

# MIDC 输电系统后续换相失败的抑制措施研究

文俊<sup>1</sup>, 李佳琪<sup>1</sup>, 王玲<sup>1</sup>, 韩民晓<sup>1</sup>, 李亚男<sup>2</sup>, 闫涵<sup>1</sup>, 李蓉<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206;  
2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209)

**摘要:** 随着直流输送容量不断增加,直流落点越来越密集,多馈入直流(MIDC)输电系统的换相失败问题日益凸显。为降低多馈入直流输电系统换相失败的概率,首先分析了多回直流同时或相继换相失败的根本原因,然后结合常规低压限流(VDCOL)控制,提出了电压补偿式变斜率 VDCOL 协调控制策略。该控制策略充分利用直流故障电流的变化特点,综合考虑了 MIDC 输电系统中各回直流自身特性影响因素,选取合理的补偿系数  $K$ ,使各回直流能在故障后有序且稳定地恢复,从而大大减少后续换相失败的发生。同时根据故障的严重程度选择性地切入  $K$  值以达到提高直流系统恢复性能的目的。最后在 PSCAD/EMTDC 中搭建算例系统及实际系统模型进行仿真验证,结果表明该控制策略能有效降低多馈入直流输电系统的后续换相失败的概率,使各回直流在故障后能够有序地恢复,同时在保证良好的恢复性能的基础上大大提高了多馈入直流输电系统的可靠性。

**关键词:** 多馈入直流输电系统; 补偿电压; 低压限流; 换相失败; 补偿系数; 故障恢复

**DOI:** 10.12067/ATEEE1710055      **文章编号:** 1003-3076(2019)04-0079-10      **中图分类号:** TM712

## 1 引言

高压直流输电方式已被广泛应用在非同步电网互联和远距离大功率输电场合<sup>[1-3]</sup>。随着我国直流工程的相继投运,出现了多回直流接入同一地区的电网结构。这些直流与所馈入的交流电网共同形成了多馈入直流(Multi-Infeed Direct Current, MIDC)输电系统<sup>[4,5]</sup>。目前,我国已形成多个含有超大规模多馈入直流输电系统的电网。

MIDC 输电系统由于各直流逆变站电气距离较近,当其中一回直流发生换相失败时,直流电流上升,直流电压下降,换流器对其所连的交流系统产生更多的无功需求,引发换相电压持续波动,进一步降低交流电压,严重时可能导致其他各回直流相继甚至同时发生换相失败。多回直流的同时功率恢复可能诱发受端电网的电压不稳定,而如果直流功率长时间得不到恢复,将导致多回直流闭锁,继而停运。含有最大规模的 MIDC 输电系统的华东电网曾由于交流系统扰动而导致奉贤、林枫、宜华三回直流同时

发生换相失败;另一个 MIDC 输电系统的广东电网的增城乙线 C 相故障导致全部 5 回直流发生同时换相失败,上述事件均造成电网功率大幅度波动,对电网产生了严重冲击<sup>[6,7]</sup>。因此当电网扰动发生时,如何使多馈入直流输电系统快速恢复至稳定状态,抑制后续换相失败具有重要意义。

目前研究 MIDC 输电系统换相失败的抑制措施及换相失败后的协调恢复多从低压限流(Voltage Dependent Current Order Limiter, VDCOL)控制的角度出发,这是因为 VDCOL 控制特性直接影响直流系统恢复特性,并间接影响直流系统的后续换相失败。常规 VDCOL 控制采用电压电流线性关系的恢复特性,因此不能灵活调整直流电压电流的变化,不利于换相电压的快速恢复。为克服常规 VDCOL 控制弊端,文献[8]结合 DC-VDCOL 和 AC-VDCOL 两种控制方式,对常规 VDCOL 控制进行改进,仿真证明改进后的控制能有效提高 MIDC 输电系统暂态稳定性;文献[9]将各回直流的 VDCOL 控制延长时常数  $\tau$  值的选取进行协调优化;文献[10]提出一种

收稿日期: 2017-10-30  
基金项目: 高等学校学科创新引智计划项目(“111”计划)  
作者简介: 文俊(1963-),女,贵州籍,教授,研究方向为高压直流输电的控制、运行分析和规划;  
李佳琪(1994-),女,湖北籍,硕士研究生,研究方向为高压直流输电的控制、运行分析和规划。

基于模糊控制的自适应 VDCOL 控制,从而能动态地适应交直流系统运行环境的变化;文献[11]提出了以多馈入功率恢复因子为评价指标的多回直流协调恢复措施,使多回直流顺序恢复直流功率,因此在一定程度上减少了直流系统失稳事故的几率。

笔者提出了基于变斜率 VDCOL 控制的电压补偿协调控制策略,该控制方法能使故障后直流电流指令快速下降,而故障切除后直流电流滞后于直流电压的上升,从而有效抑制后续换相失败。随后提出了由补偿因子选取补偿系数  $K$  的方法,并加入  $K$  值切换开关,使直流系统能根据故障的严重程度投入补偿电压,在保证不发生换相失败的同时尽可能地提高直流系统的故障恢复性能。最后在 PSCAD/EMTDC 中搭建了算例系统及实际上海 MIDC 输电系统模型,通过仿真验证了所提控制策略的有效性。

## 2 MIDC 输电系统换相失败的机理分析

### 2.1 多馈入直流输电系统换相失败的机理

换相失败分为一次换相失败及后续换相失败。一次换相失败是指故障后直流系统只发生一次换相失败即恢复稳定运行,主要包括单回直流系统发生的一次换相失败以及多馈入直流输电系统中多回直流同时发生的一次换相失败;对于单回直流系统而言,后续换相失败是指直流系统在交流系统故障清除后或未及时恢复而诱发的两次及以上次换相失败。而在多馈入直流输电系统中,一回直流系统发生的两次或多次换相失败,以及一回直流系统换相失败导致其他直流系统发生的一次或多次换相失败均称为后续换相失败。

多馈入直流输电系统换相失败的原因主要有两个:①受端电网故障,一回或多回直流系统换流母线电压发生严重畸变,导致电压幅值下降及相位偏移,从而引起这些直流系统同时发生换相失败;②一回直流系统发生换相失败后,由于逆变站间的电气耦合作用较强,导致相邻直流相继换相失败<sup>[12,13]</sup>。

