

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181531

基于 HCM3000 直流控制保护平台新型仿真系统实现与应用

刘旭辉, 张爱玲, 曹森, 黄金海, 付艳, 刘晨, 吴梦丽

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 介绍了基于 HCM3000 直流控制保护平台的新型仿真系统的整体构建, 阐述了实时数字仿真器 RTLAB 的应用和 HCM3000 直流控制保护平台多种设备的配置。详细论述了仿真系统中直流控制保护系统的优化方法、与实时数字仿真器 RTLAB 互联的接口设计、仿真系统设备间互联的实现方式。利用工程师工作站采集实时数据对仿真系统进行监控, 从而建成了较常规仿真系统结构简单且经济实用的直流输电仿真系统。最后通过在基于实际工程构建的仿真系统上进行试验验证, 表明基于 HCM3000 直流控制保护平台的新型仿真系统能够准确地反映实际的电力系统暂态物理过程, 可有效用于常规和柔性直流控制保护策略研究和优化、现场事故分析和决策。

关键词: 直流输电; HCM3000; RTLAB; 仿真系统; 系统优化; 实时仿真

Implementation and application of new generation simulation system based on HCM3000 DC control protection platform

LIU Xuhui, ZHANG Ailing, CAO Sen, HUANG Jinhai, FU Yan, LIU Chen, WU Mengli

(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: This paper introduces the overall construction of the new generation simulation system based on the HCM3000 DC control protection platform, expounds the application of the real-time digital simulator RTLAB and the configuration of the HCM3000 DC control protection platform. This paper discusses in detail the optimization method of HVDC control and protection system in the simulation system, the interface development of connecting real-time digital simulator RTLAB, and realization mode of DC control and protection equipment interconnection, uses engineer workstation to monitor simulation system of real-time data acquisition, and builds the HVDC simulation system with simple structure and economy compared to conventional simulation system. Finally, through the test verification of simulation system based on the actual engineering construction, it shows that the new simulation system based on HCM3000 HVDC control and protection platform can reflect the power system transient physical process accurately, it can be effectively used in the research and optimization of conventional and flexible DC control protection strategies, field accident analysis and decision-making.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. 2018GW01) "Research on Key Technology of ± 800 kV VSC-UHVDC Converter Valve and Control Protection".

Key words: HVDC; HCM3000; RTLAB; simulation system; system optimization; real-time simulation

0 引言

随着我国日益增多的高压直流输电工程和日益复杂的全国互联电网系统, 大量的电力电子设备接

入到电网中, 使得电网运行特性和控制特性变得非常复杂^[1-4]。为保证规模大、系统特性复杂的交直流电网安全可靠运行, 必须采用高效实用的仿真手段对其展开多方面的深入研究, 以利于合理规划工程项目、优化设计方案, 确保直流工程安全建设、调试和运行, 从而促进交直流电网稳健发展, 并为进一步开展新型直流输电技术攻关服务^[5-6]。

直流输电实时仿真系统是进行直流输电控制保

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目资助(2018GW01) “ ± 800 kV 特高压柔性直流输电换流阀和控制保护关键技术研究”

护策略研究与优化、现场事故分析和运行维护、系统调试研究等方面的有利工具^[7-8]。常规的直流输电实时仿真系统利用实时数字仿真器 RTDS 及直流控制保护设备构建^[9-10], 结构复杂且设备多。随着电力系统仿真技术的发展以及直流控制保护设备全面国产化和技术升级, 迫切需要建立适应工程仿真需要的结构简单且经济实用的直流输电仿真系统。本文阐述了基于 HCM3000 的直流控制保护平台, 应用实时数字仿真器 RTLAB 构建新型直流输电仿真系统的实现方案 and 实际应用。

1 新型直流输电仿真系统

1.1 组成部分

与实际的高压直流工程相似, 基于 HCM3000 控制保护平台的直流输电仿真系统分为一次系统与二次系统两大部分。

一次系统采用加拿大 OPAL-RT 公司研制的工业级实时仿真平台 RT-LAB, 如图 1 所示。RTLAB 包含了丰富的电力系统及控制系统元器件, 具有强大的建模能力, 既可以采用高性能多核 CPU 结合实时操作系统(Linux)的运行方式进行离线仿真, 也可以采用 FPGA 结合多核 CPU(OP5600 系列仿真主机)的运行方式, 与实际电力系统设备联接进行实时仿真。在控制器测试、保护设备测试、HVDC 与 FACTS 系统相互影响的研究等方面有着广泛的应用。

