

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.05.012

# MMC-LCC 混合直流输电系统分段下垂控制策略

马文忠<sup>1</sup>, 李文飞<sup>1</sup>, 王玉生<sup>2</sup>, 孟繁丞<sup>1</sup>, 刘星宇<sup>1</sup>, 孙路遥<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580;

2. 中国石油天然气股份有限公司规划总院, 北京 100083)

**摘要:**由模块化多电平换流器(modular multi-level converter, MMC)和电网换相换流器(line commutated converter, LCC)构成的混合直流输电系统中, LCC换相失败严重影响系统的安全稳定运行。文中首先分析 MMC-LCC 混合直流输电系统换相失败时的电流特性以及交直流电压特性。其次, 考虑调制比对半桥型 MMC 的影响, 采用 MMC 电压改善控制策略拓展电压调制比的可行域。然后, 提出 MMC 电压分段控制策略, 根据交流电压跌落程度的不同, 分别设计直流电压参考值的调节方法, 优化混合直流输电系统电压控制逻辑, 实现 MMC 电压在正常运行与故障情况下的有效切换。最后, 在 MATLAB/Simulink 中搭建 MMC-LCC 混合直流输电系统模型, 对交流电压不同跌落程度进行仿真, 结果表明所提控制策略能在实现故障穿越的同时提高直流电压控制精度, 增强系统稳定性。

**关键词:**模块化多电平换流器(MMC); 电网换相换流器(LCC); 混合直流输电系统; 换相失败; MMC 电压改善控制; MMC 电压分段控制

中图分类号: TM721

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)05-0100-08

## 0 引言

基于电网换相换流器(line commutated converter, LCC)的高压直流输电技术具有电压等级高、制造成本低等优势。但受其运行机理影响, LCC 不具备自换相能力, 无法实现黑启动, 换相过程受交流系统影响极大<sup>[1-4]</sup>。而基于模块化多电平换流器(modular multi-level converter, MMC)的柔性直流输电技术可以实现有功、无功独立调节, 可全穿越交流系统故障<sup>[5-8]</sup>。根据电网的不同需求, 将 LCC 与 MMC 进行合理组合构成混合直流输电系统, 可以充分发挥高压直流输电的经济优势以及柔性直流输电的技术优势<sup>[9]</sup>, 具有良好的工程应用前景。

文中以整流侧采用 MMC、逆变侧采用 LCC 的 MMC-LCC 混合直流输电系统为研究对象。MMC 可提供无功和电压支持, 解决了 LCC 连接风电场应附加换相电压的问题, 适用于海上风电外送场景<sup>[10-11]</sup>。但 LCC 所连交流系统发生短路故障时, 易导致 LCC 发生换相失败, 输电系统可能无法实现故障穿越。

针对混合直流输电系统的交流故障穿越已有较多研究。文献[12]提出在逆变侧交流电压发生跌落后, 立即降低 MMC 运行电压至系统允许的最低电压, 该方法虽能及时有效地避免换相失败故障, 但缺乏电压调节精度。文献[13]通过主动限流控制抑制换相失败, 当检测到故障电流后改变子模

块投切方式, 降低冲击电流的峰值及上升速率, 但此时 LCC 已发生换相失败, 致使系统产生冲击电流及功率波动。文献[14]认为混合直流输电系统中 MMC 采用半桥子模块时故障穿越能力有限, 采取全桥子模块可有效降低系统换相失败带来的危害, 但该方案增加了系统运行成本, 削弱了混合直流输电系统的经济性优势。文献[15-17]提出由 LCC、MMC 串联构成混联型结构, 文献[18]研究 MMC 与 LCC 连接同一交流馈线的情况, 提出由 MMC 向 LCC 提供无功功率支撑, 降低 LCC 换相失败的风险, 此类方案对受端结构要求较为苛刻, 不适用于所有 MMC-LCC 混合直流输电系统。

为保证 MMC-LCC 混合直流输电系统的经济性, 提高交流故障穿越时电压控制精度, 文中从协同控制角度出发, 在介绍 MMC-LCC 混合直流输电系统拓扑及控制策略的基础上, 剖析引起换相失败的因素并分析 LCC 发生换相失败时系统的电流特性, 设计 MMC 电压分段控制策略, 建立维持系统不发生换相失败时整流侧 MMC 电压和逆变侧交流电压跌落的关系, 采用 MMC 电压改善控制策略拓展 MMC 直流电压的调节范围, 用于应对 MMC 直流电压调节存在限度的问题。最后基于 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型, 验证所提控制策略的有效性。

## 1 MMC-LCC 混合直流输电系统

### 1.1 系统拓扑

MMC-LCC 混合直流输电系统拓扑如图 1 所示。

收稿日期: 2023-01-19; 修回日期: 2023-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52277208)

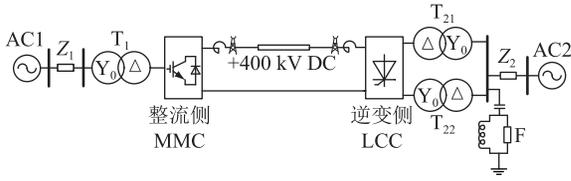


图1 MMC-LCC 混合直流输电系统

Fig.1 MMC-LCC hybrid direct current (DC) transmission system

MMC-LCC 混合直流输电系统采用双极接线方式,以正极为例进行说明,整流侧采用半桥型 MMC,逆变侧为十二脉动换流器。图 1 中,AC1、AC2 分别为送端、受端交流系统; $Z_1$ 、 $Z_2$  分别为送端、受端交流系统等值阻抗; $T_1$ 、 $T_{21}$ 、 $T_{22}$  为换流变压器; $F$  为交流滤波器。

