

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181206

## 并联型多端直流输电系统运行方式研究

彭忠<sup>1</sup>, 魏金科<sup>2</sup>, 赵静<sup>1</sup>, 李泰<sup>1</sup>, 荆雪记<sup>1</sup>, 苏进国<sup>1</sup>, 胡永昌<sup>1</sup>, 李艳梅<sup>1</sup>, 袁飞<sup>3</sup>

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 河南省轻工业职工大学, 河南 郑州 450002;  
3. 中国电力技术装备有限公司, 北京 100058)

**摘要:** LCC 通过反转电压极性实现整流和逆变的转换, 可能导致并联型多端直流输电系统功率短时中断。为此, 提出一种基于 LCC 的并联型三端直流输电系统接线方案, 分析可能存在的运行方式及转换方法, 提出极性转换、电压控制站投退的控制顺序和故障极紧急停运策略。基于 PSCAD/EMTDC 平台建立三端直流输电系统仿真模型, 仿真极性转换、电压控制站投退和故障极紧急退出实验。仿真结果表明该多端系统换流站功率反转不影响其余换流站功率稳定运行, 并且能够安全隔离故障设备, 快速恢复健全系统稳定运行。

**关键词:** 并联型多端直流输电; 接线方案; 运行方式; 控制策略; 紧急停运

### Operation mode research on parallel multi-terminal HVDC transmission system

PENG Zhong<sup>1</sup>, WEI Jinke<sup>2</sup>, ZHAO Jing<sup>1</sup>, LI Tai<sup>1</sup>, JING Xueji<sup>1</sup>, SU Jinguo<sup>1</sup>, HU Yongchang<sup>1</sup>, LI Yanmei<sup>1</sup>, YUAN Fei<sup>3</sup>  
(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China; 2. Light Industry Vocational University of Henan Province, Zhengzhou 450002, China; 3. China Electric Power Technology and Equipment Co., Ltd., Beijing 100058, China)

**Abstract:** LCC conversion between rectification and inversion by voltage reversal may force multi-terminal HVDC transmission system to be power interrupted for a short time. So a connection scheme based LCC for parallel three terminal HVDC transmission system is presented, the possible operation modes and conversion methods are analyzed, the control sequences of pole conversion and DC voltage controlling station input and output and emergency exit strategy for fault pole are presented. Based on the platform of PSCAD/EMTDC, the three terminal HVDC simulation model is built to carry out the simulation on pole conversion, DC voltage controlling station input and output, and emergency exit of fault pole. The simulation results show that power reversal of one converter station based the multi-terminal HVDC would not affect others station, and could isolate fault devices safely to recover the stable operation of sound system quickly.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900603) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52094017000W).

**Key words:** parallel multi-terminal HVDC; connection scheme; operation mode; control strategy; emergency exit

## 0 引言

多端直流输电系统指含有 3 个及 3 个以上换流站的输电系统, 其显著特征为多电源供电或多落点受电。当多个电源区域向多个负荷中心供电时, 使用多端直流输电比两端直流输电将更加经济灵活。相对于串联结构而言, 并联结构的多端直流系统换流站调节范围更大、绝缘配合更方便、扩展更灵活,

因此并联型多端直流输电系统应用更广泛<sup>[1-7]</sup>。

按照换流器类型划分, 多端直流输电可分为电网换相型多端直流输电、柔性多端直流输电和混合多端直流输电。电网换相型多端直流输电使用晶闸管, 过流能力强, 在两端直流输电工程中, 一次和二次设备有着非常成熟的设计和制造经验, 但是存在换相失败问题。柔性多端直流输电普遍使用模块化多电平换流器, 其开关器件主要为 IGBT。柔性多端直流输电具备有功和无功独立控制, 无换相失败, 潮流翻转控制灵活等优点<sup>[8-14]</sup>, 但存在器件过流能力弱, 故障电流发展速度快, 一次设备和二次

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900603);  
国家电网公司科技项目资助(52094017000W)

设备不成熟的缺点。混合多端直流输电指一部分换流站使用电网换相型换流器, 一部分使用模块化多电平换流器<sup>[15-16]</sup>, 混合多端直流输电具备了电网换相型直流输电和柔性直流输电的优点, 但依然存在 IGBT 器件过流能力弱, 故障电流发展速度快, 无成熟设备制造经验等缺点。目前已投运的电网换相型多端直流输电工程有加拿大纳尔逊河工程、意大利科西嘉-撒丁岛工程、美国太平洋联络线工程等。已投运的柔性多端直流输电工程有南澳多端柔直工程和舟山多端柔直工程。在规划设计中的混合多端直流输电工程有乌东德混合多端工程。三种多端直流输电方案各有利弊, 目前电网换相型多端直流输电的工程经验最丰富, 设计制造技术最成熟, 市场占有率最高。规划中的贵广 I 回直流工程将改造成三端电网换相型直流输电工程。

