

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209189

基于高交流调制比的混合 MMC 配比约束方案设计*

刘雨佳¹ 何柏娜¹ 张秋瑞² 张婧茹¹ 贺兴民¹ 董彦辰¹

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院 淄博 255000; 2. 国网山东省电力公司东营供电公司 东营 257300)

摘要: 全桥子模块的负电平输出性能,可使混合型 MMC 系统交流调制比大于 1。基于高交流调制比的混合型 MMC 配比优化设计,可降低直流故障率,提升交流电网电压等级,扩展交直流电压运行区域,对柔性直流输电发展意义重大。因此,提出直流故障穿越与半桥子模块电容电压平衡约束的高交流调制比混合型 MMC 全桥比例设计方法;建立 ± 500 kV 双端混合型 MMC 系统模型,分析直流故障量暂态特性与半桥子模块电容电压波动规律,得到混合型 MMC 配比综合优化设计方案。结果表明,全桥占比应不小于 41%,随全桥比例增大,系统故障后电压恢复时间先减后增,故障自清除时间缩短,半桥子模块电容电压波动减小 8.15 kV,电容电压波动与交流调制比呈正相关变化;全桥比例为 75% 的 MMC 子模块故障处理能力强,综合性能最优。研究结果为 MMC 轻型化设计提供参考。

关键词: 柔性直流输电;模块化多电平换流器;混合型 MMC;调制比;配比设计

中图分类号: TM743 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.40

Design of hybrid MMC proportion constraint scheme based on high AC modulation ratio

Liu Yujia¹ He Baina¹ Zhang Qiurui² Zhang Jingru¹ He Xingmin¹ Dong Yanchen¹

(1. School of Electric and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. State Grid Dongying Power Supply Company, Dongying 257300, China)

Abstract: Because of the module's negative-level output performance of the full bridge, the hybrid MMC with an AC modulation ratio greater than 1 is satisfied. The optimal design of hybrid MMC ratio based on high AC modulation ratio, which can reduce the DC failure and increase the AC grid voltage level. The operating area of DC voltage is extended. It is of great significance to the development of flexible HVDC transmission. Therefore, a full-bridge proportional constraint considering DC fault ride-through and half-bridge sub-module capacitor-voltage balance based on the high AC modulation ratio was proposed. The transient characteristics of DC faults and the voltage fluctuations of half-bridge sub-module capacitors were analyzed in ± 500 kV double-ended hybrid MMC system model. The comprehensive optimization design scheme of the mixed MMC ratio was obtained. The results show that the proportion of the full bridge should not be less than 41%. The system voltage recovery time is first reduced and then increased after the fault. The fault self-clearing time is shortened, and the half-bridge sub-module capacitor voltage fluctuation is reduced by 8.15 kV. The capacitor voltage fluctuation is positively correlated with the AC modulation ratio. The module fault handling capability and overall performance of MMC with a full bridge ratio of 75% is better. The research results provide a reference for the lightweight design of MMC.

Keywords: flexible DC transmission; modular multilevel converter; hybrid MMC; modulation ratio; proportioning design

0 引 言

柔性直流输电可满足绿色可再生能源的利用与消纳,具有大容量、远距离输电的技术优势,符合“双碳”目标下中国能源互联网战略的发展需求,近年来受到广泛关注^[1-4]。

基于半桥子模块(half bridge sub-module, HBSM)与全桥子模块(full bridge sub-module, FBSM)的混合型模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC),兼具负电平输出、直流故障自清除能力及运行经济性^[5-7],逐步应用于风电并网、城市供电、异步联网等输配电场合^[8-11],发展

收稿日期:2022-03-07

* 基金项目:山东省自然科学基金(ZR2021ME057)、山东省研究生教育质量问题提升计划项目(SDYKC19103)资助

前景广阔。

日前针对混合型 MMC 的设计研究,主要从子模块拓扑结构改进、满足故障穿越能力的配比优化等方面展开。文献[12]提出子模块高利用率的桥臂复用型 MMC 拓扑,利用复用桥臂降低子模块投入数量,通过 NLM 与分段 PWM 调制策略,保障桥臂能量均衡;文献[13]推导出有效隔离直流双极短路故障的全桥子模块比例临界计算公式,降低全桥电容故障隔离电压,推进混合型 MMC 轻型化设计。但上述研究均未考虑高交流调制比运行环境对混合型 MMC 的影响。全桥子模块的负电平输出能力,可使系统在交流调制比大于 1 的工况下运行^[14-15]。文献[16]提出高调制比大于 1 时,混合型 MMC 全桥子模块比例设计方案,但适用于低压城轨直流牵引系统。此外,提高系统交流调制比,可在恶劣气候、子模块故障等需降直流电压运行时,满足交流电压不变的需求,降低直流故障率^[17];或保证直流电压不变,提高交流侧输出电压,提升柔直系统运行灵活性,为接入更高电压等级输电网提供保障^[18-19]。故研究基于高交流调制比的混合型 MMC 设计方法,可较大程度改变交直流电压变换关系,对保障系统稳定安全运行至关重要。

因此,本文基于高交流调制比的混合型 MMC,提出交流调制比区间的计算方法与全桥比例设计方案。基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建 ±500 kV 双端半桥-全桥混合型 MMC 模型,并对直流故障自清除、故障量馈入路径阻断与半桥子模块电容电压稳定性约束条件进行验证。模拟柔直系统直流双极短路故障,分析全桥比例 45%~95% 下,MMC 子模块故障穿越能力与半桥模块电容电压波动;结合系统交流调制变量,研究混合型 MMC 半桥子模块电容电压变化规律,提出混合型 MMC 子模块优化配置方案。

