# 特高压多端混合直流输电系统阀组计划投/退控制方法

刘静佳,梅红明,刘 树,于华龙,王皆庆
(北京四方继保自动化股份有限公司,北京 100085)

**摘要:**现有的阀组投入/退出控制策略只适用于特高压两端常规直流输电系统,不能适用于特高压柔性直流输电系统,更不能适用于特高压多端混合直流输电系统。为此,以乌东德电站送电广东广西工程为背景,提出基于混合桥模块化多电平换流器的阀组计划投入/退出控制方法,并对现有常规直流阀组计划投/退控制方法进行改进。在RTDS仿真试验平台上进行硬件闭环测试,结果表明所提阀组计划投入/退出控制方法能够平稳、快速地完成特高压多端混合直流输电系统阀组的计划投/退。

**关键词:**特高压直流;多端混合直流输电系统;柔性直流零压解锁;阀组计划投/退;改进的阀组投/退控制
**中图分类号:**TM 721 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.201909032

## 0 引言

计划于2020年投入运行的乌东德特高压直流输电工程,送端云南站采用常规直流换流站,受端广西站和广东站采用柔性直流换流站,同时采用双极双阀组结构,构成特高压三端混合直流输电系统。其独特的拓扑结构,充分发挥了常规直流和柔性直流的各自优势[1-6],能够有效提高控制系统的灵活性和南方电网的运行稳定性[7]。

目前高低阀组串联结构仅用于特高压直流输电领域,而特高压直流输电工程均采用常规直流换流站,阀组投/退控制策略[8-15]也仅以两端常规直流输电工程为背景,并没有专门针对柔性直流阀组的计划投/退控制方法。因此,亟需研究特高压柔性直流输电系统阀组的计划投退控制策略,并将其与常规直流相结合,以满足特高压多端混合直流输电系统阀组计划投入/退出的控制要求,为建设特高压多端混合直流输电工程奠定基础。

本文在常规直流阀组计划投/退控制策略的基础上,提出柔性直流阀组计划投/退控制方法,并对常规直流阀组计划投/退控制方法进行改进,满足特高压多端混合直流输电系统阀组计划投入/退出的控制需求。此外,在特高压多端混合直流输电工程RTDS仿真试验平台上验证了该方法的有效性。

## 1 柔性直流阀组基本控制策略

乌东德直流输电工程主回路结构如图1所示,图中BPS表示旁路开关。云南站采用常规换流站,广西站和广东站桥臂采用混合模块化多电平换流器(MMC)结构(每个桥臂均由140个全桥MMC和60个半桥MMC模块串联构成)。

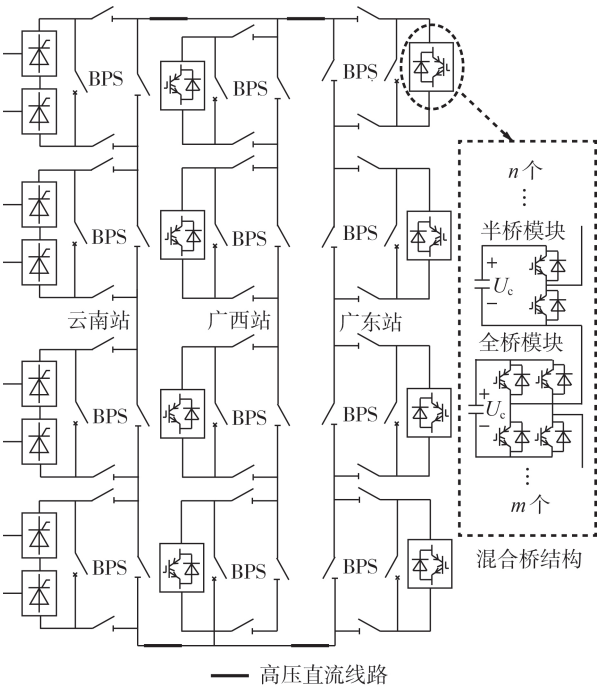


**图1 乌东德直流输电工程系统主回路图**
Fig.1 Main circuit diagram of Wudongde UHVDC system

该混合桥结构中半桥MMC模块包含2个IGBT,仅能输出0和正电压;在纯半桥型MMC中,直流侧电压$U_{dc}$与子模块电容平均电压$U_c$间存在固定的比例关系$U_{dc}=nU_c$($n$为半桥模块数)。全桥MMC模块包含4个IGBT,不仅能输出0和正电压,还能输出负电压;在全桥MMC中,$U_{dc}=kmU_c$($k$为直流调制系数,且$0\leqslant k\leqslant 1$;$m$为全桥模块数),通过调节$k$,可以使得$U_{dc}$不随$U_c$变化,完全解除直流侧电压和子模块电压之间的耦合关系,实现两者的独立控制[16]。显然全桥MMC模块成本较半桥MMC模块高,将全桥

**收稿日期:**2019-01-17;**修回日期:**2019-08-13
**基金项目:**国家重点研发计划项目(±800 kV/5 000 MW特高压柔性直流换流阀关键装备研发)(2016YFB0901003)
Project supported by the National Key Research and Development Program of China(Research and Development of Key Equipment for ±800 kV/5 000 MW UHV Flexible DC Converter Valve)(2016YFB0901003)

和半桥串联构成混合桥结构时，如果全桥数量多于半桥，则既具有输出负向电压的能力，又能兼顾经济性[17]。

乌东德工程中广西站和广东站采用全桥和半桥串联的混合桥结构，其中全桥占比70%，阀具有输出负向电压的能力，这为柔性直流阀组计划投入／退出中的零电压大电流运行提供了有利条件。