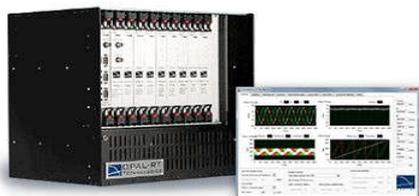


图 1 RTLAB 实时仿真器

Fig. 1 RTLAB real time simulator

与由多个 RACK 组成的 RTDS 相比, RTLAB 具有高性能价格比、多接口应用灵活、易安装维护等特点, 在国内一些大的研发中心和单位, RTLAB 已经被广泛应用于直流输电系统的集成测试和实时仿真^[11-12]。

二次系统采用许继电气直流输电分公司研制的 HCM3000 控制保护平台。该平台是基于高压直流输电领域长期的技术积累和工程经验, 融合国内外先进技术, 完全自主开发的新一代成套直流控制保护系统, 采用紧密耦合的多主处理器硬件结构, 由高性能的硬件系统、软件系统、通信及接口系统等主要部分构成, 控制保护主机硬件结构如图 2 所示。



图 2 HCM3000 控制保护硬件结构

Fig. 2 HCM3000 control protection hardware structure

完全自主化的 HCM3000 控制保护平台是整个直流输电系统最为核心的控制保护设备, 该平台已成功应用于常规直流工程、特高压直流工程、背靠背联网工程和柔性直流工程^[13-14]。

1.2 设计目标

HCM3000 控制保护平台与实时数字仿真器 RTLAB 连接构成实时闭环仿真系统, 建立适应仿真试验需要且实用高效的直流输电仿真系统, 并与实际工程保持结构和功能的一致性。

直流输电仿真系统尽量实现和实际工程相同的功能, 对于无相应信号输入、一次设备无法仿真或者无需仿真以及不必要的接口部分则不再实现, 比如交直流场部分不需仿真的刀闸和出线、阀冷系统接口、换流变保护、VBE、TM 等。

控制保护硬件设备采用与实际工程一致的 HCM3000 控制保护平台, 控制保护应用软件与实际工程现场运行软件保持一致, 根据仿真系统简化需要进行相关软件调试位设置, 但控制保护软件架构和核心功能不变, 使得稳态工况、交直流故障下的性能与实际工程基本一致^[15-16]。

1.3 设计方案

对 HCM3000 控制保护平台进行如下设计:

1) 运行人员控制层采用 Windows 版本服务器的工程师工作站, 实现与实际工程运行人员工作站一致的数据采集、监视和控制操作界面, 与控制保护层采用单 LAN 网通信;

2) 控制保护层配置单重化的与实际工程一致的控制保护设备, 各个系统之间保持与实际工程一致的连接方式;

3) 取消控制保护系统各自的测量系统设备及常规 RTDS 仿真的电气连接方式, 采用自主研发的 HSMD 仿真接口装置, 通过单路高速光纤采用 AURORA 协议实现与 RTLAB 的数据交互, 并完成多个系统的测量环节, 且保持测量程序及数据链路与实际工程一致, 通过 TDM 协议将数据上送给控制保护系统;

4) 取消常规 RTDS 仿真所需的多台工控机模拟

现场层测控装置和一次设备，采用自主研发的 DCSIM 模拟装置完成多个系统所控的一次设备的模拟，采用 IEC60044-8 协议与 HSMD 完成数据交互，采用 PRUFIBUSX 协议与控制系统完成数据交互；

