

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.02.003

# 混合多馈入直流输电系统连续换相失败抑制策略

钟明明<sup>1,2</sup>, 夏成军<sup>1,2</sup>, 黎寿涛<sup>1,2</sup>, 黄楚茵<sup>1,2</sup>, 李成翔<sup>2,3</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东省新能源电力系统智能运行与控制企业重点实验室, 广东 广州 510663; 3. 直流输电技术国家重点实验室 (南方电网科学研究院有限责任公司), 广东 广州 510663)

**摘要:**随着直流输电工程应用的增多,一旦基于电网换相换流器的高压直流(LCC-HVDC)发生连续换相失败,将会对电力系统的稳定运行产生极大影响。为了抑制混合多馈入直流输电系统中LCC-HVDC的连续换相失败,文中从提升LCC-HVDC换相电压的角度出发,提出混合多馈入直流输电系统的协调控制策略。该策略根据LCC-HVDC的实时无功缺额动态调节基于电压源换流器的高压直流(VSC-HVDC)输出的无功功率与有功功率,从而改变其暂态稳定运行点。通过该策略的协调控制可以抑制LCC-HVDC的连续换相失败以及较大程度提升直流输电系统有功功率的传输能力。最后在PSCAD/EMTDC中搭建了混合双馈入直流输电系统的仿真模型,验证了该协调控制策略的有效性。

**关键词:**混合多馈入直流系统;连续换相失败;协调控制;附加无功控制;自适应电流限制;动态功率限幅

**中图分类号:**TM722

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2022)02-0020-09

## 0 引言

随着直流输电工程<sup>[1]</sup>在大容量远距离输电及区域电网互联等领域的广泛应用,已经出现多条基于电网换相换流器的高压直流(line commutated converter based high voltage direct current, LCC-HVDC)线路与基于电压源换流器的高压直流(voltage source converter based high voltage direct current, VSC-HVDC)<sup>[2-4]</sup>线路落点于同一交流系统的混合多馈入直流输电系统<sup>[5]</sup>。例如,上海芦潮港和浙江舟山嵊泗岛之间运行的LCC-HVDC与舟山五端VSC-HVDC工程<sup>[6]</sup>就形成了一个混合双馈入直流输电系统;南方电网昆柳龙直流输电系统与其他多回LCC-HVDC构成一个混合多馈入直流输电系统。LCC-HVDC采用晶闸管作为换流元件,存在换相失败现象<sup>[7-9]</sup>,而VSC-HVDC无换相失败问题,且可提供无功电压支撑。如何利用VSC-HVDC的无功电压支撑能力来改善多馈入直流输电系统的故障恢复特性,尤其是抑制LCC-HVDC的连续换相失败就成了一个热点研究问题。

针对如何抑制连续换相失败,现有文献主要从3个方面进行改进,分别是改进直流电流参考值、快速增大越前触发角以及提升换流母线电压支撑。文献[10-12]分阶段分析了LCC-HVDC连续换相失败的产生机理,提出电流偏差控制输出的快速降

低会引发连续换相失败。文献[11-13]均提出了改进的低压限流控制(voltage dependent current order limit, VDCOL)来抑制连续换相失败,但这会导致LCC-HVDC传输的有功功率减少,严重的会导致受端交流系统存在较大的有功缺额。文献[14-15]提出根据临界电压来控制直流输送功率的策略,改善直流系统的无功需求从而抑制连续换相失败。文献[16-19]提出换相失败预测控制,在换相裕度不足时快速增大越前触发角,增大换相裕度。文献[20-21]分别提出基于关断角和触发角的无功协调控制策略,以此来提高LCC-HVDC抵御连续换相失败的能力。文献[22]分析谐波是直流故障恢复期间发生连续换相失败的原因之一,提出基于谐波电压补偿的连续换相失败抑制策略。文献[23-24]建立了LCC-HVDC逆变器关断角、直流电流和VSC-HVDC输出无功功率的关联模型,在换相失败可控域内进行优化控制。文献[25-26]分析了LCC-HVDC与VSC-HVDC之间的电气距离以及VSC-HVDC系统控制器的调节速度对混合多馈入系统故障恢复特性的影响。

现有文献提出的协调控制策略,其设计初衷是大幅增大VSC-HVDC的无功功率,为系统提供动态无功支撑,这往往会导致故障清除后其输出的有功功率受限,不利于系统功率恢复。文中提出了VSC-HVDC附加无功控制以及动态功率限幅调节策略,充分利用VSC-HVDC的容量裕度,合理分配其输出的有功功率与无功功率,可以较大程度提升混合多

收稿日期:2021-09-28;修回日期:2021-12-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1766213)

馈入直流输电系统的故障恢复特性,提高系统运行的稳定性。最后在 PSCAD/EMTDC 软件中验证了该协调控制策略的有效性。

## 1 混合多馈入直流输电系统

### 1.1 系统结构

文中所用混合多馈入直流输电系统采用典型的混合双馈入直流输电系统模型,其拓扑结构如图 1 所示, $Z_1, Z_2$  为整流侧等值阻抗; $Z'_1, Z'_2$  为逆变侧等值阻抗;LCC-HVDC 与 VSC-HVDC 之间的电气距离用等值阻抗  $Z_{12}$  表示。LCC-HVDC 采用 CIGRE 模型<sup>[27]</sup>,其控制策略也与 CIGRE 模型保持一致;VSC-HVDC 模型采用 PSCAD 官方模型。此系统可以看作是由实际复杂电力系统抽象得到的简化模型。

