DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190409

基于工程平台的直流控制保护系统全数字仿真建模与应用

苏进国[1]，李 泰[1]，张爱玲[1]，胡永昌[1]，彭 忠[1]，李艳梅[1]，胡卫东[2]

(1.许继电气股份有限公司，河南 许昌 461000;
2.许昌开普检测研究院股份有限公司，河南 许昌 461000)

摘要：为了准确模拟实际直流系统的运行特性，提出了基于工程平台HCM3000的全数字仿真建模方法。首先，介绍了仿真建模总体方案，说明了工程平台建模流程。其次，对由硬件装置实现的功能进行数字模拟，对图形化软件程序的通信接口进行改造，并转换为仿真可执行程序；通过任务调用程序，实现控制保护代码的有序调用。最后，以扎鲁特-青州特高压直流工程为例，建立直流系统仿真模型，完成大量功能性能试验，并与实际工程现场波形比对。对比结果表明，仿真模型与实际工程运行特性高度一致，验证了全数字仿真建模的准确性、有效性，能够再现直流工程的运行特性，对于实际工程的运行和维护具有重要的指导价值。

关键词：高压直流输电；HCM3000；图形化程序；控制保护装置；全数字仿真；模型验证

Full-digital simulation modeling and application for control and protection system based on HVDC project platform

SU Jinguo[1], LI Tai[1], ZHANG Ailing[1], HU Yongchang[1], PENG Zhong[1], LI Yanmei[1], HU Weidong[2]

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China;
2. Xuchang KETOP Testing Research Institute Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: In order to simulate the operating characteristics of actual DC system accurately, a full-digital simulation modeling method is proposed based on HCM3000 control and protection platform. Firstly, simulation modeling scheme is introduced, which explains the modeling process of project platform. Secondly, the function realized by hardware device is simulated digitally. Communication interface of the graphical software program is modified and then converted into simulation executable program. Through the task calling program, the order calling of control and protection codes is realized. Finally, taking Zhalute-Qingzhou UHVDC transmission project as an example, DC system simulation model is established. A large number of function performance tests and comparison with actual project waveforms are completed. Results show that simulation model is highly consistent with actual project operating characteristics, which verifies the accuracy and effectiveness of full-digital simulation model. It can reproduce operating characteristics of DC system, which has important guiding value for actual project operation and maintenance.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SGTYHT/17-JS-199) “Key Technology Research and Application of Field Test and Operation & Maintenance Optimization of UHVDC Control and Protection System”.

Key words: HVDC transmission; HCM3000; graphical program; control and protection device; full-digital simulation; model validation

0 引言

目前，我国有30余条高压/特高压直流输电工程陆续建成投运，为“西电东送”和落实大气污染防治行动计划做出了重要贡献[1-6]。为保障直流工程运行的安全稳定，需要搭建功能完善的闭环仿真系统，用于开展直流系统运行试验分析与验证[7-13]。

在直流输电仿真试验研究中，用于电磁暂态仿真的软件主要有实时数字仿真器RTDS(Real Time Digital Simulator)、HYPERSIM、电力系统全数字实

基金项目：国家电网科技项目资助(SGTYHT/17-JS-199)“特高压直流控制保护系统现场测试及运维优化关键技术研究与应用”

时仿真装置ADPSS (Advanced Digital Power System Simulator)等，通过接入工程现场单套配置的控制保护装置，实现数模混合实时仿真，达到直流输电系统精确仿真，但是需要配备大规模的控制保护装置，占地面积较大，设备费用高，仿真建模周期长，可扩展性差[14-19]。另外，以上仿真软件可以搭建实际控制保护系统逻辑简化的全数字模型，但仿真模型与工程现场的逻辑功能和试验结果差距较大，且建模工作量大、易出错，模型准确性差[20]。文献[21]介绍了基于工程的开放式全数字控制保护仿真建模，并进行了试验验证，但仿真模型试验结果与工程现场仍存在较大误差。文献[22]介绍了基于模块化的直流输电实际控制保护系统建模方法，但是缺少实际工程中详细的控制保护功能。文献[23]以自定义的方式建立了一套基于实际工程控制器的仿真模型，包括触发控制、主控制和极控制等部分，但是该模型仍是对实际控制保护系统的简化，缺少与实际控制保护系统的完整模拟。因此，为了更加准确地模拟实际直流系统动态过程，准确反映直流的运行特性，提高模型功能的完整性，降低仿真建模成本，迫切需要建立基于实际工程平台控制保护装置的数字仿真模型。