由于直流电压可以独立控制，含全桥模块的MMC换流站的控制包括交流侧控制和直流侧控制，其控制框图如图2和图3所示。

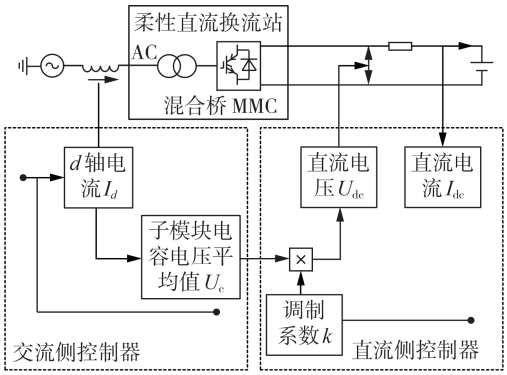


**图2　混合桥MMC控制框图**

Fig.2　Control diagram of hybrid-bridge MMC

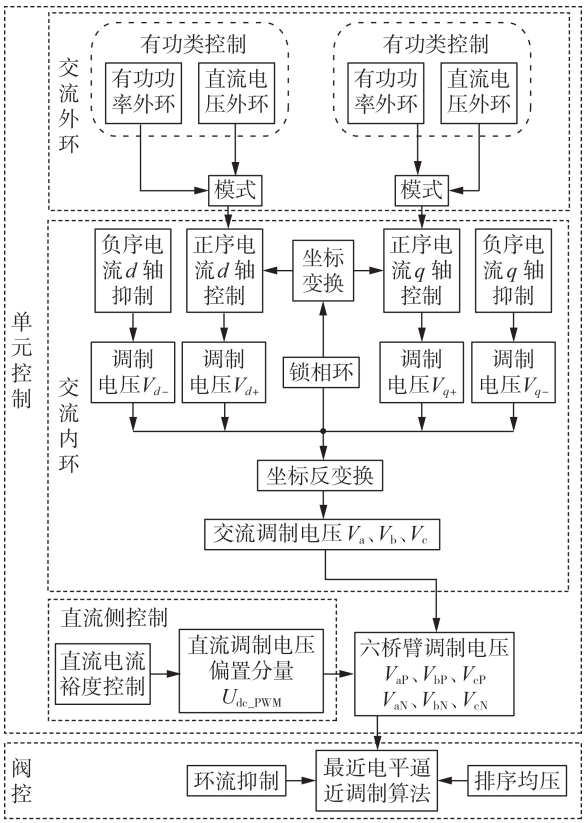


**图3　混合桥MMC直流控制框图**

Fig.3　Control diagram of hybrid-bridge MMC-HVDC

混合桥交流侧控制器与半桥型交流侧控制器原理相似，分为有功类控制和无功类控制。有功类控制根据控制模式闭环控制直流电流或直流电压，无功类控制根据控制模式闭环控制无功功率或交流电压；通过 $dq$ 轴解耦闭环控制，生成对应的交流调制波。

直流侧控制器采用直流电流裕度控制，在稳态时，直流电流跟随指令值，由于裕度设置，比例积分(PI)控制器使直流调制系数 $k$ 满偏至1，直流电压和直流电流由交流侧控制器接管；在直流电流与指令值偏差较大时，直流调制系数 $k$ 快速下降，使直流电压降低以维持直流电流稳定。

最终，叠加直流偏置分量的调制电压送入阀控，生成相应的全桥／半桥模块的控制脉冲，完成控制功能。

因此，在包含全桥模块的混合桥换流站中，可在子模块电容电压保持不变的情况下，通过直流调制系数 $k$ 改变直流偏置分量，调节直流侧电压 $U_{dc}$，完成阀组的零电压大电流运行。

## 2　阀组计划投／退控制方法

文献[8-15]描述了特高压常规直流阀组计划投／退控制方法：在阀组投入过程中，阀组解锁后进入BPS支路电流闭环(SCA)控制，调节触发角，使BPS支路电流转移至阀组，待BPS支路电流降低至0后，拉开BPS开关，切换至正常控制，逆变站控制直流电压，整流站控制直流电流，完成阀组的在线投入；在阀组计划退出时，阀组按照设定速率增加触发角，阀组输出直流电压随之降低，待阀组直流电压降低至0时，迅速闭合BPS开关，将直流电流转移至BPS支路，闭锁阀组，完成阀组的计划退出。其控制框图如图4所示。

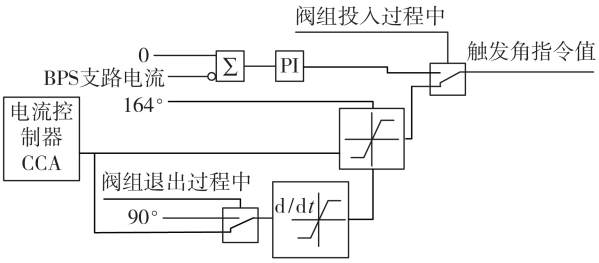


**图4　常规直流阀组计划投／退控制框图**

Fig.4　Block diagram of planned valve group entry／exit control for LCC-HVDC

### 2.1　混合直流阀组在线投入控制方法

在阀组投入过程中，柔性直流阀组可参照常规直流控制方法，阀组解锁后先进入BPS支路电流闭环控制，柔性直流阀组以BPS支路电流降至0为控制目标，闭环输出一个小的负向调制系数，阀组端口输出电压为较小的负值，迫使电流由BPS支路转移至阀组，待BPS支路电流降至0后，拉开BPS开关。常规直流站阀组按照现有阀组投入办法，转移BPS