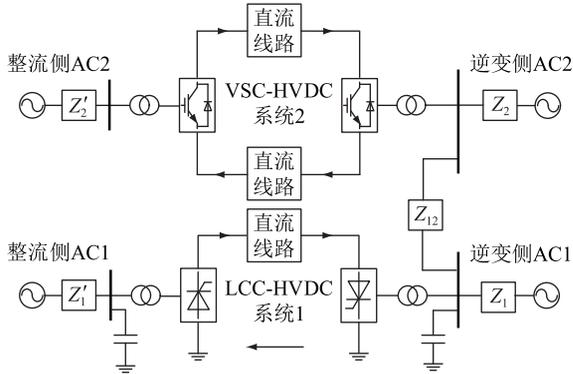


图 1 混合双馈入直流输电系统结构

Fig.1 Structure of hybrid dual-infeed HVDC transmission system

### 1.2 LCC 与 VSC 受端换流站控制策略

CIGRE 直流输电标准测试系统逆变侧的控制结构如图 2 所示。其中, $U_{d\_inv}$  为逆变侧直流电压的测量值; $I_{d\_inv}$  为直流电流的测量值; $\gamma_m$  为逆变侧熄弧角的测量值; $\gamma_{ref}$  为熄弧角参考值; $I_{d\_order}$  为定电流给定参考值; $I_{dr\_order}$  为最终送整流侧的直流电流参考值; $\beta_{inv\_CC}, \beta_{inv\_CEA}$  分别为逆变侧定电流控制和定熄弧角控制输出的越前触发角参考值; $\beta_{inv}$  为最终越前触发角参考值。由图 2 可知,逆变侧的控制主要由 VDCOL、定电流控制、定熄弧角控制和电流偏差控制组成。

传统的 VSC 矢量电流控制结构如图 3 所示,由内部电流控制环和外部功率控制环构成。其中, $P_{ref}, V_{acref}, P_s, V_{ac}$  分别为输出有功功率参考值、受端交流电压参考值、输出有功功率实际值和受端交流电压实际值; $i_d, i_q$  分别为  $d, q$  轴输出电流; $i_d^*, i_q^*$  分别为功率外环控制输出的  $d, q$  轴电流参考值; $i_{d1}^*, i_{q1}^*$  分别为经限幅后最终  $d, q$  轴电流参考值; $u_{sd}, u_{sq}$  分别为受端交流电压的  $d, q$  轴分量; $u_d^*, u_q^*$  分别为

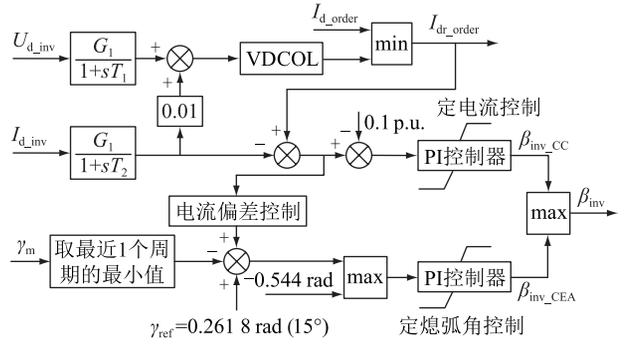


图 2 LCC-HVDC 输电系统逆变侧的控制结构

Fig.2 The inverter side control structure of the LCC-HVDC transmission system

VSC-HVDC 输出电压  $d, q$  轴参考值; $i_{lim}^*$  为换流器的最大电流限制给定值; $\omega$  为系统的角频率; $L_e$  为换流器交流侧等值电感。

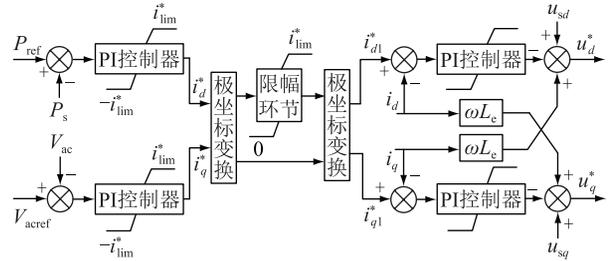


图 3 传统的 VSC 矢量电流控制结构

Fig.3 Structure of traditional VSC vector current control

## 2 换相失败的基本原理

在换相过程刚结束时,若刚退出导通的阀在反向电压作用的一段时间内未能恢复阻断能力,或换相过程未能结束,则电压转向后被换相的阀将向原来预定退出导通的阀倒换相,称之为换相失败<sup>[7]</sup>。通常首次换相失败都是由于逆变侧交流系统故障导致换流母线电压快速跌落,换相裕度不足,最终熄弧角  $\gamma$  小于固有极限熄弧角  $\gamma_{min}$ 。而在此期间控制器还来不及响应,因此首次换相失败是很难避免的。逆变侧熄弧角  $\gamma$  的计算公式为:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}kI_dX_r}{U_L} + \cos\beta\right) \quad (1)$$

式中: $k$  为逆变侧变压器变比; $I_d$  为直流电流; $X_r$  为逆变侧等效换相电抗; $U_L$  为逆变侧交流母线线电压有效值; $\beta$  为逆变侧越前触发角。

连续换相失败指直流输电系统首次发生换相失败后,再次发生换相失败的现象<sup>[11,28]</sup>。连续换相失败一般发生在直流系统的故障恢复过程中,此时部分电气量已恢复到额定值左右,且直流系统的控制器有能力对系统进行调节以保持系统的稳定运

行。因此,连续换相失败主要是由决定  $\gamma$  大小的直流电流、换流母线电压幅值和越前触发角 3 个电气变量互不配合及控制器交互不当导致的<sup>[10]</sup>。

换相失败的根本原因是熄弧角小于其固有极限熄弧角,根据连续换相失败的机理,分析式(1)可知,可分别针对决定  $\gamma$  大小的 3 个主要电气变量开展抑制措施的研究<sup>[29]</sup>。文中重点从换流母线电压角度进行改进,通过增加 VSC-HVDC 在故障期间输出的无功功率,提高受端交流系统的无功电压支撑强度,增大换相裕度。