5) 控制保护系统采用 IEC60044-8 协议将实时数据通过 HSMD 装置上送 RTLAB 用于录波分析；

6) 考虑到实时和同步性等要求，控制系统输出的触发脉冲采用预制电缆，直接接入 RTLAB 接口装置。

基于 HCM3000 控制保护平台构建的新型仿真系统整体结构如图 3 所示。

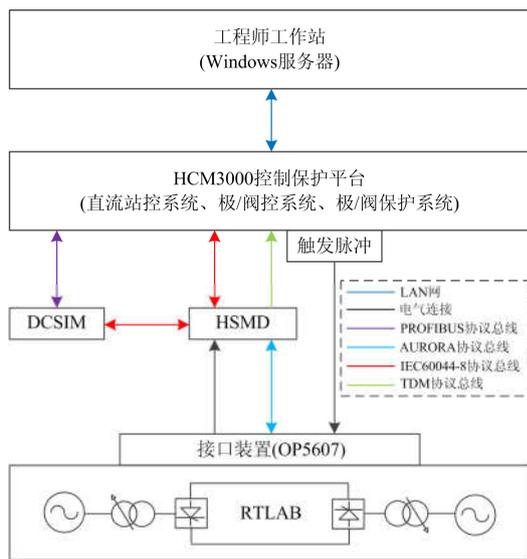


图 3 仿真系统整体结构

Fig. 3 Whole structure of simulation system

由图 3 可以看出：基于 HCM3000 控制保护平台构建的直流仿真系统通过采用自主研发的接口装置 HSMD 以及测控模拟装置 DCSIM，在最大程度上与实际工程保持一致的前提下，同时利用多种目前先进的通信技术以及性能更优的 RTLAB 实时仿真技术，较常规采用 RTDS 构建的仿真系统，其设备简化、结构简单，且可扩展性强，可构建大规模交直流输电仿真电网，满足对特高压交直流大电网进行深入研究的需求。

2 RTLAB 仿真设计

实时仿真器 RTLAB 实现直流输电一次设备的模拟仿真，一次设备主要包括换流阀、换流变压器、交/直流滤波器、平波电抗器、输电线路等。在对具体工程进行仿真系统建模时，结合各工程的情况，首先进行系统等值，确定各模型元件的参数；然后，

再按照实际工程的配置和接线方式，连接上述各物理模型，组成与具体工程相对应的直流输电仿真系统一次模型。图 4 为典型的高压直流输电系统物理模型的组成结构^[17-18]。

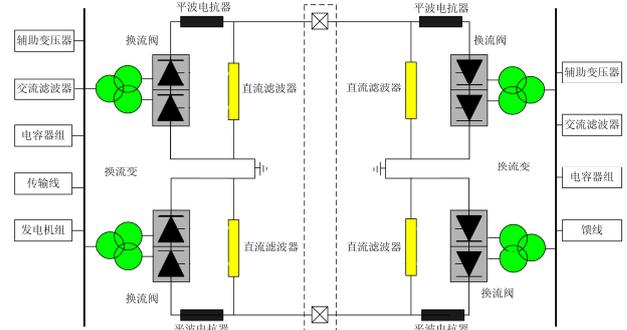


图 4 高压直流输电系统结构

Fig. 4 Structure of HVDC simulator

为和二次系统构成闭环仿真系统，RTLAB 需通过接口装置与控制保护设备进行信号交互，主要信号包括如下。

- 1) 模拟量输出：交/直流场电压和电流，换流变压器二次侧阀电压和电流；
- 2) 模拟量输入：控制保护设备用于录波的控制保护模拟量；
- 3) 开关量输出：换流变分接头档位；
- 4) 开关量输入：交直流场开关状态信号，控制系统实时触发脉冲信号，换流变分接头控制信号，以及用于录波的控制保护开关量信号。

3 HCM3000 控制保护平台仿真设计

为了减少仿真设备的投资，提高仿真试验效率，在满足仿真实验需要且最大程度与实际工程结构及功能保持一致的前提下，对实际工程中的控制保护系统进行如下优化设计。

3.1 控制保护系统优化

直流输电实际工程中冗余化配置主要是为了提高设备利用率，保证系统能够正常稳定运行。控制系统常采用双重化配置，保护系统常采用三重化配置。仿真系统主要进行系统分析和控制保护策略及性能研究，故仿真系统中可取消冗余配置。

