

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210206

# 适用于特高压多端混合直流输电系统的稳态电压控制方法

俞翔<sup>1</sup>, 鲁江<sup>1</sup>, 董云龙<sup>1</sup>, 张庆武<sup>1</sup>, 甘宗跃<sup>2</sup>, 王杨正<sup>1</sup>

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102; 2. 中国南方电网有限责任公司  
超高压输电公司, 广东 广州 510663)

**摘要:** 特高压多端混合直流输电系统稳态运行时, 定直流电压站的控制目标是维持首端整流站的端口电压为设定值。当首端整流站不是定直流电压站时, 则需考虑线路压降带来的影响, 而此时传统的电压偏差控制和下垂控制无法实现对电压和功率的无差控制。因此基于主从控制思想, 提出了一种适用于特高压多端混合直流输电系统的稳态电压控制方法。基于当前直流系统的接线方式、线路电阻和电流, 计算出定直流电压站和首端整流站之间的压降。然后对定直流电压站的电压参考值进行修正, 从而实现对首端整流站电压的精确控制。在此基础上, 针对线路电阻变化或者未知的情况, 又提出了一种自适应的稳态电压控制方法。最后利用实时数字仿真仪(RTDS)搭建了三端直流系统仿真模型, 仿真结果验证了所提方法的正确性和有效性。

**关键词:** 特高压直流; 多端混合直流输电系统; 稳态电压控制; 主从控制; 线路压降; 自适应

## A steady-state voltage control method for a multi-terminal hybrid UHVDC transmission system

YU Xiang<sup>1</sup>, LU Jiang<sup>1</sup>, DONG Yunlong<sup>1</sup>, ZHANG Qingwu<sup>1</sup>, GAN Zongyue<sup>2</sup>, WANG Yangzheng<sup>1</sup>

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 2. EHV Power Transmission Company,  
China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** In multi-terminal hybrid UHVDC transmission system, one task of the DC voltage station is to maintain the DC voltage of the head-end rectifier station at its set value. Line drop must be taken into account if the head-end rectifier station is not the DC voltage station and in such a case the traditional voltage margin control method and droop control method fail to achieve static error free control of the power and voltage. Based on the idea of a master-slave control method, this paper proposes a steady-state voltage control method for a multi-terminal hybrid UHVDC transmission system. First, the voltage drop between the DC voltage station and the head rectifier station is calculated based on system topology, line resistance and current. Then the control reference of the DC voltage station is modified to achieve precise voltage control of the head-end rectifier station. In addition, an adaptive method is proposed for the case where the line resistance is changing or totally unknown. Finally, a simulation model of three-terminal DC system using the real time digital simulator (RTDS) is built and simulation results demonstrate the correctness and validity of the proposed method.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900602).

**Key words:** UHVDC; multi-terminal hybrid DC transmission system; steady-state voltage control; master-slave control; line drop; adaptive

## 0 引言

随着基于全控型电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)的柔性直流输电技术及相应电力电子器件的不断成熟, VSC 和基于电网换相换流器(Line Commutated Converter, LCC)的常规直流在特高压等级下的互联成为可能<sup>[1]</sup>。在送端采用 LCC,

若干个受端采用 VSC 的特高压多端混合直流输电在我国大容量、远距离输电领域具有很好的应用前景。通过结合 LCC 和 VSC 的技术优点, 特高压多端混合直流输电技术可以有效避免换相失败问题, 缓解多直流馈入电网的稳定性问题, 同时可以灵活匹配不同外送和消纳能力的送端和受端, 节省输电线路走廊以及减少投资<sup>[2-10]</sup>。

对于多端直流输电系统, 直流电压的稳定决定了直流系统潮流的稳定, 因此直流电压的协调控制

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900602)

一直是多端直流输电技术的核心之一。目前已提出的直流电压控制方法主要有三种：主从控制方法、直流电压裕度控制方法以及直流电压下垂控制方法<sup>[11-17]</sup>。主从控制方法依赖站间通信，控制策略简单清晰，电压站切换过程平滑过渡。相较于主从控制方法，直流电压裕度控制方法以及直流电压下垂控制方法的优势是不依赖站间通信，但是直流电压裕度控制方法有切换过程中冲击较大且电压裕度随端数增多后难以选取等缺点，而直流电压下垂控制方法也有无法实现有功和电压的精准控制等缺点。文献[18-20]提出结合直流电压裕度控制和直流电压下垂控制的混合控制方法，在控制器合理的配置下可以弥补上述方法各自的缺点。

