

基于 HYPERSIM 的柔性直流输电系统数模混合仿真建模及试验

杨立敏¹, 朱艺颖¹, 郭强¹, 孙栩¹, 刘翀¹, 刘世成¹, 王峰渊², 陈晓刚²

(1. 电网安全与节能国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市海淀区 100192;

2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江省 杭州市 310007)

Modelling and Validation of Digital-analog Hybrid Simulation for VSC-HVDC System Based on HYPERSIM

YANG Limin¹, ZHU Yiyang¹, GUO Qiang¹, SUN Xu¹, LIU Chong¹, LIU Shicheng¹,
WANG Fengyuan², CHEN Xiaogang²

(1. State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation

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

2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Voltage source converter based HVDC system (VSC-HVDC) connected to the main network of the power system results in tight coupling between DC transmission system and AC grid. A great challenge has been imposed on the simulation of the large-scale AC/DC interconnection power system. In terms of studying a large-scale power system, a digital-analog hybrid simulation model based on HYPERSIM has been proposed in this paper for a VSC-HVDC system. The super parallel computer SGI is used as the core equipment and the real control and protection devices on a project site is connected into the proposed model. The structure of the simulation model, the modelling methods of the primary system, the simplified principle and implementation scheme of the VSC-HVDC control and protection devices, and the interface techniques of digital-analog hybrid simulation are studied in this paper. Take a typical case during the site commission test programs at the Shizhou station of Yu to E ± 420 kV back-to-back VSC-HVDC transmission project for example, a detailed comparison is made between the simulation test results of the proposed model and the field test waveforms. The comparison results show that the dynamic response characteristics of the presented model are consistent with the operation characteristics of the actual project, which can be used to simulate the large scale AC/DC interconnection power grid accurately.

KEY WORDS: VSC-HVDC; HYPERSIM; digital-analog hybrid simulation; control and protection device; simulation modelling

摘要: 柔性直流输电系统接入电力系统主网络, 使得电网交直流耦合更加紧密, 同时精确地仿真柔性直流输电系统和大规模交流电网成为一个全新的挑战。文章从系统仿真研究的角度, 提出一种基于 HYPERSIM 的柔性直流输电系统数模混合仿真建模方法, 该方法以超级并行计算机 SGI 为核心, 接入了实际柔性直流输电工程的控制保护装置。文中从仿真模型构架、一次系统建模、控制保护系统的简化原则、实现以及数模接口技术等方面对所提模型展开深入研究。选择渝鄂 ± 420 kV 背靠背柔性直流输电工程施州换流站的典型试验, 将所提模型的仿真结果与现场试验波形进行了详细的对比, 结果表明所提模型的动态响应特性与实际工程的响应特性吻合, 可以为研究柔性直流与大规模交直流混联电网间的相互影响提供准确的仿真工具。

关键词: 柔性直流输电; HYPERSIM; 数模混合仿真; 控制保护装置; 仿真建模

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0910

0 引言

随着国家电网“八交十直”特高压工程, 以及渝鄂 ± 420 kV 背靠背柔性直流输电工程的建成投运, 含有柔性直流的大规模特高压交直流混联电网形态已经形成^[1]。近年来, 风电、太阳能等清洁能源装机容量不断增大, 其随机性、波动性、低抗扰动性、弱支撑性的特点越来越明显。常规直流与柔性直流之间、多回直流之间, 清洁能源与交直流电

基金项目: 国家电网有限公司科技项目“大规模电网跨平台电磁暂态实时仿真方法研究”。

Project Supported by Science Program of SGCC “Research of Large Scale Power Grid Electromagnetic Transient Real Time Simulation Method”.

网之间的相互耦合和影响,对新一代电力系统的安全稳定以及运行特性分析提出了新的挑战^[2-4]。电力系统仿真是系统分析的重要方法之一,仿真水平决定了系统研究水平。接入新能源、直流输电系统以及综合能源系统的新一代电力系统仿真聚焦的快过程仿真时间精度是微秒级,慢过程的仿真时间长度是小时级。基于机电暂态过程、中期动态过程的传统电力系统仿真分析手段在控制器的准确程度以及仿真精度和速度上存在的不足日益凸显。电力系统数模混合仿真将与实际工程一致的控制保护装置接入数字仿真电网,可进行从电磁暂态到机电暂态的全过程实时仿真研究,能较精确地模拟交直流电网的运行特性和动态过程^[5]。

基于 MMC 的电压源型换流器的柔性直流输电 (voltage source converter based HVDC, VSC-HVDC) 技术具有谐波特性好、有功无功解耦控制、可靠性高、易扩展等优点,在清洁能源大规模并网发电、大电网异步互联以及孤岛供电等领域具有广泛的应用前景^[6-7]。目前,柔性直流输电系统的仿真建模主要包括离线仿真建模以及实时仿真建模 2 类。

离线仿真建模主要指基于 PSCAD/EMTDC,以及 MATLAB 等仿真软件,搭建柔性直流输电系统的电磁暂态模型。受限于离线仿真计算机的运算能力,采用此类建模方法搭建柔性直流输电系统电磁暂态详细仿真模型,仿真速度慢且交流电网仿真规模较小^[8-11],只适合于秒级的仿真场景。