### 3 混合多馈入直流输电系统协调控制策略

为了解决 VSC-HVDC 因抑制连续换相失败增发大量无功功率而导致输送的有功功率受限的问题,文中提出可以在故障初期大幅度增发无功功率,而当受端换流母线电压大于临界换相电压时,则通过动态改变功率外环输出的限幅值迅速减少输出的无功功率,同时加快有功功率的恢复。因此,文中提出了基于熄弧角偏差的无功附加控制和在自适应的电流限制策略<sup>[30]</sup>基础上改进的动态功率限幅调节策略相结合协调控制策略,其整体的结构如图 4 所示。该策略可以通过动态调节功率外环输出的上、下限幅值来改变其故障期间的暂态稳定运行点,快速改变 VSC-HVDC 输出的有功功率和无功功率,既能在故障初期提供无功电压支撑,又能较大限度保证有功功率的传输能力。

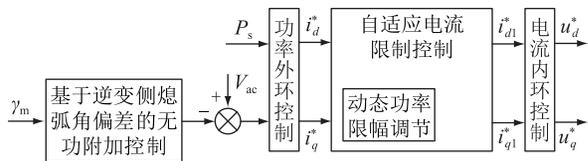


图 4 协调控制策略的整体结构  
Fig.4 The overall structure of the coordinated control strategy

#### 3.1 基于熄弧角偏差的 VSC-HVDC 无功附加控制

为了充分利用 VSC-HVDC 无功补偿的能力,抑制 LCC-HVDC 连续换相失败,根据文中对换相失败的机理分析,可以将故障时根据  $\gamma$  的偏差量计算得到的补偿量  $\Delta V_{ac}$  附加至 VSC-HVDC 的无功外环控制,使得 VSC-HVDC 能在换相裕度不足时产生更多的无功功率,并同时加快 VSC-HVDC 的响应速度,提高 VSC-HVDC 对受端交流电压的支撑能力。基于熄弧角偏差的无功附加控制的逻辑框图见图 5。

该控制计算得到补偿值后还需要使能环节来控制其投入运行。使能选择信号为故障判别模块的输出信号,当判别出故障发生时,其输出信号置

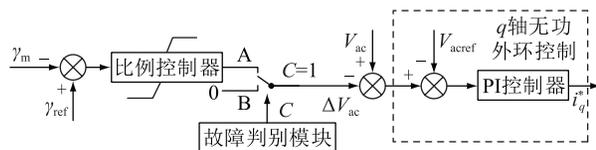


图 5 基于熄弧角偏差的无功附加控制的逻辑框图  
Fig.5 Logical block diagram of reactive power additional control based on the deviation of arc extinguishing angle

1,并维持到系统恢复至稳态值。故障判别方法不是文中研究重点,详细控制逻辑框图参考文献[31]。

#### 3.2 动态功率限幅调节策略

动态功率限幅调节策略是混合双馈入直流输电系统协调控制策略的核心部分,该策略是在自适应的电流限制策略<sup>[30]</sup>基础上,根据 LCC-HVDC 的实时无功缺额动态调整 VSC-HVDC  $q$  轴无功功率外环输出  $i_q^*$  的上、下限幅值,从而实现在故障期间改变 VSC-HVDC 的稳态运行点。自适应电流限制控制的逻辑框图见图 6,动态功率限幅调节策略具体的控制逻辑框图如图 7 所示。

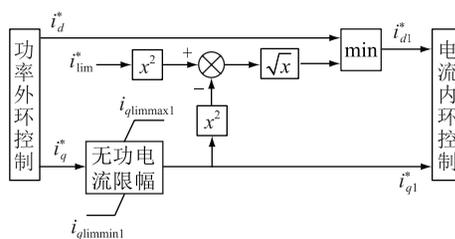


图 6 自适应电流限制控制逻辑框图  
Fig.6 Logic block diagram of adaptive current limit control

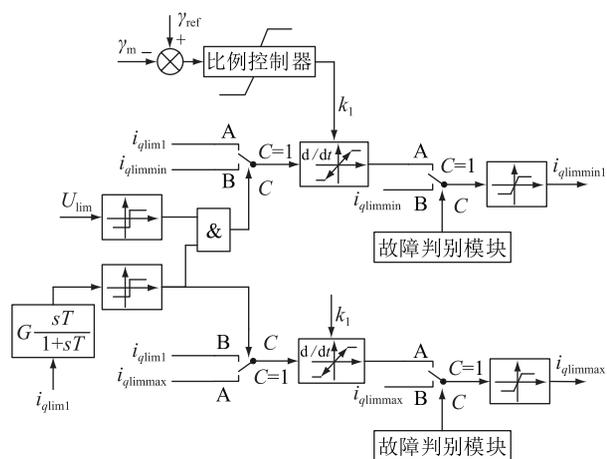


图 7 VSC-HVDC 动态功率限幅调节逻辑框图  
Fig.7 Logic block diagram of VSC-HVDC dynamic power limit adjustment

图 7 中,动态功率限幅调节策略是对无功电流参考值  $i_q^*$  进行限制,其核心是根据 LCC-HVDC 的无功缺额动态求取  $i_q^*$  的上、下限幅值  $i_{qlimmax1}$  和

$i_{q\limmin1}$ , 并将其送往自适应电流限制控制器作为功率外环控制输出的  $i_q^*$  的上、下限幅。而自适应的电流限制策略是在满足  $q$  轴无功电流需求的基础上将剩余容量裕度作为  $i_d^*$  的限制。

