

# 锡泰直流工程分层接入 500/1000 kV 交流电网 仿真计算与现场系统试验结果分析

杨万开, 贾一超, 雷霄

(中国电力科学研究院有限公司, 北京市 海淀区 100192)

## Analysis of Simulation Calculation and On-site System Test Results for Xitai UHVDC Project With Hierarchical Connection to 500 kV/1000 kV AC Grid

YANG Wankai, JIA Yichao, LEI Xiao

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

**ABSTRACT:** Ximeng-to-Taizhou (abbr. Xitai) ultra high voltage direct current (UHVDC) project with hierarchical connection to 500 kV/1000 kV AC system is the first of its kind created by China in the world, and there is no existing experience for this kind of DC control and protection system. To analyze true responses of control and protection system during steady-state operation and transient process of UHVDC transmission project accurately, an electromagnetic transient model of the actual control system is built on PSCAD/EMTDC platform. The structure and function scheme of UHVDC with hierarchical connection are analyzed. Key aspects of the control system, such as voltage balance between HV(High Voltage) and LV(Low Voltage) converters, transformer tap-changer control, reactive power control and improved commutation failure prediction control strategy, are analyzed and modeled. Through a lot of simulation tests for the built model and comparison with waveforms of test results of Xitai project, consistency between simulation results and dynamic response of actual control system is verified. The model can also offer technical support for characteristic research of other UHVDC transmission projects with hierarchical connection mode.

**KEY WORDS:** Xitai UHVDC; hierarchical connection mode; simulation calculation, system commissioning test

**摘要:** 锡盟—泰州(简称锡泰)受端分层接入 500 kV/1000 kV 不同电压等级交流电网的特高压直流接线方式在世界上属于首创,其控制保护没有可借鉴的经验。为准确分析分层接入方式下特高压直流输电控制系统稳态运行与暂态过程的真实响应,分析了分层接入方式下特高压直流控制系统的分层结构和功能配置方案,对控制系统的关键环节,如分接头控制、阀组间电压平衡控制、无功功率控制和换相失败预测控制策略进行了计算分析,并与工程现场系统调试结果进行

了对比,验证了仿真结果与现场系统调试的一致性。仿真模型可为分层接入方式特高压直流输电工程的特性研究提供技术支持。

**关键词:** 锡泰特高压直流; 分层接入方式; 仿真计算; 系统试验

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2018.0429

## 0 引言

近年来,随着生态环境的恶化和我国能源与负荷呈逆向分布的格局决定了我国需要建设远距离、大容量的能量输送通道,以实现可再生能源大规模集约开发和全国范围内能源资源优化配置<sup>[1-2]</sup>。特高压直流输电(ultra high voltage direct current, UHVDC)具有输送容量大、输电距离远且技术成熟等优点<sup>[3-6]</sup>。根据国家电网公司战略规划,“十三五”期间将建设和投运多条特高压直流输电线路,其中多条特高压直流输电工程落点东中部地区<sup>[7]</sup>。目前,华东电网已投运和在建的直流输电线路多达 9 回,输送容量将达到 46 800 MW,多馈入直流集中落入受端负荷中心是我国电网发展所面临的重要问题<sup>[8-9]</sup>。多馈入直流存在的主要问题是受端电网能否提供坚强的电压支撑。

文献[10]从电网结构入手,提出采用特高压直流分层接入交流电网的方式可以提高对馈入直流系统的电压支撑能力、引导电网潮流合理分布。文献[11]证明了两个不同层级的交流系统无功耦合较弱,提出交流滤波器及逆变侧换流变分接头需要分开控制,并且串联双阀组的中间配置直流电压测点。文献[12]从阀组间电压平衡控制、无功功率控制和阀组退出后直流功率控制等方面入手,提出适用于分层接入方式的特高压直流输电控制策略。文献[13]提出改进的最大触发延迟角控制策略,避免

基金项目: 国家电网公司科技项目(XTB 11201605129)。

Project Supported by Science and Technology Foundation of State Grid Corporation of China (XTB 11201605129).

逆变侧一个交流电网发生换相失败时导致另一个正常运行交流电网所连接的阀组发生换相失败。上述文献虽然针对分层接入方式下各种控制策略进行了讨论, 但均未指出对逆变侧单换流器进行独立控制的具体策略。文献[14-15]提出的特高压直流实际控制保护系统建模方法只适用于传统的特高压直流输电工程。

为了解决上述问题, 本文以锡盟—泰州(简称锡泰) $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程为背景, 在详细分析分层接入方式下特高压直流控制系统的分层结构和功能配置方案的基础上, 基于 PSCAD/EMTDC 平台建立实际控制系统的电磁暂态仿真模型, 通过多种运行模式的仿真波形与系统调试结果的对比, 验证仿真模型的准确性。