柔性直流输电的实时仿真建模根据应用场景主要分为大电网稳定性分析的系统级仿真以及单一工程的设备级仿真^[12-14]。基于加拿大魁北克 Opral-RT 公司研发的 RT-Lab 模型目前主要应用于单一柔性直流输电工程的实时仿真^[15]。中国电力科学研究院有限公司研发的 ADPSS 采用机电暂态和电磁暂态混合的方法实现系统级的实时仿真,目前在大规模交直流电网以及柔性直流输电系统方面的仿真技术仍在不断完善中^[16-17]。加拿大曼尼托巴直流研究中心开发的 RTDS 在单一柔性直流输电工程以及系统级仿真中均有应用。南方电网科学研究院采用 RTDS 进行系统级仿真,最大仿真规模达到 2000 节点^[6]。加拿大魁北克水电研究所与中国电力科学研究院有限公司国家电网仿真中心联合研发的 HYPERSIM 具备设备级和系统级仿真的能力,其中系统级仿真最大仿真规模可达到 6000 节点^[5]。

新一代电力系统对含有柔性直流的大规模交直流混联电网实时仿真的需求日益增大。该应用场

景下实时仿真的准确度与交流系统的详细程度以及柔性直流输电系统控制保护策略的准确度密切相关。因此,本文选择仿真规模更大的 HYPERSIM 作为仿真工具,采用接入实际工程用控制保护装置的数模混合仿真的方法,首先对适用于大规模交直流混联电网的柔性直流输电系统仿真建模方法展开研究,后续进一步研究含有柔性直流的大规模交直流混联电网实时仿真模型。

针对柔性直流输电系统,本文从仿真模型构架、一次系统建模、控制保护系统简化原则、实现方法以及仿真接口技术等方面,提出一种基于 HYPERSIM 的柔性直流输电数模混合仿真模型。为验证所建模型的准确性,选择渝鄂±420kV 背靠背柔性直流输电工程南通道施州换流站现场调试典型故障的响应特性,将仿真结果与现场波形进行对比,结果表明,所提仿真模型与现场响应特性吻合,验证了所提模型的准确性。

1 仿真模型构架

含有柔性直流的大规模交直流电网实时仿真难点在于:1) 大规模交流电网的节点数目庞大,网络结构复杂;2) 柔性直流输电系统子模块以及半导体开关器件数量庞大,以渝鄂±420kV 背靠背柔性直流输电工程施州换流站为例,其 MMC 子模块数量为 12 960 个,半导体开关器件 IGBT 模块数量为 25 920 只。

为了满足系统仿真精度的要求,本文提出一种基于 HYPERSIM 的柔性直流输电系统数模混合仿真模型,其总体构架如图 1 所示,包括 3 部分:一次系统、控保系统和接口部分。采用不同仿真器、不同仿真步长联合仿真的技术路线。综合考虑计算机处理器的计算能力、处理器之间的通信能力、数

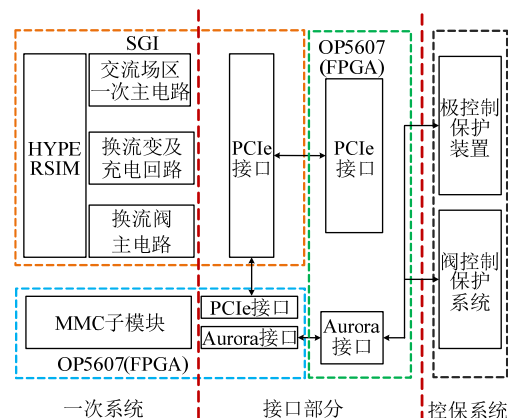


图 1 所提柔性直流输电系统数模混合仿真模型总体构架
Fig. 1 General structure of the proposed digital-analog hybrid simulation model of VSC-HVDC system

据带宽等相关指标,选择基于最新 NUMA link7 高速互联技术的 all-to-all 多核超级并行计算机 SGI UV300 对大规模交流电网进行 50ms 的数字实时仿真。对 MMC 子模块采用基于 FPGA 的仿真装置 OP5607 进行仿真,所有 MMC 子模块的仿真计算周期为 500ns。

所提模型接入柔性直流输电系统实际控制保护装置,实现大规模交直流电网电磁暂态数字模型和实际物理控制保护装置的数模混合实时仿真,以提高仿真模型的准确性。其中,与常规直流输电系统不同,柔性直流输电系统需要在阀控制系统中对子模块电容电压排序,保证子模块电容电压的均衡。

