

基于通用透明协议的接口模型的双平台并行实时仿真

朱艺颖¹, 李跃婷¹, 杨立敏¹, 刘广业², 魏明洋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 100080;

2. 上海科梁信息工程股份有限公司, 上海 200000)

摘要: 随着大规模新能源和多馈入高压直流的接入, 我国交直流大电网的持续发展对电力系统仿真规模提出了更高的要求, 当前扩大仿真规模的主要方法是采用定制化的私有协议组成的SGI高性能计算机群。然而通过直接互联扩展仿真资源的方法受制于SGI定制化的机器间通信装置硬件接口数量, 以及通信协议新旧版本不兼容等局限。为了解决上述问题, 提出了一种基于通用透明协议的通信接口和波导方程的解耦线路接口模型, 采用OP5607光纤接口和Aurora协议, 通过解耦线路对两套不同版本的SGI进行联合仿真。仿真结果验证了其可行性, 并最终在渝鄂工程模型上进行了工程验证。

关键词: 解耦线路接口模型; 实时; 通信协议; 联合仿真

Dual-platform parallel real-time simulation based on the interface model of the universal transparent protocol

ZHU Yiyang¹, LI Yueting¹, YANG Limin¹, LIU Guangye², WEI Mingyang²

(1. State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation (China Electric Power Research Institute Co., Ltd.), Beijing 100080, China; 2. Shanghai Keliang Information Engineering Co., Ltd., Shanghai 200000, China)

Abstract: With large-scale new energy generation plants and multi-infeed HVDC transmission becoming involved in the grid, the development of AC and DC power grids has higher requirements on the scale of power system simulation. The current main method to expand the scale of simulation is to use customized proprietary protocols to form a SGI high-performance computer cluster. However, the method of expanding simulation resources through direct interconnection is limited by the number of hardware interfaces of the SGI-customized inter-machine communication device, and is also limited by the incompatibility of new and old versions of the communication protocol. In order to solve this problem, this paper proposes a decoupled line interface model based on the communication interface of the universal transparent protocol and the waveguide equation, using the OP5607 optical fiber interface and Aurora protocol. Two sets of different versions of SGI are jointly simulated through decoupling lines. The results verify its feasibility. Finally, engineering verification is carried out on the Yu-E engineering model.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research on Real-time Simulation Method of Large-scale Power Grid Cross-platform Electromagnetic Transient State".

Key words: decoupled line interface model; real-time; communication protocol; co-simulation

0 引言

近年来, 大规模新能源通过直流输电远距离传输的需求和多馈入高压直流在受端交流耦合性的增强, 使得电网的运行更加复杂^[1-2]。另一方面新建

直流线路的加入在各种工况下的运行特性、极限故障下是否会对原有交流网络产生影响, 将是电力网络运行维护面临的一个难题^[3-10]。对此, 为保证安全可靠, 必须对电力电子装置动态特性、闭环控制策略等进行详尽仿真测试, 其中实时仿真技术可全面实现电力电子系统极限操作行为、各种故障工况测试, 且成本较低、可信用度高^[11-16]。目前, 实时仿真机的硬件架构有基于商用计算机(PC)、精简指令

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

集处理器(Power PC)、高性能计算机(HPC)以及可编程逻辑门阵列(FPGA)的结合, 扩大仿真规模的主要方法是采用定制化的私有协议把多个实时仿真机以网状或链状互联组成集群。例如使用 Hypersim 运行于由 32 个 10 核组成的 SGI 高性能计算机和 53 台基于 Xilinx VC707 FPGA 的 OP5607 实时仿真集群, 可以实现多于两万个电气节点和 16 条直流输电系统以 $50 \mu\text{s}$ 的步长进行实时计算, 同时可以实现仿真模型与控制器之间数据交互及协议转换^[17-19]。然而, 随着所需仿真电力系统的不断扩大, 这样的 SGI 的 CPU 数量已经不能满足更大规模的电网仿真需求。对原系统扩容一方面受限于原有定制化机间通信协议与新的硬件存在兼容性问题, 改造难度大; 另一方面基于 Xilinx FPGA 的 Aurora 协议具有高速和低冗余的特点, 已经广泛用于实时仿真机与待测控制保护装置的接口通信^[20-22], 技术成熟, 易于实现。