图 7 中,  $i_{q\limmax}$ ,  $i_{q\limmin}$  分别为初始设定的静态无功的上、下限幅值,  $k_1$  为速率限制器的斜率;  $U_{\lim}$  为 LCC 的临界换相电压, 其计算公式见式(2)。其中,  $\beta_N$  为逆变侧的额定越前触发角。

$$U_{\lim} = \frac{\sqrt{2}kI_d X_r}{\cos \gamma_{\min} - \cos \beta_N} \quad (2)$$

图 7 中,  $i_{q\lim1}$  为根据瞬时功率理论计算得到, 其计算公式为:

$$i_{q\lim1} = \frac{Q_{LCC}/S_b + u_{sq}i_d}{u_{sd}} \quad (3)$$

式中:  $Q_{LCC}$  为 LCC-HVDC 从受端交流系统吸收的无功功率;  $S_b$  为系统容量的基准值。根据锁相环的控制理论, 此处设定  $u_{sq} = 0$ ,  $u_{sd} = 1$ , 因此可得  $i_{q\lim1}$  的最终计算公式为:

$$i_{q\lim1} = Q_{LCC}/S_b \quad (4)$$

该控制策略包括如下部分:

(1) 上、下限幅选择。根据计算得到  $i_{q\lim1}$  的参考值, 求取其斜率。当斜率为正且受端交流电压大于临界换相电压时, 则改变  $i_q^*$  的下限值选择为  $i_{q\lim1}$ , 否则为  $i_{q\limmin}$ ; 当斜率为负时, 则改变  $i_q^*$  的上限值选择为  $i_{q\lim1}$ , 否则为  $i_{q\limmax}$ 。

(2) 斜率限制。考虑到 VSC-HVDC 的调节速度较快, 故加入斜率控制器限制无功的变化速率, 提高系统的稳定性。其速率控制器的斜率根据直流熄弧角偏差的大小来决定, 即将熄弧角偏差经过比例控制器并限幅后得到。

(3) 使能环节。该控制策略中的使能控制与 3.1 节中的相同。

通过采用文中所提的协调控制策略, VSC-HVDC 在故障初期可以快速增发大量的无功功率, 进而使 LCC-HVDC 的直流电压恢复速度加快, 相应地, 经 VDCOL 的直流电流参考值恢复速度也加快, 因此在文中所提协调控制策略下, LCC-HVDC 有功恢复速度将快于传统控制策略下的恢复速度。同时虽然在故障初期文中所提的控制策略会因增发大量无功而导致其输出的有功受到一定限制, 但根据动态功率限幅策略的控制逻辑, 当受端交流电压大于临界换相电压时, 控制器会迅速调节其限幅值, 减少输出的无功功率, 进而加快其有功功率的恢复。而文献[8]所提的限制型 VDCOL 策略, 虽然能抑制连续换相失败的发生, 但由于存在与 VDCOL

输出的直流电流参考值取小的环节, 因此其直流电流的恢复速度将受到限制, 有功功率的恢复速度也会慢于传统的控制策略。因此, 在有功功率恢复方面, 文中所提控制策略是优于其他控制策略的, 可以较大程度提升直流系统的有功传输能力。

同时, 文中所提的协调控制策略在应用中需要重点关注 VSC-HVDC 的最大容量约束, 即 VSC-HVDC 的最大电流限制参考值  $i_{\lim}^*$  的大小。当 VSC-HVDC 所能补偿的最大无功不足以补偿系统的无功缺额时, 尤其是在故障较为严重时, 无功缺额较大, 文中所提控制策略将受到一定的限制。因此所提控制策略更适用于受端交流系统较弱、LCC-HVDC 与 VSC-HVDC 电气距离较近且 VSC-HVDC 有较充足的无功容量裕度的情况。

### 3.3 VSC-HVDC 协调控制策略的实现流程

VSC-HVDC 的协调控制策略主要包括基于熄弧角偏差的无功附加控制和动态功率限幅调节策略两部分, 其实现流程如图 8 所示。

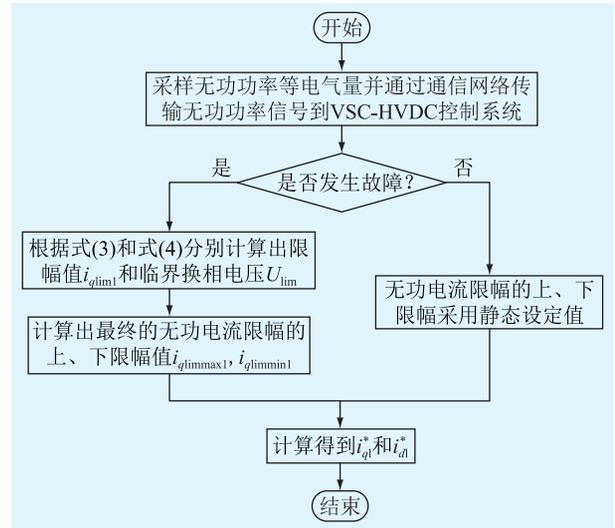


图 8 VSC-HVDC 协调控制策略的实现流程

Fig.8 Realization flow chart of VSC-HVDC coordinated control strategy

其具体步骤如下:

(1) 从 LCC-HVDC 受端换流站采样其从交流系统吸收的无功功率、换流阀熄弧角和直流电流, 并通过通信网络传输到 VSC-HVDC 控制系统;

(2) 故障判别模块判断是否发生故障, 是则跳转至步骤(3), 否则跳转至步骤(5);

(3) 求取  $i_{q\lim1}$ ,  $U_{\lim}$ ;

(4) 将  $i_{q\lim1}$ ,  $U_{\lim}$  送入动态功率限幅调节控制器计算得到最终的  $i_q^*$  信号的上、下限幅值, 跳转至步骤(6);

