

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181129

# 混合直流输电系统送端交流暂态电压特性研究

索之闻, 陈启超, 李晖, 王菲

(国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209)

**摘要:** 对于大规模新能源特高压直流外送系统, 受端电网故障可能导致送端电网电压剧烈变化, 严重威胁送端电网的安全稳定运行, 因此送端电网暂态电压是直流输电系统适应性的重要考虑因素。混合直流输电结合了常规直流和柔性直流的优势。针对大规模新能源混合直流外送应用场景, 首先介绍了两端混合直流输电系统典型拓扑, 建立了相应数学模型, 阐述了基本控制结构。然后分析了当受端交流电网发生短路故障, 采用不同直流输电拓扑方案时送端电网的交流暂态电压特性。最后在 PSCAD/EMTDC 搭建了不同混合直流输电系统仿真模型, 验证了上述分析的有效性。

**关键词:** 新能源外送; 常规直流; 柔性直流; 混合直流; 送端交流暂态电压特性

## Research on sending end AC transient voltage characteristics of hybrid HVDC transmission system

SUO Zhiwen, CHEN Qichao, LI Hui, WANG Fei

(State Grid Economic and Technological Research Institute Co. Ltd., Beijing 102209, China)

**Abstract:** For large-scale renewable energy UHVDC transmission system, fault happens on the receiving end may cause drastically change on the sending end power grid, which seriously threatens the stability of the sending end power grid. Therefore, voltage characteristic of the sending end is an important consideration for the adaptability of the HVDC transmission system. Hybrid HVDC combines the advantage of LCC-HVDC and VSC-HVDC. In view of the application scenario of large-scale renewable energy transmission through hybrid HVDC, this paper first introduces the typical topologies of two-terminal HVDC transmission system. The corresponding mathematical model is established and the basic control structure is also expounded. Then the AC voltage characteristics of the sending end power grid when short-circuit fault occurs in the receiving end under different hybrid HVDC topologies are analyzed. Finally, the simulation model of different hybrid HVDC topologies is established in the PSCAD/EMTDC simulation platform, and the effectiveness of the above analysis is verified.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. B3440817K003).

**Key words:** renewable energy transmission; LCC-HVDC; VSC-HVDC; hybrid HVDC; sending end AC transient voltage characteristic

## 0 引言

大力发展新能源已成为国内外共识, 目前我国风电和光伏发电并网装机容量均位居世界第一。根据规划, 中国将继续大力发展风电和光伏发电, 并通过多种措施有效扩大新能源消纳范围, 最大限度地提高外送新能源电量比重<sup>[1]</sup>。

特高压直流输电技术能够大幅提高电网远距离、大规模输电能力, 使我国西部、北部清洁能源

的集约高效开发和大范围配置消纳成为可能。高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)可分为常规直流输电(Line Commutated Converter HVDC, LCC-HVDC)和柔性直流输电(Voltage Source Converter HVDC, VSC-HVDC)。LCC-HVDC 传输容量大、电压等级高、投资成本低、技术成熟、运行损耗小、因此适用于大规模长距离输电。VSC-HVDC 运行灵活、换流站占地面积小, 可向弱电网或无源电网供电, 因此在新能源并网、海岛供电以及多端直流输电领域具有较好的应用前景, VSC 在大功率场合一般采用模块化多电平拓扑(Modular Multilevel

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助 (B3440817K003)

Converter, MMC)。采用混合直流输电,可以充分结合两种换流器的优势<sup>[2-3]</sup>。

目前对于混合直流输电系统的研究,主要集中在主接线和换流器拓扑结构、控制保护策略,可靠性评估及应用等方面。文献[4-7]提出了多种混合直流输电系统拓扑结构;文献[8]研究了不同混合直流输电系统直流故障处理策略的物理机理及控制流程,并对其可行性及适用性进行深入分析;文献[9-13]对 LCC-MMC 混合直流输电系统的启停、稳态和故障运行特性以及控制保护策略进行了研究;文献[14]提出一种将现有常规直流受端换流站改造为柔性直流换流站的方案,设计了主接线形式和主回路参数;文献[15]以乌东德电站送电广东广西特高压多端直流示范工程为背景,研究了特高压混合多端直流输电系统的协调控制策略;文献[16]基于某规划直流工程,研究了混合级联型直流输电系统的受端接线和控制方式,并对其暂稳态运行特性进行了分析和仿真验证。

采用 LCC-HVDC 输送新能源,当发生直流系统线路故障、受端换相失败、直流闭锁等故障时,由于直流功率输送的短时中断,将引起换流站近区系统过电压,这将对新能源机组运行产生影响,可能造成新能源的无序脱网,进一步限制了直流的输电能力,还可能引发电网严重稳定问题<sup>[17]</sup>。当采用混合直流输送新能源时,送端系统的交流暂态电压特性可能和 LCC-HVDC 有所不同,然而现有文献少有对于混合直流输电系统送端交流暂态电压特性的研究。