## 1 适应分层接入方式的直流控制系统分层结构和功能配置方案

逆变侧分层接入两个交流系统, 由于其高、低端阀组也在同一个站内, 因此仍采用双极、极、阀组的分层控制结构<sup>[16]</sup>。分层接入方式下特高压直流控制系统的分层结构如图 1 所示。

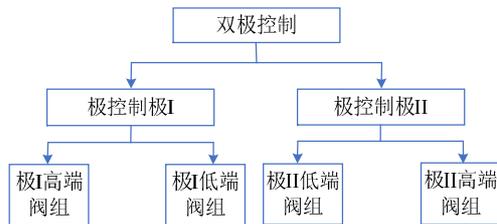


图 1 分层接入的特高压直流控制系统的系统层次结构  
Fig. 1 Hierarchical structure of control system for UHVDC with hierarchical connection

针对受端分层接入 500 kV 和 1000 kV 不同电压等级交流电网的特点, 对常规特高压直流控制系统的功能配置方案进行了调整, 以适用于分层接入的特高压直流输电工程<sup>[17]</sup>。

1) 双极控制层。分层接入方式下, 双极控制层中应配置 500 kV 和 1000 kV 系统独立的无功控制功能, 500 kV 和 1000 kV 系统无功控制以各自交流母线的无功交换或电压作为控制目标。

2) 极控制层。分层接入方式下, 高、低压换流变压器的调节级差、运行档位不同, 交流系统电压、相角不一致, 导致高、低压换流器运行电压可能存在差异。极控制层中还应该配置高、低压换流器的直流电压平衡控制功能, 以确保正常运行时两个换流器的直流电压保持平衡。

3) 换流器控制层。分层接入方式下, 由于同一个极的高、低端阀组接入两个交流系统, 因此原

来在极控系统中配置的电流、电压、关断角的闭环控制需要在换流器控制系统中实现。由于 500 kV 换流变的级差是 1.25%, 1000 kV 换流变的级差是 0.65%, 1000 kV 换流变调整 1 档在阀侧产生的电压变化是 500 kV 的 1/2, 因此高、低压换流变分接头应独立控制。

## 2 仿真建模关键问题

### 2.1 直流电压平衡控制

逆变侧直流电压计算公式<sup>[18]</sup>为

$$U_d = U_{d10} [\cos \gamma - (d_x - d_r) \frac{I_d}{I_{dN}} \frac{U_{d10N}}{U_{d10}}] + U_T \quad (1)$$

式中:  $U_{d10}$  为实际空载直流母线电压;  $U_{d10N}$  为额定空载直流母线电压;  $I_d$  为直流电流;  $I_{dN}$  为额定直流电流;  $d_x$  为相对感性压降;  $d_r$  为相对阻性压降;  $U_T$  为换流器前向压降;  $\gamma$  为关断角参考值。

单层接入方式下, 由于高、低压换流变参数一致, 高、低压阀组  $d_x$ 、 $d_r$  和  $U_{d10N}$  相等, 此外高、低压阀组的电流指令  $I_d$  和额定直流电流  $I_{dN}$  均一致, 因此常规特高压直流输电工程采取高、低端换流变分接头同步控制和关断角参考值相同实现高、低压阀组电压自然平衡。分层接入方式下, 由于高、低压换流变参数不一致, 传统的控制方式必然导致高、低压阀组电压不平衡。因此, 本文采用的控制策略是将逆变侧极控系统中配置的电流、电压、关断角的闭环控制下放至换流器控制系统中, 其中高、低压阀组仍工作在最大触发延迟角控制方式, 换流变分接头独立控制来实现阀组间电压平衡。

分层接入方式下换流器阀触发控制系统框图如图 2 所示。图中:  $U_{dINV}$  为逆变侧直流母线电压;  $I_{ORD}$  为极控产生的电流指令;  $I_d$  为逆变侧直流母线

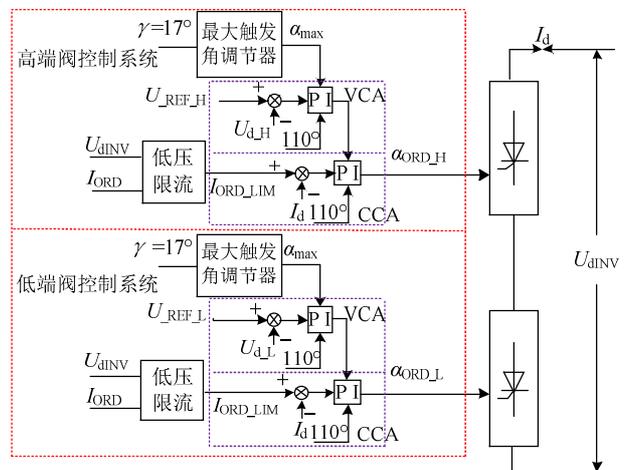


图 2 分层接入方式下换流器阀触发控制系统框图  
Fig. 2 Block diagram of converter firing control under hierarchical connection mode