1 混合型 MMC 高交流调制比运行分析

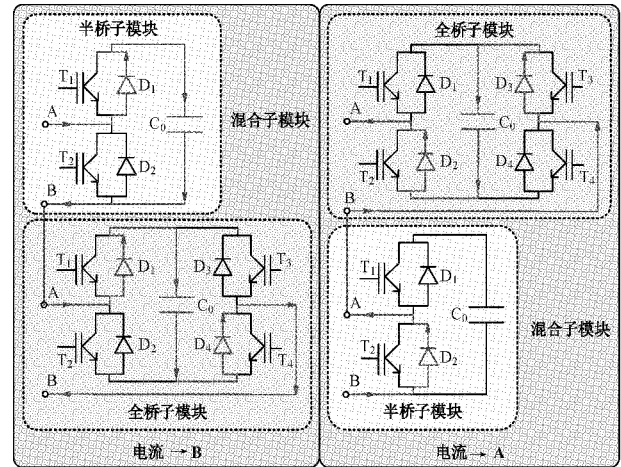
混合型 MMC 子模块拓扑结构及闭锁等效电路如图 1 所示。MMC 换流器为三相六桥臂对称分布,单相桥臂内半桥、全桥数量不同。图 1 中,M、N 分别为半桥、全桥子模块数量, L_m 为桥臂电感。

由图 1(a)可知,电流从 A 到 B 端口时,半桥、全桥子模块电容共同提供反向电动势,输出为 $2U_c$; 电流从 B 到 A 端口时,半桥子模块输出为 0,无法对外输出反向电动势阻断子模块故障电流,端口电压为 $-U_c$,由全桥子模块提供。

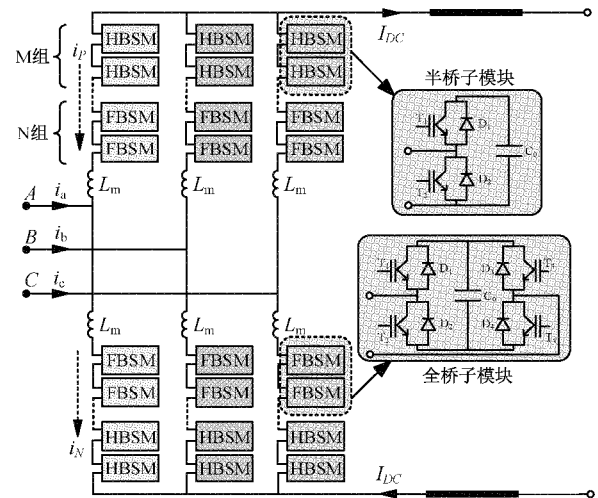
由于全桥子模块的负电平输出特性,混合型 MMC 具备高交流电压调制比配置能力,交流电压调制比如式(1)所示。

$$m_{AC} = \frac{2U_m}{U_{DC}} \quad (1)$$

其中, U_m 为交流相电压幅值, U_{DC} 为直流电压。设交流相电流峰值为 I_m ,交流侧功率因数角为 φ ,以图 1(b)所示的直流电流 I_{DC} 为参考方向,MMC 单相上下桥臂电流如



(a) 半桥、全桥及混合子模块闭锁等效电路



(b) 混合型 MMC 子模块拓扑

图 1 混合型 MMC 结构图

式(2)所示。

$$\begin{cases} i_p = -\frac{1}{3}I_{DC} - \frac{1}{2}I_m \sin(\omega t + \varphi) \\ i_n = -\frac{1}{3}I_{DC} + \frac{1}{2}I_m \sin(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知,MMC 桥臂电流中直流分量 I_{DC} 占主导。当 $m_{AC} > 1$ 时,提高 MMC 交流电压可减小桥臂电流交流分量,降低桥臂电流容量^[20],开关器件峰值电流减少,开关损耗降低。

当 m_{AC} 增大时,直流分量持续增加,桥臂电流单极性变化,半桥子模块处于充电或放电的单一状态,模块电容电压失稳,如图 2 所示。故在全桥配比设计时需考虑 m_{AC} 上限值。

由图 2 可知,为保障桥臂电流双极性,需满足最大桥臂电流为正,即:

