

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.06.009

受端混联 LCC-VSC 特高压直流输电系统故障穿越方法

王冰倩, 赵文强, 侍乔明, 田杰, 常昊添
(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:针对受端由电网换相换流器(LCC)和电压源换流器(VSC)级联的混合直流输电系统中 VSC 在交流故障穿越时子模块过压的问题,文中提出在受端 VSC 直流侧安装耗能设备以抑制 VSC 子模块过压的方法,对比分析了基于直流斩波耗能电阻、泄流晶闸管和可控避雷器 3 种耗能设备的交流故障穿越原理及策略。基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台搭建了包含工程实际控制保护主机程序的受端混联 LCC-VSC 特高压直流仿真模型,对比分析了 3 种耗能设备的交流系统故障穿越特性,结果表明在受端 VSC 直流侧安装耗能设备可以有效抑制子模块过压,实现交流故障可靠穿越。其中可控避雷器方案具有控制原理简单、可靠性高等优点,更适用于受端混联 LCC-VSC 特高压直流输电系统。

关键词:电网换相换流器(LCC);电压源换流器(VSC);故障穿越;直流斩波耗能电阻;泄流晶闸管;可控避雷器
中图分类号:TM723 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-3203(2021)06-0069-08

0 引言

随着直流输电技术的快速发展,基于电网换相换流器的高压直流输电(line commutated converter based high voltage direct current, LCC-HVDC)技术日趋成熟,常规高压直流输电系统具有远距离、大容量、低成本等优点^[1-4]。但逆变侧交流电压受到扰动时,电网换相换流器容易发生换相失败,给交直流系统稳定运行带来严重影响^[5-6]。基于电压源换流器的高压直流输电(voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC)技术具有无换相失败、无需无功补偿等优点^[7]。基于 LCC-VSC 的混合直流输电技术结合常规直流输电和柔性直流输电的优点,可提供更灵活的输电方式,但其复杂的拓扑结构和灵活的运行方式,给直流系统的控制策略、交直流故障穿越策略等带来了新的挑战。混合直流输电系统的拓扑结构、运行特性及控制策略等成为了国内外学者的研究热点^[8-10]。

文中以整流站采用 LCC,逆变站采用 LCC 和多个 VSC 级联的受端混联型 LCC-VSC 直流输电系统为研究对象,该混联型结构具有可以改善逆变侧交流电压稳定性、降低换相失败发生概率等优点。该拓扑可利用 LCC 的单向导电特性阻断直流线路故障时 VSC 的反向馈入电流,同时结合 VSC 功率指令控制可实现直流故障快速穿越和恢复^[11],但 VSC 所连交流系统发生严重故障时,输电系统可能无法实现故障穿越。

针对柔性直流输电系统的交直流故障穿越问题已有较多研究,例如在风电场直流侧安装耗能装置^[12-14],从整流侧、逆变侧分别调整控制策略^[15-21]。文献[15]通过在风电场模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)直流侧安装耗散电阻和斩波电阻来耗散过剩功率,实现交直流故障穿越,但该方案对特高压工程而言成本过高。文献[17]提出在受端 VSC 发生交流故障时, VSC 投入交流低压限流环节、正负序电流控制环节等控制策略来实现故障穿越,但该方法需站间通信,控制策略较为复杂。目前,针对受端混联型 LCC-VSC 直流输电系统的交流故障穿越策略研究较少,已有的混合直流系统交流故障穿越方法并不完全适用。

文中介绍了受端混联型 LCC-VSC 直流输电系统的拓扑结构和控制策略,分析了 VSC 换流器交流故障导致子模块电容过压机制,为实现受端 VSC 交流故障穿越,提出在受端 VSC 直流侧安装耗能设备以抑制 VSC 子模块过压。对 VSC 直流侧分别安装直流斩波耗能电阻(DC Chopper)、泄流晶闸管、可控避雷器(controllable metal oxide surge arrester, CMOA)的子模块电容过压抑制原理及效果进行研究和对比,从兼顾拓扑性能需求和经济效益方面指出了各方案的优缺点,并搭建了 PSCAD/EMTDC 仿真模型进行仿真实验。

1 受端混联型 LCC-VSC 直流输电系统

1.1 受端混联型 LCC-VSC 直流系统拓扑结构

受端混联型 LCC-VSC 直流输电系统受端采用

收稿日期:2021-06-05;修回日期:2021-08-09

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900602)

LCC 与多个 VSC 级联的方式,其单极拓扑结构如图 1 所示,送端高、低压阀组及受端高压阀组均采用 LCC 换流器,受端低压阀组采用 3 个 VSC 换流器并联,其中 BPS 为旁通开关。该拓扑具有灵活多变的运行方式,例如全压 LCC-(LCC+1VSC)、LCC-(LCC+2VSC)、LCC-(LCC+3VSC),半压 LCC-LCC、LCC-1VSC、LCC-2VSC、LCC-3VSC 等。正常全压运行条件下,逆变侧高、低压阀组平分直流功率,VSC 极母线电压为 400 kV,低端 VSC 通过协调控制平均分配直流电流,高、低端之间能够实现一定程度的功率转带。

