

# 2015 年特高压规划电网华北和华东地区 多馈入直流输电系统的换相失败分析

邵瑶, 汤涌, 郭小江, 周勤勇

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Analysis on Commutation Failures in Multi-Infeed HVDC Transmission Systems in North China and East China Power Grids Planned for UHV Power Grids in 2015

SHAO Yao, TANG Yong, GUO Xiaojiang, ZHOU Qinyong

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** Based on the summer peak load operation mode in the planning of UHV power grids in North China, Central China and East China in 2015, the commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems in North China and East China power grids are researched in depth by the electromechanical transient simulation software PSD-BPA. Research results show that the unipolar/bipolar blocking occurring in any DC line in North China and East China UHV power grids will not lead to commutation failure in other DC lines of these power grids; three phase-to-ground faults occurring near converter buses in majority DC inverter stations in North China power grid will not lead to commutation failure in other DC lines; three phase-to-ground faults occurring in main transmission channels of East China power grid and that occurring near the converter buses of inverter stations may lead to simultaneous commutation failures in multi DC lines. However, the durations of these ensuing commutation failures are very short, and the DC system can resume normal operation rapidly and the power grid can remain stable without taking any measures. The occurrence of commutation failures at DC transmission lines in East China power grid can be effectively suppressed by reactive power compensation with static var compensators (SVC).

**KEY WORDS:** the project interconnecting North China Power Grid with Central China Power Grid and East China Power Grid; multi-infeed HVDC transmission system; commutation failure; reactive power compensation; static var compensator (SVC)

**摘要:** 基于 2015 年“三华”特高压规划电网的丰大运行方式, 采用机电暂态仿真软件 PSD-BPA, 对华北、华东地区

多馈入直流输电系统换相失败问题进行深入研究。研究结果表明, 华北、华东地区任一直流发生单/双极闭锁故障时, 均不会引起其他直流发生换相失败; 华北地区大部分直流逆变站换流母线附近三永故障, 不会导致其他直流换相失败; 华东地区重要交流通道和逆变站换流母线附近三永故障会导致多回直流同时发生换相失败, 但这些换相失败持续时间较短, 直流系统能快速恢复正常运行, 系统能在不采取任何措施下保持稳定; 采用静止无功补偿器进行无功补偿, 可有效抑制华东地区直流输电系统换相失败的发生。

**关键词:** “三华”电网; 多馈入直流输电系统; 换相失败; 无功补偿; 静止无功补偿器

## 0 引言

根据“三华”特高压交直流同步电网规划<sup>[1-5]</sup>, 预计到 2015 年, 将有 10 条直流输电线路落点华东电网, 5 条直流线路落点华北电网, 届时, 华东、华北电网将成为含有“多馈入直流输电系统”的受端电网。与纯交流输电系统和单馈入直流输电系统相比, 多馈入直流输电系统在增加系统运行方式和电源安排灵活性、扩大输送容量的同时, 也增加了系统结构的复杂性<sup>[6-7]</sup>。

换相失败是直流系统最常见的故障之一<sup>[8-10]</sup>。而在多馈入直流输电系统中, 由于各直流逆变站间电气距离较近, 交直流系统间相互作用复杂, 直流系统或受端交流系统发生故障, 可能引发多回直流同时或相继换相失败和连续换相失败; 受端系统强度较弱或交流系统故障较严重时, 多回直流的连续换相失败可能导致直流功率传输的中断, 最终威胁到整个系统的安全稳定运行<sup>[11-12]</sup>。研究<sup>[13-21]</sup>表明, 各直流逆变站间的电气耦合关系、受端交流系统的强

基金项目: 国家电网公司科技项目(XT71-10-024)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC (XT71-10-024).

度、交直流系统故障的发生地点和严重程度等因素均会影响到多馈入直流输电系统换相失败的发生。

本文基于 2015 年“三华”特高压规划电网的丰大运行方式,对直流系统单/双极闭锁故障、重要交流通道故障和受端系统重要线路故障对华北、华东地区多馈入直流输电系统换相失败的影响进行详细分析,并对静止无功补偿器(static var compensator, SVC)用于抑制华东地区多馈入直流输电系统换相失败的作用进行研究。

