

基于 FPGA-Jetson 的智能电网硬件实时联合仿真

段通¹, Venkata Dinavahi², 程天石²

(1. 国家数字交换系统工程技术研究中心, 河南 郑州 450002; 2. 阿尔伯塔大学, 加拿大 埃德蒙顿 T6G0X9)

摘要: 智能电网是一个电力网络和通信网络耦合的物理信息电力系统 (CPPS, cyber-physical power system), 这种双域耦合的特性使得对其实时仿真成为难点。不同于现有基于软件同步的联合仿真方法, 借助了 FPGA 的可编程计算能力和 Jetson 的实时操作系统, 设计了基于 FPGA-Jetson 平台的智能电网硬件实时联合仿真架构, 在 FPGA 板卡内进行电力系统仿真, 在 Jetson 平台中完成信息通信系统仿真, 利用 PCIe 数据通道模拟双域的信息交互。通过充分发掘各个模块的计算和数据传输能力, 可以实现对“电网+通信网”双域联合的实时仿真。最后, 针对广域 AC-DC 混合输电网和微电网两个典型智能电网场景设计了相应的实时仿真模型及参数, 验证了所提实时联合仿真架构的可行性和可扩展性。

关键词: 智能电网; 硬件仿真; 实时仿真; FPGA; Jetson

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2021.00246

FPGA-Jetson based hardware real-time co-simulation for smart grid

DUAN Tong¹, DINAVAH I Venkata², CHENG Tianshi²

1. National Digital Switching System Engineering & Technological Research Center, Zhengzhou 450002, China

2. University of Alberta, Edmonton T6G0X9, Canada

Abstract: Smart grid is a power-communication coupled cyber-physical power system (CPPS), where the two-domain coupling features make the real-time simulation difficult. Different from the existing software-based co-simulation methods, a FPGA-Jetson based real-time co-simulation platform for smart grid by leveraging the FPGA's programmable computation capability and Jetson's real-time operating system was designed. The power system simulation was carried out on the FPGA board, the information communication system simulation was completed on Jetson platform, and the two-domain information interaction was simulated through the PCIe channel. By making full use of the computing and data transmission capabilities of each module, the real-time simulation of the combination of power grid and communication network was realized. Finally, the corresponding specific modeling and parameters were designed for the two representative smart grid scenarios: hybrid AC-DC transmission network and micro-grid, the validity and scalability of the proposed real-time co-simulation architecture were verified.

Key words: smart grid, hardware simulation, real-time simulation, FPGA, Jetson

1 引言

自“工业 4.0”的概念提出以来, 信息与通信技术 (ICT, information and communication technology)

正越来越多地融入工业基础设施。作为工业领域的重要组成部分, 电力网络 (简称“电网”) 也正在与 ICT 深度融合。在传统电网中, 电力通常是由火电厂、水电厂、核电厂等发电设施产生, 并通过一

收稿日期: 2021-05-25; 修回日期: 2021-10-20

基金项目: The Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC); 国家自然科学基金资助项目 (No.62101598)

Foundation Items: The Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), The National Natural Science Foundation of China (No. 62101598)

个庞大的电力传输网络输送给各个区域的用户。随着居民和工业用电需求的日益增长,低容量、低可靠性的老旧电力设施和僵化复杂的人工运维管理模式逐渐难以满足未来电力网络的发展需求。在这样的大背景下,智能电网(SG, smart grid)应运而生,将 ICT 全面应用到传统电力网络的基础设施中,实现对整个电力系统的实时监测和智能管控,这也代表了未来的电力网络体系架构发展方向^[1-2]。