## 1.2 控制框图

MMC 采用定直流电压和定无功功率控制,用于稳定系统直流电压,其控制框图如图 2 所示。图 2 中, $U_{dcr\_ref}$ 、 $Q_{ref}$  分别为有功外环和无功外环控制给定值; $U_{dcr}$ 、 $Q$  分别为整流侧直流电压、无功功率测量值; $I_{sd}$ 、 $I_{sd\_ref}$  分别为 MMC 阀侧电流  $d$  轴分量的实际值和参考值; $I_{sq}$ 、 $I_{sq\_ref}$  分别为 MMC 阀侧电流  $q$  轴分量的实际值和参考值; $U_{sd}$ 、 $U_{sq}$  分别为 MMC 阀侧电压  $d$  轴、 $q$  轴分量; $U_{d\_ref}$ 、 $U_{q\_ref}$  分别为所生成三相调制波的  $d$  轴、 $q$  轴分量;PI (proportional integral) 为比例积分控制; $\omega$  为电网交流电的角频率; $L_0$  为 MMC 桥臂电感。

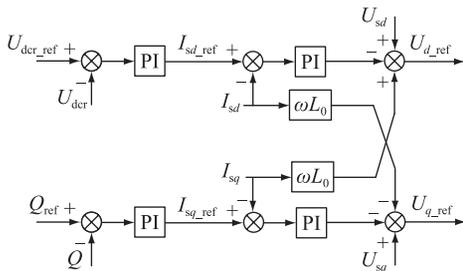


图2 MMC 控制框图

Fig.2 Control block diagram of MMC

LCC 由 2 个六脉动换流器串联组成的十二脉动换流阀构成,采用定直流电流、后备  $\gamma$  角控制,并辅助电流偏差控制 (current error control, CEC) 和低压限流环节 (voltage dependent current order limiter, VDCOL),其控制框图如图 3 所示。图 3 中, $I_{dc}$ 、 $\gamma$  分别为直流电流、关断角测量值; $I_{dc\_ref}$ 、 $\gamma_{ref}$  分别为直流电流、关断角给定值, $I_{dc\_ref}$  可通过 VDCOL 进行修正; $-\Delta U_{dc}$  为直流电压变化量。定直流电流控制与后备  $\gamma$  角控制的输出经比较选取最小值后与  $\pi$  作差可得到触发角指令  $\alpha_{inv}$ ,CEC 能够实现定直流电流控制

与后备  $\gamma$  角控制的平滑切换<sup>[2]</sup>。

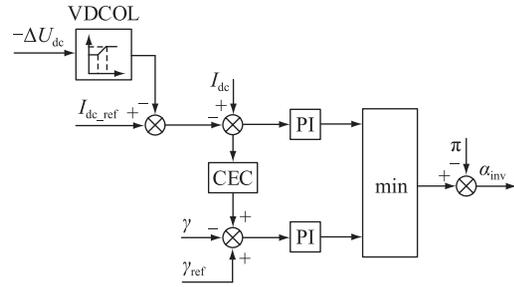


图3 LCC 控制框图

Fig.3 Control block diagram of LCC

## 2 换相失败故障下混合直流输电系统特性分析

### 2.1 电流特性分析

LCC 正常运行时,须满足  $\gamma$  小于最小关断角  $\gamma_{min}$ , $\gamma$  表达式为:

$$\gamma = \arccos(\sqrt{2}KI_{dc}X/U + \cos\beta) \quad (1)$$

式中: $K$  为换流器变比; $X$  为 LCC 换相电抗; $U$  为交流电压幅值; $\beta$  为 LCC 逆变角。

由式(1)可知,交流侧电压下降是造成换相失败的主要原因<sup>[19]</sup>。当 LCC 发生换相失败时,LCC 上下桥臂直通,导致 MMC 发生短路故障, $I_{dc}$  激增,这主要是由 MMC 侧子模块电容放电造成的<sup>[13]</sup>。MMC 放电简化示意如图 4 所示。

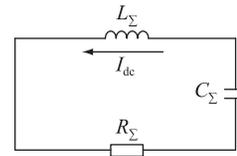


图4 MMC 放电简化示意 (a 相)

Fig.4 Simplified schematic diagram of MMC discharge (phase a)

图 4 中, $L_\Sigma$ 、 $C_\Sigma$ 、 $R_\Sigma$  计算方法为:

$$\begin{cases} L_\Sigma = 2L_0 \\ C_\Sigma = \frac{C_0}{N} \\ R_\Sigma = 2R_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $C_0$  为 MMC 子模块电容; $N$  为 MMC 每一相的子模块个数; $R_0$  为 MMC 桥臂电阻。

此时系统等效为二阶电路零输入响应,可求得此时  $I_{dc}$  为:

$$I_{dc} = 3 \sqrt{\frac{C_\Sigma}{L_\Sigma} U_{dc0}^2 + I_{dc0}^2} \quad (3)$$

式中: $U_{dc0}$ 、 $I_{dc0}$  分别为系统稳定时的直流电压和直流电流。

## 2.2 交直流电压特性分析

以混合直流输电系统正极为例,逆变侧 LCC 输出直流电压  $U_{\text{dci}}$  为:

$$U_{\text{dci}} = 2 \left( \frac{3\sqrt{2}U_{\text{aci}}}{\pi} \cos \beta + I_{\text{dc}} R_i \right) \quad (4)$$