## 1 系统模型与换相失败判断标准

### 1.1 多馈入直流输电系统

预计到 2015 年,华东、华北电网将成为含有“多馈入直流输电系统”的电网,如图 1 所示。

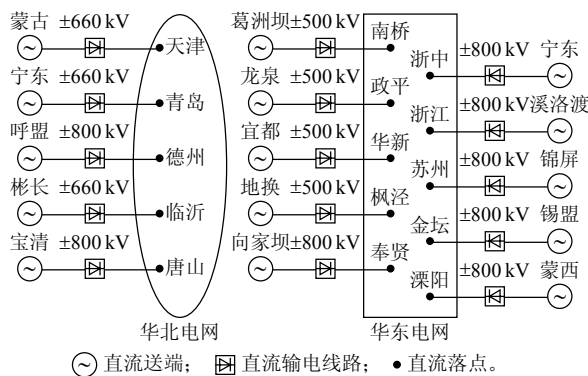


图 1 华北、华东地区多馈入直流输电系统示意

Fig. 1 Diagram of multi-infeed HVDC transmission systems in North China and East China power grids

### 1.2 仿真工具及模型

#### 1) 直流模型和仿真工具。

具有换相失败模拟功能的直流系统模型有电磁暂态模型和准稳态模型 2 种。电磁暂态模型可详细模拟换流阀的导通、截止和换相过程,能精确描述直流动态行为,但仿真规模小,不适用于实际大规模电网的仿真<sup>[22]</sup>;准稳态模型主要依赖于外部条件(如交流/直流电压阈值)来模拟换相失败逻辑,可以详细模拟直流线路和控制器,并能完整保留交流系统规模,在交直流电力系统机电暂态仿真中得到广泛应用<sup>[23-24]</sup>。

本文采用中国电力科学研究院开发的 PSD-BPA 暂态稳定程序作为仿真工具。直流系统采用整流侧恒电流控制、逆变侧恒熄弧角控制、含直流电压与直流电流测量环节、低压限流环节与触发控制环节的直流准稳态模型。

#### 2) 发电机和负荷模型。

发电机模型采用考虑次暂态电势  $E_q''$ 、 $E_d''$  变化,

计及励磁系统、调速器作用的 6 阶模型。

负荷模型中,华东、华中电网采用恒功率与恒阻抗组合的静态负荷模型,华北、西北和东北电网采用感应电动机并联静态负荷的综合负荷模型。

### 1.3 换相失败的判断标准

对于逆变站外部故障引起的换相失败,常用的判别方法主要有熄弧角判断法和最小电压降落法 2 种<sup>[6]</sup>。熄弧角判断法通过比较换流器熄弧角与引起换相失败的临界熄弧角之间的大小来判断是否发生换相失败<sup>[25-26]</sup>。最小电压降落法通过比较换相电压的降落与发生换相失败所需的最小电压降落之间的大小来判断是否发生换相失败<sup>[27-28]</sup>。

由于电压降落是引起高压直流输电(HVDC)系统换相失败的主要原因,本文采用最小电压降落法对 HVDC 系统发生换相失败和换相失败后恢复正常换相进行判断,根据工程计算经验,采取如下判据:逆变端换流母线电压变化率超过  $0.3 \text{ pu/s}$ ,且电压低于  $0.8 \text{ pu}$ ,则判断发生换相失败;逆变端换流母线电压低于  $0.6 \text{ pu}$ ,则判断发生换相失败;逆变站发生换相失败后,逆变端换流母线电压恢复到  $0.75 \text{ pu}$  及以上,直流系统恢复换相<sup>[24]</sup>。

## 2 华北地区多馈入直流输电系统换相失败仿真分析

### 2.1 直流系统单/双极闭锁故障

华北地区任一直流单/双极闭锁故障对其他相邻直流的影响如表 1 所示。可以看出,单极闭锁故障期间及故障后,正常运行直流系统的逆变侧交流母线电压不低于  $0.99 \text{ pu}$ ;双极闭锁故障期间及故障后,正常运行直流系统的逆变侧交流母线电压不低于  $0.96 \text{ pu}$ ,不满足发生换相失败的判断条件,即馈

表 1 华北地区某直流系统单/双极闭锁对其他直流的影响  
Tab. 1 Effects on other DC systems under one DC's unipolar/bipolar block faults occurring in North China power grid