本文基于直流工程 HCM3000 控制保护平台，对由硬件装置实现的功能进行数字模拟，对图形化软件程序进行通信接口改造与系统优化，并转换为仿真可执行文件，通过任务调用程序，实现仿真程序的有序调用。以扎鲁特-青州特高压直流工程为例，搭建直流系统全数字仿真模型，完成大量功能性能的仿真试验，通过仿真模型与实际工程试验波形比对，验证了全数字仿真建模方法的准确性和有效性。

1　工程平台建模方案

1.1 仿真建模方案

仿真模型的开发基于 HCM3000 直流控制保护平台，如图 1 所示。首先对由硬件装置实现的功能进行数字模拟，同时对图形化软件 ViGET 程序进行接口改造；其次，将工程程序转换为 C 代码；然后添加接口程序与任务调用程序，将源文件编译链接生成仿真模型库文件；最后创建仿真模型与验证测试。

1.2 HCM3000 控制保护平台

HCM3000 直流控制保护平台是许继自主研发的一款面向直流输电的嵌入式工业控制系统，由硬件装置/机箱、软件 ViGET 程序以及通信接口等部分构成。ViGET 软件作为工程可视化编程工具，具有程序编辑、在线调试等功能，可高效、快捷地开

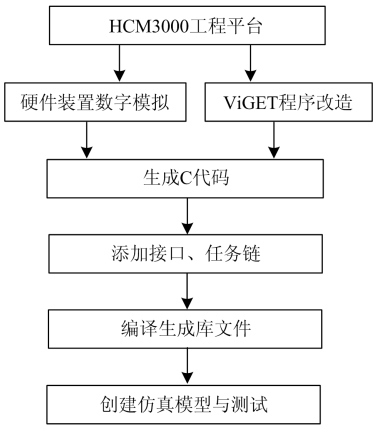


图 1 仿真建模方案

Fig. 1 Simulation modeling scheme

发工程应用程序。硬件装置/机箱是 ViGET 软件控制保护程序运行的载体，支持多任务运行模式，具有多处理器并行处理能力，为控制保护系统庞大、复杂的逻辑提供强大的运行计算环境[24-25]。

2　硬件装置数字模拟

2.1 数字低通滤波

实际工程中，用于模拟量测量的板卡有多种，均含有硬件低通滤波环节。全数字仿真程序中，采用双线性变换法设计了数字低通滤波器，在截止频率以下与硬件滤波的特性一致。

2.2 锁相积分器

实际工程中，高精度相位、触发脉冲的产生均是在现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)中实现[26]。在全数字仿真系统中，数据变换及锁相积分环节如图 2 所示。

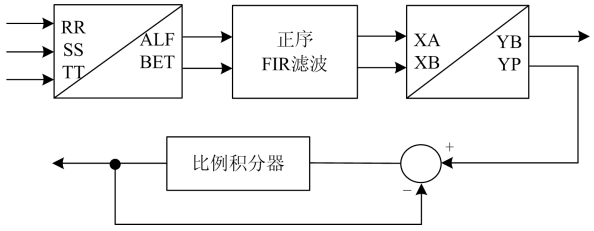


图 2 数据变换与锁相积分图

Fig. 2 Data conversion and phase-locked integrator schematic

从图 2 可以看出，交流三相电压 RR、SS、TT 经过α/β 变换，转换为直角坐标系下的 *ALF* 分量和 *BET*，公式如下：

$$\begin{cases} ALF = (2RR - SS - TT)/3 \\ BET = (SS - TT)/\sqrt{3} \end{cases} \tag{1}$$

正序 FIR 滤波器的计算公式为

$$Y(k)=\frac{1}{N}\sum_{j=0}^{N-1}X(k-j)\times factor(j) \tag{2}$$

式中：N 是 FIR 滤波器采样点个数；$X(k-j)$表示第 j 个采样点的数据；$factor(j)$ 是第 j 个采样点滤波器系数。将式(2)转换为矢量形式为

$$\begin{cases} YB=\sqrt{XA^2-XB^2} \\ YP=\dfrac{2}{\pi}\arctan\left(\dfrac{XB}{XA}\right) \end{cases} \tag{3}$$

