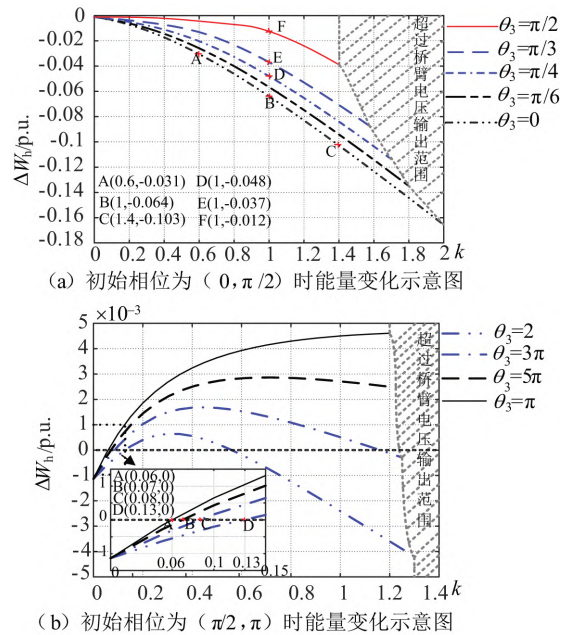


图 5 三次谐波注入电压幅值及初始相位对电容电压均衡问题影响示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the influence of amplitude and initial phase of the third harmonic injection voltage on capacitor voltage equalization

$\theta_3 = 0$ 为常规的三次谐波电压初始相位^[14-15],注入后桥臂输出电压波形如图 4(b) 所示。观察可知,当初始相位为 0 时半桥子模块被迫投入放电的区域增加,结合图 5(a) 可知当初始相位 θ_3 在 $(0, \pi/2)$ 内时, ΔW_h 随着注入系数的增大而减小。以 $\theta_3 = 0$ 为例,聚焦 A、B 及 C 点, ΔW_h 随着 k 的增加而减小,会恶化电容电压不均衡的程度。当注入系数相同时,以 $k = 1$ 为例,聚焦图 5(a) 点 D、E 及 F,初始相位的增加会使 ΔW_h 增加,这会改善电容电压不均衡的情况。但是遍历结果表明:注入初始相位 θ_3 在 $(0, \pi/2)$ 区间的三次谐波电压无法改善电容电压均衡情况。

由图 5(b) 可知当初始相位 θ_3 在 $(\pi/2, \pi)$ 内时,随着注入系数 k 的提高 ΔW_h 呈现先增大后减小的趋势,且存在使得 $\Delta W_h \geq 0$ 的区域。聚焦图 5(b) 中的点 A、B、C 及 D,可发现随着初始相位的增大,电容电压达到