根据设计方案仿真系统只需配置单重化的控制保护系统即可，同时也可对单重化系统机箱内部的冗余化硬件板卡简化为单重化配置，减少投资成本。

3.2 测量系统优化

应用于实际工程的 HCM3000 控制保护平台为保证系统运行的高效稳定性，各个控制保护系统配置有独立的测量系统，测量系统主要完成模拟量采

样、滤波预处理、故障检测等功能。测量系统在常规 RTDS 仿真系统中也是必不可少的重要组成部分,且采用较多的电气连接方式。为实现与实时数字仿真器 RTLAB 接口需求,仿真系统采用自主研发的 HSMD 仿真接口装置,通过单路高速光纤采用 AURORA 协议实现与 RTLAB 的数据交互,并集成多个控制保护测量系统功能,如图 5 所示。

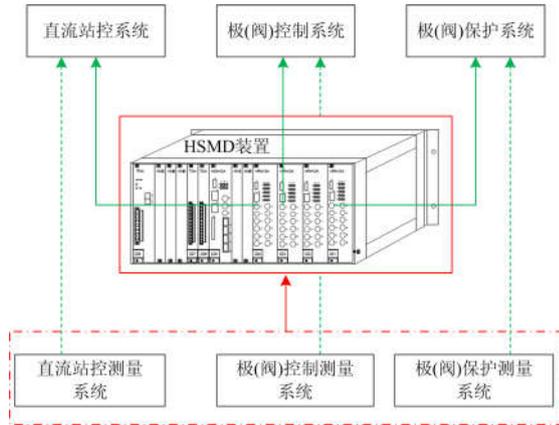


图 5 HSMD 仿真示意图

Fig. 5 Schematic diagram of HSMD simulation

由图 5 可以看出:一台 HSMD 装置高度集成多个控制保护测量系统,有效减少仿真系统的设备数量。需要注意的是 HSMD 装置插件加载的测量程序需与实际工程测量程序除接口外的主逻辑应保持一致,同时保证发送到控制保护系统的数据链路不变,最大限度保证控制保护系统与实际工程一致。

3.3 测控装置优化

实际工程中的测控装置主要完成运行人员对现场层一次设备(如刀闸、断路器等)的遥控和遥测,仿真系统中常用工控机完成模拟,但每台工控机只能完成单个系统的需求,采用自主研发的 DCSIM 模拟装置可完成多个系统所控的一次设备的模拟,如图 6 所示。

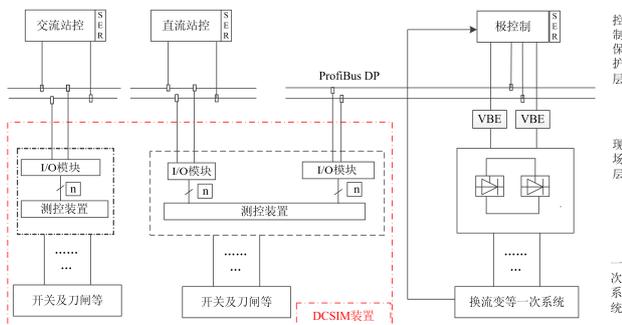


图 6 DCSIM 仿真示意图

Fig. 6 Schematic diagram of DCSIM simulation

由图 6 可以看出:DCSIM 装置高度集成多个测控装置,实现多个控制系统所需的一次设备的模拟,较采用常规 RTDS 仿真所需的多个工控机来说,结构简单易维护,可通过工程师工作站实现应用程序加载、在线调试和监测等。

4 仿真系统整体配置

根据 HCM3000 控制保护平台仿真设计,可对常规或特高压直流工程仿真系统进行如下整体配置。

4.1 常规直流工程

常规直流工程仿真系统整体配置以单站为例,所需屏柜和主要设备如表 1 所示。

表 1 常规直流工程仿真系统整体配置

Table 1 Overall configuration of conventional HVDC

序号	设备名称	数量	主设备
1	工程师工作站	2 台	Think Station
2	直流站控屏	1 面	HCM3000*1
3	极 1 极控制/保护屏	1 面	HCM3000*2
4	极 2 极控制/保护屏	1 面	HCM3000*2
5	I/O 模拟屏	1 面	DCSIM100*1
6	信号接口屏	1 面	HSMD100*2
7	RTLAB 接口装置	1 台	OP5607*1

