

DOI: 10.7667/PSPC171267

基于 ADPSS 的特高压直流输电控制保护系统开放式建模

谭阳琛¹, 刘畅¹, 李程昊², 姚伟¹, 张振安², 饶宇飞², 文劲宇¹

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北 武汉 430074;
2. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

摘要: 目前特高压直流输电控制保护系统的仿真模型主要是基于典型的控制保护结构进行构建, 难以准确地模拟实际特高压直流输电特性, 且商业仿真软件大多提供封装式模块, 难以根据实际情况进行修改和自定义建模。因此有必要搭建开放式特高压直流输电控制保护模型, 以便准确地模拟实际特高压直流输电工程的控制保护特性。ADPSS 可实现交直流机电暂态与电磁暂态混合仿真, 在解决交直流混联电网建模问题上具备独有的优越性。在 ADPSS 平台上搭建了基于实际特高压直流输电工程的开放式控制保护系统, 包括完整的换流器控制系统、换相失败预测控制与换相失败保护等。通过对比实际工程实验和所搭建的仿真模型在控制指令阶跃响应仿真与逆变侧交流系统故障仿真下的结果, 验证了基于 ADPSS 的控制保护系统模型的准确性和有效性。

关键词: 特高压直流输电; 控制保护系统; 开放式建模; 换流器控制; ADPSS

Open-style model of UHVDC control and protection system based on ADPSS

TAN Yangchen¹, LIU Chang¹, LI Chenghao², YAO Wei¹, ZHANG Zhenan², RAO Yufei², WEN Jinyu¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: At present, the simulation models of UHVDC transmission control and protection system are mainly based on typical control and protection structures, which makes it hard to simulate actual UHVDC transmission characteristics. Besides, most commercial simulation softwares provide encapsulated modules, which are difficult to modify and customize modeling according to the actual situation. For the reasons above, it is of vital importance to establish an open-style UHVDC transmission control and protection model to simulate the characteristics of actual UHVDC transmission projects. ADPSS has unique advantages in modelling AC/DC hybrid power grid because it can realize hybrid electromagnetic and electromechanical transient simulation of large-scale AC/DC power system. Using ADPSS, it builds an open-style UHVDC transmission control and protection system based on practical projects, including converter control, the commutation failure prevention and the commutation failure protection. The accuracy and effectiveness of the model are verified by comparing the outputs of control instruction step response simulation and inverter side AC fault simulation with the same measurements of practical experiment.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900800).

Key words: UHVDC transmission; control and protection system; open modelling; converter control; ADPSS

0 引言

特高压直流输电具有输送电压等级高、输送容量大等优点, 已成为我国电网发展的主要趋势^[1]。随着我国特高压直流输电的快速发展, 出现了诸如

换相失败^[2-4]等问题, 需要对其进行深入研究。电磁暂态仿真具有现象刻画准确、数值稳定性好等特点, 非常适用于特高压直流输电相关问题的研究, 因此有必要建立特高压直流输电系统的电磁暂态模型^[5]。

现有的商业软件 PSCAD/EMTDC 等的特高压直流输电电磁暂态模型大多基于封装式模块搭建, 且封装式控制保护模块中缺少实际直流工程中关键

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900800)

的控制保护功能,如等相位间隔触发控制^[6]、旁通对控制^[7]、换相失败预测控制^[8]与换相失败保护^[9]等,以致于现有特高压直流输电模型难以准确模拟实际特高压直流输电特性。此外,由于封装式模型中难以添加上述控制保护功能,因此为了准确模拟实际工程中的直流输电的控制保护特性,需要建立能够根据实际控保系统特性进行任意修改的开放式直流输电控保系统的模型。开放式的建模方式可以进行基于用户需求的自定义模型搭建,而且开放式模型中所有的中间变量均可以自由输出,方便进行模型调试。目前有文献在实际控制保护功能开放式建模方面开展了研究,文献^[10]提出了一种特高压直流输电实际控制保护系统的建模方法,但是没有搭建实际工程中比较关键的控制保护功能。文献^[11]搭建了一套完整的主控制、极控制、换流器控制系统,而且触发控制采用了实际工程中使用的等相位间隔触发控制,但是仍然缺少实际工程中关键的换相失败预测控制与换相失败保护。

不同的仿真平台具有不同的特点,因此,需要根据不同的研究目的选择不同的仿真平台。文献^[12]在 ATP/EMTP 中搭建了高压直流输电电磁暂态模型,但是该平台仅能实现电磁暂态仿真。为开展交直流大电网的研究,需要建立交直流混联系统的模型,因此有必要针对直流系统建立电磁暂态模型,针对交流系统建立机电暂态模型,进行混合仿真。ADPSS 是中国电力科学研究院研发的基于高性能 PC 机群的全数字仿真系统,可实现大规模交直流系统机电暂态和电磁暂态的实时和超实时仿真。文献^[13]基于 ADPSS/ETSDAC 封装式的特高压直流控制模块搭建了直流输电系统,但是其控制系统基于 CIGRE 标准测试系统,控制方式简单,仿真结果与实际工程有较大误差^[14]。

本文基于中国电力科学研究院开发的高性能仿真平台 ADPSS 搭建了开放式的换流器控制系统,在阀控制系统中自定义搭建了等相位间隔触发控制与旁通对控制,基于实际直流工程的控制保护系统搭建了换相失败预测控制与换相失败保护。通过将模型与实际工程对比,验证了模型的正确性。

1 ADPSS 平台简介

电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 与 RTDS 等均可以实现电磁暂态仿真,但是建立交直流混联电网全系统的电磁暂态模型从经济性方面考虑是难以实现的^[15]。ADPSS 可以将交直流混联电网分为电磁暂态子网和机电暂态子网,直流电网部分采用电磁暂态模型,在 ADPSS 中的电磁暂态计算平台中

进行仿真;交流电网部分采用机电暂态模型,在 ADPSS 中的机电暂态计算平台中进行仿真。ADPSS 提供电磁暂态计算平台与机电暂态计算平台的接口模型,实现电磁暂态模型与机电暂态模型的信息交互^[16]。基于以上功能 ADPSS 可以实现交直流机电暂态与电磁暂态混合仿真,可以更好地用于研究交直流混联电网。