电网换相型多端直流输电一直是研究热点。文献[17]研究了四端并联型直流输电系统的稳态和暂态故障控制保护策略。文献[18]基于 RTDS 搭建了并联型四端直流输电仿真模型, 研究多端直流输电控制保护样机的功能配置和仿真分析。文献[19]研究适用于并联型多端直流输电系统的控制策略和直流线路故障清除策略。文献[20]研究了并联型多端直流输电系统的金属回线运行方式。以上文献都是基于较简单的并联多端直流输电拓扑结构研究控制保护策略, 一个换流站潮流反转时, 会造成多端系统功率短时中断, 运行方式不够灵活。

本文提出了一种并联型多端直流输电的接线方案, 分析可能存在的运行方式及运行方式转换策略。提出了典型运行方式转换的控制顺序和故障极紧急停运策略, 简述了多端直流保护系统和通信系统配置。基于 PSCAD/EMTDC 仿真验证极性转换、电压控制站投入、电压控制站退出、故障极紧急退出策略的有效性。

## 1 拓扑结构

图 1 为并联型三端直流系统拓扑结构简图, 三个换流站交流侧接入三个交流电网, 直流侧使用两段架空线路连接。换流站为双极金属回线结构, 常用接地点设置在换流站 2。换流站的直流母线配置了极性转换开关, 用于改变换流站功率方向。换流站 2 配置了多端转换开关, 用于三端运行方式转换和故障处理等。

$Q1Sx \sim Q4Sx$  ( $x$  代表换流站编号,  $x=1,2,3$ ) 为极性转换开关, 用于改变换流器的电压极性, 从而改变换流站的功率方向。比如, 当  $Q1S1$  和  $Q4S1$  处于

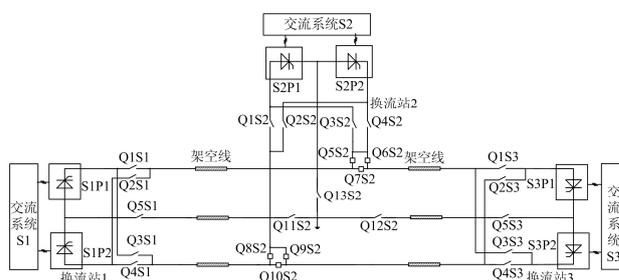


图 1 并联型三端直流系统拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of parallel three terminal DC system

合位且  $Q2S1$  和  $Q3S1$  处于分位时, 换流站 1 为整流站; 当  $Q2S1$  和  $Q3S1$  处于合位且  $Q1S1$  和  $Q4S1$  处于分位时, 换流站 1 为逆变站。 $Q1Sx$  与  $Q2Sx$ 、 $Q3Sx$  与  $Q4Sx$  互锁, 防止直流系统短路。极性转换开关可选用直流隔离开关。 $Q5S2 \sim Q10S2$  为多端转换开关, 用于多端运行方式转换和故障隔离。比如断开  $Q5S2$ 、 $Q7S2$ 、 $Q8S2$ 、 $Q10S2$ , 可隔离换流站 1 及线路。多端转换开关选用高速开关, 用于故障隔离后系统快速恢复。

相对于传统的两端直流输电或多端直流输电系统, 本文的三端拓扑结构具有如下优点:

- (1) 每个换流站都可以功率反转, 且其他换流站功率不中断, 提高了多端直流输电系统的稳定性;
- (2) 可以运行于多端双极、多端单双极混合、多端单极、两端双极等方式, 运行方式非常灵活。

## 2 运行方式分析

图 1 所示的并联型三端直流系统运行方式非常灵活, 通过排列组合超过 80 种运行方式。总体可以分为三端双极运行、三端单极运行、三端单双极混合运行、两端双极运行、两端单极运行。三端运行可以分为 1 个整流站与 2 个逆变站的方式和 2 个整流站与 1 个逆变站的方式。单双极混合运行是指在三端运行情况下, 有两个换流站为双极, 另外一个换流站为单极运行, 双极运行的两个换流站运行模式互斥(即一个整流站, 另一个逆变站)。

## 3 运行方式转换

三端系统运行方式转换可以分为三端模式转换、三端与两端转换、两端模式转换、双极与单极转换及双极与单双极混合转换。

图 2 包含了三端模式转换、两端模式转换和三端与两端转换。不区分单双极的情况下, 三端运行包含 6 种模式, 两端运行也包含 6 种模式。其中, 模式 1—模式 6 为三端运行模式, 模式 1(R,I,R)指换

流站 1 为整流模式，换流站 2 为逆变模式，换流站 3 为整流模式，通过极性转换实现 6 种模式的转换。如通过换流站 3 极性转换，则模式 1 转换为模式 2。然后通过换流站 2 极性转换，则模式 2 转换为模式 3。模式 7—模式 12 为两端运行模式，模式 7(R,I,X) 指换流站 1 为整流模式，换流站 2 为逆变模式，换流站 3 为停运状态。通过换流站投退实现三端模式与两端模式的转换，通过极性转换实现两端模式间的转换。通过投退单极可以实现单双极混合运行与双极运行方式的转换。