电流； $\alpha_{ORD}$  为输出触发角指令。正常状态下，逆变侧电压调节器(voltage control amplifier, VCA)的输出作为电流调节器(current control amplifier, CCA)的上限，最大触发角调节器的输出作为 VCA 的上限，其中最大触发角调节器中的关断角  $\gamma$  为  $17^\circ$ <sup>[16]</sup>。与常规特高压直流不同的是，分层接入方式下高、低端换流阀的  $\alpha_{ORD}$  由各自的阀控制系统分别给出。

受端换流变分接头控制目标是保证整流侧电压保持 800 kV，其数学表达式<sup>[18]</sup>为

$$U_d = U_{dINV} - U_{dN} + I_d \cdot R_L \quad (2)$$

式中： $U_{dN}$  为中性母线对地电压； $R_L$  为线路电阻。

分层接入方式下，由于高、低端换流器独立控制，式(2)中的  $U_{dINV}$  不适用于分层控制的 TCC。经过变形后的数学表达式为<sup>[19]</sup>

$$U_d = (U_{dINV} - U_{dMINV} + \frac{I_d \cdot R_L}{2}) + (U_{dMINV} - U_{dN} + \frac{I_d \cdot R_L}{2}) \quad (3)$$

式中  $U_{dMINV}$  为逆变侧高、低端阀组中间测点对地电压。

换流变分接头控制(tap changer control, TCC)框图如图 3 所示。图中， $U_{DEAD}$  为电压控制限制值。高/低端 TCC 将高/低端阀组间电压值加上线路压降的一半，通过与参考电压值  $U_{DEAD}$  比较，来控制高/低端换流变分接头档位的升降。单个阀组工作在逆变侧关断角控制，保证关断角恒定。通过上述控制器配置，一方面能保证将直流电压控制在 800 kV，另一方面能够保证两个串联阀组的平衡运行。

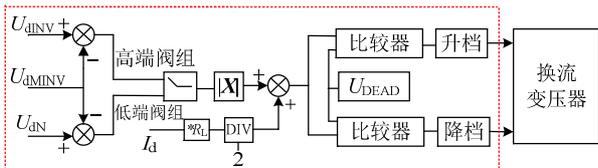


图 3 换流变分接头控制框图

Fig. 3 Block diagram of transformer tap changer control

### 2.2 无功功率控制

通常逆变侧两个交流系统电气距离短，因此一个交流系统无功单元的投切动作对另一个交流系统的电压可能产生一定的扰动。文献[11]论证了分层接入方式下受端两个交流系统的无功单元投切关联性不大，无功可以独立控制。因此，分层接入方式下特高压直流控制系统无功控制策略为：送端无功功率由直流站控系统统一控制，以交流母线的无功交换或电压为控制目标；受端直流站控系统分别配置 500 kV 和 1000 kV 系统无功控制功能，2 个交流系统的无功控制以各自交流母线的无功交换或电压为控制目标。

无功功率控制逻辑如图 4 所示。图中， $Q_{MEAS}/U_{MEAS}$  为交流母线无功交换实测值/电压实测值； $Q_{DEAD}/U_{DEAD}$  为无功控制限制值/电压控制限制值； $Q_{REF}/U_{REF}$  为运行人员设定的无功参考值/电压参考值； $Q_{INC}/U_{INC}$  为投入无功补偿装置指令； $Q_{DEC}/U_{DEC}$  为切除无功补偿装置指令。

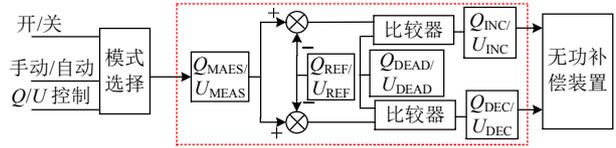


图 4 无功功率控制框图

Fig. 4 Block diagram of reactive power control

### 2.3 改进的换相失败预测控制策略

逆变侧换相失败预测功能配置在最大触发延迟角单元中，如图 5 所示。由于高、低端阀组分别接入两个交流系统，其换相失败预测功能也是独立配置的，高端阀组产生的触发角增量为  $\Delta\alpha_{AMIN,CFPRED500}$ ，低端阀组产生的触发角增量为  $\Delta\alpha_{AMIN,CFPRED1000}$ 。图 5 中引入式(4)对定  $\gamma$  控制进行修正，在暂态情况下，直流电压随着电流的增加而增加，逆变器具有正阻抗特性，有利于提高直流输电系统的稳定性<sup>[18]</sup>。

$$\beta = \arccos[\cos \gamma - 2 \cdot d_x \cdot \frac{I_0}{I_{dN}} \cdot \frac{U_{di0N}}{U_{di0}} - K(I_0 - I_d)] \quad (4)$$