ADPSS 平台不仅能实现交直流机电暂态与电磁暂态混合仿真,还能实现实时与超实时仿真。ADPSS 利用高性能 PC 机群的多节点结构和高速本地通讯网络,采用网络并行计算技术对计算任务进行分解,可以实现大规模交直流系统实时与超实时仿真。该平台还具备性价比高、扩展性好、软硬件接口灵活多样等特点^[17]。

综合而言,由于 ADPSS 具有以上优势,本文选择在 ADPSS 的电磁暂态计算平台 ETSDAC 上建立符合实际工程控制保护功能的特高压直流输电电磁暂态开放式模型,可为后续研究大规模交直流混联电网奠定模型基础。

2 特高压直流一次系统建模

本文基于 ADPSS 搭建的特高压直流输电一次系统参照哈-郑直流工程建立,特高压直流输电系统的一次结构如图 1 所示,其包含交流系统、直流输电线路、整流侧及逆变侧换流站。每个换流站包含两极,每极由一个高端阀组和一个低端阀组组成。模型输送的额定功率为 8 000 MW,额定直流电流为 5 kA,额定直流电压为 ± 800 kV。两侧交流系统采用具有一定连接阻抗的等值电压源模型,逆变侧交流系统的短路比为 2,整流侧交流系统的短路比为 2.28。整流侧交流系统额定电压为 530 kV,逆变侧为 525 kV。换流阀采用双桥 12 脉波形式,换流阀中晶闸管最小熄弧角设为 12° 。每个 12 脉波换流阀的上、下桥分别通过 Y/Y 接线的换流变压器及 Y/D 接线的换流变压器与交流系统相连,上、下桥交流系统相位相差 30° 。各变压器的参数如表 1 所示,I 为逆变侧,R 为整流侧。直流输电线路采用贝杰龙电磁暂态模型,直流输电线路的总长度为 2 110 km。直流输电线路的参数:电阻为 $0.005 \Omega/\text{km}$,电感为 $0.001\ 699 \text{ H}/\text{km}$,电容为 $0.011\ 72 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

表 1 换流变压器参数

Table 1 Parameters of converter transformers

参数	整流侧		逆变侧	
	Y/D	Y/Y	Y/D	Y/Y
额定容量/MVA	1080	1080	1080	1080
绕组电压/kV	525/172	525/172	525/168	525/168
短路阻抗/%	14.99	14.99	14.99	14.99

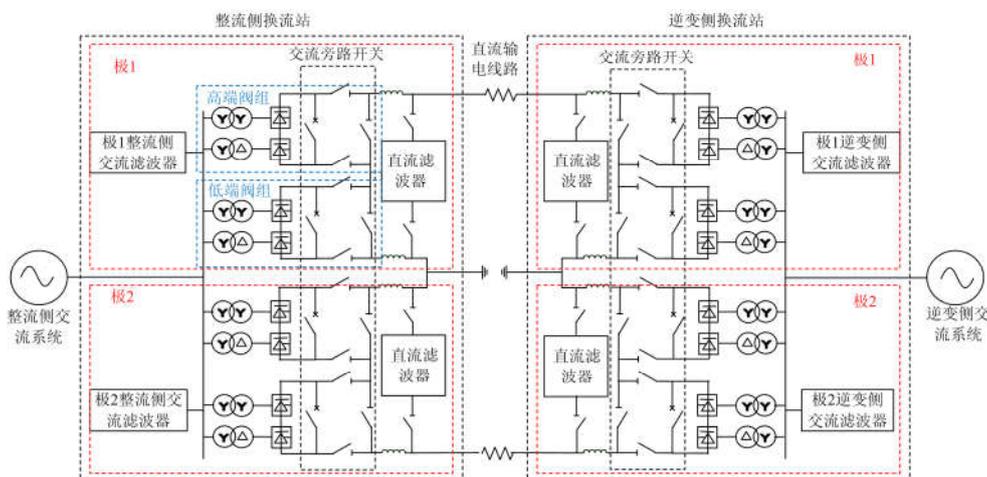


图 1 特高压直流输电系统基本结构

Fig. 1 Basic structure of UHVDC

3 基于 ADPSS 的自定义换流器控制建模

特高压直流输电采用分层控制的方式, 分为双极控制、极控制和换流器控制三个层次^[18-19]。系统的控制保护整体逻辑如图 2 所示。

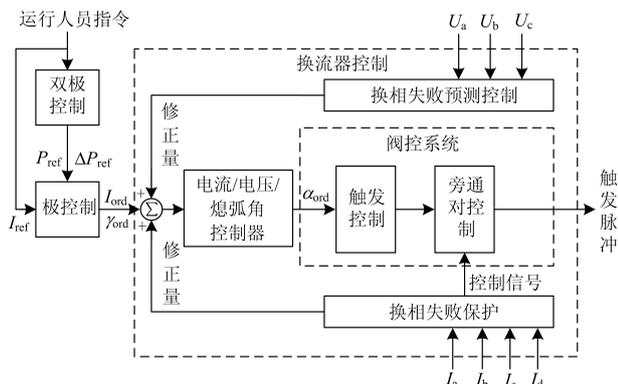


图 2 特高压直流输电控制保护系统

Fig. 2 Control and protection scheme of UHVDC

为应对特高压直流输电系统中常发生的换相失败故障, 在实际特高压直流输电工程中均配备有换相失败预测控制及换相失败保护模块。

图 2 中, P_{ref} 表示直流功率输送指令, ΔP_{ref} 为快速功率变化指令, I_{ref} 为期望电流值, I_{ord} 为电流指令值, γ_{ord} 为熄弧角指令值, 通常设置为 17° , α_{ord} 为触发角指令值, U_a, U_b, U_c 及 I_a, I_b, I_c 表示交流侧电压电流, I_d 表示直流电流。

ADPSS 中换流器控制功能主要由封装的直流输电控制系统模块来实现, 但是该模块不能实现一些实际工程中比较重要的控制保护功能, 如等相位间隔触发控制与旁通对控制等阀控系统、换相失败