特高压多端混合直流输电在应用于大容量、远距离输电时，一般不选取送端 LCC 站作为定直流电压站，因为在暂态过程中作为定直流电压站的 LCC 站难以跟上 VSC 站的调节速度，可能导致直流电压和功率较大波动，因此一般定直流电压站在受端站中选取。而定直流电压站的控制目标是维持首端整流站的直流电压恒定，这时线路压降将会给直流电压的精准控制产生影响，这是传统的电压控制方法往往会忽略的重要因素。文献[21]提出了一种适用于多端高压直流系统的精准电压裕度方法，在设置电压裕度时考虑了线路压降的影响。文献[22]提出了一种考虑线路压降的电压下垂控制方法。但是以上方法并不能满足特高压多端混合直流对电压和功率的精准控制要求。

基于此，本文基于主从控制方法思想，提出了一种适用于特高压多端混合直流输电系统的稳态电压控制方法：基于当前直流的接线方式、线路电阻和电流，计算出定直流电压站和首端整流站之间的压降，然后对定直流电压站的电压参考值进行修正，从而实现对首端整流站电压的精确控制，在此基础上，针对线路电阻未知或者变化的情况，又提出了一种自适应的稳态电压控制方法。最后以乌东德电站送电广东广西特高压多端直流示范工程(以下简称乌东德工程)为参照对象，通过实时数字仿真仪(Real Time Digital Simulator, RTDS)搭建了工程仿真系统，验证了该策略在工程中的应用价值，目前该策略也已实际应用于乌东德工程中。

## 1 特高压多端混合直流输电系统直流电压控制特点

### 1.1 特高压多端混合直流输电系统结构

多端直流输电系统按接线方式划分为并联型、

串联型和混合型，其中并联型因其在调节范围、绝缘配合、运行方式和扩建灵活性上的优势，成为工程实践中最为常见的多端直流输电接线方式。以图 1 所示的并联型三端乌东德工程的主接线图分析，每个换流站均采用常规特高压直流的接线方式，即双极对称的接线方式，每个极由高压换流器和低压换流器串联形成，其中首端整流站换流器采用基于晶闸管技术的双十二脉动换流器，而两个逆变站换流器采用的是全桥与半桥混合的模块化多电平换流器，三个换流站通过直流架空线和汇流母线形成并联<sup>[1,23]</sup>。

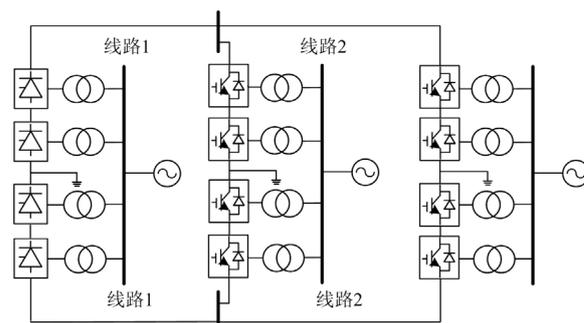


图 1 特高压混合三端直流输电系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hybrid three-terminal UHVDC transmission system

### 1.2 直流电压控制特点

与传统多端直流输电的电压控制原则相同，特高压多端混合直流输电系统的电压控制也是为了维持直流系统的电压稳定，从而维持直流系统潮流的稳定。但由于特高压多端混合直流输电自身的一些特点，也使得其稳态电压控制方法与传统方法有一定区别，具体为：

1) 控制目标的差别。在特高压多端混合直流正常运行时，由上文可知，由于控制性能的原因，定直流电压站往往选择容量较大的柔直逆变站。为了保证整流站送出的直流功率稳定且严格运行在设计要求的合理范围内，定直流电压站的控制目标不是将自身的端口电压控制为设定值，而是将整流站的端口电压控制为设定值。由于线路电阻的影响无法忽略，因此定直流电压站需要根据线路压降对电压参考值进行修正。