(5) 采用静态设定的  $i_{q\limmax}$  和  $i_{q\limmin}$  作为无功电

流限幅的上、下限幅值;

(6) 根据改进的外环控制策略,同时将得到的  $i_{q\limmin1}$  和  $i_{q\limmax1}$  送入如图 6 所示的自适应电流限制控制器,得到  $i_{q1}^*$  和  $i_{d1}^*$ 。

文中所提 VSC-HVDC 协调控制策略的信号传递如图 9 所示。

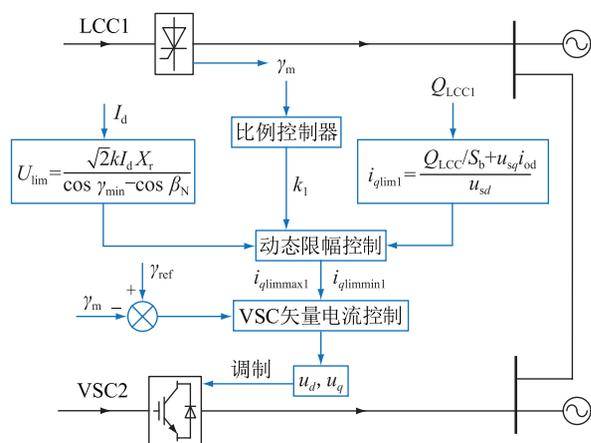


图 9 VSC-HVDC 协调控制策略的信号传递  
Fig.9 Signal transmission of VSC-HVDC coordinated control strategy

### 4 仿真分析

为了分析文中提出的协调控制策略在抑制 LCC-HVDC 换相失败方面的效果,在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 1 所示的混合双馈入直流输电系统模型。由于文中所提策略需要采样 LCC-HVDC 换流站的电气量后进行传输,信号传输过程中存在时间延时,因此此策略更适用于各受端换流站之间电气距离较近的情况,故线路阻抗值  $Z_{12}$  设置为  $3.6 + j8.3 \Omega$ 。同时考虑文中所提控制策略的适用场景,为充分验证其有效性,文中最大电流限制参考值  $i_{lim}^*$  设置为 1.4 p.u.,受端交流系统短路比 (short circuit ratio, SCR) 值取为 3。逆变侧额定触发角  $\alpha_N$  选取  $142^\circ$ ,最小关断角  $\gamma_{min}$  选取  $7^\circ$ ,LCC-HVDC 和 VSC-HVDC 的其他主要参数见表 1 和表 2。

表 1 LCC-HVDC 测试系统具体参数

Table 1 Specific parameters of LCC-HVDC test system

参数	整流侧	逆变侧
交流系统电压等级/kV	330	220
直流系统电压等级/kV	+500	+500
交流系统等值阻抗/ $\Omega$	$47.655 \angle 84^\circ$	$8.833 \angle 75^\circ$
无功补偿容量/Mvar	626	626
变压器容量/(MV·A)	603.7	591.8
变压器漏抗/p.u.	0.18	0.18
变压器变比	345 kV/213.5 kV	209.2 kV/230 kV

表 2 VSC-HVDC 系统具体参数

Table 2 Specific parameters of VSC-HVDC system

参数	整流侧	逆变侧
交流系统电压等级/kV	220	220
直流系统电压等级/kV	$\pm 320$	$\pm 320$
变压器额定容量/(MV·A)	1 000	1 000
变压器漏抗/p.u.	0.15	0.15
变压器变比	230 kV/370 kV	370 kV/230 kV
桥臂子模块数	200	200
子模块电容值/mF	10	10
桥臂电感值/mH	29	29

同时,设置了 4 组不同的方案进行对比分析,案例设置如下。

方案 1:LCC-HVDC 与 VSC-HVDC 均采用传统控制策略。

方案 2:LCC-HVDC 采用文献[11]所提的限制型 VDCOL 策略,VSC-HVDC 采用传统控制策略。

方案 3:LCC-HVDC 采用传统控制策略,VSC-HVDC 采用文中所提协调控制策略。

方案 4:LCC-HVDC 采用文献[11]所提的限制型 VDCOL 策略,VSC-HVDC 采用文中所提协调控制策略。

所有方案均对混合双馈入系统仿真模型施加如下故障:系统稳定后,于 5.0 s 时在 LCC-HVDC 受端换流母线处施加三相接地故障,接地阻抗为  $6.5 + j6.5 \Omega$ ,故障持续 0.1 s,仿真从 4.9 s 运行至 5.9 s。方案 1、方案 2、方案 3 和方案 4 时域仿真波形对比如图 10 所示。

由图 10 可知,方案 1 在受端交流系统故障后发生了 2 次换相失败,导致直流系统输送功率恢复较慢,且功率波动较大,故障切除后 LCC-HVDC 有功恢复至 90% 用时 196.2 ms。而方案 2、3、4 均能抑制连续换相失败的发生,故障切除后 LCC-HVDC 有功恢复至 90% 用时分别为 81.55 ms, 62.20 ms, 66.30 ms。但是从图 10 受端电压和直流电流的波形图可以看出,方案 2 与方案 3 抑制连续换相失败的思路有着明显的区别。由直流电流的局部放大图可知,方案 2 是通过减小故障恢复期间的直流电流来增大 LCC-HVDC 的换相裕度,LCC-HVDC 传输的有功功率恢复速率会较慢;方案 3 则充分利用了 VSC-HVDC 的容量裕度增发无功功率来提供无功电压支撑,同样提高了换相裕度,抑制了连续换相失败的发生,且并没有对直流系统传输有功的恢复进行限制,故传输的有功功率恢复速率较快。而方案 4 的故障恢复特性基本介于方案 2 和方案 3 之间,因采用 2 种改进控制策略来抑制连续换相失败,其抵御

