

DOI: 10.7667/PSPC171006

LCC-MMC 混合直流输电系统整流侧故障穿越控制策略

蔡宜君, 文明浩, 陈 玉, 史亚光, 秦 瑜

(强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 整流侧采用电网换相换流器(Line Commutated Converter, LCC), 逆变侧采用模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)构成的混合直流输电系统, 结合了 LCC、MMC 的优点; 同时, 当 MMC 为半桥子模块和全桥子模块各占 50%的混合型 MMC 时, 系统具有较强的交直流故障穿越能力。针对整流侧交流系统严重故障下半桥子模块和全桥子模块电容电压不平衡的问题, 提出一种改进的环流控制策略。改进的环流控制策略通过检测 MMC 的运行工况, 调整环流控制器的参考值, 从而使桥臂电流具有正负交替的特性。其次, 提出基于虚拟电阻和电流指令限值的故障暂态电流抑制策略, 能够抑制故障穿越期间交直流电流的振荡, 确保系统安全稳定运行。基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台, 搭建 LCC-MMC 混合直流输电系统, 仿真实验验证了所提控制方法的有效性。

关键词: 混合直流输电系统; 混合型模块化多电平换流器; 电容电压平衡; 环流; 故障穿越

Control strategy of LCC-MMC hybrid HVDC system under rectifier side fault

CAI Yijun, WEN Minghao, CHEN Yu, SHI Yaguang, QIN Yu

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The hybrid High Voltage Direct Current (HVDC) transmission system that the rectifier adopts Line Commutated Converter (LCC) and the inverter adopts Modular Multilevel Converter (MMC), combines the advantages of LCC and MMC. And when the MMC is composed of fifty percent Half Bridge Sub-Modules (HBSMs) and fifty Percent Full Bridge Sub-Modules (FBSMs), the system has a strong capability to deal with AC and DC faults. In view of the problem that the HBSMs' and FBSMs' capacitor voltages can not be balanced under the serious rectifier AC fault, an improved circulation control strategy is proposed. It can adjust the reference value of the circulation component by detecting the running condition of MMC so that the arm current has positive and negative segments in each cycle. Then, a control strategy based on virtual resistance and current reference limitation is proposed to suppress the oscillation of the system and ensure the system to run safely and stably during the fault ride-through period. Finally, a LCC-MMC hybrid HVDC transmission system is built in PSCAD/EMTDC and the simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900600) and National Natural Science Foundation of China (No. 51477061).

Key words: hybrid HVDC system; hybrid MMC; capacitor voltage balancing; circulating current; fault ride-through

0 引言

基于电网换相换流器的高压直流输电系统(Line Commutated Converter based High Voltage Direct Current, LCC-HVDC)输电容量大、造价低, 在解决我国电能供需不平衡等问题上起到了非常重要的作用^[1], 但其逆变侧换相失败的问题严重影响了电力系统的安全稳定运行^[2-3]。近年来, 基于模块

化多电平电压源型换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的柔性直流输电技术发展迅速^[4-6], 其等级已可达 ± 500 kV/3 000 MW、 ± 800 kV/5 000 MW, 但 MMC 所需器件较多, 成本高。而整流侧采用 LCC, 逆变侧采用 MMC 的混合直流输电技术结合了两者的优点, 成为国内外学者的研究热点^[7-10]。

对于 LCC-MMC 混合直流输电系统, 其整流侧远端故障引起交流电压跌落或 LCC 部分阀组退出时, 系统直流运行电压也应随之降低以保证有功功率的传输^[8-11]; 若故障后逆变侧 MMC 未能降低直流运行电压, 则 LCC 会因晶闸管的单相导电性而断

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0900600); 国家自然科学基金项目(51477061)

流,从而中断有功功率的传输,严重影响受端系统的稳定性。因此,逆变侧 MMC 的低直流电压运行能力表征了 LCC-MMC 混合直流输电系统在整流侧故障下的故障穿越能力,其较强的低直流电压运行能力是整流侧故障条件下系统实现故障穿越的前提。而基于半桥子模块(Half Bridge Sub-Module, HBSM)的半桥型 MMC 难以在直流电压大幅降低的状态下运行;同时,半桥型 MMC 不具有直流故障自清除的能力,当发生直流短路故障时,故障电流具有上升快、峰值大的特点,严重威胁换流阀的安全^[12]。基于全桥子模块(Full Bridge Sub-Module, FBSM)的全桥型 MMC 和基于 HBSM、FBSM 的混合型 MMC 则克服了半桥型 MMC 的不足。相比之下,全桥 MMC 所需器件较多,成本高,损耗大;而混合型 MMC 中和了 HBSM 和 FBSM 两者的优点,具有较大的应用前景^[13-17]。