2) 充分利用站间通信。与常规特高压两端直流相同，特高压多端混合直流输电系统也配备有非常完善的站间通信通道，在此基础上，还可以形成站间通信环网，当某两站的站间通信失去时，可以通过其他换流站形成迂回通道，从而继续保持通信。根据以往工程经验，特高压直流工程极少出现站间

通信中断的情况,因此在正常运行时直流电压控制可以充分利用站间通信,结合各传统直流电压控制方法的特点可见,主从控制方法适合作为特高压多端混合直流输电系统的常规电压控制方法,而不依赖站间通信的直流电压裕度控制和直流电压下垂控制并不适合作为直流电压调节的常规手段,仅适合作为异常工况或暂态过程中的后备调节手段。

3) 接线方式的影响。特高压直流正常运行时有两种接线方式:大地回线和金属回线,对于特高压多端混合直流输电系统,两两相邻的换流站直接可通过大地回线连接,也可以通过金属回线连接,线路压降会随着接线方式的改变而改变,从而对直流电压的控制产生影响。

## 2 特高压多端混合直流输电系统稳态电压控制方法

### 2.1 稳态电压控制基本思想

首先,特高压多端直流采用的是真双极的接线方式,两个极的电压可以独立控制,并且采用的电压控制方法相同,因此针对电压控制方法只需研究一个极即可,下文中的研究对象均为单极,不再赘述。对于每个极来说,稳态电压控制的目标是将首端整流站本极换流器直流侧端口电压控制为设定的参考值  $U_{ref}$ ,因此,直流电压站的电压参考值  $U_{ref}^*$  可表示为

$$U_{ref}^* = U_{ref} - U_{drop} \quad (1)$$

式中,  $U_{drop}$  为本极首端整流站到定直流电压站之间的总压降。

对于并联型多端直流输电系统,各个换流站通过并联的方式连接在一起,首端整流站和定直流电压站也包含在其中。图2为首端整流站和定直流电压站的单极连接示意图,图中所示的网络拓扑可视为并联型直流电网中的一个子网络,其中第一个换流站为首端整流站,第  $n$  个换流站为定直流电压站,它们之间经过的  $n-2$  个换流站,可称为中间换流站。

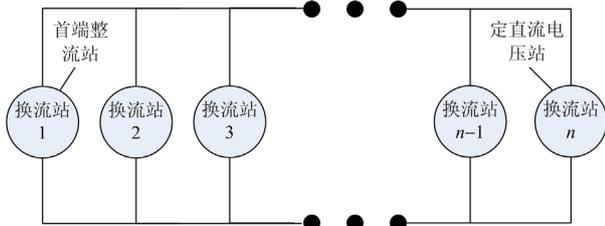


图2 首端整流站和定直流电压站的连接示意图(单极)

Fig. 2 Schematic diagram of interconnection between headend rectifier station and DC voltage control station (mono-pole)

由图2可知,我们通过计算两两相邻换流站之间的压降,再求和,就可得到首端整流站和定直流电压站之间的总压降,即

$$U_{drop} = \sum_{r=1}^{n-1} \Delta U_r \quad (2)$$

式中:  $\Delta U_r$  表示第  $r$  个换流站到第  $r+1$  个换流站之间的压降。

### 2.2 换流站间压降的计算方法

由2.1小节可知,为计算首端整流站和定直流电压站之间的总压降,需计算相邻换流站之间的压降  $\Delta U_r$ ,  $\Delta U_r$  计算方式随着两站之间接线方式的变化而变化。如图3所示,换流站之间的连接方式有大地回线和金属回线两种。在大地回线接线方式中,两个换流站通过直流线路、接地极线路、接地极以及大地形成回路。在金属回线接线方式中,两个换流站通过本极直流线路和金属回线(特高压中一般用对极直流线路)形成回路。需要注意的是,图3中金属回线中的接地起到钳制电位的作用,在多个换流站通过金属回线方式并联时,仅需在其中一个站接地即可。

