

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201354

# LCC与VSC级联的特高压混合直流输电系统控制策略

彭忠<sup>1</sup>, 孙攀磊<sup>1</sup>, 韩伟<sup>2</sup>, 李泰<sup>1</sup>, 赵静<sup>1</sup>

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 受端为电网换相换流器(Line Commutated Converter, LCC)与电压源换流器(Voltage Source Converters, VSC)级联的特高压混合直流输电系统能够抑制受端LCC换相失败导致的功率传输中断, 系统接线方式和控制方式变得灵活和多样化。针对受端交流系统故障穿越, 提出了基于直流电压与受端交流电压的低压限流控制策略和LCC限压恢复策略。针对多换流器的稳定运行, 提出了多换流器功率协调控制策略和VSC在线投退策略。针对直流线路故障穿越, 提出了基于直流电压偏差控制的穿越策略。基于电磁暂态程序(PSCAD/EMTDC)搭建了LCC与VSC级联的特高压混合直流输电系统仿真模型。仿真结果验证了所述控制策略的有效性。

**关键词:** 特高压混合直流输电; 交流系统故障穿越; 功率协调控制; 换流器投退; 直流线路故障穿越

## Control strategy of a hybrid UHVDC transmission system cascaded by LCC and VSC

PENG Zhong<sup>1</sup>, SUN Panlei<sup>1</sup>, HAN Wei<sup>2</sup>, LI Tai<sup>1</sup>, ZHAO Jing<sup>1</sup>

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. State Grid Henan Electric Power Company Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** A hybrid UHVDC transmission system cascaded by a Line Commutated Converter (LCC) and Voltage Source Converters (VSC) at the receiving station can prevent power interruption caused by commutation failure of the LCC at receiving station. The connection control modes become more flexible and diversified. Current which depends on a low voltage control strategy based on the DC and AC voltages of the receiving terminal and an LCC for the limiting voltage control strategy are proposed for AC fault crossing at the receiving station. To obtain stable operation of multi-converters, a power coordination control strategy of multi-converters and a VSC online inputting/quitting strategy are proposed. A crossing strategy based on DC voltage deviation control is proposed for DC line fault crossing. A simulation model is constructed for the hybrid UHVDC system cascaded by LCC and VSC using an electromagnetic transient program (PSCAD/EMTDC). The simulation results show the validity of proposed control strategies.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China "Research on DC Line Fault Protection and Self-adaptive Coincidence Method for Hybrid Multi-terminal HVDC Transmission System" (No. 52170218000M).

**Key words:** hybrid UHVDC transmission; AC fault crossing; power coordinated control; converter inputting/ quitting; DC line fault crossing

## 0 引言

电网换相换流器(Line Commutated Converter, LCC)具有通流能力大、制造成本低、技术成熟可靠等优点<sup>[1]</sup>, 被广泛应用于高压/特高压直流输电系统, 在我国西电东送、电网互联工程中发挥着重要

作用。但LCC存在的显著缺陷是: 逆变站交流系统扰动或故障时, LCC可能会发生换相失败<sup>[2-4]</sup>, LCC输送的功率被短时中断, 影响交流系统的稳定性。近年来, 接入我国华东和广东地区的高压/特高压直流工程逐渐增多, 系统多馈入短路比逐渐减小, 换相失败风险增大, 对系统稳定运行形成较大的挑战。

柔性直流输电技术采用电压源换流器(VSC)拓扑, 具有无换相失败、有功功率和无功功率独立控制、谐波小、可向无源系统供电、易构造多端系统

**基金项目:** 国家电网有限公司总部科技项目“混合多端直流输电线路故障保护与自适应重合方法研究”(52170218000M)

等优点<sup>[5-8]</sup>。但柔性直流输电的容量还无法与特高压直流媲美, 另外为了解决直流线路故障穿越问题, 柔性直流输电系统不得不采用具有自清除能力的换流器拓扑或者配置直流断路器<sup>[9-11]</sup>, 导致建设成本较高, 损耗较大。

混合直流输电吸收 LCC 与 VSC 的优点<sup>[12-17]</sup>, 为消除上述缺陷提供了新的解决方案。文献[18]提出了一种送端为 LCC, 受端为 LCC 与 VSC 级联的特高压混合直流输电拓扑。在直流线路故障时, 受端 LCC 能够阻断 VSC 的短路电流, 因此 VSC 可选用技术成熟、成本和损耗相对较小的半桥型模块化多电平换流器(MMC)拓扑。在受端交流系统故障时, LCC 可能发生换相失败, 但 VSC 仍然可以输送功率, 不会导致系统功率中断, 同时 VSC 的无功支撑有利于抑制 LCC 换相失败。综上分析, LCC 与 VSC 级联的特高压混合直流输电技术具有一定的应用前景。

LCC 与 VSC 级联的混合直流输电系统由多个不同类型的换流器组合而成, 如何协调控制多个换流器稳定运行, 并且能适应各种运行方式成为一个挑战。MMC 的绝缘栅双极型晶体管(IGBT)过流能力小, 子模块电容也属于敏感性元件, 因此交流系统故障穿越和直流线路故障穿越成为研究重点。文献[19]提出了一种混合多端直流的非线性下垂控制策略, 由于混合多端直流的运行方式较多, 非线性控制参数的整定将变得非常困难。文献[20]提出了一种适用于海上风电并网的混合多端直流系统主从控制策略, 文献未验证运行方式转换时该策略的有效性。文献[21]提出了一种混合多端直流系统的多端协调控制、启停/投退控制顺序。文献[22]提出了一种全桥和半桥混合拓扑的线路故障重启策略。文献[23]对比研究了受端定电压与送端定电压的混合直流输电交流系统故障响应。文献[24]研究了 LCC 与 VSC 混合级联直流输电拓扑低压端旁通断路器(BPS)合闸的暂态电流抑制技术。现有文献对于 LCC 与 VSC 级联的混合直流输电系统的多换流器功率协调控制技术、受端交流系统故障穿越及恢复技术、直流线路故障穿越策略缺乏深入研究。

本文基于受端 LCC 与 VSC 级联的特高压混合直流输电系统, 提出了多换流器功率协调控制策略、VSC 投退控制策略。针对交流系统故障穿越, 提出了基于直流电压与受端交流电压的低压限流控制策略和 LCC 限压恢复控制策略, 并提出了基于直流电压偏差控制的直流线路故障重启策略。搭建了电磁暂态(PSCAD/EMTDC)仿真模型, 验证了控制策略的有效性。

## 1 接线方案

受端 LCC 与 VSC 级联的特高压混合直流输电系统的单极拓扑结构如图 1 所示。送端为 LCC, 受端高阀组为 LCC, 低阀组为三个并联的 VSC。为满足高压大容量的需求, VSC 选用半桥型 MMC 拓扑。受端 400 kV 母线与中性线之间配置大能量的耗能装置, 防止受端交流系统故障穿越过程中子模块电容过压闭锁。VSC 的直流侧配置高速直流开关(HSS)和具备灭弧能力的中性母线开关(NBS)。如果受端 LCC 发生换相失败, VSC 将支撑 400 kV 电压, 因此可抑制功率传输中断。如果直流线路发生故障, 受端 LCC 能够阻断 VSC 馈入的短路电流, 因此 VSC 无需闭锁跳闸。虽然 VSC 不能降压运行, 但 LCC 具备快速降压能力, 因此在线路绝缘降低时, 该系统可以降压运行。