式中:  $U_{\text{aci}}$  为逆变侧交流线电压有效值;  $R_i$  为 LCC 等效换相电阻, 如式(5)所示。

$$R_i = \frac{3\omega L_i}{\pi} \quad (5)$$

式中:  $L_i$  为 LCC 等效换相电感。

整流侧 MMC 的输出直流电压  $U_{\text{dcr}}$  为:

$$U_{\text{dcr}} = \frac{2\sqrt{2}E_r}{\sqrt{3}m} \quad (6)$$

式中:  $E_r$  为整流侧交流线电压有效值;  $m$  为调制比, 其最大取值为 1, 一般取 0.85<sup>[20]</sup>。

受调制比影响, 整流侧 MMC 的输出直流电压可下调范围  $\Delta U_{\text{dcr}}$  为:

$$\Delta U_{\text{dcr}} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \left( \frac{1-m}{m} \right) E_r \quad (7)$$

混合直流输电系统 UI 特性曲线表达式为:

$$I_{\text{dc}} R_{\text{dc}} = U_{\text{dcr}} - U_{\text{dci}} \quad (8)$$

式中:  $R_{\text{dc}}$  为混合直流输电系统线路电阻。

将式(4)代入式(8)可得:

$$I_{\text{dc}} R_{\text{dc}} = U_{\text{dcr}} - 2 \left( \frac{3\sqrt{2}U_{\text{aci}}}{\pi} \cos \beta + I_{\text{dc}} R_i \right) \quad (9)$$

将式(3)代入式(9)可得:

$$3 \sqrt{\frac{C_{\Sigma}}{L_{\Sigma}}} U_{\text{dc0}}^2 + I_{\text{dc0}}^2 \times (R_{\text{dc}} - R_i) = U_{\text{dcr}} - \frac{6\sqrt{2}U_{\text{aci}}}{\pi} \cos \beta \quad (10)$$

实际工程中  $I_{\text{dc0}}$  数值远小于  $U_{\text{dc0}}$  数值, 故可将式(10)简化为:

$$\frac{U_{\text{dcr}} - 3U_{\text{dc0}} \sqrt{C_{\Sigma}/L_{\Sigma}} (R_{\text{dc}} - R_i)}{U_{\text{aci}}} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} \cos \beta \quad (11)$$

由式(11)可知, 在 LCC 逆变角  $\beta$  不变的情况下, 整流侧 MMC 的输出直流电压  $U_{\text{dcr}}$  与逆变侧 LCC 交流线电压正相关。因此, 可在逆变侧 LCC 交流母线电压跌落时调节整流侧 MMC 的输出直流电压, 从而实现逆变角的调整。但在传统控制中整流侧 MMC 采取定电压控制,  $U_{\text{dcr}}$  稳定不变, 当逆变侧 LCC 交流电压跌落时, 根据 LCC 工作原理, 逆变侧 LCC 输出直流电压  $U_{\text{dci}}$  将下降。结合式(8)可知, 这将导致  $I_{\text{dc}}$  升高, 致使关断角  $\gamma$  降低, 造成连续换相失败。对于此类短路特性故障, 工程中多采用直接跳开交

流侧断路器阻止系统故障进一步发展<sup>[21]</sup>, 但半桥型 MMC 重启过程较为复杂且无法阻断电容放电, 电气设备极易受到损伤。因此, 亟需一种新型控制策略应对此类故障。

## 3 交流故障下 MMC 调压控制策略

### 3.1 MMC 电压改善控制策略

根据上述分析, 可通过调节整流侧 MMC 的输出直流电压实现系统交流故障穿越。但由式(7)可知, 整流侧直流电压变化范围受调制比  $m$  限制。例如, 当调制比  $m$  取 0.85 时, 整流侧 MMC 的输出直流电压降为 0.9 p.u.;  $m$  升至 0.95 时, 基本无电压调节裕度<sup>[22]</sup>。文献[23]提出采用三次谐波注入(third harmonic voltage injection, THVI)调制和无功功率动态调整(reactive power dynamic adjustment, RPDA)扩大 MMC 直流电压下降范围, 有效实现交流故障穿越。

调制波注入三次谐波后, MMC 最大调制比  $m_{\text{max}}$  可取 1.15<sup>[20]</sup>。RPDA 可通过 MMC 无功外环控制降低交流电压来实现, 但降低交流电压会危害交流系统正常运行, 因此该控制仅在 MMC 调制比达到最大且交流故障尚未消除时使用, 用于保证电源不被切除。

基于上述 2 种方法构建 MMC 电压改善控制策略, 其控制框图如图 5 所示。图 5 中,  $U_{\text{acr\_ref}}$ 、 $U_{\text{acr}}$ 、 $U_{\text{abc\_ref}}$  分别为整流侧 MMC 交流电压的给定值、测量值及三相调制波。