式中：XA、XB 分别为交流电压的 α、β 分量；YB、YP 分别为交流电压的幅值、相位。

对式(3)中得到的相位 YP 经过比例积分环节反馈到积分输入处，与 YP 相位作差，最终输出精细相位数据。

2.3 触发脉冲生成

根据 FPGA 装置产生触发脉冲的原理，全数字仿真模拟触发脉冲产生功能如图 3(a)所示。根据锁相环输出的相位数据，依次产生 12 路相位，作为触发脉冲生成程序的输入，再依据极控制下达的触发角指令，二者以弧度为单位进行比较，当相位大于触发角时，产生某一相的脉冲产生指令，在判断当前阀状态(Ind)的基础上，按序产生等间隔的触发脉冲信号[27-28]。其中，阀所处的状态有正常触发、投旁通对、闭锁。

另外，为了获取精准的脉冲触发时刻，采用线性插值方法得到数值在 0~1 之间的插值信号，使阀精准导通触发。因此，触发脉冲产生程序的输出包含两个信号，分别为脉宽 120°的触发脉冲(FP)和数值为 0~1 之间的时间插值(FT)，如图 3(b)所示。

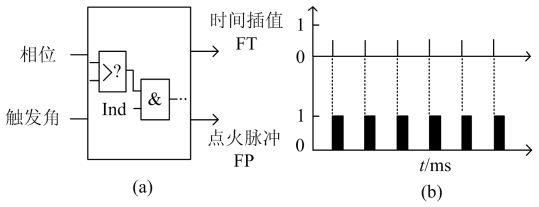


图 3 触发脉冲产生

Fig. 3 Schematic diagram of firing pulse generation

3 工程程序改造与系统简化

3.1 通信接口改造

对实际控制保护系统程序中局域网通信、即插式快速通信进行接口改造。

(1) 局域网(Local Area Network, LAN)通信，用于阀控与运行人员控制系统、直流站控的通信，对涉及的通信模块接收/发送地址重新配置。在全数字仿真系统中，阀控不向运行人员控制系统发送数据，只接收其数据；阀控只向直流站控发送数据，不接收其数据。

(2) 即插式快速通信(Inserted Fast Communication, IFC)，用于控制保护系统机箱之间的数据通信，对通信模块地址引脚数据重新配置。如阀控程序中配置：0 表示无用，1 表示发送/接收极控数据，2 表示发送/接收阀保护数据，可根据实际需要按序增加编号。

3.2 系统简化

对控制保护仿真程序进行以下简化处理：

(1) 实际工程平台采用控制冗余和保护三取二配置，仿真建模时不考虑冗余和三取二等相关功能，不考虑系统切换功能[29]。

(2) 实际工程中交/直流场开关控制配置非常复杂，对交/直流场开关及其联锁顺控操作进行简化，对交流场开关不做模拟，只保留直流站控对关键开关和刀闸控制。

(3) 精简人机操作接口，减少控制指令配置，保留控制保护系统的输入输出功能，包括控制器参数和保护定值输入、录波监视输出等接口。

3.3 代码转换

通过转换工具将工程控制保护系统图形化程序进行编译，对实际控保机箱中不同处理器程序分别转换成对应的 C 程序代码，如图 4 所示。C 程序中包括初始化程序、正常执行程序。初始化程序只在仿真开始前运行一次，主要用于设置功能块参数；正常执行程序则在运行中循环执行。

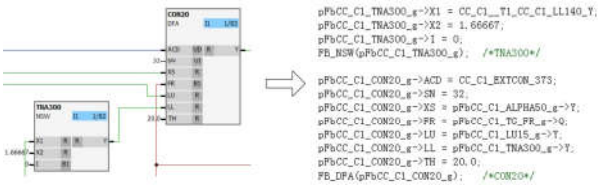


图 4 ViGET 工程程序转换成 C 代码

Fig. 4 ViGET project program converting to C codes

3.4 仿真程序任务调用

实际直流控制保护程序中，图形化编辑功能包(CFC)的模块分置在不同 CPU 处理器和不同任务链上运行，执行周期不同。对实际工程中任务执行进行模拟，开发任务调用程序，实现所有任务链下的程序加载。

在 main 主函数中建立调用任务链，调用不同 CPU 函数，如极控制系统，包括多个 CPU 程序，每个 CPU 的任务列表如图 5 所示。

从图 5 可以看出，CFC 功能包中含有 T1~T5 周期任务链下运行的程序，如 CFC_1 Task_1、

CFC_1 Task_2、CFC_1 Task_3、CFC_1 Task_4、CFC_1 Task_5。极控的 CPU_1 任务列表(xex schedule)由周期(T1~T5)和中断(I1~I8)任务链组成，每个任务链中可加载多个 CFC 任务，如 T1 周期中，按照实际执行顺序，依次调用 CFC_1 Task_1、CFC_2 Task_1、CFC_3 Task_1 等任务程序。对于不同周期之间的数据传递，如数据由 T1 传至 T2 时，采用共享变量 T1_T2_1 进行数据传递，由 T3 至 T4 数据传输用 T3_T4_1 传递，依次类推。中断程序执行周期短，任务链的调用过程与周期 T 相同。

