

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.01.017

# 特高压混合级联直流多级自适应协调交流故障穿越控制策略

吕彦北<sup>1</sup>, 赵文强<sup>1</sup>, 侍乔明<sup>1</sup>, 姚其新<sup>2</sup>, 随顺科<sup>1</sup>, 常昊添<sup>1</sup>

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 国网湖北省电力有限公司直流公司, 湖北 宜昌 443000)

**摘要:**特高压混合级联直流可以结合电网换相换流器(line commutated converter, LCC)和电压源换流器(voltage source converter, VSC)各自的优势,但也带来了直流侧功率盈余的问题,在受端发生交流故障时,可能导致VSC子模块过压。针对混合级联直流的拓扑特点,文中提出一种基于运行方式和电气量的多级自适应协调控制策略。通过故障阀组负序电压控制、健全阀组辅助电压控制、投入可控自恢复消能装置及送端配合移相、调整送受端换流器直流功率等措施,在站内单VSC内、站内多VSC间、站间LCC与VSC间进行多级自适应协调配合,有效解决了VSC子模块过压问题,实现了混合级联直流的交流故障穿越。基于实际控制保护装置和工程拓扑搭建闭环实时数字仿真试验平台,验证了所提策略的可行性。该策略已成功应用于白鹤滩—江苏特高压混合直流工程。

**关键词:**特高压直流;混合级联拓扑;多级自适应;故障穿越;子模块过压;消能装置

**中图分类号:**TM721.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2025)01-0165-10

## 0 引言

基于晶闸管的电网换相换流器高压直流输电(line commutated converter based high voltage direct current, LCC-HVDC)技术可靠性高、成本低,适用于远距离、大容量输电,在国内外得到了广泛应用。但因晶闸管只可控开通不可控关断的半控特性,LCC-HVDC存在固有的换相失败问题<sup>[1-5]</sup>。随着我国特高压直流工程的大规模建设,交直流系统之间的关联越来越紧密,换相失败问题也越来越突出<sup>[6-10]</sup>。

基于全控型器件的电压源换流器高压直流输电(voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC)技术无换相失败问题,且具有独立控制有功和无功功率、谐波水平低、占地面积小、可以为无源系统供电等优点,因此为海上风电接入、分布式电源接入、海上或偏远地区供电、改善交流电网运行特性等场合提供了重要解决方案<sup>[11-14]</sup>。但受电压等级低、输送容量小、成本高和可靠性低等因素的影响,柔性直流输电难以向远距离、大容量直流输电场合拓展<sup>[15-16]</sup>。

文献[17-20]提出了送端采用电网换相换流器(line commutated converter, LCC)、受端采用LCC串联多个电压源换流器(voltage source converter, VSC)的多落点混合级联拓扑,可以充分结合LCC和VSC

各自的优点:适用于远距离、大容量直流输电;送端LCC移相功能和受端LCC单向导电性使系统自身具有直流故障穿越能力;即使受端LCC换相失败,VSC的存在仍能使得系统保持一定的功率输送能力;此外,多VSC可同时为多个落点供电<sup>[21]</sup>。VSC虽然没有换相失败问题,但在受端发生交流故障时存在直流侧功率盈余问题,该盈余功率可能导致VSC子模块过压,同时危及其他直流场设备。

针对混合级联直流受端交流故障穿越问题,现有文献主要从优化控制保护策略和增加一次设备2个角度进行研究。在优化控制保护策略方面,文献[22]从保护设备的角度提出了换流阀桥臂电流不平衡保护与换流器分步闭锁策略,以抑制换流阀子模块过电压应力,但不适用于受端交流故障引起的VSC子模块过压问题。文献[23-24]提出了利用设备裕度抵御交流故障的方案,通过增大非故障阀组的功率,疏散系统盈余功率,但该方案只能解决小功率或不太严重的交流故障穿越问题。文献[25]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,通过限制送端功率来解决受端盈余功率问题,但考虑到站间通信延时和系统响应时间,该策略时效性较差。在增加一次设备方面,文献[26]提出了一种基于储能型模块化多电平换流器技术的受端交流故障穿越策略,但受限于建造成本高、占地面积大等因素,暂无法进行工程应用。文献[27]提出了一种基于故障限流器的故障穿越方法,但在工程应用前故障限流器与原有一次设备的交互影响还有待进一步研究。文献[28-31]提出了在

收稿日期:2024-05-06;修回日期:2024-07-26

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(5100-2023490-04A-1-1-ZN)

VSC 直流侧并联可控自恢复消能装置的方案,以便在受端交流故障时泄放系统的暂态盈余功率,但长时间的大功率耗散会加速避雷器老化,且消能装置在短时间内不能连续动作,其使用受限。

文中基于特高压混合级联直流的拓扑特点,提出了混合级联直流多级自适应协调交流故障穿越控制策略,通过综合分析判断运行方式和电气量,自动选择相应的交流故障穿越策略,以解决特高压混合级联直流的交流故障穿越问题。为验证所提策略的可行性,文中基于实际控制保护装置搭建了闭环实时数字仿真(real time digital simulator, RTDS)试验平台,进行了多种工况下的交流故障穿越试验。文中的研究成果已应用于白鹤滩—江苏特高压混合直流工程。

## 1 特高压混合级联直流输电系统交流故障穿越问题

### 1.1 特高压混合级联直流拓扑

±800 kV/8 000 MW 特高压混合级联直流双极拓扑如图 1 所示。

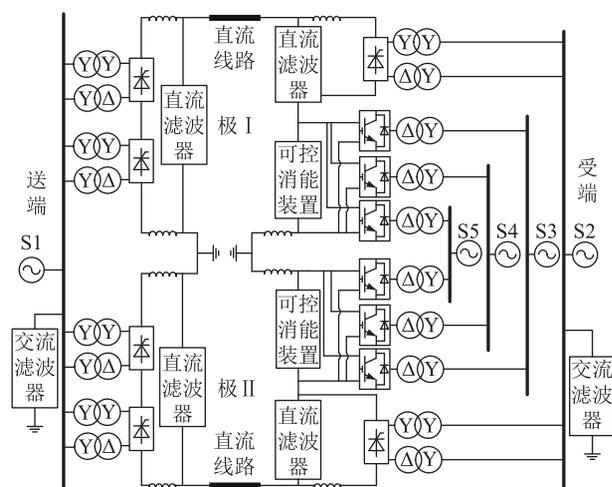


图 1 特高压混合级联直流双极拓扑  
Fig.1 Bipole topology of hybrid cascaded ultra high voltage direct current