本文首先介绍了典型两端混合直流输电系统拓扑,建立了相应数学模型,阐述了基本控制结构;然后分析了当受端交流系统发生短路故障,采用不同直流系统拓扑方案时送端系统的交流暂态电压特性;最后在 PSCAD/EMTDC 搭建了不同混合直流电磁暂态仿真模型,对上述分析进行验证,相关研究成果将对新能源直流外送的送端电网规划设计提供技术参考。

### 1 系统拓扑、数学模型及控制结构

送端交流系统的暂态电压特性和具体直流系统场景(拓扑)、直流控制环节等因素均有关,因此本节以两端直流系统为例,在建立数学模型的基础上,简要介绍典型混合直流系统拓扑及相应控制结构。

#### 1.1 拓扑结构

图 1 为典型两端直流输电系统拓扑,其中图 1(b)为 LCC-VSC 混合直流输电系统。针对目前已建成或拟建成的 LCC-HVDC 工程,如果其逆变侧是弱

交流系统,为避免逆变侧发生换相失败,可以考虑将其建成或改造为 VSC,即整流侧为 LCC 逆变侧为 VSC 的混合直流输电系统;另一种情况是尽管受端系统足够强,但由于多条 LCC-HVDC 馈入,为避免多条直流发生同时换相失败,可以考虑将其中部分直流输电工程的逆变侧改造为 VSC 系统<sup>[3]</sup>。

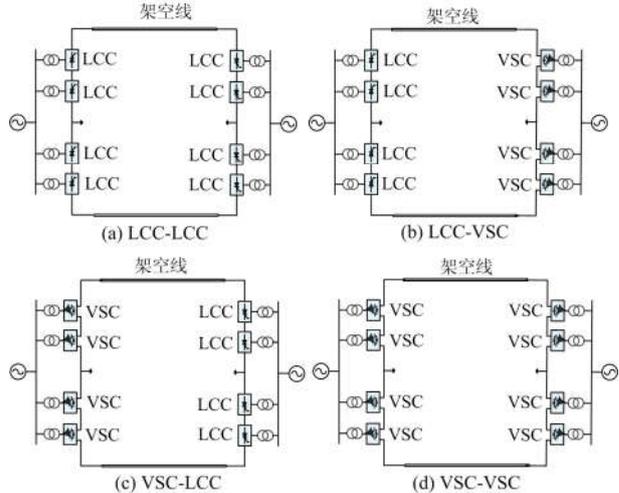


图 1 双端直流输电系统典型拓扑

Fig. 1 Two-terminal typical HVDC topology

图 1(c)为 VSC-LCC 混合直流输电系统。目前,海上风电通过 VSC-HVDC 联网已经成为研究热点和工程应用的可选方案。当受端电网短路容量较大时,LCC-HVDC 不易发生换相失败,因此 VSC-HVDC 的逆变侧可以由 LCC 取代,即形成整流侧为 VSC 逆变侧为 LCC 的混合直流输电系统。相比于两端 VSC-HVDC 工程,该混合直流系统还可以大大减小逆变站投资,从而实现可靠性和经济性之间的平衡<sup>[3]</sup>。

文献[16]提出了一种双端新型混合直流输电系统拓扑,如图 2 所示,其中送端仍采用 LCC 拓扑,受端采用极混联方案,高端为 LCC 拓扑,低端为多个 VSC 拓扑并联(分散接入弱交流电网或无源电网),高低端阀组通过直流电缆相连。该新型混合直

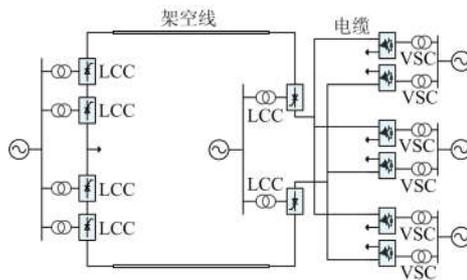


图 2 新型混合直流输电系统拓扑

Fig. 2 A new hybrid HVDC topology

流拓扑可选择不同的交流系统接入方式, 提高了输电系统的灵活性, 同时由于直流线路输送容量较大, 可节约走廊资源。

## 1.2 数学模型

LCC 整流器的数学模型为

$$U_{dR} = 1.35U_1 \cos \alpha_R - \frac{3}{\pi} X_{r1} I_d \quad (1)$$

$$P_R = 1.35U_1 I_d \cos \left( \alpha_R + \frac{\mu_R}{2} \right) \cos \left( \frac{\mu_R}{2} \right) \quad (2)$$

$$Q_R = \frac{1}{4} \cdot I_d \cdot U_{dioR} \cdot \frac{2 \cdot \mu_R + \sin 2\alpha_R - \sin 2(\alpha_R + \mu_R)}{\cos \alpha_R - \cos(\alpha_R + \mu_R)} \quad (3)$$

$$\mu_R = \arccos \left( \cos \alpha_R - \frac{2X_{r1} I_d}{\sqrt{2}U_1} \right) - \alpha_R \quad (4)$$