在实际 MIDC 输电系统中,受端电网故障点如果离逆变站较近,则一次换相失败难以避免,防止直流系统由一次换相失败发展成后续换相失败就具有重要的工程应用价值。后续换相失败的发生与否与直流系统控制相关。若控制措施不当,使直流系统恢复过程中功率波动较大或恢复速度过慢,均可能导致后续换相失败。

### 2.2 多馈入直流输电系统后续换相失败的危害

MIDC 输电系统后续换相失败的发生使多回直流系统处于长时间的换相失败中,各回直流短路持续时间变长,直流电流过载严重;此外,逆变器会把交流电引入直流回路中,可能引发直流回路谐振,导致直流过电压;同时换流母线电压扰动加剧,可能导致弱受端电网的电压不稳定。如果各回直流系统长期得不到恢复,必然造成直流系统闭锁,多回直流系统的同时闭锁可能诱发受端电网的频率不稳定。

## 3 变斜率 VDCOL 控制的提出与设计

MIDC 输电系统的研究发现,多回直流系统间存在如下不良相互影响:一回直流系统换流母线电压波动将导致其他回换流母线的电压波动;某个换流母线的电压严重畸变可能导致其他换流母线出现谐波放大,从而使故障后直流功率很难快速恢复,进而引发后续换相失败。VDCOL 控制在系统故障或恢复过程中能缓解逆变站对交流系统的无功需求,因此有助于缓解多回直流间的不良相互影响,在维持交流电压的同时,有助于减小后续换相失败发生的可能性。

### 3.1 VDCOL 控制

低压限流控制特性是指当故障使直流电压低于限值  $U_{dl}$  时,自动降低定电流控制的电流整定值,待直流电压恢复后,又自动恢复原有整定值的控制功能<sup>[14,15]</sup>。

VDCOL 控制特性的直流电流整定值对交流系统的电压稳定性和直流系统的动态恢复特性均有很大的影响。直流电流整定值增加过快或过慢均不利于直流系统故障后的恢复。这是由于故障切除后,直流电流的过快上升将使逆变器的无功消耗增大过快,受端电网由于无功支撑乏力而可能发生电压失稳,导致直流系统后续换相失败的发生;而直流电流恢复太慢则将导致有功功率传输水平的下降,不利于维持交流系统的功角稳定,也会导致后续换相失败的发生。常规 VDCOL 控制的伏安特性呈正比例关系,不能根据故障严重程度及受端电网的强度灵活调节直流系统的恢复特性。对于 MIDC 输电系统,更无法满足故障切除后各逆变器在同一时刻均存在大量无功功率需求的特殊性,容易导致多回直流发生后续换相失败。

### 3.2 变斜率 VDCOL 控制原理

常规的 VDCOL 控制如图 1 中曲线 1 所示,该斜

率为固定斜率。由于该控制特性曲线在故障的任意时刻均为同样的斜率,因而灵活性不高。因此在常规 VDCOL 控制的基础上,考虑采用变斜率 VDCOL 控制策略,如图 1 中曲线 2 所示。 $U_{dl1}$ 、 $U_{dl2}$  分别为常规和变斜率 VDCOL 控制下对应的直流电压最低动作值; $I_{dh}$ 、 $I_{dl}$  分别为最大允许电流和最小允许电流, $U_{dh1}$ 、 $U_{dh2}$  为相应的直流电压最高动作值。在故障切除初期,直流电流变化较大,直流电压由  $U_{dl1}$  滞后至  $U_{dl2}$ ,滞后程度较大;随着直流电流及受端电压水平的缓慢恢复,直流电流的变化率逐渐减小,直流电压滞后程度也减小,在接近额定值时,直流电压由  $U_{dh1}$  滞后至  $U_{dh2}$ ,滞后程度很小,此时 VDCOL 控制特性的斜率最大,从而实现恢复初期减缓恢复速度,较高直流电压水平提升恢复速度的目标,满足了快速恢复直流功率的需求。因此变斜率 VDCOL 控制特性曲线对故障后的换相失败抑制以及故障后的直流系统恢复均有利。

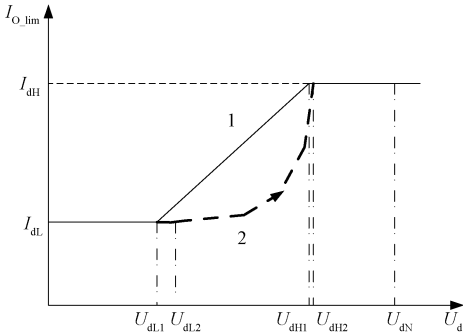


图 1 变斜率 VDCOL 控制特性曲线

Fig. 1 Characteristic curve of variable slope VDCOL

### 3.3 电压补偿式变斜率 VDCOL 控制的设计

为了实现变斜率 VDCOL 控制,在 VDCOL 控制的输入端增加一个反映直流电流变化率的补偿电压  $U_{dc}$ 。由于稳态时直流电流近似恒定,因此补偿电压也近似为零。补偿电压  $U_{dc}$  为:

$$U_{dc} = K \left| \frac{dI_d}{dt} \right| \quad (1)$$

式中, $K$  为补偿系数( $K \geq 0$ ); $I_d$  为直流电流; $t$  为时间。

此时 VDCOL 的控制斜率变为:

$$k = (I_{di} - I_{dl}) / (U_{di} - \Delta U_{dcHi} - U_{dl1}) \quad (2)$$

式中, $I_{di}$  与  $U_{di}$  分别为某一时刻实际的直流电流和直流电压; $\Delta U_{dcHi}$  为某一时刻低压限流补偿电压。补偿电压的存在使 VDCOL 控制直流电压的动作滞后,电压补偿式变斜率 VDCOL 控制电路如图 2 所

示,输入仍然为直流电压  $U_d$ ,然而经过常规 VDCOL 和变斜率 VDCOL 的输出电流指令值不同,在改进环节中考虑到故障瞬间直流电流突增,可瞬间达到 6~8pu,若直流电流的变化率不加限制,则无论是否为严重故障,直流电流均可能在变斜率 VDCOL 控制的作用下直接跌至最低限制值,失去了 VDCOL 控制依赖直流电压选择直流电流大小的功能,因而对直流电流的变化率进行了限制。