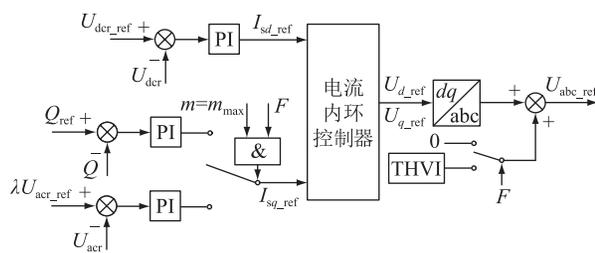


图 5 MMC 电压改善控制策略

Fig.5 Enhanced control strategy of MMC voltage

三次谐波若过早注入, MMC 存在过调制风险, 考虑到 THVI 会增大桥臂电流峰值, 提高开关器件电流容量要求, 故不宜过早注入三次谐波。逆变侧发生交流故障后, 根据 3.2 节所提 MMC 电压分段控制策略, 当 MMC 调制比  $m$  取 0.85 且直流电压给定值  $U_{\text{dc\_ref}} = 0.9$  p.u. 时,  $m$  则升至 0.95, 故基本已无电压调节裕度, 此时注入三次谐波增大调制比  $m$ , 有利于 MMC 侧电压进一步下降, 记  $U_{\text{dc\_ref}} < 0.9$  p.u. 为信号  $F$ 。在此基础上, 当调制比  $m = m_{\text{max}}$  时, 启动无功

功率动态调整策略,修改 MMC 无功环为定交流电压控制。交流电压给定值为交流电压额定值乘以一个小于 1 的系数  $\lambda$ ,  $\lambda$  为交流电压强度系数,与交流侧系统强度有关,文中  $\lambda$  取 0.95。

结合式(6)可知,系统最小运行电压为  $U_{\text{der,min}} = (2\sqrt{2} \times 0.95E_r) / (\sqrt{3} \times 1.15) = 1.35E_r$ , 即 MMC 的输出直流电压可下降至  $m$  取 0.85 时额定直流电压的 0.7 倍。

### 3.2 MMC 电压分段控制策略

将逆变侧 LCC 交流线电压有效值  $U_{\text{aci}}$  跌落信号作为合理调节整流侧 MMC 输出直流电压  $U_{\text{der}}$  的依据,并采取下垂控制方式,有利于提高系统故障穿越能力。文中将此方法称为 MMC 电压分段控制策略,其控制原理如图 6 所示。图 6 中,  $U_{\text{dcn}}$ 、 $U_{\text{acn}}$  分别为整流侧直流电压与逆变侧交流电压的额定值;  $U^*$ 、 $U_{\text{tv}}$ 、 $U_{\text{acm}}$  分别为不同阶段下 MMC 电压分段控制的交流电压阈值,三者对应图 6 中对应的直流电压分别为  $U_{\text{dcn}}$ 、 $U_{\text{vd}}$ 、 $U_{\text{dem}}$ 。

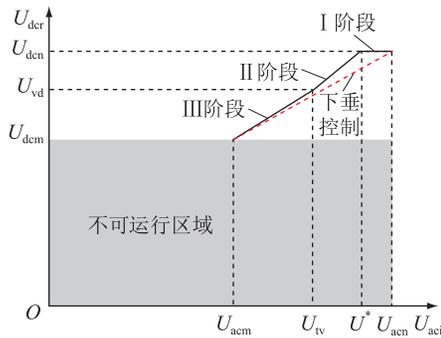


图 6 MMC 电压分段控制原理

Fig.6 Principle of segmented control of MMC voltage

在 I 阶段 ( $U^* \leq U_{\text{aci}} \leq U_{\text{acn}}$ ), 逆变侧交流电压的下降不会对系统稳定造成影响,为避免系统电压扰动对控制产生不必要的影响,在此阶段 MMC 直流电压保持不变。在实际工程中,交流电压可运行的波动范围为 5%<sup>[24]</sup>,故  $U^*$  选为 0.95 p.u.。

在 II 阶段 ( $U_{\text{tv}} \leq U_{\text{aci}} < U^*$ ), 根据式(4)可知,逆变侧交流电压的下降将导致逆变侧逆变角  $\beta$  降低。而逆变角  $\beta$  裕度不足是造成后续换相失败的主要原因<sup>[25-27]</sup>。受触发角限制,并综合考虑 CEC 环节,直流电压  $U_{\text{vd}}$  为 CEC 与 VDCOL 环节的临界电压,即 VDCOL 触发电压。

在 III 阶段 ( $U_{\text{acm}} \leq U_{\text{aci}} < U_{\text{tv}}$ ), 逆变侧交流电压降幅较大,逆变侧直流电压下降将触发 VDCOL 环节对直流电流进行限制以维持关断角  $\gamma$  大小,此时须同比例降低整流侧直流电压。记采取 MMC 电压改善控制后 MMC 最小运行电压为  $U_{\text{dcn}}$ ,  $U_{\text{acm}}$  为与之对

应的交流电压阈值。

综上所述,与传统下垂控制(图 6 中红色虚线)不同,文中所提 MMC 电压分段控制在不同阶段的下垂系数  $k$  取值不同,具体表示为:

$$\begin{cases} k = 0 & U^* \leq U_{\text{aci}} \leq U_{\text{acn}} \\ k = k_1 = \frac{U_{\text{dcn}} - U_{\text{vd}}}{U^* - U_{\text{tv}}} & U_{\text{tv}} \leq U_{\text{aci}} < U^* \\ k = k_2 = \frac{U_{\text{vd}} - U_{\text{dem}}}{U_{\text{tv}} - U_{\text{acm}}} & U_{\text{acm}} \leq U_{\text{aci}} < U_{\text{tv}} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $k_1$ 、 $k_2$  分别为图 6 中 II、III 阶段下垂系数。

结合图 6 与式(12)分析可得,MMC 电压分段控制框图如图 7 所示。 $\Delta U_{\text{des}}$  为 MMC 电压分段控制输出量;  $U_{\text{dc,ref1}}$  为经  $\Delta U_{\text{des}}$  修订后 MMC 直流电压参考值。