式中:  $U_{dR}$  为六脉动整流器直流电压;  $P_R$  和  $Q_R$  分别为六脉动整流器消耗的有功和无功功率;  $\alpha_R$  为整流器触发角;  $\mu_R$  为整流器叠弧角;  $U_1$  为整流站阀侧空载线电压有效值;  $X_{r1}$  为整流站换相电抗;  $I_d$  为直流电流。

对于 LCC 逆变器, 将式(1)一式(4)中用关断角  $\gamma$  代替  $\alpha_R$  即可。送端交流暂态过电压主要和 LCC 换流单元有关(详见第 2 节), MMC 的数学模型<sup>[18]</sup> 本文不予详述。

## 1.3 基本控制结构

混合直流输电的稳定运行需要各站控制系统之间的协调, 下面对直流控制系统的基本控制结构作简要介绍。

### 1.3.1 LCC 基本控制结构

直流控制系统由换流器触发控制(CFC)、极功率控制(PPC)、变压器分接头控制(TCC)等几大控制子系统组成, 其内部又包含多个具体的子系统。例如, CFC 由电流控制, 电压控制和触发控制等子系统组成, HVDC 系统的动态性能主要由电流控制中的低压限流环节(VDCOL)和电流控制放大器(CCA)决定。CCA 的原理为 PI 调节器, 它将电流偏差信号放大并转化为触发角指令, 可实现稳态时电流零偏差控制及故障时快速减小电流的作用。CFC 基本控制结构见图 3。文献[17]指出, CCA 环节的比例系统、积分时间常数以及 VDCOL 环节的最小限制电流、直流电压下降时间常数对送端交流系统的暂态过电压特性影响较大, 是控制系统优化的关键参数。

### 1.3.2 MMC 基本控制结构

和 LCC 不同, VSC 具有两个控制自由度, 可实现有功类和无功类物理量的解耦控制, 因此 VSC

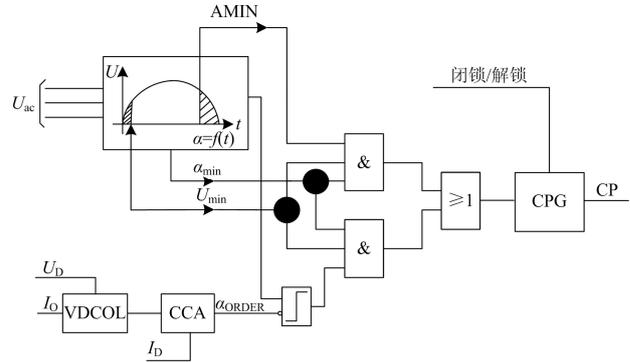


图 3 CFC 基本控制结构<sup>[19]</sup>

Fig. 3 CFC single phase equivalent circuit

存在多种控制变量的组合。文献[20]提出了一种 MMC 基本控制结构, 如图 4 所示, 包含差模电流控制, 共模电流控制, 功率平衡控制、调制及电容电压平衡等环节。其中差模电流控制环节又包含外环功率和内环电流控制环节, 而外环功率控制环节决定了 VSC 的基本控制方式。

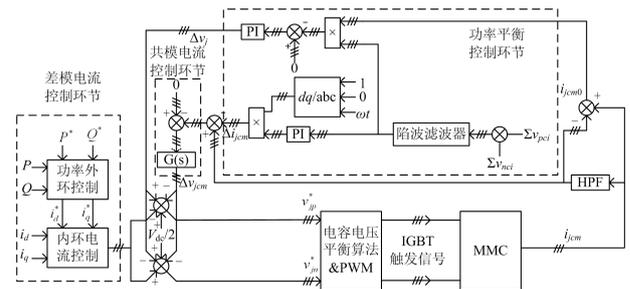


图 4 MMC 基本控制结构<sup>[20]</sup>

Fig. 4 MMC basic control structure

## 2 送端系统交流暂态电压特性

直流系统送受端可分别采用 LCC 或 VSC 型拓扑, 本文以两端直流输电场景为例, 研究受端交流系统短路后送端交流暂态电压特性, 并基于此总结不同直流场景下送端交流暂态电压的共性问题。