式中： $I_0$  为直流电流指令； $K$  为正系数。

当一个交流电网发生故障、另一个交流电网正常运行时，故障交流电网连接的阀组发生换相失

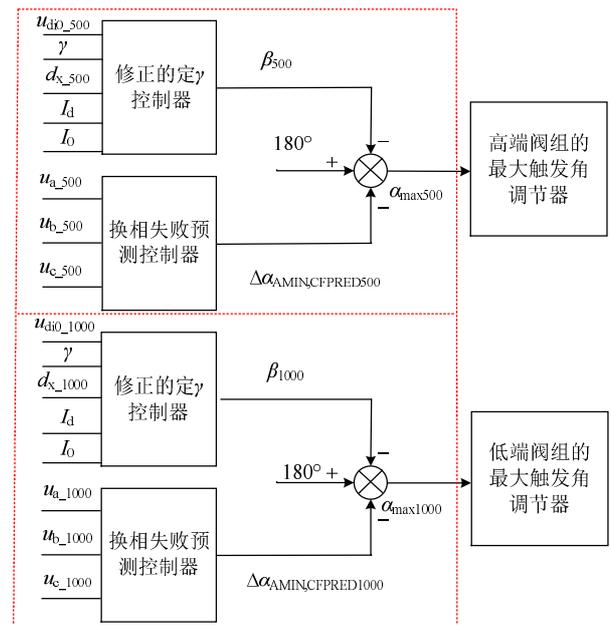


图 5 传统的换相失败预测控制框图

Fig. 5 Block diagram of traditional commutation failure prediction control

败, 逆变侧直流电压相对整流侧直流电压下降较大, 导致流过逆变侧正常运行阀组的直流电流快速上升。由式(4)可知, 正常运行阀组中  $\beta$  减小, 通过提高正常运行阀组电压抑制直流电流上升。此外, 分层接入方式下两个交流系统耦合较弱, 一个交流电网故障对另一个交流系统影响较小, 无故障交流电网连接阀组中的换相失败预测功能产生的触发角增量很小<sup>[13]</sup>。

对于分层接入方式, 如果继续沿用传统的换相失败预测控制策略, 在电网的某些故障情况下与非故障电网相连的阀组可能会发生连续换相失败, 引发直流输电系统功率振荡。因为直流电流增加, 一方面导致换相重叠角  $\mu$  增加; 另一方面导致正常运行阀组中的  $\beta$  减小,  $\gamma$  实际值远小于  $\gamma$  参考值。其中, 正常运行阀组中配置的换相失败预测功能未能正确反映另一交流电网的故障是导致正常运行阀组发生连续换相失败的根本原因, 逆变侧直流电流快速增加是引起连续换相失败的直接原因。

本文提出改进换相失败预测控制策略的逻辑如图 6 所示, 虚线框中表示的是改进换相失败预测控制器。故障切换模块用于判定并量化受端两个交流系统的情况, 设定  $u_{\text{fault}}$  为故障状态变量, 当 500 kV 交流母线发生故障时,  $u_{\text{fault}}$  为 1; 1000 kV 交流母线发生故障时,  $u_{\text{fault}}$  为 0。此外, 当两个交流系统同时发生故障时, 故障切换模块选择故障时间长的交流系统作为状态输出。将故障阀组中换相失败预测产生的触发角增量作为故障期间串联阀组统一的触发角增量, 实现了正常运行阀组不发生换相失