对此, 本文提出了一种基于 Aurora 通用透明协议的通信接口和波导方程的解耦线路来实现两台不同版本 SGI 集群的联合仿真, 以满足更大规模的仿真需求。两套 SGI 平台之间联合仿真, 其数据通信会有一个必要的固有延时。众所周知, 传输线电信号在线路末端之间的距离上传播具有一个固有延时, 因此, 可采用传输线的固有延时来吸收两套 SGI 通过 Aurora 通信产生的固有延时, 基于此本文选择 Bergeron 的传输线作为连接两套 SGI 的接口模型。

1 联合仿真接口通信及同步机制

1.1 联合仿真要求

当两套系统进行联合仿真时, 需要保证两套系统满足一定的条件才能确保仿真结果的可靠性及正确性, 根据实时仿真的需求, 两套系统联合仿真需要考虑以下三个主要目标:

- 1) 同步两套仿真系统之间的时钟信号;
- 2) 交换两套系统之间的数字信号和逻辑信号;
- 3) 保证一次交互的时间在 $10\sim 50 \mu\text{s}$ 的仿真步长之内^[23-27]。

此外, 通信过程需要保证: 可靠和快速, 即通信延时小。由于不可避免的通信延迟和协议限制, 所以选择合适的通信协议需要考虑对联合仿真结果的影响。

1.2 联合仿真通信和同步机制

针对上述联合仿真的要求, 本文选用 Aurora 协议的相关参数设置如表 1 所示。该协议是一种可在多种常见 FPGA 上运行的通用协议, 通信冗余小于 200 ns , 基于 8b/10b 编码方式, 可以使用 SFP(Small Form-factor Pluggable)光模块和光纤作为介质实现

设备间的互联。FPGA 采用 200 MHz 的基础时钟, 每个通信接口既可以支持 128 个单精度浮点数的双向数据传输, 又能保证交互时间低于 $50 \mu\text{s}$ 。

表 1 Aurora 协议参数设置

Table 1 Aurora protocol parameter settings

参数	值
数据宽度	4 Bytes
传输速率	5 Gb/s
数据量模式	全双工
参考时钟	125 MHz

两个 SGI 机群之间可以有一根或多根光纤接口, 但其中至少有一根需要传输一个时钟标志位, 作为两套机群的同步信号。机群间具体的通信和同步机制如图 1 所示。

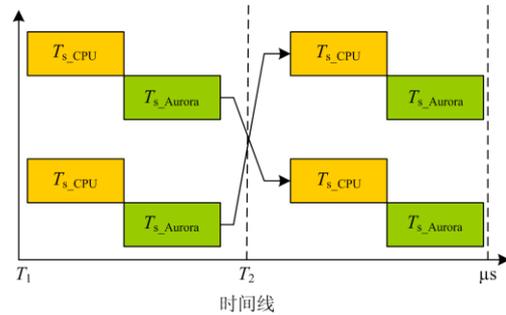


图 1 时钟同步机制

Fig. 1 Clock synchronization mechanism

由图 1 可见, 在一个仿真步长 T_s 内主要包括两部分, 即 CPU 内部计算耗时 T_{s_CPU} 和与另一端 FPGA 之间的数据传输时间 T_{s_Aurora} 。Aurora 通信周期是由 FPGA 时钟精准控制的, 这里以 Aurora 传输协议的帧尾来触发下一个仿真步长, 从而保证了不同电磁暂态实时仿真平台之间的同步。

1.3 联合仿真解耦方法

联合仿真的解耦原理是利用了输电线路的波导时延特性, 图 2 为输电线路的 Bergeron 等效电路图^[28-32], 一条输电线路可以拆分成两个独立的电流注入二端口网络, 这个模型称为分布参数线(Distributed Parameters Line, DPL)。在进行仿真建模时, 将系统或者线路的电感 L 进行解耦, 可以用图 3 中的电路进行等效, 其中, T_s 为仿真步长, L 为等效前电抗值, K 和 R 为电感等效后得到的值。

为了将运行在不同 SGI 平台上的 Hypersim 仿真模型联系起来, 将一个电感 L 分为相等的两部分, 分别在不同的 SGI 中运行, 解耦后的电感等效电路如图 4 所示。图中的 K 和 R 为电感解耦等效后的值, 由于将电感进行均分, 因此这里的 K 和 R 为之前的