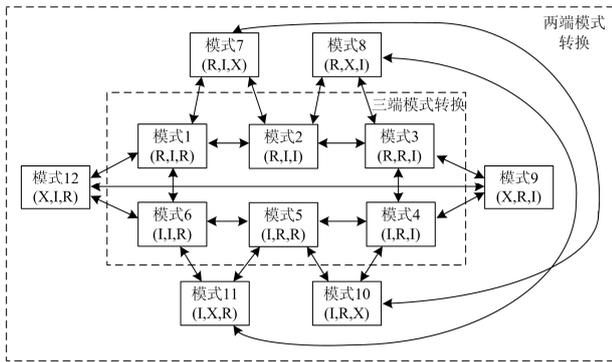


图 2 运行模式转换

Fig. 2 Operation modes conversion

### 3.1 极性转换策略

以换流站 1 和换流站 2 为整流站，换流站 3 为逆变站的运行方式，换流站 1 转变为逆变站，另外两个换流站模式不变为例(即图 2 中模式 3 转换为模式 4)，说明极性转换策略。

图 3 为换流站 1 极性转换过程。图 3(a)为换流站 1 运行在整流模式，Q1S1 和 Q4S1 闭合，换流站 2 的多端转换开关 Q6S2、Q7S2、Q9S2、Q10S2 闭合，S1P1 为正极，S1P2 为负极，功率流向直流系统。图 3(b)为换流站 1 闭锁。图 3(c)为拉开多端转换开关 Q7S2 和 Q10S2。图 3(d)为倒极性转换开关，

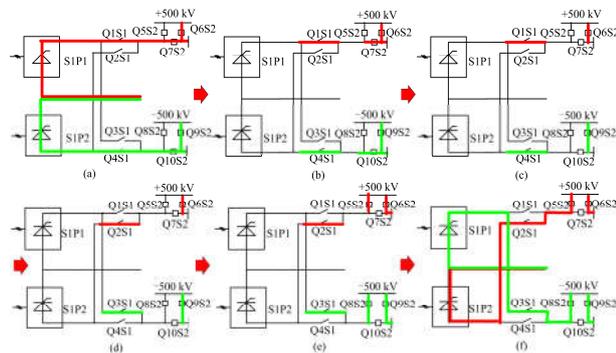


图 3 换流站 1 极性转换过程

Fig. 3 Pole conversion process of converter station 1

拉开 Q1S1 和 Q4S1，闭合 Q2S1 和 Q3S1。图 3(e) 为闭多端转换开关 Q5S2 和 Q8S2。图 3(f)为解锁，此时换流站 1 运行在逆变模式，S1P1 为负极，S1P2 为正极，功率流向交流系统。

### 3.2 电压控制站投退策略

考虑系统稳定性和限制故障电流，直流电压控制站一般选择容量较大的逆变站。

图 4(a)为电压控制站投入的控制顺序。以换流站 1 为整流站、换流站 2 为逆变站两端运行方式下投入换流站 3 为例，说明电压控制站投入策略(即图 2 中模式 7 转换为模式 2)。初始时刻，换流站 1 控制直流电流，换流站 2 控制直流电压。换流站 3 闭合直流场的相关刀闸，进行极连接操作。然后，闭合相关多端转换开关进行线路连接。完成线路连接后，换流站 3 以功率/电流控制模式解锁，直流电流参考值为 0.1 p.u.。三端系统稳定后，换流站 2 切换为直流电流控制模式，经过站间通信延时后，换流站 3 切换为直流电压控制模式。根据运行方式要求，提升换流站 1 直流功率，换流站 3 的功率增大至满功率运行。

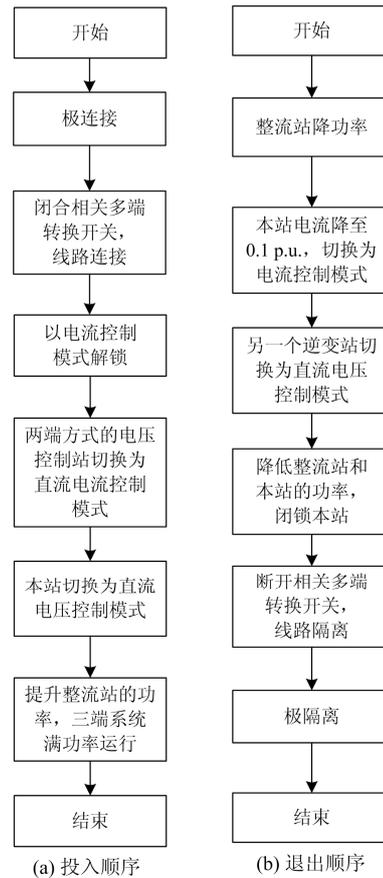


图 4 电压控制站投退顺序

Fig. 4 DC voltage controlling station input and output controlling sequence

图 4(b)所示为电压控制站退出的控制顺序(即图 2 中模式 2 转换为模式 7)。初始时刻, 换流站 1 为整流站, 换流站 2 为逆变站, 换流站 1 和换流站 2 控制直流电流, 换流站 3 为逆变站, 控制直流电压。根据运行方式要求, 降低换流站 1 功率, 换流站 3 的功率逐渐降低。当换流站 3 的直流电流降至  $0.1 \text{ p.u.}$  后, 切换为直流电流控制模式, 换流站 2 切换为直流电压控制模式。三端系统稳定后, 降低换流站 1 和换流站 3 的功率, 闭锁换流站 3。然后拉开相关多端转换开关进行线路隔离操作, 拉开直流场的相关刀闸进行极隔离操作。