LCC 型直流在暂态过程中无功大范围波动是导致送端电网电压剧烈变化的主要原因, 当换流站采用 LCC 型拓扑时, 交流滤波器提供的无功功率为

$$Q_c = B_c U_{ac}^2 \quad (5)$$

其中:  $B_c$  为滤波器等效电纳;  $U_{ac}$  为交流系统电压有效值。

对于 LCC, 其与系统交换的无功功率可表示为

$$Q_s = Q_c - Q_d \quad (6)$$

其中:  $Q_d$  为换流站消耗的无功功率;  $Q_s$  为正表示向交流系统提供容性无功功率。

忽略直流线路电容效应, 直流输电线路动态过

程微分方程可表示为

$$(U_R - U_1) = I_d R_d + L_d \frac{dI_d}{dt} \quad (7)$$

其中： $R_d$ 为直流线路电阻； $L_d$ 为平波电抗器和直流线路电感； $U_R$ 和 $U_1$ 分别为整流侧和逆变侧单极直流电压。

暂态过程中 LCC 与系统交换的无功功率可以通过式(1)一式(7)加上 VSC 或 LCC 直流控制系统的微分代数方程组求解。

然而，基于实际工程的混合直流控制系统方程非常复杂，存在限幅等诸多非线性环节。以 LCC 极控系统为例，其主要包括电流控制器、电压控制器、关断角控制器，各控制器均配置了比例积分调节器。关断角控制器的输出将作为电压调节器的最大值限幅，电压调节器的输出在逆变运行时将作为电流调节器的最大限幅值，在整流运行时将作为最小限幅值<sup>[21-22]</sup>。另外，还需要计及 VSC 控制系统的作用，难以直接采用理论解析方法计算，因此本文考虑通过理论定性分析送端交流系统的暂态电压特性，再借助电力系统仿真软件进行求解。

## 2.1 LCC-VSC 直流输电系统

文献[17]指出，LCC-HVDC 受端交流系统发生短路故障导致直流换相失败后，送端交流系统电压将呈现先降后升的特性。文献[23]对比了不同控制策略下混合多端直流的交流故障响应，针对 LCC-VSC 混合直流输电系统，整流站 LCC 采用定直流电流控制，逆变站 VSC 采用定直流电压控制时，相比其他控制组合，在送端交流系统发生故障时系统恢复特性更优，因此本文也采用该控制组合。

受端系统发生短路故障后，送端交流系统电压先升后降，主要分为以下两个阶段。

1) 直流电流降低阶段。受端交流系统短路后，受端交直流系统能量不匹配，部分能量流入 VSC 中各子模块电容，逆变站直流电压增加，由于整流站直流电压暂时维持不变，直流电流下降。此时在整流站 CCA 环节的作用下，为维持直流电流不变，整流站触发角迅速降低，导致换流站消耗的无功功率迅速减小，而整流站的交流滤波器仍未及时切除，导致换流站无功过剩，将向系统注入大量无功(式(6)中  $Q_s \gg 0$ )，送端系统出现交流暂态过电压。

2) 直流电流恢复过程。受端故障清除后，由于整流站触发角较低，整流站直流电压较高，直流电流迅速升高，此时整流站无功消耗较大，又将从系统吸收大量无功(式(6)中  $Q_s \ll 0$ )，送端交流系统又将呈现低电压特性。在直流控制系统作用下，整流站触发角由 5 度迅速升高后又逐渐恢复，整流站的

无功损耗也逐渐恢复至故障前水平，换流站与系统之间无功交换平衡，送端交流系统电压恢复正常。

## 2.2 VSC-LCC 直流输电系统

受端系统发生短路故障导致直流换相失败后，送端交流系统将呈现低电压特性，主要过程如下所述。

受端交流系统瞬时短路导致换相失败后，逆变站形成直流通路，整流站相当于发生直流侧短路故障，直流电流迅速增加，这将导致逆变站持续换相失败，VSC 由于过电流闭锁后等效为一个三相不可控整流器，送端交流系统持续向逆变站馈入电流，送端交流系统电压降低。整流站为半桥型 MMC 逆变站为 LCC 的混合直流输电系统，当受端交流系统故障导致直流换相失败后，即使受端交流系统故障清除，混合直流系统也难以恢复。此时由于直流系统出现持续过电流，整流站将闭锁，但整流侧交流系统仍将通过 MMC 的反并联二极管馈入电流，可通过打开整流侧交流断路器切断馈流通路后再重启直流系统。

文献[24]提出了一种 LCC 超前触发角控制策略，有助于 VSC-LCC 混合直流系统从换相失败中迅速恢复，但该策略将使逆变站直流电压进一步降低，从而导致直流电流进一步升高，送端交流系统仍将呈现低电压特性。文献[25]将整流站改为全半桥子模块混合拓扑，提出了一种故障穿越协调控制策略，可实现混合直流系统故障后快速恢复，并且送端交流系统电压维持在正常水平，降低了受端交流故障对送端新能源发电系统的干扰，但是由于采用全桥子模块，换流站投资和损耗也将进一步增加。