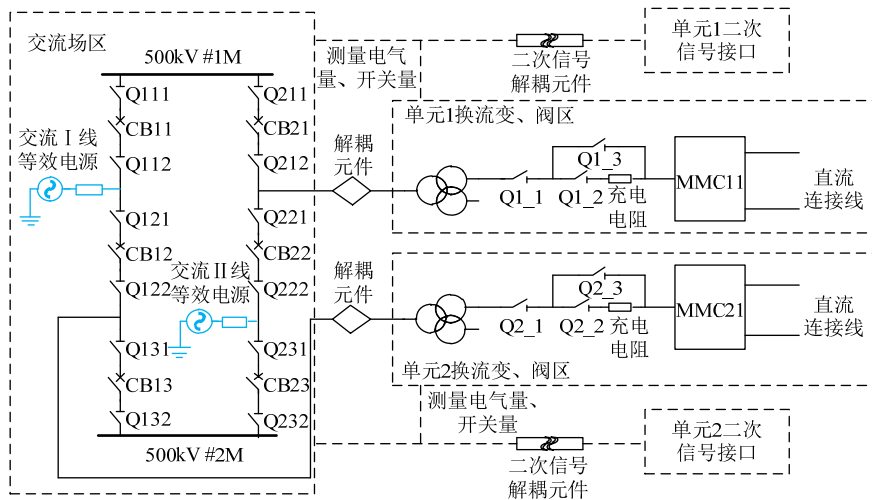


图2 所提仿真模型一次系统单侧示意图

Fig. 2 Primary system diagram of the proposed simulation model in single side

交流场区采用 2/3 接线方式将交流线路与双单元换流器相连。在所提数模混合仿真模型调试期间,与双母线相连的两回 500kV 交流线,使用三相交流电源和系统等效阻抗代替。对含有柔性直流输电的大规模交直流电网实时仿真时,将两回 500kV 交流线路接入详细的大网数字模型进行联合仿真。

换流变压器区主电路主要包括三绕组变压器和换流阀充电回路。为了保证仿真模型的准确度,变压器的绕组接线方式、中性点接地方式以及充电回路电阻和刀闸的配置等,均与实际工程现场保持一致。

2.2 直流一次系统建模

直流一次系统为 2 个单元背靠背 MMC 换流阀,在 HYPERSIM 软件中 MMC 桥臂的仿真模型如图 3(a)所示^[18],由 2 个支路并联而成,左支路为充电支路,右支路为放电支路。左支路与二极管串联的受控电压源 Vs1 输出的电压 U_{Vs1} 为

$$U_{Vs1} = \sum_{i=0}^{N_{in}} u_{sm_insert_i} + \sum_{j=0}^{N_{block}} u_{sm_block_j} \quad (1)$$

2 一次系统建模

HYPERSIM 由加拿大魁北克水电研发中心开发,依托开放的结构、高速并行处理系统,是目前唯一有能力实现 10 000+节点仿真分析的超大型电力系统电磁暂态实时仿真软件。本文依托于 HYPERSIM 软件平台,对柔性直流输电系统数模混合仿真模型的一次系统进行建模,如图 2 所示,主要分为交流系统和直流系统 2 大类。

2.1 交流一次系统建模

所提仿真模型的交流一次系统由两侧交流场区、单元 1 换流变压器区以及单元 2 换流变压器区构成。

右支路与二极管串联的受控电压源 Vs2 输出的电压 U_{Vs2} 为

$$U_{Vs2} = \sum_{i=0}^{N_{in}} u_{sm_insert_i} \quad (2)$$

式中: $u_{sm_insert_i}$ 为处于投入状态的子模块输出电压; $u_{sm_block_j}$ 为处于闭锁状态的子模块输出电压; N_{in} 为投入状态的子模块数; N_{block} 为处于闭锁状态的子模块数。

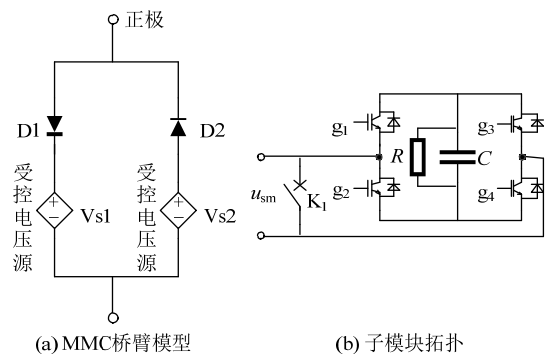


图3 MMC 桥臂仿真模型以及子模块拓扑

Fig. 3 Simulation models of MMC arm and submodule topology

在仿真模型中,基于 FPGA 的仿真装置 OP5607 计算出每个子模块的输出电压,根据子模块的工作状态计算得到受控电压源 V_{s1} 和 V_{s2} 的输出电压值。OP5607 中采用全桥型子模块拓扑,如图 3(b)所示,包含 4 只半导体开关器件分别为 g_1 管、 g_2 管、 g_3 管和 g_4 管、子模块电容及并联均压电阻和一个旁路开关。通过将 g_3 管闭锁, g_4 管导通,可以将全桥性子模块拓扑改造为半桥子模块拓扑,通过控制 g_1 管和 g_2 管的导通和关断调制子模块输出电压 u_{sm} 。当子模块发生故障时,闭合旁路开关 K_1 将子模块旁路且 $u_{sm}=0$ 。

2.3 模型解耦与任务映射

大规模电网实时仿真时通常需要解耦一次主电路,合理地划分电网络,以确保仿真的实时性。一般按照不同的场区以及不同功能划分任务,将同类任务映射到同一个计算核中^[19]。