故障 直流	系统 稳定性	闭锁 类型	逆变侧交流母线电压最低值/pu				
			蒙津	宁青	呼德	彬临	宝唐
蒙津	稳定	单极	—	1.02	1.03	1.02	1.01
		双极	—	1.01	1.02	1.01	0.99
宁青	稳定	单极	1.01	—	1.02	1.02	1.01
		双极	1.00	—	1.01	0.99	1.00
呼德	稳定	单极	1.00	1.01	—	1.01	1.01
		双极	1.00	0.98	—	0.99	1.01
彬临	稳定	单极	1.01	1.01	1.02	—	1.02
		双极	1.00	0.99	1.01	—	1.01
宝唐	稳定	单极	0.99	1.01	1.02	1.02	—
		双极	0.96	1.01	1.01	1.01	—

入华北地区的任一直流系统发生单/双极闭锁故障，均不会引起其他正常运行直流系统的换相失败。

### 2.2 受端系统重要交流线路故障

选取直流逆变站换流母线附近 500 kV 交流线路三相永久性短路故障进行研究，故障时序为：0 s 故障发生，0.09 s 跳开故障侧三相开关，0.1 s 跳开对侧三相开关。仿真结果如表 2 所示，可以看出：

1) 华北地区的蒙古—天津、宝清—唐山和呼盟—德州直流逆变站换流母线附近发生三永故障，只会导致本直流发生换相失败，不会导致其他直流同时发生换相失败。

表 2 华北地区重要交流线路三永故障对换相失败的影响

**Tab. 2 Effects on commutation failures under three phase-to-ground faults occurring on important AC lines in North China power grid**

故障线路	系统稳定性	发生换相失败的直流	开始时间/s	恢复时间/s
天津—津北	稳定	蒙津	0.08	0.15
天津—宝北	稳定	蒙津	0.08	0.15
青岛—大泽	稳定	宁青	0.08	0.15
		彬临	0.08	0.12
青岛—崂琅	稳定	宁青	0.08	0.15
		彬临	0.08	0.12
青岛—琅琊	稳定	宁青	0.08	0.15
		彬临	0.08	0.12
临沂—日照	稳定	宁青	0.08	0.10
		彬临	0.08	0.14
临沂—沂蒙	稳定	宁青	0.08	0.10
		彬临	0.08	0.13
德换—滨州	稳定	呼德	0.08	0.11
德换—陵县	稳定	呼德	0.08	0.10
唐逆—滦县	稳定	宝唐	0.08	0.15
唐逆—安各庄	稳定	宝唐	0.08	0.15

2) 宁东—青岛、彬长—临沂直流逆变站换流母线附近发生三永故障，会引起青岛和临沂逆变站换流母线电压同时下降，从而导致这 2 回直流同时发生换相失败，但换相失败持续时间较短，直流功率可在交流故障清除后快速恢复。

## 3 华东地区多馈入直流输电系统换相失败仿真分析

### 3.1 直流系统单/双极闭锁故障

华东地区任一直流单/双极闭锁故障对其他相邻直流的影响如表 3 所示。可以看出，馈入华东地区的任一直流系统发生单/双极闭锁故障，均不会引起其他正常运行直流系统换相失败。单极闭锁故障期间及故障后，正常运行直流系统的逆变侧交流母线电压不低于 0.92 pu，双极闭锁故障期间及故障后，正常运行直流系统的逆变侧交流母线电压不低于 0.86 pu，直流电流变化较小，不会显著增加换相及熄弧所需时间，因此不会引起逆变器换相失败。

### 3.2 重要交流通道故障

由于华东地区五省市间通过特高压和 500 kV 交流通道联网，某一交流通道故障可能引发多回直流系统换相失败，本文对该问题进行详细分析。故障类型为三相永久性短路故障，故障位置选取江苏、上海、浙江和安徽 1000 kV 及 500 kV 站之间的交流线路，故障时序为：0 s 故障发生，特高压通道 0.08 s 跳开故障侧三相开关，0.1 s 跳开对侧三相