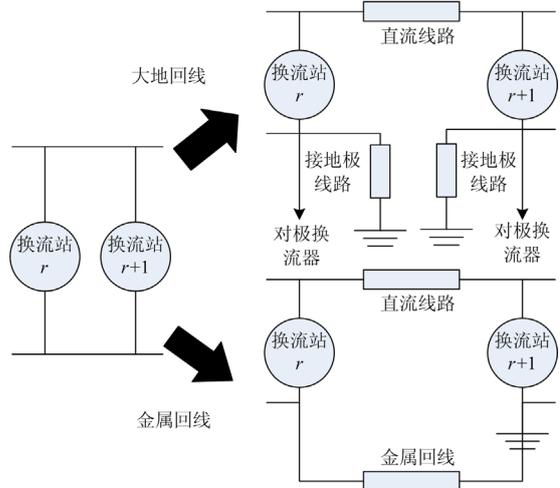


图3 大地回线与金属回线方式

Fig. 3 Ground return mode and metallic return mode

对于大地回线,两站之间压降的计算方式为

$$\Delta U_r = I_{line,r} R_{line,r} + I_{electrode,r} R_{electrode,r} + I_{electrode,r+1} R_{electrode,r+1} \quad (3)$$

式中:  $I_{line,r}$  为第  $r$  条直流线路上的直流电流;  $R_{line,r}$  为第  $r$  条直流线路的电阻值;  $I_{electrode,r}$  为第  $r$  个站接地极线路上的电流;  $R_{electrode,r}$  为第  $r$  个站接地极线路和接地极电阻之和;  $I_{electrode,r+1}$  为第  $r+1$  个站接地极线路上的电流;  $R_{electrode,r+1}$  为第  $r+1$  个站接地极线路和接地极电阻之和。

对于金属回线, 两站之间压降的计算方式为

$$\Delta U_r = I_{\text{line},r} R_{\text{line},r} + I_{\text{metal},r} R_{\text{metal},r} \quad (4)$$

式中:  $I_{\text{metal},r}$  为第  $r$  条金属回线上的直流电流;  $R_{\text{metal},r}$  为第  $r$  条金属回线的电阻。在特高压直流工程中, 一般利用对极的直流线路作为金属回线, 且对极此时不运行, 故  $I_{\text{metal}} = I_{\text{line}}$ , 故式(4)可化简为

$$\Delta U_r = I_{\text{line},r} (R_{\text{line},r} + R_{\text{metal},r}) \quad (5)$$

按以上方法求出相邻两站之间的压降, 再结合式(1)和式(2), 即可得到定直流电压站的电压参考值。

### 2.3 换流站间压降的计算方法

在首端整流站和定直流电压站均处于大地回线接线方式的情况下, 如图4所示, 还可以对2.2小节所述的一般方法进行简化。

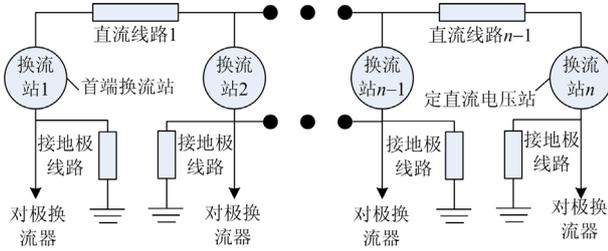


图4 首端整流站和定直流电压站均处于大地回线

Fig. 4 Head-end rectifier station and DC voltage control station both in ground return mode

由图4可以看出, 定直流电压站和首端整流站之间的压降为  $n-1$  条直流线路上的压降以及两站自身接地极压降之和, 因此可以对压降计算进行简化, 如式(6)所示。

$$U_{\text{drop}} = \sum_{r=1}^{r=n-1} I_{\text{line},r} R_{\text{line},r} + I_{\text{electrode},1} R_{\text{electrode},1} + I_{\text{electrode},n} R_{\text{electrode},n} \quad (6)$$

式中:  $I_{\text{electrode},1}$  和  $R_{\text{electrode},1}$  分别为首端整流站接地极电流和总电阻(包含接地极线路和接地极);  $I_{\text{electrode},n}$  和  $R_{\text{electrode},n}$  分别为定直流电压站接地极电流和总电阻(包含接地极线路和接地极)。