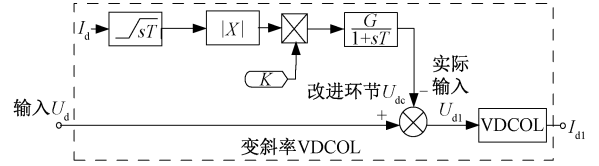


图 2 电压补偿式变斜率 VDCOL 控制电路

Fig. 2 Control circuit of variable slope VDCOL with voltage compensation

## 4 MIDC 输电系统的选择性电压补偿式变斜率 VDCOL 协调控制策略

在故障恢复期间,MIDC 输电系统最大的特点是各逆变器对交流系统无功功率的需求较大,为了避免因各换流母线电压同时快速恢复引发的后续换相失败,需要合理协调各直流系统的 VDCOL 控制,使多馈入直流有序地恢复。

### 4.1 补偿系数 $K$ 值选取的影响指标

MIDC 输电系统发生多回直流同时或相继换相失败后,各直流系统的协调恢复与自身的特性紧密相关。因此 MIDC 各直流子系统恢复方案中  $K$  值的确定需结合以下几个因素综合考虑:

#### (1) 交流系统强度 $SCR$

交流系统的强度  $SCR$  (即短路比) 决定了其对换流母线电压的支撑能力。交流系统越强,在直流系统恢复过程中,抵御电压变化的作用越强<sup>[16]</sup>。

#### (2) 多馈入相互作用因子 $MIIF$

多馈入相互作用因子  $MIIF$  是用电压的相对变化率来衡量逆变器间相互影响的强度, $MIIF$  定义为:当换流母线  $i$  投入对称三相电抗器使得该母线电压降低 1% 时,直流子系统  $j$  的换流母线的电压变化率如下<sup>[17]</sup>:

$$MIIF_{ji} = \frac{\Delta U_j}{\Delta U_i} \quad (3)$$

式中, $0 \leq MIIF \leq 1$ 。 $MIIF$  越大,表示换流母线  $i$  的电压波动对换流母线  $j$  的电压影响越大,各直流子



系统间的相互作用越强。

### (3) 直流功率 $P_d$

直流系统传输功率越大时,故障切除后直流系统恢复过程中消耗的无功功率越大,对其他各回直流换流母线的的影响也越大。

同时还需要考虑受端交流系统的电压稳定和功角稳定何者占主导地位。交流系统较强时,电压支撑能力较强,功角稳定是首要考虑的问题,因此故障恢复期间可以尽快恢复直流功率的传输,此时 VDCOL 控制曲线应左移;交流系统较弱时,其电压支撑能力较弱,电压稳定成为主要问题,应尽量减少故障恢复期间换流站从交流系统吸收的无功功率,此时 VDCOL 控制曲线应右移,使直流系统缓慢恢复<sup>[18]</sup>。定义电压补偿系数  $K$  如下:

$$K_i = m / MISCR_i = \frac{P_{di} + \sum_{j=1, j \neq i}^n MIIF_{ji} P_{dj}}{m S_{aci}} \quad (4)$$

式中,  $m$  为补偿因子;  $MISCR_i$  为第  $i$  回直流多馈入短路比;  $P_{di}$ 、 $S_{aci}$  为第  $i$  回直流的直流功率、短路容量;  $MIIF_{ij}$  为第  $i$ 、 $j$  回直流间的多馈入相互作用因子。由式(4)可知,  $MISCR_i$  越大,表明该回直流受端系统越强,  $K$  值越小,该回直流应尽快恢复,反之则缓慢恢复。  $K$  同时考虑了交流系统的强度、直流系统间的耦合作用和直流传输的功率等因素。在其他因素不变的情况下,该回直流功率、 $MIIF$  越大,  $K$  值越大,该回直流系统应缓慢恢复,从而减少对其他各回直流系统的冲击;反之直流系统应尽早恢复。因此各回直流系统的恢复顺序通过  $K$  错开来实现 MIDC 输电系统多回直流的有序恢复<sup>[19]</sup>。

$K$  值选取过大或过小均不利于直流系统的稳定恢复。通过大量仿真验证,确定了强、弱交流系统对应的直流系统  $K$  值可选范围分别宜为  $[0, 0.05]$ 、 $[0, 0.5]$ 。其中  $m$  的选取与各受端交流系统的  $MISCR$  相关。当直流系统回数大于等于 2 时,  $K$  值的具体选取分为如下三种情况(直流系统回路数为两回且受端交流系统恰好为一强一弱时,选取原则为弱系统取  $K=0.5$ ,强系统在  $[0, 0.05]$  的范围内选取,其中  $MISCR$  小于 3 可认定为弱受端交流系统):

(1) 各受端交流系统均为强系统,此时令最强交流系统中相对最弱的交流系统  $i$  为 0.05,其他各回直流的  $K$  值根据式(5)计算产生。

$$K_j = m / MISCR_j, m = 0.05 MISCR_i \quad (5)$$

(2) 各受端交流系统均为弱系统,此时令最弱

的交流系统  $i$  对应的  $K$  值为 0.5,其他各回直流的补偿系数为:

$$K_j = m / MISCR_j, m = 0.5 MISCR_i \quad (6)$$

(3) 受端交流系统同时存在强系统和弱系统时,考虑到强系统对应的直流系统的恢复过程会对弱系统对应的直流系统恢复存在影响,因此强弱交流系统的补偿系数应分别按式(5)和式(6)进行计算。

## 4.2 选择性电压补偿式变斜率 VDCOL 控制策略

对于弱受端交流系统而言,故障程度较轻时,以正常速度恢复即可;故障程度较严重,或者多回直流换流母线的近区同时发生单相接地故障时,直流电压电流应缓慢恢复。为实现该功能,加入  $K$  值切换开关,使直流系统能根据故障严重程度选择性加入补偿系数  $K$ ,  $K$  值切换开关功能实现如图 3 所示。