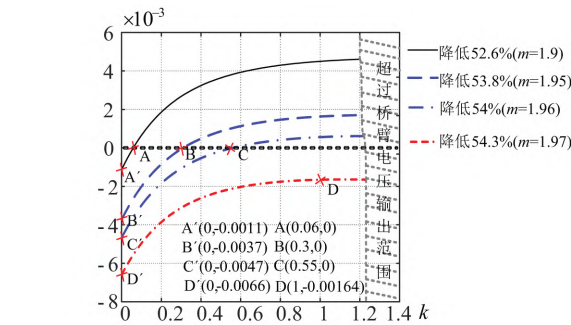
均衡($\Delta W_h \geq 0$) 所需的注入系数减小。

为了提高三次谐波电压的利用率,文中选取的初始相位 θ_3 为 π 。

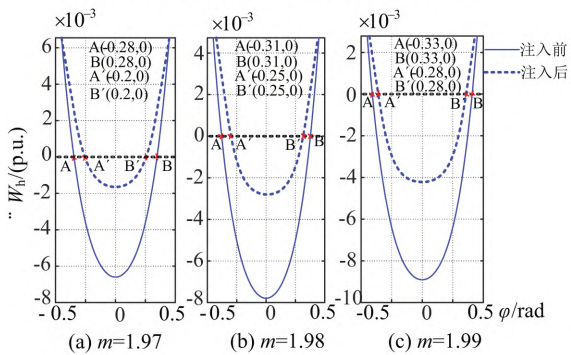
3.3 对混合型 MMC 运行区域扩展效果分析

为研究所提三次谐波电压注入策略对混合型 MMC 运行区域的扩展效果,图 6(a) 以单位功率因数为例,给出了直流侧电压不同跌落程度下,三次谐波电压注入对子模块电容电压不均衡问题的影响。聚焦图中点 A'、B'、C' 及 D' 可知,注入前随着直流侧电压跌落程度的加深, ΔW_h 逐渐减小,电容电压不均衡问题愈加突出。图中 A、B 及 C 为不同跌落程度下,三次谐波电压注入使得电容电压恰好达到均衡的点,即注入系数 k 使得 ΔW_h 等于零。

进一步观察可知,当直流侧电压跌落程度在 54% ($m = 1.96$) 以内时,三次谐波电压注入能够使得电容电压在整个运行区域内达到均衡。然而,当直流侧电压跌落程度超过 54% 时,以 54.3% ($m = 1.97$) 为例,聚焦图 6(a) 中的点 D' 及 D 可知,三次谐波电压注入虽然使得不均衡问题得到改善,但无法使得电容电压在单位功率因数下达到均衡,此时必须降低功率因数运行。



(a) 单位功率因数下对运行区域的扩展效果



(b) 降低功率因数时对运行区域的扩展效果

图 6 三次谐波电压注入对扩展混合型 MMC 运行区域影响

Fig. 6 Influence of third harmonic voltage injection on expanding the operating area of hybrid MMC

如图 6(b) 所示,以直流侧电压降低 54.3% ($m =$

1.97)、54.5% ($m = 1.98$) 及 54.8% ($m = 1.99$), 以 $k = 1$ 为例,作三次谐波电压注入前后混合型 MMC 的运行区域。以直流侧电压降低 54.3% 为例,由图 6(b) 中的 (a) 可知,三次谐波电压注入使不均衡问题发生的区域由注入前的 $(-0.28, 0.28)$ 减小到注入后的 $(-0.2, 0.2)$, 改善了电容电压不均衡程度,缩小了不均衡问题发生的区域。

综上,对于直流侧电压跌落程度在 54% 以内的混合型 MMC,三次谐波电压注入能够使得电容电压在整个运行区域内保持均衡,而当直流侧电压跌落程度超过 54% 时,三次谐波电压注入缩小了不均衡问题发生的区域,扩展了混合型 MMC 的运行区域。

4 仿真验证

为了验证所提三次谐波电压注入对混合型 MMC 子模块电容电压均衡的有效性,在 MATLAB/Simulink 中搭建了如图 7 所示的双端混合型 MMC-HVDC 测试系统,变压器采用 Y/Δ 接法,系统主要参数如表 1 所示。混合型 MMC 正常稳态调制比为 0.9。系统开始时工作于额定工况下,MMC1 采用定直流电压控制,MMC2 采用定有功功率控制, $t = 1.1$ s 时 MMC1 降低直流电压指令值使换流器工作于低直流电压运行工况,同时 MMC2 按比例降低功率使直流侧电流保持不变^[10]。

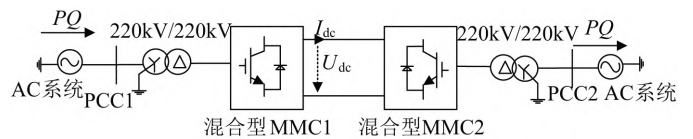


图 7 双端混合型 MMC 系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of double-ended hybrid MMC system

表 1 系统主要参数

Tab. 1 Main parameters of the system

系统参数	数值
交流侧线电压 U_n /kV	220
额定直流电压 U_{dc} /kV	400 ($m = 0.9$)
桥臂子模块个数 N	200
子模块额定电容电压 U_c /kV	2
桥臂电抗 L /mH	60
子模块电容 C /mF	8.4
额定功率 P_N /MW	400