在 LCC-MMC 混合直流输电系统整流侧故障穿越控制方面,文献[18]研究了 LCC-半桥型 MMC 系统整流侧故障穿越控制策略,但半桥型 MMC 直流电压运行范围有限,只能适用于轻微故障情况;文献[19]研究了 LCC-C-MMC 系统整流侧故障穿越控制策略,依靠投旁通对实现在直流电压大幅降低的状态下运行,但其需要部分子模块闭锁,故障清除后解锁时对系统冲击大、恢复困难,且整个过程中系统控制较为复杂。而对于逆变侧采用混合型 MMC 的系统而言,根据桥臂中 FBSMs 所占比例,混合型 MMC 能够运行在不同的直流电压范围,从而具有不同的整流侧故障穿越能力。为使其具有直流故障穿越能力,一般 FBSMs 占比至少应为 50%^[10,16-17]。文献[9]分析了逆变侧采用混合型 MMC 的混合直流输电系统 FBSMs 的数量配置问题,但忽略了子模块电容电压平衡的要求;文献[10,17]深入地分析了混合型 MMC 的直流电压运行范围与桥臂 FBSMs 占比的关系,指出在低直流电压下运行时,为使桥臂两种子模块电容电压能够平衡, FBSMs 的占比应约为 75%,所需 FBSMs 较多,成本高、损耗大;文献[20]提出了上桥臂全部采用 HBSMs、下桥臂全部采用 FBSMs 的不对称混合型 MMC 结构,但其工作在低直流电压工况时,两极直流电压不对称,不能在 LCC 交流系统电压跌落的情况下实现故障穿越。

本文针对整流侧采用 LCC,逆变侧采用 FBSMs 占比为 50%的混合型 MMC 构成的混合直流输电系统,研究了其整流侧交流系统故障时的穿越控制策略。首先分析了采用传统环流抑制策略时系统的故障穿越能力,针对严重故障下两种子模块电容电压

不平衡的问题,提出了一种改进的环流控制策略,保证系统能够在较低直流运行电压下稳定运行,提高系统整流侧故障穿越能力;同时,为抑制故障穿越过程中交直流电流的振荡,提出了基于虚拟电阻和电流指令限值的暂态电流抑制策略;最后在 PSCAD/EMTDC 中搭建 LCC-MMC 混合直流输电系统对所提故障穿越策略进行了验证。

1 拓扑结构

图 1 所示为双端混合直流输电系统拓扑结构,其中整流侧采用基于晶闸管的 LCC,逆变侧采用基于 HBSM 和 FBSM 的混合型 MMC。

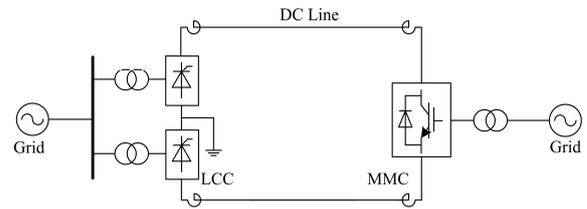


图 1 混合直流输电系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of hybrid HVDC system

基于 HBSM 和 FBSM 的混合型 MMC 拓扑结构如图 2 所示。图中:各桥臂配置的 HBSM 和 FBSM 数目相同,均为 N ; $u_{sj}(j=a, b, c)$ 为换流器交流侧输出相电压; i_{sj} 为交流侧相电流; L_0 为桥臂电抗; u_{pj} 、 u_{nj} 为上下桥臂电压; i_{pj} 、 i_{nj} 为上下桥臂电流; i_{cirj} 为桥臂电流中二倍频环流分量; U_{dc} 为直流极间电压; I_{dc} 为直流电流。

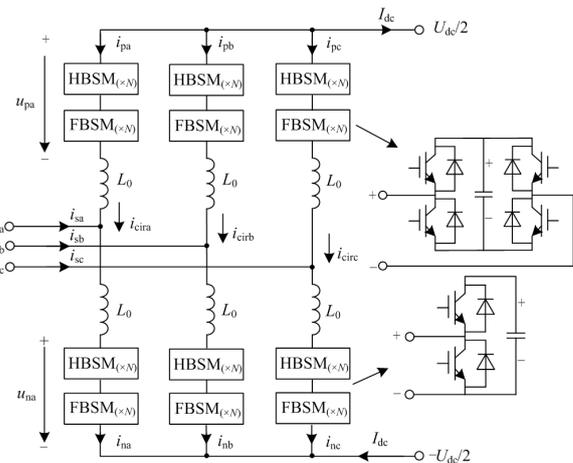


图 2 MMC 拓扑结构

Fig. 2 Topology of hybrid MMC

2 整流侧交流系统故障下的稳态控制策略

2.1 传统环流抑制策略下系统故障穿越能力分析

整流侧交流系统发生故障后,系统直流电压应

随之降低, 而 FBSMs 的引入使得混合型 MMC 有一定的低直流电压运行能力。根据文献[10,17]可知, 对于 FBSMs 占比为 50% 的混合型 MMC 而言, 当直流电压标幺值在 $0 \sim 1 - m_e$ (m_e 为 MMC 交流电压额定调制比, 通常为 $0.85 \sim 0.9$) 范围时, 仅依靠 FBSMs 即可输出所需桥臂电压, 不存在子模块电容电压不能平衡的问题; 而当直流电压标幺值在 $1 - m_e \sim 1$ 范围时, HBSMs 需参与输出桥臂电压, 此时要求桥臂电流具有正负交替的特性才能实现两种子模块电容电压的平衡。

通常, MMC 采用环流抑制策略, 以 A 相上桥臂为例, 其电流表达式为

$$i_{pa} = -\frac{1}{2}i_{sa} - \frac{1}{3}I_{dc} = -\frac{1}{2}I_m \cos(\theta_i) - \frac{1}{4k}m_e I_m \cos(\varphi) \quad (1)$$