由表 1 可以看出:常规直流工程仿真系统两站共需配置 10 面屏柜构成 HCM3000 控制保护平台,两站共需配置 4 台工程师工作站,除用于运行人员监控外,还用于 HCM3000 控制保护平台应用软件的加载、实时监视和在线调试。

4.2 特高压直流工程

特高压直流工程较常规直流工程复杂,仿真系统整体配置以单站为例,所需屏柜和主要设备如表 2 所示。

表 2 特高压直流工程仿真系统整体配置

Table 2 Overall configuration of conventional UHVDC

序号	设备名称	数量	主设备
1	工程师工作站	2 台	Think Station
2	直流站控屏	1 面	HCM3000*1
3	极 1 极控制/保护屏	1 面	HCM3000*2
4	极 1 高端阀控制/保护屏	1 面	HCM3000*2
5	极 1 低端阀控制/保护屏	1 面	HCM3000*2
6	极 2 极控制/保护屏	1 面	HCM3000*2
7	极 2 高端阀控制/保护屏	1 面	HCM3000*2
8	极 2 低端阀控制/保护屏	1 面	HCM3000*2
9	I/O 模拟屏	1 面	DCSIM100*1
10	信号接口屏	1 面	HSMD100*2
11	RTLAB 接口装置	1 台	OP5607*1

由表 2 可以看出:特高压直流工程仿真系统两站共需配置 18 面屏柜构成 HCM3000 控制保护平

台, 两站共需配置 4 台工程师工作站, 除用于运行人员监控外, 还用于 HCM3000 控制保护平台应用软件的加载、实时监控和在线调试。

5 仿真实验

为检验仿真系统的功能和运行性能, 本文以建成的特高压±800 kV 宾金直流工程仿真系统为例, 进行阶跃响应试验和交流故障试验, 并将技术指标和现场实际波形进行对比, 验证了仿真系统动态响应特性满足指标要求且故障特性与实际工程一致。

5.1 阶跃响应试验

阶跃响应试验主要用于验证直流系统动态响应特性, 校核控制器参数设定是否合理并满足相应技术指标^[19-22]。直流控制系统设计有多种控制器, 包括直流电流控制器、直流电压控制器、直流功率控制器和熄弧角控制器等。宾金直流仿真系统采用与实际工程一致的控制器参数, 直流电流阶跃波形如图 7 所示, 直流电压阶跃波形如图 8 所示, 试验数据如表 3 所示。

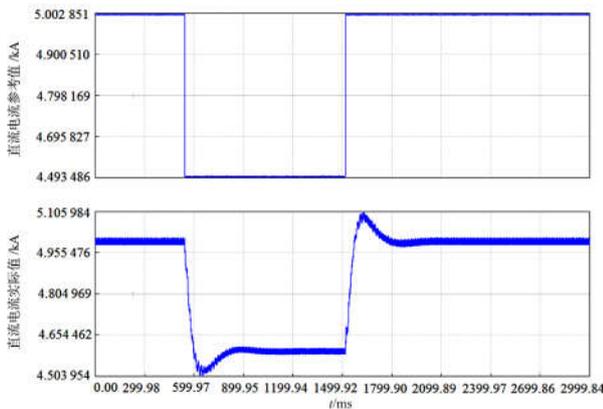


图 7 直流电流阶跃波形

Fig. 7 DC current step waveform

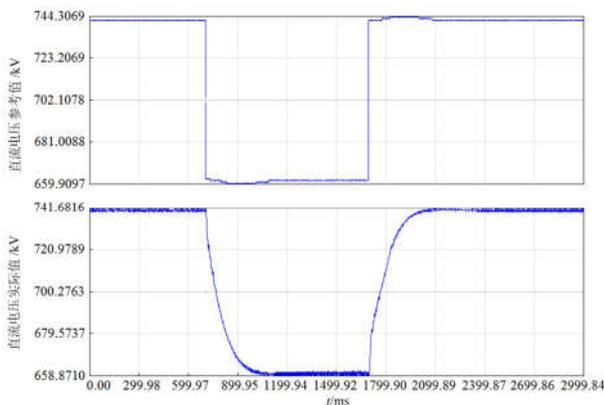


图 8 直流电压阶跃波形

Fig. 8 DC voltage step waveform

表 3 阶跃试验数据

Table 3 Step test data

阶跃名称	阶跃前	阶跃后	阶跃量	超调量	响应时间
电流下阶跃	5 000 A	4 600 A	400 A	26.5%	47 ms
电流上阶跃	4 600 A	5 000 A	400 A	24.0%	52 ms
电压下阶跃	740 kV	660 kV	80 kV	1.5%	118 ms
电压上阶跃	660 kV	740 kV	-80 kV	2.6%	125 ms