对于所提基于 HYPERSIM 的柔性直流输电系统模型而言,如图 2 所示,共分为 10 类任务,分别为 2 个交流场区任务、4 个换流变压器区任务、2 个换流器区任务以及 2 个二次信号接口区任务。首先从功能的角度,采用二次信号解耦元件将一次系统与二次测量信号解耦为 2 类任务。对于一次系统而言,所提模型的柔性直流输电系统两侧要接入大规模交流电网的仿真模型,考虑到单个任务所需的计算资源,采用一次电路解耦元件将交流场区与换流变压器区以及换流阀区解耦。换流变压器区与换流器区不解耦。因此,所提模型通过解耦将 10 类任务为 6 部分,分别映射到不同的 CPU 核。

3 控制保护系统

所提仿真模型控保系统包括极控制保护装置和阀控制保护系统。极控制保护装置的主要功能为实现充电控制逻辑、解闭锁逻辑、直流电压控制、有功无功功率控制、交流电压控制等控制功能以及交流侧保护、直流侧保护、换流阀故障保护等保护功能。阀控制保护系统的主要功能为生成子模块开关信号、实现环流抑制、直流电流波动抑制、子模块均压等控制功能、以及子模块故障保护、桥臂过流保护等保护功能。

3.1 控制保护系统的简化原则

实际柔性直流输电系统的控保系统采用分级控制分区保护。换流阀控保系统、极控保系统和直流安控系统配置 A/B 两套系统互为备用。交流场站区域、直流场站区域、换流变压器以及换流阀区域均配置了 A/B/C 三套独立的保护系统,采用三取二

的保护策略。在互为备用的控保系统中,硬软件配置完全相同。

在确保与柔直现场控保装置响应特性一直的前提下,借鉴常规直流数模混合仿真模型的控制保护装置简化原则^[12]对柔性直流输电系统控制保护装置进行简化。简化原则如下:

1) 所有柔性直流输电系统子区域的控保系统均保留一套,每套包含一套主机,在主机软件中去除控制主机切换功能和保护主机的三取二逻辑等。

2) 保留与柔性直流输电系统运行特性相关的控制保护功能,去除换流阀冷却控制系统等柔直数模混合仿真平台无法模拟部分。

3) 简化实际柔性直流输电系统中的 CT、PT 等测量装置,直接从仿真模型一次系统中采集所需要的电气量,通过数据传输协议传输到控保装置。

控保系统配置套数的减少并不意味着系统功能大量缩减,所建柔性直流输电系统数模混合仿真系统的整体结构与实际控保系统仍保持一致,包括交流场站区与控制保护、换流变压器及充电回路控制保护、换流阀区域控制保护,直流场站区域控制保护;此外,接入实际柔性直流仿真系统的控保装置中所有主机软件均来自实际柔直工程,仅对其中无需在仿真平台进行试验验证或无法实现的部分进行简化。

对于控保系统的功能而言,简化后的柔性直流控保仿真系统与实际工程用控保系统在响应特性上完全一致,可以满足含有柔性直流的大规模交直流电网交互特性的研究需要。

3.2 控制保护系统的实现

在基于 HYPERSIM 的柔性直流输电系统数模混合仿真平台中,根据上小节所述控制保护系统简化原则,设计了 2 种控制保护系统的实现方案。方案一:采用阀控物理装置的实现方案,如图 4 所示;方案二:采用数字阀控系统的实现方案,如图 5 所示。

方案一中,极控制保护装置通过 OP5607 与 SGI 中一次系统主电路以及二次测量信号的数字模型交互数据;阀控物理装置通过慢速光纤与极控装置通信,通过 AURORA 高速光纤与 OP5607 中的 FPGA 阀体数字模型通信。

方案二中,与方案一的不同之处在于,阀控制系统部分采用数字阀控系统代替实际阀控物理装置。其中,实际阀控装置中 CPU 主控机箱负责的导通子模块数生成、环流抑制功能、直流电流波动抑制功能以及各类保护功能,在该方案中由数字阀

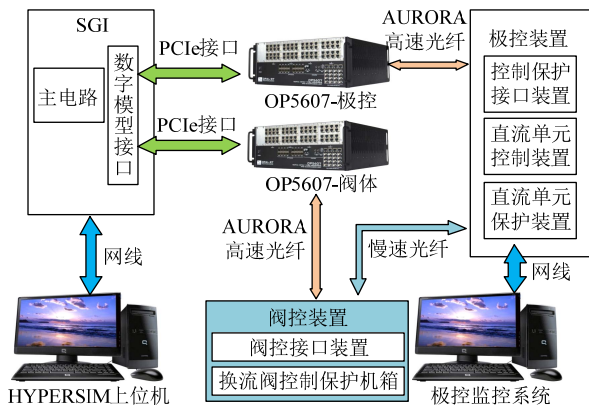


图4 采用阀控物理装置的数模混合仿真系统
Fig. 4 Digital-analog hybrid simulation system with physical valve control device

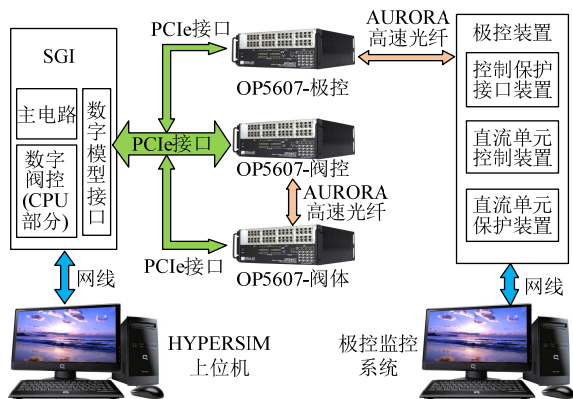


图5 采用数字阀控系统的数模混合仿真系统
Fig. 5 Digital-analog hybrid simulation system with digital valve control system