## 2.3 VSC-VSC 直流输电系统

受端交流系统发生短路故障后，送端交流系统电压基本维持不变，主要过程如下所述。

受端交流系统发生短路故障后，受端交直流系统能量不匹配，部分能量流入 VSC 中各子模块电容，导致逆变站直流电压增加，此时整流站三相电压调制因子稍有下降，为维持调制因子不变，在直流控制系统作用下，送端交流系统电压也将稍有增加。随着受端短路故障清除，逆变站向受端交流系统输送的有功功率逐渐增加，逆变站直流电压恢复至额定值附近并保持稳定。

## 2.4 新型混合直流输电系统

受端系统发生短路故障后，送端交流系统电压先降后升，主要分为以下三个阶段。

1) 逆变站高端短路阶段。受端交流系统短路故障导致逆变站高端阀组换相失败形成直流通路，整流站和逆变站直流电压之间存在压差，直流电流增加。此时直流电流向逆变站低端 VSC 阀组充电，导

致整流站和逆变站直流电压压差减小, 限制了直流电流的增加。整流站消耗的无功功率稍有增加, 由于交流滤波器尚未投入, 导致送端交流系统电压稍有降低。

2) 直流电流降低阶段。在整流站 CCA 控制环节的作用, 整流站触发角迅速增加, 直流电流迅速减小, 导致整流站消耗的无功功率迅速减小, 而整流站的交流滤波器仍未及时切除, 此时换流站无功过剩, 将向系统注入大量无功(式(6)中  $Q_s \gg 0$ ), 送端系统出现交流暂态过电压。

3) 直流电流恢复过程。受端故障清除后, 在直流控制系统作用下, 整流站触发角逐渐减小, 直流功率逐渐恢复至故障前水平, 换流器的无功消耗也逐渐恢复至故障前水平, 换流站与系统之间无功交换平衡。

和 LCC-HVDC 类似, 新型混合直流输电系统在受端交流短路导致高端阀组发生换相失败故障后, 其送端交流系统电压也将呈现先降后升的特性, 但是由于逆变站低端 VSC 仍能提供部分电压支撑, 直流电流的变化幅度有限, 因此送端系统的交流暂态电压特性要好于 LCC-HVDC 系统。

### 2.5 送端暂态电压特性

本节对典型两端直流输电系统送端交流暂态电压特性进行了分析, 当受端交流系统发生短路故障导致 LCC 换相失败故障后, 传统 LCC-HVDC 和新型混合直流输电系统的送端交流暂态电压特性均表现为先降后升, VSC-LCC 直流输电系统表现为低电压, LCC-VSC 直流输电系统送端交流暂态电压特性表现为先升后降, VSC-HVDC 直流输电系统送端电压基本不变。需要强调的是, 上述分析无法涵盖所有的混合直流拓扑组合(如多极混合直流输电, 多端混合直流输电等)。但从本质上说, 只要送端含有 LCC 换流单元, 就会出现送端交流暂态过电压, 这是由于暂态过程中 LCC 换流单元的无功需求和交流滤波器提供的无功不匹配。在新能源直流外送送端电网规划设计时, 需考虑送端系统的交流暂态电压特性, 选择合适的直流输电系统。各直流输电系统控制策略见表 1。

表 1 各直流输电系统控制策略

直流拓扑	整流器控制策略	逆变器控制策略
LCC-VSC	定直流电流控制	定直流电压/定无功控制
VSC-LCC	定有功/定无功控制	定直流电压控制
VSC-VSC	定有功/定无功控制	定直流电压/定无功控制
新型混合		LCC 定直流电压
直流输电	定直流电流控制	VSC1 定直流电压/定无功
系统拓扑		VSC2、3 定有功/定无功控制

## 3 仿真验证

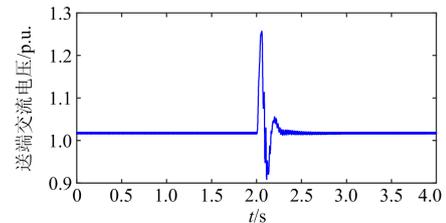
在 PSCAD/EMTDC 上搭建图 1、图 2 所示各直流系统仿真模型, 对上述分析进行验证, 其中直流输电系统额定功率均为 1 000 MW, 额定直流电压为 500 kV, 送受端交流系统线电压有效值分别为 345 kV 和 230 kV, 送受端交流系统短路比均为 2.5, 各直流输电系统控制策略如表 1 所示, 选取典型控制环节参数如表 2 所示。2 s 时刻, 受端交流系统发生短路故障, 持续 50 ms 后故障清除。