支路电流，拉开BPS开关。

BPS开关拉开后，进入阀组升压控制过程，该过程需要考虑多个站间协调问题。为适应多端直流控制系统，本文增加站间协调控制，如图5所示。各站BPS开关拉开后，发送升压允许信号至控直流电压站；控直流电压站收到其余各站的升压允许信号，且本阀组BPS开关拉开后，切换至升压控制模式。闭环调节控制参数，抬升直流电压至额定值，随着直流电压的抬升，控直流电流站调节控制变量，维持直流电流的稳定，完成阀组的在线投入。

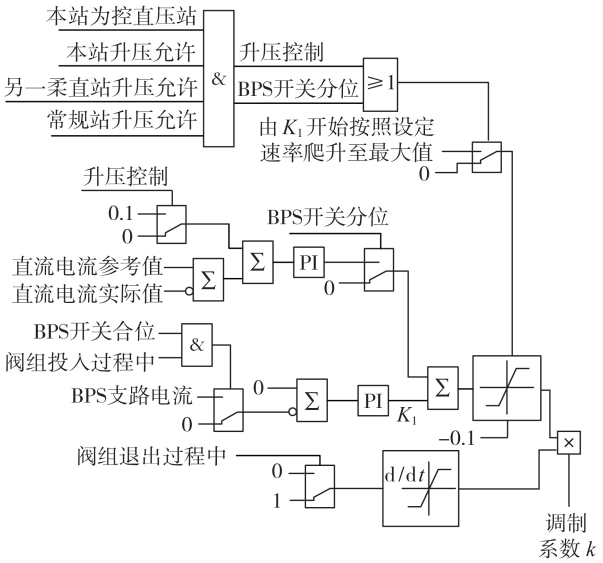


**图5 柔性直流阀组计划投／退控制框图**

Fig.5 Block diagram of planned valve group entry／exit control for MMC-HVDC

特高压多端混合直流输电系统阀组在线投入控制方法步骤如下（以投入高阀组为例）：

（1）各站收到高阀组投入指令后，常规站进行换流变充电，柔性直流换流站进行预充电和可控充电，分别操作相关刀闸，使直流电流全部流经BPS开关；

（2）常规直流站按照现有的阀组投入控制策略进入SCA控制，解锁调整触发角，控制BPS支路电流转移至阀组；

（3）柔性直流换流站解锁进入类SCA控制，根据BPS开关状态，以BPS支路电流降至0作为控制目标，经过PI控制器，输出较小的负向调制系数，使BPS支路电流迅速转移至阀组，阀组直流电流升高，同时保证阀组直流电压为0，完成零电压下直流电流的转移；

（4）各站待投入阀组检测到BPS支路电流降低至设定值（50 A）以下时（流过待投入阀组的直流电流与极线上直流电流基本相等），发分BPS指令；

（5）各站待投入阀组的BPS开关拉开后，发送升压允许信号至控直流电压站；

（6）控直流电压站BPS开关拉开且收到其余各站高阀组的升压允许信号后，切换为定直流电压控制，PI闭环控制直流电压升高至额定直流电压，其余各站在BPS拉开后切换至定电流控制模式；

（7）随着直流电压升高，降低极功率控制直流电流目标值，保证阀组投入前后输送功率不变。

图6为多端特高压输电系统阀组投入时序图。图中，左边站间通信时间为站控到阀组层的指令传输时间，右边站间通信时间为各阀组发送BPS状态至直流电压控制站的传输时间，该时间由站间通信距离和装置链路延时决定，为毫秒级。由于阀组投入过程中，各站分BPS之前，极线上直流电压、直流电流均不变化，所以各阀组收到投入指令的时间偏差不会影响控制效果；而BPS开关分位的传输时间只影响整个阀组投入时间，同样不影响控制效果。

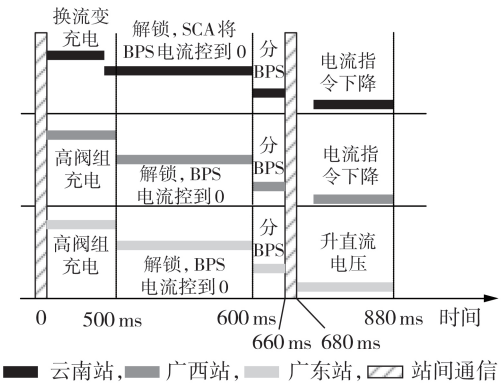


**图6 多端特高压输电系统阀组投入时序图**

Fig.6 Sequence diagram of valve group entry for mutli-terminal UHVDC

## 2.2 阀组在线计划退出

现有阀组计划退出控制方法中，控制触发角线性增大，可降低直流电压。如果柔性直流阀组参照常规直流控制方法，线性改变控制变量，也可达到降低直流电压的目的。

常规直流阀组的直流电压为 $U_{dc}=U_{di0}\cos\alpha-D_X U_{di0_NOM} I_{dc}/I_{dc_NOM}$，其中，$U_{di0}$ 为换流变二次侧线电压包络线值，$\alpha$ 为触发角，$D_X$ 为等效阻抗，$U_{di0_NOM}$ 为换流变二次侧线电压包络线值额定值，$I_{dc}$ 为实际直流电流，$I_{dc_NOM}$ 为额定直流电流。柔性直流阀组直流电压为 $U_{dc}=knU_c(0\leqslant k\leqslant 1)$。综上可知，常规直流阀组直流电压与触发角近似呈余弦关系，而柔性直流阀组直流电压与直流调制系数呈线性关系。当各站控制参数（触发角、调制系数）均线性改变时，各站间直流电压曲线不一致，站间电压差必然不再维持原匹配度，这势必会引起直流线路上直流电流的波动。因此，为满足特高压多端混合直流输电工程阀组计划退出的控制要求，不能简单照搬现有常规直流的阀组计划退出控制策略。本文对常规直流阀组计划退出控制过程进行改进，改进后的控制框图见图7。