控的CPU部分实现。实际阀控装置中FPGA主控机箱负责的均压排序以及子模块开关信号生成功能,在该方案中由数字阀控FPGA部分实现,如图5所示。此外,方案一中极控制保护装置与阀控制保护装置之间的交互数据的传输路径,在方案二中调整为极控制保护装置首先通过AURORA高速光纤将数据传输到极控OP5607中,然后再通过PCIe接口传输到SGI的数字阀控CPU部分。

数字阀控的CPU部分的硬件平台是超级并行计算机SGI,软件平台是HYPERSIM。该部分在实现过程中需要使用HYPERSIM软件中的用户自定义代码模块(user coded model, UCM)。调用由实际阀控装置中CPU主控机箱软件程序生成的可执行文件。

数字阀控的FPGA部分的硬件平台为基于FPGA内核的OP5607,通过PCIe接口与超级并行计算机SGI相连,从而实现与数字阀控CPU部分交互数据;和OP5607中的FPGA阀体数字模型的通信方式,与方案一相同,采用AURORA高速光纤通信。

在所提数模混合仿真模型中,通过有功阶跃试验对方案一和方案二的动态响应特性进行对比,如图6所示。当柔性直流输电系统的有功功率由100MW阶跃到150MW,1s后阶跃回100MW时,2种方案下有功功率、直流电压和直流电流的动态响应特性高度吻合。从上述波形可以看出,数字阀控系统与实际阀控物理装置在功率控制、直流电压控制响应上具有良好的一致性,基本能够满足含有柔性直流的大规模交直流混联电网特性研究的需要。

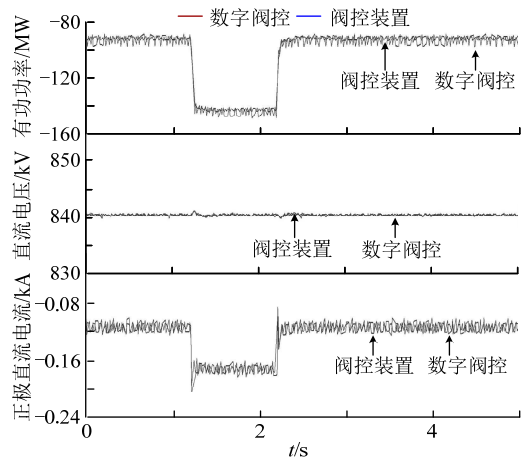


图6 2种方案下系统动态响应仿真波形
Fig. 6 Simulation waveforms of system dynamic response on two kinds of control and protection systems

4 接口技术

所提基于HYPERSIM的柔性直流输电系统数模混合仿真模型中主要采用了3种接口技术:标准的PCIe接口技术、基于AURORA协议的高速光纤通信技术以及基于60044-8协议的低速光纤通信技术。

标准的PCIe接口技术主要用于连接超级并行计算机SGI与接口装置OP5607。SGI UV300可以分成8个子区域独立运行,每个子区域包含40个CPU核以及12个PCIe接口,如图7所示。每个PCIe接口连接一台OP5607,一个PCIe接口最多输入和输出32路数据,每路最多可以传输250个32bit的数据,通信周期为50μs(HYPERSIM的计算周

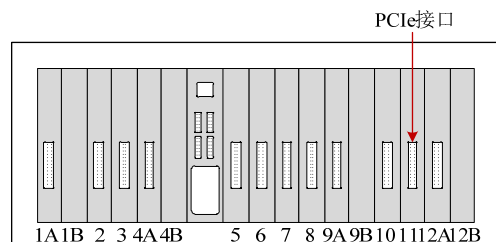


图7 SGI UV300的一个子区域示意图
Fig. 7 Diagram of one part in SGI UV300

期)^[19]。在 HYPERSIM 软件中，通过配置 sensor 文件以及 IO 文件中变量的接口通道编号，将各个数字量和模拟量与 PCIe 接口一一对应，从而实现 SGI/HYPERSIM 与 OP5607 的高速通信。

阀控物理装置与数字阀体 OP5607 之间采用 Aurora 8b10b 协议，通信周期为 10 μ s(与实际工程相同)，单根光纤最大容纳 201 个 32bit 的二进制数，通信协议如表 1—2 所示。对于单个 MMC 而言，方案一共需要 12 根光纤。数字阀控 FPGA 部分与数字阀体 OP5607 之间也采用 Aurora 8b10b 协议，通信周期为 50 μ s(HYPERSIM 的计算周期)，单根光纤可最大容纳 879 个 32bit 二进制数据。对于单个 MMC 而言，方案二需要 2 根光纤。物理阀控装置的控制周期为 100 μ s，数字阀控系统的控制周期为 50 μ s，由于在高压大功率场合 MMC 子模块的平均开关频率较低^[20]，因此，阀控系统采用 100 μ s 或 50 μ s 的控制周期对 MMC 的运行特性影响不大。