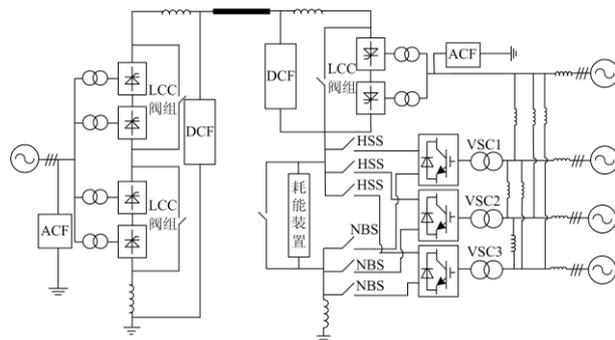


图 1 系统拓扑结构

Fig. 1 System topology

## 2 协调控制策略

文献[23]研究表明: 对于送端为 LCC, 受端为 VSC 的混合直流输电系统, 系统直流电压控制权归属送端还是受端对受端交流系统故障穿越性能影响不大。考虑交直流系统故障穿越性能等因素, 送端采用定功率/电流控制模式; 受端 LCC 采用定电压控制模式, 控制 LCC 直流电压; 三个 VSC 采用电压主从控制方式, 优先级最高的 VSC 为定直流电压控制模式, 控制三个 VSC 的直流电压, 另两个 VSC 为定有功功率控制模式。稳态工况下, 受端 LCC 与 VSC 直流电压相等, 投运的 VSC 功率水平相同。在 VSC 投退、系统启停过程中, 定电压控制模式的 VSC 自动平衡有功功率变化, 定有功功率控制模式的 VSC 通过 VSC 功率协调控制器重新分配有功功率参考值, 使得 VSC 功率平稳变化。图 2 为 VSC 功率协调控制框图, 主要包括: 指令跟随环节、协调环节和限幅环节。指令跟随环节由上级控制模块输出的  $I_{ord}$  与三个 VSC 的直流电流参考值之和作差, 输入至 PI 控制器, 使得 VSC 直流电流参考值

之和与  $I_{ord}$  相等。PI 控制器的输出乘以协调环节的协调系数  $K_i$ ，计算出三个 VSC 的直流电流参考值。协调环节包括协调系数斜率发生器和速率锁存器。图 2 中  $dbl_{k_i}$  为第  $i$  个 VSC 的解锁信号，当  $dbl_{k_i}=1$  时，第  $i$  个 VSC 斜率发生器使能。斜率发生器的输入  $K_{nowi}$  满足式(1)。

$$K_{nowi} = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{i=1}^3 F(blk_i)}, & blk_i = 0 \\ 0, & blk_i = 1 \end{cases} \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

式中： $K_{nowi}$  为第  $i$  个 VSC 的当前功率协调系数； $blk_i$  为第  $i$  个 VSC 的闭锁信号； $F(blk_i)$  为第  $i$  个 VSC 的闭锁函数。

$$F(blk_i) = \begin{cases} 0, & blk_i = 1 \\ 1, & blk_i = 0 \end{cases} \quad (i=1,2,3) \quad (2)$$

$$K_{pasti}(n) = K_{nowi}(n-m) \quad (i=1,2,3) \quad (3)$$

式中： $K_{pasti}(n)$  为在  $n$  时刻第  $i$  个 VSC 的历史功率协调系数； $K_{nowi}(n-m)$  为在  $n-m$  时刻第  $i$  个 VSC 的当前功率协调系数。

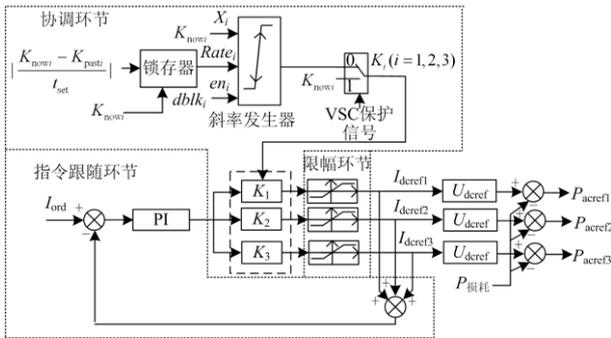


图 2 VSC 功率协调控制框图

Fig. 2 Power coordination controlling scheme of VSC

由式(1)和式(2)可知，当第  $i$  个 VSC 闭锁时，对应  $K_{nowi} = 0$ 。当只有 1 个 VSC 解锁运行时，该 VSC 的功率协调系数为 1，其余为 0；当两个 VSC 解锁运行时，对应 VSC 的功率协调系数  $K_{nowi}=1/2$ ，未解锁 VSC 的功率协调系数为 0；当三个 VSC 解锁运行时，每个 VSC 的功率协调系数  $K_{nowi} = 1/3$ 。速率锁存器的锁存条件为  $K_{nowi}(n) \neq K_{nowi}(n-m)$ 。当  $K_{nowi}$  未再次刷新时，斜率发生器的速率依然为锁存时刻的变化速率。对于 VSC 故障闭锁或者紧急闭锁的工况，该 VSC 收到保护信号后，功率协调系数  $K_i$  直接置为 0，其余 VSC 的功率协调系数变为新的  $K_{nowi}$ ，在这个过程中无斜坡变化过程。限幅环节对 VSC 直流电流参考值进行最大值和最小值限幅。限幅环节生成的电流参考值乘以 VSC 的直流电压参

考值，减去稳态有功损耗后，输出 VSC 换流变网侧有功功率参考值。

### 3 VSC 换流器投退控制

控制系统接收到 VSC 投入指令后，闭合 VSC 低压侧的中性母线开关。当中性母线开关闭合后，闭合 VSC 换流变网侧交流断路器，然后闭合软启动电阻的旁路开关，并启动 VSC 主动充电功能。当子模块电容电压达到额定值后，以定直流电压控制模式解锁该 VSC。当 VSC 的高速直流开关端口电压小于阈值后，闭合高速直流开关，随后，VSC 切换为定有功功率控制模式，VSC 功率协调控制器将升高该 VSC 的有功功率，同步降低其余 VSC 的功率。

控制系统接收到退出控电压 VSC 的指令后，该换流器切换为定有功功率控制模式，直流电压主从控制中下一优先级的 VSC 切换为定直流电压控制模式。VSC 功率协调控制器降低该 VSC 有功功率，并同步升高其余 VSC 有功功率。当 VSC 直流电流小于最小限值后，闭锁 VSC，断开高速直流开关和换流变网侧交流断路器。交流断路器断开后，断开中性母线开关，完成了 VSC 的隔离。

半桥型 MMC 不具备快速降压能力，更不具备输出零电压的能力，因此第一个 VSC 投入过程中需要送端强制移相配合，才能将受端的低阀组旁通断路器断开。第一个 VSC 接收到投入指令后，执行充电操作。当子模块电容电压达到额定后，VSC 以定电压控制模式解锁。送端收到 VSC 就绪信号后强制移相，断开低阀组旁通断路器，投入低阀组 LCC。受端检测到极线为零电流状态时，断开低阀组旁通断路器。旁通断路器断开后，闭合高速直流开关。高速直流开关闭合后送端解除强制移相，系统恢复功率。