表 3 华东地区某直流系统单/双极闭锁对其他直流的影响

**Tab. 3 Effects on other DC systems under one DC's unipolar/bipolar block faults occurring in East China power grid**

故障直流	系统稳定性	闭锁类型	逆变侧交流母线电压最低值/pu									
			葛南	宜华	地枫	向奉	龙政	锦苏	锡金	蒙溧	宁浙	溪浙
葛南	稳定	单极	—	0.96	0.97	0.97	0.96	0.97	1.01	0.99	1.00	1.00
		双极	—	0.95	0.96	0.96	0.96	0.96	1.01	0.99	0.99	1.00
宜华	稳定	单极	1.01	—	0.96	0.97	0.96	0.96	1.00	0.99	0.99	1.00
		双极	0.99	—	0.94	0.95	0.94	0.95	0.99	0.97	0.98	0.99
地枫	稳定	单极	1.01	0.95	—	0.97	0.96	0.96	1.01	0.99	0.99	1.00
		双极	0.99	0.93	—	0.95	0.94	0.95	0.99	0.97	0.98	0.99
向奉	稳定	单极	0.98	0.93	0.94	—	0.94	0.94	0.99	0.97	0.98	0.99
		双极	0.93	0.97	0.88	—	0.91	0.91	0.95	0.92	0.94	0.97
龙政	稳定	单极	1.01	0.95	0.97	0.97	—	0.97	1.01	0.98	0.99	1.00
		双极	1.00	0.94	0.96	0.96	—	0.95	0.98	0.97	0.98	0.99
锦苏	稳定	单极	1.00	0.93	0.94	0.96	0.93	—	0.98	0.96	0.97	0.98
		双极	0.96	0.88	0.90	0.93	0.9	—	0.87	0.94	0.95	0.97
锡金	稳定	单极	1.00	0.94	0.95	0.97	0.95	0.96	—	0.97	0.98	0.99
		双极	0.98	0.92	0.93	0.95	0.93	0.94	—	0.95	0.98	0.99
蒙溧	稳定	单极	1.00	0.93	0.95	0.96	0.94	0.95	0.99	—	0.98	0.99
		双极	0.95	0.86	0.87	0.93	0.90	0.90	0.94	—	0.93	0.96
宁浙	稳定	单极	1.00	0.94	0.95	0.96	0.94	0.95	0.99	0.97	—	0.98
		双极	0.96	0.90	0.91	0.93	0.91	0.92	0.96	0.93	—	0.96
溪浙	稳定	单极	1.00	0.94	0.96	0.96	0.95	0.96	1.00	0.98	0.94	—
		双极	0.96	0.86	0.87	0.92	0.89	0.90	0.95	0.90	0.84	—

开关；500 kV 通道 0.09 s 跳开故障侧三相开关，0.1 s 跳开对侧三相开关。

华东地区 1 000 kV 特高压交流通道故障对多馈入直流输电系统换相失败的影响如表 4 所示。可以看出：江苏—上海和上海—浙江特高压交流通道发生三永故障，会导致馈入华东地区的所有直流发生换相失败；安徽—江苏和浙江—安徽特高压交流通道发生三永故障，会导致馈入上海和江苏地区的所有直流、浙江地区的宁东—浙中直流发生换相失败。其中，葛洲坝—南桥、龙泉—政平、向家坝—奉贤和宁直—浙中直流在安徽—江苏特高压交流通道故障清除后，溪洛渡—浙江直流在江苏—上海特高压交流通道故障清除后发生换相失败。但这些换相失败持续时间较短，直流功率能快速恢复，系

统在不采取任何措施情况下能维持稳定运行。

江苏—上海和上海—浙江 500 kV 交流通道发生三永故障，会导致馈入上海和江苏地区的所有直流、浙江地区的宁东—浙中直流发生换相失败；安徽—江苏和浙江—安徽 500 kV 交流通道发生三永故障，会导致馈入上海、江苏和浙江地区的部分直流同时发生换相失败。其中，江苏—上海 500 kV 交流通道三永故障会导致龙泉—政平和蒙西—溧阳直流发生 2 次不连续换相失败，上海—浙江 500 kV 交流通道三永故障会导致葛洲坝—南桥、地换—枫泾和宜都—华新 3 回直流发生 2 次不连续换相失败。但这些换相失败的持续时间较短，直流功率可较快恢复，系统能在不采取任何措施情况下维持稳定运行。

表 4 华东地区特高压交流通道三永故障对多馈入直流输电系统换相失败的影响

Tab. 4 Effects on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission system under three phase-to-ground faults occurring on the 1 000 kV AC transmission channels in East China power grid