在阀组计划退出过程中，将直流电压由当前实际值按照设定速率 $p$（推荐0.005 p.u.／ms，可根据实

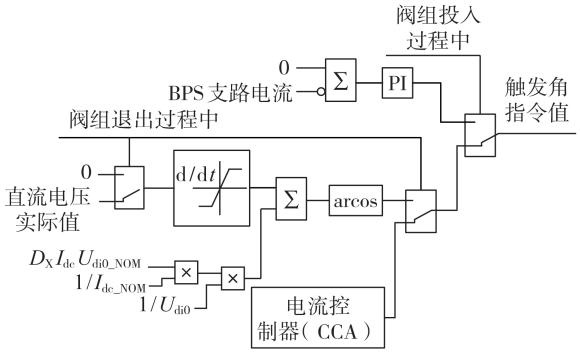


**图 7　改进的常规直流阀组计划投／退控制框图**

Fig.7　Control diagram of improved planned valve group entry／exit for LCC-HVDC

际情况调整）线性降低至 0，根据直流电压计算公式，反算出对应的触发角并作为触发角指令值，从而保证直流电压的线性下降，柔性直流阀组按照相同速率 $p$ 改变直流调制系数，线性降低阀组直流电压，即可解决各站降压过程中曲线不匹配问题。

特高压多端混合直流输电系统阀组计划退出控制方法步骤如下（以退出高阀组为例）：

（1）收到高阀组计划退出指令后，常规站的高阀组按照设定速率线性降低直流电压目标值，以近反余弦曲线增大触发角，线性降低阀组端口直流电压；

（2）柔性直流换流站高阀组按照设定速率，线性减小直流调制系数，使阀组端口直流电压线性降低；

（3）各站高阀组直流电压降低至 0.05 p.u. 以下后，发出合 BPS 指令；

（4）各站收到各自的 BPS 合位状态后，闭锁阀组，完成相关刀闸操作；

（5）极功率控制检测到直流电压降低后，逐渐增加直流电流指令，使直流功率恢复至阀组投入前水平。

图 8 为多端特高压输电系统阀组计划退出时序图。图中，站间通信时间会造成 3 个站阀组实际收到阀组计划退出指令的时间存在偏差，而阀组计划退出指令将直接触发各站阀组直流电压下降，故通信时间偏差较大会导致极线上直流电流波动。因此，在装置实现时，需测出站控至各站阀组层的通信时间，给各站控制器阀组计划退出指令增加不同的延时处理，以保证各站阀组计划退出启动时间一致，从而保证阀组计划退出控制效果。

## 3　试验验证

为验证本文提出的柔性直流阀组计划投入／退出控制方法的正确性和可行性，本文借助重大专项 RTDS 闭环试验平台对所提方法进行测试，并与常规阀组计划退出控制方法进行比较。三端特高压混合直流输电具有多种控制方法，本文在广东站控直流

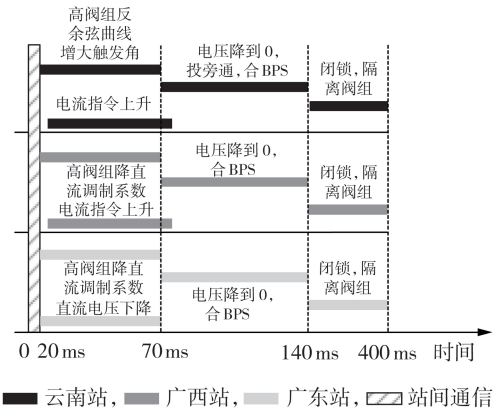


**图 8　多端特高压输电系统阀组计划退出时序图**

Fig.8　Sequence diagram of planned valve group exit for mutli-terminal UHVDC

电压，云南、广西站定直流电流的基本控制策略上进行试验。试验平台的系统示意图如图 9 所示。

图 9 中左边虚线框表示控制保护装置，自上而下依次为监控层、双极控层、极控层、阀组层。各层装置全部采用北京四方继保自动化股份有限公司研制的高压直流输电系列装置，即采用高性能多核 DSP+大容量 FPGA 集成技术，满足特高压多端系统对大量信号的高精度、快速处理需求。图中右边虚线框表示 RTDS 仿真设备，图中搭建了与乌东德送电广东广西工程一致的一次回路模型，接收控制保护装置发出的控制指令，完成主回路一次设备的模拟运算，并输送实时变量至控制保护装置和录波装置。

### 3.1　三端混合特高压直流输电阀组投入试验

云南、广西、广东 3 站极 1 低阀组稳定运行，设定功率目标值为云南送广西 625 MW、云南送广东 1 375 MW，投入 3 站极 1 高阀组。

图 10 为阀组投入试验波形。由图中可以看出：阀组投入过程中，常规直流站解锁后降低触发角，电流由 BPS 支路转移至阀组；柔性直流换流站解锁后，输出较小的负向调制系数，将电流由 BPS 支路转移至阀组；各站的 BPS 开关都拉开后，广东站控制直流电压抬升，极功率控制降低直流电流指令，保证阀组投入前后输送功率不变。可见，阀组投入试验过程中，电流转移过程正确，BPS 开关能正确拉开，阀组直流电压平稳上升，阀组投入过程平稳可控。