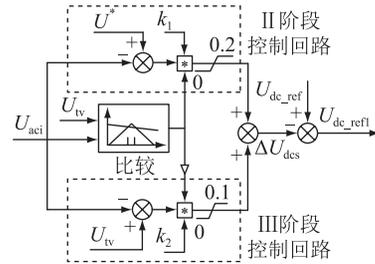


图 7 MMC 电压分段控制框图

Fig.7 Control block diagram of segmented control of MMC voltage

当  $U_{\text{aci}} \leq U^* \leq U_{\text{acn}}$  时,系统正常运行,此时 MMC 电压分段控制的输出为 0。当  $U_{\text{aci}}$  下降至  $U_{\text{tv}} \leq U_{\text{aci}} < U^*$  时,比较环节输出为 1, II 阶段控制回路投入运行即输出一个正值, III 阶段控制回路输出为 0,两者相加后在  $U_{\text{dc,ref}}$  的基础上减去一个正值,此时直流电压参考值  $U_{\text{dc,ref1}}$  减小。同理,当  $U_{\text{aci}}$  继续下降至  $U_{\text{acm}} < U_{\text{aci}} < U_{\text{tv}}$  时,比较环节输出 0, III 阶段控制回路投入运行并输出一个正值,直流电压参考值  $U_{\text{dc,ref1}}$  将继续减小。

## 4 仿真实验

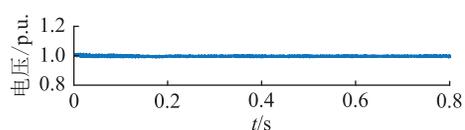
为了验证所提控制策略的有效性,在 MATLAB/Simulink 中搭建如图 1 所示的仿真模型,系统参数如表 1 所示。

### 4.1 系统启动

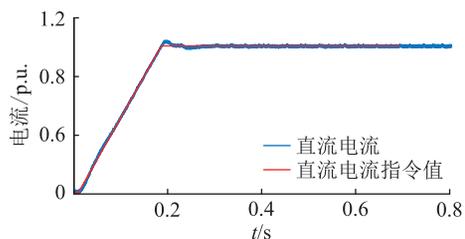
MMC-LCC 混合直流输电系统启动时,首先应由 MMC 建立系统直流电压,随后 LCC 定直流电流解锁,通过移动触发角  $\alpha$  控制直流电流,实现系统功率传输。设仿真开始前 MMC 已充电,系统直流电压稳定在额定值 400 kV,直流电流随触发角  $\alpha$  移动逐渐增至额定值 2.5 kA,系统逐渐进入稳态,仿真结果如图 8 所示。

表 1 系统参数  
Table 1 System parameters

参数	数值
额定直流电压/kV	400(1 p.u.)
额定直流电流/kA	2.5(1 p.u.)
MMC 桥臂子模块数量	100
MMC 桥臂电感 $L_0$ /mH	5
MMC 子模块电容 $C_0$ /μF	15 000
MMC 子模块初始电压/kV	4
额定有功功率/MW	1 000(1 p.u.)
逆变侧额定交流电压/kV	169(1 p.u.)
整流侧额定交流电压/kV	210



(a) 直流电压



(b) 直流电流

图 8 混合直流输电系统启动仿真

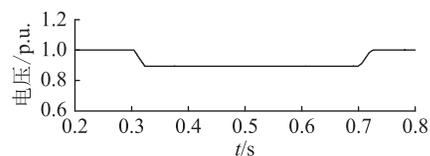
Fig.8 Start-up simulation of hybrid DC transmission system

图 8(a) 为直流电压波形,图 8(b) 为直流电流及其指令值波形。系统启动过程中直流电压能够保持稳定,直流电流亦能很好地跟随指令值,可认为 MMC 采用的定直流电压控制及 LCC 采用的定直流电流控制策略有效。

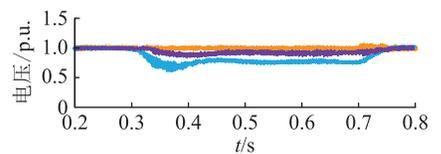
#### 4.2 LCC 交流侧发生轻微故障

首先验证所提 MMC 电压分段控制在 LCC 交流侧发生轻微故障时的性能。设置 LCC 交流侧在 0.3 s 时发生三相对称短路故障,LCC 交流电压由 1 p.u. 下降至 0.85 p.u.,0.7 s 时故障恢复。控制方式 1: MMC 仅采取双闭环控制,不进行额外控制。控制方式 2:采用文献[12]所提控制策略,在检测到交流故障后,通过 VDCOL 直接将 MMC 直流电压限制为 0.7 p.u.。控制方式 3:采用文中所提 MMC 电压分段控制策略。仿真结果如图 9 所示。图 9(a) 为 LCC 交流电压幅值,当其低于 0.95 p.u.时,MMC 电压分段控制投入运行。当交流电压跌落至 0.85 p.u.时,II 阶段控制回路输出一个正值,III 阶段控制回路输出为 0,此时 MMC 直流电压下降,直流电压如图 9(b) 所示。图 9(c) 为直流电流波形,图 9(d) 为