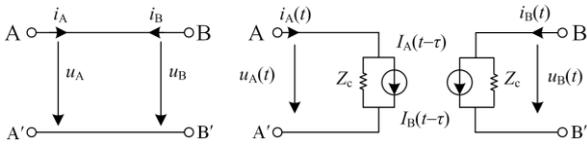


图 2 输电线路的 Bergeron 等效电路

Fig. 2 Bergeron equivalent circuit of transmission line

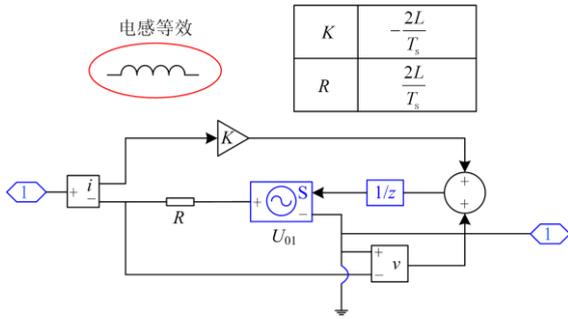


图 3 电感的等效模型

Fig. 3 Equivalent model of inductance

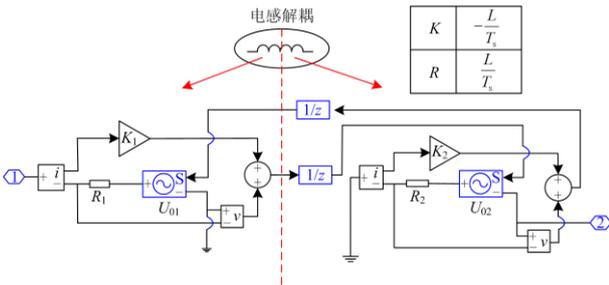


图 4 电感的解耦等效模型

Fig. 4 Decoupling equivalent model of inductance

一半，这里 $K_1 = K_2 = K$ ， $R_1 = R_2 = R$ 。

鉴于目前的应用主要是把不同区域的电网仿真在两套 SGI 上，区域电网之间采用高压直流或高压交流线路互联，线缆长度大于 30 km，其自然传输延时大于两个仿真步长(典型值为 100 μ s)，因此分布参数线将作为本平台主要的解耦元件。

DPL 被用作解耦模块，基于 Bergeron 行波法用于电磁暂态程序，与离线模型实现不同，因为诺顿或戴维南瞬态等效值来源于电流和电压的递归时间值，所以必须考虑每个时间步长的网络解决方案之后的数据更新，而在 1.2 节中 T_{s_Aurora} 协议传输的内容即为此部分更新数据，可以保证在单个 CPU 步长内完成数据交互。

以上从软件和硬件两个方面进行了分析，得出可以同时满足联合仿真三个目标的交互方式。

1.4 联合仿真 Hypersim 通信协议配置方法

基于 Virtex 7 系列 FPGA 的实时仿真平台

OP5607 的光纤接口如图 5 所示，在两套 SGI 上进行 Hypersim 联合仿真时，数据通过 OP5607 的高速光口进行通信和同步。



图 5 OP5607 光纤接口

Fig. 5 OP5607 optical fiber interface

在 Hypersim 模型里，使用预先定制的 FPGA Bitstream 文件来完成 SFP 通信，利用软件界面中的 IO 接口配置选项，可以按需分配 IO 并定义其格式，最后通过软件里的 Sensor 列表与 FPGA 进行通信。

本文定制的 Bitstream 文件里已经定义了 4 对端口(DataIn1~4 和 DataOut1~4)，DataIn 的作用是将 Hypersim 模型中的数据下发到 FPGA，然后向外发送，而 DataOut 的作用是将 FPGA 接收的数据上传到 Hypersim 模型。其中：DataIn1 下发光纤接口 CH00 的复位控制信号；DataIn2 下发光纤接口 CH00 的传输数据；DataOut1 上传光纤接口 CH00 接收到的数据；DataOut2 上传光纤接口 CH00 的状态信息；DataIn3 下发光纤接口 CH01 的复位控制信号；DataIn4 下发光纤接口 CH01 的传输数据；DataOut3 上传光纤接口 CH01 接收到的数据；DataOut4 上传光纤接口 CH01 的状态信息。

但需注意，在定制的 Bitstream 文件里定义传输复位信号和状态信号的端口是无法配置多个向量的，它们只能传输一个双字的浮点型数据，而定义传输光纤数据的端口可以为 16 个浮点型数据和 32 个双字的数字量。一般地，电压电流信号采用浮点型数据格式，开关信号采用数字量格式。

FPGA 接收到 Hypersim 下发的数据，缓存后即刻发送到光纤上。光纤采用 LC-LC 多模 850 nm 的配置，SFP 光模块选用 Avago AFBR-57R5APZ，线上传送速率为 2 Gbps，采用 Aurora 8b/10b 编码，通道位宽 4 个字节。按照此配置，能够在 1 个仿真步长内传输 16 个浮点型数据和 32 个双字的数字量。光纤接收到外部数据后，会在每个仿真步长将缓存的数据上传到 Hypersim 模型。