预测控制和换相失败保护。为了搭建更贴近实际工程的特高压直流输电模型, 本文利用 ADPSS 自定义模块搭建了换流器控制模型。

3.1 直流输电控制器的自定义建模

参照 ABB 公布的技术报告^[20]搭建了逆变侧的最大触发延迟角控制、电流调节器与电压调节器, 如图 3 所示。图 3 中 I_{ord} 为上层控制输出的电流指令值, γ_{ord} 为上层控制器输出的熄弧角指令值, U_{ord} 为上层控制器输出的直流电压指令值, α_{ord} 为逆变侧直流输电控制系统输出的触发角指令值; U_{mes} 为逆变侧测量的直流电压, I_{mes} 为逆变侧测量的直流电流; d_x 为相对感性压降, U_{dio} 为空载直流电压。最大触发延迟角控制^[21-22]主要根据式(1)实现。

$$\beta = \cos^{-1}[\cos \gamma_{ord} - 2d_x \frac{I_{ord}}{U_{dio}} - K(I_{ord} - I_{mes})] \quad (1)$$

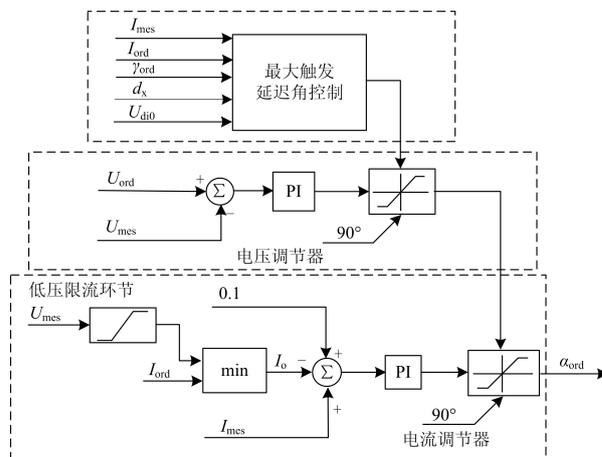


图 3 逆变侧控制器的结构与配合方式

Fig. 3 Structure and coordination of inverter side controllers

逆变侧控制器的配合方式为：最大触发延迟角控制的输出为电压调节器的上限幅值，电压调节器的输出作为电流调节器的上限幅值，电流调节器的输出即为最终的触发角指令值。正常运行情况下，电压调节器的直流电压指令值高于额定运行电压，并且设定的逆变侧直流电流指令偏差为 0.1 p.u.，所以逆变侧是最大触发延迟角控制进行控制。图 4 为

ADPSS 中搭建的逆变侧控制模型，AMAX 为最大触发延迟角控制输出，VCA 输出为电压调节器输出，CCA 输出为电流调节器输出。整流侧没有最大触发延迟角控制，只有电流调节器与电压调节器，而且整流侧控制器的协调配合方式与逆变侧不同，电压调节器的输出作为电流调节器的下限幅，电流调节器的输出作为最终的触发延迟角指令值。

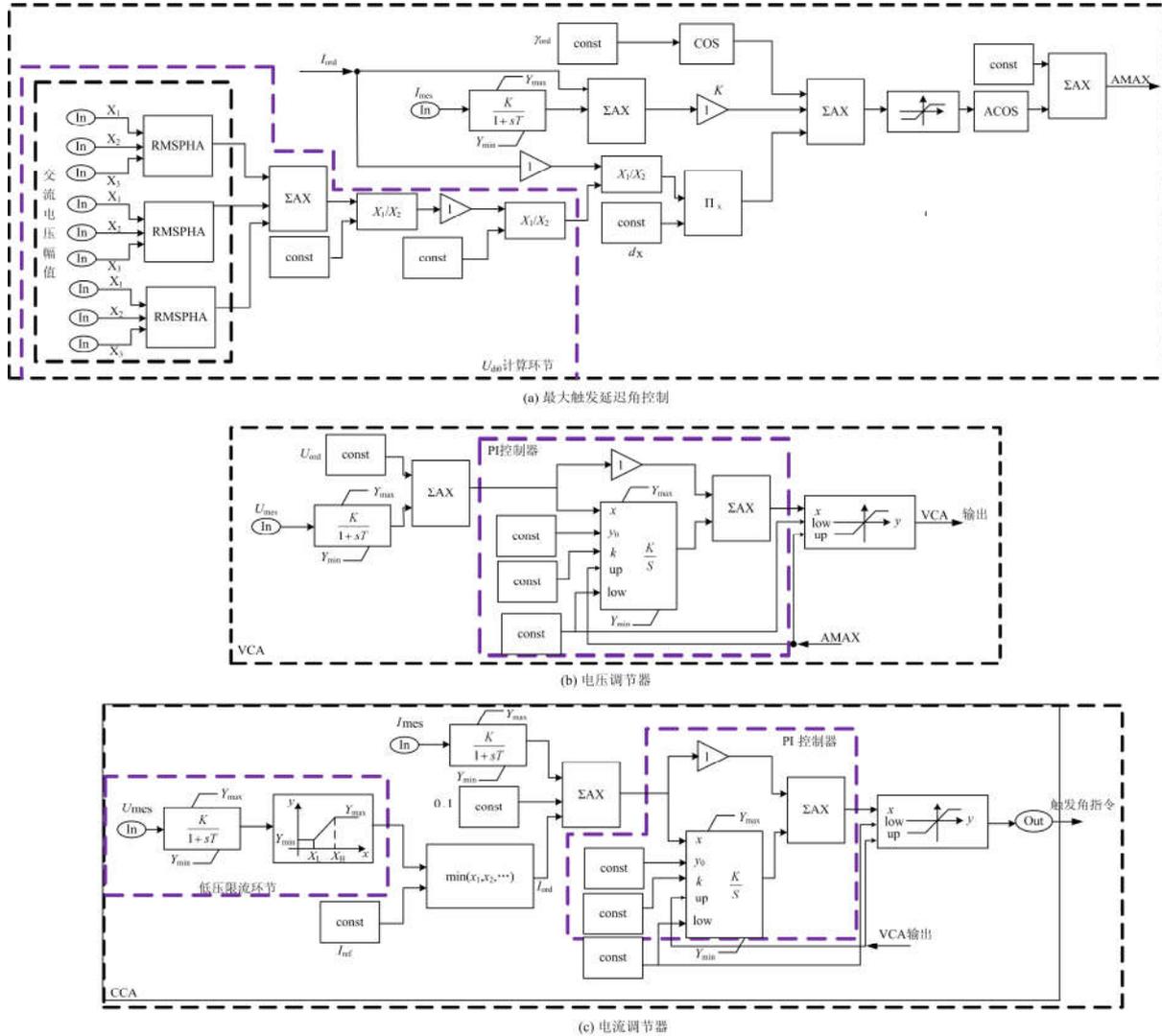


图 4 基于 ADPSS 搭建的逆变侧控制器模型

Fig. 4 Controllers of inverter side based on ADPSS

3.2 阀控系统自定义建模

3.2.1 旁通对控制建模

旁通对是指连接于同一相的一对晶闸管。当这两个晶闸管同时导通时，称为投入旁通对。在开放式阀控系统模型中加入实际工程中使用的旁通对控制功能，旁通对控制功能以 6 脉波桥为基本单元独立配置，其控制逻辑如图 5 所示。F₁~F₆ 分别表示六