以整流侧为例,如图 8(a) 所示,1.1 s 时直流侧电压降低 52.6%,调制比 m 由 0.9 提高到 1.9,电容电压恰好发生不均衡现象。

从图 8(a) 可以看出,注入前子模块电容电压缓慢的出现不均衡现象,半桥子模块电容电压下降而全桥子模块电容电压上升。根据图 6(a) 选取 $k = 0.06$,注入后波形如图 8(b) 所示,注入后子模块电容电压不均

衡现象得到有效改善。图 8(c) 为注入前后桥臂输出电压波形,可以看出桥臂输出电压由于三次谐波电压的注入而被重塑。

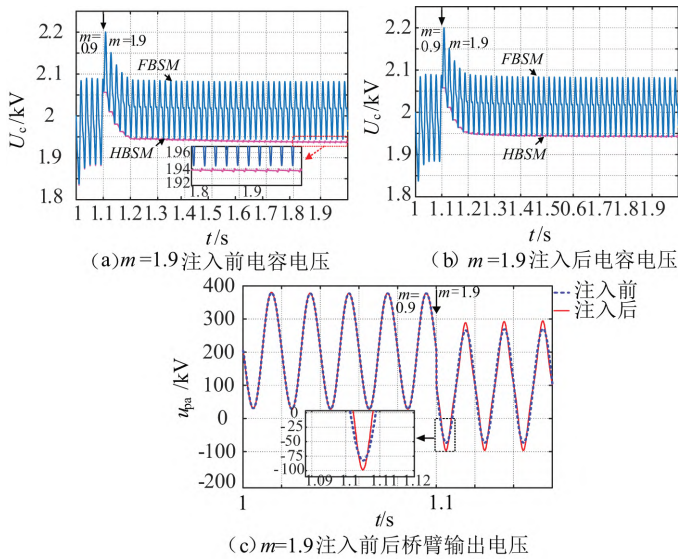


图 8 $m = 1.9$ 注入前后波形

Fig. 8 Waveform before and after injection when $m = 1.9$

为了验证三次谐波电压幅值和初始相位对电容电压均衡问题影响分析的正确性,图 9 给出了不同三次谐波电压幅值和初始相位下的 a 相上桥臂电容电压的仿真波形。聚焦图 9(a)、图 9(b) 发现:当 θ_3 为 $2\pi/3$ 时,若注入 $k = 0.13$ 的三次谐波电压后电容电压达到均衡,而注入 $k = 0.6$ 的三次谐波电压后电容电压不再均衡,验证了 3.2 节中三次谐波电压幅值对均衡问题分析的正确性。

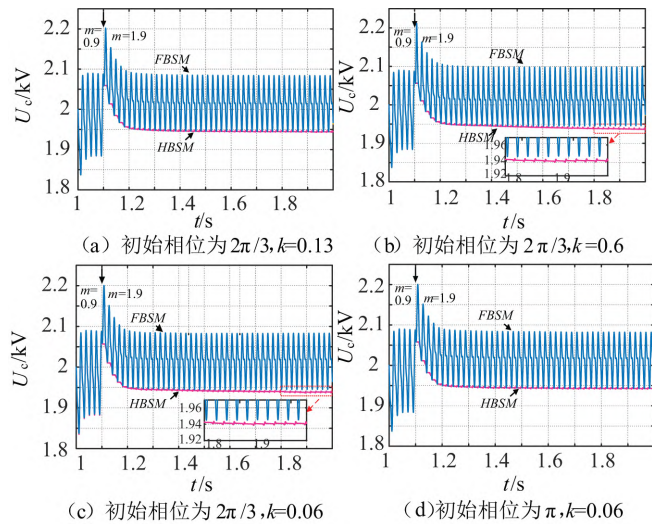


图 9 三次谐波电压注入后电容电压

Fig. 9 Capacitor voltages with third harmonic voltage injection

聚焦图 9(c) 及图 9(d) 发现:当 $k = 0.06$ 时若注入 $\theta_3 = 2\pi/3$ 的三次谐波电压无法满足电容电压均衡情况,而注入 $\theta_3 = \pi$ 的谐波电压可有效改善均衡情况,验证了 3.2 节中三次谐波电压初始相位对电容电压不均衡问题分析的正确性。