送端每个完整单极仍由 2 个 12 脉动 LCC 串联组成,两极 4 个 LCC 接入同一个交流电网 S1。受端每个完整单极则由 1 个 12 脉动 LCC 与 3 个 VSC 串联组成,其中 3 个 VSC 并联连接,受端每极 4 个换流器均接入不同交流电网 S2—S5。

正常运行时,送端 LCC 控制直流电流,受端 LCC 和每极一个 VSC 控制直流电压,其他 VSC 控制直流功率。若控制直流电压的 VSC 因故障退出,则控制直流功率的 VSC 按照预先设定的优先级接管直流电压控制。

受端各换流器直流电流、直流电压以及直流功率的关系如下:

$$\begin{cases} I_{dc\_LCC} = \sum_{i=1}^3 I_{dc\_VSCi} = I_{dc} \\ U_{dc\_LCC} + U_{dc\_VSC} = U_{dc\_INV} \\ P_{dc\_LCC} + \sum_{i=1}^3 P_{dc\_VSCi} = P_{dc\_INV} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $I_{dc\_LCC}$  为 LCC 直流电流;  $I_{dc\_VSCi}$  为各 VSC 直流电流,其中  $i = 1, 2, 3$ ;  $I_{dc}$  为整个极的直流电流;  $U_{dc\_LCC}$  为 LCC 直流电压;  $U_{dc\_VSC}$  为 VSC 直流电压;  $U_{dc\_INV}$  为逆变侧整个极的直流电压;  $P_{dc\_LCC}$  为 LCC 直流功率;  $P_{dc\_VSCi}$  为各 VSC 直流功率;  $P_{dc\_INV}$  为整个极的直流功率。

### 1.2 VSC 交流故障穿越问题

与 LCC 通过调节触发角控制直流电压不同, VSC 通过投切子模块,改变自身输出电压来调节交、直流功率关系,控制直流电压。

VSC 直流电压与交、直流功率关系如下:

$$\begin{cases} U_{dc\_VSCi} = \sqrt{\frac{2}{C_{eq}}} \int (P_{dc\_VSCi} - P_{ac\_VSCi}) dt \\ P_{dc\_VSCi} = U_{dc\_VSCi} I_{dc\_VSCi} \\ P_{ac\_VSCi} = \frac{U_{si} U_{ci} \sin \delta_i}{n_{ri} X_{ri}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $U_{dc\_VSCi}$  为各 VSC 直流电压;  $C_{eq}$  为 VSC 等效电容;  $P_{ac\_VSCi}$  为各 VSC 输出的交流功率;  $U_{si}$  为各 VSC 所连交流母线电压;  $U_{ci}$  为各 VSC 输出交流电压;  $n_{ri}$  为各 VSC 连接变变比;  $X_{ri}$  为各 VSC 连接变漏抗;  $\delta_i$  为各 VSC 输出交流电压与交流母线电压的相角差。

当 VSC 所连交流系统发生接地故障时,交流母线电压  $U_{si}$  急剧下降,根据式(2)可知,VSC 向交流系统输出的交流功率  $P_{ac\_VSCi}$  将受限。考虑到站间通信延时和控制系统响应时间,VSC 的直流功率  $P_{dc\_VSCi}$  不能及时下降,VSC 出现直流功率盈余,多余的功率流入 VSC 子模块,导致 VSC 子模块电压升高。当盈余功率较多时,可能导致直流过压闭锁或 VSC 子模块和其他直流场设备过压损坏。

### 1.3 LCC 交流故障穿越问题

LCC 与 3 个 VSC 串联,流过 LCC 的直流电流与 3 个 VSC 直流电流之和相等。当 LCC 故障导致直流电流波动时,VSC 也会受到影响。

直流电流计算公式为:

$$I_{dc} = (U_{dc\_REC} - U_{dc\_INV})/R \quad (3)$$

式中:  $U_{dc\_REC}$  为送端直流电压;  $R$  为直流电流流经回路的电阻。

正常运行时,受端 LCC 直流电压由式(4)决定。

$$U_{\text{dc,LCC}} = 2 \left( \frac{3\sqrt{2}U_{\text{s,LCC}}}{\pi n_{\text{LCC}}} \cos \gamma - \frac{3X_{\text{rLCC}}}{\pi} I_{\text{dc}} \right) \quad (4)$$

式中:  $U_{\text{s,LCC}}$  为 LCC 所连交流系统线电压;  $\gamma$  为 LCC 关断角;  $n_{\text{LCC}}$  为 LCC 换流变变比;  $X_{\text{rLCC}}$  为 LCC 每相的换相电抗。

受端 LCC 关断角  $\gamma$  可以表示为:

$$\gamma = \arccos \left( \frac{\sqrt{2}n_{\text{LCC}}X_{\text{rLCC}}I_{\text{dc}}}{U_{\text{s,LCC}}} + \cos \beta \right) - \varphi \quad (5)$$

式中:  $\beta$  为 LCC 的超前触发角;  $\varphi$  为不对称交流故障导致的换相电压过零点前移角度。

当 LCC 所连交流系统发生高阻接地故障时,交流系统线电压  $U_{\text{s,LCC}}$  下降,根据式(4)可知,LCC 直流电压也会相应下降。结合式(1)一式(3)可知,该故障会进一步导致 VSC 直流侧功率盈余,引起 VSC 子模块电压升高。

当 LCC 所连交流系统发生低阻接地故障时,交流系统线电压  $U_{\text{s,LCC}}$  严重跌落,根据式(5)可知,关断角  $\gamma$  随之减小,当  $\gamma$  减小至最小关断角以下时,LCC 将发生换相失败,换流器直流电压无法维持,换流器功率传输短时中断,逆变侧直流功率盈余,多余的功率流入 VSC 子模块,导致 VSC 子模块电压和直流电压升高。

受端 VSC 多落点分散接入交流电网的方式减弱了各换流器交流侧电气连接,提高了系统的可靠性。但当与 LCC 交流侧电气距离较近的 VSC 发生严重的交流故障时,仍有可能引起 LCC 换相失败,导致逆变侧直流功率盈余突增,引发 VSC 直流过压问题。

## 2 特高压混合级联直流输电系统交流故障穿越控制策略

根据式(2)可知,解决 VSC 子模块过压的关键在于解决直流侧功率盈余问题,解决措施可分为“开源”和“节流”2类。“开源”即为盈余功率提供其他通路,具体有提升健全换流器功率输出和可控消能装置泄流等措施;“节流”即从源头减少功率输入,具体有限制整流侧功率和整流侧移相等措施。