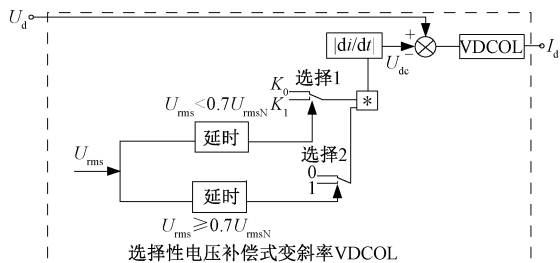


图3 选择性电压补偿式变斜率 VDCOL 控制框图

Fig.3 Control block diagram of selective variable slope VDCOL with voltage compensation

图3中补偿系数  $K_0=0$ ,表示正常运行状态时该模块不起作用。当换流母线电压持续低于某一阈值时,表明发生了较严重故障,选择1开关切换至  $K_1$ ,该值由各补偿因子共同确定。与此同时,选择2开关切换至“1”,  $K_1$  值加入后,各回直流系统的恢复过程根据  $K$  值大小有序地进行;随着直流电压逐渐恢复趋近额定电压,选择2开关切换至“0”,经过与门后补偿系数变为零,补偿系数不再起作用,各回直流均以各自最大的速度恢复使 MIDC 输电系统较快地恢复至额定状态。

## 5 仿真实验

### 5.1 算例系统

在 PSCAD/EMTDC 中搭建基于直流工程控制系统的双馈入直流输电模型,其中,每回直流系统的整流侧和逆变侧均分别采用定电流和定  $\alpha_{max}$  控制;  $K=0$  为常规 VDCOL 控制方式;  $K>0$  为电压补偿式变斜率 VDCOL 控制方式。两回直流系统通过站间

阻抗  $Z_{ij} = (60 + j31.4) \Omega$  相连,其他各参数见表 1。

表 1 双馈入直流输电系统参数

Tab. 1 System parameters of two-infeed HVDC						
直流系统	直流电压 /kV	输送功率 /MW	受端系统电压 /kV	系统等值阻抗 / $\Omega$	短路比	$K$
1	$\pm 500$	3000	521	$1.803 + j17.91$	5	0.05
2	$\pm 500$	3000	515	$2.509 + j25.07$	3.5	0.5

(1)令直流系统 2 的  $K=0$ 。在  $t=3\text{s}$  时刻,直流系统 1 逆变侧换流母线设置三相直接接地故障,故障持续 0.1s 后切除,该回直流在  $K=0$  和  $K=0.05$  时的仿真波形如图 4 所示。其中,从上往下各波形依次为直流电流  $I_d$ 、直流电压  $U_{dr}$ 、功率  $P_d$ 、触发角  $\alpha$ 、关断角  $\gamma$ (下同),当关断角小于最小关断角  $12^\circ$  即认为发生一次换相失败<sup>[20]</sup>。

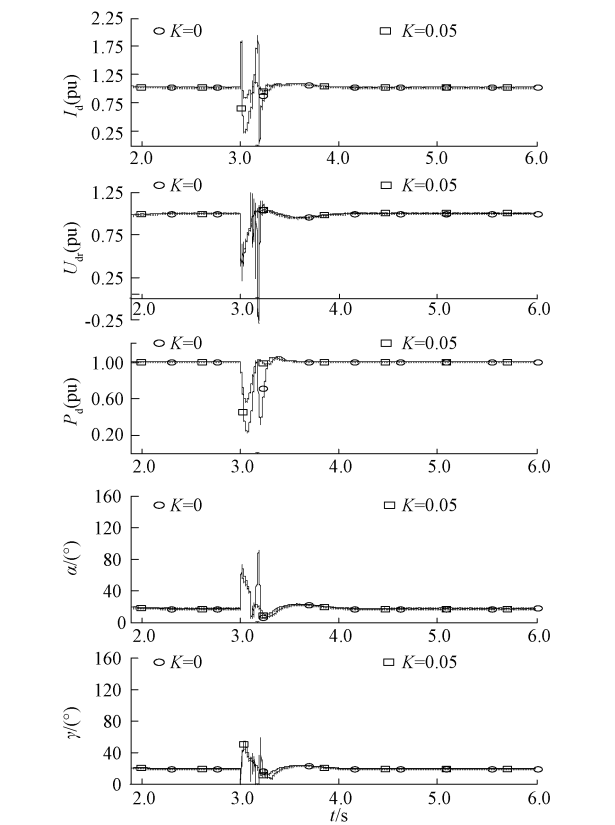


图 4 直流系统 1 的波形(直流系统 1 三相直接接地故障)  
Fig. 4 Waveform of DC system 1 while DC system 1 occurs three phase to earth

由图 4 可见:①常规 VDCOL 控制(即  $K=0$ )下的直流系统 2 发生了 2 次换相失败,而采用电压补偿式变斜率 VDCOL 控制的直流系统 2 仅发生了 1 次换相失败,说明变斜率 VDCOL 控制策略能有效地抑制直流系统后续的换相失败;②两种控制策略

下稳态时的波形完全一致,表明  $K$  值在稳态时不起作用。

(2)在  $t=3\text{s}$  时刻,在直流系统 2 逆变侧换流母线设置三相经电抗接地故障( $L=0.1\text{H}$ , HVDC1 系统  $K=0$ ),假设此时故障线路所在变电站中开关单相拒动,考虑失灵保护于故障后 0.2s 后切除。直流系统 2 对应于  $K=0$  及  $K=0.5$  时的波形如图 5 所示。