表 2 典型控制环节参数

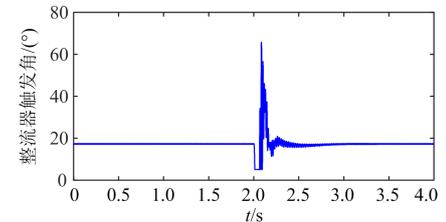
控制环节	参数名称	典型参数
电流控制环节	比例系数	84
	积分时间常数	0.005
低压限流环节	整流侧启动电压下限	0.15
	整流侧启动电压上限	0.15
	逆变侧启动电压下限	0.8
	逆变侧启动电压上限	0.8
	直流电流最低限制	0.345
	整流侧直流电压下降时间常数	0.03
	整流侧直流电压上升时间常数	0.04
	逆变侧直流电压下降时间常数	0.03
逆变侧直流电压上升时间常数	0.04	
换相失败预测环节	增加关断角的大小	25
	关断角恢复时间常数	0.3
AMAX 控制环节	AMAX 控制比例系数	0.15
直流电压调节器	电压调节器比例系数	25
MMC 外环参数	比例系统	2
	积分时间常数	0.01
MMC 内环参数	比例系统	5
	积分时间常数	0.08

### 3.1 LCC-VSC 直流输电系统

图 5 为 LCC-VSC 直流系统的仿真结果, 可以看出, 受端短路故障后, 直流电流先降后升, 整流器触发角先降至 5 度再升高最后恢复正常, 仿真结果与理论分析相符, 送端电压呈现先升后降的特性。



(a) 送端交流电压



(b) 整流器触发角

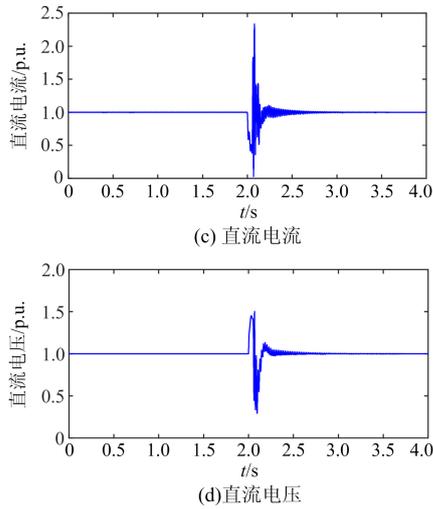


图 5 LCC-VSC 直流输电系统仿真结果  
Fig. 5 Simulation results of LCC-VSC system

### 3.2 VSC-LCC 直流输电系统

图 6 为 VSC-LCC 直流输电系统的仿真结果，其中 VSC 采用半桥型拓扑，可以看出，受端短路故障后，直流电流迅速增加，故障清除后逆变器持续换相失败，直流系统无法恢复，送端交流系统呈现低电压特性。

### 3.3 VSC-VSC 直流输电系统

图 7 为 VSC-VSC 直流输电系统的仿真结果，可以看出，受端短路故障后，逆变器直流电压增加，送端交流电压基本保持不变。

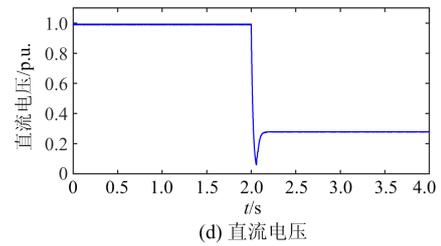
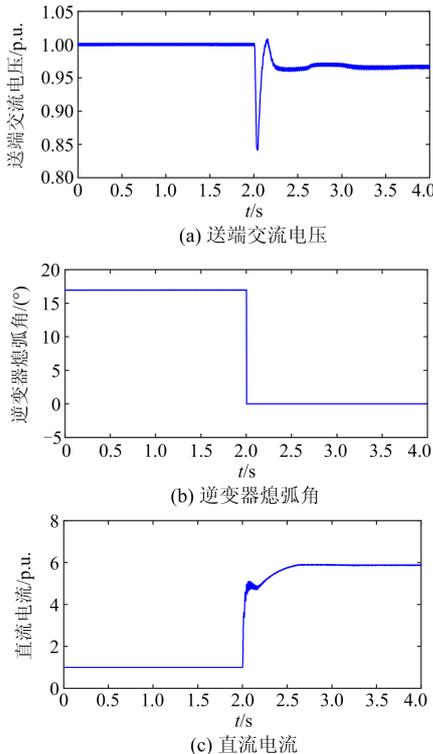