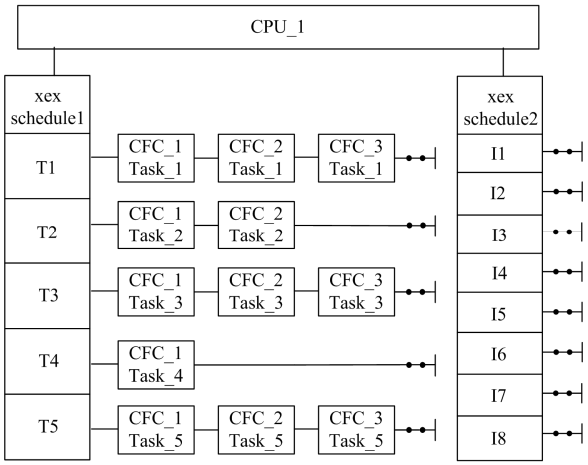


图 5 CPU 程序任务调用

Fig. 5 CPU program task scheduling

4 仿真试验

4.1 搭建模型

以±800 kV 扎鲁特−青州特高压直流工程为例，基于 HYPERSIM 平台，搭建控制保护系统全数字仿真模型，如图 6 所示。

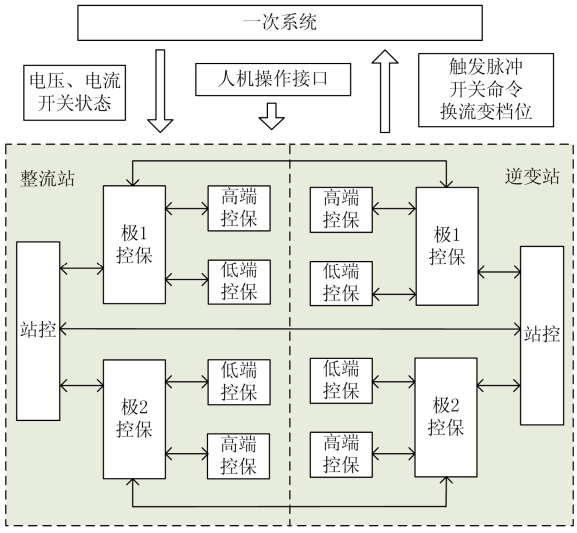


图 6 全数字仿真系统模型结构

Fig. 6 Modeling structure of full-digital simulation system

从图 6 可以看出，仿真模型主要包括一次系统、人机操作接口和控制保护系统。其中，一次系统参数按照工程主回路参数配置[30-31]，换流阀采用精确触发模型。一次系统向二次控保系统传输电压、电流等电气量和开关状态等信息，接收控制保护系统发出的触发脉冲、开关控制命令、换流变分接头档位等信息。

人机操作接口控制直流运行，与实际工程运行人员控制系统的配置一致，向控制保护系统发出功率参考值、开关控制命令、解闭锁指令等信息；控制保护系统模型主要包括站控模块、极控保模块和高低端阀控保模块。其中，站控模块中有直流站控及其测量模块和现场层开关模拟模块(DCSIM)；极控保模块中有极控和极保护及测量模块；高低端阀控保模块中有阀控和阀保护模块。

(1) 直流站控：实现对直流开关场的控制和监视，为两极的极控系统提供极功率指令，即根据人机操作接口发出的功率指令，综合附加控制、两极电流平衡控制、极间紧急功率转移等功能，向各极控系统分配功率指令。通过 IFC 通信与极控数据交互，通过 LAN 网通信与对站直流站控、阀控数据交互。

(2) 极控：实现极间功率转移、电流裕度补偿、低压限流、直流线路故障、空载加压等功能。整流站包括直流电流控制器、电压控制器和熄弧角控制器，由于逆变站每极两个阀组接入两个不同交流系统，这些功能下放至阀控，在极控中加入阀组电压平衡控制功能。通过 LAN 网与对站极控数据交互，通过 IFC 通信与极保护、阀控数据交互。