系统收到最后一个 VSC 计划退出指令后，送端执行强制移相。受端检测到极线为零电流状态时，闭锁 VSC，断开高速直流开关、交流断路器和中性母线开关。高速直流开关断开后，闭合低阀组旁通断路器。送端接收到受端的低阀组旁通断路器闭合状态时，闭合低阀组旁通断路器，退出低阀组 LCC，然后解除强制移相，系统恢复功率。

当 VSC 收到保护退阀组信号时，故障 VSC 即刻闭锁，直流电流向子模块电容充电。当直流电流小于阈值时，断开高速直流开关和交流断路器。交流断路器断开后，断开中性母线开关。VSC 功率协调控制器收到 VSC 保护信号后，阶跃式调整协调系数，快速增大其余 VSC 的有功功率，抑制系统功率盈余。当最后一个 VSC 收到保护退阀组信号时，需要送端

强制移相配合低阀组旁通断路器合闸, 最后一个 VSC 保护退出策略与计划退出策略相似, 不再赘述。

## 4 受端交流系统故障穿越

### 4.1 故障过程分析

当受端 LCC 与 VSC 连接的交流系统之间存在较强耦合时, 交流系统故障可能引起 LCC 换相失败以及 VSC 子模块电容严重过电压, 从而导致 VSC 过压闭锁。

$$P_{ac} = \frac{U_s U_c \sin \delta}{X} \quad (4)$$

式中:  $P_{ac}$  为 VSC 输出的有功功率;  $U_s$  为交流母线电压;  $U_c$  为换流器输出电压;  $\delta$  为  $U_s$  与  $U_c$  的夹角;  $X$  为换流器与交流母线间的连接电抗。

$$U_{dc} = \sqrt{\frac{2}{C_{eq}} \int (P_{dc} - P_{ac}) dt} \quad (5)$$

式中:  $U_{dc}$  表示忽略损耗时 VSC 的直流电压;  $C_{eq}$  为 VSC 等效电容;  $P_{dc}$  为流入 VSC 的直流功率。由式(4)和式(5)可知, 受端交流系统故障引起 LCC 发生换相失败, 直流电流增大, 流入 VSC 的直流功率  $P_{dc}$  增大, 此时 VSC 的交流电压  $U_s$  减小, 输出的有功功率  $P_{ac}$  减少, 导致 VSC 出现较大的盈余功率,  $U_{dc}$  增大, VSC 子模块电容电压升高。限制 VSC 子模块电容过电压的总体思路可包括: 消耗 VSC 盈余功率和送端移相限制过电压。受端交流系统故障时可能同时出现 VSC 过电压和 LCC 换相失败, 送端难以通过电气量识别故障, 只能通过站间通信接收故障信号, 因此送端移相限制过电压方案要求非常高的站间通信可靠性和较短的通信延时, 对于远距离输电系统其适用性不强。消耗 VSC 盈余功率的主要方法包括: 可控避雷器耗能方案<sup>[24]</sup>和 DC chopper 耗能方案<sup>[25]</sup>。相对于集中式 DC chopper, 可控避雷器具有非线性电阻特性, 在交流系统故障清除后, 可控避雷器将自动转变为高电阻状态, 直流电流突变速率较小, 系统恢复时, 无过电压冲击, 本文选择可控避雷器作为耗能方案。

### 4.2 可控避雷器耗能方案

可控避雷器安装于 400 kV 母线和中性线平波电抗器阀侧, 如图 1 所示的耗能装置位置。可控避雷器结构<sup>[26]</sup>如图 3 所示。可控避雷器包含固定元件 MOA1 和受控元件 MOA2, 以及控制开关 K。

图 4 为可控避雷器伏安特性。区域 A 为稳态运行或子模块电容轻微过压区间。区域 B 表示可控避雷器开关 K 闭合, 伏安特性曲线 1 转化为曲线 2, 降低可控避雷器残压, 限制子模块电容过压。区域 C 为雷电过电压区间。

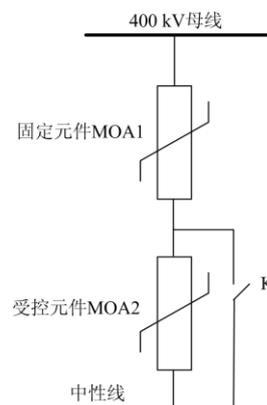


图 3 可控避雷器结构

Fig. 3 Structure of controllable arrester

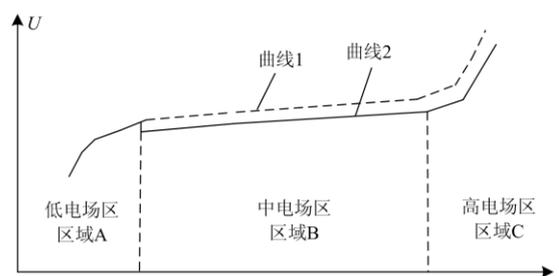


图 4 可控避雷器伏安特性

Fig. 4 Volt-ampere characteristics of the controllable arrester

可控避雷器的控制逻辑如图 5 所示。图中  $U_{dcVSC}$  为 VSC 直流电压,  $I_{ca}$  为可控避雷器电流。当受端交流系统发生故障导致 VSC 直流电压升高并超过阈值  $U_{set1}$  时, 闭合可控避雷器开关 K, 受控元件被旁路, 固定元件动作, 流入 VSC 的直流电流将大量转移至可控避雷器支路, 从而抑制子模块电容电压升高。故障消失后, VSC 正常输出功率, VSC 直流电压降低, 可控避雷器固定元件电压降至参考电压以下时, 可控避雷器只剩下泄漏电流。当 VSC 直流电压小于阈值  $U_{set2}$ , 并且可控避雷器电流降低至阈值  $I_{set1}$  后, 断开可控避雷器开关 K。

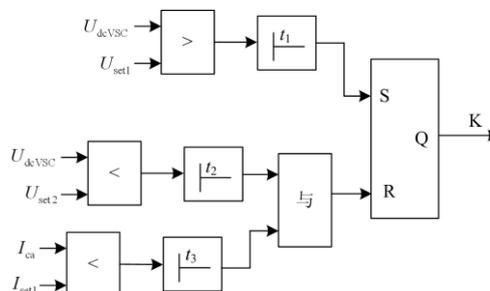


图 5 可控避雷器控制逻辑图

Fig. 5 Control logic of controllable arrester

### 4.3 低压限流控制策略

受端 LCC 与 VSC 交流系统之间存在一定程度的耦合时, 交流系统故障导致 LCC 发生换相失败, 极母线电压降低一半(典型值为 400 kV)。对于一般性故障(如单相接地), VSC 过电压水平较低, 极母线电压略高于半压水平。对于大功率运行工况下的严重故障(如三相接地), VSC 的盈余功率较大, VSC 过电压水平较高, 极母线电压由半压水平逐渐上升至较高水平, 常规的低压限流控制策略将无法大幅度限制直流电流, 使得耗能装置吸收能量较大。由式(4)可知, 交流电压跌落幅度越大, VSC 输出有功功率越小, VSC 的功率盈余量越大。根据交流电压正序幅值限制送端直流电流, 将可以减小 VSC 的功率盈余量, 并能够改善故障恢复性能。图 6 为基于直流电压与受端交流电压的低压限流控制策略。 $U_{acposmin}$  为受端各换流器交流母线正序电压最小值,  $U_{max}$  为电压最大值,  $U_{dc}$  为本站极母线电压,  $T_1 \sim T_4$  为电压惯性环节时间参数。 $I_{ord}$  为上级功能计算的直流电流参考值,  $U_{L1}$ 、 $I_{L1}$ 、 $U_{H1}$ 、 $U_{L2}$ 、 $I_{L2}$ 、 $U_{H2}$  为低压限流环节参数, 式(6)为低交流电压限流功能的数学函数。