仿真试验结果表明: 直流电流阶跃超调量不超过整定值变化量的 30%, 响应时间不大于 90 ms, 电流控制器参数合理且满足技术指标; 直流电压阶跃反映电压控制器对直流电压整定值变化的快速响应特性, 符合相应的技术要求。

5.2 交流故障试验

交流故障试验主要用于验证交流系统发生故障后直流系统的响应特性, 常见的交流故障有交流单相接地、交流三相接地、交流相间短路故障等。在宾金直流仿真系统一次模型上根据现场故障时刻设置相应故障点模拟交流单相接地, 将仿真波形与现场实际波形进行对比, 交流电压对比波形如图 9 所示, 直流电压和直流电流对比波形如图 10 所示, 整流侧触发角和逆变侧熄弧角对比波形如图 11 所示。

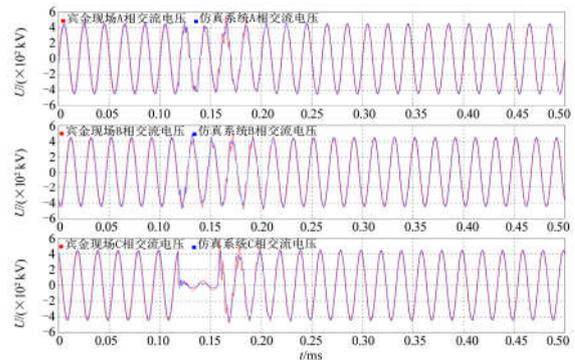


图 9 交流电压对比波形

Fig. 9 AC voltage waveform comparison

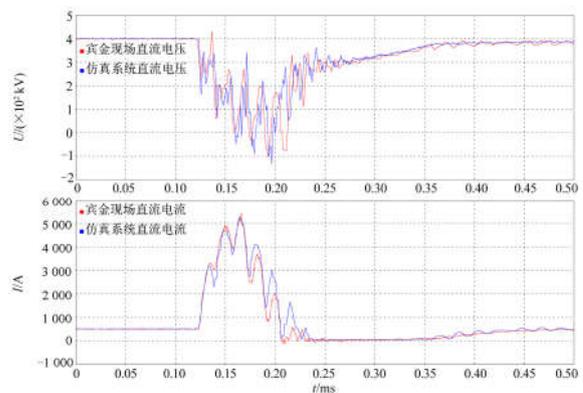


图 10 直流电压(上)和直流电流(下)对比波形

Fig. 10 Comparison of DC voltage (up) and DC current (down)

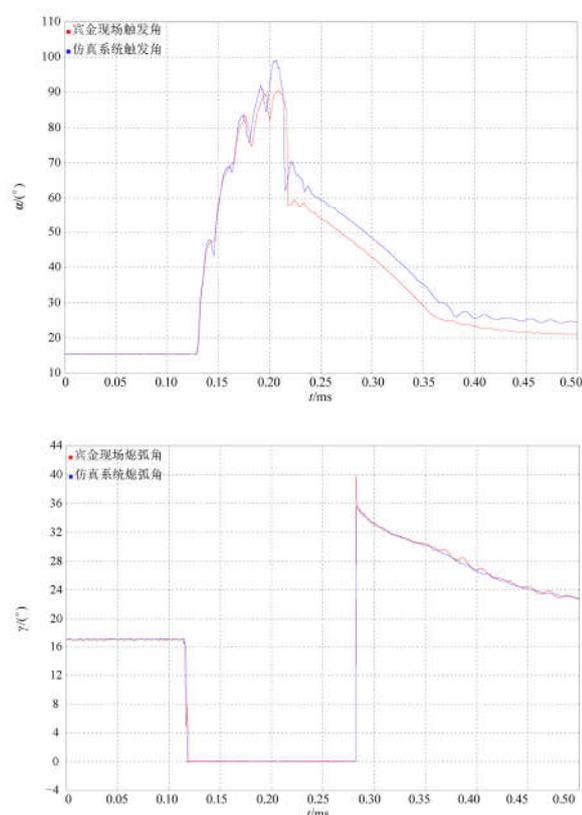


图 11 触发角(上)和熄弧角(下)对比波形

Fig. 11 Comparison of firing angle (up) and extinction angle (down)