2 联合仿真接口模型测试

2.1 联合仿真接口模块单体测试

用于联合仿真的 DPL 接口模块开发依赖于其两个主要的性能约束：用于仿真机数据通信的硬件接口；用于 Hypersim 定制 DPL 接口数学模型。针对以上两个性能约束，从简单到复杂对 DPL 接口模型进行测试，对通信接口和接口模型进行功能性验证。测试电路如图 6 所示。

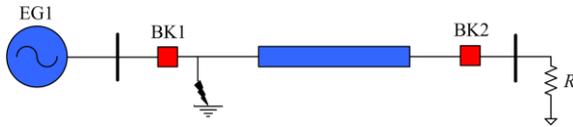


图 6 单体模型测试
Fig. 6 Unit model test

为了评估联合仿真过程，在该电路中加入故障让电路稳态运行过程中产生干扰。首先在单台 SGI 进行测试，设置 A 相接地故障，故障后断路器 BK1 分开，然后断路器 BK2 分开，故障清除后断路器 BK1 和 BK2 重新合闸，其动作过程如图 7 所示。

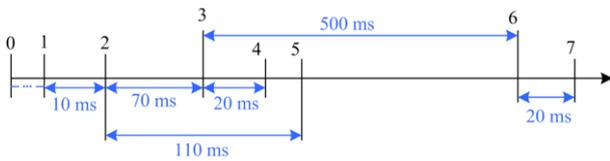


图 7 开关动作时刻
Fig. 7 Switch action time

图 7 中各个时刻点动作变化如下：

- 1) 时刻 0 是模型启动；
- 2) 时刻 1 是 A 相过零点；
- 3) 时刻 2 是 A 相对地故障；
- 4) 时刻 3 和时刻 4 分别是线路断路器 BK1 和 BK2 的跳闸；
- 5) 时刻 5 是故障的清除；
- 6) 时刻 6 和时刻 7 分别是线路断路器 BK1 和 BK2 的重新连接。

为了验证联合仿真 DPL 接口模块，在两套 SGI 上重复测试上述过程，其中 BK1 运行在 SGI1, BK2 运行在 SGI2, 联合仿真采用 DPL 接口模块进行连接，测试结果与在单台 SGI 上进行对比。

对以上两个试验的 A 相电压进行录波，仿真结果如图 8 所示，可以看出单独在 SGI 仿真与联合仿真的结果基本吻合，说明联合仿真的接口模块数学模型正确，两套 SGI 之间的通信正常。

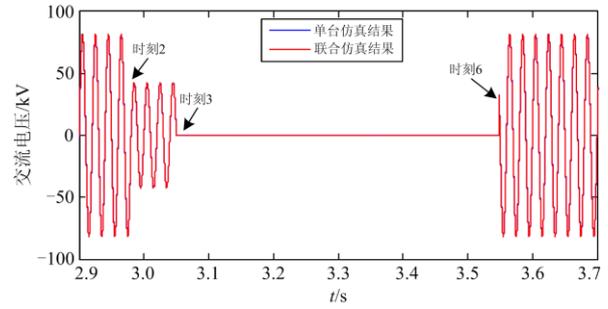


图 8 两种测试结果对比

Fig. 8 Comparison of two test results

2.2 联合仿真接口模块工程模型测试

为了验证联合仿真方案的可行性和正确性，以渝鄂柔直工程接入电网作为仿真研究对象，主回路参数如表 2 所示，在 Hypersim 上搭建相应的实时仿真模型。采用两套 SGI 联合仿真的形式，对渝鄂工程南通道恩施直流进行测试，南通道的系统主接线如图 9 所示。

表 2 主回路参数

Table 2 Main circuit parameters

参数	值
电网侧额定电压	525 kV
额定直流电压	±420 kV
每个单元额定容量	1 250 MVA
每个桥臂子模块个数	540(包含 40 个冗余子模块)
桥臂电抗	140 mH
子模块电容	11 mF
联结变压器	Y0/YN/Δ, 525/437.23/66 kV