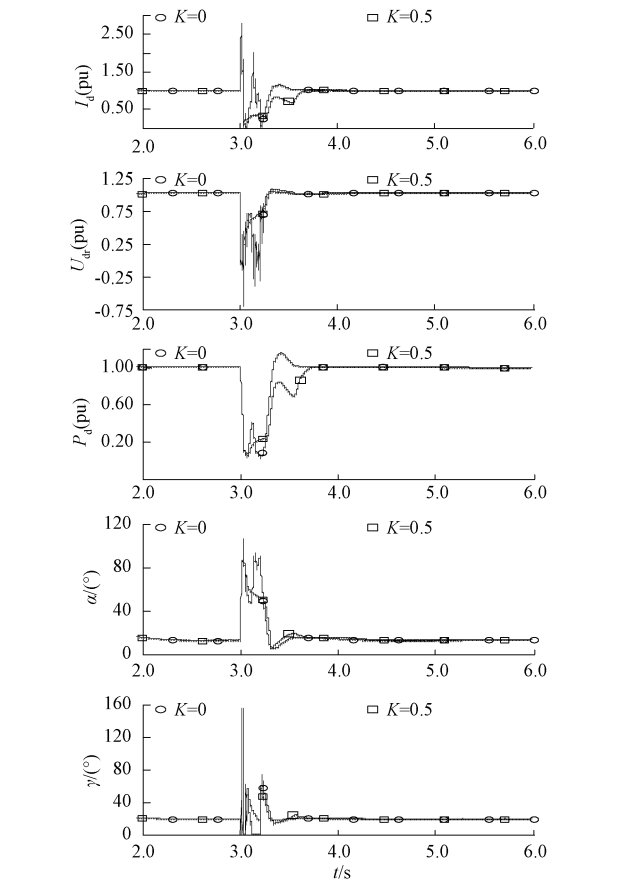


图 5 直流系统 2 的波形(直流系统 2 三相经电抗接地)  
Fig. 5 Waveform of DC system 2 while DC system 2 occurs three phase to earth through reactance

由图 5 可知, $K=0.5$  时,直流系统恢复平缓,换相失败次数由  $K=0$  时的 2 次变为 1 次,说明变斜率 VDCOL 控制策略能有效地抑制直流系统后续的换相失败。

对比图 6 中弱受端交流系统  $K=0.55$  与  $K=0.5$  时( $t=3\text{s}$  时刻,在 HVDC2 逆变侧换流母线设置三相经电抗接地故障,持续时间为 0.1s)的电流恢复波形进行比较发现, $K=0.55$  对应的波形在接近额定直流电流时直流电流波动较大,容易引起后续振荡,从而诱发后续换相失败。因此  $K$  取值不宜过大。

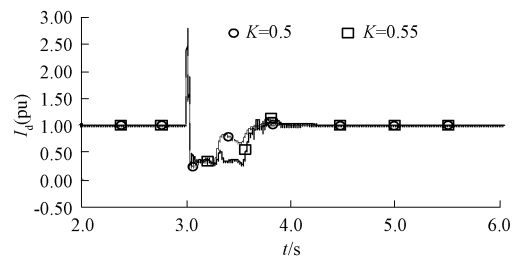


图 6 直流系统 2 不同  $K$  值下的波形  
(直流系统 2 三相经电抗接地)

Fig. 6 Waveforms of DC system 2 under different  $K$  values while DC system 2 occurs three phase to earth through reactance

同样对比图 7 中强交流系统  $K = 0.05$  和  $K = 0.06$  时( $t = 3\text{s}$  时刻,在 HVDC1 逆变侧换流母线设置三相直接接地故障,持续时间为  $0.1\text{s}$ )的直流电流恢复波形可知, $K = 0.06$  时直流系统发生了 2 次换相失败,而  $K = 0.05$  时仅发生了一次换相失败。由此可见,对于强受端交流系统  $K$  值不宜过大,过大会造成后续的换相失败。

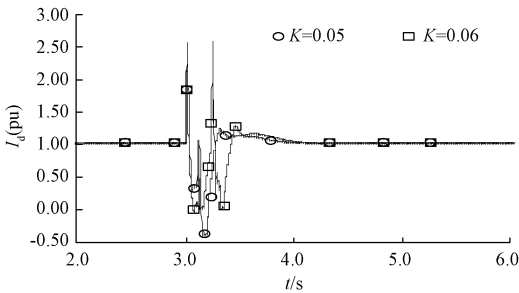


图 7 直流系统 1 不同  $K$  值下的波形  
(直流系统 1 三相直接接地)

Fig. 7 Waveforms of DC system 1 under different  $K$  values while DC system 1 occurs three phase to earth

因此令强交流系统的  $K$  值选取范围为  $[0, 0.05]$ ,弱交流系统的  $K$  值选取范围为  $[0, 0.5]$ ,能有效抑制后续换相失败的发生。

5.2 常规与改进 VDCOL 控制策略下的仿真分析

以上海电网直流输电工程为例,上海电网共接入宜都-华新、葛洲坝-南桥南、枫泾-练塘、复龙-奉贤共 4 回直流输电线路,如图 8 所示。其中,宜都-华新、葛洲坝-南桥南、枫泾-练塘三回直流的额定电压均为  $\pm 500\text{kV}$ ,额定功率分别为  $3000\text{MW}$ 、 $3000\text{MW}$  和  $1200\text{MW}$ ,两端换流器均为 12 脉动的双极结构,复龙-奉贤为特高压直流输电线路,额定参数为  $\pm 800\text{kV}$ , $6400\text{MW}$ ,两端换流器均为双 12 脉动串联的双极结构,配置了交、直流滤波器组及无功补偿装

置。所有参数均采用实际参数。

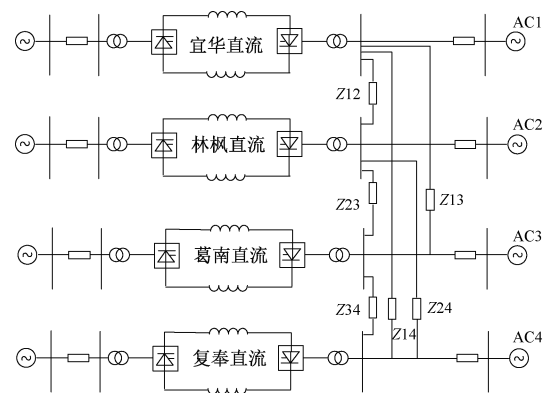


图 8 四馈入直流输电系统模型

Fig. 8 Four-infeed HVDC model

(1)案例 1:模拟最严重故障情况,在华新、枫泾、南桥、奉贤四个逆变站换流母线处设置  $3\text{s}$  时刻三相短路接地故障,故障持续时间  $0.1\text{s}$ 。观察该故障情况下常规 VDCOL 控制与电压补偿控制策略下的各直流回路的恢复特性。各站  $K$  值按照表 2 选取(下同)。

表 2 四回直流稳态运行参数				
Tab. 2 Steady-state operation parameters of four-infeed HVDC				
直流	触发角/(°)	MISCR	关断角/(°)	$K$
宜华	15	4.9	18.80	0.050
林枫	16.16	4.9	18.72	0.050
葛南	15.2	2.8	16.16	0.500
复奉	15.5	5	18.87	0.049