$$I_{dcref} = \begin{cases} I_{ord}, & U_{acposmin} \geq U_{H2} \\ I_{L2} + \frac{I_{ord} - I_{L2}}{U_{H2} - U_{L2}} (U_{acposmin} - U_{L2}), & U_{L2} \leq U_{acposmin} < U_{H2} \\ I_{L2}, & U_{acposmin} < U_{L2} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中各变量的含义与图 6 相同,  $I_{dcref}$  为经过低压限流模块输出的直流电流参考值。当受端交流系统故障,  $U_{acposmin}$  减小至  $U_{H2}$  以下时, 低交流电压限流功能减小  $I_{dcref}$ 。交流系统故障清除后,  $U_{acposmin}$  增大, 低交流电压限流功能将增大  $I_{dcref}$ 。检测到当前电流参考值  $I_{dcref}(k)$  大于  $I_{dcref}(k-1)$  时, 表明故障已清除, 电压惯性环节切换为较大的时间常数(典型值为 30 ms), 减小恢复过程直流电流冲击。该策略在受端交流电压跌落幅度大的工况下, 大幅降低送端直流电流, 有利于减小可控避雷器能量; 在交流电压跌落幅度小的工况下, 小幅降低送端直流电流, 有利于提高故障清除后的系统恢复速度。

### 4.4 LCC 限压恢复策略

受端交流系统故障清除后, VSC 可能仍存在较大的过电压, 常规的 LCC 电压控制策略快速控制 LCC 电压至额定值, 在功率快速恢复过程中, 容易导致极母线出现较大过电压。图 7 为受端 LCC 的限压恢复控制策略,  $U_{refVSC}$  为 VSC 直流电压参考值,  $U_{VSC}$  为 VSC 直流电压,  $U_{db}$  为 VSC 直流电压偏差

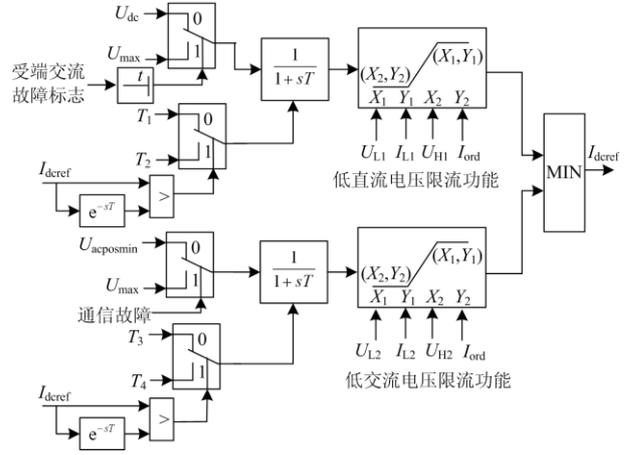


图 6 基于直流电压与受端交流电压的低压限流控制

Fig. 6 Current depending on low voltage control based on DC voltage and AC voltage of receiving terminal

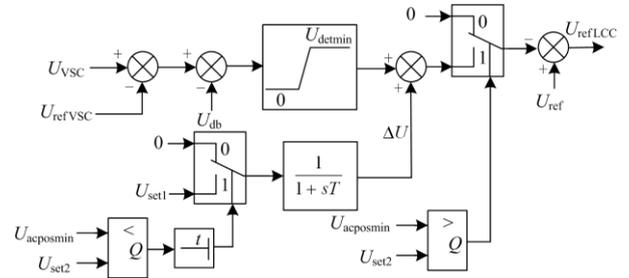


图 7 受端 LCC 限压恢复控制

Fig. 7 Limiting voltage control of LCC at receiving terminal

死区值,  $U_{db} > 0$ ,  $U_{detmin}$  为 LCC 允许的限压控制限值,  $U_{set1}$  为辅助限压增量,  $U_{set1} > 0$ ,  $\Delta U$  为经过平滑处理的辅助限压增量,  $U_{set2}$  为交流电压正常的判定阈值, 在交流电压恢复正常时启动该功能。 $U_{ref}$  为上级控制功能输出的 LCC 电压参考值。当  $U_{acposmin} > U_{set2}$  时, 表明交流系统故障已清除, 受端 LCC 的直流电压参考值为

$$U_{refLCC} = U_{ref} - (U_{VSC} - U_{refVSC} - U_{db}) - \Delta U \quad (7)$$

式(7)中各变量的含义与图 7 相同。等号右边第二项为故障清除后的 VSC 过电压量, 计及  $U_{db}$  可防止电压扰动对电压参考值的影响, 等号右边第三项为辅助限压项, 用于减小线路电感在系统快速恢复时造成送端极线过电压。当故障清除后,  $\Delta U$  由  $U_{set1}$  平滑变化至 0。该策略在故障恢复过程中有利于限制因 VSC 过电压和快速恢复功率造成的极母线过电压。

## 5 直流线路故障穿越

直流线路发生接地故障, 送端强制移相后, 受

端控功率 VSC 继续输出功率将导致控电压 VSC 反送功率。为防止控电压 VSC 功率反送, 基于直流电压偏差控制的直流线路故障穿越策略如图 8 所示。三个 VSC 都配置直流电压偏差控制器, 但电压裕度不一致。规定 VSC 换流变阀侧电流流向阀为正方向, 稳态工况下, VSC 向电网输送功率, 阀侧电流为负。当 VSC 收到线路保护信号后, 设置阀侧电流限制  $I_{\max}=0$ , 从而保证故障期间 VSC 有功功率不会反向。送端强制移相后, 流入受端的直流电流降为 0, VSC 直流电压降低, 控电压 VSC 输出有功功率降为 0。电压裕度较小的控功率 VSC 进入电压低限偏差控制模式, 输出有功功率降为 0 后, 另一个 VSC 也进入电压低限偏差控制模式, 最终 VSC 输出有功功率都降为 0。当送端解除强制移相后, VSC 直流电压逐步升高。电压裕度较大的 VSC 输出有功功率增大至额定值后转化为定有功功率控制模式。电压裕度较小的 VSC 随后恢复有功功率并转化为定功率控制模式。最后控电压 VSC 重新接管直流电压控制权恢复有功功率输出, 并取消 VSC 的  $I_{\max}=0$  限制。送端强制移相时, 受端 LCC 的电流几乎为 0, 受端 LCC 由定电压控制模式切换为定电流控制模式。送端解除强制移相后, 直流电流快速恢复至受端 LCC 电流参考值以上时, 受端 LCC 切换为电压控制模式, 控制 LCC 直流电压升高至目标值。