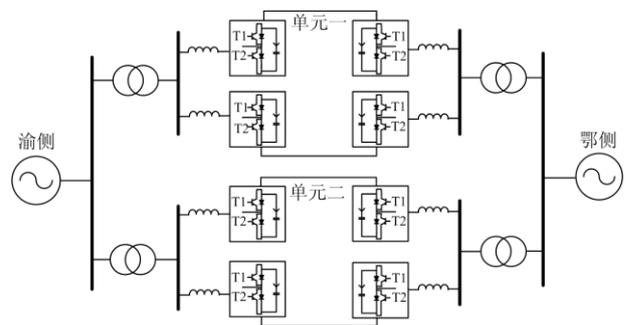


图 9 渝鄂工程南通道主回路

Fig. 9 South passage main circuit of Yu-E project

由图 9 可知，南通道分为单元一和单元二，每个单元由 2 个背靠背 MMC 换流阀组成。两套 SGI 分别仿真单元一的两端交流电网和 MMC 模型，直流输电线路采用 DPL 接口模块，分别进行了稳态运行试验、单相接地试验和直流侧正极母线接地试验，测试结果如下所述。

2.2.1 HVDC 稳态运行试验

系统控制目标为：鄂侧网侧有功功率为额定功率 1 250 MW，无功功率为 500 Mvar。图 10 为鄂侧仿真结果，依次为直流电压、有功功率和无功功率、交流电压、交流电流。由图 10 可知，采用 DPL 接口模块的 SGI 联合仿真双端直流模型能够稳定地运行在有功功率为 1 250 MW、无功功率为 500 Mvar 的功率点上，稳态控制效果良好。

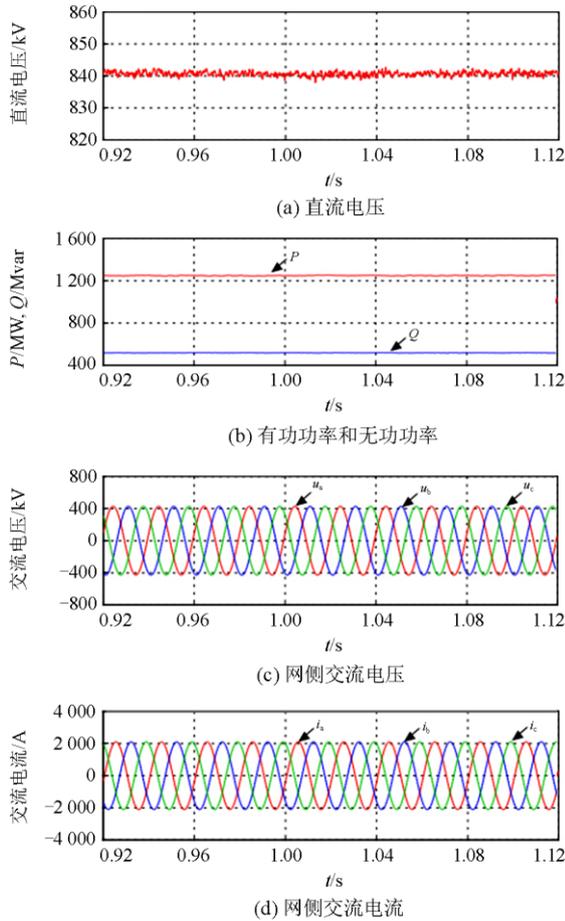


图 10 渝鄂工程稳定运行波形

Fig. 10 Waveform of stable operation of Yu-E project

2.2.2 网侧单相接地故障试验

在渝侧网侧进行单相接地故障试验，具体试验工况为：有功功率为额定功率 1 250 MW，渝侧和鄂侧均输出无功功率 400 Mvar，然后渝侧网侧发生 A 相接地故障，故障持续时间为 100 ms。试验结果如图 11 所示，依次为渝侧网侧交流电压、交流电流，以及换流阀侧交流电压、交流电流。由图 11 可知，网侧 A 相电压在故障期间跌落到 0，故障发生后，控制保护系统的故障穿越功能启动，可以看到阀侧电流基本保持三相平衡，且没有过电流，故障持续 100