连续换相失败的能力更强,但有功功率的传输能力有所限制,故该方案可用于 VSC-HVDC 的无功容量不足以补偿系统无功缺额时的场景。

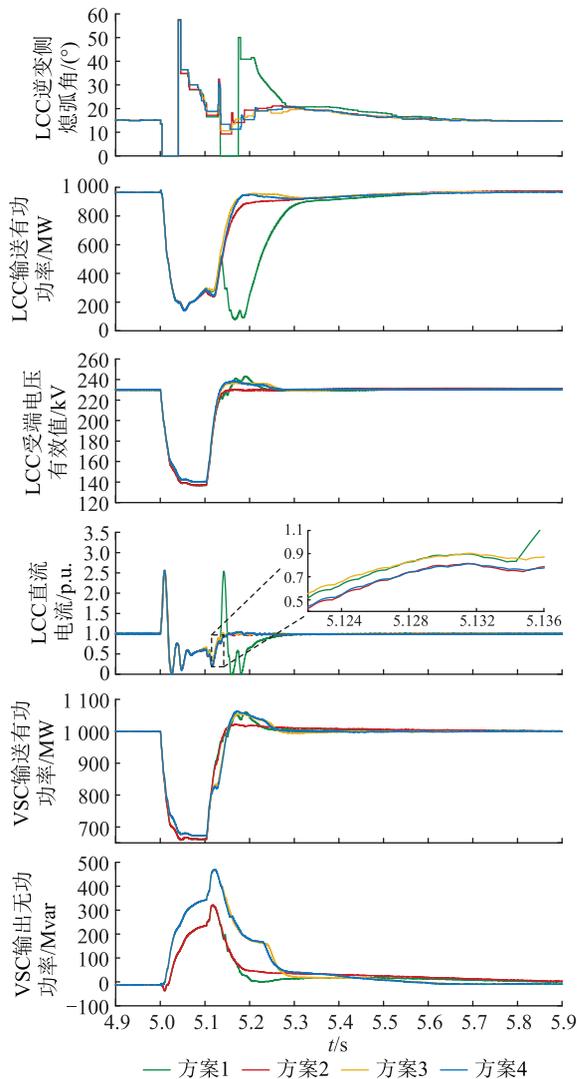


图 10 故障后逆变侧控制系统响应过程

Fig.10 Response process of the inverter control system after fault

为充分验证文中所提控制策略在不同故障严重程度下对连续换相失败的抑制效果,仿真对比了三相对称故障与非对称故障下 4 种控制方案发生换相失败的次数以及 LCC-HVDC 有功恢复至 90% 用时,以三相接地故障为例,其结果见表 3—表 6。

故障严重程度采用故障期间受端换流母线电压跌落水平来表示。故障期间受端换流母线电压有效值跌落在 0.50~0.95 p.u. 之间。三相接地故障时刻设置在 5 s,故障持续时间为 0.1 s。

由表 3—表 6 可知,方案 2、3、4 均能有效抑制不同故障严重程度下的连续换相失败。虽然 3 种方案均从抑制连续换相失败的机理出发,但方案 2 以降低 LCC-HVDC 的传输有功为代价;而方案 3 的优

表 3 方案 1 中直流系统的恢复特性统计数据  
Table 3 Statistics of recovery characteristics of HVDC systems in case 1

故障电压跌落水平/p.u.	换相失败次数	LCC 有功恢复至 90% 用时/ms
0.50	1	68.55
0.55	1	67.40
0.60	2	196.2
0.65	2	182.5
0.70	2	169.2
0.75	1	72.70
0.80	1	58.10
0.85	1	53.55
0.90	1	53.55
0.95	1	54.55

表 4 方案 2 中直流系统的恢复特性统计数据  
Table 4 Statistics of recovery characteristics of HVDC systems in case 2

故障电压跌落水平/p.u.	换相失败次数	LCC 有功恢复至 90% 用时/ms
0.50	1	74.35
0.55	1	68.85
0.60	1	81.55
0.65	1	76.65
0.70	1	167.1
0.75	1	75.85
0.80	1	64.00
0.85	1	57.45
0.90	1	55.65
0.95	1	55.40

表 5 方案 3 中直流系统的恢复特性统计数据  
Table 5 Statistics of recovery characteristics of HVDC systems in case 3

故障电压跌落水平/p.u.	换相失败次数	LCC 有功恢复至 90% 用时/ms
0.50	1	64.70
0.55	1	69.40
0.60	1	62.20
0.65	1	72.30
0.70	1	62.10
0.75	1	57.30
0.80	1	63.45
0.85	1	52.45
0.90	1	54.70
0.95	1	50.75

势在于可以充分利用 VSC-HVDC 的容量裕度,发挥其无功电压支撑的能力,因此故障期间 LCC-HVDC 输送功率的恢复速度会快于方案 2;方案 4 则介于方案 2 和 3 之间。综上,在混合多馈入直流输电系

表6 方案4中直流系统的恢复特性统计数据  
Table 6 Statistics of recovery characteristics of HVDC systems in case 4

故障电压 跌落水平/p.u.	换相失败次数	LCC有功恢复 至90%用时/ms
0.50	1	68.35
0.55	1	69.50
0.60	1	66.30
0.65	1	73.45
0.70	1	65.10
0.75	1	63.45
0.80	1	56.30
0.85	1	54.05
0.90	1	57.80
0.95	1	56.30

统下,为充分发挥 VSC-HVDC 的无功电压调节能力,方案3会优于方案2,而当 VSC-HVDC 的无功调节能力达到上限时则可选择方案4。

## 5 结语

文中提出了混合多馈入直流输电系统抑制连续换相失败的协调控制策略,即基于熄弧角偏差的无功附加控制和动态功率限幅调节策略相结合的控制策略。该策略将熄弧角裕度不足时的熄弧角偏差附加到 VSC-HVDC 的无功外环,加快在裕度不足时 VSC-HVDC 的响应速度;又通过采用动态功率限幅调节的控制策略,改变 VSC-HVDC 故障期间的暂态稳定运行点,既可以充分发挥 VSC-HVDC 无功快速调节的能力,快速补偿故障恢复期间系统的无功缺额,抑制连续换相失败的发生,又能较大幅度提升故障恢复期间有功功率的传输能力。

### 参考文献:

[1] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:机械工业出版社,2004.  
XU Zheng. Dynamic behavior analysis of AC and DC power system[M]. Beijing:China Machine Press,2004.