### 3.3 故障极紧急停运

当非故障的两个换流站都为整流站或者逆变站时, 故障极紧急停运将迫使三端系统单极停运。当非故障的两个换流站的模式互斥时, 故障极紧急停运, 三端双极运行方式将转换为三端单双极混合运行方式。

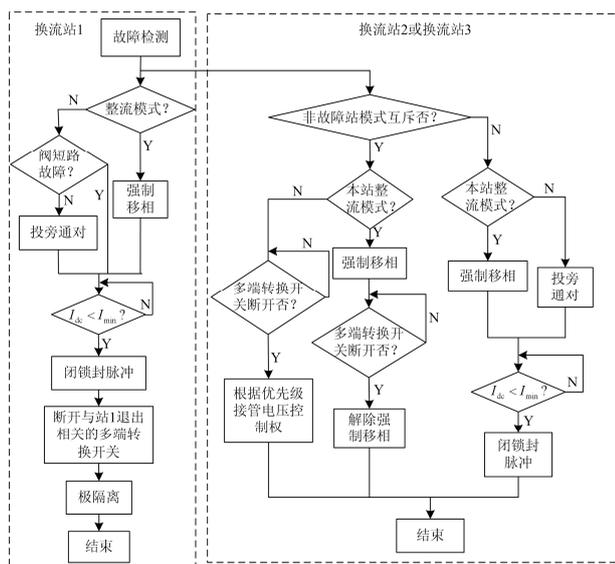


图 5 故障极紧急停运策略

Fig. 5 Fault pole emergency exit strategy

图 5 为换流站 1 单极故障紧急停运策略。保护系统检测到故障后, 若本站为整流模式, 则故障极强制移相; 若为逆变模式, 则除阀短路故障、丢脉冲等故障外, 故障极接收到保护信号后, 投旁通对。当检测到直流电流小于最小限值时, 闭锁换流器。然后, 断开与本站单极退出相对应的多端转换开关, 进行线路隔离和极隔离操作。换流站 2 和换流站 3 通过站间通信接收到换流站 1 的故障紧急退出信号后, 若两站的模式互斥, 则本极故障穿越, 否则, 三端单极停运。在非故障站模式互斥方式下, 如果本站为整流模式, 则强制移相。当检测到故障极退

出的多端转换开关的分位信号时, 解除强制移相。如果本站为逆变模式, 则根据预设的电压控制优先级, 确定是否接管系统电压控制权。

## 4 保护系统配置

图 6 为并联型多端系统的换流站 2 单极关键设备保护分区示意图。1 区为换流阀保护区, 2 区为直流母线保护区, 3 区为中性母线保护区, 4 区为双极保护区, 5 区为多端转换保护区, 6 区为金属回线保护区, 7 区为换流变保护区, 8 区为换流站 2 至换流站 3 的线路保护区, 9 区为换流站 2 至换流站 1 的线路保护区。相对于传统的直流保护区, 本文的直流母线保护需要适应极性转换的需求, 线路保护和多端转换保护需要适应多端运行需求。换流站 1 和换流站 3 保护与传统直流差别不大。

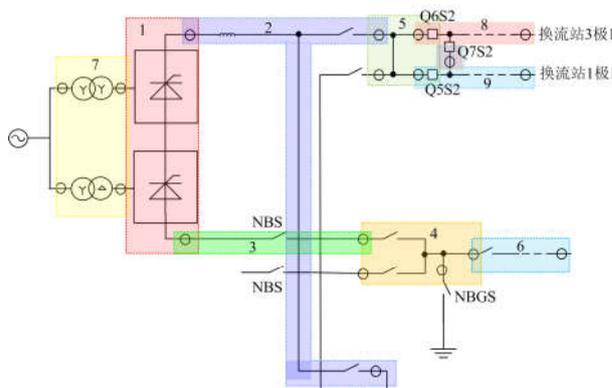


图 6 换流站 2 关键设备保护分区示意图

Fig. 6 Protection zone for key equipment of converter station 2

相对于两端 LCC 直流输电系统而言, 并联型多端直流系统的故障处理方法更加复杂。直流母线区保护范围为直连母线和跨极性连接线, 配置直流母线差动保护。多端转换保护区范围为极性转换开关与多端转换开关之间的区域, 配置多端转换差动保护功能。直流母线差动保护或多端转换差动保护动作将依据运行方式判定系统是否停运, 如果非故障站继续运行, 则断开 Q5S2(或 Q8S2)和 Q6S2(或 Q9S2), 非故障整流站强制移相, 故障隔离后重启。多端转换差动保护动作将禁用对极极性转换功能。线路保护配置行波保护、电压突变量保护和线路纵差保护等功能。若换流站 2 至换流站 3 线路发生永久故障, 保护动作后, 将依据运行方式判定系统是否停运, 如果非故障站继续运行, 则断开 Q6S2(或 Q9S2)和 Q7S2(或 Q10S2)隔离故障线路, 非故障换流站重启。若换流站 2 至换流站 1 线路发生永久故障, 保护动作后, 将依据运行方式判定系统是否停