故障通道	系统稳定性	直流是否换相失败/(开始时间/s)/(恢复时间/s)									
		葛南	宜华	地枫	向奉	龙政	锦苏	锡金	蒙溧	宁浙	溪浙
安徽—江苏	稳定	是/0.1/0.12	是/0.08/0.1	是/0.08/0.1	是/0.15/0.17	是/0.11/0.12	是/0.08/0.1	是/0.08/0.1	是/0.08/0.1	是/0.15/0.16	否
江苏—上海	稳定	是/0.08/0.10	是/0.08/0.1	是/0.08/0.1	是/0.08/0.10	是/0.08/0.10	是/0.08/0.1	是/0.08/0.1	是/0.08/0.1	是/0.08/0.10	是/0.12/0.13
上海—浙江	稳定	是/0.08/0.10	是/0.08/0.1	是/0.08/0.1	是/0.08/0.10	是/0.08/0.10	是/0.08/0.1	是/0.08/0.1	是/0.08/0.1	是/0.08/0.10	是/0.08/0.1
浙江—安徽	稳定	是/0.08/0.10	是/0.08/0.1	是/0.08/0.1	是/0.08/0.10	是/0.08/0.10	是/0.08/0.1	是/0.08/0.1	是/0.08/0.1	是/0.08/0.10	否

### 3.3 受端系统重要交流线路故障

华东电网作为一个典型多直流馈入系统，直流输送容量大且落点密集，某一直流逆变站附近交流系统故障可能引起多个逆变站换流母线电压同时下降，存在导致多回直流同时发生换相失败的可能性，当故障出现在换流母线上时，对换相失败的不利影响最为严重<sup>[6-7]</sup>，本文对该问题展开深入研究。故障类型为三相永久性短路故障，故障位置选取直流逆变站换流母线附近 500 kV 交流线路换流母线侧，故障时序为：0 s 故障发生，0.09 s 跳开故障侧三相开关，0.1 s 跳开对侧三相开关。

研究结果表明：馈入上海和江苏地区的任一直流逆变站换流母线附近线路发生三永故障，均会导致上海和江苏地区的其他直流发生换相失败，此外，政平、南桥、华新、枫泾、奉贤逆变站换流母线附近线路故障还会导致浙江地区的宁东—浙中直流发生换相失败，如图 2—4 所示。其中，宜都—华新直流逆变站换流母线附近线路故障会导致龙泉—政平直流发生 2 次不连续换相失败，锦屏—苏州直流逆变站换流母线附近线路故障会导致葛洲坝—南桥和宜都—华新直流发生 2 次不连续换相失败。但这些换相失败持续时间均较短，直流功率

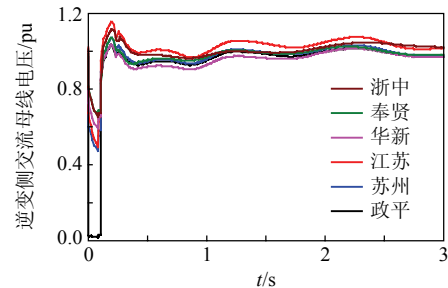


图 2 政平逆变站换流母线附近某线路三永故障稳定曲线  
Fig. 2 Stability curves of other DCs under three phase-to-ground fault occurring on some AC line near Zhengping inverter station

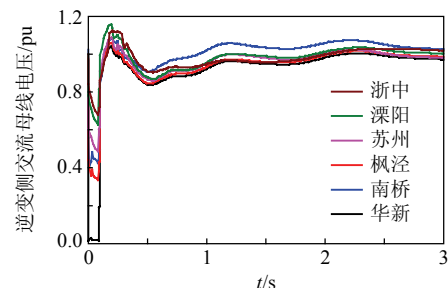


图 3 南桥逆变站换流母线附近某线路三永故障稳定曲线  
Fig. 3 Stability curves of other DCs under three phase-to-ground fault occurring on some AC line near Nanqiao inverter station

可较快恢复，系统能在不采取任何措施情况下维持稳定运行。

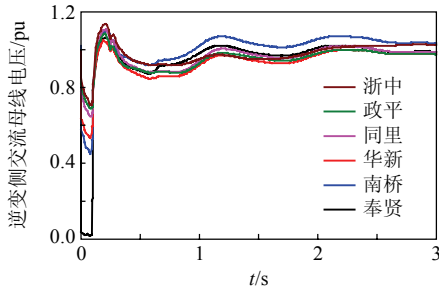


图 4 奉贤逆变站换流母线附近某线路三永故障稳定曲线  
 Fig. 4 Stability curves of other DCs under three phase-to-ground fault occurring on some AC line near Fengxian inverter station

馈入浙江地区的任一直流逆变站换流母线附近线路发生三永故障，均不会引起上海和江苏地区的直流发生换相失败，故障期间上海和江苏地区母线电压不低于 0.85 pu，系统受扰动小，直流能维持正常运行。溪洛渡—浙江直流逆变站换流母线附近线路三永故障会导致馈入浙江地区的所有直流同时发生换相失败，但换相失败持续时间较短，直流功率可在故障清除后较快恢复，不会对系统的安全稳定运行造成影响。