### 3.2　三端混合特高压直流输电阀组计划退出试验

云南、广西、广东 3 站极 1 双阀组稳定运行，设定功率目标值为云南送广西 625 MW、云南送广东 1 375 MW，计划退出 3 个站极 1 高阀组。

图 11 为阀组计划退出试验波形。由图中可以看出：阀组计划退出过程中，常规直流站增大触发角，使阀组输出直流电压线性下降；柔性直流换流站

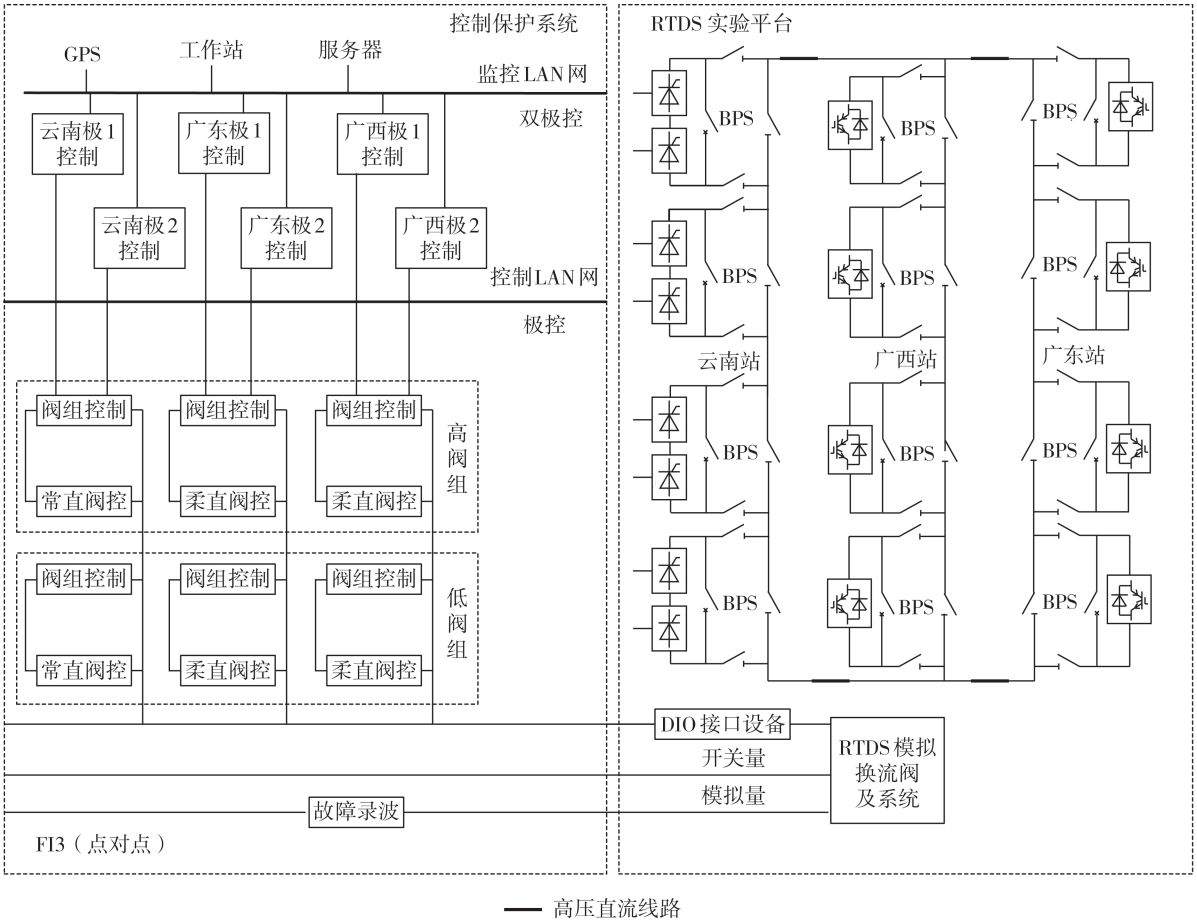


**图9 RTD闭环试验平台示意图**

Fig.9 Schematic diagram of RTDS closed-loop test platform

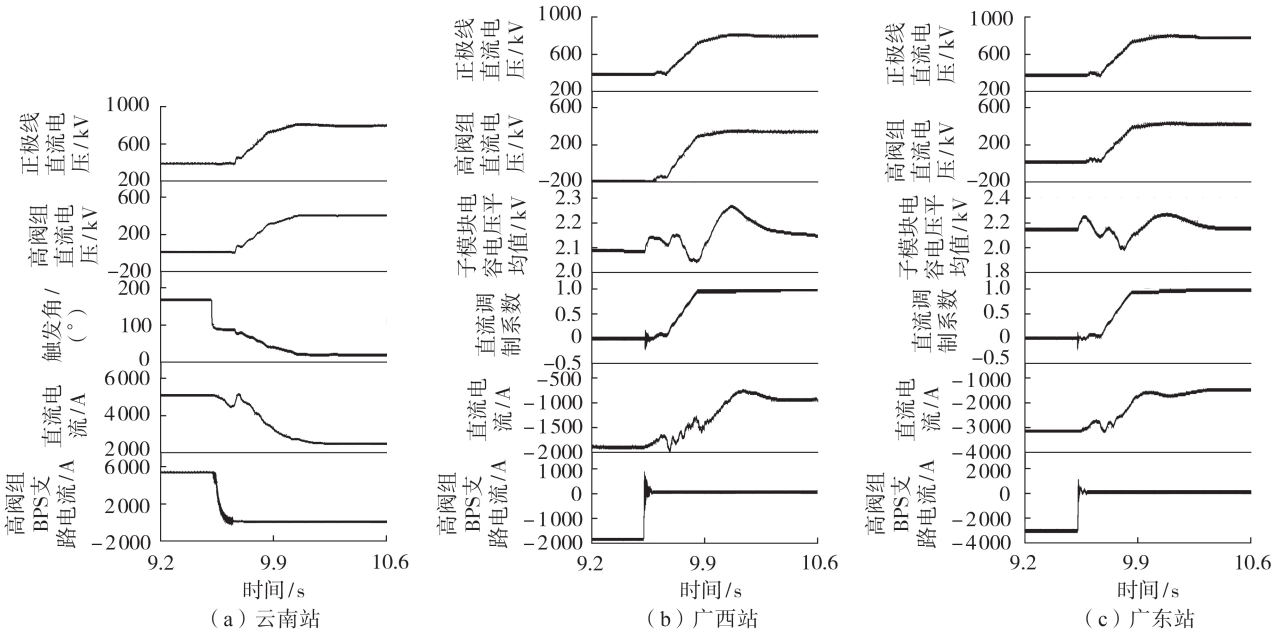


**图10 阀组投入试验波形**

Fig.10 Test waveforms of valve group entry