(3) 阀控：接收极控指令并生成触发脉冲，实现系统启停顺序控制，分接头控制，正常投/退、紧急投/退顺序控制，上层控制命令失去时保持稳定运行；同时，逆变站阀控中加入电流、电压、熄弧角闭环控制器功能。通过 IFC 通信与阀保护数据交互。

4.2 功能性能测试

为了验证直流控制保护系统全数字仿真模型是否满足工程设计规范要求，结合控制保护装置的出厂试验项目，进行了共计 105 项控制保护试验测试，各项试验结果均满足工程设计规范要求。主要包括以下试验项目：稳态参数校核、解闭锁试验、阶跃响应试验、无功控制试验、空载加压试验、分接头控制试验、在线投退阀组试验、极保护试验、双极保护试验、阀组保护试验、直流线路保护试验、直流滤波器保护试验。

4.3 试验对比

根据实际工程现场得到的试验波形与工况数

据，进行阶跃响应、阀组投退、直流线路接地故障等试验波形对比与分析。在试验波形中，从上至下依次是直流电压(U_{DL})、直流电流(I_{dNC})和触发角(α)，红色波形为工程现场试验结果，蓝色波形(信号名带有后缀)为仿真试验结果。

(1) 阶跃响应试验

试验工况：功率正送、极 2 单阀组运行，单极功率 250 MW，进行电流阶跃响应试验。

现场直流电流阶跃量为 500 A，阶跃时间持续 1 s，仿真试验与现场波形对比如图 7 和表 1 所示。

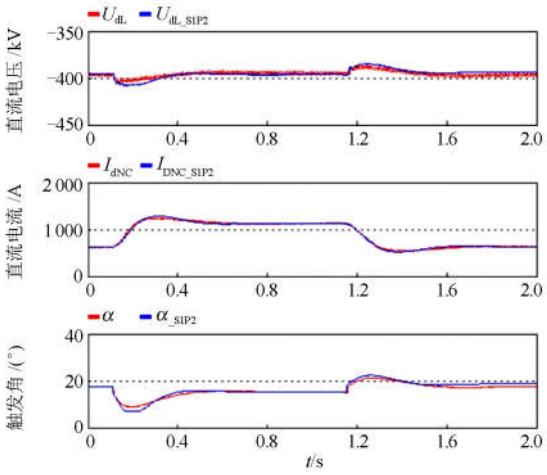


图 7 电流阶跃响应试验对比

Fig. 7 DC current step responses comparison

表 1 电流阶跃响应试验结果

Table 1 Current step response test result

电流阶跃	现场试验	仿真试验	误差
上阶跃响应时间	95 ms	103 ms	8.4%
下阶跃响应时间	128 ms	118 ms	7.8%
电流最大值	1 245.4 A	1 285.1 A	3.1%
电流最小值	535.5 A	517.2 A	3.4%
电压最大值	−386.1 kV	−384.2 kV	0.49%
电压最小值	−405.0 kV	−408.3 kV	0.81%

从图 7 和表 1 可以看出，以现场试验数据作为基准，电流阶跃暂态响应过程中，仿真试验与现场试验的上阶跃、下阶跃的响应时间误差分别为 8.4%、7.8%，电流最大值、最小值的误差分别为 3.1%、3.4%，电压最大值、最小值的误差分别为 0.49%、0.81%；系统达到稳态后，仿真试验与现场试验的直流电流、电压分别为 628.2 A、625.6 A 和 394.9 kV、393.7 kV，误差分别为 0.41%、0.3%。

(2) 阀组投退试验

试验工况：功率正送、极 1 双阀组运行，单极功率 500 MW，高端阀组投退试验。

高端阀组收到命令后，整流侧触发角迅速移至 90°，合旁通开关(BPS)，待直流电流由阀完全转移至 BPS 开关上，触发角移至 120°最终至 160°闭锁，如图 8 所示。仿真试验和现场波形的电流最大值分别为 1 445.3 A、1 344.6 A，误差为 7.4%；电压最小值分别为 303.7 kV、324.5 kV，误差为 6.4%。阀组退出后达到稳态时，直流电流、电压分别为 1 290.9 A、1 294.3 A 和 399.4 kV、397.8 kV，误差分别为 0.26%、0.04%。