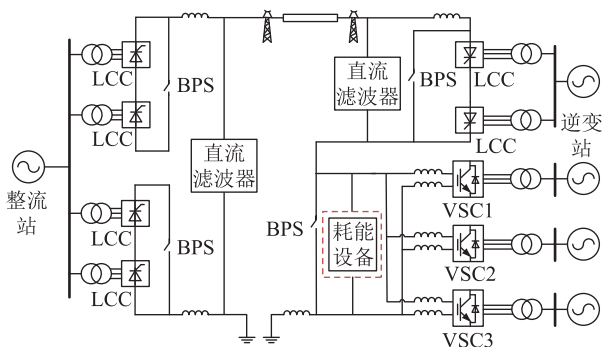


图 1 受端混联直流输电系统拓扑

Fig.1 Topology of hybrid cascade HVDC transmission system

1.2 受端混联型 LCC-VSC 直流系统控制策略

整流站 LCC 控制策略与常规特高压直流输电系统基本相同,通过控制触发角来实现定直流功率/直流电流控制,通过低压限流、交流暂态控制等环节来改善交直流动态运行性能。逆变站高端 LCC 采用定直流电压控制,低端 3 个 VSC 中 1 个控制直流电压,另 2 个控制功率,若控制直流电压的 VSC 因故退出,则控制功率的 VSC 按照预先设定的优先级接管直流电压控制。

逆变站 VSC 采用矢量控制,即基于 dq 旋转坐标系的解耦控制,分为外环功率控制和内环电流控制^[1,21-24]。其中外环控制包含直流电压控制、有功功率控制、无功功率控制、交流电压控制等,根据系统直流电压、直流电流等参数及系统电压、电流、功率等控制目标产生参考电流输送给内环控制。内环控制通过矢量控制生成三相电压参考值,最终计算得到上、下桥臂子模块的开通个数。VSC 控制结构如图 2 所示。其中 U_{dc} 、 I_{dc} 分别为 MMC 直流侧电压和电流; $U_{s,abc}$ 、 $I_{s,abc}$ 分别为换流器交流侧相电压和相电流; θ 为 U_{sa} 相位; U_{sd} 、 U_{sq} 分别为交流侧相电压的 d 轴和 q 轴分量; I_{sd} 、 I_{sq} 分别为交流侧相电流的 d 轴和 q 轴分量; P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为有功功率和无功功率

参考值; U_{dcref} 、 U_{sref} 分别为直流电压和交流侧电压参考值; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为 d 轴和 q 轴电流参考值; U_{cdref} 、 U_{cqref} 分别为 d 轴和 q 轴电压参考值。

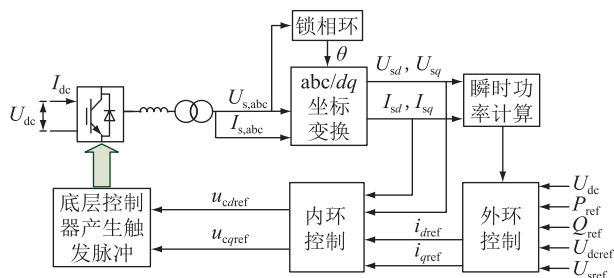


图 2 VSC 控制策略结构

Fig.2 Structure of VSC control strategy

1.3 受端 VSC 交流故障过压机制

VSC 子模块电容电压与交、直流侧的关系可简化如下^[25]:

$$P_{dc} - P_{ac} = d(0.5CU_{dc}^2)/dt \quad (1)$$

式中: P_{dc} 为换流器直流侧功率; P_{ac} 为换流器交流侧功率; C 为换流器投入子模块总电容; U_{dc} 为直流电压。

当 VSC 直流侧输入功率与交流侧输出功率不平衡时,会引起 VSC 子模块电容电压的变化^[26-28]。例如逆变侧低端 VSC 交流系统发生三相接地故障,一方面高端 LCC 与低端 VSC 所连交流系统的强耦合作用可能导致 LCC 发生换相失败,相当于 LCC 旁通后对低阀 VSC 充电,另一方面交流电压严重跌落,交流低压限流环节作用降低输出电流,导致换流器交流系统功率输出通道严重受阻^[21]。而整流侧依旧按照稳定运行时的功率设定参考值输送直流功率,导致 VSC 交流功率 P_{ac} 远远小于直流功率 P_{dc} ,过剩的功率转移储存至 VSC 子模块电容上,最终导致子模块电压严重升高,引起直流闭锁,甚至威胁设备安全。

2 受端混联型 LCC-VSC 直流系统交流故障穿越策略

2.1 耗能设备

由 VSC 交流故障过压机制分析可知,实现 VSC 交流故障穿越的本质是消耗交流电压跌落后直流侧过剩的功率,减轻 VSC 子模块电容的储能负担,维持 VSC 交、直流侧功率平衡。因此考虑在 VSC 直流侧安装耗能设备,用以消耗交流故障期间直流侧过剩功率,限制子模块电压在安全范围内,保证系统可靠穿越交流故障。目前,耗能设备主要有 DC Chopper、泄流晶闸管和 CMOA,其结构如图 3 所示,性能对比如表 1 所示。