表 1 数字阀体 OP5607 发送到阀控物理装置通信协议

Tab. 1 Protocol from digital valve on OP5607 to physical valve control device

名称	位宽/bit	功能	备注
Head#1	32	帧头#1	
v_branch	6*16	桥臂电压	传输量
i_branch	6*16	桥臂电流	传输量
Head#2	32	帧头#2	
sm_voltage	256*16	子模块电压	传输量
Head#3	32	帧头#3	
sm_state	256*8	子模块电压	传输量

表 2 阀控物理装置发送到数字阀体 OP5607 通信协议

Tab. 2 Protocol from physical valve control device to digital valve on OP5607

名称	位宽/bit	功能	备注
Head#1	32	帧头#1	
sm_order	256*8	子模块开关命令	传输量

极控制保护装置与极控 OP5607 之间采用的 Aurora 8b10b 协议，通信周期为 50 μ s(HYPERSIM 的计算周期)，单根光纤可最大容纳 130 个 32bit 二进制数据，上下行通信协议如表 3 所示。每帧有效数据部分为 128 个 32bit，其中前 100 个为模拟量，后 28 个为数字量^[19]。

柔直极控制保护装置与阀控制保护装置间采用基于 IEC60044-8 标准协议的慢速光纤通信技术。

表 3 极控制保护装置与极控 OP5607 通信协议

Tab. 3 Protocol between OP5607 for pole control and the pole control and protection device

名称	位宽/bit	功能	备注
Head	32	帧头	0xAAAAAAAA
Data	128*32	有效数据	传输量
CRC	32	校验位	

该协议的的数据帧采用 IEC 60870-5-1 的 FT3 格式。通用帧的标准传输速度为 10Mbit/s(数据时钟)，采用曼彻斯特编码，首先传输 MSB(最高位)。传输的数据主要包括换流阀解闭锁指令、交直流充电指令、桥臂参考电压等信息。

柔直数模混合仿真系统是一个高精度控制系统，对系统中不同设备之间数据通信同步性具有很高的要求。所建模型中选用 OP5607 作为接口设备，它支持硬件同步和软件同步 2 种同步方式。硬件同步是通过光纤或音频同步线，以一台接口设备为主时钟，其他设备直接从主时钟上获取同步源。软件同步中所有接口设备通过 PCIE 串行通信线从仿真主机上获取时间源^[19]。实际的柔性直流输电系统的控制保护系统是一个同步系统，同步源为极控装置。所建模型采用硬件同步的方式，将极控 OP5607 作为主时钟，通过光纤将所有的 OP5607 相连，从而保证接口装置的通信的同步性。

5 试验验证

对于柔性直流输电系统数模混合仿真平台，需要通过全面的功能性试验验证柔直控保装置各项控制和保护功能的正确性以及工程现场的一致性。结合柔性直流输电系统控保装置出厂试验和现场调试内容，总结出实验室柔性直流控保装置试验项目应当包括表 4 所示内容。

表 4 柔性直流输电系统数模混合仿真模型功能性试验

Tab. 4 Functional test contents of digital-analog hybrid simulation model on VSC-HVDC system

序号	控制试验	保护试验
1	充电试验	最后断路器试验
2	空载加压试验	交流系统故障穿越试验
3	起/停试验	模拟直流过电压保护跳闸试验
4	功率升降/暂停试验	模拟桥臂过流保护跳闸试验
5	有功/无功阶跃试验	故障子模块数超限保护试验
6	直流/交流电压阶跃试验	子模块过压保护试验
7	无功控制模式切换试验	—
8	分接头试验	—
9	双单元控制试验	—

为验证所提柔性直流输电系统数模混合仿真模型与实际系统的一致性，本文以渝鄂背靠背柔性直流输电工程南通道施州换流站为例，针对同样的系统运行条件，在仿真模型上模拟与现场一样的运行，并将仿真波形与现场实测波形进行对比分析。

试验选用 2018 年 12 月 30 日进行动态性能试验中功率反送，有功功率指令阶跃试验，试验工况如下：直流系统输送功率为-100MW；直流系统运行方式为功率反送，采用单单元控制方式，渝侧采用定直流电压控制，鄂侧采用定有功功率控制，两

侧无功控制模式均为定交流电压控制。待系统稳定后,施加持续时间为 1s,幅值为 30MW 的阶跃指令。

将仿真试验系统工况调整为与现场动态试验前一致,并施加同样的阶跃指令。图 8—9 为施州换流站有功功率、直流侧电压电流以及控制器相关变量的波形对比,其中红色曲线为现场波形,蓝色曲线为仿真波形。

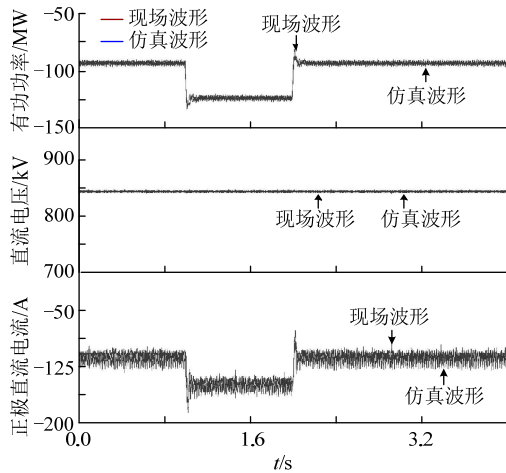


图 8 施州换流站有功功率、直流侧电压和电流波形对比
Fig. 8 Comparison of active power, DC voltage and DC current of Shizhou station