$$-\frac{1}{3}I_{DC} + \frac{1}{2}I_m \sin(\omega t + \varphi) > 0 \quad (3)$$

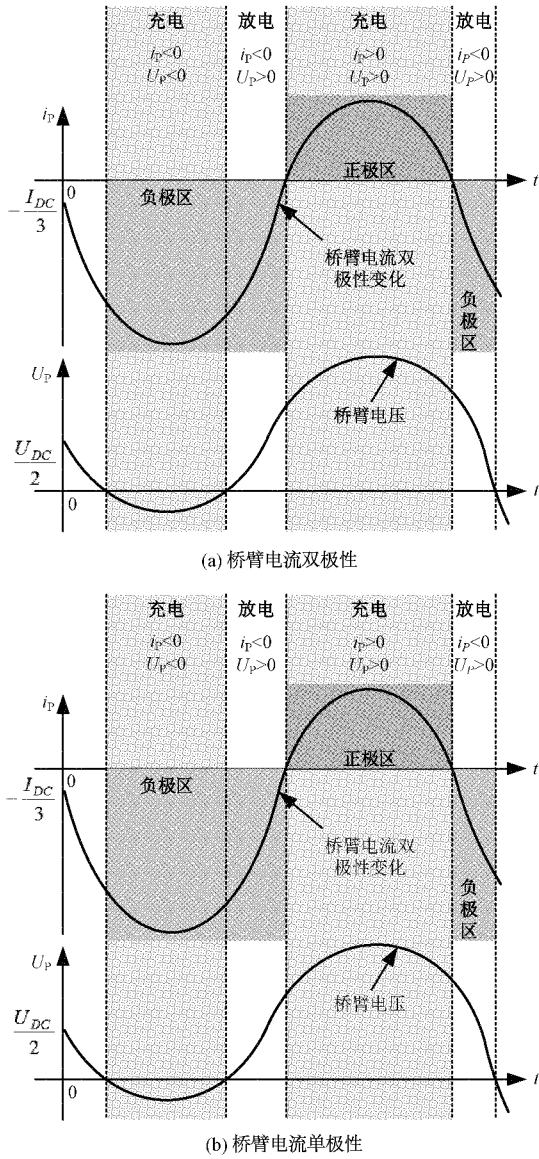


图 2 子模块桥臂电流电压波形图

由功率守恒定律,交直流两侧功率相等推得:

$$\frac{3}{2}U_m I_m \cos\varphi = U_{DC} I_{DC} \quad (4)$$

将式(1)代入,得 I_{DC} 与 I_m 关于 m_{AC} 的关系式如式(5)所示。

$$I_{DC} = \frac{3m_{AC}}{4} I_m \cos\varphi \quad (5)$$

综合式(3)~(5)得高调制比运行下 m_{AC} 应满足式(6)所示取值范围。

$$1 < m_{AC} < \frac{2}{\cos\varphi} \quad (6)$$

由于半桥子模块无法输出负电平,全桥子模块负电平运行工况下,需进一步考虑半桥子模块电容电压平衡。此外,直流故障自清除能力是混合型 MMC 设计的必要因素。故有必要对混合型 MMC 全桥配比的约束条件深入探讨。

2 混合型 MMC 全桥子模块配比设计

2.1 故障电流自清除约束条件

故障闭锁时 MMC 自主清除直流侧故障需阻断 MMC 子模块交流馈入通路^[20, 21]。以 A 相电流为例,交流侧馈入 MMC 路径如图 3 所示。

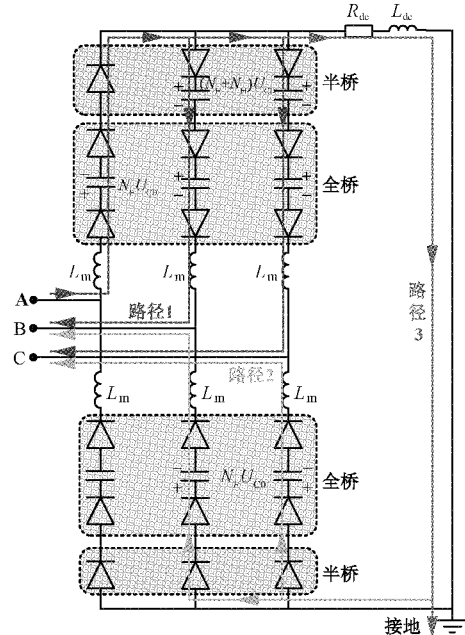


图 3 交流侧馈入电流通路图

由图 3 可知,当路径 1 和路径 2 流经子模块的反向电动势不小于交流线电压幅值时,混合型 MMC 可有效阻断交流电气量馈入,混合子模块交流阻断条件如式(7)所示。

$$\begin{cases} (2N_F + N_H)U_{C0} \geq \sqrt{3}U_m, \text{路径 1} \\ 2N_H U_{C0} \geq \sqrt{3}U_m, \text{路径 2} \end{cases} \quad (7)$$

其中, U_{C0} 为子模块额定电容电压; U_m 为交流相电压幅值。定义 P_F 为每相桥臂混合子模块全桥比例系数, P_F 取值范围如式(8)所示。

$$\frac{\sqrt{3}}{4}m_{AC} \leq P_F = \frac{N_F}{N_{all}} \leq 1 \quad (8)$$

由式(8)可求出满足故障电流自清除约束条件下的混合型 MMC 全桥子模块比例。

2.2 子模块电容电压约束条件

故障闭锁后,半桥子模块电平为正或 0,桥臂电流方向决定子模块电容充放电状态,混合型 MMC 充电路径如图 4 所示。

由图 4 可知,为保障模块电容电压平衡,当桥臂电流方向不变时,需切除半桥子模块,由全桥子模块提供桥臂电压。混合 MMC 阀侧三相交流电压及上下桥臂电压表达式如式(9)、(10)所示。

$$U_{AC} = U_m \left(\cos\omega t \pm \frac{2}{3}n\pi \right), n = -1, 0, 1 \quad (9)$$