由仿真图 9 可知:①各直流系统在  $t = 3\text{s}$  时刻故障瞬间发生了一次换相失败,由于各直流间的相互影响,大约在  $t = 3.2\text{s}$  又发生了一次换相失败,而南桥站大约再过了  $0.1\text{s}$  左右发生了第二次换相失败,后逐渐恢复至稳定状态,各直流的恢复时间均很长;②加入电压补偿式变斜率 VDCOL 控制策略后,各直流恢复速度减缓,南桥站及其他各站均未发生第二次的换相失败,说明该控制策略控制能有效减少 MIDC 输电系统的后续换相失败。

(2)案例 2:假设华新、南桥两个逆变站换流母线处在  $3\text{s}$  时刻发生单相接地故障,故障持续时间为  $0.1\text{s}$ 。同时在  $4\text{s}$  时设置四个逆变站均发生三相接地故障,观察电压补偿式(控制策略 A,下同)与选择性电压补偿式变斜率 VDCOL 控制策略下(控制策略 B,下同)的各回直流系统的恢复特性。其中图 10(a)、10(b)分别为控制策略 A、B 下各回直流对

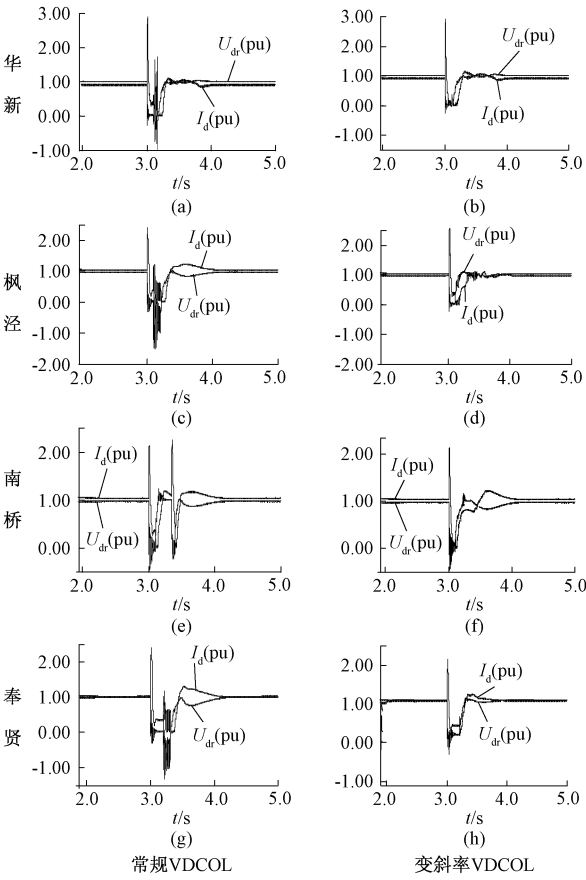


图9 四回直流逆变侧换流母线均发生三相接地故障后直流系统波形

Fig. 9 Waveform of DC system while three phase to earth fault occurs in the four inverter buses simultaneously

应的直流电压电流等的波形。

控制策略 A 下,无论交流系统换流母线是否发生严重故障,K 值一直存在;控制策略 B 下正常及轻微故障程度下 K 值均为 0,仅在系统发生较严重故障时 K 值才投入。

如图 10 所示,t=3s 时刻发生单相接地故障,对比两种控制下的系统响应,显然发现:①南桥站各参数的变化最大,控制策略 A 下的系统响应表现为单相接地故障时直流系统的恢复时间非常长,达到额定状态的时间为 0.4s,而控制策略 B 下的直流系统恢复时间为 0.2s,控制策略 B 较 A 有更优的直流系统恢复性能;②华新、枫泾和奉贤三个逆变站受端交流系统较强,其 K 值均较小,因此在两种控制策略下系统响应表现基本一致。

综合控制策略 A、B 的特点及仿真结果可知:①发生轻微故障(如单相接地故障)时,K 值可不投入,以保证直流系统的正常恢复速度;②发生严重故

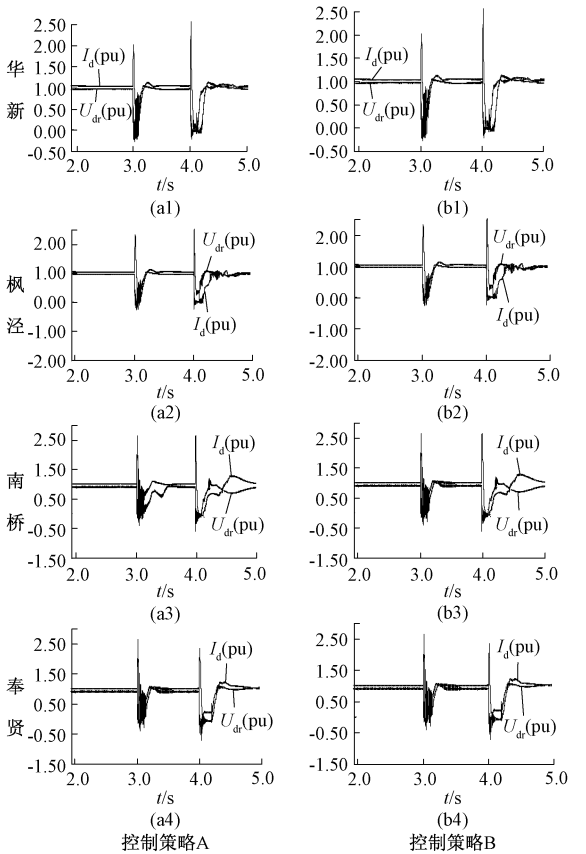


图10 四回直流逆变侧换流母线先后发生单相、三相接地故障后直流系统波形

Fig. 10 Waveform of DC system while four inverter commutation buses occur single phase and three-phase to earth successively

障(如三相接地故障)时,如果是弱受端交流系统,应投入 K 值,以减缓直流系统的恢复速度,防止发生后续换相失败;③无论发生轻微或严重接地故障,对于强受端交流系统,根据其补偿系数 K 值较小,所以 K 值的投入对直流系统的恢复影响不大。