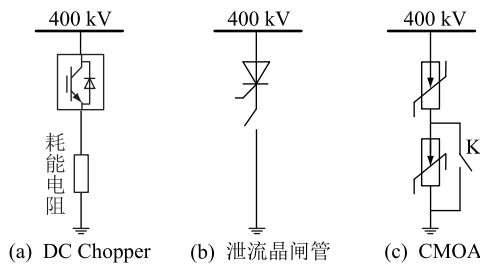


图3 耗能设备结构

Fig.3 Structure of energy consuming equipments

表1 3种耗能设备性能对比

Table 1 Performance comparison of three energy-consuming equipments

技术方案	一次主回路	控制保护原理	引起功率中断	占地面积	经济成本
DC Chopper	复杂	复杂	不会	较大	高
泄流晶闸管	较复杂	较复杂	会	小	较高
CMOA	简单	简单	不会	大	低

DC Chopper 由耗能电阻和控制开关组成^[13],其中电阻实现盈余功率转移耗散,电阻值 R_{Chopper} 由式(2)决定, P_{dc} 一般选择额定容量^[15],控制开关一般采用高速全控型开关绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT), 以实现精确投入和退出。当 VSC 子模块电容电压越限后开通开关器件来限制 VSC 端口电压,当故障消失后,断开 Chopper 回路实现系统快速恢复,其不足是 IGBT 技术成本及造价较高。

$$P_{\text{dc}} \leq \frac{U_{\text{dc}}^2}{R_{\text{chopper}}} \quad (2)$$

泄流晶闸管技术类似常规直流的投旁通对,故障时给 VSC 直流侧盈余的功率提供一个直流通路,以避免直流侧盈余的功率储存在 VSC 换流器的子模块电容上而引起过压。为防止晶闸管不能及时自动关断,考虑串联直流开关来保证其可靠关断。其缺点是晶闸管的关断需要整流侧移相,通过一次重启实现,会造成故障穿越过程中功率中断,且在实际工程应用中存在泄流晶闸管巡检及性能监控技术难度大等不足^[29]。

CMOA 由固定元件、受控元件、控制开关组成^[30]。固定部分一般位于高位端,受控部分与控制开关并联,通常位于低位端。主要是利用避雷器防止过压的特性,将 VSC 换流器的端口电压限制在安全范围内,从而避免 VSC 换流器过电压,其工作原理类似于 DC Chopper,但其具有经济成本低、制造技术较成熟等优势。

2.2 基于耗能设备的交流故障穿越控制策略

设定投入耗能设备的子模块电容电压阈值,当

交流故障导致 VSC 子模块电容电压大于阈值时, VSC 控制系统将发出投入耗能设备指令,从而避免子模块电容电压进一步升高。子模块电容电压阈值需保证:在最严苛的故障情况下,耗能设备导通后子模块电容电压被限制在安全范围内,同时对耗能设备的储能要求尽可能低,以便在工程应用中实现。

对于图 1 所示的受端混联型 LCC-VSC 直流输电系统, VSC 运行个数不同, VSC 发生交流系统故障期间,采用的协调控制策略不同。

当受端低阀 3 个 VSC 均运行时,其中 1 个 VSC 交流系统发生故障,一方面可以利用非故障 VSC 转带故障 VSC 的部分功率,另一方面当子模块电容电压超过阈值后导通耗能设备,将盈余功率转移至耗能设备,减轻子模块电容储能负担,从而抑制子模块电容电压升高。当故障清除后,子模块电容电压下降至阈值以下,退出耗能设备,实现交流系统故障穿越。

当受端低阀只有 2 个 VSC 运行时,系统输送功率可以设定为额定值,当其中 1 个 VSC 所连交流系统发生故障,非故障 VSC 功率转带能力有限,此时对耗能设备容量的要求较高,可以采取整流侧配合移相以减少直流侧流入耗能设备的功率,从而减小耗能设备容量需求。

当受端低阀只有 1 个 VSC 运行时,唯一的 VSC 发生故障后没有非故障 VSC 接管定电压控制及功率转带,故障后 VSC 承受电压应力大,为防止对设备造成损害,系统将降低输送功率,利用耗能设备可靠穿越 VSC 交流故障。

DC Chopper 安装在图 1 所示 VSC 直流侧耗能设备处,当交流故障导致子模块电容电压大于阈值时,投入 DC Chopper 开关形成泄能回路,故障清除后,关断开关,退出 DC Chopper。混合直流系统 VSC 交流故障后的控制策略如图 4 所示,其中红框部分为 DC Chopper 动作策略。

VSC 直流侧安装有泄流晶闸管的结构如图 5 所示,晶闸管动作策略如图 4 中绿框部分所示。为保证晶闸管能够可靠关断,在晶闸管处串联直流开关, VSC 直流出口处需要安装阻断二极管以防止 VSC 电流反向流进晶闸管形成短路回路。当故障导致 VSC 子模块电压越限后,触发导通泄流晶闸管,从而与高端 LCC 形成泄流回路,故障清除后,整流侧进行移相,晶闸管关断,系统进行一次重启,实现故障穿越。