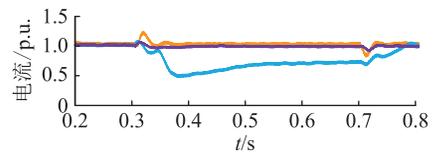
注入交流系统的有功功率。



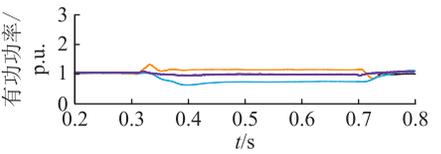
(a) LCC 交流电压



(b) 直流电压



(c) 直流电流



(d) 注入交流系统的有功功率

图 9 LCC 交流电压跌落较小时的仿真

Fig.9 Simulation when alternating current (AC) voltage drop of LCC is small

LCC 交流电压发生轻微跌落,混合直流输电系统中直流电压由 MMC 控制,由于 MMC 中包含大量电容,具有极强的定直流电压能力<sup>[15]</sup>。当采用控制方式 1 时,系统直流电压保持稳定,但由于 LCC 交流电压跌落,导致电流升高,LCC 首先通过关断角调节直流电流,在直流电流超过关断角调节能力后,LCC 将采取定关断角控制<sup>[28]</sup>,最终导致功率上升。考虑到此时 LCC 交流电压发生跌落,故逆变侧将产生盈余功率,不利于系统稳定<sup>[29]</sup>。通过控制方式 2、3 均可有效解决功率盈余问题,但控制方式 2 与控制方式 3 相比控制精度较差,系统直流电压、电流下降较多,导致功率传输受限。综上所述,MMC 电压分段控制策略的性能较控制方式 1、2 更优。

#### 4.3 LCC 交流侧发生严重故障

为测试所提 MMC 电压分段控制在 LCC 交流侧发生严重故障时的性能,设置 LCC 交流侧在 0.3 s 时发生严重三相对称短路故障,LCC 交流电压由 1 p.u. 下降至 0.65 p.u.,0.8 s 时故障恢复。控制方式 1: MMC 仅采取双闭环控制,不进行额外控制。控制方式 2:采用文献[13]所提基于主动限流的换相失败抑制策略,当判断 LCC 发生换相失败故障后,令

MMC 输出直流分量为 0, 随后降低系统直流电流指令值, 当电流稳定后令 MMC 进入低压运行模式。控制方式 3: 采用文中所提 MMC 电压分段控制策略。仿真结果见图 10。图 10(a) 为 LCC 交流电压幅值, 当其跌落至 0.65 p.u. 时, II 阶段控制回路输出一个正值, III 阶段控制回路亦输出一个正值, 此时 MMC 直流电压下降, 直流电压如图 10(b) 所示。图 10(c) 为直流电流波形, 图 10(d) 为注入交流系统的有功功率波形, 图 10(e) 为 LCC 关断角  $\gamma$  波形。

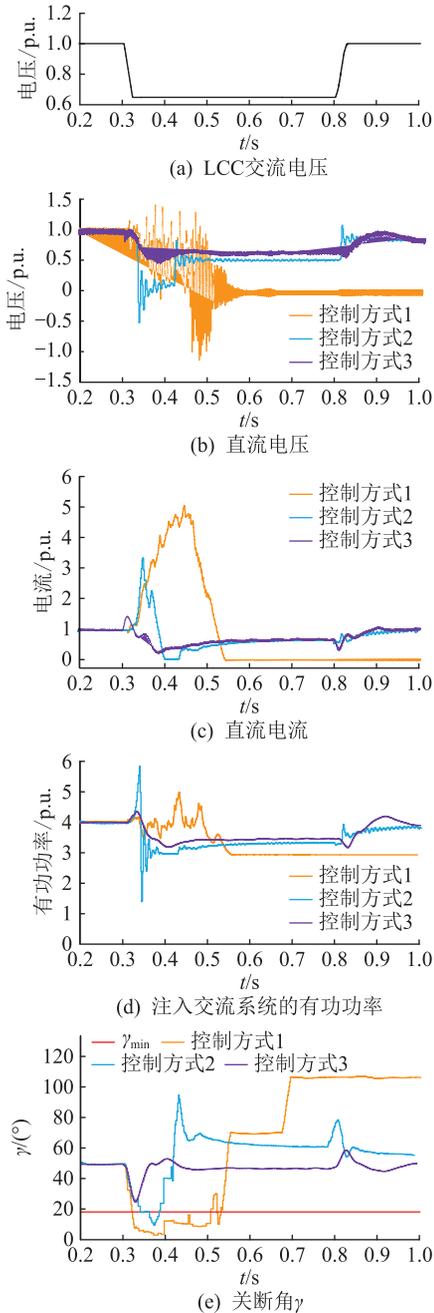


图 10 LCC 交流电压跌落较大时的仿真

Fig.10 Simulation when AC voltage drop of LCC is large

LCC 交流电压发生严重跌落, 当采用控制方式 1 时, LCC 将发生换相失败, 受 MMC 定直流电压能

力影响, 直流电压在发生故障最初的时间内仍维持稳定, 相当于直流系统发生了极间短路, 同时未能及时触发 LCC 侧 VDCOL 环节, 系统将出现严重过电流, 最终导致系统停运。MMC 采用控制方式 2、3 均可有效避免系统停运。但由图 10(e) 可知, 控制方式 2 是在系统发生换相失败故障后投入控制, 抑制换相失败恢复过程中直流电流的增加, 并使 MMC 进入低压运行状态, 防止 LCC 发生连续换相失败。而采用控制方式 3 可有效避免发生首次换相失败, 避免系统产生较大的冲击电流。由图 10(d) 可知, 采用控制方式 3 时, 注入受端交流系统的有功功率最多, 保障了系统的供电可靠性。上述分析表明, 在 LCC 交流侧发生严重故障时, 采取 MMC 电压分段控制策略有利于维持系统稳定。