ms 后，系统恢复正常运行。试验结果证明，采用 DPL 接口模块的 SGI 联合仿真双端直流模型的控制保护系统在单相接地故障下的故障穿越能力良好。

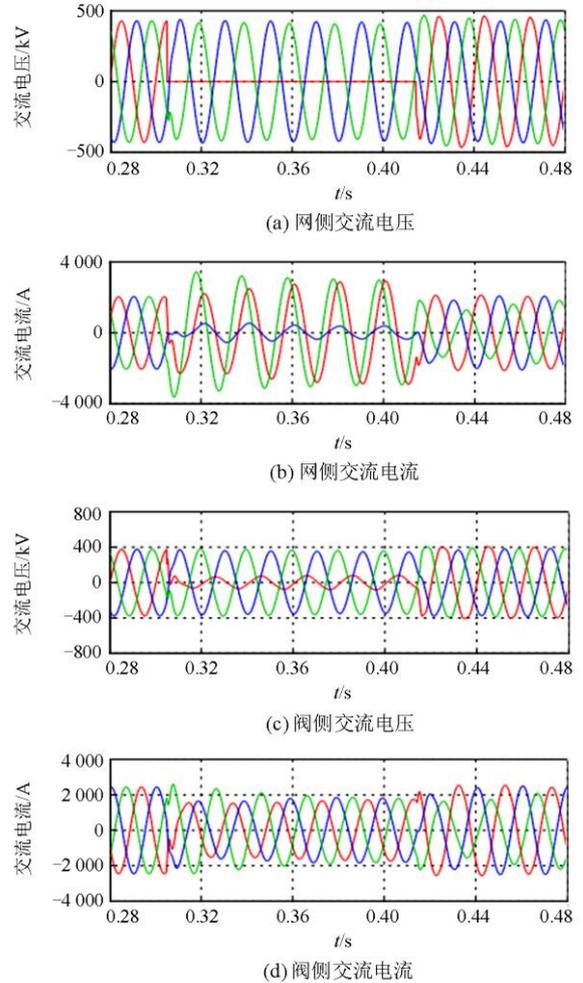
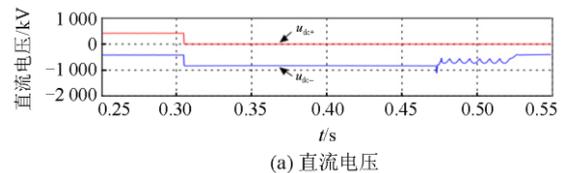


图 11 单相接地故障试验

Fig. 11 Single-phase ground fault test

2.2.3 直流侧正极母线接地故障试验

在单元一直流侧进行正极母线接地故障试验，具体试验工况为：HVDC 运行方式，有功功率 1 250 MW，渝侧输出无功功率 365 Mvar，然后直流侧正极母线发生接地故障，故障持续时间为 1 s，仿真结果如图 12 所示，依次为直流电压、渝侧交流电压、渝侧交流电流、换流阀闭锁信号和交流开关跳闸信号。



(a) 直流电压

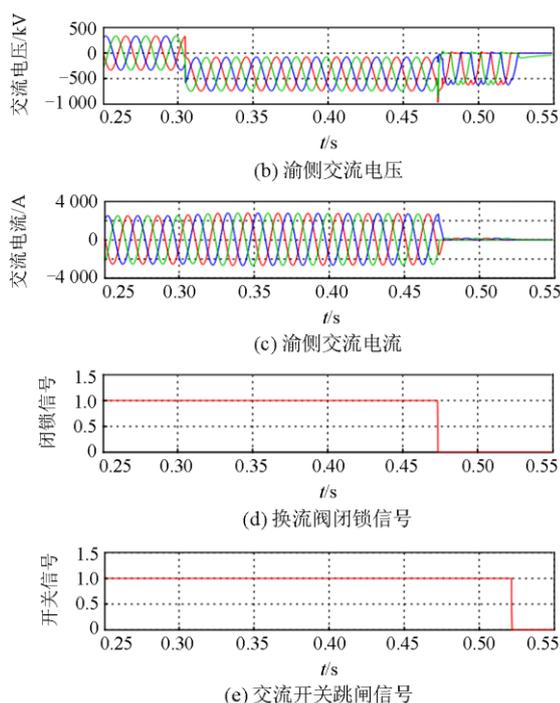


图 12 直流正极接地故障试验

Fig. 12 DC positive ground fault test

由图 12 可知, 故障发生后, 直流侧正极母线电压跌落到 0, 同时负极母线电压降到约 -840 kV, 阀侧交流母线电压也开始出现直流偏执, 这是直流正极母线接地故障改变了阀侧的接地方式造成的。控制保护系统检测到故障后, 首先闭锁, 然后跳闸。试验结果表明控制保护系统能够正确地检测故障, 并执行相应的保护动作, 达到了预期的控制保护效果。

从以上三个试验结果可以看出, 直流输电线路采用 DPL 解耦, 两套 SGI 联合仿真, 在稳态和故障工况下, 联合仿真的结果均达到预期目标, 验证了联合仿真的接口模块数学模型的正确性。

3 结论

本文提出的基于 Aurora 协议和分布参数线模型的解耦接口模块可以实现两套不同版本 SGI 实时仿真机群联合仿真, 并对其实现方法进行介绍, 分别对解耦模块进行了单体测试及工程测试, 测试结果表明, 本文提出的 DPL 解耦模块和通信接口完全适用于两套 SGI 联合仿真, 验证了其可行性及正确性, 为 SGI 联合仿真后续的应用和推广打下了坚实基础。

参考文献

[1] 任冲, 柯贤波, 樊国伟, 等. 大规模风电直流送出系统过电压抑制措施及控制方案优化研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 163-174.