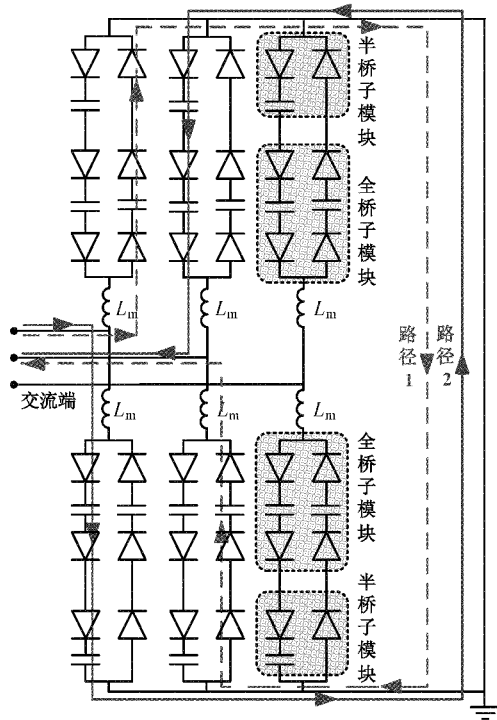


图 4 混合 MMC 充电路径图

$$\begin{cases} U_p = \frac{U_{DC}}{2} - U_{AC} \\ U_n = \frac{U_{DC}}{2} + U_{AC} \end{cases} \quad (10)$$

将式(1)、(9)代入式(10)得桥臂电压与交直流调制比关系式为:

$$\begin{cases} U_p = \frac{1}{2} (m_{DC} - m_{AC} \cos \omega t) N_{all} U_{C0} \\ U_n = \frac{1}{2} (m_{DC} + m_{AC} \cos \omega t) N_{all} U_{C0} \end{cases} \quad (11)$$

其中, m_{DC} 为直流调制比, 桥臂电压取值范围如式(12)所示。

$$\begin{cases} -N_F U_{C0} \leq U_p \leq N_F U_{C0} \\ -N_F U_{C0} \leq U_n \leq N_F U_{C0} \end{cases} \quad (12)$$

此外, 为保证单周期内桥臂电流方向改变, 交直流电压调制比需满足如式(13)所示的条件。

$$\frac{m_{DC}}{m_{AC}} > \frac{1}{2} |\cos \varphi| \quad (13)$$

将式(12)、(13)代入式(11), 得到半桥子模块电容电压平衡约束下全桥比例系数 P_F 取值区间, 如式(14)所示。

$$P_F \in \left[\frac{1}{2} (m_{AC} + |m_{DC}|), +\infty \right] \cap [0, 1] \quad (14)$$

此外, 还需考虑全桥子模块故障时提供的反向电动势应满足二极管关断条件, 全桥子模块数量应满足:

$$N_F U_{cell} > \frac{\sqrt{6}}{3} U_{AC} \quad (15)$$

其中, U_{cell} 为单个子模块输出电压; U_{AC} 为交流线电压, 全桥比例系数 P_F 取值区间如式(16)所示。

$$\frac{\sqrt{6}}{3} U_{AC} < P_F \leq 1 \quad (16)$$

综合分析式(8)、(14)、(16)得全桥子模块配比区间, 如式(17)所示。

$$P_F \in \left[\frac{\sqrt{3}}{4} m_{AC}, 1 \right] \cup \left[\frac{1}{2} (m_{AC} + |m_{DC}|), 1 \right] \cup \left[\frac{\sqrt{6}}{3} U_{AC}, 1 \right] \quad (17)$$

2.3 全桥子模块配比设计方案

设混合型 MMC 系统容量为 S 、直流电压为 U_{DC} 、交流侧功率因数为 $\cos \varphi$, 直流故障自清除约束与子模块容压平衡约束下, 用于全桥子模块输出的高调制比混合型 MMC 设计流程如图 5 所示。

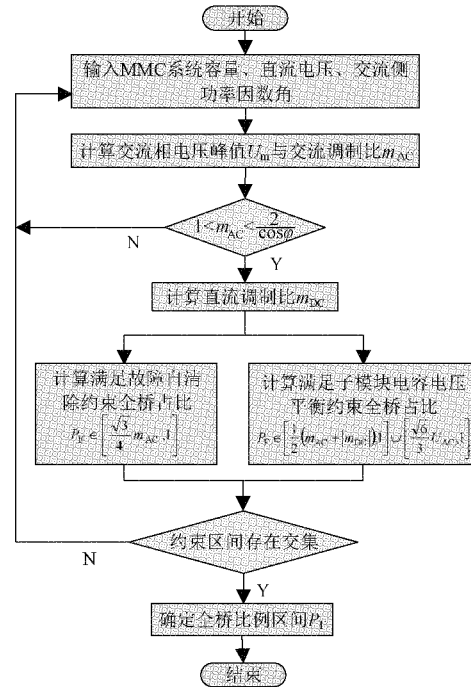


图 5 全桥子模块配比设计流程图

具体设计流程如下:

1) 确定混合型 MMC-HVDC 系统容量 S 、直流电压等级 U_{DC} 、交流侧功率因数角 φ , 由式(18)、(19)得桥臂电流峰值 I_{rmax} 、桥臂电流交流分量峰值 I_m 。

$$I_{rmax} > \frac{(1 + \cos \varphi)}{3 \cos \varphi} \cdot \frac{S}{U_{DC}} \quad (18)$$

$$I_m = 2I_{rmax} - \frac{2S}{3U_{DC}} \quad (19)$$

由功率守恒定律得交流相电压幅值 U_m , 如式(20)所示, 由式(1)计算交流调制比 m_{AC} 。

$$U_m = \frac{2S}{3I_m \cos \varphi} \quad (20)$$

2) 判断 m_{AC} 是否满足约束区间 $[1, \frac{2}{\cos \varphi}]$, 若不满足

区间要求,则重新选取系统参数。

3) 由式(21)计算系统直流调制比 m_{DC} 。

$$m_{DC} = \frac{U_{dc}}{U_{DC}} \quad (21)$$

其中, U_{dc} 为系统直流侧输出电压。

4) 由式(17)计算直流故障自清除与半桥子模块电容电压平衡约束条件下全桥子模块占比,判断是否存在交集。

5) 得到高交流调制比下混合型 MMC 全桥子模块配比区间。

3 仿真验证

3.1 算例分析

基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建 ±500 kV 双端半桥-全桥混合型 MMC-HVDC 系统模型,如图 6 所示。

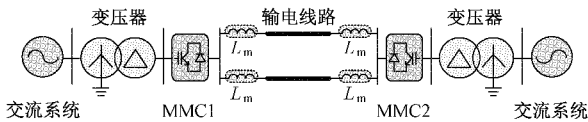


图 6 MMC-HVDC 系统模型

图 6 中, L_m 为平波电抗器,MMC1 采用定直流电压、定无功控制,MMC2 采用定有功、定无功控制,模型参数如表 1 所示,具体设计过程如下:

1) 计算得桥臂电流峰值 $I_{mmax} > 1\ 333.3\ A$,桥臂电流交流分量峰值 $I_m = 1\ 481.48\ A$,交流相电压幅值 $U_m = 454.67\ kV$,交流调制比 $m_{AC} = 1.82$;

2) m_{AC} 约束区间为 $[1, 2.22]$,算例 m_{AC} 满足约束条件;

3) 系统直流侧输出电压 U_{dc} 与额定直流电压 U_{DC} 相等时,取直流调制比 $m_{DC} = 1$;

4) 计算得直流故障自清除与半桥子模块电容电压平衡约束条件下,全桥子模块占比交集区间为 $[0.41, 1]$;

设计得高交流调制比运行状态下,混合型 MMC 全桥子模块配比应不小于 41%。

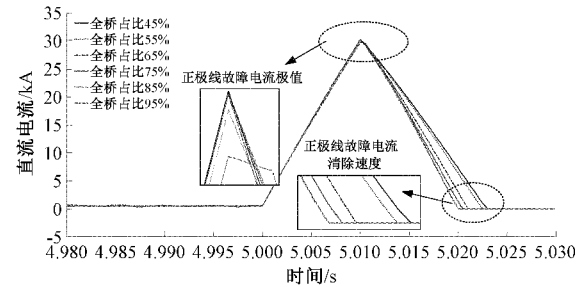
表 1 MMC-HVDC 系统模型参数

模型参数	数值
直流电压 U_{DC}/kV	±500
交流电压/kV	230
系统容量 S/MVA	1 000
交流侧功率因数 $\cos\varphi$	0.9
子模块电容/mF	30
平波电抗器/mH	150

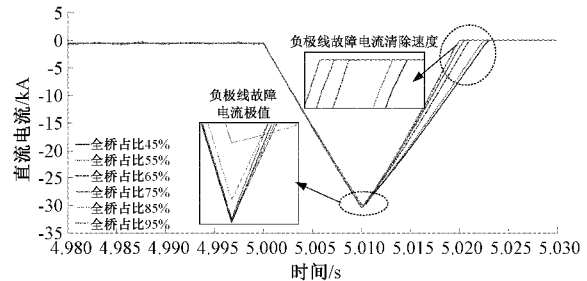
3.2 直流故障仿真分析

模拟 MMC1 出口端 $t = 5\ s$ 时发生双极短路故障,10 ms 后换流站闭锁,故障持续时间 0.1 s。仿真分析全桥子模块占比为 45%、55%、65%、75%、85%、95% 下,