CMOA 安装位置与 DC Chopper 一致,动作策略

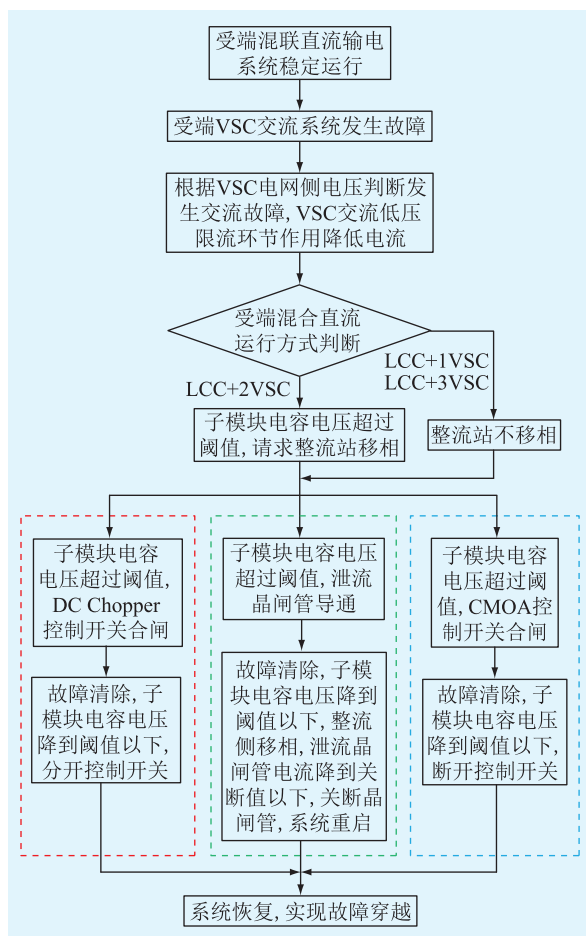


图4 交流故障控制策略及耗能设备动作策略

Fig.4 Control strategy and energy consumption equipment action strategies of AC fault

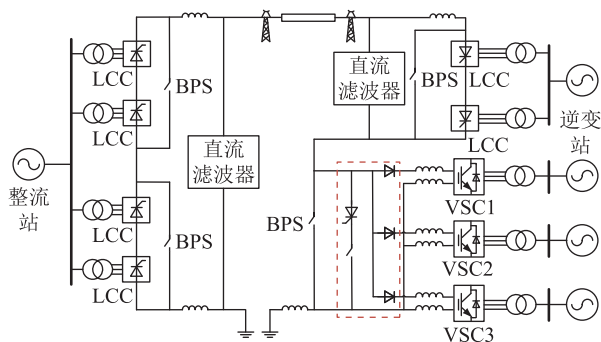


图5 配置泄流晶闸管的受端混联直流输电系统拓扑

Fig.5 Topology of hybrid cascade HVDC transmission system with thyristor

如图4中蓝框部分所示。当逆变侧VSC交流系统发生故障导致子模块电容电压升高并超过阈值时,控制开关K闭合,受控元件被旁路,降低CMOA残压,固定元件将高端LCC流入VSC的直流电流大量转移至CMOA,同时让VSC释放一部分能量,从而限制子模块电容过压。故障消失后,VSC正常输出功率,VSC直流电压降低,子模块电容电压降低至阈值后,打开CMOA开关K。

3 仿真分析

3.1 仿真系统

基于PSCAD平台搭建受端混联LCC-VSC特高压直流输电仿真系统,其中,主回路结构参照图1设计。送端高、低端配置LCC+BPS;受端高端配置LCC+BPS;受端低端配置3VSC+BPS+耗能设备;额定功率为8000MW;额定直流电压为±800kV;额定直流为5000A;VSC子模块个数为200个;投入耗能设备的子模块电容电压阈值为2600V。

受端LCC+3VSC全压运行模式时,单极输送功率4000MW,高端LCC输送2000MW,低端单个VSC输送667MW;LCC+2VSC全压运行模式时,单极输送功率4000MW,高端LCC输送2000MW,低端单个VSC需要输送1000MW;LCC+VSC全压运行模式时,因为低端单个VSC输送功率受限,系统降功率运行,单极输送功率为1600MW,高端LCC输送800MW,低端单个VSC需要输送800MW。系统全压LCC+2VSC运行方式下单个VSC换流器承受的功率更大,交流故障导致过压情况更严苛,因此文中研究全压LCC-(LCC+2VSC)运行方式下的三相交流故障穿越,其中VSC3为定电压控制,VSC2为定功率控制。

3.2 仿真结果

3.2.1 无耗能设备仿真结果

VSC直流侧不安装耗能设备时,如果VSC3所连交流系统发生三相金属性接地故障,仿真结果如图6所示,故障发生于9.1s,持续时间100ms,子模块电容电压最大值持续上升,最后峰值达到3.46kV,VSC直流侧端口电压达到1228kV,严重过压,VSC换流器闭锁,最后极闭锁,无法实现交流故障穿越。