为了验证直流侧电压不同跌落程度下,三次谐波电压注入对不均衡问题的有效性。分别对直流侧电压降低 53.8% ($m = 1.95$) 及 54% ($m = 1.96$) 注入前后电容电压进行仿真验证。

如图 10(a)、如图 10(c) 所示,随着直流侧电压跌落程度的加深电容电压不均衡问题愈加突出。根据图 6(a),分别注入 $k = 0.3$ 及 $k = 0.55$ 的三次谐波电压,注入后的波形如图 10(b)、如图 10(d) 所示,三次谐波电压注入后电容电压不均衡问题得到有效改善。

图 10(e)、如图 10(f) 为三次谐波电压注入前后 a 相上桥臂电流波形。三次谐波电压注入前,由于电容电压不均衡导致桥臂电流出现不规则分量,1.35 s 时注入三次谐波电压,注入后桥臂电流波动被有效抑制。

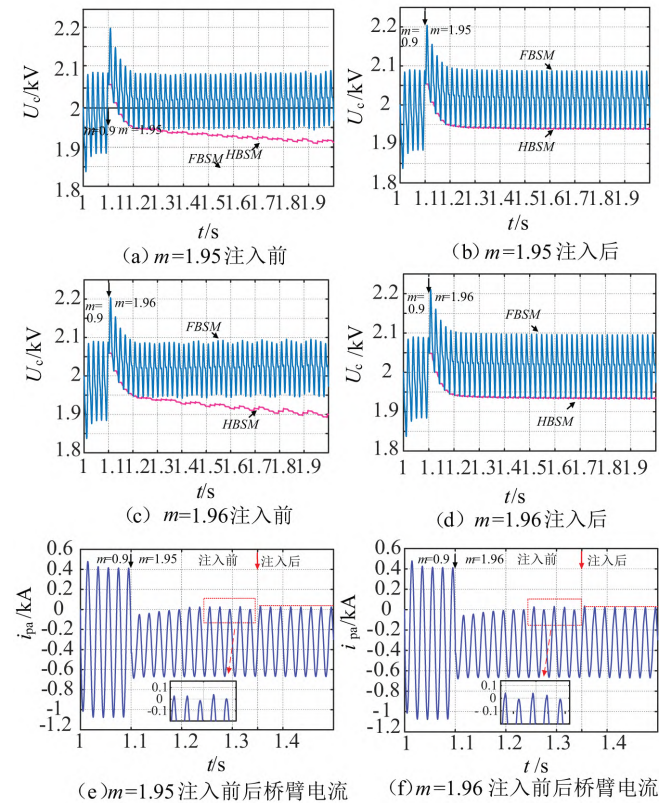


图 10 不同跌落程度下注入前后电容电压及桥臂电流
Fig. 10 Capacitor voltage and bridge arm current before and after injection at different degrees of drop

5 结束语

文章通过分析混合型 MMC 在低直流电压运行工

况下的电容电压不均衡问题,定量计算了混合型 MMC 的运行区域。

考虑桥臂中全桥及半桥阀组输出电压的能力,定性及定量分析了三次谐波电压幅值及相位对混合型 MMC 电容电压均衡问题的影响机理,并定量计算了三次谐波电压注入对混合型 MMC 运行区域的扩展效果。

基于 MATLAB/Simulink 搭建了双端混合型 MMC 的仿真模型,仿真结果验证了三次谐波电压对改善电容电压均衡问题的有效性以及其幅值和相位定量分析的准确性。

参 考 文 献

[1] 彭开军,周国梁,李文津,等. 采用二极管整流单元和模块化多电平换流器的混合型远海风电送出方案[J/OL]. 高压电器: 1-9 [2023-07-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1127.TM.20230403.1707.002.html>.

[2] Oates C. Modular multilevel converter design for VSC HVDC applications [J]. IEEE Journal of Selected and Emerging Topics in Power Electronics, 2015, 3(2): 505-515.

[3] 陈磊,何慧雯,王磊,等. 基于半桥型 MMC 的柔性直流电网故障限流方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 175-186.
Chen Lei, He Huiwen, Wang Lei, et al. Review of the fault current limiting approaches for a flexible DC grid based on a half-bridge MMC [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 175-186.