文中从交流故障和稳态运行 2 种工况分别介绍多级自适应协调交流故障穿越控制策略。

### 2.1 交流故障期间的穿越控制策略

#### 2.1.1 VSC 负序交流电压控制

为了防止非对称故障下出现换流器过流和子模块电容过压,需要在 VSC 中采取不对称故障控制措施。

VSC 正常运行时只输出正序电压,当交流电网发生不对称故障时,若 VSC 不提供与之相对的反电势,则会在 VSC 阀侧产生很大的负序电流分量,与原有分量叠加可能导致 VSC 过流和子模块电容过压。针对该问题的解决思路是将阀侧电流进行正序分量和负序分量分解,分解后的负序分量在负序同步旋转坐标系下的关系式为:

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{\text{vd}}^-(t) \\ i_{\text{vq}}^-(t) \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_{\text{vd}}^-(t) \\ i_{\text{vq}}^-(t) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} u_{\text{sd}}^-(t) \\ u_{\text{sq}}^-(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{\text{diffd}}^-(t) \\ u_{\text{diffq}}^-(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega L \\ -\omega L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\text{vd}}^-(t) \\ i_{\text{vq}}^-(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $L$  为连接电感;  $u_{\text{sd}}^-(t)$ 、 $u_{\text{sq}}^-(t)$ 、 $i_{\text{vd}}^-(t)$ 、 $i_{\text{vq}}^-(t)$  分别为交流系统电压、电流的负序  $d$ 、 $q$  轴分量;  $u_{\text{diffd}}^-(t)$ 、 $u_{\text{diffq}}^-(t)$  分别为 VSC 输出差模电压的负序  $d$ 、 $q$  轴分量;  $\omega$  为角频率。

根据式(6),参照正序控制系统,可以设计如图 2 所示的负序控制系统。图 2 中,  $\theta^-$  为负序交流电压相角,负序控制系统的输出叠加到原有正序控制系统中形成最终的三相参考电压  $u_{\text{aref}}$ 、 $u_{\text{bref}}$ 、 $u_{\text{cref}}$ ,使得 VSC 换流站交流侧的输出电压含有故障所引起的等量负序电压,从而有效抑制负序电流。

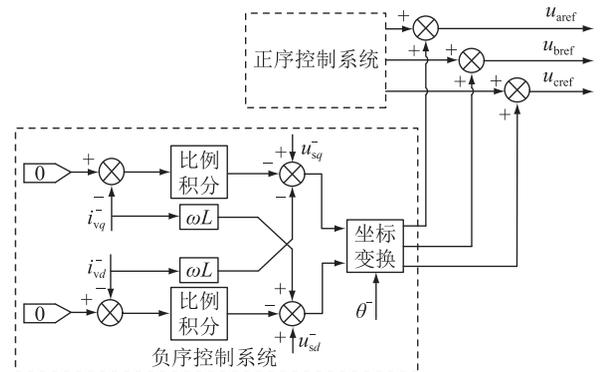


图 2 VSC 负序交流电压控制框图

Fig.2 Block diagram of negative sequence AC voltage control of VSC

负序控制系统中负序电流分量的给定值为零。当交流系统电压正常时,负序控制系统的补偿电压分量为零;当有不对称故障发生时,一般为单相接地或者相间短路,负序控制器自动计算获得负序电压,控制负序电流为零。在交流系统故障时通过采用正、负序独立控制,可辅助换流阀完成故障穿越。

#### 2.1.2 VSC 辅助直流电压控制

当一极有 2 个或 3 个 VSC 运行时,若 VSC 未运行在最大功率工况,一个 VSC 交流系统发生故障时,其余 VSC 可以在故障期间适当增加功率输出,

从而减小直流侧盈余功率,缓解故障期间的直流过电压。

由式(2)可知,VSC 直流功率与直流电压正相关,据此可设计辅助直流电压控制环节,直流电压高时增加输出有功功率参考值,控制框图如图 3 所示。其中, $U_{dc}^{ref}$ 、 $U_{dc}$ 、 $\Delta U_{dc}$ 分别为 VSC 端口直流电压指令值、实际值、两者差值;死区设置环节输入为  $\Delta U_{dc}$ , $\Delta U_{dset1}$ 、 $\Delta U_{dset2}$ 为死区设置值, $\Delta U_{dcout}$ 为输出值,死区一般略大于 0.05 p.u.,以保证正常运行时仍保持正常的有功功率控制; $K_p$ 为线性比例系数; $\Delta P$ 、 $\Delta P_{max}$ 、 $\Delta P_{min}$ 分别为输出功率及其上、下限幅值。根据动态性能要求和过负荷能力对以上参数进行整定。经比例环节之后,辅助直流电压控制的输出与功率外环叠加。

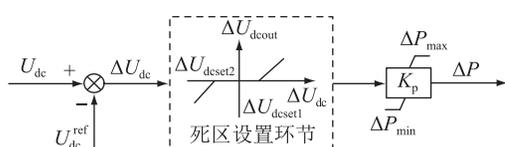


图 3 VSC 辅助直流电压控制框图  
Fig.3 Block diagram of auxiliary DC voltage control of VSC

辅助直流电压控制可保证在正常情况下,处于功率控制模式的 VSC 不参与电压控制,精准控制有功功率指令  $P_{ref}$ ,当直流电压差值超过死区时自动参与直流电压控制,抑制直流电压波动。

### 2.1.3 受端投入可控自恢复消能装置

为解决严重交流故障下 VSC 子模块过压问题,在 VSC 直流侧安装可控自恢复消能装置,如图 1 所示,为直流盈余功率提供泄放通道,从而避免 VSC 子模块电压持续升高。可控自恢复消能装置拓扑如图 4 所示。

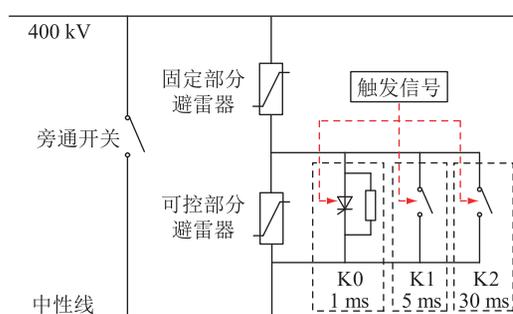


图 4 可控自恢复消能装置拓扑  
Fig.4 Topology of controllable self-recovery energy dissipation device