为了对比DC Chopper、泄流晶闸管、CMOA设备抑制子模块过压的性能,在VSC直流侧分别安装3种耗能设备,并进行VSC3交流系统三相金属性接地故障试验。

3.2.2 基于DC Chopper的技术方案

仿真波形如图7所示,结果显示VSC3三相接地故障时VSC子模块电容电压最大值降到2.73kV,VSC直流侧端口电压最大值降为523kV,故障消失后,系统恢复运行。同时可以看出DC Chopper转移效果快,也反映出对Chopper电阻的要求高,考虑到DC Chopper的经济成本较高,对于柔性直流输电系统可适当引入使用,对于特高压直流大容量输电系统而言,电阻要求大,其经济成本过高。

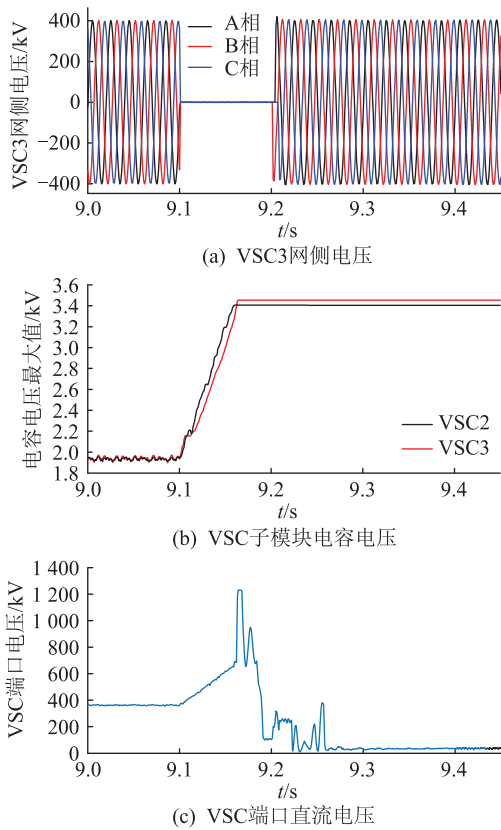


图6 无耗能设备时 VSC3 三相交流接地故障仿真波形
Fig.6 Simulation waveforms of three-phase AC fault in VSC3 without energy-consuming equipments

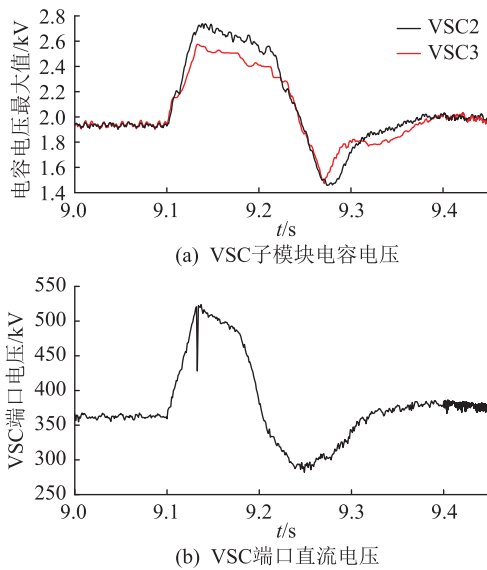


图7 配置 DC Chopper 时 VSC3 三相接地故障仿真波形
Fig.7 Simulation waveforms of three-phase AC fault in VSC3 with DC Chopper

3.2.3 基于泄流晶闸管的技术方案

仿真波形如图 8 所示,结果显示 VSC3 三相接地故障后,VSC 子模块的电容电压最大值降到 2.74 kV,VSC 直流侧的端口电压最大值降为 521 kV,整流侧移相后直流线路电流和晶闸管电流降为零,实