简化后的压降计算无需关注中间换流站的接地极压降或金属回线压降, 从而减少了需要用站间通信传递的信号, 降低了对站间通信通道的压力。

### 2.4 自适应直流电阻变化的稳态电压控制方法

前文所述的压降计算方法中, 用到的直流线路以及接地极的直流电阻值可选用系统成套设计给出的常温下的设计值, 是一个固定值。然而受直流电流的增大或者外部环境温度的影响, 导线的电阻值也随着导线温度发生一定程度的变化, 从而导致压

降计算出现一定的误差。另外, 在某些情况下, 可能并不知道导线具体的电阻值, 仅仅知道一个大概的范围。为了保证稳态电压控制的精度, 需要对直流电阻进行实时计算, 从而使电压控制可以适应直流电阻的变化。

对于直流线路电阻, 计算方法为

$$R_{\text{line},r} = \max[R_{\text{line},r}^{\min}, \min(R_{\text{line},r}^{\max}, \frac{U_{\text{line},r} - U_{\text{line},r+1}}{I_{\text{line},r}})] \quad (7)$$

式中:  $U_{\text{line},r}$  和  $U_{\text{line},r+1}$  分别为第  $r$  条线路两端的直流电压测量值, 其测点位置位于第  $r$  个和第  $r+1$  个换流站内;  $R_{\text{line},r}^{\min}$  和  $R_{\text{line},r}^{\max}$  为第  $r$  条线路直流电阻在不同环境温度下的最小值和最大值。

对于接地极总电阻(包含接地极线路和接地极), 计算方法为

$$R_{\text{electrode},r} = \max[R_{\text{electrode},r}^{\min}, \min(R_{\text{electrode},r}^{\max}, \frac{U_{\text{electrode},r}}{I_{\text{line},r}})] \quad (8)$$

式中:  $U_{\text{electrode},r}$  为第  $r$  个换流站接地极压降, 其测点位置位于极中性母线上;  $R_{\text{electrode},r}^{\min}$  和  $R_{\text{electrode},r}^{\max}$  分别为第  $r$  个站接地极总电阻在不同环境温度下的最小值和最大值。

将式(7)和式(8)计算出的电阻值代入前文所述的压降计算方法, 综合即可得到可以自适应直流电阻变化的稳态电压控制方法。可以看到, 该方法可以实时计算线路电阻, 由此得到的线路压降也更为精确, 但计算量更大, 且对测点信息的要求也更高, 因此该方法可与采取固定电阻值的方法进行结合。例如, 当直流电流较小或者常温时, 实际电阻偏差较小, 可采用固定电阻法, 当直流电流较大或环境温度较高时, 采用自适应电阻法。

## 3 仿真分析

### 3.1 仿真系统分析

为了验证上述控制策略的可行性和有效性, 基于乌东德工程, 在 RTDS 仿真平台上搭建了如图1所示特高压并联型三端混合直流输电系统, 首端整流站 LCC 采用定电流控制, 中间换流站 VSC1 采用定有功功率和定无功功率控制, 末端换流站 VSC2 采用定直流电压和定无功功率控制, 直流线路采用相域频变模型, 线路1总长度为 904 km, 常温下直流电阻为 3.738 2  $\Omega$ , 线路2总长度为 547 km, 常温下直流电阻为 3.745 5  $\Omega$ , 其他关于三端仿真系统的主要参数见表1所示。

### 3.2 仿真结果分析

1) 工况1: 稳态运行及功率提升

为验证稳态工况下的电压控制的精确程度,分别在单极大地回线和金属回线方式下,使用固定电阻法和自适应电阻法,在直流运行在 0.1 p.u.、0.5 p.u.和 1.0 p.u.功率水平下,测得首端整流站(LCC 站)的直流电压,如表 2 和表 3 所示。

表 1 仿真系统主要参数

Table 1 Main parameters of the simulation system

系统参数	额定直流电压/kV	额定功率/MW	变压器变比 kV/kV	平波电抗器电感值/mH	桥臂电抗器电感值/mH
LCC	± 800	8 000	525/172.3	300	
VSC1	± 800	3 000	525/244	300	55
VSC2	± 800	5 000	525/220	150	40

系统参数	子模块额定电压/V	子模块电容/mF	各阀组内子模块数(含冗余)/个	半桥模块占比/%	接地极线路及接地极电阻/ $\Omega$
LCC					0.598 9
VSC1	2 100	18	216	30	2.637 3
VSC2	2 100	12	216	30	2.295 4