线性调节直流调制系数，降低阀组直流电压；阀组直流电压降低后，闭合BPS开关，阀组闭锁，同时直流电流升高，使阀组计划退出前后输送功率保持不变。通过试验可见，阀组计划退出试验过程中，阀组直流电压平稳下降，降压过程中直流电流无波动，阀组计划退出过程平稳可控。

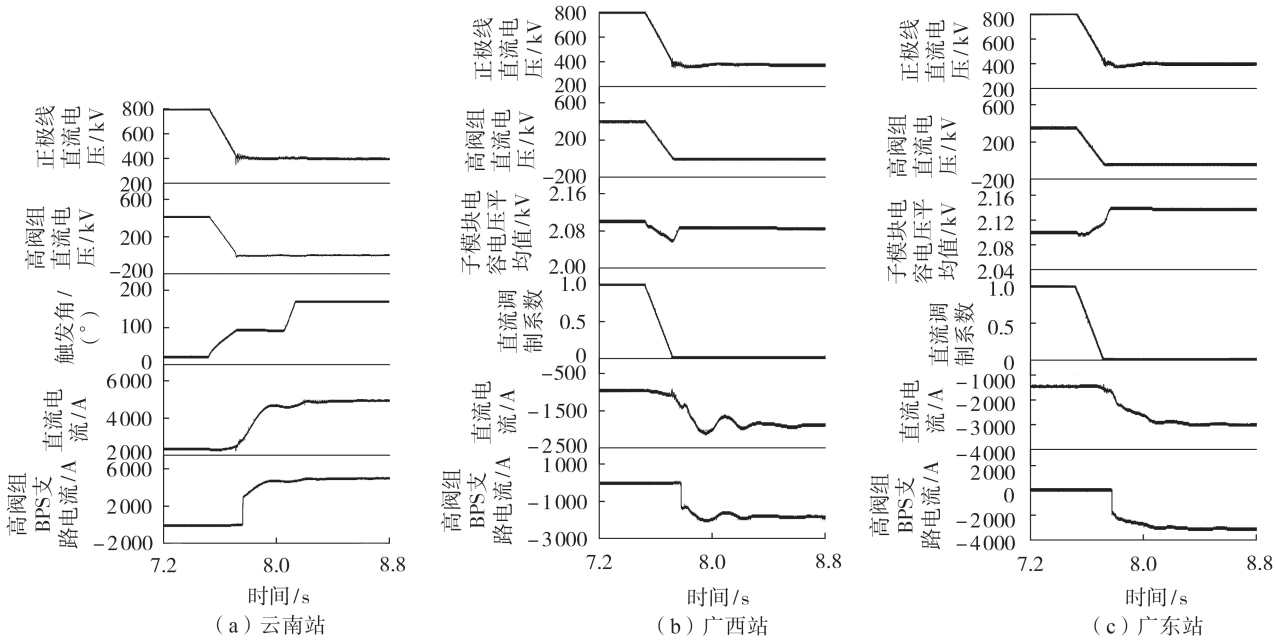


**图 11　阀组计划退出试验波形**

Fig.11　Test waveforms of planned valve group exit

### 3.3　现有阀组计划退出控制方法应用于三端混合特高压直流输电试验

将现有阀组计划退出控制方法和本文提出的柔性直流阀组退出控制方法，应用于乌东德三端混合直流输电系统，以 3.2 节工况进行阀组计划退出测试，试验波形如图 12 所示。