VSC 换流阀控制系统实时检测桥臂子模块电容电压,当本极任一 VSC 桥臂子模块电容电压超过阈值时,投入本极可控自恢复消能装置。子模块电容电压阈值由子模块耐压性能决定,与子模块过压

保护配合,须在子模块过压保护动作前投入可控自恢复消能装置。

收到合闸指令后,可控自恢复消能装置晶闸管控制支路 K0 在 1 ms 内实现通流,泄放盈余功率,快速机械开关 K1 在 5 ms 内实现合闸,慢速机械开关 K2 在 30 ms 内合闸,K1、K2 合闸后,K0 支路电流向 K1、K2 转移,晶闸管断流并自动关断。

### 2.1.4 送端配合移相控制

受端 1+2(即受端同极的 LCC 和 2 个 VSC 在运行)大功率运行方式下,当受端某 VSC 交流侧发生三相短路或接地故障时,由于其他 VSC 功率分担能力受限,仅靠投入可控自恢复消能装置实现交流故障穿越,对可控自恢复消能装置的容量需求过大,会造成设计成本过高<sup>[28]</sup>。

可控自恢复消能装置在工作期间的吸收能量  $W$  可表示为:

$$W = \int_0^T u(t)i(t)dt \quad (7)$$

式中: $T$ 为可控自恢复消能装置的工作时间; $u(t)$ 、 $i(t)$ 分别为可控自恢复消能装置工作期间的两端电压和流过可控自恢复消能装置的电流。

由式(7)可知,减小可控自恢复消能装置工作期间的电流及持续时间可减小其吸收能量。因此,为减小对可控自恢复消能装置的容量需求,降低能量越限概率,当在 1+2 这种较为严苛的运行方式下发生受端交流故障时,投入可控自恢复消能装置的同时发送移相命令至送端,经站间通信延时后,送端收到移相命令,短时移相至  $164^\circ$ ,将送端直流电压降至零。根据式(3)可将直流线路上流过的电流降为零,即将直流线路上输送的功率短时降至零,从源头解决功率盈余问题。

## 2.2 稳态运行时的站间协调控制策略

### 2.2.1 站间通信故障时自动限制送端功率

当站间通信正常,受端 VSC 发生严重三相短路故障时,通过送端配合移相以降低可控自恢复消能装置所需承担的能量,从而降低可控自恢复消能装置的制造难度和设计成本。然而,当站间通信故障时,送端将无法及时知晓受端 VSC 发生了严重的交流故障,若此时仍维持较大的功率输送,可能导致可控自恢复消能装置吸收的能量超过设计能力,从而损坏可控自恢复消能装置,造成 VSC 区域和受端低端 400 kV 区域设备承受较高的直流过电压。

为解决上述问题,设计以下策略:在站间通信故障发生时,若两站均只有 LCC 在运行,则直流系统可以维持正常运行,相关控制保护策略与常规特高压直流工程一致;若站间通信故障发生时,受端

有 VSC 在运行,则执行功率回降,将直流功率降至可以安全运行的水平。

### 2.2.2 VSC 交流母联合闸时自动限制送端功率

混合级联拓扑中多换流器合站建设,分层接入交流系统,可以减弱受端交流故障时 LCC 与 VSC 间以及多 VSC 间的相互影响,提高系统可靠性<sup>[20]</sup>。

为了提高运行方式的灵活性,站内多 VSC 交流母线间配有母联开关,当母联开关处于合位时,两 VSC 交流侧直接相连,一旦发生交流故障,相当于原来 2 个 VSC 同时发生交流故障。

当受端处于 1+2 运行方式,且 2 个在运的 VSC 间交流母联处于合位时,一旦发生交流故障,无健全 VSC 辅助进行直流电压控制,直流侧盈余功率全部涌入故障 VSC 子模块和可控自恢复消能装置,带来设备安全隐患。

为了解决上述问题,当受端处于 1+2 运行方式,且 2 个在运的 VSC 间交流母联处于合位时,主动限制送端直流运行功率,提前在源头解决受端交流故障期间的功率盈余问题。

稳态运行时的功率回降和功率限制目标值设置须与可控自恢复消能装置能量越限定值相配合,避免在最严重的交流故障下出现可控自恢复消能装置能量越限导致的跳闸,以顺利完成交流故障穿越。具体数值可由系统研究并结合各种工况下的交流故障穿越仿真试验获得。

### 2.3 多级自适应协调交流故障穿越控制策略

基于特高压混合级联直流的拓扑特点,实时检测直流系统站间通信状态、运行方式、VSC 子模块电压和交流系统电压,满足对应条件时,自动执行站内单 VSC 内、站内多 VSC 间、站间 LCC 与 VSC 间的多级协调交流故障穿越控制策略,实现各种工况下的受端交流故障穿越。完整的控制策略流程如图 5 所示。

特高压混合级联直流中按层级从上到下依次配置极控制主机、换流器控制主机、阀控制主机,分别完成双极与单极、单换流器、单换流阀相关的控制和监测。

正常运行时,整流侧极控制主机检测站间通信状态,同时接收来自逆变侧极控制主机的 VSC 运行状态和 VSC 母联位置状态。若在 VSC 运行的情况下检测到站间通信故障,整流侧极控制主机自动执行图 5 中的策略①;若在 1+2 运行方式下检测到 VSC 母联处于合位,整流侧极控制主机自动执行策略②。