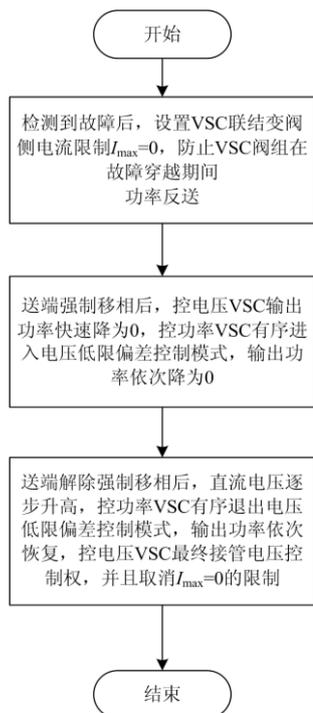


图 8 直流线路故障穿越策略

Fig. 8 DC line fault crossing strategy

## 6 仿真验证

基于 PSCAD/EMTDC 搭建图 1 所示特高压混合直流输电系统仿真模型, 系统额定直流电压为 800 kV, 额定直流电流为 5 kA。VSC 为半桥型 MMC, 桥臂子模块数为 210 个, 子模块电容为 18 mF, 桥臂电感为 50 mH, LCC 参数为特高压直流输电典型参数。受端 LCC 交流系统与 VSC 之间存在耦合。

### 6.1 系统启停

特高压混合直流输电系统启停过程如图 9 所示。受端控电压 VSC 最先解锁, VSC 直流电压从约 0.6 p.u. 阶跃至 0.85 p.u. 后, 斜坡升至 1 p.u. (400 kV)。由于直流线路未充电, 受端 LCC 电压被钳位至 -400 kV。随后另两个 VSC 解锁, 此时 VSC 有功功率为 0, 然后受端 LCC 解锁。最后送端解锁给线路充电, 直流电压升高至 800 kV, 直流电流斜坡升至 5 kA, VSC 直流电流同步上升。约 5.6 s 时刻, 送端开始降功率, 直流电流斜坡下降至最小限值后, 强制移相闭锁。受端 LCC 闭锁前投旁通对和闭合旁通断路器造成直流线路放电, 直流电压和电流出现持续时间约 300 ms 的低幅值高频振荡。VSC 收到 LCC 闭锁信号, 并且检测到直流电流小于最小限值后闭锁。在启停过程中, 直流电流和直流电压的冲击较小, 功率平稳变化, 表明 VSC 功率协调策略和系统启停顺序合理有效。

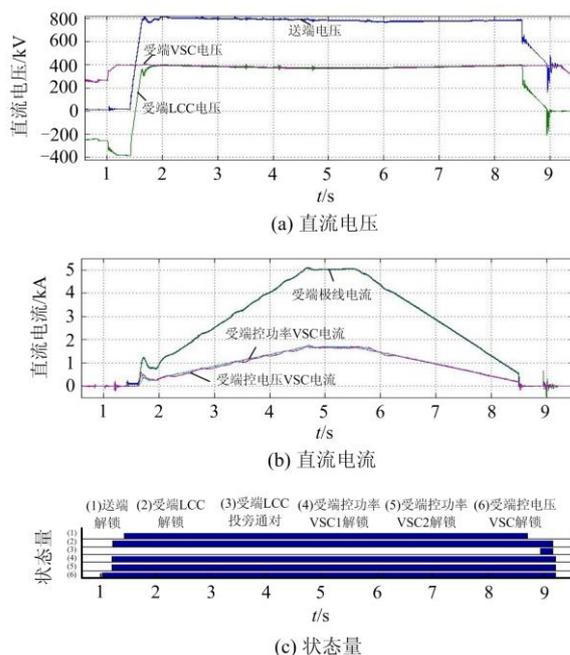


图 9 系统启停仿真波形

Fig. 9 Simulation wave of starting-up/shutting-down

### 6.2 VSC 投退

#### 6.2.1 常规单个 VSC 换流器投退

在已有两个 VSC 运行的工况下，控电压 VSC 的投退过程如图 10 所示。

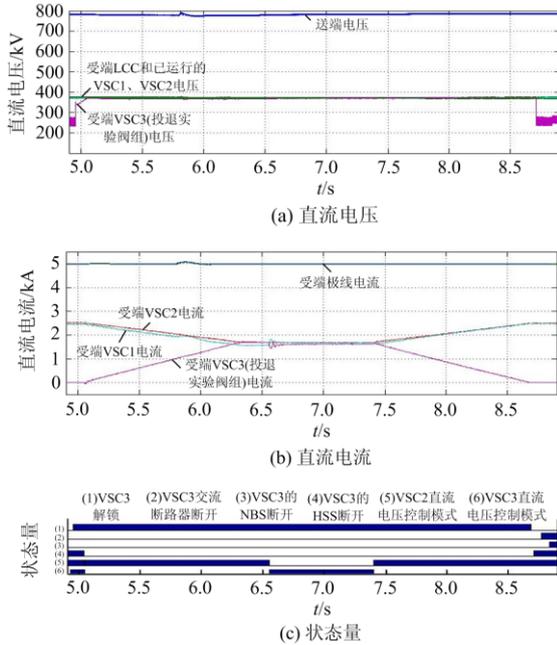


图 10 VSC 在线投退仿真波形

Fig. 10 Simulation of VSC on line inputting/quitting

VSC3(投退实验阀组) 投入前，闭合中性母线开关和网侧交流断路器，进行相关充电操作。以定电压控制模式解锁，直流电压上升至高速直流开关允许合闸的阈值内，闭合高速直流开关，并切换为定功率控制模式。在 VSC 功率协调控制器作用下，VSC3 直流电流平稳上升，另两个 VSC 电流同步下降。系统稳定后 VSC3 切换为定电压控制模式，VSC2 切换为定功率控制模式。控制模式切换时存在短时小扰动。控电压 VSC 退出时，需要切换为定功率控制模式，在 VSC 功率协调控制器作用下，直流电流斜坡下降，另两个 VSC 电流同步上升。当 VSC 电流小于最小限值后闭锁，断开高速直流开关，然后断开网侧交流断路器，最后断开中性母线开关。在控电压 VSC 投退过程中，直流电压和电流波动小，其余 VSC 功率平稳变化，表明 VSC 功率协调控制策略和阀组投退顺序合理有效。

#### 6.2.2 第一个 VSC 投入

第一个 VSC 投入过程如图 11 所示。初始状态为送端和受端 LCC 半压运行，直流电流为 4 kA。VSC 完成了充电后，约在 5.72 s 时刻，解锁 VSC。然后送端强制移相，并解锁送端低阀组，断开低阀组旁通断路器。直流极线电流变为 0 后，断开受端

低阀组旁通断路器，然后闭合高速直流开关。约 5.95 s 时刻送端解除强制移相，系统功率恢复，直流电压变为 800 kV，直流电流变为 2 kA。第一个 VSC 投入过程中，系统出现短时功率中断，未出现明显过电压或过电流冲击。