式中: I_m 为交流相电流幅值; θ_i 为 A 相交流电流的相位; φ 为 A 相交流电流初始相角; $k = U_{dc}/U_{dce}$, 为直流电压标幺值。

于是当 $1 - m_e \leq k \leq 1$ 时, 则要求桥臂电流交流分量幅值大于直流分量, 即

$$\frac{1}{2}I_m > \frac{1}{4k}m_e I_m |\cos(\varphi)| = \frac{1}{4}x I_m \quad (2)$$

式中, $x = m_e |\cos(\varphi)| / k$ 。

根据式(2)可得

$$x < 2 \quad (3)$$

式(3)也可表示为

$$k > \frac{1}{2}m_e |\cos(\varphi)| \quad (4)$$

于是, 在传统环流抑制策略下系统能运行的直流电压标幺值范围为 $0 \sim 1 - m_e$ 、 $0.5m_e |\cos(\varphi)| \sim 1$ 。极端情况下, $|\cos(\varphi)| = 1$, 则其能运行的直流电压标幺值范围仅为 $0 \sim 1 - m_e$ 、 $0.5m_e \sim 1$; 而当故障后要求系统直流电压标幺值处于 $1 - m_e \sim 0.5m_e$ 范围时, 系统难以实现故障穿越。

另外, 根据式(1)可得正常运行时 MMC 桥臂电流的峰值 I_{pa_p} 为

$$I_{pa_p} = \left(\frac{1}{4}x + \frac{1}{2}\right)I_m = \left(\frac{1}{3} + \frac{2}{3x}\right)I_{dc} \quad 0 \leq x \leq m_e \quad (5)$$

则桥臂电流最大值 I_{pa_max} 为

$$I_{pa_max} = \left(\frac{1}{3} + \frac{2}{3m_e}\right)I_{dce} \quad (6)$$

式中, I_{dce} 为额定直流电流。

2.2 改进的环流控制策略

当整流侧交流系统故障导致直流电压标幺值位于 $1 - m_e \sim 0.5m_e |\cos(\varphi)|$ 范围时, 因桥臂电流不具备正负交替的特性, FBSMs 与 HBSMs 的电容电压不能

平衡, 从而导致系统不能实现故障穿越。由于 MMC 中子模块电容电压存在波动, 在无环流抑制措施的情况下, 桥臂电流中除了基频分量和直流分量外, 还含有二倍频负序环流分量^[21-22]。环流的存在增大了桥臂电流的峰值, 提高了开关器件电流容量的要求, 故正常运行时必须采取环流抑制措施^[22]。但在送端交流系统故障导致系统运行在低直流电压工况时, 换流器传送的有功功率下降, 桥臂电流也随之减小, 故可以适当控制桥臂电流中二倍频环流分量, 使桥臂电流具有正负交替的特性, 同时能够控制桥臂电流在正常范围内。叠加负序二倍频环流分量后的桥臂电流及其分量示意图如图 3 所示。

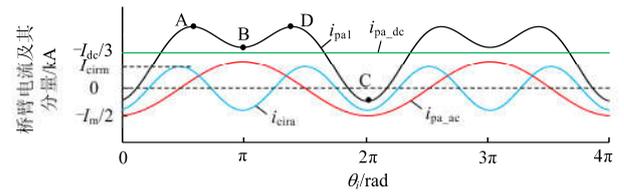


图 3 桥臂电流及其分量示意图

Fig. 3 Arm current and its components

图 3 中: i_{pa_ac} 、 i_{pa_dc} 、 i_{cira} 分别为桥臂电流基频分量、直流分量和二倍频环流分量, i_{pa1} 为叠加二倍频环流分量后的桥臂电流; A、B、C、D 为桥臂电流一周波内可能存在的四个极值点, 各点电流分别用 i_A 、 i_B 、 i_C 、 i_D 表示, 电流大小分别用 I_A 、 I_B 、 I_C 、 I_D 表示。从图 3 可见: 桥臂电流直流分量大于基频分量的幅值, 当采取环流抑制时, 桥臂电流将因严重偏置而始终为正; 叠加二倍频分量后, 桥臂电流则具有正负交替的特性。于是, 应合理选取环流分量的指令值, 使叠加环流后桥臂电流在满足 $i_C < 0$ 的同时其最大值不超过 I_{pa_max} 。

1) 相位指令值 θ_{cir_ref} 的选取

当桥臂电流中叠加负序二倍频环流分量后, 根据式(1), 可得换流器 A 相上桥臂电流表达式为

$$i_{pa1} = -\frac{I_m}{2} \cos(\theta_i) - \frac{I_m}{4k} m_e \cos(\varphi) + I_{cir} \cos(\theta_{cir}) \quad (7)$$