发生交流故障时,由换流器控制主机进行交流故障状态判断,交流故障对应 VSC 控制主机自动执

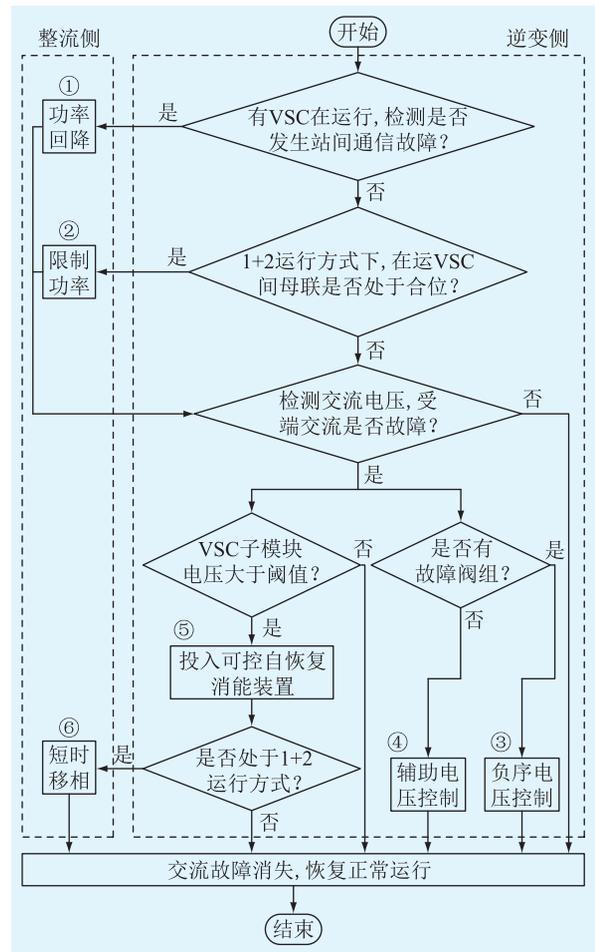


图 5 多级自适应协调交流故障穿越控制策略流程

Fig.5 Flow chart of multi-level adaptive coordinated AC fault ride-through control strategy

行图 5 中的策略③,健全 VSC 控制主机自动执行策略④。与此同时,由阀控制主机进行子模块电压越限判断,将相关信号发送至对应换流器控制主机并自动执行策略⑤;通过站间通信将相关信号发送至整流侧,1+2 运行方式下投入可控自恢复消能装置时,整流侧换流器控制主机自动执行策略⑥。

### 3 试验验证

采用与白鹤滩—江苏混合级联特高压直流工程一致的拓扑、主回路参数以及控制保护装置,搭建 RTDS 系统,对文中所提多级自适应协调交流故障穿越控制策略进行验证。试验用主回路参数和控制参数分别见表 1 和表 2。

#### 3.1 1+3 运行方式下的站间通信故障试验

单极 4 000 MW 满功率运行在 1+3(即受端同极的 LCC 和 3 个 VSC 在运行)方式下,断开控制系统站间通信,试验结果如图 6 所示。可见,当送端检测到站间通信故障时,自动将直流功率回降至预先设置的功率水平 0.4 p.u.,即 1 600 MW。

表 1 试验用主回路参数

Table 1 Main circuit parameters for testing

主回路参数	数值
双极额定功率/MW	8 000
额定直流电压/kV	±800
额定直流电流/A	5 000
送端交流电压/kV	525
受端交流电压/kV	510
直流线路电阻/ $\Omega$	10.9
平波电抗器电感/mH	150
VSC 单桥臂子模块个数	200
VSC 子模块电容/mF	18
VSC 桥臂电抗器电感/mH	50

表 2 试验用控制参数

Table 2 Control parameters for testing

控制参数	数值
站间通信故障功率限制/p.u.	0.4
VSC 母联合位功率限制/p.u.	0.7
VSC 辅助直流电压控制死区/p.u.	0.07
VSC 辅助直流电压控制比例系数	3.0
VSC 辅助直流电压控制输出限幅/p.u.	1.2
请求投入可控自恢复消能装置的 VSC 桥臂子模块电压阈值/V	2 600
VSC 桥臂子模块过压保护定值/V	3 100

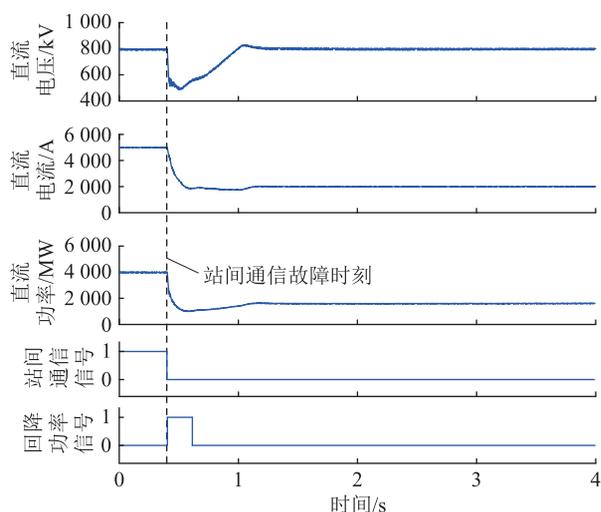


图 6 1+3 运行方式下的站间通信故障试验波形

Fig.6 Test waveforms of inter-station telecommunication fault in 1+3 operation mode

### 3.2 1+3 运行方式下 VSC 母联合闸时单 VSC 退出试验

考虑到交流故障穿越问题,1+2 运行方式下禁止 VSC 母联合闸。为了验证相关功能,首先基于 4 000 MW 满功率运行在 1+3 运行方式,进行 VSC2 和 VSC3 间的母联合闸,然后模拟 VSC1 故障退出,

创造出 1+2 运行方式且 VSC 母联处于合位的工况,试验结果如图 7 所示。

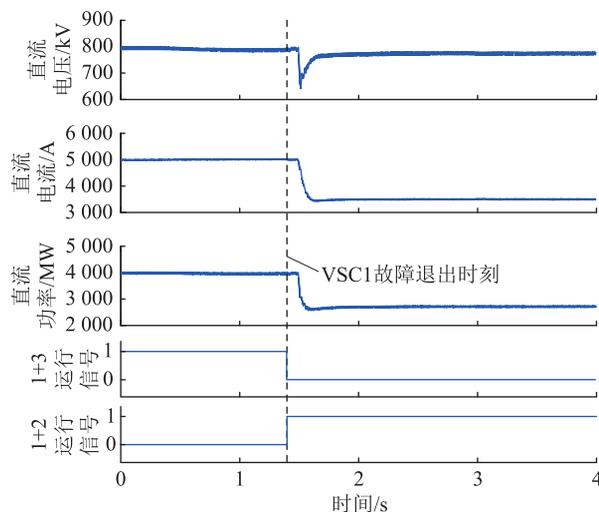


图 7 1+3 运行方式且母联合闸时单 VSC 退出试验波形

Fig.7 Test waveforms of single VSC trip in 1+3 operation mode with bus connection breaker close

可以看出,在 VSC1 因故障退出后,满足受端 1+2 运行并且 VSC 母联处于合位的条件,相关信号经站间通信传输至送端,送端经延时判断后自动限制直流功率至预先设置的功率水平 0.7 p.u.,即 2 800 MW。