表 2 单极大地回线首端整流站直流电压

Table 2 DC voltage of commutator station at head end of unipolar earth loop

算法	0.1 p.u.功率水平	0.5 p.u.功率水平	1.0 p.u.功率水平
	下直流电压/kV	下直流电压/kV	下直流电压/kV
固定电阻法	799.9	800.5	801.0
自适应电阻法	799.9	800.0	800.2

表 3 金属回线首端整流站直流电压

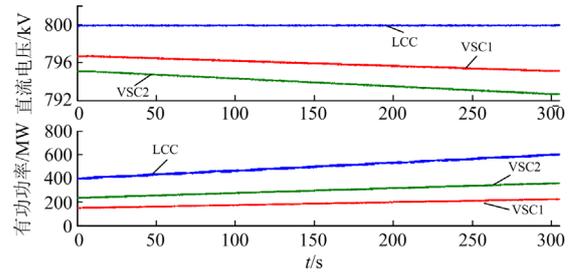
Table 3 DC voltage of rectifier station at the head end of metal loop

算法	0.1 p.u.功率水平	0.5 p.u.功率水平	1.0 p.u.功率水平
	下直流电压/kV	下直流电压/kV	下直流电压/kV
固定电阻法	800.1	801.2	802.8
自适应电阻法	799.7	799.7	800.1

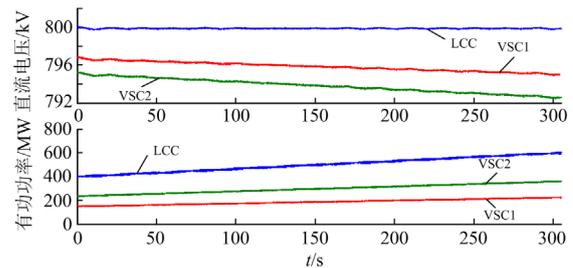
由表 2 和表 3 可以看出,固定电阻法在小功率下控制直流电压精度较高,但是由于预设的电阻值与实际线路电阻一定有所偏差,从而导致计算的线路压降会有偏差,随着直流功率/电流变大,这种偏差也会被逐渐放大,所以大功率水平下固定电阻法的控制误差会略大。而自适应电阻法在不同功率水平下,均可精确地控制直流电压,误差很小。

进一步地,模拟三站同步升功率操作,验证稳态电压控制方法的精度,具体操作为,在单极大地回线方式下,LCC 站控制直流功率按 40 MW/min 的速率从 400 MW 升至 600 MW,同时另一功率站 VSC1 站控制直流功率按 15 MW/min 的速率从 150 MW 升至 225 MW(需要说明的是,本文所述直

流功率均为折算到整流侧发出的直流功率),仿真结果如图 5 所示。



(a) 固定电阻法仿真结果



(b) 自适应电阻法仿真结果

图 5 稳态升功率仿真波形

Fig. 5 Simulation waveforms of power ramp-up

由图 5 可知,随着三站功率逐步增大,线路压降也逐渐增大,定直流电压站 VSC2 按计算得到的电压参考值控制自身的端口电压,VSC2 和定功率站 VSC1 直流电压逐渐下降,保证首端整流站 LCC 直流电压一直精确地维持在 800 kV。

2) 工况 2: 定直流电压站紧急停运(退站)

三站均运行在单极大地回线,且均处于满功率状态,LCC 直流功率为 4 000 MW,VSC1 直流功率为 1 500 MW,VSC2 直流功率为 2 500 MW,模拟定直流电压站 VSC2 紧急停运,电压控制方法采用在大功率水平下更为精确的自适应电阻法,仿真结果如图 6 所示。