现晶闸管关断,系统通过一次重启实现交流故障穿越。

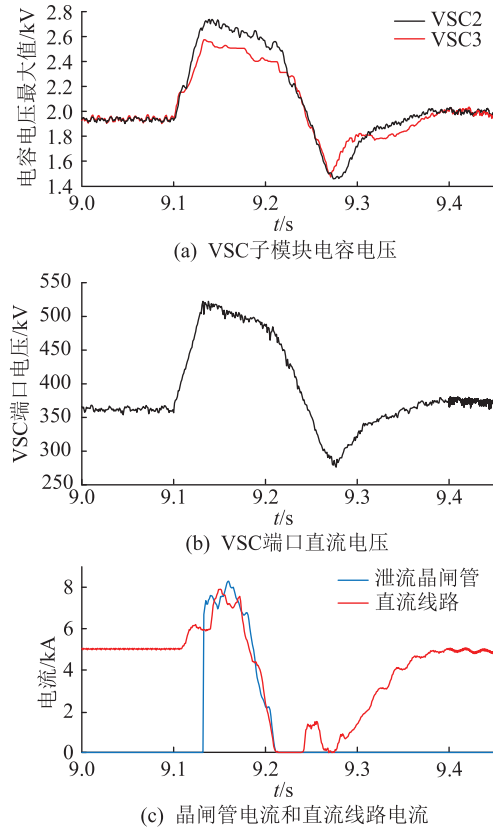
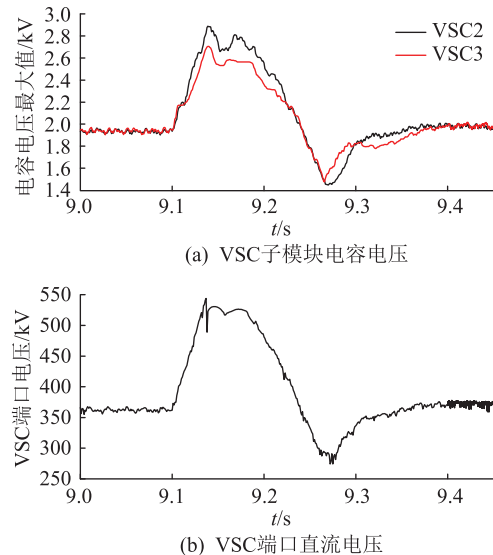


图8 配置泄流晶闸管时 VSC3 三相接地故障仿真波形
Fig.8 Simulation waveforms of three-phase AC fault in VSC3 with thyristor

3.2.4 基于 CMOA 的技术方案

仿真波形如图 9 所示,结果显示子模块电容电压最大值降低至 2.88 kV,VSC 直流侧端口电压最大值降为 543 kV,故障消失后可以快速恢复运行,可靠穿越交流三相短路故障,CMOA 固定元件的能量达到了 165 MJ,该能量可作为 CMOA 设计依据。



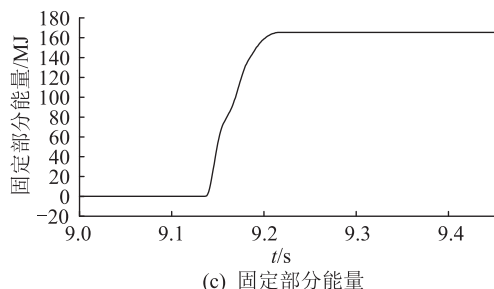


图9 配置 CMOA 时 VSC3 三相接地故障仿真波形

Fig.9 Simulation waveforms of three-phase AC fault in VSC3 with CMOA

3 种耗能设备的仿真结果如表 2 所示,结果表明 3 种方案均可实现 VSC 交流故障穿越。结合工程实际应用,综合考虑耗能设备对子模块电容过压抑制效果、工程应用的经济成本及工程实现难度,CMOA 不仅能满足功率耗散性能要求,而且经济成本较其他方案低,工程实现技术难度也较低,更适用于受端混联 LCC-VSC 特高压直流输电系统。

表 2 3 种耗能设备仿真结果

Table 2 Simulation results of three energy-consuming equipments

技术方案	VSC3 子模块 电容电压 最大值/kV	VSC2 子模块 电容电压 最大值/kV	VSC 端口电 压最大值/kV
DC Chopper	2.58	2.73	523
泄流晶闸管	2.58	2.74	521
CMOA	2.71	2.88	543

4 结语

文中提出利用 DC Chopper、泄流晶闸管、CMOA 来抑制 VSC 子模块电容电压的受端混联 LCC-VSC 直流输电系统交流故障穿越方法,搭建 PSCAD 模型进行仿真验证。结果表明,3 种耗能设备均可有效降低交流故障穿越过程中的子模块电容电压。从工程应用及经济性角度出发,泄流晶闸管会导致故障穿越过程中功率中断且工程中性能检测及巡检难度大,DC Chopper 在大容量输电系统工程背景下经济成本高,CMOA 方案能够兼顾经济效益和性能需求,更适用于受端混联 LCC-VSC 特高压直流输电系统的工程应用。

本文得到国网电力科学研究院有限公司科技项目“±800 kV 混合级联多端直流输电系统控制保护关键技术及应用研究”(JS1900544)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 徐政,肖晃庆,张哲任,等. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机

械工业出版社,2016:7-10.

XU Zheng, XIAO Huanqing, ZHANG Zheren, et al. Flexible direct current transmission system [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2016:7-10.

[2] 张泽宁,孟令军,王越杨. 基于非接触式行波采集的分布式高压直流故障测距方法[J]. 电网与清洁能源,2020,36(4):55-59.

ZHANG Yining, MENG Lingjun, WANG Yueyang. A fault location method for distributed HVDC high resistance fault based on non-contact traveling wave collecting [J]. Power System and Clean Energy, 2020,36(4):55-59.

[3] 熊华强,杨程祥,马亮,等. 含分层接入特高压直流的交直流混联电网机电-电磁暂态混合仿真研究[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(24):145-153.

XIONG Huaqiang, YANG Chengxiang, MA Liang, et al. Electromechanical-electromagnetic transient hybrid simulation of an AC/DC hybrid power grid with UHVDC hierarchical connection mode [J]. Power System Protection and Control, 2020,48(24):145-153.