## 5 结论

针对 MMC-LCC 混合直流输电系统中 LCC 换相失败问题, 文中提出一种根据受端交流电压调节送端直流电压的故障穿越控制技术。

(1) 通过理论分析与计算, 推导送端直流电压与受端交流电压的交直流电压特性, 可在逆变侧交流母线电压发生跌落时调节整流侧直流电压, 进而实现逆变角调整。

(2) 提出 MMC 电压改善控制策略, 明确 THVI 调制和 RPDA 控制策略运行条件, 提出 MMC 电压分段控制策略。根据逆变侧交流电压跌落程度的不同对整流侧直流电压进行分段调节, 能够有效抑制 LCC 的换相失败故障, 并对逆变侧交流电压跌落后的直流过电流问题起到一定改善作用。

### 参考文献:

- [1] 朱佳敏. LCC-HVDC 系统中换流变压器差动保护的研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2022.  
ZHU Jiamin. Research on differential protection of converter transformer in LCC-HVDC system [D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2022.
- [2] 杨硕, 郭春义, 张加卿, 等. LCC-HVDC 系统整流-逆变交互振荡模式稳定变化特征及机理研究 [J/OL]. 中国电机工程学报: 1-11 [2023-01-05]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEV12pW9UrhTDCd-PD65djwFi6aRxPXe-HhCV2AqNU709I8cIgl-kkuAs023KoL7X-NtPtRH9q&uniplatform=NZKPT>.  
YANG Shuo, GUO Chunyi, ZHANG Jiaqing, et al. Study on characteristics and mechanism of the stability moving trend of rectifier-inverter interactive oscillation mode for LCC-HVDC System [J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-11 [2023-01-05]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEV12pW9UrhTDCd-PD65djwFi6aRxPXe-HhCV2AqNU709I8cIgl-kkuAs023KoL7X-NtPtRH9q&uniplatform=NZKPT>.

- ZKPT.
- [3] 谢爵昊. HVDC 控制系统动态性能影响因素分析与换相失败抑制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2021.  
XIE Juehao. Analysis of factors affecting dynamic performance of HVDC transmission control system and research on mitigation strategy of commutation failure[D]. Beijing:North China Electric Power University,2021.
- [4] XU R, SONG G, HOU J, et al. Adaptive restarting method of LCC-HVDC based on principle of fault location by current injection[J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(6): 554-563.
- [5] YANG S Z, XIANG W, WEN J Y. An improved DC line fault detection scheme using zone partition for MTDC wind power integration systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(2): 1109-1119.
- [6] 束洪春, 邵宗学, 江耀曦, 等. 具备闭锁和非闭锁模式抑制直流故障电流的新型模块化多电平变流器拓扑[J]. 电工技术学报, 2022, 37(21): 5526-5540.  
SHU Hongchun, SHAO Zongxue, JIANG Yaoyi, et al. A new modular multilevel converter topology with capability of DC faults clearing under blocking and non-blocking mode [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(21): 5526-5540.
- [7] HE J, CHEN K, LI M, et al. Active injection protection scheme for flexible HVDC grids based on amplitude of input impedance [J]. Global Energy Interconnection, 2021, 4(6): 532-542.
- [8] 朱鹏飞. 柔性直流输电系统直流故障抑制及穿越技术研究[D]. 南京:东南大学,2021.  
ZHU Pengfei. Research on DC fault suppression and fault ride-through technology of flexible HVDC transmission system[D]. Nanjing:Southeast University, 2021.
- [9] 刘泽洪, 王绍武, 种芝艺, 等. 适用于混合级联特高压直流输电系统的可控自恢复消能装置[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(2): 514-524.  
LIU Zehong, WANG Shaowu, CHONG Zhiyi, et al. Controllable and adaptive energy absorption device for hybrid cascaded UHVDC transmission system [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 514-524.
- [10] 赵成勇, 刘文静, 郭春义, 等. 一种适用于风电场送出的混合型高压直流输电系统拓扑[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 146-151.  
ZHAO Chengyong, LIU Wenjing, GUO Chunyi, et al. Topology of a hybrid HVDC transmission system for wind power grid connection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 146-151.
- [11] 李春华, 蒋碧松, 周勤勇, 等. 一种适用于风电外送的直流输电控制策略及无功投切方法[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3280-3285.  
LI Chunhua, JIANG Bisong, ZHOU Qinyong, et al. HVDC control strategy and reactive power switching method for wind power delivery [J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3280-3285.
- [12] 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.
- [13] 马文忠, 李肇远, 张奎同, 等. 基于主动限流的混合直流输电换相失败抑制策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 29-36.  
MA Wenzhong, LI Zhaoyuan, ZHANG Kuitong, et al. Commutation failure suppression strategy of hybrid DC transmission based on active current limiting[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 29-36.
- [14] LU X J, XIANG W, LIN W X, et al. Comparative study of small-signal stability under weak AC system integration for different VSCs [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(4): 4482-4499.
- [15] 连攀杰, 刘文焯, 李霞, 等. 混联直流输电系统送端三相短路故障分析及优化控制[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3877-3884.  
LIAN Panjie, LIU Wenzhuo, LI Xia, et al. Analysis and optimal control of three-phase short circuit faults at sending end of hybrid-HVDC [J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3877-3884.
- [16] 董芷函, 王国腾, 徐政, 等. 白鹤滩—江苏特高压混合级联直流系统运行特性分析方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(6): 118-125.  
DONG Zhihan, WANG Guoteng, XU Zheng, et al. Operation characteristic analysis method of Baihetan-Jiangsu hybrid cascaded UHVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 118-125.
- [17] 曾蕊, 李保宏, 江琴, 等. 级联型混合直流输电系统的自适应下垂控制策略研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 60-66.  
ZENG Rui, LI Baohong, JIANG Qin, et al. Adaptive droop control strategy of cascaded hybrid HVDC system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 60-66.
- [18] 李竹青. 混合双馈入直流系统中换相失败影响分析与抑制策略[D]. 北京:华北电力大学,2022.  
LI Zhuqing. Influence analysis and suppression strategy of commutation failure in hybrid dual-infeed HVDC system [D]. Beijing:North China Electric Power University, 2022.
- [19] 刘席洋, 王增平, 郑博文, 等. LCC-HVDC 故障恢复型连续换相失败机理分析与抑制措施[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3163-3172.  
LIU Xiyang, WANG Zengping, ZHENG Bowen, et al. Mechanism analysis and mitigation measures for continuous commutation failure during the restoration of LCC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3163-3172.
- [20] 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.