运,如果非故障站继续运行,则断开 Q5S2(或 Q8S2)和 Q7S2(或 Q10S2)隔离故障线路,非故障换流站重启。

### 5 通信系统配置

并联型多端直流输电系统的极性转换、换流站投退、功率协调控制、电流裕度控制、故障协调处理等功能都依赖通信实现站间指令交换。

图 7 为多端系统通信示意图,由于需要适用三端运行方式和两端运行方式,因此每两个换流站之间都需要有通信通道。为了提高通信可靠性,除了采用三重化冗余通信通道外,还可以使用通信环网方案,即发一路直通信号,同时发一路转站信号。换流站极控系统使用高速通信交换闭锁信号、电流指令等对延时要求较高信号。保护系统使用高速通信交换电流纵差的测量值等信号。站控系统使用低速通信交换功率指令、换流站模式等延时要求较低的信号。

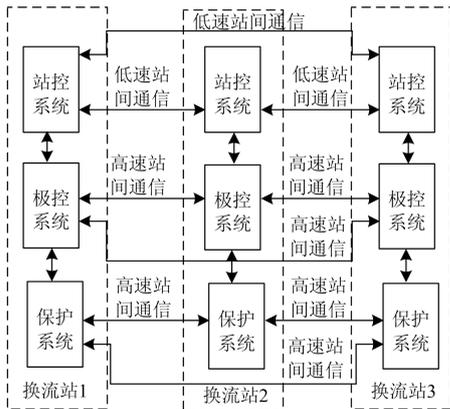


图 7 多端系统通信示意图

Fig. 7 Communication for multi-terminal HVDC transmission system

### 6 仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 中搭建图 1 所示的三端并联型直流输电模型。该多端系统直流电压为 ±500 kV,换流站 1 容量为 3 000 MW,换流站 2 容量为 1 500 MW,换流站 3 容量为 3 000 MW。换流站 1 与换流站 2 间线路长 574 km,换流站 2 与换流站 3 间线路长 634 km。

#### 6.1 极性转换实验

图 8 为换流站 1 极性转换实验波形(即图 2 中模式 3 转换为模式 4),图中带有“▷”标记的曲线为极 2 波形,无标记的曲线为极 1 波形。初始工况:换流站 1 运行在整流模式,直流电压为 ±500 kV,直流功率为 1 500 MW,极 1、极 2 的电流分别为

1.5 kA 和 -1.5 kA。换流站 2 运行在整流模式,直流功率为 1 500 MW,极 1、极 2 的电流分别为 1.5 kA 和 -1.5 kA。换流站 3 运行在逆变模式,直流功率为 3 000 MW,极 1、极 2 的电流分别为 3 kA 和 -3 kA,换流站 3 控制系统电压。 $T=5$  s 时刻,换流站 1 开始降功率, $T=5.8$  s 时刻,闭锁换流站 1 双极换流器。 $T=6.5$  s 时刻,拉开多端转换开关,换流站 1 与换流站 2 之间的线路电压开始缓慢下降。 $T=10$  s 时刻,倒换极性转换开关,此时由于拉开了多端转换开关,没有出现电流冲击。 $T=11.5$  s 时刻,闭合多端转换开关,换流站 2 给线路充电,造成了暂态过压冲击。 $T=12$  s 时刻,设置换流站 1 为逆变模式,设定换流站 1 和换流站 3 的功率都为 750 MW,解锁换流站 1 双极换流器,系统平稳运行至新的功率水平。换流站 1 极性转换过程中,换流站 2 和换流站 3 平稳运行,未出现功率中断。