式中, I_{cir} 、 θ_{cir} 分别为环流分量的幅值和相位。

由于 MMC 工作于逆变状态, 桥臂电流的直流偏置为正, 若在基频分量处于负最大值时, 二倍频环流分量恰处于负最大值, 则对帮助桥臂电流恢复正负交替的特性最有利, 则 θ_{cir_ref} 与 θ_i 满足式(8)关系, 如图 3 所示。

$$\theta_{cir_ref} = -2\theta_i + \pi \quad (8)$$

2) 幅值指令值 I_{cir_ref} 的选取

在式(8)关系下, $I_A = I_D$ 。于是, i_A 、 i_B 、 i_C 为

$$\begin{cases} i_A = \frac{1}{4}xI_m + \frac{I_m^2}{32I_{\text{circ}}} + I_{\text{circ}} & I_{\text{circ}} \geq \frac{I_m}{8} \\ i_B = \frac{1}{4}xI_m + \frac{1}{2}I_m - I_{\text{circ}} \\ i_C = \frac{1}{4}xI_m - \frac{1}{2}I_m - I_{\text{circ}} \end{cases} \quad (9)$$

根据 $i_C < 0$ 的要求, 则有

$$I_{\text{circ}} > \frac{1}{4}xI_m - \frac{1}{2}I_m \quad (10)$$

于是, 在 $k > 1 - m_e$ 的情况下不妨取环流分量的幅值指令为

$$I_{\text{circ_ref}} = \begin{cases} 0 & x < 2 - \varepsilon \\ P[\frac{1}{4}(x + \varepsilon) - \frac{1}{2}]I_m & x \geq 2 - \varepsilon \end{cases} \quad (11)$$

式中: P 为可靠系数, 且 $P > 1$; ε 为一小正数, ε 的引入可保证 MMC 运行在 $x=2$ 附近的工况时, 桥臂电流能够可靠过零, 即在 $x \geq 2 - \varepsilon$ 的工况下需注入相应的环流。

考虑在低直流电压下, 直流电流保持额定值以尽可能维持功率传送, 则根据电流最大值不大于 $I_{\text{pa_max}}$ 的要求, 可得 (ε 很小, 取 $P \geq 2/(2 - \varepsilon)$)

$$\begin{cases} [\max(I_A, I_B)]_{\text{max}} = \frac{(1+P)I_{\text{dec}}}{3} \leq (\frac{1}{3} + \frac{2}{3m_e})I_{\text{dec}} & x \geq 2 - \varepsilon \\ I_{\text{Cmax}} = \frac{(P-1)I_{\text{dec}}}{3} \leq (\frac{1}{3} + \frac{2}{3m_e})I_{\text{dec}} & x \geq 2 - \varepsilon \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\max(I_A, I_B)$ 为 I_A 、 I_B 两者的较大者;

$[\max(I_A, I_B)]_{\text{max}}$ 、 I_{Cmax} 分别为 $\max(I_A, I_B)$ 、 I_C 在 $x \geq 2 - \varepsilon$ 范围内的最大值。

于是可得可靠系数 P 的取值范围为

$$\frac{2}{2 - \varepsilon} \leq P \leq \frac{2}{m_e} \quad (13)$$

本文 ε 取 0.1, 考虑一定的裕度, 可靠系数 P 的范围可取 1.2~2, 本文取 1.5。

根据式(11)和式(13)可知, 混合型 MMC 工作在 $k > 1 - m_e$ 且 $x \geq 2 - \varepsilon$ 的工况时, 只需根据 MMC 的调制比、功率因数和交流电流, 调整二倍频环流分量的幅值和相位, 即可使桥臂电流具有正负交替的特性, 维持子模块电容电压平衡, 同时不会对换流阀造成过流的危害。因此, 采用改进的环流控制策略, 混合直流输电系统能够运行在 0~1 p.u. 的任意直流电压下, 提高了系统的故障穿越能力。

2.3 MMC 电压外环指令选取

基于 2.2 节中所提改进的环流控制策略, 混合

型 MMC 能够运行于 0~1 p.u. 的任意直流电压下, 满足了整流侧交流系统严重故障时实现故障穿越的要求。对于混合直流输电系统, 其整流侧采用传统的定直流电流控制和后备最小触发角(一般为 5°)控制, 逆变侧 MMC 采用定直流电压控制。在整流侧交流电压跌落后, 逆变侧依靠减小混合型 MMC 的直流电压指令(k 值)来使逆变侧直流电压与整流侧电压跌落程度相匹配, 逆变侧保持为直流电压控制方式。若 k 减小程度不足, 则导致逆变侧直流电压高于整流侧直流电压, 系统功率传送中断; 若 k 减小程度过大, 则会导致 LCC 触发角过大, 系统能传送的功率减小。所以, 在故障发生后, 整流侧检测到电压跌落深度, 将信号传送至逆变侧, 并估算逆变侧的直流电压指令值。逆变侧的正、负极直流电压估算表达式为

$$\frac{kU_{\text{dec}}}{2} = h \left(\frac{1.35U_{\text{mf}} \cos \alpha}{k_T} - \frac{3I_{\text{dc_ref}} X_s}{\pi} \right) - I_{\text{dc_ref}} R_{\text{dc}} \quad (14)$$

式中: h 为 LCC 每极的六脉动阀组数目; U_{mf} 为故障后整流侧交流线电压有效值; α 为触发角; $I_{\text{dc_ref}}$ 为 LCC 直流电流指令值; k_T 为换流变压器变比; X_s 为换流变压器折算至二次侧的电抗; R_{dc} 为直流线路电阻。