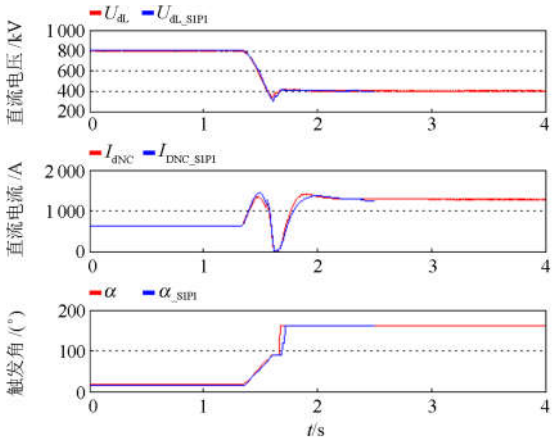


图 8 高端阀组退出试验

Fig. 8 High valve group switching off test

高端阀组收到投入命令后，整流侧触发角移至 90°附近，当直流电流由 BPS 完全转移至换流阀，拉开 BPS，触发角快速移至 15°，同时对站阀控触发角及 BPS 开关进行配合，如图 9 所示。仿真试验和现场波形的电流最大值分别为 2 140.1 A、2 110.2 A，误差为 1.4%；电压最大值分别为 798.6 kV、804.1 kV，误差为 0.66%。阀组投入后达到稳态时，直流电流、

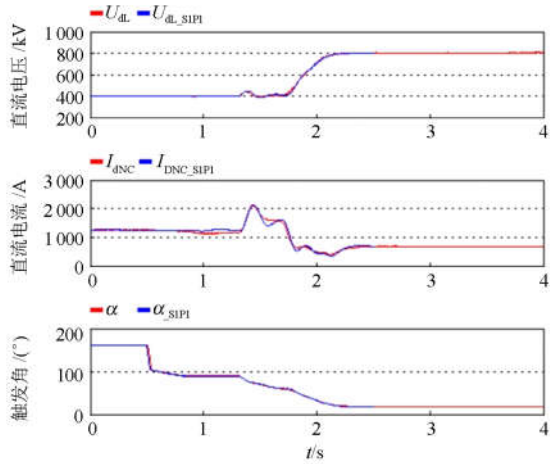


图 9 高端阀组投入试验

Fig. 9 High valve group switching on tests

电压分别为 686.6 A、684.3 A 和 797.2 kV、799.1 kV，误差分别为 0.33%、0.23%。

(3) 直流线路接地故障试验

试验工况：功率正送、极 1 单阀组运行，单极功率 250 MW，靠近扎鲁特站直流线路金属接地。

通过对现场波形分析，估算故障时间为 65 ms、接地电阻为 12 Ω，调整仿真模型交流等值电源与工程现场一致，极 1 靠近整流站直流线路瞬时故障重启试验波形如图 10 所示。故障开始后，经过 150 ms 的去游离时间，控制系统进入重启过程，仿真试验和现场波形的电流最大值分别为 8 428.5 A、8 879.4 A，误差为 5.0%；直流电压恢复时，最大值分别为 378.5 kV、374.2 kV，误差为 1.1%。故障后达到稳态时，直流电流、电压分别为 643.2 A、647.6 A 和 399.2 kV、400.1 kV，误差分别为 0.64%、0.22%。

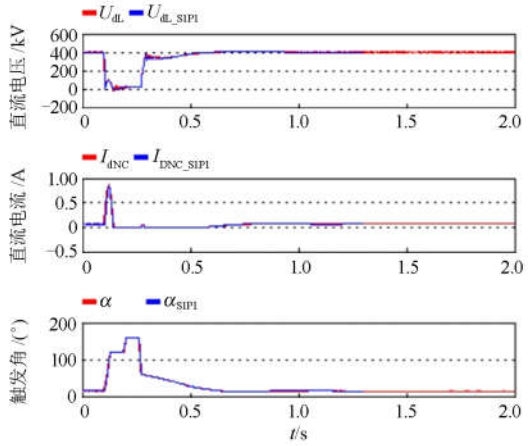


图 10 极 1 靠近整流站直流线路故障试验

Fig. 10 Pole 1 DC line fault near rectifier test

综上(1)、(2)、(3)可知：在系统达到稳态时，仿真试验与现场波形的直流电流、电压的误差均小于工程设计规范要求的±2%；暂态过程中，仿真试验波形与实际现场的直流电压、电流曲线一致，由于受交流电源等值、站间通信延时等因素影响，故障过程中仿真结果与实际现场波形存在一定误差；触发角的变化趋势相同。

5　结语

本文提出了基于直流工程平台 HCM3000 的控制保护系统全数字仿真建模方法。以扎鲁特−青州特高压直流工程为例，搭建 HYPERSIM 仿真模型，完成了大量功能性能仿真试验，并与实际工程现场试验波形比对，结果表明：仿真模型与工程现场动态响应特性高度吻合，验证了全数字仿真建模方法的准确性和有效性，能够准确反映实际工程现场的运行特性，维护方便，可移植性好。

参考文献

[1] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[2] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.