个晶闸管的触发信号，U_a、U_b、U_c 代表交流侧电压。p₁~p₆ 分别表示等相位间隔触发系统给晶闸管 1~6(VT₁~VT₆)分配的触发脉冲；BPPO 为旁通对投入信号，CPC 为闭锁信号。

假设当 BPPO 信号发出时，图 5 所示换流桥中 VT₁ 与 VT₂ 处于导通状态，则旁通对控制信号变化情况如表 2 所示。表中 × 表示无论 0, 1 信号均无关。

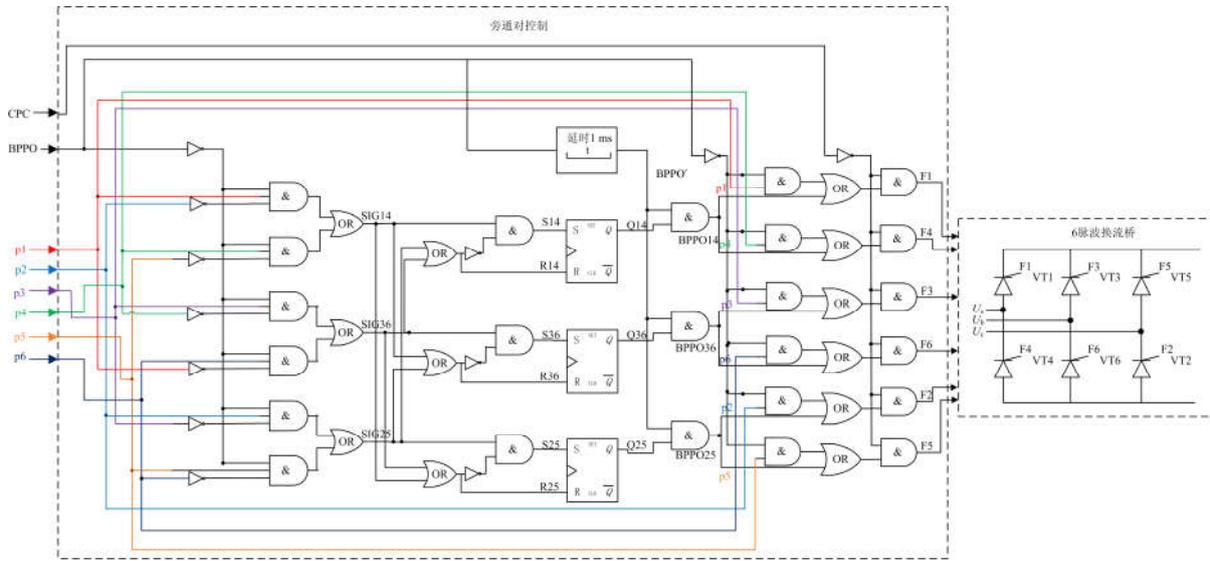


图 5 旁通对控制结构

Fig. 5 Control scheme of bypass pair

表 2 旁通对控制信号

Table 2 Signals for bypass pair control

信号	1 ms 以内	1 ms 之后
BPPO	1	1
BPPO'	0	1
p1	1	×
p2	1	×
p3	0	×
p4	0	×
p5	0	×
p6	0	×
SIG14	0	×
SIG36	0	×
SIG25	1	×
BPPO14	0	0
BPPO36	0	0
BPPO25	0	1
CFC	0	0
F1	0	0
F2	0	1
F3	0	0
F4	0	0
F5	0	1
F6	0	0

可见, BPPO 信号发出后 1 ms 以内 F1~F6 均为 0, 所有触发脉冲均停发, 但由于晶闸管为半控型器件, 因此 VT₁ 和 VT₂ 仍继续导通。1 ms 后, F2、F5 为 1, VT₂ 和 VT₅ 作为旁通对导通, 其余晶闸管均关断。

采用该控制逻辑, 可以使旁通对信号发出之前最后导通的晶闸管所在上下桥臂作为旁通对导通, 避免了晶闸管的频繁开断。

3.2.2 等相位间隔触发控制建模

等相位间隔触发控制是换流器控制中非常重要的一部分, 下面对等相位间隔触发控制建模进行详细的描述。等相位间隔触发控制如图 6 所示, 图中 t_{pll} 为触发时刻与相应线电压过零点时间之差(阀 1 对应 U_{ac}), θ 为相邻两次触发间隔角, α_{pll} 为锁相角。

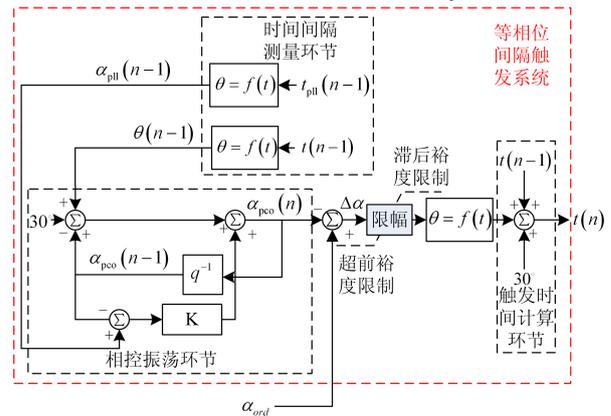


图 6 等相位间隔触发控制

Fig. 6 Diagram of equal phase triggered controller

首先测量上一次的 $\alpha_{pll}(n-1)$ 与 $\theta(n-1)$, 将以上两个量输入到相控振荡环节, 相控振荡环节经过式(2)所示的计算输出的 $\alpha_{pco}(n)$, 经过限幅环节并转换成时间间隔加在上次触发的时间上得到本次触发的时间。

$$\begin{cases} \alpha_{\text{pco}}(n) = \alpha_{\text{pco}}(n-1) + m_1 + m_2 \\ m_1 = \theta(n-1) - 30^\circ \\ m_2 = k(\alpha_{\text{pll}}(n-1) - \alpha_{\text{pco}}(n-1)) \end{cases} \quad (2)$$