[4] 李国庆,张林,江守其,等. 风电经双极混合型 MMC-HVDC 并网的直流故障穿越协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 27-36.
Li Guoqing, Zhang Lin, Jiang Shouqi, et al. Coordinated control strategies for DC fault ride-through of wind power integration via bipolar hybrid MMC-HVDC overhead lines [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 27-36.

[5] 王彤彤,文俊,靳海强,等. LCC-MMC 混合直流输电系统直流回路谐振特性研究[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(3): 1-7, 16.
Wang Tongtong, Wen Jun, Jin Haiqiang, et al. Research on the resonance characteristics of the DC loop of the LCC-MMC hybrid DC transmission system [J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2021, 37(3): 1-7, 16.

[6] 何平港,牟大林,林圣. LCC-MMC 混合级联型直流输电系统启动控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(22): 71-80.
He Pinggang, Mu Dalin, Lin Sheng. Start-up control strategy for an LCC-MMC hybrid cascade HVDC system [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(22): 71-80.

[7] 韩伟,杨睿璋,刘超,等. 混合三端直流输电系统线路故障特性及故障电流抑制策略[J]. 高压电器, 2021, 57(6): 179-188.
Han Wei, Yang Ruizhang, Liu Chao, et al. DC fault characteristics and fault current suppression strategy of three-terminal hybrid hvdc system based on LCC and hybrid MMC [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 179-188.

[8] 倪伟坤,叶冬萌,戴国安,等. 基于电压回升比的混合直流线路主保护新原理[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(5): 1-9.

Ni Chuankun, Ye Dongmeng, Dai Guoan, et al. A New principle of main protection for hybrid HVDC lines based on the voltage recovery ratio [J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2022, 38(5): 1-9.

[9] Lu Maozeng, Hu Jiabing, Zeng Rong, Li Wu hua, and Lin Lei. Imbalance mechanism and balanced control of capacitor voltage for a hybrid modular multilevel converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(7): 5686-5696.

[10] 李少华,王秀丽,李泰,等. 混合式 MMC 及其直流故障穿越策略优化[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1849-1858.

[11] Inoue S., Katosh S.. Modular multilevel converter with DC fault protection [P]. European patent application, June, 2013.

[12] W. Lin, D. Jovicic, S. Ngudefu, et al. Full-bridge MMC converter optimal design to HVDC operational requirements [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1342-1350.

[13] Y. Dong, J. Tang, H. Yang, W. Li, and X. He. Capacitor Voltage Balance Control of Hybrid Modular Multilevel Converters With Second Order Circulating Current Injection [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(1): 157-167.

[14] LI R, FLETCHER J E, WILLIAMS B W. Influence of third harmonic injection on modular multilevel converter-based high-voltage direct current transmission systems [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(11): 2764-2770.

[15] 陆锋,李钰,樊强,等. 混合 MMC 电容电压波动差异机理及抑制策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 92-109.
Lu Feng, Li Yu, Fan Qiang, et al. Hybrid MMC capacitor voltage fluctuation difference mechanism and suppression strategy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 92-109.

[16] 倪翰文,李庚,鲍刚,等. 基于能量平衡的模块化多电平变换器调制方法[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(7): 9-15, 24.
Ni Hanwen, Li Geng, Bao Gang, et al. A modulation method of modular multilevel converter based on energy balance [J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2022, 38(7): 9-15, 24.

作者简介:



李冠宏(1995—)男,硕士研究生,从事分布式电源并网技术及应用研究。Email: liguanhong789@163.com

路茂增(1988—)男,通信作者,博士,从事高压大容量柔性直流输电的控制与保护技术研究。

边敦新(1971—)男,副教授,博士,从事电力电子、新能源发电技术研究。

赵艳雷(1976—)男,教授,博士生导师,博士,从事电力电子、微电网运行于控制研究。

路梅雪(1996—)女,硕士研究生,从事同步磁阻电机控制研究。

收稿日期:2019-10-16;修回日期:2023-07-21
(王克祥 编发)