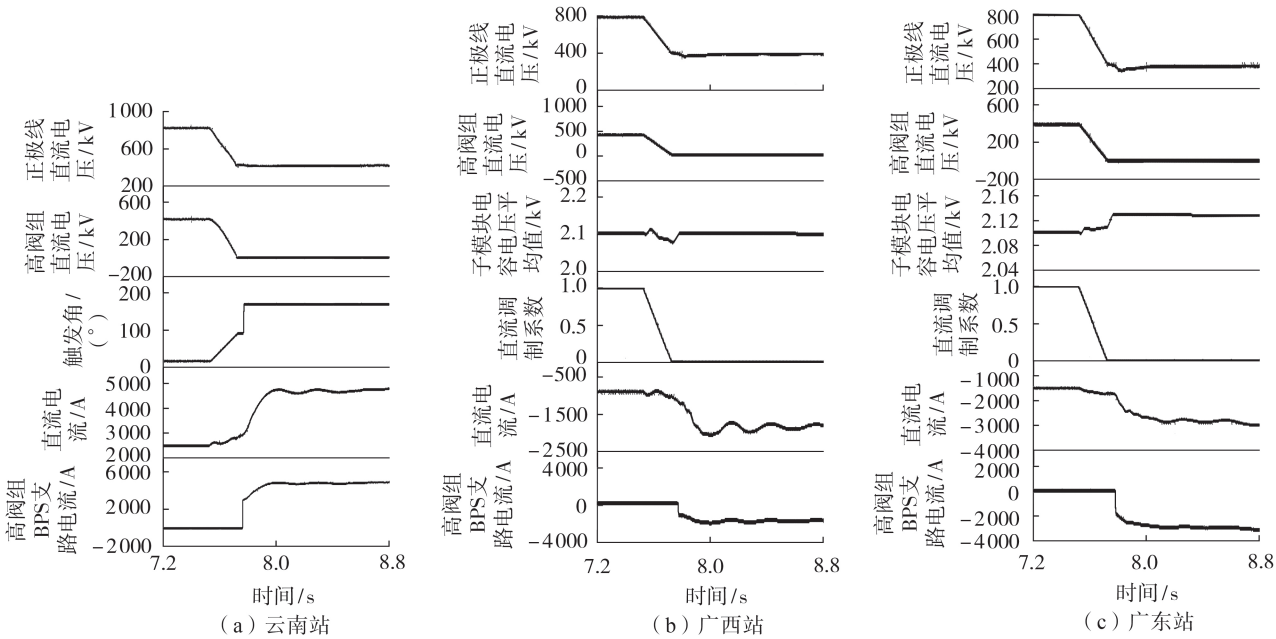


**图 12　阀组计划退出试验波形**

Fig.12　Test waveforms of planned valve group exit

对比 3.2 节和 3.3 节的试验波形可以看出，在相同工况下，采用现有阀组计划退出控制方法（触发角线性变化）时，由于云南站直流电压余弦变化，广东站和广西站直流电压线性变化，在降压的过程中（7.56~7.76 s），极线上直流电流出现了约 300 A 的波动，而该波动对于控制系统是不希望出现的。

## 4　结论

（1）本文提出了柔性直流阀组的计划投入／退出控制方法，能够快速、稳定地实现柔性直流换流站单个阀组的计划投入／退出控制，解决了特高压直流输电工程采用柔性直流阀组后带来的阀组投／退问题；

(2)本文对现有常规直流阀组计划投入/退出控制方法进行了适当改进,使其能与柔性直流阀组计划投退控制方法相配合,满足特高压多端混合直流输电控制系统的阀组计划投/退的控制要求;

(3)本文在特高压多端混合直流仿真平台上,对提出的方法进行验证,结果证明了该控制方法的正确性。

## 参考文献:


[1] 韦延方,卫志农,孙国强,等. 一种新型的高压直流输电技术——MMC-HVDC[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):1-9.
WEI Yanfang,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. New HVDC power transmission technology:MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):1-9.

[2] 郭春义,殷子寒,王烨,等. LCC-MMC型混合直流输电系统小干扰稳定性研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(8):1-13.
GUO Chunyi,YIN Zihan,WANG Ye,et al. Investigation on small-signal stability of hybrid LCC-MMC HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(8):1-13.

[3] 胡兆庆,毛承雄,陆继明,等. 一种新型的直流输电技术——HVDC Light[J]. 电工技术学报,2005,20(7):12-16.
HU Zhaoqing,MAO Chengxiong,LU Jiming,et al. New high voltage direct current transmission technology-HVDC Light[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(7):12-16.

[4] 唐庚,徐政,薛英林. LCC-MMC混合高压直流输电系统[J]. 电工技术学报,2013,28(10):301-310.
TANG Geng,XU Zheng,XUE Yinglin. A LCC-MMC hybrid HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(10):301-310.

[5] 李广凯,李庚银,梁海峰,等. 新型混合直流输电方式的研究[J]. 电网技术,2006,30(4):82-86.
LI Guangkai,LI Gengyin,LIANG Haifeng,et al. Research on a novel hybrid HVDC system[J]. Power System Technology,2006,30(4):82-86.

[6] 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 current transmission technology and its development analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(7):156-167.

[7] 饶宏,洪潮,周保荣,等. 多端直流工程受端采用柔性直流对多直流集中馈入问题的改善作用研究[J]. 南方电网技术,2017,11(3):1-5.
RAO Hong,HONG Chao,ZHOU Baorong,et al. Study on improvement of VSC-HVDC at inverter side of Wudongde multi-terminal UHVDC for the problem of centralized multi-infeed HVDC[J]. Southern Power System Technology,2017,11(3):1-5.

[8] 李岩,黄立滨,洪潮,等. ±800 kV直流输电系统双12脉动阀组投退策略分析[J]. 南方电网技术,2010,4(2):21-25.
LI Yan,HUANG Libin,HONG Chao,et al. Analysis on the strategy of block/deblock dual 12-pulse valve groups in ±800 kV DC transmission system[J]. Southern Power System Technology,2010,4(2):21-25.

[9] 李艳梅,李泰,李少华,等. ±800 kV特高压直流输电工程换流器投退策略分析[J]. 电力与能源,2015,36(6):751-757.
LI Yanmei,LI Tai,LI Shaohua,et al. Strategy of converter entry/exit for ±800 kV UHVDC project[J]. Power & Energy,2015,36(6):751-757.

[10] 王庆,石岩,陶瑜,等. ±800 kV直流输电系统双极12脉动阀组平衡稳定运行及投退策略的仿真研究[J]. 电网技术,2007,31(17):1-6,10.
WANG Qing,SHI Yan,TAO Yu,et al. Simulation study on control strategy for balanced steady operation and block/deblock of dual 12-pulse conver groups in ±800 kV DC transmission project[J]. Power System Technology,2007,31(17):1-6,10.