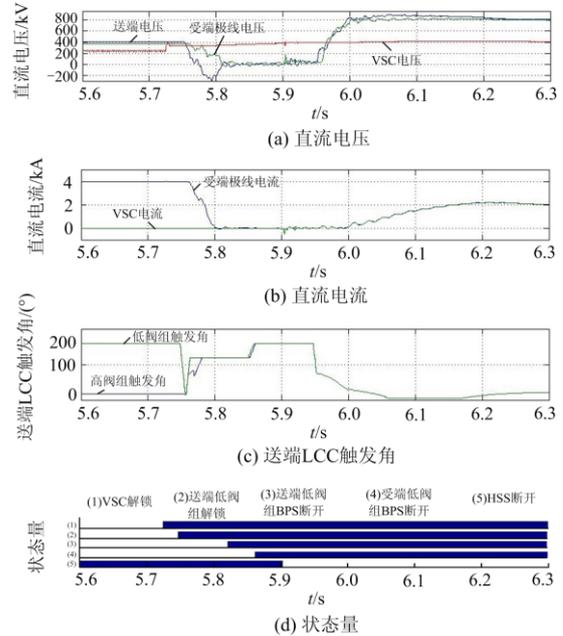


图 11 第一个 VSC 投入仿真波形

Fig. 11 Simulation wave of the first VSC inputting

#### 6.2.3 最后一个 VSC 退出

最后一个 VSC 退出过程如图 12 所示。初始状态为系统全压运行，直流电流为 2 kA。约在 2.43 s 时

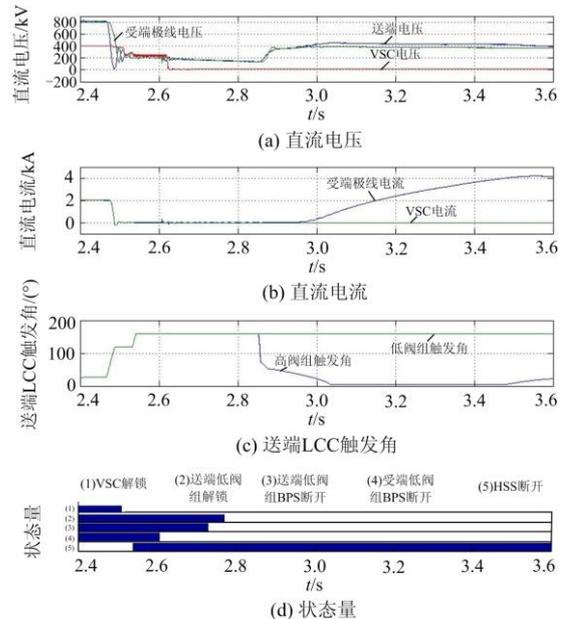


图 12 最后一个 VSC 退出仿真波形

Fig. 12 Simulation waveform of the last VSC quitting

刻, 送端强制移相, 直流电流迅速降为 0。约在 2.5 s 时刻, VSC 闭锁, VSC 直流电压下降到 250 kV 左右。随后高速直流开关断开, VSC 测量的直流电压变为 0。高速直流开关断开后, 受端低阀组旁通断路器闭合, 然后送端低阀组旁通断路器闭合, 闭锁送端低阀组。约在 2.85 s 时刻送端解除强制移相, 直流电流快速升高至 4 kA。最后一个 VSC 退出过程中, 系统出现短时功率中断, 未出现明显过电压或过电流冲击。

### 6.3 受端交流系统故障穿越

本文选取受端 LCC 与两个 VSC 级联运行方式下的 LCC 交流系统单相接地故障作为一般性故障, VSC 交流系统三相接地故障作为严重故障, 对比本文策略和传统策略的性能。

#### 6.3.1 受端 LCC 交流系统单相故障穿越

受端 LCC 与两个 VSC 运行方式下, LCC 交流系统发生单相接地故障穿越过程如图 13 所示, 故障持续 100 ms。

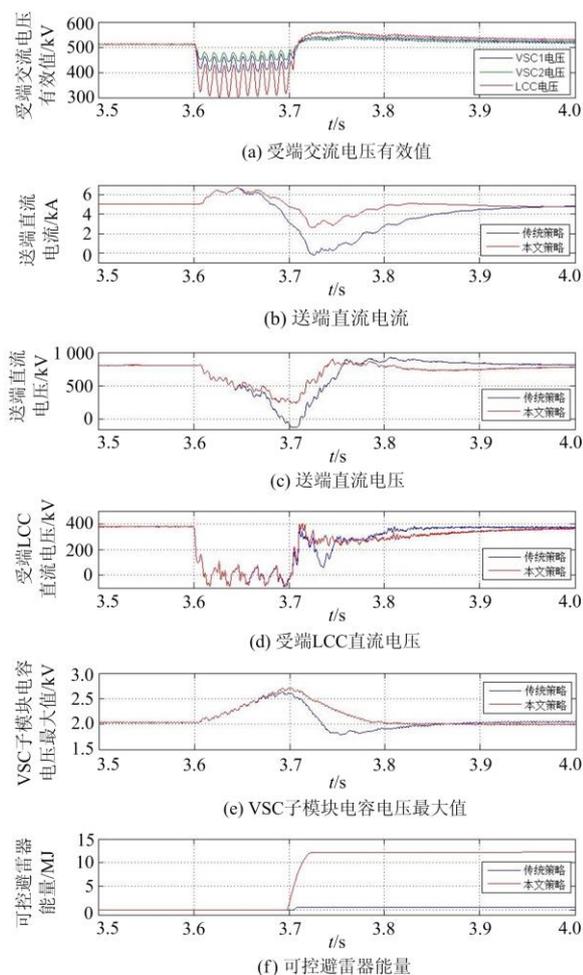


图 13 受端 LCC 交流系统单相故障仿真波形

Fig. 13 Simulation waveform of one-phase fault occurring in AC system connecting with LCC at receiving terminal

故障发生后, 受端 LCC 与 VSC 存在不同程度的交流电压跌落, LCC 直流电压跌落至 0 附近, 表明 LCC 发生了换相失败。送端直流电压跌落至 500 kV 后, 传统策略的低压限流控制功能动作, 降低直流电流参考值, 触发角增大, 导致直流电压大幅跌落, 直流电流跌落至 0, 故障清除后 210 ms 直流电流恢复至故障前 90%。本文策略根据受端交流电压跌落幅度降低直流电流参考值, 直流电流跌落至 2.6 kA, 故障清除后 94 ms 直流电流恢复至故障前的 90%。传统策略和本文策略的子模块电容电压峰值分别为 2.63 kV 和 2.7 kV, 可控避雷器能量分别为 0.7 MJ 和 12 MJ。实验结果表明对于一般性故障, 本文策略显著缩短了故障恢复时间, 小幅度增大了子模块电容电压峰值和可控避雷器能量。