#### 4 SVC 抑制换相失败的研究

直流输电系统在运行时需要消耗大量无功功率，采用动态无功补偿装置对直流系统(尤其是与弱交流系统相连接的直流系统)进行无功补偿，可降低逆变站换流母线电压对暂态故障的灵敏度，维持直流系统换相电压的稳定，减少交流电压大幅度下降时直流系统换相失败的发生几率<sup>[6-7,29]</sup>。

SVC 是一种被广泛应用的并联无功发生或吸收装置，其基本原理是检测换流母线电压或换流站与交流系统交换无功功率的变化，通过控制晶闸管的触发角改变接入电网中的等效电纳，从而达到调节输出无功、控制电力系统特定参数(通常是母线电压)的目的，其动作速度是 ms 级的<sup>[9,30]</sup>。

本文采用固定电容-晶闸管控制电抗型(fixed capacitor-thyristor controlled reactor, FC-TCR)静止无功补偿器对华东地区的部分直流系统进行无功补偿。FC-TCR 型 SVC 的典型结构如图 5 所示，其

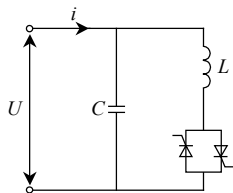


图 5 FC-TCR 型 SVC 的典型结构  
 Fig. 5 Typical structure of FC-TCR SVC

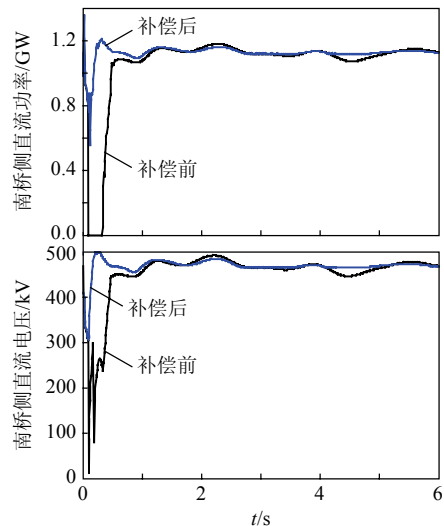
中电容 C 支路为固定连接，TCR 支路采用延时触发控制，形成连续可控的感性电抗<sup>[9,24]</sup>。

分别在南桥、华新、枫泾和奉贤直流逆变站加装一定容量的 SVC，具体补偿方案如表 5 所示。

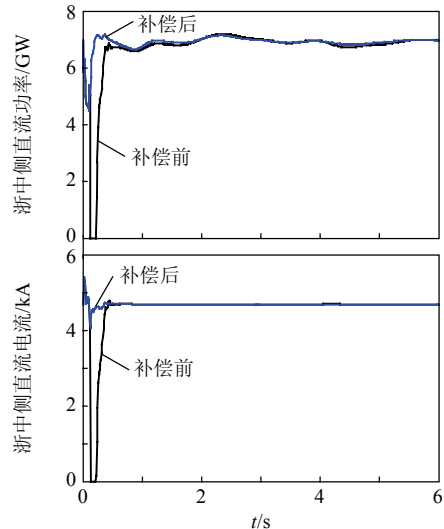
表 5 华东地区 SVC 补偿方案  
 Tab. 5 Compensation scheme of SVC in East China power grid

安装地点	安装容量/Mvar	补偿范围/Mvar
南桥	180	0~180
华新	180	0~180
枫泾	180	0~180
奉贤	240	0~240

在龙泉—政平直流逆变交流侧施加三相永久性短路故障，故障线路为政平—武南，图 6 为 SVC 补偿前后华东地区部分直流系统的仿真曲线。从稳定对比曲线可以看出，在华东地区直流逆变站加装



(a) 葛洲坝—南桥直流



(b) 宁东—浙中直流

图 6 SVC 补偿前后华东地区部分直流系统仿真曲线对比  
 Fig. 6 Comparisons of the stability curves of some DC systems in East China power grid before and after SVC compensation

一定量的 SVC, 可明显改善故障期间及故障后华东地区多回直流输电系统的恢复特性, 提高直流电压、直流电流和直流功率的恢复速度, 有效抑制华东地区直流输电系统换相失败的发生。