3.3 换相失败控制保护建模

交流系统故障或晶闸管触发脉冲的不正常产生均可能导致换相失败，从而恶化换流阀运行条件。我国特高压直流输电系统均配备有换相失败预测控制及换相失败保护。

3.3.1 换相失败预测控制

换相失败预测控制检测交流系统故障，并根据交流系统故障的严重程度，减少逆变侧触发角指令值，从而增加换相裕度以抑制换相失败。

首先，换相失败预测控制输入三相电压瞬时值，并基于交流零序电压检测出单相故障，同时基于交流电压 α/β 变换检测出三相故障^[23]。

检测出交流故障以后，根据交流故障的严重程度输出逆变侧触发角指令减少量，并将该量信号展宽 20 ms，发送给逆变侧控制器。

3.3.2 换相失败保护

实际特高压直流输电工程的换相失败保护动作时序如图 7 所示。



图 7 换相失败保护动作时序

Fig. 7 Action scheme of commutation failure protection

换相失败检测的判据如式(3)所示，其动作于换相失败导致的上下桥臂同时导通所造成的直流侧短路。

$$\begin{cases} I_d - I_{\text{acY}} > K_1 I_{\text{dn}} + 0.1 I_d \quad (\text{Y桥}) \\ I_{\text{acY}} < K_2 I_d \\ I_d - I_{\text{acD}} > K_1 I_{\text{dn}} + 0.1 I_d \quad (\text{D桥}) \\ I_{\text{acD}} < K_2 I_d \end{cases} \quad (3)$$

式中： I_{acY} 和 I_{acD} 为换流变阀侧电流； I_d 表示直流电流； K_1 、 K_2 为厂家设定值，设置 K_1 为0.1， K_2 为0.65。由于在换相失败过程中，上下桥臂导通的情况断续出现，因此换相失败检测信号在整个换相失败过程中也是间断的。检测到换相失败后，延时 3 ms 产生熄弧角指令增加信号，使逆变侧 γ_{ord} 增加 5° ，并发出换相失败告警信号。

换相失败信号在换相失败过程中断续出现，因此为了判断连续换相失败，将换相失败检测信号展宽至 300 ms。当持续接收到换相失败检测信号 2.6 s 后，发送直流闭锁指令，直流闭锁采用直流输电中

常用的 Y 闭锁指令，其流程如图 8 所示。

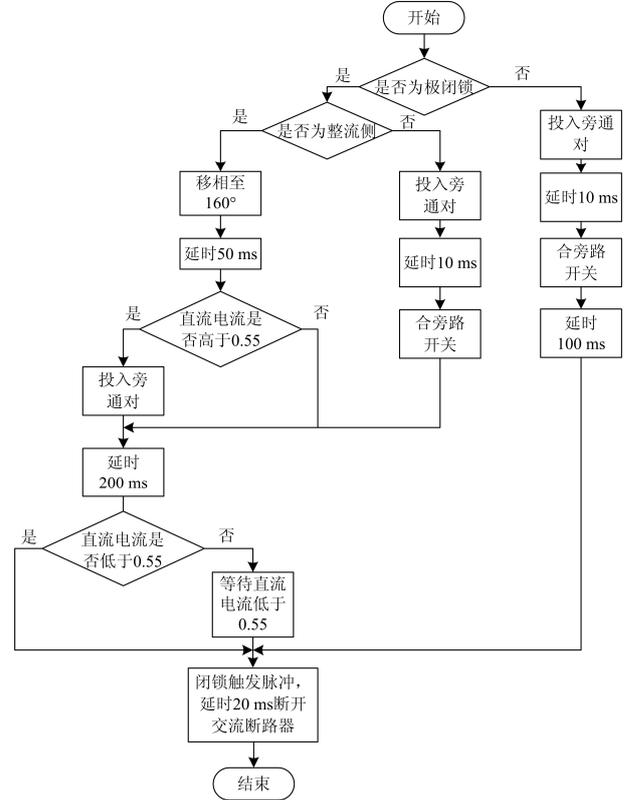


图 8 Y 闭锁流程

Fig. 8 Procedure of Y block

4 模型仿真实验

为了验证所搭建 ADPSS 模型的准确性，本文将 ADPSS 模型的仿真结果与控保联调实验的结果进行对比。控保联调实验是指实际直流输电控保设备在环的物理-数字混合仿真实验，实验平台中交直流一次电路在 RTDS 中通过数字建模实现，直流控制保护由实际的控保装置通过通信接口装置与 RTDS 相连构成。前两小节分别测试了换相失败预测控制与换相失败保护这两个模块的正确性，后两小节验证了模型整体的暂态特性。

4.1 换相失败预测控制模型开环验证

由 3.3.1 节的描述可知，换相失败预测控制的输入为交流系统三相电压瞬时值，输出为逆变侧控制系统的触发角指令减少值。首先得到控保联调实验中换相失败预测控制的输入值三相电压瞬时值以及输出值逆变侧控制系统的触发角指令减少值，以开环验证 ADPSS 模型换相失败预测控制的正确性。将上述三相电压数据输入到换相失败预测控制模块，对比模块输出的逆变侧控制系统的触发角指令减少值与控保联调实验相应的结果。图 9 即为换相失败预测控制测试对比图。

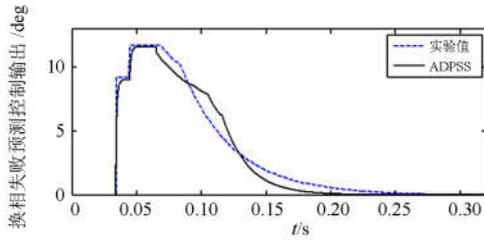


图 9 换相失败预测控制输出对比

Fig. 9 Comparison of the output of commutation failure prediction control

为了衡量所搭建模型与实际系统的拟合度, 定义一个类似相对误差平均值的量 E_{ave} , 如式(4)所示。

$$E_{ave} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|b_{i1} - b_{i2}|}{b_{n1}} \quad (4)$$