故障后, 根据式(14)求得 MMC 的直流电压标幺值指令 k 的取值, 为避免 k 减小程度不足导致功率传送中断, α 可取 20° (正常运行时为 $10^\circ \sim 20^\circ$)。

3 整流侧交流系统故障下的暂态电流抑制策略

3.1 基于虚拟电阻的直流暂态电流抑制策略

故障初期, 由于线路分布电容和 LCC 侧直流滤波器的存在, 在换流阀与直流滤波器、线路电容之间会构成振荡回路。因直流线路两侧均装有较大的平波电抗器, 直流线路电阻较小, 故呈欠阻尼状态。电流振荡的具体过程为: 1) 故障发生至执行故障穿越指令的阶段, 该阶段由于直流电压未能降低, LCC 将出现断流, MMC 与直流线路电容、直流滤波器之间形成振荡回路; 2) 当 MMC 执行故障穿越指令后, 系统直流电压下降, LCC 电流恢复, 此时 LCC 与直流滤波器、直流线路电容之间也构成振荡回路。

故障初期直流电流的振荡会造成 MMC 桥臂电流振荡, 影响子模块电容电压的平衡。此时可引入虚拟电阻, 增大阻尼, 抑制故障初期直流电流的振荡, 从而缩短其暂态过程。引入虚拟电阻后 MMC 桥臂输出电压参考值为

$$\begin{cases} u_{pj_ref} = \frac{1}{2}kU_{dce} - u_{sj_ref} + u_{cirj_ref} - I_{dc}R_{vir} \\ u_{nj_ref} = \frac{1}{2}kU_{dce} + u_{sj_ref} + u_{cirj_ref} - I_{dc}R_{vir} \end{cases} \quad (15)$$

式中: u_{sj_ref} 为交流相电压参考值; R_{vir} 为虚拟电阻。

在故障初期, 为尽可能地抑制暂态电流, 并考虑桥臂输出电压的范围, 虚拟电阻在额定电流下产生的附加电压最大值可取为每极额定电压, 即在故障穿越起始时刻 R_{vir} 可取 0.5 p.u.。虚拟电阻的引入是为抑制故障穿越初期的暂态电流, 由于故障穿越稳态期间有明显的直流电流, 故在故障穿越的过程中应逐渐减小虚拟电阻的阻值, 以避免其对故障后稳态造成影响。

3.2 基于电流指令限值的交流暂态电流抑制策略

虚拟电阻的引入虽可以抑制故障初期的暂态电流, 但其同时在 MMC 直流输出电压上叠加了虚拟电阻上的附加压降, 以及故障发生后系统运行状态的突变等都将导致 MMC 外环电压控制产生的内环电流指令波动较大, 从而导致 MMC 交流输出电流振荡。正常运行时, 考虑器件的通流能力, MMC 内环电流指令的上、下限值通常为 -1.2 p.u.、1.2 p.u. 左右; 若在故障穿越期间保持电流指令限值范围不变, 则电流指令容易在限值范围内大幅波动, 影响系统的稳定。整流侧故障后, 系统传送的功率减小, 故障稳态下 MMC 输出的有功电流随之下降, 故此时可适当修改电流指令的限值, 缩小电流指令的允许范围, 从而减小 MMC 交流电流的振荡。设故障后 LCC 的电流指令为 I_{dc_ref} , 忽略系统的损耗, 则稳定状态下逆变侧 MMC 的有功电流标幺值 i_{sd} 为

$$i_{sd} = -k \frac{I_{dc_ref}}{I_{dce}} \quad (16)$$

若故障穿越期间直流电流指令保持为额定值, 考虑 0.1 p.u. 的调节范围, 则 MMC 的 d 轴电流指令的标幺值范围可限制为 $(-k-0.1) \sim (-k+0.1)$ 。

4 仿真验证

4.1 仿真系统参数

在 PSCAD/EMTDC 中搭建双端混合直流输电系统仿真模型, 其中: 整流侧采用每极两个十二脉动阀组串联构成的 LCC, 即 $h=4$; 换流变压器变比为 525 kV/103 kV, 等值电抗为 0.1 p.u.; 直流线路采用 4×LGJ-720 线路, 电阻参数为 0.009 735 Ω /km, 线路长 200 km; 逆变侧采用混合型 MMC, 其参数如表 1 所示。

表 1 混合型 MMC 参数
Table 1 Parameters of hybrid MMC

参 数	数值
额定容量/MVA	1 000
额定直流电压/kV	±500
桥臂 HBSM 数目	228
桥臂 FBSM 数目	228
子模块电容/mF	12
桥臂电感/mH	60
阀侧额定电压/kV	520
额定调制比	0.85

文献[10,17,20]对于混合型 MMC 采用环流抑制策略时运行在低直流电压工况下的子模块电容电压平衡情况作了相应的仿真分析, 本文不再赘述。下面主要仿真分析整流侧电压跌落从而导致直流电压下降较严重时的故障穿越过程。