[3] 郭子淳, 胡志坚. 超高压同塔双回双极直流输电线路工频参数测量方法研究[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2018, 51(3): 225-230.
GUO Zichun, HU Zhijian. Research on measurement method of power frequency parameters of double-circuit double-pole EHV DC lines on same tower[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(3): 225-230.

[4] 黄梦华, 汪娟娟. 低压限流环节优化控制策略综述[J]. 广东电力, 2018, 31(10): 11-19.
HUANG Menghua, WANG Juanjuan. Review on optimization control strategy for voltage dependent current order limiter[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(10): 11-19.

[5] 程鑫, 杨燕, 徐蔚, 等. 多直流馈入电网规划方案评价指标体系[J]. 广东电力, 2018, 31(10): 118-126.
CHENG Xin, YANG Yan, XU Wei, et al. Evaluation index system of multi-infeed DC power grid planning schemes[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(10): 118-126.

[6] 汤奕, 朱亮亮, 陈斌, 等. 特高压直流分层接入受端系统电压稳定性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(9): 35-41.
TANG Yi, ZHU Liangliang, CHEN Bin, et al. Analysis on voltage stability of receiving-end system with UHVDC hierarchial connection to AC grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(9): 35-41.

[7] 李胜男, 邢超, 苏进国, 等. 观音岩直流多功率传输方式仿真研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(9): 50-54.
LI Shengnan, XING Chao, SU Jinguo, et al. Simulation and research on multi-operation modes of Guanyinyan HVDC[J]. Smart Power, 2017, 45(9): 50-54.

[8] 艾红杰, 方扬, 陈大鹏, 等. 晋北-南京特高压直流输电工程安稳系统及其控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 118-125.
AI Hongjie, FANG Yang, CHEN Dapeng, et al. Study on stability system and control strategy in Jinbei-Nanjing HVDC project[J]. Power System Protection and Control,

2018, 46(24): 118-125.

[9] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian, et al. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power System, 2016, 1(2): 27-33. DOI: 10. 1186/s41601- 016- 0025-x.

[10] 张哲任, 徐政, 徐雨哲, 等. 高压直流输电基本测试系统[J]. 广东电力, 2018, 31(9): 2-12.
ZHANG Zheren, XU Zheng, XU Yuzhe, et al. Basic test systems for HVDC[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(9): 2-12.

[11] 栗然, 卢佳丽, 赵峰, 等. 弱受端支撑的高压直流故障恢复优化研究[J]. 华北电力大学学报, 2019, 46(2): 1-9.
LI Ran, LU Jiali, ZHAO Feng, et al. Optimization of HVDC fault recovery with weak receiving end[J]. Journal of North China Electric Power University, 2019, 46(2): 1-9.

[12] 张天, 龚雁峰. 特高压交直流电网输电技术及运行特性综述[J]. 智慧电力, 2018, 46(2): 87-92.
ZHANG Tian, GONG Yanfeng. Research on transmission technologies and operational performance of UHV AC/DC power grid in China[J]. Smart Power, 2018, 46(2): 87-92.

[13] 姜梦, 熊浩清, 邓晓璐, 等. 特高压直流系统异常运行下的功率特性研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(5): 58-64.
JIANG Meng, XIONG Haoqing, DENG Xiaolu, et al. Study on power characteristics of UHVDC under abnormal operation[J]. Smart Power, 2018, 46(5): 58-64.

[14] 周俊, 郭剑波, 胡涛, 等. 高压直流输电系统数字物理动态仿真[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 221-228.
ZHOU Jun, GUO Jianbo, HU Tao, et al. Digital/analog dynamic simulation for ±500 kV HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 221-228.

[15] 刘云, 印永华, 曾南超, 等. 数模混合式高压直流输电仿真系统的建立[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(18): 38-54.
LIU Yun, YIN Yonghua, ZENG Nanchao, et al. Model establishment of digital/analog HVDC simulation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(18): 38-44.

[16] 胡涛, 朱艺颖, 印永华, 等. 含多回物理直流仿真装置的大电网数模混合仿真建模及研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 68-75.
HU Tao, ZHU Yiying, YIN Yonghua, et al. Modeling and study of digital/analog hybrid simulation for bulk grid with multi-analog HVDC simulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 68-75.