由上图可以看出: 红色仿真试验波形与蓝色直流工程实测数据高度吻合, 能够正确反映直流系统暂态故障特性, 表明构建的仿真系统满足工程研究的要求, 能够用于直流系统的实时仿真试验。

6 总结

本文基于 HCM3000 直流控制保护平台, 采用当前更具优势的 RTLAB 实时仿真器以及最新研制的仿真接口装置 HSMD 和测控模拟装置 DCSIM, 组成了较常规仿真系统结构优化且经济实用的直流输电仿真系统。文中详细介绍了仿真系统的设计目标和方案、直流控制保护系统的优化方法、HSMD 和 DCSIM 的配置和应用以及各设备间互联的实现方式。基于此介绍了常规和特高压直流工程仿真系统的整体配置方案, 最后通过在基于实际工程构建的仿真系统上进行试验验证, 表明基于 HCM3000 的直流控制保护平台的新一代仿真系统能够准确地反映实际的电力系统暂态物理过程, 可有效用于控制保护策略的研究和优化、现场事故分析和决策、交直流系统调试研究以及运维和检修仿真培训等。

参考文献

- [1] 熊家祚, 张能, 翟党国, 等. 大规模电力电子设备接入的电力系统混合仿真接口技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 152-161.
XIONG Jiazuo, ZHANG Neng, ZHAI Dangguo, et al. Review of hybrid simulation interface technology for power system of large-scale power electronic equipment access[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 152-161.
- [2] WANG L C, GAO H L, ZOU G B. Modeling methodology and fault simulation of distribution networks integrated with inverter-based DG[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 370-378. DOI: 10.1186/s41601-017-0058-9.
- [3] 任志航, 李民, 马凯琪, 等. 交直流混合微电网微元建模与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 82-88.
REN Zhihang, LI Min, MA Kaiqi, et al. Modeling & control of hybrid AC/DC micro-grid micro components[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 82-88.
- [4] 崔勇, 杨菊芳, 张栋. 基于风光互补的主动电网规划模型[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 101-106, 125.
CUI Yong, YANG Jufang, ZHANG Dong. Research on active power network planning model based on wind-solar complementation[J]. Electric Power, 2017, 50(5): 101-106, 125.
- [5] 王志强. 一种特高压交直流电网数模混合实时仿真系统[J]. 自动化与仪器仪表, 2014(9): 145-147.
WANG Zhiqiang. One kind of UHV AC and DC power mixed analog-digital real-time simulation system[J]. Automation & Instrumentation, 2014(9): 145-147.
- [6] 崔勇, 郭强, 黄志岭. 特高压交直流电网实时仿真平台建设及应用[J]. 华东电力, 2014, 42(3): 467-472.
CUI Yong, GUO Qiang, HUANG Zhiling. Construction and application of UHV AC/DC power grid real-time simulation platform[J]. East China Electric Power, 2014, 42(3): 467-472.
- [7] ZHENG Weijie, YAN Jianfeng, CHEN Xujiang, et al. Technology and engineering application of cross area HVDC interconnection system high-precision simulation modeling based on ADPSS[J]. Global Energy Interconnection, 2018, 1(5): 627-635.
- [8] 王祥旭. 基于 RTDS 的 ± 800 kV 特高压直流输电系统的建模与仿真[J]. 华东电力, 2011, 39(3): 335-339.
WANG Xiangxu. RTDS-based modeling and simulation of ± 800 kV UHVDC transmission system[J]. East China Electric Power, 2011, 39(3): 335-339.
- [9] 张攀, 张菲菲, 雷娜. 基于 RTDS 的特高压直流输电系