4.2 整流侧故障导致直流电压降为 0.3 p.u. 时的故障穿越仿真

1.1 s 前, 系统运行于额定工况, LCC 控制直流电流为 1 kA, MMC 控制直流电压为 1 000 kV, 无功功率指令为 0; 1.1 s 时, 整流侧交流系统远端发生故障, 电压跌落至 180 kV(跌落程度为 66%), 考虑信号传递延时 5 ms, 1.105 s 时逆变侧启动故障穿越策略, 根据式(14), 直流电压标幺值 k 降为 0.3, 虚拟电阻在 20 ms 内从 0.5 p.u. 以斜坡的形式衰减至 0, 内环电流指令 d 轴分量上、下限值分别为 -0.2 p.u.、-0.4 p.u.; 1.6 s 时故障清除, 5 ms 后逆变侧直流电压标幺值 k 逐渐恢复至额定值 1。

图 4 为故障穿越过程中不引入虚拟电阻和不调整电流指令限值时的仿真结果, 其中 i_{pdc} 、 i_{ndc} 分别为 MMC 正负极直流电流。从图中可见, 故障穿越初期直流电流、桥臂电流、LCC 触发角振荡严重, MMC 交流电流也存在波动, 暂态过程较长。图 5 为故障穿越过程中引入虚拟电阻和调整电流指令限值后的仿真结果。根据图 5, 引入虚拟电阻和调整电流指令限值后, 直流电流交流分量得到明显的抑制, 从而也抑制了桥臂电流和 LCC 触发角的振荡, MMC 交流电流波动减小, 确保系统安全稳定运行。

图 6 为整个故障穿越过程的仿真结果。其中 u_{pah_av} 、 u_{paf_av} 分别为 A 相上桥臂 HBSMs、FBSMs 电容电压平均值。根据图 6, 整流侧电压跌落导致 MMC 直流电压标幺值降为 0.3, 环流控制器修改二倍频环流分量的指令, 桥臂电流环流分量的相位与基频分量的相位满足最佳相位关系; 在故障穿越初期, 存在一段时间内桥臂电流始终为正的情况, 这

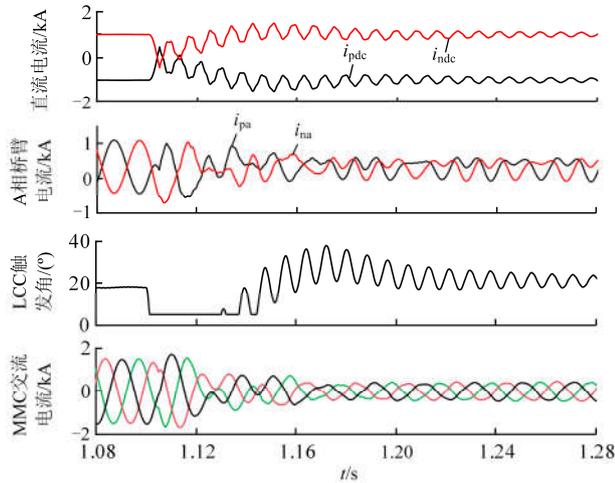


图4 无虚拟电阻和不调整电流指令限值时的仿真

Fig. 4 Simulation without virtual resistance and adjusting current limitation

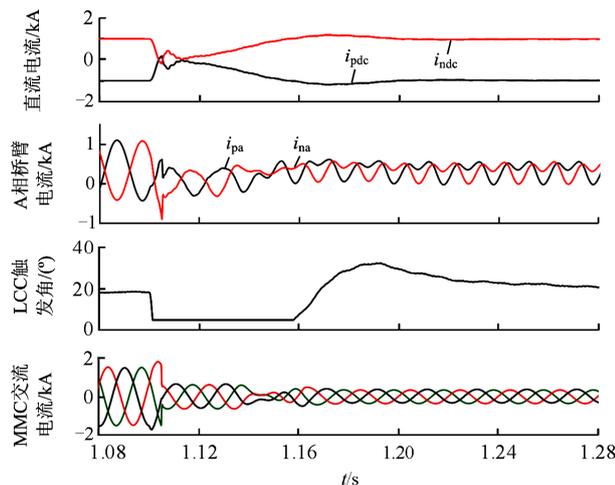
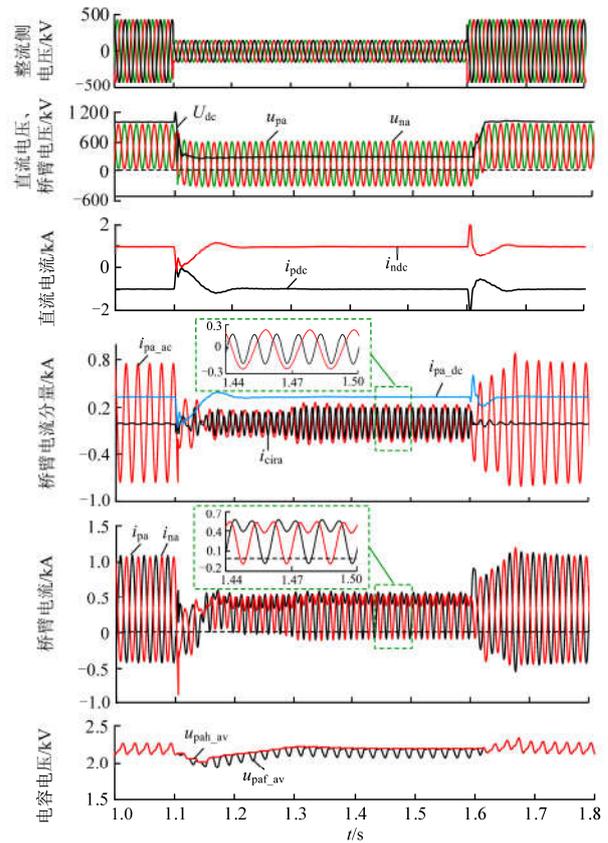