- [2] 华光辉, 胡汝伟, 焦龙, 等. 光伏电站快速频率响应技术研究及应用[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(5): 64-69, 76.
- [3] 舒展, 张伟晨, 王光, 等. 特高压直流接入江西电网后的故障影响分析及其应对措施[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 163-170.
- [4] 时伯年, 孙刚, 瞿艳霞. 柔性直流输电的孤网频率稳定协调控制[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 137-142.
- [5] 李大虎, 张志杰, 张伟晨, 等. 背靠背柔性直流接入电网后的影响评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 71-80.
- [6] 马万成, 袁铁江, 张恒, 等. 超/特高压交直流混联电网中直流偏磁敏感源的预测方法研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(3): 58-63.
- [7] 杨楠, 崔伟, 王智伟, 等. 含风电特高压直流系统单极接地故障暂态特性研究[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 142-149, 157.
- REN Chong, KE Xianbo, FAN Guowei, et al. Transient voltage stabilization and control optimization for large-scale wind power UHV DC transmission system[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 163-174.
- HUA Guanghui, HU Ruwei, JIAO Long, et al. Research and application of fast frequency response technology for photovoltaic stations[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(5): 64-69, 76.
- SHU Zhan, ZHANG Weichen, WANG Guang, et al. Fault analysis and its countermeasures of Jiangxi Provincial Grid after UHVDC line connection[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 163-170.
- SHI Bonian, SUN Gang, QU Yanxia. Research on coordinated frequency stability control after islanding based on VSC-HVDC technique[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 137-142.
- LI Dahu, ZHANG Zhijie, ZHANG Weichen, et al. Influence evaluation of provincial power grid integrated with back-to-back VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 71-80.
- MA Wancheng, YUAN Tiejie, ZHANG Heng, et al. Research on the early warning method of DC bias sensitive source in ultra/extra high voltage AC/DC hybrid power grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(3): 58-63.
- YANG Nan, CUI Wei, WANG Zhiwei, et al. Research on transient characteristics of monopolar grounding fault for wind power integrated UHVDC[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 142-149, 157.

- [8] 张正卫, 陈得治, 卜广全, 等. 多直流馈入的特高压环网安全稳定控制措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 46-53.
ZHANG Zhengwei, CHEN Dezhi, BU Guangquan, et al. Research on safety and stability control measures of UHV loop network with multiple DC feeding[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 46-53.
- [9] REN Chao, XU Yan, ZHANG Yuchen. Post-disturbance transient stability assessment of power systems towards optimal accuracy-speed tradeoff[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 194-203. DOI: 10.1186/s41601-018-0091-3.
- [10] 王超, 常海军, 摆世彬, 等. 高比例新能源与多直流场景下连锁故障防控策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 49-57.
WANG Chao, CHANG Haijun, BAI Shibin, et al. Study on the prevention and control strategy of cascading failure of bulk power system with multi-HVDC and high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 49-57.
- [11] 王晓建, 王龙, 袁慧宏, 等. 基于站内、站间多信息源的站域-广域一体化保护系统研究[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(11): 63-68.
WANG Xiaojian, WANG Long, YUAN Huihong, et al. Research on the integrated protection system with substation-wide area level based on multi information sources from intra/inter stations[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(11): 63-68.
- [12] 兰佳, 汪东, 陈娅, 等. 双级式光伏发电并网系统控制策略及仿真研究[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(4): 129-136.
LAN Jia, WANG Dong, CHEN Ya, et al. Research on control strategy and simulation of double stage photo-voltaic grid connected system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(4): 129-136.
- [13] 赵琦, 王新迎, 乔骥. 数据驱动的能源互联网建模与仿真关键技术[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(1): 39-45.
ZHAO Qi, WANG Xinying, QIAO Ji. Key technologies of Data-driven energy interconnection modeling and simulation[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020, 18(1): 39-45.
- [14] SAAD H, PERALTA J, DENNETIERE S, et al. Dynamic averaged and simplified models for MMC-based HVDC transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1723-1730.
- [15] ZHANG Han, LIU Zhigang, WU Siqu, et al. Input impedance modeling and verification of single-phase voltage source converters based on harmonic linearization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(9): 8544-8554.
- [16] ALAM M M, LEITE H, SILVA N, et al. Performance evaluation of distance protection of transmission lines connected with VSC-HVDC system using closed-loop test in RTDS[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 152: 168-183.
- [17] 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 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.
- [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(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): 32-39.
ZHU Yiyang, 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 two modeling and validation of digital-analog hybrid simulation of DC transmission projects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 32-39.
- [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.
- [20] ZHU Zhe, LI Xiaolin, RAO Hong, et al. Testing a complete control and protection system for multi-terminal MMC HVDC links using hardware-in-the-loop simulation[C] // IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 29-November 1, 2014, Dallas, TX, USA: 4402-4408.
- [21] 田鹏飞, 刘崇茹, 洪国巍, 等. 模块化多电平换流器半实物仿真平台设计与实验验证[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 122-128.
TIAN Pengfei, LIU Chongru, HONG Guowei, et al. Design and experimental verification of a