图 6 VSC-LCC 直流输电系统仿真结果  
Fig. 6 Simulation results of VSC-LCC system

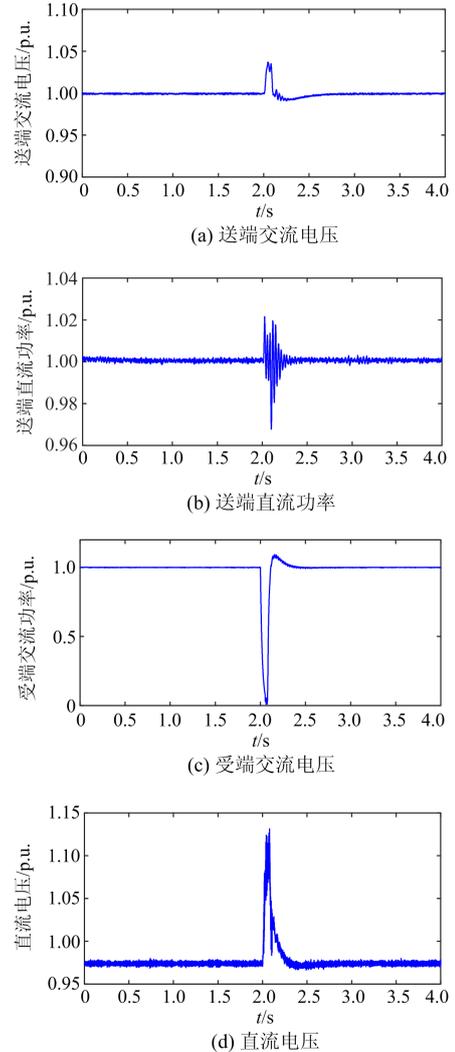


图 7 VSC-VSC 直流输电系统仿真结果  
Fig. 7 Simulation results of VSC-LCC system

### 3.4 新型混合直流输电系统

图 8 为新型混合直流输电系统仿真结果，可以看出，受端交流短路故障导致逆变器高端阀组换相失败后，直流电流增加幅度有限，故障清除后，混合直流系统逐渐恢复，送端交流系统电压呈现先降后升的特性。

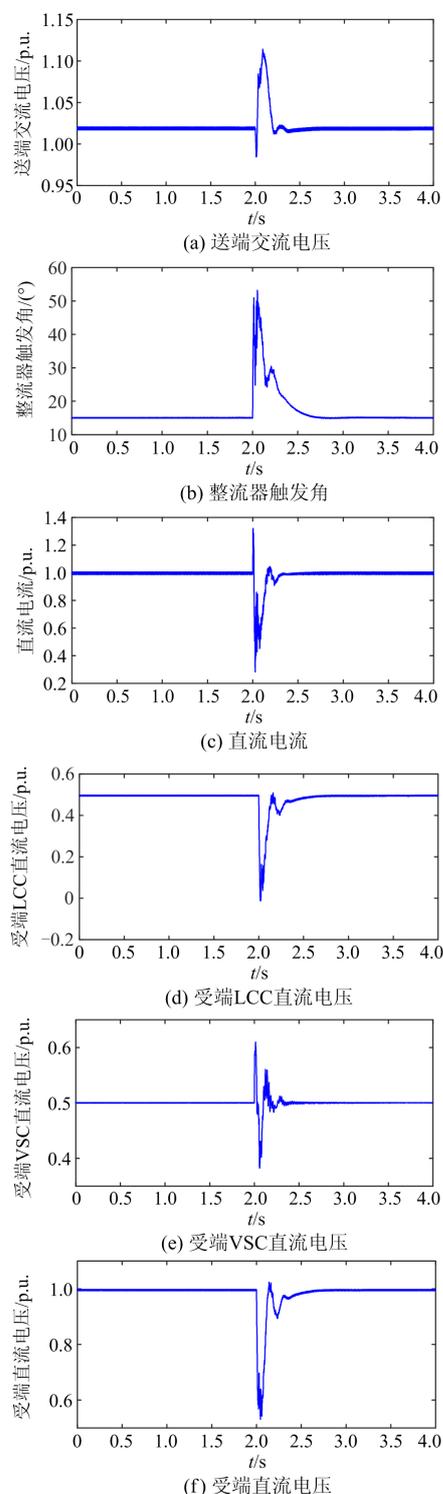


图8 新型混合直流输电系统系统仿真结果

Fig. 8 Simulation results of the new hybrid HVDC system

## 4 结论

送端交流暂态电压是混合直流输电系统适应性的重要考虑因素, 本文以典型两端直流输电系统为例对混合直流送端暂态电压特性进行了分析, 通过

仿真计算, 可得如下结论:

1) 当送端换流站含有 LCC 换流单元时, 不论受端采用 VSC 或者 LCC 拓扑, 送端系统在受端短路时均会出现交流暂态过电压。

2) 当送端为孤岛系统时, 整流站宜采用 VSC 拓扑, 可同时对送端系统的电压和频率进行控制。

3) 当送端含有大规模新能源时, 可根据送端系统的强度和机组类型, 选择合适的直流输电系统, 以防送端系统过电压或低电压导致大规模新能源脱网, 诱发电压稳定问题, 可采用增强网架结构或增加动态无功补偿装置等措施。