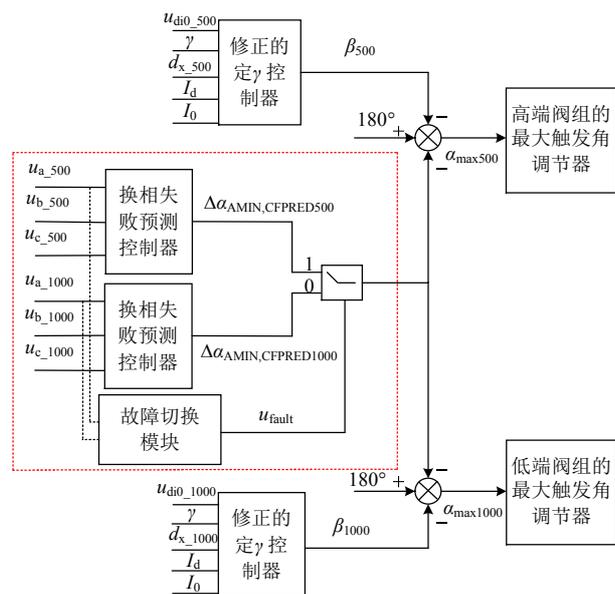


图 6 改进的换相失败预测控制框图

Fig. 6 Block diagram of improved commutation failure prediction control

败的控制目标, 避免了直流功率振荡。

### 3 仿真实证

#### 3.1 计算条件

以锡泰±800 kV 特高压直流工程参数为基础, 包括换流器、换流变压器、平波电抗器、直流线路、接地极线路、交直流滤波器等关键设备, 基于 PSCAD/EMTDC 建立实际控制系统的电磁暂态仿真模型。对两侧交流系统进行静态等值, 等值后的交流系统参数如表 1 所示。±800 kV 直流输电系统整流侧采用定功率控制、逆变侧采用修正的定  $\gamma$  控制。

表 1 交流系统参数

Tab. 1 Main parameters of AC system

交流系统编号	额定电压/kV	等值阻抗/ $\Omega$	短路电流/kA
1	530	3.03+j34.62	8.8
2	520	1.31+j14.95	20
2	1050	4.40+j50.30	12

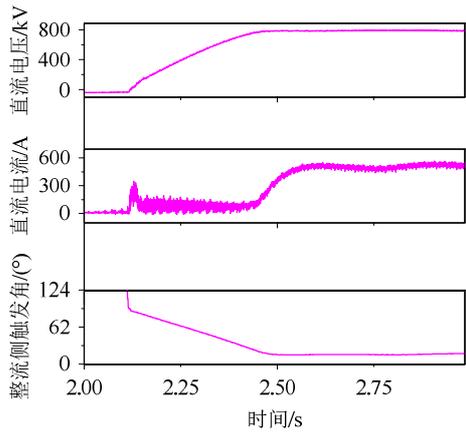
1—整流侧, 2—逆变侧。

#### 3.2 模型测试

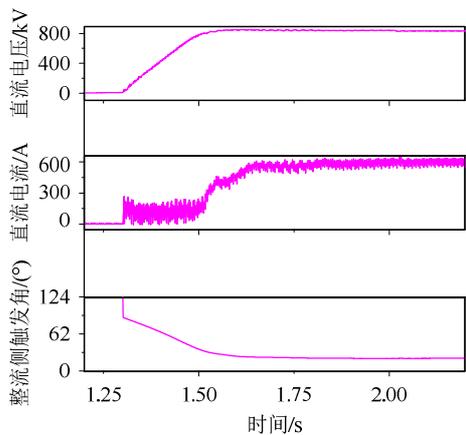
完成分层接入方式下特高压直流控制系统建模之后, 需要进行大量的仿真测试工作。仿真测试的主要方式是对直流电压、直流电流和触发角等进行分析, 检查直流响应是否能够达到实际直流控制保护系统的标准。考虑到实际工程中, 2 个换流站之间控制保护装置信号传递存在延时, 锡泰特高压直流工程实测结果为 30 ms, 因此在本仿真模型中也按此时间设定站间通信延时。

图 7 为单极 800 kV 双 12 脉动换流器解锁波形, 输送功率 500 MW。直流系统正常启动涉及到直流控制保护系统的很多逻辑, 是考验直流控制保护模型准确性的判别方法之一<sup>[18]</sup>。锡泰工程采用逆变侧先解锁, 整流站后解锁的启动逻辑, 逆变侧解锁指令下发的同时, 移相命令消失, 随后整流侧在电流调节器的作用下缓慢降低触发角, 直流系统电压开始缓慢升高至 800 kV, 直流电流建立并提升至 625 A。图 7(a)为现场试验波形, 图 7(b)为仿真波形, 两者电压、电流和触发角波形几乎完全一致。在电流调节器的作用下, 现场试验录波和仿真波形的触发角均下降至 16.9°, 直流电流上升至 90%的时间分别为 336 ms 和 289 ms, 可见电磁暂态仿真模型的动态响应特性基本准确。

图 8 为单极 800 kV 双 12 脉动换流器稳定运行, 输送功率 500 MW, 直流线路靠近线路中点瞬时金属性接地故障波形。图 8(a)为模拟直流线路故障重启现场试验波形, 重启一次后, 直流系统恢复正常运行。但由于交流电压畸变, 泰州站高、低压端阀



(a) 现场单极解锁试验波形



(b) 单极仿真解锁波形

图 7 单极双 12 脉动换流器解锁

Fig. 7 Deblock of two 12-pulses converters of monopole

组在功率恢复过程中发生了换相失败，在此之后，直流系统逐渐恢复至稳态运行。图 8(b)为人工直流线路故障现场试验波形，由于送端交流系统弱，锡泰直流工程现场调试过程中取消了线路重启功能，防止直流线路重启失败导致闭锁直流系统。图 8(c)为直流线路靠近线路中点瞬时金属性接地故障仿真波形。对比图 8(a)和图 8(c)可知，实际录波和仿真波形的直流电流由故障发生时刻恢复至 90%的时间分别为 624 ms 和 583 ms，可见调节器的动态响应特性基本准确。