- hardware-in-the-loop simulation platform for modularized multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 122-128.
- [22] 黄润鸿, 陈俊, 龚文明, 等. 柔性直流阀控全链路试验方案及实时仿真[J]. 南方电网技术, 2020, 14(5): 16-21. HUANG Runhong, CHEN Jun, GONG Wenming, et al. Full chain test scheme and real-time simulation of VSC-HVDC valve control[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(5): 16-21.
- [23] 刘水, 王鸿, 王海群, 等. 基于跨平台联合仿真技术的接口算法研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(2): 70-74. LIU Shui, WANG Hong, WANG Haiqun, et al. Research on interface algorithm based on cross-platform joint simulation technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(2): 70-74.
- [24] 杨用春, 肖湘宁, 袁敞. MMC-UPQC 在 RTDS 仿真中的脉冲输入方案设计[J]. 电测与仪表, 2019, 56(9): 104-109. YANG Yongchun, XIAO Xiangning, YUAN Chang. Pulse input scheme design of MMC-UPQC in RTDS simulation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(9): 104-109.
- [25] 王健, 陈威, 汤卫东, 等. 分布式并行网络拓扑计算关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 117-122. WANG Jian, CHEN Wei, TANG Weidong, et al. Research on the key technologies of distributed parallel network topology computing[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 117-122.
- [26] 田芳, 周孝信. 交直流电力系统分割并行电磁暂态数字仿真方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 1-7. TIAN Fang, ZHOU Xiaoxin. Partition and parallel method for digital electromagnetic transient simulation of AC/DC power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 1-7.
- [27] ZHAI Xuebing, LIN Chang, GREGOIRE L A, et al. Multi-rate real-time simulation of modular multilevel converter for HVDC grids application[C] // IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 29-November 1, 2017, Beijing, China: 1325-1330.
- [28] 姜彤, 吕艳萍. 基于 Bergeron 模型的纵联电流保护新判据[J]. 电气自动化, 2014, 36(3): 83-85. JIANG Tong, LÜ Yanping. A new criterion for longitudinal current protection based on Bergeron model[J]. Electrical Automation, 2014, 36(3): 83-85.
- [29] DOMMEL H W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multiphase networks[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, PAS-88(4): 388-399.
- [30] VERMA S C, ODANI H, OGAWA S, et al. Real time interface for interconnecting fully digital and analog simulators using short line or transformer[C] // 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 18-22, 2006, Montreal, QC, Canada: 1-8.
- [31] 齐超, 孙天, 孙立山, 等. 含源二端口网络等效电路及其传输参数研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(1): 36-41. QI Chao, SUN Tian, SUN Lishan, et al. Research on equivalent circuits and transmission parameters for source-containing two-port network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(1): 36-41.
- [32] WANG Zhiying, WANG Chengshan, LI Peng, et al. Extendable multirate simulation of active distribution networks based on field programmable gate arrays[J]. Applied Energy, 2018, 228: 2422-2436.

收稿日期: 2020-11-18; 修回日期: 2021-03-23

作者简介:

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; E-mail: wzhy@epri.sgcc.com.cn

李跃婷(1980—), 女, 硕士研究生, 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。 E-mail: liyueting@epri.sgcc.com.cn

(编辑 姜新丽)