(3)案例 3:假设华新、枫泾、南桥、奉贤四个逆变站换流母线处在 3s 时刻设置三相接地故障,故障持续 0.1s,直流系统恢复后,在 4s 时刻,宜华、南桥发生单相接地故障,故障同样持续 0.1s,观察控制策略 A、B 下的各回直流的恢复特性。其中图 11 (a)、11(b)分别为控制策略 A、B 下各直流对应的直流电压电流等的波形。

由仿真图 11 可知:①发生三相交流系统故障后,控制策略 B 使各直流系统的恢复速度变慢;②华新、枫泾、奉贤三回直流在控制策略 A、B 下波形基本一致,主要是由于其受端交流系统较强,对应 K 值较小;③对比南桥站在两种控制策略下的直流响



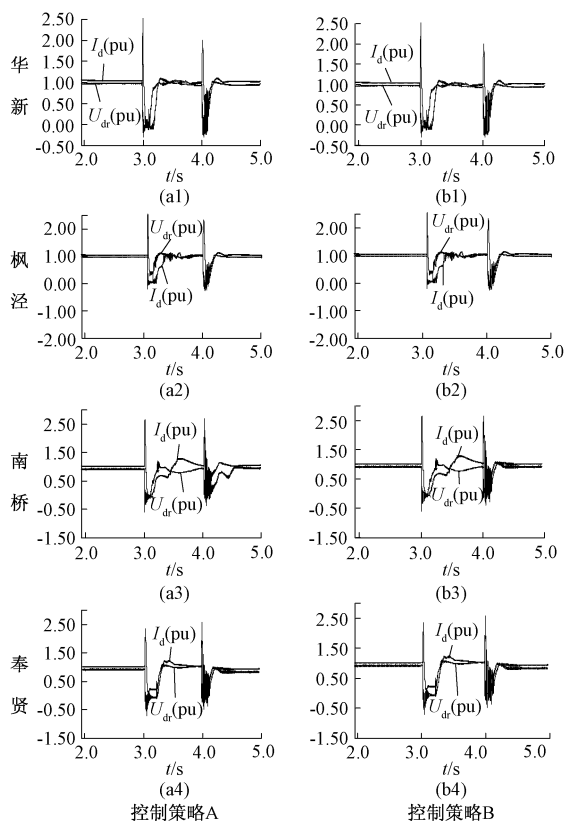


图 11 四回直流逆变侧换流母线先后发生三相、单相接地故障后直流系统波形

Fig. 11 Waveform of DC system while four inverter commutation buses occur three-phase and single-phase to earth successively

应图 11(a3)、11(b3)可知,南桥站发生三相接地故障后  $K$  值均投入,然而在发生后续单相接地故障时,控制策略 A 下的直流系统两次故障恢复过程中对应的  $K$  值保持不变,导致图 11(a3)中直流系统恢复速度被强行延缓,使恢复性能变差;而在控制策略 B 下因三相接地故障后直流电压已恢复至  $0.7U_d$  及以上, $K$  值已置 0,第二次故障后恢复过程中直流系统只需按照正常恢复速度恢复,从而减少了恢复过慢引起的功角不平衡导致的后续换相失败的发生。

## 6 结论

笔者提出了选择性电压补偿式变斜率 VDCOL 控制的协调控制策略,该控制策略充分依据故障时直流电流的变化特点,考虑 MIDC 输电系统中各回直流恢复的影响因素,通过计算设置各回直流补偿系数  $K$  值来协调控制各回直流的恢复速度,并根据故障严重程度选择性地投入  $K$  值。结合仿真结果可得出以下主要结论:

(1)提出的电压补偿式变斜率 VDCOL 控制策略克服了常规 VDCOL 控制无法根据直流电流水平控制恢复速度的缺陷,在故障瞬间及切除后均能灵敏地调整直流电流整定值,有效地抑制直流系统的后续换相失败。既不增加投资,且可操作性强。

(2)对于给定的 MIDC 输电系统,根据  $K$  值选取标准,合理选择各回直流的补偿系数  $K$ ,即可协调控制各回直流的故障后恢复速度,使各回直流有序恢复,从而有效抑制 MIDC 输电系统后续换相失败的发生。

(3)增加  $K$  值切换的选择性电压补偿式变斜率 VDCOL 控制策略能根据故障严重程度选择性投入,使各回直流在轻微交流故障时能保持良好的恢复特性,而在发生严重交流系统故障时能使各回直流的稳定恢复。

(4)降低 MIDC 输电系统后续换相失败发生的概率能够使 MIDC 输电系统更加安全稳定地运行,在发生较严重故障时,不至于造成大面积的停电事故,有利于提高当今能源互联格局中交直流系统互联的稳定性。本文仅针对实际上海电网进行了仿真验证,然而该方法对采用同样直流输电控制保护系统,且具有同样的多回直流系统馈入同一受端交流系统特征的 MIDC 输电系统(如南方电网)均适用。

## 参考文献 (References):

- [1] 赵婉君 (Zhao Wanjun). 高压直流输电工程技术 (第三版) (HVDC transmission engineering technology (Third Edition)) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 2013.
- [2] 王玲, 文俊, 崔康生, 等 (Wang Ling, Wen Jun, Cui Kangsheng, et al.). 多馈入直流输电系统换相失败研究综述 (Research survey of commutation failure in MIDC transmission systems) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (8): 56-65.
- [3] 马静, 刘天琪, 李兴源, 等 (Ma Jing, Liu Tianqi, Li Xingyuan, et al.). 基于多代理的多馈入直流输电系统换相失败协调预防研究 (Method of coordinated prevention of commutation failure based on multi-agent in MIDC) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (3): 61-65.
- [4] 刘婷婷, 文俊, 乔光尧, 等 (Liu Tingting, Wen Jun, Qiao Guangyao, et al.). 多馈入直流输电系统谐波相互影响的研究 (Study on harmonic effects of multi-in-