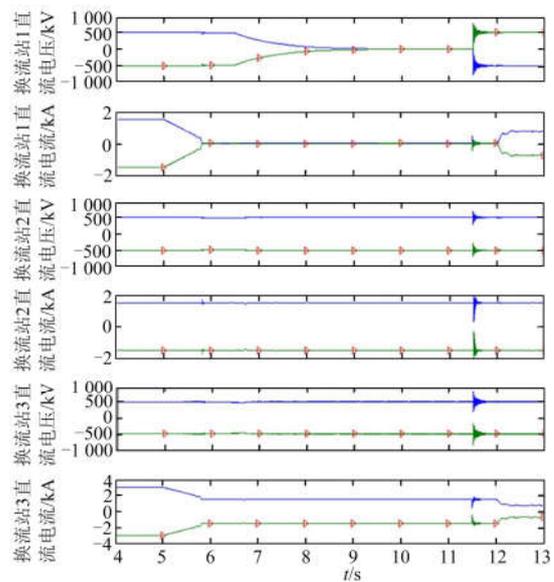


图 8 极性转换波形

Fig. 8 Wave of pole conversion

#### 6.2 电压控制站投入实验

图 9 为换流站 3(电压控制站)投入实验波形(即图 2 中模式 7 转换为模式 2)。初始工况为:换流站 1 运行在整流模式,直流电压为 ±500 kV,直流功率为 1 500 MW,直流电流为 1.5 kA。换流站 2 运行在逆变模式,直流功率为 1 500 MW,直流电流为 1.5 kA,换流站 2 控制系统电压。换流站 3 处于隔离状态。完成换流站 3 直流极连接操作后, $T=5$  s 时刻,闭合多端转换开关,完成换流站 3 线路连接。线路连接时,存在暂态充电过压过流。 $T=6$  s 时刻,设置换流站 3 为逆变模式,以功率/电流控制模式解

锁, 直流电流为 300 A, 同时换流站 1 直流电流升为 1.8 kA。T=6.5 s 时刻, 换流站 2 切换为电流控制模式, 经过站间通信延时后, 换流站 3 切换为电压控制模式。控制模式切换完成后, 增大换流站 1 功率, 换流站 1 电流增大至 3 kA, 换流站 3 增大至 1.5 kA, 换流站 2 保持为 1.5 kA。

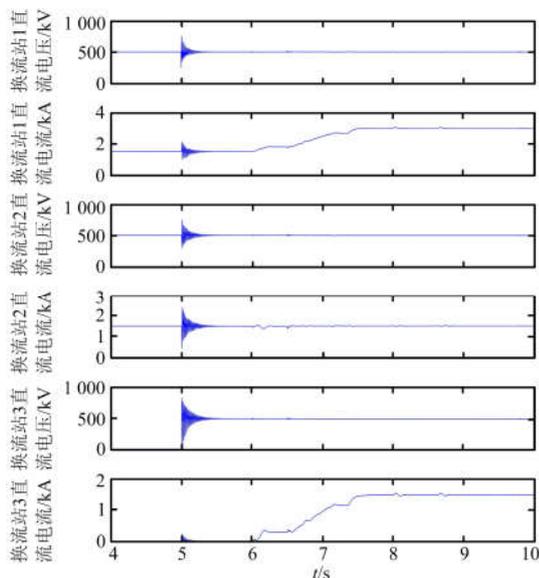


图 9 电压控制站投入波形

Fig. 9 Wave of DC voltage controlling station input

### 6.3 电压控制站退出实验

图 10 为换流站 3(电压控制站)退出实验波形(即图 2 中模式 2 转换为模式 7)。初始工况为: 换流站 1 运行在整流模式, 直流电压为  $\pm 500$  kV, 直流功率为 1 500 MW, 极 1、极 2 的电流分别为 1.5 kA 和 -1.5 kA。换流站 2 运行在整流模式, 直流功率为 1 500 MW, 极 1、极 2 的电流分别为 1.5 kA 和 -1.5 kA。换流站 3 运行在逆变模式, 直流功率为 3 000 MW, 极 1、极 2 的电流分别为 3 kA 和 -3 kA, 换流站 3 控制系统电压。T=5 s 时刻, 降低换流站 1 的直流功率至 1 800 MW, 此时换流站 1、换流站 2 和换流站 3 的直流电流分别为 1.8 kA、1.5 kA 和 0.3 kA。将换流站 3 切换为电流控制模式, 经过站间通信延时后, 换流站 2 切换为电压控制模式, 控制模式切换过程中, 系统稳定运行。控制模式切换完成后, 降低换流站 1 和换流站 3 的功率至 1 500 MW 和 0, 此时换流站 1 的直流电流为 1.5 kA, 换流站 3 的直流电流约为 0。然后闭锁换流站 3, 拉开多端转换开关进行线路隔离, 换流站 3 的直流电压逐渐衰减。电压控制站退出过程中, 换流站 1 和换流站 2 都能稳定运行, 没有造成电压电流冲击。