后续将进一步研究不同故障形态下混合直流输电系统送端交流暂态电压特性, 以及相应的保护与控制策略。

## 参考文献

- [1] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-9.  
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.
- [2] 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.
- [3] 赵成勇, 郭春义, 刘文静. 混合直流输电[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [4] 李程昊. 混合直流输电系统拓扑结构及关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- [5] 徐政, 王世佳, 李宁璨, 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.
- [6] CHEN X, SUN H, WEN J, et al. Integrating wind farm to the grid using hybrid multiterminal HVDC technology[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(2): 965-972.
- [7] TADESE A. Performance of a combined LCC and VSC based bipole HVDC link[D]. Aalborg: Aalborg University, 2010.
- [8] 陆翌, 李继红, 裘鹏, 等. 混合直流输电系统直流故障处理策略比较分析[J]. 电力建设, 2017, 38(8): 33-41.  
LU Yi, LI Jihong, QIU Peng, et al. Analysis and comparison of DC fault handling strategies for hybrid HVDC system[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(8): 33-41.

[9] 杨洋, 王瑶, 李浩涛, 等. 子模块混合型 LCC-MMC 混合直流输电系统的启动控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 58-64.  
YANG Yang, WANG Yao, LI Haotao, et al. Start-up control strategies for the cell-hybrid LCC-MMC hybrid HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 58-64.

[10] 许烽, 宣晓华, 陆翌, 等. 向无源网络供电的 LCC-MMC 混合直流输电系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 129-135.  
XU Feng, XUAN Xiaohua, LU Yi, et al. Control strategies for LCC-MMC hybrid DC system connected to passive networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 129-135.

[11] 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.

[12] 时伯年, 洪潮, 孙刚, 等. 交流不对称故障下的 LCC-MMC 混合直流系统输送功率提升策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 73-78.  
SHI Bonian, HONG Chao, SUN Gang, et al. Research on power transmission enhancement strategy of LCC-MMC hybrid HVDC system under AC symmetric fault[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 73-78.

[13] 洪潮, 时伯年, 孙刚, 等. 基于 LCC-MMC 的三端混合直流输电系统故障特性与控制保护策略[J]. 电力建设, 2017, 38(8): 73-79.  
HONG Chao, SHI Bonian, SUN Gang, et al. Fault characteristics and control & protection strategy of three-terminal LCC-MMC hybrid HVDC transmission system[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(8): 73-79.

[14] 黄伟煌, 饶宏, 黄莹, 等. 一种基于常规直流输电系统的混合直流改造方案[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2861-2868.  
HUANG Weihuang, RAO Hong, HUANG Ying, et al. A novel refurbishment scheme for reforming the existing LCC-HVDC to hybrid HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2861-2868.

[15] 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 Jingliang, 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.

[16] 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, 3148.  
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, 3148.

[17] 冀肖彤. 抑制 HVDC 送端交流暂态过电压的控制策略优化[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 721-728.  
JI Xiaotong. Optimization of HVDC control system for mitigating AC transient overvoltage on rectifier station[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 721-728.

[18] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.

[19] ABB. The Three Gorges-Changzhou ±500 kV DC transmission project: converter firing control technical report[R]. 2000.

[20] ZENG R, XU L, YAO L, et al. Analysis and control of modular multilevel converters under asymmetric arm impedance conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics[R], 2016, 63(1): 71-81.

[21] 屠竞哲, 张健, 曾兵, 等. 交直流换相失败及恢复过程暂态无功特性及控制参数影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(7): 2131-2139.  
TU Jingzhe, ZHANG Jian, ZENG Bing, et al. HVDC transient reactive power characteristics and impact of control system parameters during commutation failure and recovery[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2131-2139.

[22] 李亚男, 卢亚军, 刘心旸, 等. 交逆变侧控制策略对换相失败的影响及恢复特性优化研究[J]. 电力建设, 2015, 36(9): 112-116.  
LI Yanan, LU Yajun, LIU Xinyang, et al. Influence of inverter control strategy on commutation failure and recovery characteristic optimization[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(9): 112-116.

[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, 50.  
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, 50.

[24] HANSEN A, HAVEMANN H. Decreasing the commutation failure frequency in HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 15(3): 1022-1026.

[25] ZENG R, XU L, YAO L, et al. Hybrid HVDC for integrating wind farms with special consideration on commutation failure[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 789-797.

收稿日期: 2018-09-02; 修回日期: 2018-12-18

作者简介:

索之闻(1988—), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 主要研究方向为高压直流输电系统设计及交直流混合电力系统安全稳定分析; E-mail: suozhiwen@126.com

陈启超(1983—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为电力电子变压器、柔性直流输电技术;

李晖(1981—), 男, 博士, 教授级高工, 主要研究方向为智能电网规划。

(编辑 姜新丽)