式中: N 为时间段内采样点数; b_{i1} 为 ADPSS 模型中待对比物理量输出; b_{i2} 为控保联调实验中该量的测量结果; b_{n1} 为控保联调实验中该量的最大值; N 为时间窗口内采样点数。

对比换相失败预测控制的输出, 取时间窗口为 0~0.32 s, 经计算, $E_{ave}=3.84\%$, 说明模型输出值与实验值的平均相对误差较小。

4.2 换相失败保护验证

直流系统严重的连续换相失败将会触发换相失败保护进行闭锁, 为了验证换相失败保护的功能需要触发直流系统闭锁。因此, 仅在此算例中将逆变侧交流系统的短路比设置为 0.8, 同时逆变侧交流系统发生严重的三相短路接地故障。换相失败保护的验证方法为: 验证换相失败仿真模型是否按照 3.3.2 节设计的闭锁逻辑动作。图 10 是在连续换相失败及 Y 闭锁时段内极 1 直流电流。

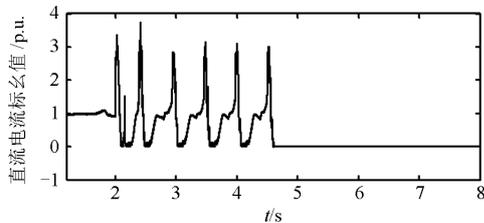


图 10 换相失败及 Y 闭锁过程的直流电流

Fig. 10 DC current in commutation failure and Y block process

仿真结果显示直流系统发生了严重的连续换相失败, 换相失败保护执行双极 Y 闭锁。

如图 11 所示高端阀组闭锁信号与低端阀组闭锁信号同时产生, 故极 1 执行极闭锁指令, 极闭锁信号发出的时刻为 4.617 s。

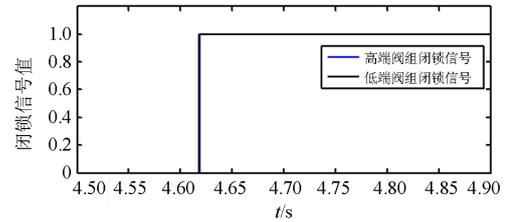
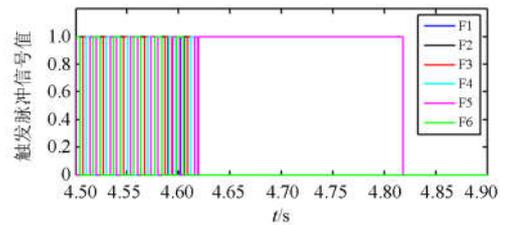


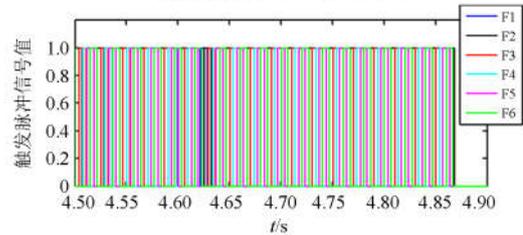
图 11 极 1 阀组闭锁信号

Fig. 11 Valve block signal of pole 1

图 12 与图 13 分别为阀组触发脉冲信号与直流电流低于 0.55 p.u. 的信号, 用于验证模型正确性。



(a) 逆变侧阀组触发脉冲信号



(b) 整流侧阀组触发脉冲信号

图 12 阀组触发脉冲信号

Fig. 12 Trigger pulse signal of valve group

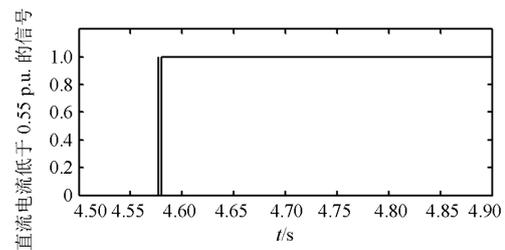


图 13 直流电流低于 0.55 p.u. 的信号

Fig. 13 Signal of DC current below 0.55 p.u.

图 12(a) 中 F1~F6 分别为逆变侧极 1 六脉波阀组阀 1 至阀 6 的触发脉冲。在极闭锁信号发出 1 ms 之后(4.618 s), 逆变侧投 2、5 旁通对; 由于直流电流在投旁通对之后一直小于 0.55 p.u., 如图 13 所示, 所以逆变侧只需在投旁通对并延时 200 ms 后(6.818 s)闭锁阀触发脉冲, 对照 3.3.2 节的闭锁控制逻辑, 逆变侧的闭锁控制正确动作。

图 12(b) 中 F1~F6 分别为整流侧极 1 六脉波阀

组 1~6 的触发脉冲。直流电流在极闭锁信号之后一直小于 0.55 p.u., 如图 13 所示, 故整流侧在极闭锁信号发出 50 ms 后不投入旁通对, 在极闭锁信号发出 250 ms 后(4.867 s)直接闭锁阀触发脉冲, 对照 3.3.2 节的闭锁控制逻辑, 整流侧闭锁控制正确动作。

4.3 阶跃仿真对比验证

为验证直流输电控制模型的动态特性, 参照控保联调实验在 ADPSS 模型中分别设置直流电流指令阶跃、直流电压指令阶跃与熄弧角指令阶跃, 对比模型的阶跃响应与控保联调实验中阶跃响应的结果。

表 3 为阶跃响应仿真的额定值、阶跃值以及阶跃时刻与恢复时刻的描述。

表 3 控制指令阶跃仿真设计

Table 3 Design of control instructions step simulation

阶跃类型	额定值	阶跃值	阶跃时刻/s	恢复时刻/s
直流电流	5 kA	2.5 kA	2.45	3.45
直流电压	742 kV	680 kV	2.35	3.18
熄弧角	17°	27°	2.4	3.22

模型与工程实验的阶跃响应对比结果如图 14 所示, 为了衡量阶跃响应过程中 ADPSS 模型与实验结果的拟合度, 采用 3.1 节中 E_{ave} 相同的定义, 不同的是分母 b_{n2} 取控保联调阶跃前的额定值, 并取时间窗口为 2.4~4 s, 相对误差的计算结果如表 4 所示。