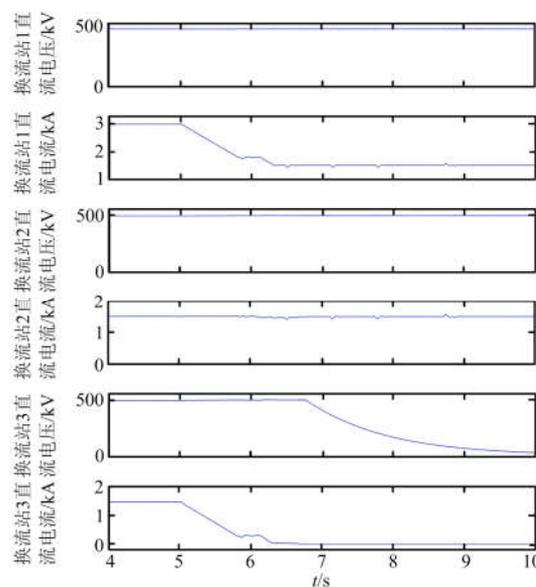


图 10 电压控制站退出波形

Fig. 10 Wave of DC voltage controlling station output

### 6.4 故障极紧急停运实验

图 11 为三端双极运行, 换流站 1 极 1 的极母线接地故障导致极 1 紧急退出。图中带有“>”标记的曲线为极 2 波形, 无标记的曲线为极 1 波形。初始工况为: 换流站 1 运行在整流模式, 直流电压为  $\pm 500$  kV, 直流功率为 1 500 MW, 极 1、极 2 的电流分别为 1.5 kA 和 -1.5 kA。换流站 2 运行在整流模式, 直流功率为 1 500 MW, 极 1、极 2 的电流分别为 1.5 kA 和 -1.5 kA。换流站 3 运行在逆变模式, 直流功率为 3 000 MW, 极 1、极 2 的电流分别为 3 kA 和 -3 kA, 换流站 3 控制系统电压。T=5 s 时刻, 换流站 1 的极 1 发生极母线接地故障, 换流站 1 和换流站 2 提供故障电流, 因此换流站 1 和换流站 2 的直流电流增大。换流站 1 极母线差动保护出口, 极 1 强制移相。换流站 2 接收到换流站 1 的保护信号后, 强制移相。当换流站 1 直流电流小于最小限值时, 闭锁极 1 换流器, 然后断开对应的多端转换开关。换流站 3 极 1 接收到多端转换开关的分位状态后, 极 1 控制的电压由换流站 1 极 1 端口切换为换流站 2 极 1 端口, 换流站 2 极 1 解除强制移相。三端双极运行方式转换为三端单双极混合运行方式, 换流站 1 变为单极运行, 输送功率为 750 MW, 极 2 电流为 1.5 kA。换流站 2 为双极运行, 输送功率为 1 500 MW, 双极电流都为 1.5 kA。换流站 3 为双极运行, 吸收功率为 2 250 MW, 其中, 极 1 吸收的功率为 750 MW, 极 2 吸收的功率为 1 500 MW, 极 1 电流为 1.5 kA, 极 2 电流为 3 kA。

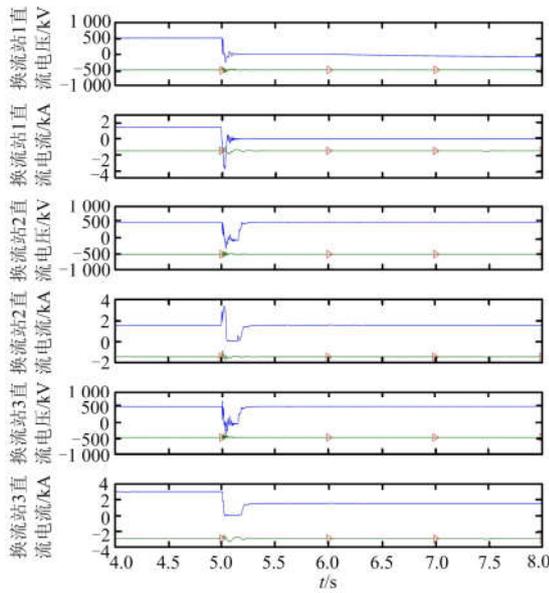


图 11 故障极紧急退出波形

Fig. 11 Wave of fault pole emergency exit

### 7 结论

本文提出了一种运行方式灵活的并联型多端直流输电系统接线方案，分析了运行方式转换策略，提出了极性转换、电压控制站投退、故障极紧急停运策略。本文的仿真实验为典型的运行方式转换实验，许多运行方式转换的控制顺序相似或者更简单，不再详述。根据仿真结果可以得出以下结论。

(1) 本文提出的接线方案和控制顺序可以实现任一个换流站进行极性转换，剩余的两个换流站功率不中断，从而提高多端直流输电系统的稳定性。

(2) 本文提出的接线方案和控制顺序可以实现多端直流输电系统电压控制站投入和退出或者电压控制点转移，系统都能平稳进入新的平衡状态。

(3) 本文提出的故障极紧急停运策略可以有效隔离故障设备，保证设备安全，并快速恢复多端系统运行。

### 参考文献

[1] 张文亮, 汤涌, 曾南超. 多端高压直流输电技术及应用前景[J]. 电网技术, 2010, 34(9): 1-6.  
ZHANG Wenliang, TANG Yong, ZENG Nanchao. Multi-terminal HVDC transmission technologies and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 1-6.

[2] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.  
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-

terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.

[3] YI Xiaoran, YANG Fenyan, FU Xiazhou, et al. Principle and algorithm of reactive power management for LCC-based parallel MTDC transmission system[C] // 2014 International Conference on Power System Technology, October 20-22, 2014, Chengdu, China: 2265-2271.

[4] 徐殿国, 刘瑜超, 武健. 多端直流输电系统控制研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 1-12.  
XU Dianguo, LIU Yuchao, WU Jian. Review on control strategies of multi-terminal direct current transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 1-12.