[2] 赵成勇,郭春义,刘文静. 混合直流输电[M]. 北京:科学出版社,2014.  
ZHAO Chengyong, GUO Chunyi, LIU Wenjing. Hybrid high voltage direct current transmission system[M]. Beijing: Science Press,2014.

[3] 申志鹏,熊会,朱介北,等. 影响特高压直流输电工程安全高效运行评估因素集的建模与分析[J]. 发电技术,2021,42(1):48-59.  
SHEN Zhipeng, XIONG Hui, ZHU Jiebei, et al. Modelling and analysis on evaluation factor sets affecting the safe and high-efficiency operation of UHVDC transmission project[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 48-59.

[4] 吕思卓,舒展,宋新甫,等. 柔性直流接入对弱受端电网恢复

特性的影响及优化措施[J]. 电力工程技术,2020,39(1):31-37.

LYU Sizhuo, SHU Zhan, SONG Xinfu, et al. Influence of VSC-HVDC interconnection on recovery characteristics of weak receiving-end grid fault and optimization measure [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 31-37.

[5] 郭春义,倪晓军,赵成勇. 混合多馈入直流输电系统相互作用关系的定量评估方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):1772-1780.

GUO Chunyi, NI Xiaojun, ZHAO Chengyong. A quantitative evaluation method on interaction analysis of hybrid multi-infeed HVDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1772-1780.

[6] 高强,林焯,黄立超,等. 舟山多端柔性直流输电工程综述[J]. 电网与清洁能源,2015,31(2):33-38.

GAO Qiang, LIN Ye, HUANG Lichao, et al. An overview of Zhoushan VSC-MTDC transmission project [J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(2): 33-38.

[7] 袁阳,卫志农,雷霄,等. 直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):140-147.

YUAN Yang, WEI Zhinong, LEI Xiao, et al. Survey of commutation failures in DC transmission systems [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 140-147.

[8] 刘耀,吴佳玮,肖晋宇,等. 有源型柔性直流输电技术在全球能源互联网背景下的应用研究[J]. 全球能源互联网,2020,3(2):107-116.

LIU Yao, WU Jiawei, XIAO Jinyu, et al. Application of active MMC-HVDC in the background of global energy interconnection [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(2): 107-116.

[9] 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.

[10] 刘磊,林圣,刘健,等. 控制器交互不当引发后续换相失败的机理分析[J]. 电网技术,2019,43(10):3562-3568.

LIU Lei, LIN Sheng, LIU Jian, et al. Mechanism analysis of subsequent commutation failures caused by improper interaction of controllers [J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3562-3568.

[11] 刘席洋,王增平,郑博文,等. LCC-HVDC故障恢复型连续换相失败机理分析与抑制措施[J]. 中国电机工程学报,2020,40(10):3163-3172.

LIU Xiyang, WANG Zengping, ZHENG Bowen, et al. Mechanism analysis and mitigation measures for continuous commutation failure during the restoration of LCC-HVDC [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3163-3172.

[12] 李春华,黄莹,李岩,等. 一种基于最大短路电流限制的高压直流输电连续换相失败抑制方法[J]. 南方电网技术,2018,12(5):10-16.