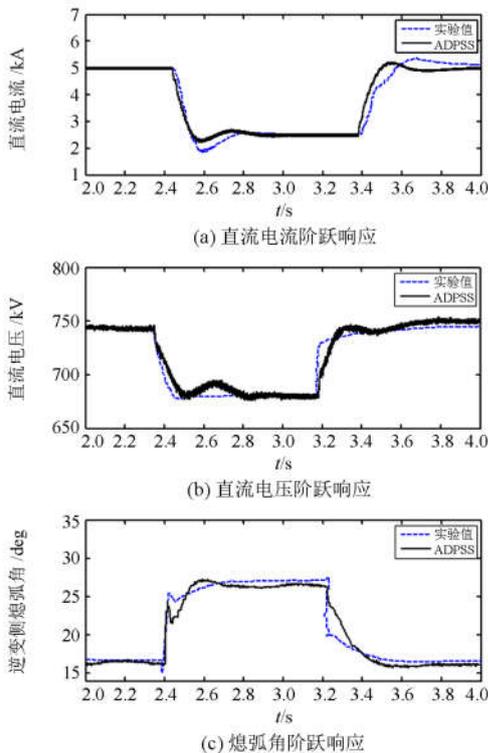


图 14 阶跃响应波形对比

Fig. 14 Comparison of step responses waveforms

表 4 阶跃仿真中相关量的 E_{ave} 值
Table 4 E_{ave} value of corresponding quality of step response simulation

阶跃指令类型	E_{ave}
直流电流	8.08%
直流电压	3.30%
熄弧角	4.17%

阶跃响应中, 直流电流、直流电压与熄弧角的平均相对误差均较小, 尤其是直流电压阶跃响应结果。说明 ADPSS 模型与控保联调实验在指令值阶跃过程有较好的拟合度。

为了衡量 ADPSS 模型与实验结果的吻合度, 本文还选取了阶跃响应指标进行对比, 如表 5 所示。

表 5 阶跃响应指标对比

Table 5 Comparison of step responses indexes

阶跃类型	对比对象	下调节时间/ms	下超调量	上调节时间/ms	上超调量
直流电流	ADPSS	296	10%	355	4.3%
	工程实验	329	28.6%	512	11.1%
直流电压	ADPSS	180	0%	280	0%
	工程实验	80	4.4%	350	0%
熄弧角	ADPSS	230	0%	200	1.01%
	工程实验	290	0%	180	0%

通过对比模型与实际工程的阶跃响应, 在一定程度上可以说明所搭建的 ADPSS 模型与实际直流输电工程比较吻合。但是, 阶跃响应过程仍然存在差别, 造成这些差别的主要原因是 ADPSS 模型的直流输电控制系统是在实际工程的基础上简化得来, 模型的控制结构与实际工程存在一定的差别。

4.4 逆变侧交流系统三相接地短路故障

为了验证模型在逆变侧交流系统发生三相接地故障后的暂态响应的正确性, 参照控保联调实验在 ADPSS 模型逆变侧交流系统设置三相接地短路故障, 故障持续时间为 0.1 s。将 ADPSS 模型输出的直流电流与整流侧触发角指令与工程实验结果进行对比, 如图 15 所示。

仍采用 E_{ave} 衡量交流系统故障后模型的暂态响应与实际工程的拟合度, 时间间隔取 2.4~3.8 s, 不同的是分母 b_{n3} 取控保联调实验输出量的平均值, 直流电流与整流侧触发角的 E_{ave} 值如表 6 所示。

表 6 直流电流与触发角的 E_{ave}

Table 6 E_{ave} values of DC current and trigger angle

物理量	E_{ave}
直流电流	6.72%
触发角	10.27%

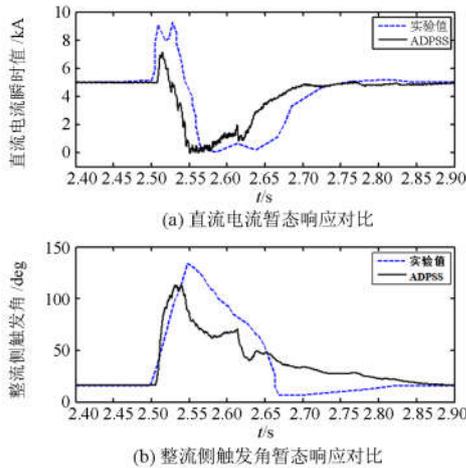


图 15 暂态响应波形对比

Fig. 15 Comparisons of transient response waveforms

经 ADPSS 模型仿真发现, 在逆变侧发生三相接地故障后, 直流系统发生了换相失败, 这与控保联调实验的结果是相同的。直流电流与整流侧触发角指令值在暂态过程中变化趋势基本相似, E_{ave} 值分别为 6.72% 与 10.27%。模型与实际系统在逆变侧交流系统故障后的暂态过程是比较吻合, 但是模型的输出与控保联调实验值仍然存在一定的误差, 误差产生的主要原因与 4.3 节所分析的一致。

5 结论

1) 利用控保联调实验中换相失败预测控制的部分数据, 换相失败预测控制输出与实际工程结果吻合度高, 验证了模型的准确性。在 ADPSS 模型中进行连续换相失败仿真使换相失败保护动作, 换相失败闭锁逻辑满足设计要求, 验证了换相失败保护与旁通对控制的正确性。

2) 参照控保联调实验在 ADPSS 模型中设置了控制指令阶跃仿真与逆变侧交流系统故障仿真, ADPSS 模型结果与控保联调实验结果吻合度高, ADPSS 模型可有效地模拟实际工程控制保护特性, 可为后续开展交直流混联电网方面的研究提供较为详细的模型基础。

3) 提出了根据实际控制保护特性任意修改控保模型的开放式建模思路, 基于 ADPSS 自定义模块搭建了实际控制保护系统的关键部分, 模型输出的结果与实际控保系统基本吻合, 但是动态误差仍然存在, 产生动态误差的主要原因是控保模型与实际控保系统仍存在差异, 建模工作还需进一步完善。

参考文献

[1] 马为民, 樊继超. 特高压直流输电系统规划设计[J].