图 9 为单极 800 kV 双 12 脉动换流器稳定运行，输送功率 550 MW，在直流控制系统中施加持续时间为 500 ms，幅值为 160 MW 的功率阶跃指令。图 9(a)中功率上阶跃响应时间为 97 ms，超调量为 8.1%，图 9(b)中功率上阶跃响应时间为 85 ms，超调量为 7.2%，仿真模型的动态响应与现场调试结果基本符合。

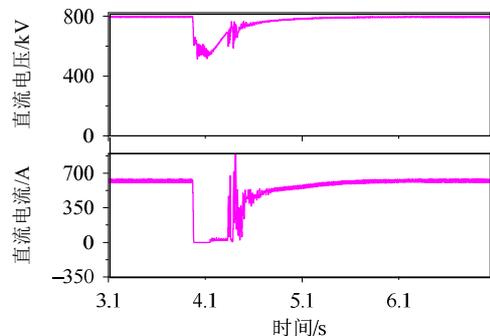
模型分类进行多项稳态和动态响应测试，如起/停控制，单换流器、双换流器紧急停运，功率阶跃响应，直流线路接地故障等，波形较多，本文只列

出图 7、图 8 和图 9 这 3 种情况下的仿真波形。可以看出，仿真模型的结果与现场调试结果基本一致，包括直流电压和直流电流的响应以及触发角的变化。经过大量的仿真测试，验证了模型结果的准确性，为模型的进一步应用提供了技术保证。

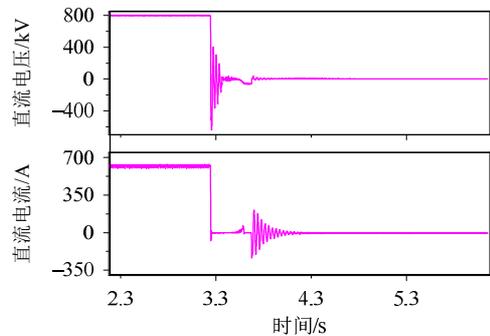
### 3.3 模型应用

锡泰±800 kV 特高压直流输电工程系统调试过程中，由于华东地区交流系统短路容量较小，其不具备做人工交流系统接地故障的试验条件。为分析逆变侧交流系统接地故障后直流控制系统的响应以及直流传输功率能否在规定的时间内平稳地恢复，采用本文建立的特高压直流仿真模型，模拟逆变侧交流系统故障，直流系统单极 800 kV 双 12 脉动换流器运行，输送功率 500 MW。

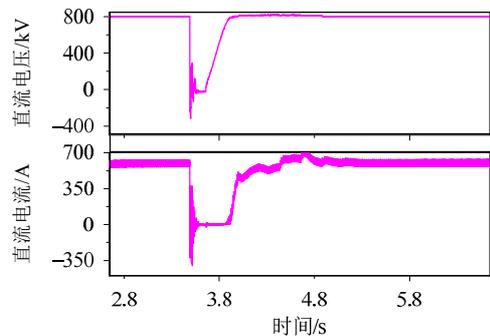
故障时序为，逆变侧低端阀组所连接的 1000 kV



(a) 模拟直流线路故障重启现场试验波形



(b) 直流线路故障现场试验波形



(c) 仿真直流线路故障波形

图 8 极 I 直流线路瞬时接地故障

Fig. 8 Transient fault of pole I line

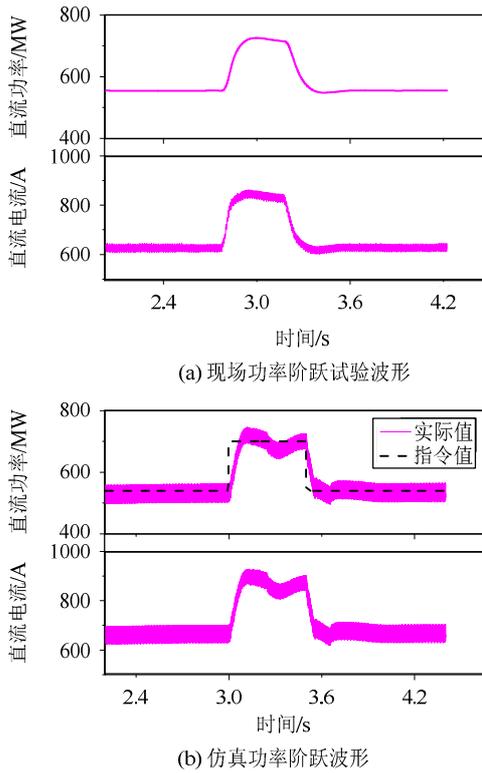


图 9 功率阶跃响应

Fig. 9 Power step response waveforms

交流母线发生金属性三相接地故障，100 ms 后跳开故障相，而高端阀组所连接的 500 kV 交流母线正常运行，仿真波形如图 10 所示。 $t_1$  时刻，1000 kV 交流系统发生金属性三相接地故障，低端阀组发生换相失败。在改进的换相失败预测策略作用下，换