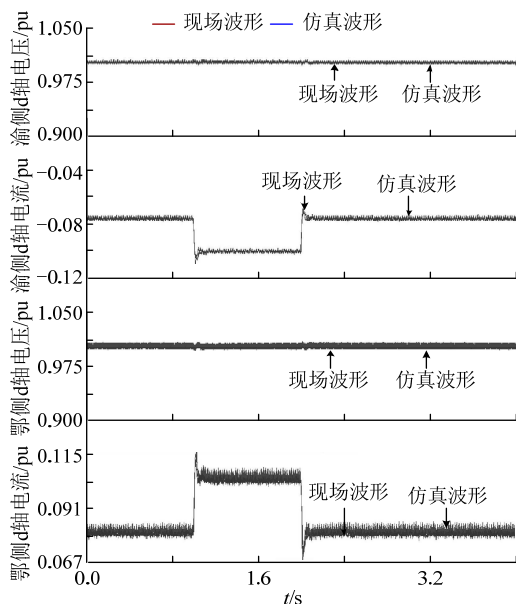


图 9 施州换流站两侧 MMC 控制器变量波形对比
Fig. 9 Comparison of control variables of two side MMCs in Shizhou station

从图 8 中可以看出,稳态时仿真模型与现场试验波形高度吻合,直流电压均为 840kV,直流电流为 117A,有功功率为 98MW。动态变化时,仿真模型与现场试验波形的响应时间、变化趋势十分吻合,图 9 所示的 MMC 两侧控制器的交流电压和电流 d 轴分量在稳态以及动态变化时响应时间、变化趋势具有高度一致性。由于对一次系统进行电磁暂

态仿真建模时,各个设备的准确运行参数、换流器各处的杂散电容、杂散电感以及交流系统等效阻抗等参数均无法做到没有偏差,因此,所建的柔性直流输电系统数模混合在仿真结果中高频振荡的幅值和频率与现场波形存在较小偏差,但现场波形与仿真试验波形的整体变化趋势和幅值吻合程度非常高,作为研究含有柔性直流的大规模交直流系统相互影响的工具,可以认为模型的运行特性与实际工程是一致的。

图 10 为鄂送渝 200MW 时渝侧发生 A 相接地的仿真波形,从图中可以看出,在故障期间渝侧换流器通过负序控制降低 A 相调制波以减少故障相电压,从而抑制故障相电流。仿真系统中极控制保护系统的响应与预期相同,验证了控制保护策略的正确性。

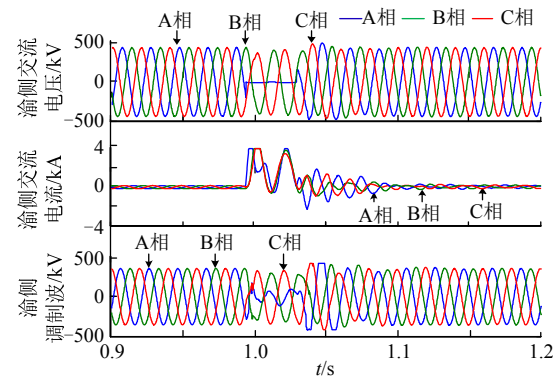


图 10 施州换流站渝侧 A 相接地故障仿真波形
Fig. 10 Waveforms of Shizhou station under phase A fault condition in Yu Side

6 结论

为了满足含有柔性直流的大规模交直流混联电网实时仿真的需求,本文提出一种基于 HYPERSIM 的柔性直流输电系统数模混合仿真建模方法,并以渝鄂±420kV 背靠背柔性直流输电工程南通道为例,将所建柔直模型的仿真结果与现场试验波形进行对比,得出结论如下:

1) 接入实际控保装置的柔性直流输电系统数模混合实时仿真技术是可行的,能够实现对柔性直流输电系统精确仿真,为实现接入大规模交流电网实现交直流混联电网的实时仿真奠定了基础。

2) 采用不同仿真器即基于 FPGA 的仿真装置和超级并行计算机 SGI 的联合仿真,能够实现对 MMC 所有子模块 500ns 的仿真,以及对交流电网 50μs 的仿真,保证了柔性直流输电系统接入大规模交流电网仿真的精确性。