- 统控制功能研究[J]. 山东工业技术, 2016(10): 172-173.
ZHANG Pan, ZHANG Feifei, LEI Na. Research on control function of UHVDC transmission system based on RTDS[J]. Shandong Industrial Technology, 2016(10): 172-173.
- [10] 武霄, 崔勇, 黄志龙, 等. 基于 RTDS 的高压直流输电控制功能研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2014, 41(6): 60-66.
WU Xiao, CUI Yong, HUANG Zhilong, et al. Research on control function of HVDC based on RTDS[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2014, 41(6): 60-66.
- [11] CHEN W, WANG G S. Performance of RT-LAB platform in complex electromechanical simulation system[C] // 2014 IEEE 5th International Conference on Software Engineering and Service Science, June 27-29, 2014, Beijing, China: 605-608.
- [12] 张群, 赵倩, 陈朋. 基于 RT-LAB 的柔性直流输电系统仿真平台设计[J]. 高压电器, 2015, 51(9): 123-128.
ZHANG Qun, ZHAO Qian, CHEN Peng. Design of real time simulation platform based on RT-LAB for flexible HVDC system[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(9): 123-128.
- [13] 康建爽, 郝俊芳, 曹森, 等. 基于 HCM3000 平台柔性直流输电系统设计[J]. 东北电力技术, 2015, 36(1): 10-14.
KANG Jianshuang, HAO Junfang, CAO Sen, et al. Flex HVDC system design based on HCM3000 platform[J]. Northeast Electric Power Technology, 2015, 36(1): 10-14.
- [14] 李楠, 张亚琼, 郭虎锋, 等. HCM3000 中预测性熄弧角控制算法的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 119-124.
LI Nan, ZHANG Yaqiong, GUO Hufeng, et al. Design of predictive extinction angle control algorithm used in HCM3000[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 119-124.
- [15] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 基于 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.
- [16] 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 Protection and Control, 2012, 40(9): 114-117.
- [17] 段志芳, 张恺. 高压直流输电系统运行方式的仿真与研究[J]. 电力学报, 2013, 28(6): 473-475, 495.
DUAN Zhifang, ZHANG Kai. Simulation and research on operation mode of HVDC transmission system[J]. Journal of Electric Power, 2013, 28(6): 473-475, 495.
- [18] CHEN Tie, KE Haoyun. Modeling and simulation of high voltage circuit breaker based on PSCAD[C] // Proceedings of 2018 3rd International Conference on Communications, Information Management and Network Security (CIMNS2018), 2018: 5.
- [19] 胡涛, 刘翀, 班连庚, 等. 藏中电网 SVC 控制策略实时仿真及参数优化[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 1001-1007.
HU Tao, LIU Chong, BAN Liangeng, et al. Real-time simulation and parameter optimization of SVC control strategy for central-tibet power grid[J]. Power System Technology, 2014, 38(4): 1001-1007.
- [20] NAMI A, LIANG J, DIJKHUIZEN F, et al. Modular multilevel converters for HVDC applications: review on converter cells and functionalities[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 18-36.
- [21] 吉宇, 王生强, 曹炆, 等. 分散式储能 MMC 综合控制策略研究[J]. 中国电力, 2017, 50(10): 159-165.
JI Yu, WANG Shengqiang, CAO Yang, et al. Research on comprehensive control strategy of distributed energy storage MMC[J]. Electric Power, 2017, 50(10): 159-165.
- [22] 喻锋, 王西田, 杨煜, 等. 一种混合遗传算法在 HVDC 定电流控制器参数优化中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 126-131.
YU Feng, WANG Xitian, YANG Yu, et al. An application of hybrid genetic algorithm in the parameters optimization of HVDC constant current controller[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 126-131.

收稿日期: 2018-12-07; 修回日期: 2019-03-15

作者简介:

刘旭辉(1984—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为高压直流输电技术; E-mail: liuxuhui0119@163.com

张爱玲(1968—), 女, 硕士研究生, 教授级高工, 从事高压直流输电控制保护设备开发和工程管理工作;

曹森(1974—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 从事高压直流输电控制技术研究。

(编辑 魏小丽)