[4] 董朝阳,吉攀攀,冯敏,等. 基于 LCC-FHMMC 混合直流输电的控制策略研究及试验验证[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(13):148-155.

DONG Chaoyang, JI Panpan, FENG Min, et al. Control strategies and experimental verification for hybrid HVDC system based on LCC and FHMMC [J]. Power System Protection and Control, 2019,47(13):148-155.

[5] 李晓华,张陈泽宇,蔡旺延,等. 基于三相同时刻采样值算法的 HVDC 换相失败预测改进[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(20):170-176.

LI Xiaohua, ZHANG Chenzeyu, CAI Wangyan, et al. Improvement of HVDC CFPREV based on a three phase simultaneity sampling values algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2020,48(20):170-176.

[6] 郭知非,郑秀波,姚文峰. 多直流馈入受端电网交直流相互影响分析框架[J]. 南方能源建设,2020,7(1):101-106.

GUO Zhifei, ZHENG Xiubo, YAO Wenfeng. AC/DC interaction analysis framework for load center power grids with multiple HVDC infeeds [J]. Southern Energy Construction, 2020,7(1):101-106.

[7] TORRES-OLGUIN R E, GARCES A. Grid integration of offshore wind farms using a hybrid HVDC composed by an MMC with an LCC-based transmission system [J]. Energy Procedia, 2017, 137:391-400.

[8] 赵文强,宣佳卓,陆翌,等. 适用于常规直流改造的混合直流输电系统主电路拓扑研究[J]. 电力自动化设备,2018,38(12):186-193.

ZHAO Wenqiang, XUAN Jiazhao, LU Yi, et al. Research on circuit topology of hybrid HVDC system suitable for refurbishing existing LCC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,38(12):186-193.

[9] 赵文强,高得力,马云龙,等. 基于混合式 MMC 的混合高压直流输电系统启动策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(7):

- 62-70.
ZHAO Wenqiang, GAO Deli, MA Yunlong, et al. Startup strategy of hybrid HVDC transmission system based on hybrid MMC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42 (7): 62-70.
- [10] 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.
- [11] 杨硕, 郑安然, 彭意, 等. 混合级联型直流输电系统直流故障特性及恢复控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 166-172, 179.
YANG Shuo, ZHENG Anran, PENG Yi, et al. DC fault characteristic analysis and recovery control strategy for hybrid cascaded HVDC system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 166-172, 179.
- [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] 王国英, 贾一凡, 邓娜, 等. 应用于海上风电接入的 VSC-HVDC 系统主网侧交流故障穿越方案[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 146-154.
WANG Guoying, JIA Yifan, DENG Na, et al. Grid side fault ride through solution for offshore wind connection with VSC-HVDC [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 146-154.
- [14] 李文津, 汤广福, 康勇. 含动态直流泄能电阻的 MMC-HVDC 提高风电场低电压穿越能力研究[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1127-1135.
LI Wenjin, TANG Guangfu, KANG Yong. Improving low voltage ride through capability of wind farm grid-connected via dynamic chopper controlled breaking resistor based MMC-HVDC transmission system [J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1127-1135.
- [15] 曹帅, 向往, 姚良忠, 等. 风电经混合型 MMC-HVDC 并网的交直流故障穿越策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 37-43, 49.
CAO Shuai, XIANG Wang, YAO Liangzhong, et al. AC and DC fault ride-through strategies for wind power integration via hybrid MMC-HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 37-43, 49.
- [16] 戴金水, 朱森. VSC-MTDC 联网风电场的交流故障穿越控制[J]. 电气自动化, 2016, 38(1): 26-30.
DAI Jinshui, ZHU Miao. A control strategy for AC fault ride-through of wind farm integration through VSC-MTDC [J]. Electrical Automation, 2016, 38(1): 26-30.
- [17] 李桂源, 黄伟煌, 曹润彬, 等. 特高压混合多端直流系统的 VSC 交流故障穿越方法及装置: CN110492519A [P]. 2019-11-22.
LI Guiyuan, HUANG Weihuang, CAO Runbin, et al. VSC alternating current fault ride-through method and device of extra-high voltage hybrid multi-terminal direct current system: CN110492519A [P]. 2019-11-22.
- [18] 王毅, 付媛, 苏小晴, 等. 基于 VSC-HVDC 联网的风电场故障穿越控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 150-159.
WANG Yi, FU Yuan, SU Xiaoqing, et al. Fault ride-through control strategy of wind farm integrated with VSC-HVDC [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 150-159.
- [19] 洪潮, 熊卿, 刘斌, 等. 一种混合多端直流输电系统交流侧故障穿越控制方法: CN105896585A [P]. 2016-08-24.
HONG Chao, XIONG Qing, LIU Bin, et al. AC side fault ride-through control method for hybrid multi-terminal DC transmission system: CN105896585A [P]. 2016-08-24.
- [20] 徐政, 王世佳, 李宁臻, 等. 适用于远距离大容量架空线路的 LCC-MMC 串联混合型直流输电系统[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 55-63.
XU Zheng, WANG Shijia, LI Ningcan, et al. A LCC and MMC series hybrid HVDC topology suitable for bulk power overhead line transmission [J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 55-63.
- [21] 柏传军, 赵文强, 汪楠楠, 等. 一种混合型直流输电系统受端交流侧故障处理方法: CN106058826A [P]. 2016-10-26.
BAI Zhuanjun, ZHAO Wenqiang, WANG Nannan, et al. Method for handling failure of alternating current side of inverter side of mixed-type direct current transmission system: CN106058826A [P]. 2016-10-26.
- [22] 董云龙, 包海龙, 田杰, 等. 柔性直流输电控制及保护系统[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 89-92.
DONG Yunlong, BAO Hailong, TIAN Jie, et al. Control and protection system for VSC-HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 89-92.
- [23] 徐雨哲, 徐政, 张哲任, 等. 基于 LCC 和混合型 MMC 的混合直流输电系统控制策略[J]. 广东电力, 2018, 31(9): 13-25.
XU Yuzhe, XU Zheng, ZHANG Zheren, et al. Control strategy of hybrid DC transmission system based on LCC and hybrid MMC [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9): 13-25.
- [24] 王英沛. 柔性多端直流对交流系统的故障穿越控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
WANG Yingpei. Research of the AC fault ride-through control of VSC-MTDC [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [25] 刘均鹏. 基于 VSC-HVDC 联网的风电场故障穿越控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
LIU Junpeng. Research on fault ride through control strategy of wind farm connected grid via VSC-HVDC [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.