### 3.3 1+3 运行方式下的 VSC1 交流单相接地试验

单极 4 000 MW 满功率运行在 1+3 方式下,模拟 VSC1 交流系统单相金属性接地故障,故障时间为 100 ms,试验结果如图 8 所示。

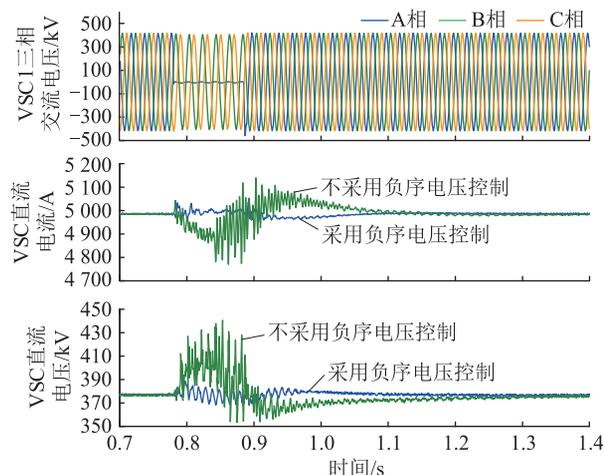


图 8 1+3 运行方式下 VSC1 单相接地故障试验波形

Fig.8 Test waveforms of VSC1 one-phase grounding fault in 1+3 operation mode

由图 8 可以看出,在 VSC1 发生不对称交流故障期间,VSC1 的负序电压控制有效减小了直流电流和直流电压的波动。

### 3.4 1+3 运行方式下的 VSC1 交流三相接地试验

单极 4 000 MW 满功率运行在 1+3 运行方式下,模拟 VSC1 交流系统三相金属性接地故障,故障时间为 100 ms,试验结果如图 9 所示。

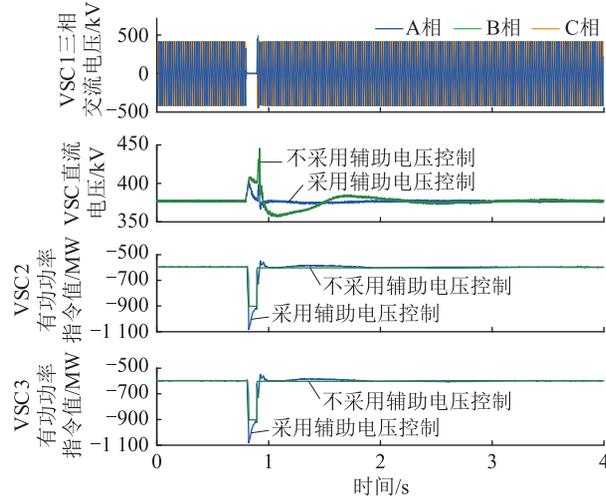


图 9 1+3 运行方式下 VSC1 三相接地故障试验波形

Fig.9 Test waveforms of VSC1 three-phase grounding fault in 1+3 operation mode

由图 9 可以看出,在 VSC1 发生交流故障期间,当 VSC 直流电压波动超过阈值时,VSC2 和 VSC3 自动投入辅助电压控制,调节输出功率,相比不采用辅助电压控制,直流电压波动明显减小,最大值从 446 kV 降至 403 kV,且能够更快稳定。

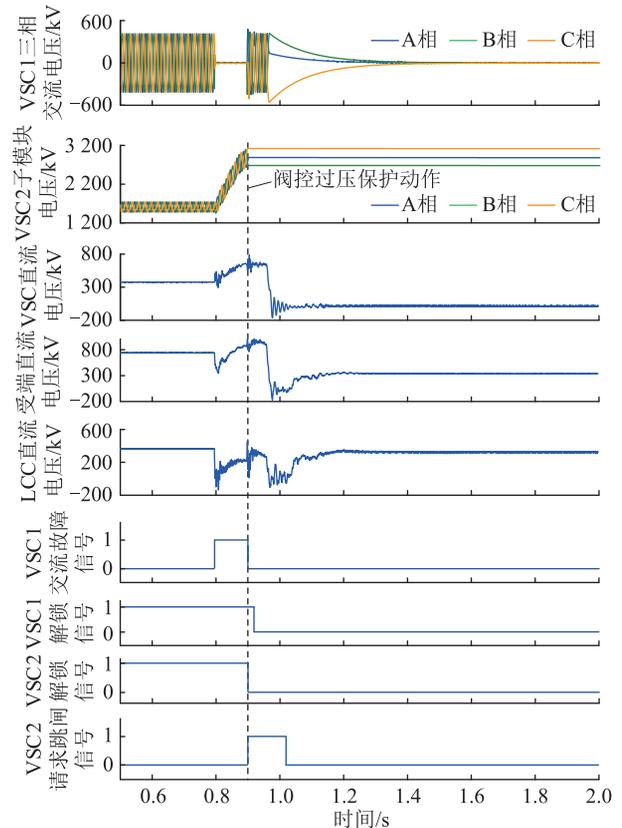
### 3.5 1+2 运行方式下的 VSC1 交流三相接地试验

单极 4 000 MW 满功率运行在 1+2 (VSC1 和 VSC2 在运行) 方式下,模拟直流功率盈余问题最为严重的故障,即 VSC1 交流系统三相金属性接地故障,故障时间为 100 ms,试验的结果如图 10 所示。

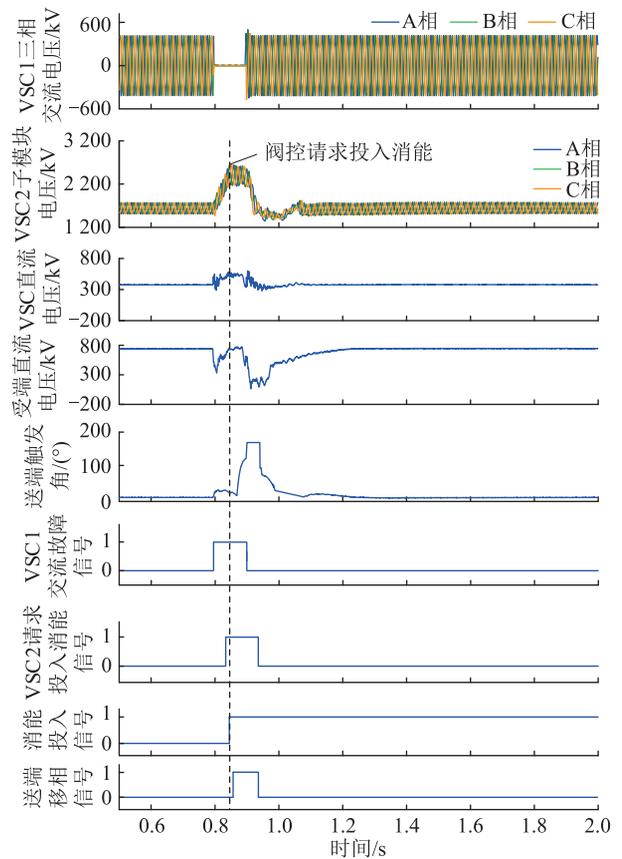
由图 10(a) 可知,1+2 运行方式下,受端 VSC1 交流故障不仅影响 VSC 交流功率传输,还导致 LCC 直流电压和传输功率下降,两者共同产生盈余功率。在这种严苛的工况下,即使投入除可控自恢复消能装置外所有的控制措施,仍会导致 VSC 超过过压保护定值从而闭锁,无法完成故障穿越。