3) 在保证系统动态响应特性与实际系统一致的前提下,对数模混合仿真平台中柔性直流输电系统控制保护装置进行合理简化,能够降低仿真系统复杂度。

4) 柔性直流输电数模混合仿真模型的响应特性与实际系统的响应特性高度吻合, 验证了所提模型的准确性, 能够为研究柔性直流与大规模交直流电网交互特性提供有力依据。

参考文献

- [1] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904.
Zhou Xiaoxin, Chen Shuyong, Lu Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904(in Chinese).
- [2] 吴克河, 王继业, 李为, 等. 面向能源互联网的新一代电力系统运行模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(4): 966-978.
Wu Kehe, Wang Jiye, Li Wei, et al. Research on the operation mode of new generation electric power system for the future energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 966-978(in Chinese).
- [3] 汤奕, 郑晨一. 高压直流输电系统换相失败影响因素研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(2): 187-201.
Tang Yi, Zheng Chenyi. Review on influencing factors of commutation failure in HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 187-201(in Chinese).
- [4] 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(in Chinese).
- [5] 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 Yiyang, Yu Zhao, Li Baiqing, et al. Construction and validation of electromagnetic transient digital-analog hybrid simulation platform for large-scale AD/DC power grids part one general configuration and simulation validation of large scale AD/DC power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 164-170(in Chinese).
- [6] 杨立敏, 李耀华, 李子欣, 等. MMC 子模块故障下能量再平衡控制与安全运行域分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 34(4): 52-59.
Yang Limin, Li Yaohua, Li Zixin, et al. Energy rebalance control and safe operation region analysis of MMC with sub-module fault[J]. Electric Power Automatic Equipment, 2018, 34(4): 52-59(in Chinese).
- [7] 陈启超, 李晖, 吴文传, 等. 渝鄂背靠背柔性直流频率限值控制器优化设计[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 385-392.
Chen Qichao, Li Hui, Wu Wenchuan, et al. Optimization design of frequency limit controller of back-to-back VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 385-392(in Chinese).
- [8] Saad H, Sébastien Denetière, Mahseredjian J, et al. Modular multilevel converter models for electromagnetic transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(3): 1481-1489.
- [9] 罗雨, 饶宏, 许树楷, 等. 级联多电平换流器的高效仿真模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2346-2352.
Luo Yu, Rao Hong, Xu Shukai, et al. Efficient modeling for cascading multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2346-2352(in Chinese).
- [10] Gnanarathna U N, Gole A M, Jayasinghe R P. Efficient modeling of modular multilevel HVDC converters (MMC) on electromagnetic transient simulation programs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 316-324.
- [11] Xu J, Zhao C, Liu W, et al. Accelerated model of modular multilevel converters in PSCAD/EMTDC[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 129-136.
- [12] 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(二)直流输电工程数模混合仿真建模及验证[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 32-37.
Zhu Yiyang, Yu Zhao, Li Baiqing, et al. Construction and validation of electromagnetic transient digital-analog hybrid simulation platform for large-scale AD/DC power grids part two modelling and validation of digital-analog hybrid simulation of DC transmission projects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 32-37(in Chinese).
- [13] 贺之渊, 刘栋, 庞辉. 柔性直流与直流电网仿真技术研究[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 6-17.
He Zhiyuan, Liu Dong, Pang Hui. Research of simulation technologies of VSC-HVDC and DC grids[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 6-17(in Chinese).
- [14] 孙栩, 曹士冬, 卜广全, 等. 架空线柔性直流电网构建方案[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 678-682.
Sun Xu, Cao Shidong, Bu Guangquan, et al. Construction scheme of overhead line flexible HVDC grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 678-682(in Chinese).
- [15] 汪谦, 宋强, 许树楷, 等. 基于 RT-LAB 的 MMC 换流器 HVDC 输电系统实时仿真[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 36-40.
Wang Qian, Song Qiang, Xu Shukai, et al. Efficient modeling for cascading multilevel converters[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 36-40(in Chinese).
- [16] 王艺璇, 张鑫, 穆清, 等. 特高压直流分层接入系统换相失败预防控制参数优化[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 329-336.
Wang Yixuan, Zhang Xin, Mu Qing, et al. Parameter optimization of commutation failure prevention and control of UHVDC hierarchical connection to AC grid system[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 329-336(in Chinese).
- [17] 朱艺颖. 电力系统数模混合仿真技术及发展应用[J]. 电力建设, 2015, 36(12): 42-47.
Zhu Yiyang. Development and application of power system digital-analog hybrid simulation technology[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(12): 42-47(in Chinese).
- [18] Li Wei, Belanger J. An equivalent circuit method for modelling and simulation of modular multilevel converter in real-time HIL test bench[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 2401-2409.
- [19] 董鹏, 朱艺颖, 郭强, 等. 基于 HYPERSIM 的直流输电系统数模混合仿真接口技术研究[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 3895-3902.
Dong Peng, Zhu Yiyang, Guo Qiang, et al. Hybrid digital-analog simulation interface technology for HVDC system based on HYPERSIM[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 3895-3902(in Chinese).
- [20] Li Zixin, Gao Fanqiang, Xu Fei, et al. Power Module Capacitor Voltage Balancing Method for a $\pm 350\text{kV}/1000\text{MW}$ Modular Multilevel Converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(6): 3977-3984.



杨立敏

在线出版日期: 2020-09-02。

收稿日期: 2020-06-23。

作者简介:

杨立敏(1991), 男, 通信作者, 博士, 研究方向为柔性直流输电技术、大功率电力电子电能变换技术, E-mail: yang_li_min@yeah.net;

朱艺颖(1974), 女, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统实时仿真、直流输电及电磁暂态分析等, E-mail: wzhyyf@epri.sgcc.com.cn。

(实习编辑 李健一)