[17] 郭剑波, 周俊, 郭强, 等. 华北-华中-华东交直流输电系统数模混合仿真[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 55-59.
GUO Jianbo, ZHOU Jun, GUO Qiang, et al. Digital and analog hybrid simulation of interconnected UHVAC/ UHVDC transmission system from north China via central China to east China[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 55-59.

[18] 朱艺颖, 于钊, 李柏青, 等. 大规模交直流电网电磁暂态数模混合仿真平台构建及验证: (一)整体构架及大规模交直流电网仿真验证[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 164-170.
ZHU Yiying, YU Zhao, LI Baiqing, et al. Construction and validation of electromagnetic transient digital-analog hybrid simulation platform for large-scale AC/DC power grids: Part one general configuration and simulation validation of large scale AC/DC power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 164-170.

[19] 刘长胜, 陈礼义, 郑玉森, 等. 电力系统模数混合试验系统[J]. 天津大学学报, 2004, 37(1): 80-83.
LIU Changsheng, CHEN Liyi, ZHENG Yusen, et al. Power system analog and digital hybrid simulation system[J]. Journal of Tianjin University, 2004, 37(1): 80-83.

[20] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状及发展[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 66-70.
TANG Yong. Status and development of digital simulation technology of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 66-70.

[21] 谭阳琛, 刘畅, 李程昊, 等. 基于 ADPSS 的特高压直流输电控制保护系统开放式建模[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 99-108.
TAN Yangchen, LIU Chang, LI Chenghao, et al. Open-style model of UHVDC control and protection system based on ADPSS[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 99-108.

[22] 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.

[23] 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.

[24] 曾丽丽, 姚致清, 李延龙, 等. HCM3000平台内置故障录波功能设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 114-117.
ZENG Lili, YAO Zhiqing, LI Yanlong, et al. Internal fault recording function design of HCM3000[J]. Power System Technology, 2012, 40(9): 114-117.

[25] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. HCM3000 平台的高岭扩建工程直流极保护系统实施策略[J]. 东北电力技术, 2012, 33(10): 35-40.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. DC protection system implementation strategy of Gaoling Ⅱ project based on HCM3000 platform[J]. Northeast Electric Power Technology, 2012, 33(10): 35-40.

[26] 李延龙, 杨敏, 杨亚璞. 特高压控制保护系统触发脉冲相位控制单元研究[J]. 南方电网技术, 2008, 2(4): 77-79.
LI Yanlong, YANG Min, YANG Yapu. Research on the trigger set for UHVDC transmission control and protection systems[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(4): 77-79.

[27] 祁招, 杨会磊, 胡子健, 等. 一种基于直流输电换流阀阀控设备的触发测试系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 125-129.
QI Zhao, YANG Huilei, HU Zijian, et al. Design of automatic test system for triggering function of HVDC valve control equipment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 125-129.

[28] 陶瑜, 马为民, 马玉龙, 等. 特高压直流输电系统的控制特性[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 1-5.
TAO Yu, MA Weimin, MA Yulong, et al. Control characteristics of UHVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 1-5.

[29] 柏传军, 叶周, 程璐璐, 等. 基于实际工程及虚拟装置的直流输电控制保护模型设计方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 186-191.
BAI Chuanjun, YE Zhou, CHENG Lulu, et al. Design method of control and protection model for DC transmission based on actual project and virtual device[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 186-191.

[30] 罗汉武, 乐健, 毛涛, 等. 扎鲁特-青州±800 kV 特高压直流输电工程运行特性分析[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 53-59.
LUO Hanwu, LE Jian, MAO Tao, et al. Analysis of operation characteristics of Zhalute-Qingzhou ±800 kV UHVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 53-59.

[31] 李春山, 任普春, 吴姜. 扎鲁特直流对吉林省风电消纳影响研究[J]. 东北电力大学学报, 2018, 38(6): 1-8.
LI Chunshan, REN Puchun, WU Jiang. The study on the impact of wind power consumption in Jilin province from Zhalute DC[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2018, 31(6): 1-8.

收稿日期：2019-04-12；　修回日期：2019-08-07

作者简介：

苏进国(1986—)，男，通信作者，硕士，工程师，主要从事高压直流输电控制保护系统仿真研究工作；E-mail: sujinguo163@163.com

李　泰(1980—)，男，硕士，高级工程师，主要从事高压直流输电控制保护系统仿真开发工作；

张爱玲(1968—)，女，本科，教授级高级工程师，主要从事特高压直流控制与保护系统设备开发工作。

(编辑　魏小丽)