#### 6.3.2 受端 VSC 交流系统三相故障穿越

受端 LCC 与两个 VSC 运行方式下, VSC1 交流系统发生三相接地故障过程如图 14 所示, 故障持

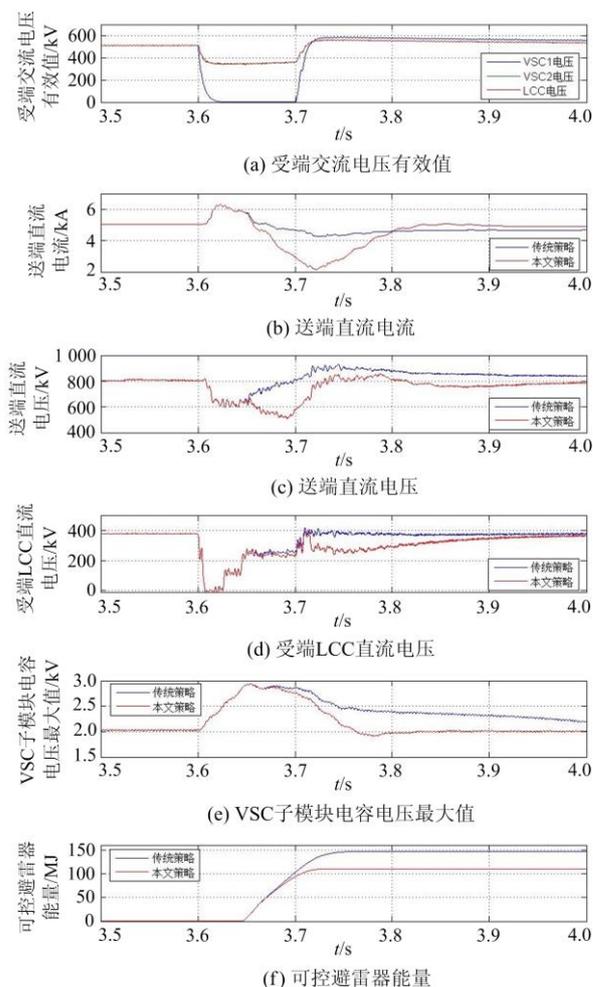


图 14 受端 VSC 交流系统三相故障仿真波形

Fig. 14 Simulation waveform of three-phase fault occurring in AC system connecting with VSC at receiving terminal

续 100 ms。故障发生后，VSC1 交流电压跌落至 0，LCC 与 VSC 交流电压跌落至 69%，LCC 直流电压短时跌落至 0 附近，表明 LCC 发生了短时换相失败。传统策略的送端直流电压大于 600 kV，低压限流控制功能未动作，直流电流最小值为 4.3 kA，可控避雷器能量达到 146 MJ，故障恢复时送端极线电压达到 931 kV。本文策略根据受端交流电压跌落幅度降低直流电流参考值，直流电流跌落至 2.2 kA，故障清除后 98 ms 直流电流恢复至故障前的 90%，可控避雷器能量达到 109 MJ，故障恢复时送端极线电压达到 855 kV。传统策略和本文策略的子模块电容电压峰值都为 2.94 kV，原因为严重故障下子模块电容电压上升速度过快，本文低压限流策略依赖站间通信，其延时导致送端电流来不及减小。实验结果表明对于严重故障，本文策略显著减小了可控避雷器能量和恢复时的过电压。

### 6.4 直流线路故障

直流线路首端发生接地故障过程如图 15 所示，故障持续 100 ms。故障发生后送端直流电压降低，直流电流增大，受端直流电压跌落，受端 LCC 由定电压控制模式切换为定电流控制模式。行波保护出

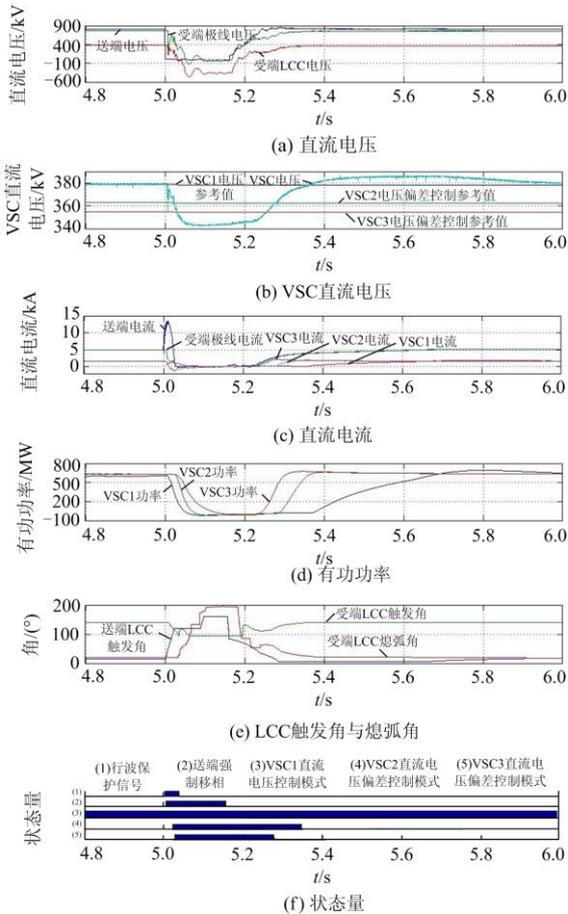


图 15 直流线路故障穿越仿真波形

Fig. 15 Simulation waveform of DC line fault crossing

口后，送端强制移相，线路电流几乎为 0，VSC 功率不平衡，导致 VSC 直流电压逐渐减小。受端 VSC1 为定直流电压控制模式，VSC1 有功功率最先下降到 0，并进入受限状态。由于 VSC 直流电压下降，VSC2 转换为电压偏差控制模式，有功功率下降到 0，进入受限状态。随后 VSC3 转换为电压偏差控制模式，有功功率下降到 0。VSC3 电压偏差控制参考值为 354 kV，VSC 直流电压跌落至 343 kV，然后缓慢升高，VSC3 电压控制误差不大于 3.2%，表明 VSC 直流电压处于受控状态。线路去游离结束后，送端解除强制移相，直流电流快速恢复，受端 LCC 由定电流控制模式切换为定电压控制模式，控制 LCC 电压至目标值。VSC 电压逐渐升高，VSC3 和 VSC2 有功功率先后恢复至额定值，并依次退出电压偏差控制模式，VSC1 最后恢复功率。直流畅线故障穿越过程中，VSC 有功功率没有反送，系统平稳恢复。

### 7 结论

在受端交流系统故障期间，LCC 与 VSC 级联的特高压混合直流输电技术能够抑制换相失败导致的功率传输中断，在直流线路故障期间无需闭锁，成本和损耗较低，因此对于多直流馈入的华东和广东地区具有应用前景。本文提出了 VSC 功率协调控制策略、VSC 投退控制策略、低压限流策略、LCC 限压恢复策略和基于直流电压偏差控制的直流线路故障穿越策略，搭建了 LCC 与 VSC 级联的特高压混合直流系统 PSCAD/EMTDC 仿真模型，根据仿真试验结果可得出如下三点结论：

- 1) 在系统启停和 VSC 投退过程中，直流电压电流过冲小，功率平稳变化，因此验证了 VSC 功率协调策略和控制顺序的有效性。
- 2) 在受端交流系统一般性故障穿越过程中，本文的低压限流策略和 LCC 限压恢复策略显著缩短了故障恢复时间，小幅度增大了可控避雷器能量和子模块电容电压。在受端交流系统严重故障穿越过程中，显著减小了可控避雷器能量和极线过电压，增大了故障恢复时间，但是故障恢复时间能满足工程要求。
- 3) 在直流线路故障穿越过程中，基于直流电压偏差控制的直流线路故障穿越策略抑制了控电压 VSC 功率反送，故障清除后，系统能够快速平稳恢复。