- feed HVDC systems) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (1): 42-47.
- [5] 申洪明, 黄少锋, 费彬, 等 (Shen Hongming, Huang Shaofeng, Fei Bin, et al.). 基于数学形态学的换相失败检测新方法 (A new method to detect commutation failure based on mathematical morphology) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (4): 170-177.
- [6] 孙志媛, 梁小冰, 孙艳 (Sun Zhiyuan, Liang Xiaobing, Sun Yan). 基于 EMTDC 的多馈入直流输电系统仿真研究 (Simulation study of multi-infeed HVDC system based on EMTDC) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2006, 30 (S2): 295-298.
- [7] 刘羽超. 多馈入直流输电换相失败机理分析与防御措施研究 (Analysis of commutation failure mechanism in multi-infeed HVDC and research on its defending method) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric University), 2015.
- [8] 王珂, 杨卫东, 方勇杰, 等 (Wang Ke, Yang Weidong, Fang Yongjie, et al.). 有利于多馈入直流输电系统协调恢复的 VDCOL 控制策略研究 (Study of VDCOL control strategies for coordinated recovery of multi-feed-in HVDC system) [J]. 电力工程技术 (Power Engineering Technology), 2007, 26 (1): 1-4.
- [9] 郭利娜, 刘天琪, 李兴源 (Guo Lina, Liu Tianqi, Li Xingyuan). 抑制多馈入直流输电系统后续换相失败措施研究 (Measures inhibiting follow-up commutation failures in multi-infeed HVDC system) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2013, 33 (11): 95-99.
- [10] 张彪, 王渝红, 李兴源 (Zhang Biao, Wang Yuhong, Li Xingyuan). 改善直流系统恢复特性的 VDCOL 控制策略研究综述 (Overview on VDCOL control strategy for improving DC system recovery characteristics) [J]. 华东电力 (East China Electric Power), 2014, 42 (5): 826-832.
- [11] 冯明, 李兴源, 洪潮, 等 (Feng Ming, Li Xingyuan, Hong Chao, et al.). 基于多馈入功率恢复因子的南方电网多回直流分层协调控制策略 (Study of layered coordinated control strategy of CSG's HVDC systems based on multi-infeed power recovery factor) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2015, 39 (10): 2822-2829.
- [12] 何朝荣, 李兴源 (He Chaorong, Li Xingyuan). 影响多馈入高压直流换相失败的耦合导纳研究 (Study on mutual admittance and commutation failure for multi-infeed HVDC transmission systems) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2008, 28 (7): 51-57.
- [13] 李晓华, 刘详, 蔡泽祥 (Li Xiaohua, Liu Xiang, Cai Zexiang). 直流输电换流变压器阀侧交流单相接地故障 (Analysis of grounding fault at HVDC converter transformer valve side) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2012, 27 (6): 38-45.
- [14] 冯明, 李兴源, 李妮, 等 (Feng Ming, Li Xingyuan, Li Ni, et al.). 基于 Simplex 算法的高压直流输电分段变速率 VDCOL 研究 (Study of HVDC piecewise variable rate VDCOL based on simplex algorithm) [J]. 四川大学学报 (工程科学版) (Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)), 2015, 47 (4): 162-167.
- [15] 刘磊, 王渝红, 李兴源, 等 (Liu Lei, Wang Yuhong, Li Xingyuan, et al.). 基于模糊控制的变斜率 VDCOL 控制器设计 (Design of variable slope VDCOL controller based on fuzzy control) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2015, 39 (7): 1814-1818.
- [16] 林伟芳, 汤涌, 卜广全 (Lin Weifang, Tang Yong, Bu Guangquan). 多馈入交直流系统短路比的定义和应用 (Definition and application of short circuit ratio for multi-infeed AC/DC power systems) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of The CSEE), 2008, 31 (28): 1-8.
- [17] 邵瑶, 汤涌 (Shao Yao, Tang Yong). 采用多馈入交互作用因子判断高压直流系统换相失败的方法 (A commutation failure detection method for HVDC systems based on multi-infeed interaction factors) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2012, 32 (4): 108-114.
- [18] 刘建, 李兴源, 傅孝韬, 等 (Liu Jian, Li Xingyuan, Fu Xiaotao, et al.). 多馈入短路比及多馈入交互作用因子与换相失败的关系 (Relationship of multi-Infeed short circuit ratio and multi-infeed interaction factor with commutation failure) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2009, 33 (12): 20-25.
- [19] 杨卫东, 徐政, 韩祯祥 (Yang Weidong, Xu Zheng, Han Zhenxiang). 多馈入直流输电系统的协调恢复策略 (Cordinated recovery strategy for multi-infeed HVDC system) [J]. 电力自动化设备 (Automation of Electric Power System), 2002, 22 (11): 63-66.
- [20] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等 (He Chaorong, Li Xingyuan, Jin Xiaoming, et al.). 高压直流输电系统换相失败的判断标准 (Criteria for commutation failure in HVDC transmission system) [J]. 电网技术 (Power System technology), 2006, 30 (22): 19-23.

**Study on suppression measures of subsequent commutation failure  
in MIDC transmission systems**

WEN Jun<sup>1</sup>, LI Jia-qi<sup>1</sup>, WANG Ling<sup>1</sup>, HAN Min-xiao<sup>1</sup>, LI Ya-nan<sup>2</sup>, YAN Han<sup>1</sup>, LI Rong<sup>1</sup>

(1. Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

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

**Abstract:** With the increasing of DC transmission capacity, HVDC connecting points are becoming more and more crowded, and commutation failure becomes increasingly prominent in MIDC transmission systems. To reduce the probability of commutation failure in MIDC systems, this paper first analyzes the fundamental causes of simultaneous or successive commutation failure, and then combing with the tradition VDCOL control puts forward the coordinated control strategy of variable slope VDCOL with voltage compensation. The control strategy takes advantage of the DC current characteristics while fault occurs, considers the influence factors of the DC systems characteristics in MIDC transmission system, and selects the reasonable compensation coefficient  $K$ , so that the MIDC systems can be recovered stably after faults, and the occurrence of subsequent commutation failure will be reduced. At the same time, according to the severity of the fault, the  $K$  value is selectively introduced in order to improve the recovery performance of the DC systems. Finally the example system and the actual system are built in PSCAD/EMTDC. Simulation results show that the control strategy can effectively reduce the probability of following commutation failure in MIDC transmission systems, and makes all DC system recovery orderly after fault, meanwhile ensures the good recovery performance which can greatly improve the safety and reliability in MIDC transmission systems.

**Key words:** MIDC transmission system; compensation voltage; VDCOL; commutation failure; compensation coefficient; fault recovery