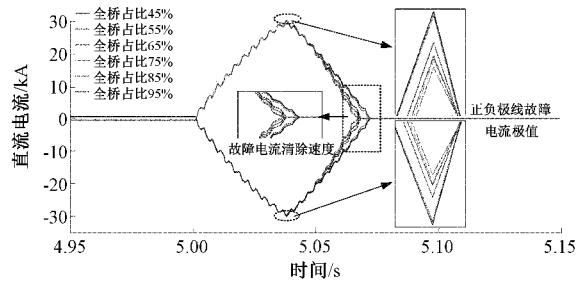
MMC1、MMC2 端直流电压、直流电流故障特性,结果如图 7、表 2 所示。



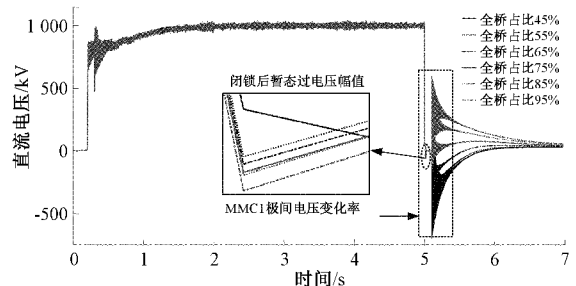
(a) MMC1 出口端正极线电流



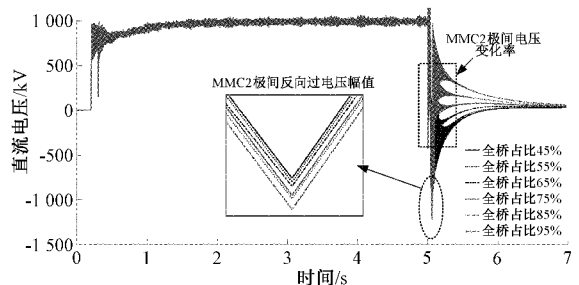
(b) MMC1 出口端负极线电流



(c) MMC2 出口端极线电流



(d) MMC1 端极间电压



(e) MMC2 端极间电压

图 7 直流故障仿真波形

表 2 不同全桥子模块比例系数故障仿真数据对比

全桥占比/ %	MMC1 故障 电流极值/kA	MMC2 故障 电流极值/kA	MMC1 故障电流 清除时间/ms	MMC2 故障电流 清除时间/ms	MMC1 闭锁后暂态 过电压极值/kV	MMC2 极间反向 过电压极值/kV
45	±30.308	±30.095	13.0	32.5	-32.31	-1 119.4
55	±30.278	±30.087	12.5	31.8	-38.67	-1 141.1
65	±30.270	±30.025	11.0	28.3	-40.05	-1 168.9
75	±30.253	±29.991	10.5	27.1	-43.27	-1 198.0
85	±30.155	±29.989	10.0	27.0	-45.67	-1 209.7
95	±30.050	±29.971	10.0	26.7	-53.99	-1 218.2

图 7、表 2 所示仿真结果表明,MMC-HVDC 系统发生双极短路故障时,双端 MMC 出口处直流线路出现严重过压过流。换流站闭锁后,混合型 MMC 直流侧电流逐渐衰减至 0,全桥子模块占比影响过压过流幅值及故障电流清除速度。

由图 7(a)、(b)可知,故障发生后,MMC1 出口端极线电流骤增,5.01 s 换流站闭锁后逐渐下降。由表 2 可知,当全桥占比由 45% 增大至 95% 时,直流双极线故障电流幅值由 30.308 kA 降低至 30.050 kA,正负极线故障电流清除时间由 13.0 ms 缩短至 10.0 ms,故障电流清除速度提升。

由图 7(c)、表 2 可知,因输电线路故障能量损耗与故障波传递时延,与 MMC1 相比,MMC2 出口端过电流幅值降低约 0.3 kA,故障电流衰减至 0 的时间滞后约 16~19 ms。随全桥比例增大,故障电流幅值仍呈减小趋势,故障电流自清除时间由 32.5 ms 缩短至 26.7 ms。

因桥臂正向导通电流与故障反射波产生的突变电压双重作用,换流站闭锁后线路仍存在暂态过电压。由图 7(d)、(e)可知,随全桥占比增加,MMC1 暂态过电压幅值、MMC2 极间反向过电压上升。此外,故障后极间电压变化率先减后增,全桥比例为 75% 时,恢复稳态时间最短,约为故障后 0.2 s。MMC1 与 MMC2 极间电压的变化规律基本一致,但 MMC1 极间电压受平波电抗器抑制明显,波动范围小于 MMC2。

综上,随全桥子模块占比增加,MMC 双端过电流幅值减小,故障电流自清除时间缩短,故障后极间电压变化率先减后增。系统具备故障穿越能力,仿真结果进一步验证了设计方案中直流故障自清除的约束条件。

3.3 子模块电容电压仿真分析

为进一步研究全桥占比对半桥子模块电容电压影响,仿真分析系统运行稳态与故障暂态时,全桥比例 45%~95% 的混合型 MMC 半桥子模块电容电压波形。假设 $t=5$ s 时发生双极短路故障,10 ms 后换流站闭锁,故障持续时间 0.1 s,仿真结果如图 8、表 3 所示。

由图 8(a)、(b)及表 3 可知,半桥子模块电容电压呈周期性稳态波动,满足设计方案中的电容电压平衡约束条件,方案可行性得到验证。混合型 MMC 稳态运行时,与全桥比例 45% 相比,全桥比例 95% 时单周期内电容电压波动

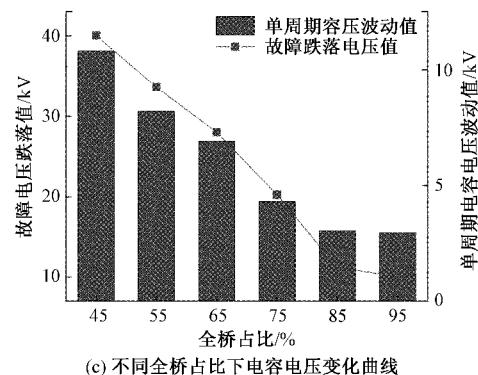
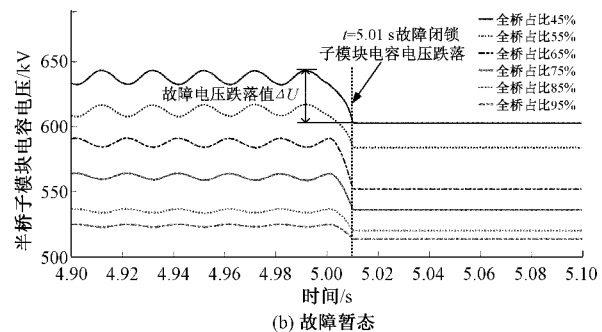
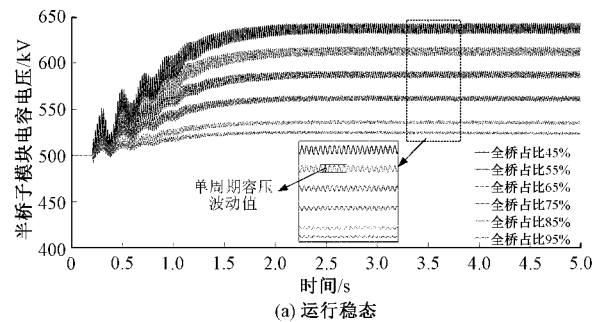