图5 引入虚拟电阻和调整电流指令限值时的仿真

Fig. 5 Simulation with virtual resistance and adjusting current limitation

是因为暂态过程导致子模块电容电压轻微跌落，低于额定值，从而导致 MMC 直流输出电压低于指令值，内环电流指令处于上限值 -0.2 p.u.，电流幅值小于稳态值 0.3 p.u.，环流分量也相应减小。但在该阶段内电容电压偏低，系统应表现为对子模块充电以提升其电压，而对投入的 HBSMs 而言，正的桥臂电流恰使其处于充电状态，子模块电容电压能够维持平衡；当子模块电容电压上升至额定值附近后，MMC 直流输出电压也达指令值附近，内环电流指令不再处于限值位置，环流分量相应增大，桥臂电流恢复正负交替的特性，子模块电容电压维持平衡，系统进入稳态。同时可见，环流注入后，桥臂电流依然在正常范围内，不会对换流阀造成过流的危害。

图6 整流侧故障导致直流电压降为 0.3 p.u.时的仿真Fig. 6 DC voltage drops to 0.3 p.u. because of the rectifier side fault

4.3 整流侧故障导致直流电压降为 0.1 p.u.时的故障穿越仿真

同样， 1.1 s 前系统运行在额定状态， 1.1 s 时整流侧交流系统电压跌落至 80 kV(跌落程度为 85%)， 5 ms 后逆变器启动故障穿越策略，根据式(14)，直流电压标幺值 k 降为 0.1 ，虚拟电阻取值与4.2中相同，内环电流指令 d 轴分量上、下限值分别为 0 、 -0.2 p.u.； 1.6 s 时故障清除， 5 ms 后逆变器直流电压标幺值 k 逐渐恢复至额定值 1 。

图7为整个故障穿越过程的仿真结果。当直流电压降为 0.1 p.u.时，由于 FBSMs 能够输出相应的桥臂电压，所以不向桥臂电流中注入二倍频环流，桥臂电流在故障穿越期间始终为正，投入的 HBSMs 将始终处于充电状态；在故障穿越初期，FBSMs 电容电压在暂态过程中轻微跌落，低于 HBSMs 电容电压，排序均压模块不会选择 HBSMs 投入；之后，在 MMC 电压控制的作用下，FBSMs 电容电压开始回升，当其高于 HBSMs 电容电压时，HBSMs 将会被选择投入，进而对其充电，维持子模块电容电压

的平衡; 待两者电容电压均达到额定值附近, HBSMs 电容被充电至大于 FBSMs 电压后, HBSMs 将不会被选择投入, 系统进入稳态。

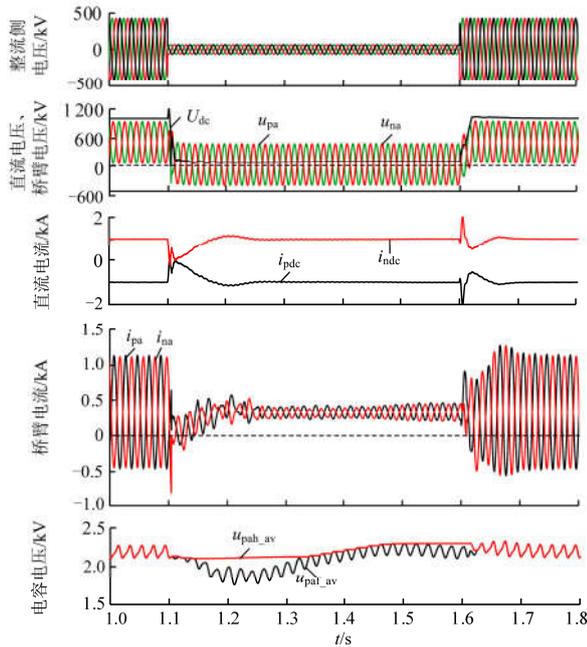


图7 整流侧故障导致直流电压降为 0.1 p.u.时的仿真
Fig. 7 DC voltage drops to 0.1 p.u. because of the rectifier side fault

5 结论

本文针对整流侧采用 LCC, 逆变侧采用 FBSMs 占比为 50% 的混合型 MMC 构成的混合直流输电系统, 研究了其整流侧故障后系统的故障穿越策略, 主要得出以下结论:

1) 故障穿越期间引入虚拟电阻和调整电流指令限值能够抑制系统的振荡, 缩短暂态过程, 确保系统安全稳定运行;

2) 改进的环流控制策略能够维持子模块电容电压的平衡, 使系统能够工作在 0~1 p.u. 的任意直流电压, 提高了系统的故障穿越能力。

参考文献

- [1] 裴昂, 吕思颖, 秦昕, 等. 特高压直流输电系统换流站故障过电压研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 149-154.
PEI Chan, LÜ Siying, QIN Xin, et al. Study on fault overvoltage of converter station of UHVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 149-154.
- [2] 姚良忠, 吴婧, 王志冰, 等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6007-6020.