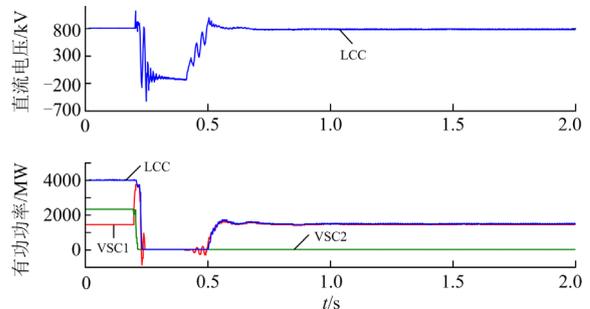


图 6 定直流电压站闭锁波形

Fig. 6 Simulation waveforms of blocking fault at constant DC voltage station

由图 6 可以看出, 在 0.2 s 时 VSC2 发生紧急停运, 闭锁换流器, 直流功率变为 0, 执行故障退站操作, 剩余两站通过移相、临时闭锁等操作协同将直流电流和直流电压降至 0, 从而使 VSC2 可以顺利拉开与汇流母线相连的快速开关, 同时 VSC1 通过站间通信检测到 VSC2 闭锁后自动切换为定直流电压站。需要注意的是, 在此过程中稳态电压控制不起作用。待 VSC2 与汇流母线断开连接后, 剩余两站再恢复直流功率和直流电压, 受 VSC1 最大功率限制, 故障后直流功率变为 1 500 MW。另外, 新的定直流电压站 VSC1 也按本文所述方法恢复直流电压, 可以看到, 故障前和故障后 LCC 的稳态直流电压均可精确维持在 800 kV。

#### 4 结论

在特高压多端混合直流输电系统中, 由于定直流电压站的控制目标是首端整流站, 为实现稳态时对直流电压的精确控制, 需要考虑长距离线路压降带来的影响。本文首先分析了目前最常见特高压多端混合直流的系统结构, 充分利用特高压直流站间通信可靠性高的特点, 基于主从控制思想, 提出了一种适用于特高压多端混合直流输电系统的稳态电压控制方法, 即通过直流系统的接线方式、线路电阻和电流, 实时计算定直流电压站和首端整流站之间的压降, 并定直流电压站的电压参考值进行修正, 从而实现对首端整流站电压的精确控制。进一步地, 考虑到线路电阻存在偏差或者原始数据难以获取等问题, 提出了一种可以实时计算线路电阻的自适应方法。仿真结果表明, 本文所提方法可以有效实现整流站电压的精确控制。本文所述方法也已应用于乌东德电站送电广东广西特高压多端直流示范工程中, 在未来可为后续的多端混合直流工程提供有益的参考。

#### 参考文献

- [1] 曹润彬, 李岩, 许树楷, 等. 特高压混合多端直流线路保护配置与配合研究[J]. 南方电网技术, 2018, 12(11): 52-58.  
CAO Runbin, LI Yan, XU Shukai, et al. Research on configuration and coordination of multi-terminal hybrid UHVDC line protection[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(11): 52-58.
- [2] 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.
- [3] LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. A review of the protection for the multiterminal VSC-HVDC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 239-249.
- [4] 郑安然, 郭春义, 崔鹏, 等. 特高压混合多端直流输电系统中串联换流阀组间的电压平衡控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3408-3414.  
ZHENG Anran, GUO Chunyi, CUI Peng, et al. Voltage balancing control strategy of series-connected converter valve groups in hybrid multi-terminal UHVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3408-3414.
- [5] 刘强, 杜忠明, 佟明东, 等. 特高压多端直流技术的应用及前景分析[J]. 南方电网技术, 2018, 12(11): 9-14.  
LIU Qiang, DU Zhongming, TONG Mingdong, et al. Utilization and prospect analysis of UHV multi-terminal DC technologies[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(11): 9-14.
- [6] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 119-127.  
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method of a hybrid HVDC system based on the coordination of a fault current limiter and a DC circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 119-127.
- [7] 张大海, 杨宇辰, 刘艳梅, 等. 基于 EMD 与 Spearman 相关系数的混合直流线路纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 1-11.  
ZHANG Dahai, YANG Yuchen, LIU Yanmei, et al. Hybrid HVDC line pilot protection method based on EMD and Spearman correlation coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 1-11.
- [8] 王永平, 赵文强, 杨建明, 等. 混合直流输电技术及发展分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 156-167.  
WANG Yongping, ZHAO Wenqiang, YANG Jianming, et al. Hybrid high-voltage direct current transmission technology and its development analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(7): 156-167.
- [9] 张明, 马洲俊, 王勇, 等. 基于换流器  $\pi$  型等效模型的交流混合配电网潮流计算[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 30-37, 45.  
ZHANG Ming, MA Zhoujun, WANG Yong, et al. Power flow calculation of AC/DC hybrid distribution network based on equivalent  $\pi$ -model of converter[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 30-37, 45.