LI Chunhua, HUANG Ying, LI Yan, et al. A suppressing me-

- thod to mitigate the continuous commutation failure of HVDC power transmission based on limit of maximum short circuit current[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(5): 10-16.
- [13] 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.
- [14] 王嘉铭,余浩,陈武晖. 多馈入直流输电系统换相失败研究综述[J]. 发电技术, 2020, 41(4): 335-345.  
WANG Jiaming, YU Hao, CHEN Wuhui. Research on commutation failure in multi-feed HVDC transmission system [J]. Power Generation Technology, 2020, 41(4): 335-345.
- [15] 汤奕,郑晨一,楼伯良,等. 抑制连续换相失败的直流功率控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3514-3522.  
TANG Yi, ZHENG Chenyi, LOU Boliang, et al. Research on DC power control strategy for mitigating continuous commutation failure [J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3514-3522.
- [16] 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.
- [17] 刘席洋,王增平,乔鑫,等. 交直流混联电网换相失败分类及抑制措施研究综述[J]. 智慧电力, 2020, 48(6): 1-7, 34.  
LIU Xiyang, WANG Zengping, QIAO Xin, et al. Review on classification and mitigation measures of commutation failures in AC-DC hybrid power grids [J]. Smart Power, 2020, 48(6): 1-7, 34.
- [18] 牛宇昆,文俊,马立民,等. 换相失败引起的送端电网暂态过电压抑制措施研究[J]. 智慧电力, 2021, 49(11): 59-65.  
NIU Yukun, WEN Jun, MA Limin, et al. Transient overvoltage suppression measures for sending-end power grid caused by commutation failure [J]. Smart Power, 2021, 49(11): 59-65.
- [19] 夏海涛,周小平,洪乐荣,等. 一种抑制后续换相失败的自适应电流偏差控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4345-4356.  
XIA Haitao, ZHOU Xiaoping, HONG Lerong, et al. An adaptive current deviation control method for suppressing following commutation failures [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4345-4356.
- [20] 陈欢,王振,杨治中,等. 并联混合直流输电系统中传统直流和柔性直流暂态无功协调控制策略研究[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1719-1725.  
CHEN Huan, WANG Zhen, YANG Zhizhong, et al. Coordinated reactive power control approach for LCC-HVDC and VSC-HVDC in hybrid parallel HVDC system [J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1719-1725.
- [21] 曾雪洋,刘天琪,王顺亮,等. 换相失败下柔性直流与传统直流互联输电系统的暂态无功协调控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 28-35.  
ZENG Xueyang, LIU Tianqi, WANG Shunliang, et al. Coordinated transient reactive power control strategy for transmission system connected by VSC-HVDC and LCC-HVDC under commutation failure [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 28-35.
- [22] 何晓峰,李成翔,夏成军,等. 基于谐波电压补偿的混合直流连续换相失败抑制策略[J]. 电力工程技术, 2019, 38(4): 112-117.  
HE Xiaofeng, LI Chengxiang, XIA Chengjun, et al. Control strategy to suppress hybrid HVDC continuous commutation failure by harmonic voltage compensation [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4): 112-117.
- [23] XIAO C, XIONG X F, OUYANG J X, et al. A commutation failure suppression control method based on the controllable operation region of hybrid dual-infeed HVDC system [J]. Energies, 2018, 11(3): 574.
- [24] 肖超,欧阳金鑫,熊小伏,等. 基于混合双馈入直流输电系统有功无功协调的后续换相失败控制方法[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3523-3531.  
XIAO Chao, OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, et al. Subsequent commutation failure control method based on coordination between active and reactive Powers in hybrid dual-infeed HVDC system [J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3523-3531.
- [25] 陆翌,刘博,童凯,等. 混合双馈入直流系统中 VSC-HVDC 对 LCC-HVDC 换相失败抵御能力的影响[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(9): 1-7.  
LU Yi, LIU Bo, TONG Kai, et al. Impact of VSC-HVDC on the commutation failure immunity of LCC-HVDC in dual-infeed hybrid HVDC system [J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(9): 1-7.
- [26] 倪晓军,郭春义,赵成勇,等. LCC-HVDC 直流控制模式对混合双馈入直流系统运行特性的影响[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(1): 24-30.  
NI Xiaojun, GUO Chunyi, ZHAO Chengyong, et al. Effects of LCC-HVDC control mode on the operating characteristic of dual-infeed hybrid HVDC system [J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(1): 24-30.
- [27] 黄梦华. 交流故障下高压直流输电系统运行特性及恢复策略研究[D]. 广州:华南理工大学, 2019.  
HUANG Menghua. Study on operation characteristics and recovery strategy of HVDC system under AC fault [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [28] 景柳铭,王宾,董新洲,等. 高压直流输电系统连续换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 116-123.  
JING Liuming, WANG Bin, DONG Xinzhou, et al. Review of

consecutive commutation failure research for HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9):116-123.

[29] 郭利娜,刘天琪,李兴源. 抑制多馈入直流输电系统后续换相失败措施研究[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11):95-99.

GUO Lina, LIU Tianqi, LI Xingyuan. Measures inhibiting follow-up commutation failures in multi-infeed HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11):95-99.

[30] LIU Y, CHEN Z. A flexible power control method of VSC-HVDC link for the enhancement of effective short-circuit ratio in a hybrid multi-infeed HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2):1568-1581.

[31] ZHANG L D, DOFNAS L. A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems[C]//Proceedings of International Conference on Power System Technology. Kunming, China. IEEE, 2002:51-56.

作者简介:



钟明明

钟明明(1996),男,硕士在读,研究方向为高压直流输电(E-mail: epzhongmingming@mail.scut.edu.cn);

夏成军(1974),男,博士,副教授,研究方向为电力系统稳定分析与控制;

黎寿涛(1996),男,硕士在读,研究方向为电力系统连锁故障分析及高压直流输电。

### Continuous commutation failure suppression strategy in hybrid multi-infeed HVDC transmission system

ZHONG Mingming<sup>1,2</sup>, XIA Chengjun<sup>1,2</sup>, LI Shoutao<sup>1,2</sup>, HUANG Chuyin<sup>1,2</sup>, LI Chengxiang<sup>2,3</sup>

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Operation and Control for New Energy Power System, Guangzhou 510663, China; 3. State Key Laboratory of HVDC (China Southern Power Grid Electric Power Research Institute), Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** For the wide application of high voltage direct current (HVDC) transmission engineering, the continuous commutation failure of line commutated converter HVDC (LCC-HVDC) has a seriously negative impact on the stable operation of the power system. Therefore, in order to mitigate the continuous commutation failure of LCC-HVDC in hybrid multi-feed HVDC system, from the perspective of increasing the LCC-HVDC commutation voltage, a coordinated control strategy for hybrid multi-infeed HVDC systems is proposed in this paper. According to the real-time reactive power shortage of the conventional DC, the reactive power and active power of voltage source converter HVDC (VSC-HVDC) output are dynamically adjusted by this strategy, thereby changing the transient stable operating point of VSC-HVDC. Through the coordinated control of this strategy, the continuous commutation failure of LCC-HVDC is suppressed and the transmission capacity of the active power of the DC transmission system is greatly improved. Finally, a simulation model of the hybrid dual-infeed HVDC system is built in PSCAD/EMTDC, and the effectiveness of the coordinated control strategy is verified.

**Keywords:** hybrid multi-feed high voltage direct current system; continuous commutation failure; coordinated control; additional reactive power control; adaptive current limit; dynamic power limiting

(编辑 钱悦)