- YAO Liangzhong, WU Jing, WANG Zhibing, et al. Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020.
- [3] 潘垣, 尹项根, 胡家兵, 等. 论基于柔直电网的西部风光能源集中开发与外送[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3621-3629.
PAN Yuan, YIN Xianggen, HU Jiabing, et al. Centralized exploitation and large-scale delivery of wind and solar energies in West China based on flexible DC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3621-3629.
- [4] TAO Fen, XIE Zhujun, CHENG Jie, et al. Fast valve power loss evaluation method for modular multi-level converter operating at high-frequency[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 26-36. DOI: 10.1186/s41601-016-0015-z.
- [5] 徐政, 薛英林, 张哲任. 大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5051-5062.
XU Zheng, XUE Yinglin, ZHANG Zheren. VSC-HVDC Technology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062.
- [6] 孙刚, 时伯年, 赵宇明, 等. 基于 MMC 的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 127-133.
SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Yuming, et al. Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 127-133.
- [7] 王永平, 赵文强, 杨建明, 等. 混合直流输电技术及发展分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 156-167.
WANG Yongping, ZHAO Wenqiang, YANG Jianming, et al. Hybrid high-voltage direct current transmission technology and its development analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 156-167.
- [8] 唐庚, 徐政, 薛英林. LCC-MMC 混合高压直流输电系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 301-310.
TANG Geng, XU Zheng, XUE Yinglin. A LCC-MMC hybrid HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 301-310.
- [9] 许烽, 徐政. 基于 LCC 和 FHMMC 的混合型直流输电系统[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2520-2530.
XU Feng, XU Zheng. Hybrid HVDC system based on LCC and FHMMC[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2520-2530.
- [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.

- LI Shaohua, WANG Xiuli, LI Tai, et al. Optimal design for hybrid MMC and its DC fault ride-through strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1849-1858.
- [11] 黎东祥, 王渝红, 丁理杰, 等. 基于双 12 脉动阀组共同控制的特高压单阀组投退策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 148-154.
- LI Dongxiang, WANG Yuhong, DING Lijie, et al. Blocking and deblocking strategy of single UHVDC converter group under joint control mode of dual 12-pulse converter groups[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 148-154.
- [12] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 1-7.
- WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Analysis of submodule overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 1-7.
- [13] ZENG Rong, XU Lie, YAO Liangzhong, et al. Precharging and DC fault ride-through of hybrid MMC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1298-1306.
- [14] 李红梅, 行登江, 高扬, 等. 子模块混联 MMC-HVDC 系统直流侧短路故障电流抑制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 57-64.
- LI Hongmei, XING Dengjiang, GAO Yang, et al. A DC pole-to-pole fault current suppression strategy of the half-and full-bridge based cell-hybrid modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 57-64.
- [15] ZENG Rong, XU Lie, YAO Liangzhong, et al. Design and operation of a hybrid modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1137-1146.
- [16] CUI S H, SUL S. A comprehensive DC short-circuit fault ride through strategy of hybrid modular multilevel converters (MMCs) for overhead line transmission[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(11): 7780-7796.
- [17] LIN W X, JOVICIC D, NGUEFEU S, et al. Full-bridge MMC converter optimal design to HVDC operational requirements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1342-1350.
- [18] 刘志超, 时伯年, 刘斌, 等. 基于最大调制比的 LCC-MMC 混合直流交流侧故障控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 125-130.
- LIU Zhichao, SHI Bonian, LIU Bin, et al. Control strategies of LCC-MMC hybrid HVDC transmission under AC system fault based on maximum modulation index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 125-130.
- [19] 薛英林, 葛风雷, 赵峥, 等. LCC-C-MMC 混合高压直流系统直流低电压穿越控制策略[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 85-96.
- XUE Yinglin, GE Fenglei, ZHAO Zheng, et al. DC low-voltage ride-through control strategy of LCC-C-MMC hybrid HVDC system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 85-96.
- [20] JUNG J, CUI S H, LEE J, et al. A new topology of multilevel VSC converter for a hybrid HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(6): 4199-4209.
- [21] 屠卿瑞, 徐政, 郑翔, 等. 模块化多电平换流器型直流输电内部环流机理分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 547-552.
- TU Qingrui, XU Zheng, ZHENG Xiang, et al. Mechanism analysis on the circulating current in modular multilevel converter based HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 547-552.
- [22] 蔡永梁, 任成林, 周竞宇, 等. 基于 MMC 的柔性直流输电电容电压波动抑制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 45-50.
- CAI Yongliang, REN Chenglin, ZHOU Jingyu, et al. Control strategy for suppressing capacitor voltage ripple of MMC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 45-50.

收稿日期: 2017-07-07; 修回日期: 2017-09-27

作者简介:

蔡宜君(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流输电系统控制与保护; E-mail: hust_cyj@hust.edu.cn

文明浩(1973—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用、新型继电保护原理; E-mail: swenmh@hust.edu.cn

陈玉(1990—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为配电网无功补偿。E-mail: ChenYu_Huster@hust.edu.cn

(编辑 葛艳娜)