- [10] 张瑞东, 邓卫, 张学, 等. 面向不间断供电的多端交直流混合配电网控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(2): 33-39.  
ZHANG Ruidong, DENG Wei, ZHANG Xue, et al. Control strategy for distribution networks with multi-terminal AC/DC hybrid power under an uninterruptible power supply[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 33-39.
- [11] VRANA T K, BEERTEN J, BELMANS R, et al. A classification of DC node voltage control methods for HVDC grids[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 103(8): 137-144.
- [12] NAKAJIMA T, IROKAWA S. A control system for HVDC transmission by voltage sourced converters[C] // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 18-22, 1999, Edmoton, Canada: 1113-1119.
- [13] SAKAMOTO K, YAJIMA M. Development of a control system for a high-performance self-commutated AC/DC converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(1): 225-232.
- [14] JOHNSON B K, LASSETER R H, ALVARADO F L, et al. Expandable multi-terminal DC systems based on voltage droop[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(4): 1926-1932.
- [15] 吴蒙, 贺之渊, 阎发友, 等. 下垂控制对直流电网动态电压稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 8-15.  
WU Meng, HE Zhiyuan, YAN Fayou, et al. Influence of droop control on the dynamic voltage stability of DC grid analysis[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 8-15.
- [16] HAILESELASSIE T M, UHLEN K. Impact of DC line voltage drops on power flow of MTDC using droop control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1441-1449.
- [17] 刘长富, 张玉龙, 竺炜, 等. 基于 MMC 的多端直流输电系统下垂控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(2): 47-53.  
LIU Changfu, ZHANG Yulong, ZHU Wei, et al. Improved droop control strategy for MMC-MTDC system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(2): 47-53.
- [18] 唐庚, 徐政, 刘昇, 等. 适用于多端柔性直流输电系统的新型直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 125-132.  
TANG Geng, XU Zheng, LIU Sheng, et al. A novel DC voltage control strategy for VSC-MTDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 125-132.
- [19] 刘佳易, 秦文萍, 韩肖清, 等. 交直流双向功率变换器的改进下垂控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 304-310.  
LIU Jiayi, QIN Wenping, HAN Xiaoqing, et al. Control method of interlink-converter in DC microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 304-310.
- [20] 吴金龙, 刘欣和, 王先为, 等. 多端柔性直流输电系统直流电压混合控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1593-1599.  
WU Jinlong, LIU Xinhe, WANG Xianwei, et al. Research of DC voltage hybrid control strategy for VSC-MTDC System[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1593-1599.
- [21] 胡静, 赵成勇, 翟晓萌, 等. 适用于 MMC 多端高压直流系统的精确电压裕度控制[J]. 电力建设, 2013, 34(4): 1-7.  
HU Jing, ZHAO Chengyong, ZHAI Xiaomeng, et al. Precise voltage margin control for modular multilevel converter based multi-terminal HVDC system[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(4): 1-7.
- [22] 董辉, 宋平岗, 周振邦, 等. 考虑线路电压降的 MMC-MTDC 下垂补偿控制[J]. 电力建设, 2017, 38(8): 80-85.  
DONG Hui, SONG Pinggang, ZHOU Zhenbang, et al. Compensation droop control of MMC-MTDC considering line voltage drop[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(8): 80-85.
- [23] 吕承, 邵能灵, 郑晓冬, 等. 基于边界电流的柔性直流线路保护新方案[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(1): 115-121.  
LÜ Cheng, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Protection novel scheme for flexible DC line based on boundary current[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 115-121.

收稿日期: 2021-02-28; 修回日期: 2021-10-07

作者简介:

俞翔(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为特高压直流输电及柔性交直流输电技术; E-mail: yuxiang@nrec.com

鲁江(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为特高压直流输电及柔性交直流输电技术;

董云龙(1977—), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为特高压直流输电及柔性交直流输电技术。

(编辑 葛艳娜)