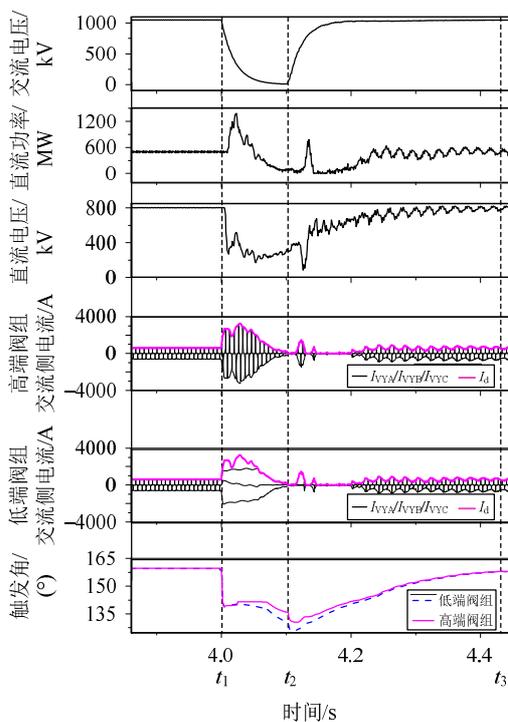


图 10 1000 kV 交流系统三相故障波形

Fig. 10 Waveforms of three-phase fault of 1000 kV AC system

相失败预测产生的触发角增量为  $22^\circ$ ，逆变侧高、低端阀组触发角均下降至  $138^\circ$ ，高端阀组换相裕度增加，没有发生换相失败。故障期间，整流侧通过调节器自动作用，增大触发角来抑制短路电流。 $t_2$  时刻，交流故障消失，1000 kV 交流系统开始恢复。 $t_3$  时刻，直流输电系统功率恢复。如果不采用本文提出的改进的换相失败预测策略，在相同的故障下，高低端换流器均会发生换相失败，由于篇幅原因，这里不再展示仿真波形。仿真结果表明了改进控制策略的有效性，能够提升分层接入特高压直流对换相失败的抵御能力。

### 4 结论

本文在深入分析分层接入方式下特高压直流控制系统的分层结构和功能配置方案的基础上，对控制系统的关键环节，如分接头控制、阀组间电压平衡控制、无功功率控制和换相失败预测策略进行分析和建模，建立了基于 PSCAD/EMTDC 的特高压直流控制系统电磁暂态模型。通过大量的仿真测试并与现场调试结果对比，验证此建模方法的正确性。通过逆变侧交流系统故障研究，为工程调试提供技术支持，下一步将利用模型分析分层接入方式下交直流系统的相互影响。

### 参考文献

- [1] 舒印彪. 中国直流输电的现状与展望[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 1-2, 20.  
Shu Yinbiao. Present status and prospect of HVDC transmission in China[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 1-2, 200(in Chinese).
- [2] 舒印彪, 刘泽洪, 袁竣, 等. 2005 年国家电网公司特高压输电论证综述[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 1-120.  
Shu Yinbiao, Liu Zehong, Yuan Jun, et al. A survey on demonstration of UHV power transmission by state grid corporation of China in the year of 2005[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 1-12(in Chinese).
- [3] 杨万开, 印永华, 曾南超, 等. 向家坝—上海±800 kV 特高压直流输电工程系统调试技术分析[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 19-23.  
Yang Wankai, Yin Yonghua, Zeng Nanchao, et al. Analysis on commissioning test of ±800 kV UHVDC transmission project from Xiangjiaba to Shanghai[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 19-23(in Chinese).
- [4] 杨万开, 印永华, 曾南超, 等. 天中特高压直流输电工程系统试验方案[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 349-355.  
Yang Wankai, Yin Yonghua, Zeng Nanchao, et al. System commissioning test program of ±800 kV UHVDC transmission project from Tianshan to Zhongzhou[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 349-355(in Chinese).
- [5] 杨万开, 吴庆范, 庞广恒, 等. 特高压直流融冰方式控制策略及试验分析[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3313-3319.  
Yang Wankai, Wu Qingfan, Pang Guangheng, et al. Analysis of control strategy and test for de-icing operation mode of UHVDC