- [26] 杨艳晨,郭剑波,王姗姗,等. 柔性直流电网直流过电压分析及控制策略研究[J]. 电网技术,2019,43(5):1586-1592.
YANG Yanchen, GUO Jianbo, WANG Shanshan, et al. Analysis and control strategy of DC overvoltage in MMC-HVDC grid [J]. Power System Technology, 2019, 43(5):1586-1592.
- [27] 李乃一,陈俊,任广振,等. 一起柔性直流输电电缆双极短路故障分析[J]. 浙江电力,2020,39(10):28-35.
LI Naiyi, CHEN Jun, REN Guangzhen, et al. Analysis of a bipolar short circuit fault of VSC-HVDC transmission cables [J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(10):28-35.
- [28] 肖超,韩伟,李琼林,等. 柔性直流输电系统交流侧线路继电保护适应性研究[J]. 智慧电力,2020,48(4):1-8.
XIAO Chao, HAN Wei, LI Qionglin, et al. Adaptability of MMC-HVDC system on relay protection of AC transmission lines [J]. Smart Power, 2020, 48(4):1-8.
- [29] 卢东斌,黄华,潘卫明,等. 一种旁通晶闸管阀组巡检方法和控制装置:CN108258715A [P]. 2018-07-06.
LU Dongbin, HUANG Hua, PAN Weiming, et al. Bypass thyristor valve group inspection method and control device: CN108258715A [P]. 2018-07-06.
- [30] 葛健,张磊,张春合,等. 一种可控避雷器的控制方法和系统:CN108448534A [P]. 2018-08-24.
GE Jian, ZHANG Lei, ZHANG Chunhe, et al. Control method and system of controllable arrester: CN108448534A [P]. 2018-08-24.

作者简介:



王冰倩

王冰倩(1991),女,硕士,工程师,从事直流输电控制保护工作(E-mail: wangbq@nrec.com);

赵文强(1985),男,硕士,高级工程师,从事直流输电控制保护及电力电子技术应用工作;

侍乔明(1987),男,博士,工程师,从事直流输电控制保护及电力系统稳定控制工作。

Fault ride-through method of inverter hybrid cascade LCC-VSC UHVDC transmission system

WANG Bingqian, ZHAO Wenqiang, SHI Qiaoming, TIAN Jie, CHANG Haotian
(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: In a hybrid cascade UHVDC transmission system which the receiving end consists of a line commutated converter (LCC) in series with multiple parallel voltage source converters (VSC), the VSC has sub-module overvoltage problems when the AC grid fault. A method to suppress the overvoltage of the sub-module by installing energy-consuming devices on the DC side of VSC is proposed. The fault ride-through principles and strategies based on energy-consuming devices as DC Chopper, thyristor and controllable metal oxide surge arrester (CMOA) are compared and analyzed. Based on the PSCAD/EMTDC simulation platform, a hybrid cascade UHVDC simulation model containing the actual control and protection host program is built, and the AC fault ride-through characteristics based on three energy-consuming devices are compared and analyzed. The results show that the method of installing energy-consuming devices on the DC side of the VSC can effectively suppress the overvoltage of the sub-module and achieve reliable AC fault ride-through. The CMOA scheme has the advantages of simple control principle and high reliability, and it is suitable to be the energy-consuming devices for the hybrid cascade UHVDC transmission system which the receiving end consists of LCC and multiple VSC.

Keywords: line commutated converter (LCC); voltage source converters (VSC); fault ride-through; DC Chopper; thyristor; controllable metal oxide surge arrester

(编辑 方晶)