由图 10(b) 可知,1+2 运行方式下,当 VSC2 子模块电压大于阈值时,自动投入可控自恢复消能装置,并将移相命令经站间通信传输至送端,由送端配合执行短时移相,VSC2 子模块电压逐渐下降,成功完成故障穿越。VSC2 子模块电压和直流电压的最大值分别从采取策略前的 3 133 kV 和 800 kV 降至 2 656 kV 和 602 kV。

通过多种工况下的试验可知,在采取文中提出的多级自适应协调交流故障穿越控制策略后,控制



(a) 采取策略前



(b) 采取策略后

图 10 1+2 运行方式下 VSC1 三相接地故障试验波形

Fig.10 Test waveforms of VSC1 three-phase grounding fault in 1+2 operation mode

系统可根据运行方式和电气量自动执行相应措施,多种策略协调配合,完成特高压混合级联直流受端交流故障穿越。

#### 4 结语

针对特高压混合级联直流受端交流故障穿越问题,文中提出了基于运行方式和电气量的多级自适应协调交流故障穿越控制策略,基于实际控制保护装置和工程拓扑搭建了 RTDS 试验平台,进行了各种工况下的受端交流故障试验。分析和试验结果表明:运行方式和电气量可以作为控制策略的切换判据,自适应选择对应级别的交流故障穿越策略;通过站内单 VSC 内、站内多 VSC 间、站间 LCC 与 VSC 间多级交流故障穿越策略自适应协调配合,可以解决特高压混合级联直流 VSC 子模块过压问题,实现各种工况下的受端交流故障穿越。

所提策略已应用于白鹤滩—江苏特高压混合直流工程,同时对采用其他拓扑的混合直流的交流故障穿越有一定的借鉴意义。

#### 参考文献:

[1] 林圣,刘健,刘磊,等. 基于控制保护的高压直流输电系统换相失败抑制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19):6045-6059.  
LIN Sheng, LIU Jian, LIU Lei, et al. A review of commutation failure suppression methods for HVDC systems based on control protection measures [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19):6045-6059.

[2] 宋金钊,李永丽,曾亮,等. 高压直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22):2-13.  
SONG Jinzhao, LI Yongli, ZENG Liang, et al. Review on commutation failure of HVDC transmission system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22):2-13.

[3] 汤奕,郑晨一. 高压直流输电系统换相失败影响因素研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2):499-513, 647.  
TANG Yi, ZHENG Chenyi. Review on influencing factors of commutation failure in HVDC systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2):499-513, 647.

[4] 刘江山,李凤婷,尹纯亚,等. 换相失败引发送端混合级联直流系统换流母线暂态电压波动机理及抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20):36-46.  
LIU Jiangshan, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Mechanism of and suppression strategy for transient voltage fluctuation in the commutator bus of a hybrid cascaded DC system caused by commutation failure [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20):36-46.

[5] 辛业春,刘奇,王拓,等. 抑制 LCC-HVDC 后续换相失败的改进型电流偏差控制策略[J]. 电力建设, 2024, 45(3):97-106.  
XIN Yechun, LIU Qi, WANG Tuo, et al. An improved current

deviation control strategy for suppressing subsequent commutation failure of LCC-HVDC [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(3):97-106.

[6] 李新年. 特高压直流输电系统换相失败及其预防措施研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018.  
LI Xinnian. Study on commutation failure and its prevention strategy in UHVDC [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

[7] 李培平,周泓宇,姚伟,等. 多馈入结构背景下的高压直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电网技术, 2022, 46(3):834-850.  
LI Peiping, ZHOU Hongyu, YAO Wei, et al. Review of commutation failure on HVDC transmission system under background of multi-infeed structure [J]. Power System Technology, 2022, 46(3):834-850.

[8] 贺之渊,高冲,丁骁,等. 多馈入高压直流输电系统换相失败防御技术研究综述[J]. 高电压技术, 2024, 50(7):2735-2746.  
HE Zhiyuan, GAO Chong, DING Xiao, et al. A review of commutation failure prevention technology for multi-infeed HVDC transmission systems [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7):2735-2746.

[9] 叶全,郭春义. 多馈入直流输电系统换相失败风险区域识别(一):计及故障期间直流电流动态特性的换相失败判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21):8182-8193.  
YE Quan, GUO Chunyi. Commutation failure risk areas identification for multi-infeed HVDC system (part I): a method to discriminate the commutation failure considering the dynamic change of DC current under fault condition [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(21):8182-8193.

[10] 李大虎,李佳,周悦,等. 常规直流送端近区电网中调相机和柔性直流的无功协调控制[J]. 电力建设, 2023, 44(12):148-160.  
LI Dahu, LI Jia, ZHOU Yue, et al. Reactive power-coordinated control of a synchronous condenser and VSC-HVDC in the sending-side near region power grid of an LCC-HVDC [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12):148-160.

[11] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 2版. 北京:机械工业出版社, 2017.  
XU Zheng. Flexible HVDC transmission system [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2017.

[12] 聂永辉,张瑞东,周勤勇,等. 海上风电场经柔直送出系统的虚拟导纳中频振荡抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9):36-45.  
NIE Yonghui, ZHANG Ruidong, ZHOU Qinyong, et al. Virtual admittance control strategy for medium-frequency oscillation in an offshore wind farm when connected to a VSC-HVDC [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9):36-45.