[5] HAMMER S, HAHN C, LUTHER M. Analytical derivation of controller parameters for series connected LCC multiterminal HVDC systems through the use of a decoupling filter[C] // 2017 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), April 23-26, 2017, Washington, DC, USA: 1-5.

[6] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.  
LIANG Xuming, ZHANG Ping, CHANG Yong. Recent advances in high-voltage direct current power transmission and its developing potential[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 1-9.

[7] 杨堤, 程浩忠, 姚良忠, 等. 多端直流输电接入下的交直流混联系统电压稳定性研究综述[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2201-2209.  
YANG Di, CHENG Haozhong, YAO Liangzhong, et al. Research review on AC/DC hybrid system with multi-terminal HVDC[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 2201-2209.

[8] 杨柳, 黎小林, 许树楷, 等. 南澳多端柔性直流输电示范工程系统集成设计方案[J]. 南方电网技术, 2015, 9(1): 63-67.  
YANG Liu, LI Xiaolin, XU Shukai, et al. The integrated system design scheme of Nan'ao VSC-MTDC demonstration project[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 63-67.

[9] 凌卫家, 孙维真, 张静, 等. 舟山多端柔性直流输电示范工程典型运行方式分析[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1751-1758.  
LING Weijia, SUN Weizhen, ZHANG Jing, et al. Analysis of typical operating modes of Zhoushan multi-terminal

- VSC-HVDC pilot project[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1751-1758.
- [10] 孙晓云, 高鑫, 刘延华. 柔性直流输电换流器故障特性分析及诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 75-84.  
SUN Xiaoyun, GAO Xin, LIU Yanhua. VSC fault characteristic analysis and diagnosis research of VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 75-84.
- [11] 付艳, 黄金海, 吴庆范, 等. 基于 MMC 多端柔性直流输电保护关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 133-139.  
FU Yan, HUANG Jinhai, WU Qingfan, et al. Key technologies research based on multi-terminal MMC-HVDC protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 133-139.
- [12] 徐进, 金逸, 胡从川, 等. 适用于海上风电并网的多端柔性直流系统自适应下垂控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 78-85.  
XU Jin, JIN Yi, HU Congchuan, et al. DC voltage adaptive droop control of multi-terminal VSC-HVDC system for offshore wind farms integration[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 78-85.
- [13] 吴杰, 王志新. 多端柔性直流输电系统的改进下垂控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 241-250.  
WU Jie, WANG Zhixin. Improved droop control strategy for multi-terminal voltage source converter-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 241-250.
- [14] 肖晃庆, 徐政, 薛英林, 等. 多端柔性直流输电系统的启动控制策略[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2550-2557.  
XIAO Huangqing, XU Zheng, XUE Yinglin, et al. Start control strategy of MMC-MTDC system[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2550-2557.
- [15] 张立奎, 张英敏. 混合多端直流输电系统附加控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 128-133.  
ZHANG Likui, ZHANG Yingmin. Design of additional controller for hybrid multi-terminal DC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 128-133.
- [16] 李少华, 王秀丽, 彭忠, 等. LCC 型双端直流中引出并联 FB-MMC 功率分支站的混合型多端直流输电系统[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2796-2802.
- LI Shaohua, WANG Xiuli, PENG Zhong, et al. Hybrid multi-terminal integration of parallel FB-MMC tapping station into LCC-HVDC transmission link[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2796-2802.
- [17] 雷霄, 王华伟, 曾南超, 等. 并联型多端高压直流输电系统的控制与保护策略及仿真[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 244-249.  
LEI Xiao, WANG Huawei, ZENG Nanchao, et al. Control and protection strategies for parallel multi-terminal HVDC power transmission system and their simulation[J]. Power System Technology, 2012, 36(2): 244-249.
- [18] 胡铭, 傅闯, 王俊生, 等. 并联型四端直流输电系统实时数字仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 87-92.  
HU Ming, FU Chuang, WANG Junsheng, et al. Analysis on a parallel four-terminal HVDC transmission system based on real time digital simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 87-92.
- [19] 徐政, 胡永瑞, 傅闯. 并联型多端直流输电系统的控制策略与故障特征[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2721-2729.  
XU Zheng, HU Yongrui, FU Chuang. Control strategy and fault characteristics of parallel MTDC transmission systems[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2721-2729.
- [20] 王俊生, 傅闯, 胡铭, 等. 并联型多端直流输电金属回线运行方式[J]. 南方电网技术, 2009, 6(5): 22-26.  
WANG Junsheng, FU Chuang, HU Ming, et al. Metallic return modes in parallel type multi-terminal HVDC transmission[J]. Southern Power System Technology, 2009, 6(5): 22-26.

收稿日期: 2018-09-24; 修回日期: 2018-11-19

作者简介:

彭忠(1986—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为直流输配电控制保护; E-mail: pengzhong-2010@163.com

魏金科(1981—), 男, 本科, 讲师, 研究方向为电气工程。E-mail: 284935054@qq.com

(编辑 许威)