[11] 黎东祥,王渝红,丁理杰,等. 基于双12脉动阀组共同控制的特高压单阀组投退策略[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):148-154.
LI Dongxiang,WANG Yuhong,DING Lijie,et al. Blocking and deblocking strategy of single UHVDC converter group under joint control mode of dual 12-pulse converter groups[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(4):148-154.

[12] 张尧,房宣合,胡烈良,等. 特高压直流输电系统阀组投退策略[J]. 高电压技术,2010,36(8):1858-1864.
ZHANG Yao,FANG Xuanhe,HU Lieliang,et al. Blocking and debocking strategies of valve group for UHVDC power transmission[J]. High Voltage Engineering,2010,36(8):1858-1864.

[13] 房宣合. 特高压直流输电系统阀组投退策略研究[D]. 广州:华南理工大学,2010.
FANG Xuanhe. Study on the strategies of valve group block and deblock in UHVDC power transmission systems[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2010.

[14] 李新年,李涛,吕鹏飞,等. 向家坝至上海特高压直流输电工程换流器的投退策略分析[J]. 高电压技术,2011,37(5):1232-1238.
LI Xinnian,LI Tao,LÜ Pengfei,et al. Analysis on the strategy of converter entry/exit for Xiangjiaba to Shanghai UHVDC project[J]. High Voltage Engineering,2011,37(5):1232-1238.

[15] 石岩,韩伟,张民,等. 特高压直流输电工程控制保护系统的初步方案[J]. 电网技术,2007,31(1):1-7.
SHI Yan,HAN Wei,ZHANG Min,etal. A preliminary scheme for control and protection system of UHVDC project[J]. Power System Technology,2007,31(1):1-7.

[16] 许烽,徐政. 基于LCC和FHMMC的混合型直流输电系统[J]. 高电压技术,2014,40(8):2520-2530.
XU Feng,XU Zheng. Hybrid HVDC system based on LCC and FHMMC[J]. High Voltage Engineering,2014,40(8):2520-2530.

[17] 张帆. 子模块混合型MMC-HVDC直流故障控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.
ZHANG Fan. Research on DC fault control strategy for cell-hybrid modular multilevel converter based HVDC transmis-

sion systems[D]. Beijing:North China Electric Power University,2017.

**作者简介:**

刘静佳(1988—),女,河南舞钢人,硕士,主要研究方向为高压直流输电控制策略(**E-mail**:liujingjia1016@126.com);

梅红明(1984—),男,湖北武汉人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力电子及直流输电;

刘静佳

刘　树(1981—),男,天津人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力电子及直流输电;

于华龙(1988—),男,天津人,博士,主要研究方向为高压直流输电控制策略;

王皆庆(1984—),男,山西临汾人,工程师,硕士,主要研究方向为电力电子及直流输电。

## Planned valve group entry / exit control method for UHV multi-terminal hybrid HVDC system

LIU Jingjia, MEI Hongming, LIU Shu, YU Hualong, WANG Jieqing

(Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract**: The existing valve group entry / exit control strategies are only suitable for two-terminal LCC-UHVDC (Line Commutated Converter Ultra-High Voltage DC) transmission system, but cannot be used in VSC-UHVDC (Voltage Source Converter Ultra-High Voltage DC) transmission system and multi-terminal hybrid UHVDC transmission system, for which, based on the background of the project transmitting power from Wudongde power station to Guangdong and Guangxi, a planned valve group entry / exit control method based on hybrid bridge MMC (Modular Multilevel Converter) is proposed, and the existing planned valve group entry / exit control method for LCC-HVDC is improved. The hardware closed-loop test is performed in RTDS simulation test platform, and results show that the proposed method can smoothly and quickly complete the planned valve group entry / exit in multi-terminal hybrid UHVDC transmission system.

**Key words**: UHVDC; multi-terminal hybrid HVDC system; zero voltage deblock of MMC; planned valve group entry / exit; improved valve group entry / exit control

(上接第 150 页 continued from page 150)

## Security correction strategy of AC / DC hybrid system based on security distance sensitivity

CHEN Zhong[1,2], ZHU Zhengguang[1,2], YAN Jun[1,2]

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Smart Grid Technology and Equipment, Nanjing 210096, China)

**Abstract**: In the large-scale AC / DC hybrid system, the dynamic characteristics of AC / DC hybrid power grid have been fundamentally changed due to the large capacity, flexible and controllable characteristics of the DC system, and the difficulty of operation and control has increased sharply. The large-scale transfer of power flow after DC blocking will seriously affect the stable operation of the system. It is urgent to study the security correction strategy of AC / DC hybrid system. Therefore, a safety correction method for AC / DC hybrid system based on steady-state security distance sensitivity is proposed. Based on the steady-state security region theory of AC / DC hybrid system, in order to meet the requirements of online calculation of power system, the linear fitting of the security region boundary surface is performed and the calculation method of security distance and its sensitivity are given. The control cost of different dimensional variables is characterized by the expansion and contraction of the security region, on this basis, the security correction guidance vector is obtained. According to the sensitivity of each control variable to the guidance vector and the actual adjustment ability of each control variable, it is sorted and substituted into the security correction model to minimize the total adjustment during the regulation process. Based on the analysis and calculation of the modified IEEE 39-bus AC / DC hybrid system and the simplified actual power grid, the correctness and effectiveness of the proposed security correction strategy are verified.

**Key words**: AC / DC hybrid system; steady-state security region; linear fitting; security distance sensitivity; security correction