### 参考文献

[1] 杨文博, 宋强, 刘文华, 等. 基于电流单向型模块化多

- 电平换流器的混合直流输电系统[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2205-2212.
- YANG Wenbo, SONG Qiang, LIU Wenhua, et al. Hybrid high voltage direct current transmission system based on unidirectional current modular multilevel converter[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2205-2212.
- [2] 朱佳, 李银红, 段献忠. 基于定关断面积的混合双馈入直流输电系统换相失败抑制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3735-3743.
- ZHU Jia, LI Yinhong, DUAN Xianzhong. A constant extinction area based control strategy for suppressing commutation failure in hybrid dual-infeed HVDC system[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3735-3743.
- [3] 李程昊, 刘畅, 张振安, 等. 计及换相失败预测控制和故障合闸角的 HVDC 换相失败分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 56-63.
- LI Chenghao, LIU Chang, ZHANG Zhen'an, et al. Analysis of commutation failure in HVDC power transmission system considering prediction control of commutation failure and initial failure angle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 56-63.
- [4] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.
- ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [5] 孙冰, 包丹, 张磊, 等. 考虑惯性与阻尼特性的 MMC- 联 HVDC 附件功率控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 108-114.
- SUN Bing, BAO Dan, ZHANG Lei, et al. Supplementary power control scheme for an MMC-HVDC station considering inertia and damping[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 108-114.
- [6] LI Rui, XU Lie, HOLLIDAY D, et al. Continuous operation of radial multiterminal HVDC systems under DC fault[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 351-360.
- [7] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC system[J]. Protection and control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [8] 林湘宁, 胡仙清, 童宁, 等. 具备高灵敏性与速动性的柔性直流输电系统纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 130-139.
- LIN Xiangning, HU Xianqing, TONG Ning, et al. A pilot protection scheme for an VSC-MTDC system with high sensitivity and rapidity[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 130-139.
- [9] 何炎, 李周, 李亚州, 等. 基于真双极接线的 VSC-MTDC 系统功率转代策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 95-101.
- HE Yan, LI Zhou, LI Yanzhou, et al. Power conversion strategy of VSC-MTDC system based on real bipolar wiring mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 95-101.
- [10] WANG Sheng, LI Chuanyue, ADEUYI O D, et al. Coordination of MMCs with hybrid DC circuit breakers for HVDC grid protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 11-22.
- [11] 孙栩, 曹士冬, 雷霄, 等.  $\pm 500$  kV 柔性直流电网控制策略研究[J]. 高压电器, 2019, 55(5): 154-160.
- SUN Xu, CAO Shidong, LEI Xiao, et al. Control strategy research on  $\pm 500$  kV flexible HVDC grid[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5): 154-160.
- [12] 鲁江, 董云龙, 卢宇, 等. 特高压混合直流输电系统整流侧交流故障控制策略[J]. 湖北电力, 2020, 44(3): 1-8.
- LU Jiang, DONG Yunlong, LU Yu, et al. AC fault control strategy on rectifier side of UHV hybrid DC transmission system[J]. Hubei Electric Power, 2020, 44(3): 1-8.
- [13] 徐政, 王世佳, 张哲任, 等. LCC-MMC 混合级联型直流输电系统受端接线和控制方式[J]. 电力建设, 2018, 39(7): 115-122.
- XU Zheng, WANG Shijia, ZHANG Zheren, et al. Inverter station connection modes and control strategies of LCC-MMC hybrid HVDC system[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(7): 115-122.
- [14] 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.
- [15] 李少华, 王秀丽, 彭忠, 等. LCC 型双端直流中引出并联 FB-MMC 功率分支站的混合型多端直流输电系统[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2795-2802.
- LI Shaohua, WANG Xiuli, PENG Zhong, et al. Hybrid multi-terminal integration of parallel FB-MMC tapping station into LCC-HVDC transmission link[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2795-2802.
- [16] 饶宏, 洪潮, 周保荣, 等. 乌东德特高压多端直流工程受端采用柔性直流对多直流集中馈入问题的改善作用

- 研究[J]. 南方电网技术, 2017, 11(3): 1-5.
- RAO Hong, HONG Chao, ZHOU Baorong, et al. Study on improvement of VSC-HVDC at inverter side of Wudongde multi-terminal UHVDC for the problem of centralized multi-infeed HVDC[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(3): 1-5.
- [17] 张军, 吴金龙, 王先为, 等. 混合直流输电系统过电压抑制方法研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 187-194.
- ZHANG Jun, WU Jinlong, WANG Xianwei, et al. Research of control strategy of suppressing overvoltage on hybrid-HVDC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 187-194.
- [18] 刘杉, 余军, 贺之渊, 等. 基于 VSC 与 LCC 混合的多点传输直流输电系统拓扑结构研究与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2980-2988.
- LIU Shan, YU Jun, HE Zhiyuan, et al. Research on the topology and characteristic of multi-terminal HVDC based on VSC and LCC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2980-2988.
- [19] 刘英培, 杨小龙, 梁海平, 等. 适用于混合多端直流输电系统的非线性下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 178-186.
- LIU Yingpei, YANG Xiaolong, LIANG Haiping, et al. Nonlinear droop control strategy for hybrid multi-terminal HVDC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 178-186.
- [20] 葛廷利, 宁博扬, 陈金辉. 受端多端的混合直流系统输送风电的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 191-195.
- GE Tingli, NING Boyang, CHEN Jinhui. Research on control strategy of received multiterminal DC system transporting mixed by the wind[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 191-195.
- [21] 李婧靓, 黄伟煌, 刘涛, 等. 特高压多端混合直流输电系统的控制策略研究[J]. 南方电网技术, 2018, 12(2): 47-55.
- LI Jingjing, HUANG Weihuang, LIU Tao, et al. Research on control strategy of multi-terminal hybrid UHVDC transmission system[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(2): 47-55.
- [22] 熊岩, 饶宏, 许树楷, 等. 特高压多端混合直流输电系统启动与故障穿越研究[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(4): 478-486.
- XIONG Yan, RAO Hong, XU Shukai, et al. Research on start and fault ride-through strategy for ultra-high voltage multi-terminal hybrid DC transmission system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 478-486.
- [23] 杨健, 洪潮, 张野, 等. 不同控制策略下混合多端直流输电的交流故障响应对比[J]. 南方电网技术, 2017, 11(7): 39-44.
- YANG Jian, HONG Chao, ZHANG Ye, et al. Comparison on AC fault response of hybrid multi-terminal HVDC with different control strategies[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(7): 39-44.
- [24] 许冬, 李探, 梅念, 等. VSC 与 LCC 混合级联直流输电系统暂态电流抑制方法[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(2): 166-171.
- XU Dong, LI Tan, MEI Nian, et al. Transient current suppression method for VSC and LCC cascaded hybrid HVDC system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(2): 166-171.
- [25] 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 through solution for offshore wind connection with VSC-HVDC[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 146-154.
- [26] 陈秀娟, 陈维江, 时卫东, 等. 特高压交流开关型可控避雷器的参数选择和样机研制[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1981-1986.
- CHEN Xiujian, CHEN Weijiang, SHI Weidong, et al. Parameter selection and prototype development of UHVAC switch type controller arrester[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1981-1986.

收稿日期: 2020-11-05; 修回日期: 2021-01-20

作者简介:

彭忠(1986—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为直流输配电控制保护; E-mail: pengzhong-2010@163.com

孙攀磊(1982—), 男, 硕士, 研究方向为柔性直流输电技术、中低压直流配电网仿真。E-mail: xjbh\_sunpanlei@163.com

(编辑 魏小丽)