- 高电压技术, 2015, 41(8): 2545-2549.
- MA Weimin, FAN Jichao. Planning and design of UHVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2545-2549.
- [2] 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-MCC hybrid HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 301-310.
- [3] 许加柱, 罗隆福, 李季, 等. 交流系统故障对滤波换相换流器的影响分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 144-150.
- XU Jiazhu, LUO Longfu, LI Ji, et al. Analysis of the impact of AC system faults on filter commutation converter in HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 144-150.
- [4] 刘青, 廖诗武, 姚伟, 等. 计及并联电容器补偿的多馈入交直流系统改进有效短路比指标[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 8-15.
- LIU Qing, LIAO Shiwu, YAO Wei, et al. An improved effective short circuit ratio of multi-infeed AC/DC power system considering shunt capacitors[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 8-15.
- [5] ZOU G B, HUANG Q, SONG S L, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.
- [6] 刘磊, 林圣, 何正友. 基于 PSCAD/EMTDC 的 HVDC 换流器触发控制建模仿真[J]. 四川电力技术, 2017, 40(1): 14-18.
- LIU Lei, LIN Sheng, HE Zhengyou. HVDC converter trigger control modeling and simulation based on PSCAD/EMTDC[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2017, 40(1): 14-18.
- [7] 吕茵, 张文, 劳颖然, 等. 特高压换流站投旁通对的策略及改进[J]. 高压电器, 2015, 51(3): 76-81.
- LÜ Yin, ZHANG Wen, LAO Yingran, et al. Discussion on application schemes of UHVDC converter station by-pass pair[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3): 76-81.
- [8] 郑超, 周静敏, 李惠玲, 等. 换相失败预测控制对电压稳定性影响及优化措施[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 179-182.
- ZHENG Chao, ZHOU Jingmin, LI Huiling, et al. Impact of commutation failure prediction control on voltage stability and optimization method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 179-182.
- [9] 徐朋见, 黄金海, 许静静, 等. 宾金特高压直流换相失败保护的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 140-146.
- XU Pengjian, HUANG Jinhai, XU Jingjing, et al. Study of Bin-Jin UHVDC project commutation failures protection[J]. Power System Protection and Control,

- 2017, 45(2): 140-146.
- [10] 雷霄, 许自强, 王华伟, 等. ± 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 ± 800 kV UHVDC transmission project and its application[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1359-1364.
- [11] 万磊, 丁辉, 刘文焯. 基于实际工程的直流输电控制系统仿真模型[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 629-634.
WAN Lei, DING Hui, LIU Wenzhuo. Simulation model of HVDC transmission control system based on practical engineering[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 629-634.
- [12] 董曼玲, 谢施君, 何俊佳, 等. 采用 ATP/EMTP 的 CIGRE HVDC 建模与仿真[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 796-804.
DONG Manling, XIE Shijun, HE Junjia, et al. CIGRE HVDC modeling and simulation of CIGRE HVDC using ATP/EMTP[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 796-804.
- [13] 江涵, 李锐, 陈绪江, 等. 基于 ETSDAC 的 ± 800 kV 特高压直流输电系统仿真建模研究[J]. 智能电网, 2016, 4(7): 661-668.
JIANG Han, LI Rui, CHEN Xujiang, et al. ± 800 kV ultra-high voltage direct current power transmission system simulation model based on ETSDAC[J]. Smart Grid, 2016, 4(7): 661-668.
- [14] 关红兵, 黄立滨, 周鹏鹏, 等. 基于 RTDS 的高压直流控制系统锁相环仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 129-132.
GUAN Hongbing, HUANG Libin, ZHOU Pengpeng, et al. Application of improved PLL for HVDC transmission system based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 129-132.
- [15] 陈磊, 张侃君, 夏勇军, 等. 基于 ADPSS 的高压直流输电系统机电暂态-电磁暂态混合仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 137-142.
CHEN Lei, ZHANG Kanjun, XIA Yongjun, et al. Electromechanical-electromagnetic transient hybrid simulation on HVDC power transmission system based on ADPSS[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 137-142.
- [16] 朱旭凯, 周孝信, 田芳, 等. 基于电力系统全数字实时仿真装置的大电网机电暂态-电磁暂态混合仿真[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 26-31.
ZHU Xukai, ZHOU Xiaoxin, TIAN Fang, et al. Hybrid electromechanical simulation to transient process of large-scale power grid on the basis of ADPSS[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 26-31.
- [17] 田芳, 宋瑞华, 周孝信, 等. 全数字实时仿真装置与直流输电控制保护装置的闭环仿真方法[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 82-86.
TIAN Fang, SONG Ruihua, ZHOU Xiaoxin, et al. Method for closed-loop simulation of advanced digital power system simulator and HVDC control and protection devices[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 82-86.
- [18] 张庆武, 王永平, 陈小军, 等. 特高压直流控制保护系统设计及开发[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 88-93.
ZHANG Qingwu, WANG Yongping, CHEN Xiaojun, et al. Design and development of UHVDC control and protection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 88-93.
- [19] 杨光亮, 邵能灵, 郑晓东, 等. ± 800 kV 特高压直流输电控制保护系统分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(12): 3277-3283.
YANG Guangliang, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Discussion of ± 800 kV UHVDC transmission control and protection system[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12): 3277-3283.
- [20] ABB power systems technical report of converter firing control[R]. Zurich: The Three Gorges-Changzhou ± 500 kV DC Transmission Project, 2000.
- [21] 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, 37(7): 1809-1816.
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, 37(7): 1809-1816.
- [22] 王海军, 黄义隆, 周全. 高压直流输电换相失败响应策略与预测控制技术路线分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 125-131.
WANG Haijun, HUANG Yilong, ZHOU Quan. Analysis of commutation failure response strategies and prediction control technology in HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 125-131.
- [23] 王学之, 周全, 国建宝. 南方电网直流换相失败机理及判别方法[J]. 南方电网技术, 2013, 7(6): 44-47.
WANG Xuezhi, ZHOU Quan, GUO Jianbao. The mechanism and discrimination method of HVDC commutation failure in China Southern Power Grid[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(6): 44-47.

收稿日期: 2017-08-22; 修回日期: 2017-11-28

作者简介:

谭阳琛(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流输电建模; E-mail: m201671305@hust.edu.cn

刘畅(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为直流输电及电力系统稳定控制; E-mail: liuchang_sgo@qq.com

姚伟(1983—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为交直流混联电网的稳定分析与控制。E-mail: w.yao@hust.edu.cn

(编辑 张爱琴)