- project[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3313-3319(in Chinese).
- [6] 杨万开, 衣福全, 曾南超, 等. 特高压直流中性线母线开关重合保护误动分析[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1759-1765.  
Yang Wankai, Yi Fuquan, Zeng Nanchao, et al. Analysis of UHVDC neutral bus switch reclosing protection maloperation[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1759-1765(in Chinese).
- [7] 覃琴, 郭强, 周勤勇, 等. 国网“十三五”规划电网面临的安全稳定问题及对策[J]. 中国电力, 2015, 48(1): 25-32.  
Qin Qin, Guo Qiang, Zhou Qinyong, et al. The security and stability of power grids in 13th Five-Year Planning and countermeasures [J]. Electric Power, 2015, 48(1): 25-32(in Chinese).
- [8] 李新年, 刘耀, 朱艺颖, 等. 华北电网直流多馈入系统动态特性实时仿真[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 75-80.  
Li Xinnian, Liu Yao, Zhu Yiyang, et al. Real-time simulation of dynamic performance of multi-infeed UHVDC transmission system to be connected to North China Power Grid before 2015[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 75-80(in Chinese).
- [9] 邵瑶, 汤涌, 郭小江, 等. 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[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 9-15.  
Shao Yao, Tang Yong, Guo Xiaojiang, et al. 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[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 9-15(in Chinese).
- [10] 刘振亚, 秦晓辉, 赵良, 等. 特高压直流分层接入方式在多馈入直流电网的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 1-7.  
Liu Zhenya, Qin Xiaohui, Zhao Liang, et al. Study on the application of UHVDC hierarchical connection mode to multi-infeed HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 1-7(in Chinese).
- [11] 李少华, 王秀丽, 张望, 等. 分层接入特高压直流交流电网方式下直流控制系统设计[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2409-2416.  
Li Shaohua, Wang Xiuli, Zhang Wang, et al. Control system design for UHVDC hierarchical connection to AC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2409-2416(in Chinese).
- [12] 王永平, 卢东斌, 王振曦, 等. 适用于分层接入的特高压直流输电控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 59-65.  
Wang Yongping, Lu Dongbing, Wang Zhengxi, et al. Coordinated control strategy of offshore wind farms and VSC-based HVDC transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 59-65(in Chinese).
- [13] 卢东斌, 王永平, 王振曦, 等. 分层接入方式的特高压直流输电逆变侧最大触发延迟角控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1808-1816.  
Lu Dongbin, Wang Yongping, Wang Zhenxi, et al. Inverter maximum alpha control in UHVDC transmission with hierarchical connection mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1808-1816(in Chinese).
- [14] 雷霄, 许自强, 王华伟, 等.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电工程实际控制保护系统仿真建模方法与应用[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1359-1364.  
Lei Xiao, Xu Ziqiang, Wang Huawei, et al. A modeling method for actual control and protection system of  $\pm 800$  kV UHVDC transmission project and its application[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1359-1364(in Chinese).
- [15] 郑晓冬, 邵能灵, 杨光亮, 等. 特高压直流输电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 10-14.  
Zheng Xiaodong, Tai Nengling, Yang Guangliang, et al. Modeling and simulation of UHVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7): 10-14(in Chinese).
- [16] 韩民晓, 文俊, 徐永海. 高压直流输电原理与运行[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 185-205.
- [17] 蒲莹, 厉璇, 马玉龙, 等. 网侧分层接入 500 kV/1000 kV 交流电网的特高压直流系统控制保护方案[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3081-3087.  
Pu Ying, Li Xuan, Ma Yulong, et al. Control and protection system scheme on UHVDC with hierarchical connection to 500 kV/1000 kV AC systems[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3081-3087 (in Chinese).
- [18] 陶瑜. 直流输电控制保护系统分析及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 44-69.
- [19] 杨万开, 印永华, 班连庚, 等.  $\pm 1100$  kV 特高压直流系统试验方案研究[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2815-2821.  
Yang Wankai, Yin Yonghua, Ban Liangeng, et al. Study on  $\pm 1100$  kV UHVDC system commissioning test program[J]. Power System Technology, 2015, 39(10): 2815-2821(in Chinese).



杨万开

收稿日期: 2018-03-07。

作者简介:

杨万开(1960), 男, 通信作者, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为高压直流输电技术, E-mail: wankai@epri.sgcc.com.cn;

贾一超(1993), 男, 硕士, 研究方向为高压直流输电技术, E-mail: jiayichao0614@163.com;

雷霄(1985), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为直流输电技术与大电网仿真分析, E-mail: leixiao@epri.sgcc.com.cn.

(责任编辑 马晓华)