图 8 不同全桥占比下半桥子模块电容电压仿真波形

减小 8.15 kV,波动范围随全桥占比增加而减少。 $t=5.01$ s 故障闭锁后,半桥子模块电容电压出现故障跌落,全桥比例 45% 时,模块电容电压跌落现象最严重,跌幅为 40.60 kV,故障跌落电压 ΔU 与全桥比例系数呈负相关变化。

由图 8(c)可知,随全桥子模块比例系数增大,半桥子模块单周期电容电压波动值、故障跌落电压值递减,全桥

表 3 不同全桥占比下半桥容压仿真数据对比

全桥占比/%	单周期容压极大值/kV	单周期容压极小值/kV	单周期容压波动值/kV	故障跌落电压值 $\Delta U/kV$
45	642.15	631.34	10.81	40.60
55	617.50	609.29	8.21	39.63
65	591.19	584.27	6.92	33.03
75	563.61	559.31	4.30	20.25
85	537.63	534.58	3.05	11.19
95	525.67	523.01	2.66	10.09

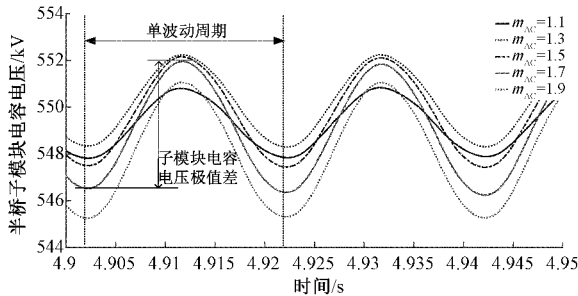
注:表中单周期数据为同一时间段内测量

比例大于 75% 时,衰减程度明显降低,全桥占比对半桥子模块电容电压影响减小。

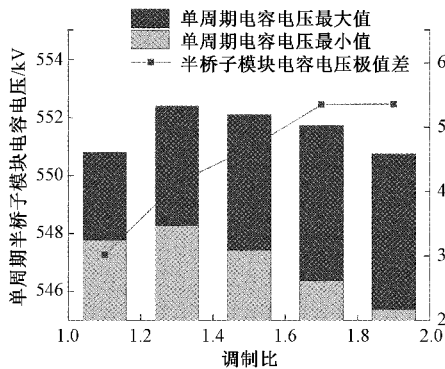
综上,全桥比例系数增加可有效抑制半桥子模块单周期电容电压波动与故障电压跌落,子模块电容稳定性提高。全桥占比大于 75% 时,全桥子模块数量对电容电压稳定性的影响减弱。

3.4 交流调制比影响分析

高交流调制比下,桥臂电流长期处于负极性状态,影响半桥子模块投切时间与模块电容电压。由 3.2 节、3.3 节分析可知,全桥子模块占比为 75% 时,全桥数量对混合型 MMC 故障穿越能力、电容电压平衡影响减弱。故选取全桥比例为 75%、交流调制比 m_{AC} 为 1.1~1.9,半桥子模块电容电压单周期变化,仿真结果如图 9、表 4 所示。



(a) 半桥子模块电容电压波形线



(b) 不同交流调制比下电容电压变化曲

图 9 不同交流调制下半桥子模块电容电压仿真波形

表 4 不同调制比下半桥容压仿真数据对比

交流调制比 m_{AC}	单周期容压最大值/kV	单周期容压最小值/kV	单周期电容电压波动值/kV
1.1	550.80	547.78	3.02
1.3	552.40	548.27	4.13
1.5	552.10	547.43	4.76
1.7	551.73	546.38	5.35
1.9	550.75	545.39	5.36

由图 9、表 4 可知,高交流调制比下,半桥子模块电容电压呈周期性波动,波动周期与 m_{AC} 无关,单周期内电压最大值随 m_{AC} 先增后减。 $m_{AC}=1.1$ 时,电容电压极值差为 3.02 kV,波动范围最小,随 m_{AC} 增加,半桥子模块电容电压波动值增大。与 $m_{AC}=1.1$ 相比, $m_{AC}=1.9$ 时单周期内电容电压波动增加 2.34 kV,当 $m_{AC}>1.7$ 时,交流调制比对电容电压影响降低。

综上,全桥子模块数量一定时,半桥子模块电容电压波动与交流调制比呈正相关变化。交流调制比与全桥比例系数共同影响半桥子模块电容电压波动,混合型 MMC 设计需兼顾直流故障自清除、半桥子模块容压波动抑制等综合性能,满足半桥-全桥配比优化需求。

4 结 论

本文基于混合型 MMC 研究了高交流电压调制比下,全桥比例系数对直流双极短路故障特性、半桥模块电容电压稳定性的影响,提出混合型 MMC 全桥子模块配比约束设计方法,通过 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建 ± 500 kV 双端半桥-全桥混合型 MMC 模型,验证了设计方案的可行性,结论如下:

考虑直流故障穿越、子模块电容电压平衡双重约束的混合型 MMC 全桥子模块比例不小于 41%。随全桥子模块占比增大,双端 MMC 故障后电压恢复时间先减后增;故障电流自清除时间缩短,MMC1 端由 13.0 ms 缩短至 10 ms,MMC2 端由 36.5 ms 缩短至 26.7 ms;故障电流得到抑制,MMC1 端抑制效果显著,幅值减小约 0.3 kA。全桥占比 75%~85% 时,混合型 MMC 故障处理能力较强。

随全桥占比增大,稳态运行时半桥子模块单周期内电容电压波动降低 8.15 kV,直流双极短路故障时电容电压跌落减少 40.60 kV,模块电容电压稳定性显著提高。全桥占比大于 75% 时,全桥比例对电容电压稳定性影响逐渐降低。

半桥子模块单周期内电容电压波动与交流调制比呈正相关变化,全桥比例为 75% 的 MMC 兼具故障处理能力 & 运行经济可靠性,综合性能最优,可保障系统稳定运行。

参考文献

[1] XIE Y, HE B, WANG L, et al. Characteristics of

- secondary arc current on UHVDC and EHV AC transmission lines erected on the same tower [J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2019, 20(5): 1-14.
- [2] 孙功伟, 周克楠, 马喆非, 等. 考虑柔性负荷的智能电网调度策略研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(3): 40-46.
- [3] 刘辉, 李永康, 张森, 等. 基于 GWO-TCN 网络的 HVDC 输电线路故障诊断[J]. 电子测量技术, 2021, 44(22): 168-174.
- [4] 徐耀松, 唐维, 徐才宝, 等. 基于 S 变换和 PSO-GRNN 的柔性直流输电线路故障测距方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(6): 9-17.
- [5] 尹太元, 王跃, 段国朝, 等. 基于零自流电压控制的混合型 MMC-HVDC 直流短路故障穿越策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 1): 343-351.
- [6] XIANG W, LIN W, XU L, et al. Enhanced independent pole control of hybrid MMC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(2): 861-872.
- [7] 陈铮, 陈武, 刘忠, 等. 具有直流故障阻断能力的电流主动转移型 MMC[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 106-114.
- [8] ZHANG J, HE B, JIANG R, et al. Adaptive restart scheme based on active injection current ratio for half-bridge MMC-HVDC with overhead transmission lines [J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2021, 22(3): 353-367.
- [9] 卢自宝, 龚莉, 赵传超, 等. 直流微电网中 DC-DC 变换器的切换控制方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(8): 202-209.
- [10] ZHANG J, HE B, HE X, et al. Research on fault clearing scheme for half-bridge modular multilevel converters high voltage DC based on overhead transmission lines[J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2021, 22(1): 61-72.
- [11] 王琛, 陶建业, 王毅, 等. 具备故障电流对称清除能力的双向开关钳位式全桥子模块[J]. 电网技术, 2021, 45(7): 2596-2604.
- [12] 王琛, 陶建业, 王毅, 等. 桥臂复用型模块化多电平换流器的拓扑及控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3373-3385.
- [13] 邓帅荣, 周念成, 王月月, 等. 基于混合型 MMC 全桥子模块比例的直流侧故障隔离电压研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3250-3257.
- [14] 周月宾, 宋强, 张楠, 等. MMC 线性调制区扩大方法及其对桥臂功率波动影响的统一分析模型[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4451-4461.
- [15] SONG Q, YANG W, ZHAO B, et al. Energy storage requirement reduction using negative-voltage states of a full-bridge modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5243-5255.
- [16] 陆锋, 李钰, 许建中, 等. 混合型 MMC 降低子模块电容电压波动的优化策略[J]. 电力建设, 2019, 40(4): 110-118.
- [17] 席嫣娜, 李笑彤, 李子明, 等. 用于城轨直流牵引系统的混合型 MMC 全桥子模块比例设计方法[J]. 中国电力, 2022, 55(4): 54-62.
- [18] 林艺哲, 林磊, 徐晨. 稳态负电平输出下的混合型 MMC 设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4202-4211.
- [19] HU J, XIANG M, LIN L, et al. Improved design and control of FBSM MMC with boosted AC voltage and reduced DC capacitance [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(3): 1919-1930.
- [20] XU Y, ZHANG Z, XU Z. Design and DC fault clearance of modified hybrid MMC with low proportion of full-bridge sub-modules [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15: 1-12.
- [21] 李俊松, 张英敏, 曾琦, 等. MMC-MTDC 系统单极接地故障电流计算方法[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 546-553.

作者简介

刘雨佳, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流输电技术及模块化多电平换流器设计与应用。

E-mail: 985514390@qq.com

何柏娜(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统暂态特性仿真及高电压绝缘技术、模块化多电平换流器。

E-mail: hbn770425@163.com

张秋瑞, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划与运行、模块化多电平换流器设计与应用。

E-mail: 550852001@qq.com

张婧茹, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性直流输电线路直流测故障特性。

E-mail: zhangjr_fx@163.com

贺兴民, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电及储能优化配置。

E-mail: 1459929594@qq.com

董彦辰, 硕士研究生, 主要研究方向为断路器瞬态恢复电压。

E-mail: 473093082@qq.com