[13] 朱琳,寇龙泽,范征,等. 柔性直流并入城市电网后对换流站近区短路电流的影响研究[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(2):139-148.  
ZHU Lin, KOU Longze, FAN Zheng, et al. Study on the influ-

- ence of VSC-HVDC into urban power grid on short-circuit current of the adjacent area of converter station [J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2023, 6(2):139-148.
- [14] 王柯,朱海勇,刘黎,等. 柔性直流系统联网-孤岛转换控制策略[J]. *浙江电力*, 2023, 42(7):1-8.  
WANG Ke, ZHU Haiyong, LIU Li, et al. Control strategy of transition between grid-connected and island operation of flexible DC system [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2023, 42(7):1-8.
- [15] 李选平. LCC-MMC 混合直流输电系统的运行特性分析[D]. 广州:华南理工大学, 2020.  
LI Xuanping. Analysis of operating characteristics of LCC-MMC hybrid HVDC transmission system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [16] 李铜林,冯媛,黄亚欧,等. 柔性直流输电技术及提高 IGBT 元件运行稳定性的策略研究[J]. *南方能源建设*, 2023, 10(5):34-40.  
LI Tonglin, FENG Yuan, HUANG Yaou, et al. Research on flexible HVDC transmission technology and strategies for improving the operational stability of IGBT components [J]. *Southern Energy Construction*, 2023, 10(5):34-40.
- [17] QAHRAMAN B, GOLE A. A VSC based series hybrid converter for HVDC transmission [C]//Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Saskatoon, SK, Canada. IEEE, 2005:458-461.
- [18] 郭春义,赵成勇,彭茂兰,等. 一种具有直流故障穿越能力的混合直流输电系统[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(17):4345-4352.  
GUO Chunyi, ZHAO Chengyong, PENG Maolan, et al. A hybrid HVDC system with DC fault ride-through capability [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(17):4345-4352.
- [19] 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.
- [20] 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 systems [J]. *Electric Power Construction*, 2018, 39(7):115-122.
- [21] 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.
- [22] 郭贤珊,刘路路,周杨,等. LCC-MMC 混合级联系统 MMC 换流器过电压应力抑制策略[J]. *全球能源互联网*, 2020, 3(4):412-419.  
GUO Xianshan, LIU Lulu, ZHOU Yang, et al. Overvoltage mitigation control strategies of MMC converter in a hybrid LCC-MMC HVDC system [J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2020, 3(4):412-419.
- [23] 刘晨,孙攀磊,刘旭辉,等. 特高压混合级联系统受端交流故障问题分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(22):180-187.  
LIU Chen, SUN Panlei, LIU Xuhui, et al. Analysis of AC faults in the receiving-end of a hybrid cascaded multi-terminal HVDC system [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(22):180-187.
- [24] 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.
- [25] 彭忠,孙攀磊,韩伟,等. LCC 与 VSC 级联的特高压混合直流输电系统控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(19):162-172.  
PENG Zhong, SUN Panlei, HAN Wei, et al. Control strategy of a hybrid UHVDC transmission system cascaded by LCC and VSC [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(19):162-172.
- [26] 李晓栋. 特高压混合级联直流输电系统的几个关键技术问题研究[D]. 杭州:浙江大学, 2022.  
LI Xiaodong. Research on several key technical issues for hybrid cascaded UHVDC transmission system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [27] 王相飞,江琴,赵静波,等. 一种基于故障限流器的混合级联直流输电系统故障穿越方法[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(3):60-67.  
WANG Xiangfei, JIANG Qin, ZHAO Jingbo, et al. Fault ride-through method of hybrid cascaded HVDC transmission system based on fault current limiter [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(3):60-67.
- [28] 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.
- [29] 王冰倩,赵文强,侍乔明,等. 受端混联 LCC-VSC 特高压直流输电系统故障穿越方法[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(6):69-76.  
WANG Bingqian, ZHAO Wenqiang, SHI Qiaoming, et al. Fault ride-through method of inverter hybrid cascade LCC-VSC

UHVDC transmission system[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(6): 69-76.

[30] 刘泽洪, 马为民, 王绍武, 等. 混合级联特高压直流输电系统方案设计及动模试验验证[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 1214-1222.

LIU Zehong, MA Weimin, WANG Shaowu, et al. Schematic design of hybrid cascaded ultra HVDC and its modification in dynamic model experiment[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 1214-1222.

[31] 刘磊, 张翔, 王德昌, 等. 基于晶闸管的直流可控避雷器关键技术[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(9): 183-188.

LIU Lei, ZHANG Xiang, WANG Dechang, et al. Key technolo-

gy of DC controllable arrester based on thyristor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(9): 183-188.

作者简介:



吕彦北

吕彦北(1993), 男, 硕士, 工程师, 从事高压直流输电控制保护工作(E-mail: lvyb@nrec.com);

赵文强(1985), 男, 硕士, 高级工程师, 从事高压直流输电控制保护工作;

侍乔明(1987), 男, 博士, 高级工程师, 从事高压直流输电控制保护工作。

## Multi-level adaptive coordinated AC fault ride-through control strategy for hybrid cascaded UHVDC transmission system

LYU Yanbei<sup>1</sup>, ZHAO Wenqiang<sup>1</sup>, SHI Qiaoming<sup>1</sup>, YAO Qixin<sup>2</sup>, SUI Shunke<sup>1</sup>, CHANG Haotian<sup>1</sup>

(1. Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. Direct Current Company, Yichang 443000, China)

**Abstract:** Hybrid cascaded ultra high voltage direct current (UHVDC) integrates the advantages of line commutated converters (LCC) and voltage source converters (VSC). However, there is surplus power on the direct current (DC) side during alternating current (AC) faults at the receiving end, which may cause overvoltage issues in VSC sub-modules. Based on the topological features of the hybrid cascaded UHVDC system, a multi-level adaptive coordinated control strategy is proposed, utilizing operation modes and electrical signals. Multi-level control strategies, namely controlling the negative sequence voltage of the faulty VSC converter, adopting the auxiliary DC voltage control of the sound VSC converters, switching on the controllable energy dissipation devices at the receiving end and retarding of the LCC converters at the sending end, adjusting the DC power of the converters at the sending and receiving ends, are adaptively coordinated within converters, between converters and between stations to effectively mitigate the overvoltage issues in VSC sub-modules and realize AC fault ride-through of the hybrid cascaded UHVDC system. A closed-loop real-time digital simulation test platform is built based on actual control and protection devices and the topology used on site. The test results show the validity of the proposed strategy. The proposed strategy has been successfully applied in the Baihetan-Jiangsu hybrid UHVDC project.

**Keywords:** ultra high voltage direct current (UHVDC); hybrid cascaded topology; multi-level adaptive; fault ride-through; sub-module overvoltage

(编辑 陆海霞)