- [21] LI X D, XU Z, ZHANG Z R. Enhanced ride-through capability under rectifier-side AC fault for series LCC-MMC hybrid HVDC system[J]. IEEE Access, 2021, 9: 153050-153057.
- [22] 孟沛或, 向往, 迟永宁, 等. 一种适用于大规模新能源远距离外送的分层混联输电系统[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(10): 3349-3363, 3661.  
MENG Peiyu, XIANG Wang, CHI Yongning, et al. A hierarchical LCC-MMC hybrid transmission system for transmitting large-scale renewable power over long-distance[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3349-3363, 3661.
- [23] LI X D, XU Z, ZHANG Z R. Enhanced ride-through capability under rectifier-side AC fault for series LCC-MMC hybrid HVDC system[J]. IEEE Access, 2021, 9: 153050-153057.
- [24] 同向前, 伍文俊, 任碧莹. 电压源换流器在电力系统中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.  
TONG Xiangqian, WU Wenjun, REN Biying. Application of voltage source converter in power system[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [25] 周泓宇, 姚伟, 李程昊, 等. 一种可降低首次换相失败风险的预测型低压限流控制[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3179-3189.  
ZHOU Hongyu, YAO Wei, LI Chenghao, et al. A predictive voltage dependent current order limiter with the ability to reduce the risk of first commutation failure of HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3179-3189.
- [26] 韩平平, 童青洋, 杨为, 等. UHVDC 系统换相失败故障过程分析及运行参数影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(18): 25-34.  
HAN Pingping, TONG Qingyang, YANG Wei, et al. Analysis of the commutation failure process and a study on the influence of operation parameters on a UHVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 25-34.
- [27] 江叶峰, 鲍颜红, 张金龙, 等. 应对直流连续换相失败的动态无功备用评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 173-180.  
JIANG Yefeng, BAO Yanhong, ZHANG Jinlong, et al. Dynamic reactive power reserve evaluation for DC continuous commutation failure[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 173-180.
- [28] 喻建瑜, 范栋琛, 徐凯, 等. 混合级联多端直流系统的分阶段协调故障穿越策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(6): 69-75.  
YU Jianyu, FAN Dongchen, XU Kai, et al. Staged coordinated fault ride-through strategy for hybrid cascaded multi-terminal DC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 69-75.
- [29] 毛炽祖, 娄伟涛, 李清, 等. 混合多馈入直流输电系统交流故障下 VSC 暂态调压控制策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2905-2913.  
MAO Chizu, LOU Weitao, LI Qing, et al. VSC transient voltage regulation control strategy under AC faults in hybrid multi-infeed DC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2905-2913.

#### 作者简介:



马文忠

马文忠(1968), 男, 博士, 教授, 研究方向为柔性直流输电与能源互联网等(E-mail: mawenzhong@126.com);

李文飞(1999), 男, 硕士在读, 研究方向为混合直流输电(E-mail: 1615917926@qq.com);

王玉生(1975), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力和能源战略研究工作。

## Segmented droop control strategy of MMC-LCC hybrid DC transmission system

MA Wenzhong<sup>1</sup>, LI Wenfei<sup>1</sup>, WANG Yusheng<sup>2</sup>, MENG Fancheng<sup>1</sup>, LIU Xingyu<sup>1</sup>, SUN Luyao<sup>1</sup>

(1. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. PetroChina Planning and Engineering Institute, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In the hybrid direct current (DC) transmission system composed of modular multi-level converter (MMC) and line commutated converter (LCC), the commutation failure of LCC seriously affects the security and stability of the system. Firstly, the current characteristics and alternating current (AC)/DC voltage characteristics of MMC-LCC hybrid DC transmission system are analyzed when commutation failure occurs. Secondly, considering the influence of modulation ratio on half-bridge MMC, the feasible region of voltage modulation ratio is extended by using enhanced control strategy of MMC voltage. Then, the segmented control strategy of MMC voltage is proposed. According to the different degrees of AC voltage sag, the adjustment methods of DC voltage reference value are designed respectively, and the voltage control logic of hybrid HVDC transmission system is optimized to realize the effective switching of MMC voltage between normal operation and fault condition. Finally, the model of MMC-LCC hybrid DC transmission system is built in MATLAB/Simulink, and the simulation results show that the proposed control strategy can improve the DC voltage control accuracy and system stability while achieving fault ride through.

**Keywords:** modular multi-level converter (MMC); line commutated converter (LCC); hybrid direct current (DC) transmission system; commutation failure; enhanced control of MMC voltage; segmented control of MMC voltage

(编辑 吴楠)