## 5 结论

本文基于 2015 年“三华”特高压电网规划数据的丰大运行方式, 对华北、华东多馈入直流输电系统换相失败问题进行仿真分析。研究结果表明:

1) 华北地区任一直流发生单/双极闭锁故障时, 均不会引起其他直流同时换相失败。

2) 华北地区大部分直流逆变站换流母线附近三永故障, 不会导致其他直流同时换相失败; 宁青和彬临直流逆变站换流母线附近三永故障, 会引起这 2 回直流同时换相失败, 但换相失败持续时间很短, 故障清除后直流系统能快速恢复正常运行, 系统能在不采取任何措施下保持稳定。

3) 华东地区任一直流发生单/双极闭锁故障时, 均不会引起其他直流同时换相失败。

4) 华东地区 1000 kV 特高压交流通道三永故障, 会导致馈入上海和江苏地区的所有直流、浙江地区的大部分直流同时换相失败; 华东地区 500 kV 交流通道三永故障, 会导致馈入上海、江苏和浙江地区的部分直流同时换相失败, 但这些换相失败持续时间很短, 直流功率能快速恢复, 系统在不采取任何措施情况下能维持稳定运行。

5) 馈入上海和江苏地区的任一直流逆变站换流母线附近线路三永故障, 均会导致上海和江苏地区的其他直流换相失败, 部分线路故障会导致浙江地区的直流换相失败, 但这些换相失败持续时间均较短, 直流可在故障清除后恢复换相, 系统能在不采取任何措施下维持稳定运行; 馈入浙江地区的任一直流逆变站换流母线附近线路三永故障, 均不会引起上海和江苏地区的直流发生换相失败。

6) 采用合适的 SVC 补偿方案, 可有效抑制华东地区直流输电系统换相失败的发生。

## 参考文献

[1] 吴敬儒, 徐永禧. 我国特高压交流输电发展前景[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 1-4.  
Wu Jingru, Xu Yongxi. EHV AC transmission's development prospects in our country[J]. Power System Technology, 2005, 29(3): 1-4(in Chinese).

[2] 郭强, 张运洲, 吕健. 我国未来同步电网构建研究[J]. 电网技术, 2005, 29(22): 14-18, 60.

Guo Qiang, Zhang Yunzhou, Lü Jian. Study on scheme for structure and construction of synchronous power grid in China from 2010 to 2020[J]. Power System Technology, 2005, 29(22): 14-18, 60(in Chinese).

[3] 舒印彪, 刘泽洪, 高理迎, 等.  $\pm 800$  kV 6400 MW 特高压直流输电工程设计初探[J]. 电网技术, 2006, 30(1): 1-8.  
Shu Yinbiao, Liu Zehong, Gao Liying, et al. A preliminary exploration for design of  $\pm 800$  kV UHVDC project with transmission capacity of 6400 MW[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 1-8(in Chinese).

[4] 郭强, 申洪, 周勤勇, 等. 2015 年国家电网主网架结构稳定性研究与评估[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010.

[5] 郭小江, 邵瑶, 周勤勇, 等. 多馈入直流地区电网安全稳定性研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010.

[6] 林凌雪, 张尧, 钟庆, 等. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 40-46.  
Lin Lingxue, Zhang Yao, Zhong Qing, et al. A survey on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 40-46(in Chinese).

[7] 邵瑶, 汤涌. 多馈入交直流混合电力系统研究的综述[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 24-30.  
Shao Yao, Tang Yong. Current situation of research on multi-infeed AC/DC power systems[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 24-30(in Chinese).

[8] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 193-194.

[9] Kundur P. 电力系统稳定和控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002: 331-332.

[10] 赵曦君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 125-127.

[11] 张晋华, 蒋卫平, 印永华, 等. 特高压规划电网安全稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 64-68.  
Zhang Jinhua, Jiang Weiping, Yin Yonghua, et al. Security and stability study on planned ultra high voltage power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(22): 64-68(in Chinese).

[12] 孙景强, 郭小江, 张健, 等. 多馈入直流输电系统受端电网动态特性[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 57-60, 87.  
Sun Jingqiang, Guo Xiaojiang, Zhang Jian, et al. Dynamic characteristics of receiving-end of multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 57-60, 87(in Chinese).

[13] Zhou Changchun, Xu Zheng. Study on commutation failure of multi-infeed HVDC system[C]//IEEE Proceedings of International Conference on Power System Technology, 2002: 2462-2466.

[14] 蔡泽祥, 朱浩骏, 白雪峰. 多馈入直流输电系统的动态特性及稳定控制与分析[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(5): 1-8.  
Cai Zexiang, Zhu Haojun, Bai Xuefeng. Dynamic characteristics stability control and analysis of multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Journal of North China Electric Power University, 2004, 31(5): 1-8(in Chinese).

[15] 陈树勇, 李新年, 余军, 等. 基于正余弦分量检测的高压直流换相失败预防方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 1-6.  
Chen Shuyong, Li Xinnian, Yu Jun, et al. A method based on the sin-cos components detection mitigates commutation failure in HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 1-6(in Chinese).

[16] 项玲, 郑建勇, 胡敏强. 多端和多馈入直流输电系统中换相失败的研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(11): 29-33.  
Xiang Ling, Zheng Jianyong, Hu Minqiang. Study on commutation



- failure in MTDC and MIDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 29-33(in Chinese).
- [17] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电系统换相失败判断标准的仿真分析[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 20-24.  
He Chaorong, Li Xingyuan, Jin Xiaoming, et al. Criteria for Simulation analysis on commutation failure in criteria for HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 20-24(in Chinese).
- [18] CIGRE Working Group B4. 41. Systems with multiple DC infeed[R]. Paris: CIGRE, 2008.
- [19] 何朝荣, 李兴源. 影响多馈入高压直流换相失败的耦合导纳研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 51-57.  
He Chaorong, Li Xingyuan. Study on mutual admittance and commutation failure for multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 51-57 (in Chinese).
- [20] 刘建, 李兴源, 傅孝韬, 等. 多馈入短路比及多馈入交互作用因子与换相失败的关系[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 20-25.  
Liu Jian, Li Xingyuan, Fu Xiaotao, et al. Relationship of multi-infeed short circuit ratio and multi-infeed interaction factor with commutation failure[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 20-25(in Chinese).
- [21] Rahimi E, Gole A M, Davies J B, et al. Commutation failure analysis in multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(1): 378-384.
- [22] Szechtman N, Thio C V. First benchmark model for HVDC control studies[J]. Electra, 1991(135): 374-378.
- [23] 周长春, 徐政. 直流输电准稳态模型有效性的仿真验证[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 33-36.  
Zhou Changchun, Xu Zheng. Simulation validity test of the HVDC quasi-steady-state model[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 33-36(in Chinese).
- [24] 汤涌, 卜广全, 侯俊贤, 等. PSD-BPA 暂态稳定程序用户手册[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2008.
- [25] 吴红斌, 丁明, 刘波. 交直流系统暂态仿真中换流器的换相过程分析[J]. 电网技术, 2004, 28(17): 11-14.  
Wu Hongbin, Ding Ming, Liu Bo. Analysis on commutation process of converters in transient simulation of hybrid AC/DC systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(17): 11-14(in Chinese).
- [26] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电换相失败判断标准[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 19-24.  
He Chaorong, Li Xingyuan, Jin Xiaoming, et al. Criteria for commutation failure in HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 19-24(in Chinese).
- [27] Thio C V, Davies J B, Kent K L. Commutation failures in HVDC transmission systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 946-957.
- [28] 荆勇, 任震, 欧开健. 天广直流输电系统换相失败的研究[J]. 继电器, 2003, 31(10): 32-36.  
Jing Yong, Ren Zhen, Ou Kaijian. Research on commutation failure in Tian-Guang HVDC transmission system[J]. Relay, 2003, 31(10): 32-36(in Chinese).
- [29] 周长春, 徐政. 联于弱交流系统的 HVDC 故障恢复特性仿真分析[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 19-21.  
Zhou Changchun, Xu Zheng. Simulation and analysis of recovery characteristics of HVDC connected to AC system with weak strength[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 19-21(in Chinese).
- [30] 赵贺. 电力电子学在电力系统中的应用: 灵活交流输电系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001: 44-52.



邵瑶

收稿日期: 2011-03-16。

作者简介:

邵瑶(1986), 女, 博士研究生, 研究方向为交直流系统分析、电力系统电压稳定与控制, E-mail: yaoshao@epri.sgcc.com.cn;

汤涌(1959), 男, 博士, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析、控制及软件技术;

郭小江(1977), 男, 高级工程师, 研究方向为高压直流输电及电力系统稳定控制;

周勤勇(1977), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划。

(责任编辑 马晓华)