在智能电网的研究中,仿真技术是十分重要的。电力网络实体铺设、试验的巨大成本,使得对大型电网实体铺设之前的模拟仿真十分关键。传统电网的仿真,主要关注两个方面:使电力设备的数学仿真模型更为精确,以还原真实设备的电力参数(即仿真精度);快速求解大型电网拓扑产生的微分方程组,使仿真的速度更快(即仿真速度)。然而,在智能电网中,电力系统是和通信网络耦合的,因此智能电网又被称作物理信息电力系统。在这个系统里,电力节点或设备的参数要通过信息系统进行采样、传输、和分析,电网的控制指令也需要通过信息通信系统进行传输和生效。因此,纯粹的电力系统仿真已经难以模拟或还原整个智能电网的运行过程和电力参数。在这个背景下,电网-通信网联合仿真(co-simulation)的机制设计成为智能电网仿真领域所关注的另一个研究重点^[3-4]。现有联合仿真的方法多集中于软件层面的设计:将现有电力系统的仿真软件(如 PSCAD/EMTDC、PLSF、Matlab Simulink 等)的仿真数据,与通信网络仿真软件(如 NS2/3、OMNeT++、OPNET 等)的仿真数据交互同步^[5-11];而电力仿真是基于离散时间的(以时间步长驱动),网络仿真是基于离散事件的,因此需要对网络仿真软件的逻辑进行更改,使得电力仿真的时间每前进一步长或多步长,网络仿真和电力仿真均能到达相同的仿真时间点,这带来了数据同步难、仿真速度慢的问题。

在电力系统仿真中,实时仿真(real-time simulation)是一种可以实时输出与真实电力系统中电力参数相匹配结果的仿真方法,即仿真结果输出的速度能够达到真实电力系统运行的速度。因此,实时仿真对电网实际运行过程中的状态模拟和操作控制均具有相当重要的作用。近年来,随着数字孪生等技术概念的提出,实时仿真技术成为构建智能电网的数字映射系统的核心技术之一。显然,有软件层面的联合仿真机制无法达到实时仿真的效

果。为实现实时联合仿真,硬件仿真器成为首选。例如,在文献[12-13]中用到的商用硬件电力仿真器 RT-LAB,文献[14-15]中用到的商用硬件仿真器 RTDS。在以上研究中,网络仿真软件(如 OPNET)在 PC 端运行,实时电力仿真则在硬件仿真器上进行。这种方法虽然能实现实时仿真,但其专用硬件和 PC 端中网络仿真软件的连接和数据同步更为复杂,且专用硬件仿真器内部的仿真逻辑和实现方法并未公开,缺乏一般性和研究可复制性。

基于以上分析,本文提出了一种基于 FPGA-Jetson 的实时仿真架构,FPGA 已经被广泛应用于电力系统的实时仿真,Jetson 则是 NVIDIA 推出的具备实时操作系统的计算平台,可专门用于计算和仿真的加速。在所提架构中,FPGA 负责电力设施层的实时仿真,Jetson 负责信息通信层和电网控制层的实时仿真;通过快速的 PCIe 通道互联,可将电力设施层和信息通信层仿真的数据进行实时交互。通过多块 FPGA-Jetson 平台之间的接口设计,可实现所仿系统规模的扩展性。本文所提实时仿真架构解决了智能电网实时仿真的 3 个技术难题。

- 电力设施层和信息通信层数据交互过程的真实模拟问题,本文采用基于 FPGA 的小步长仿真+PCIe 快速通道读写的方式解决。

- 信息通信层的实时仿真适配问题,本文提出用新颖的基于传输参数时间库的仿真方法解决。

- 贴合不同电网场景的参数设计和配置问题,本文在所提实时仿真架构的基础上,设计了两个实时仿真的典型应用案例,AC 和 DC 混合输电网场景以及 15 节点的微电网场景,采用了符合实际电网的电力设备模型和通信系统协议。通过对所占资源和仿真速度的分析,验证所提实时仿真架构的可行性和优势。

2 智能电网架构及仿真要点

智能电网 3 层架构示意图如图 1 所示,在整体架构上可划分为 3 层:电力设施层、信息通信层、电网控制层。电力设施层涵盖了发电设施、输电设施、配电设施、用电设施、储能设施、可控负载以及电力保护开关等,属于强电设备。信息通信层则主要由数字测控装置和通信网络设备组成,属于弱电设备。其中,数字测控装置负责对电力设施层的电力参数进行采样或对可控设备执行控制指令(如 PMU、TTU、RTU 等),而网络设备则包括骨干路

由器、接入级路由器、防火墙、工业交换机以及光纤链路等^[16]。电网控制层负责接收数字测控装置发送的电力参数并下发控制指令,其具体的控制应用依据不同的电力场景采用不同的控制功能,例如,在变电站内部自动化系统中以 SCADA 控制为主,在广域测量保护系统中是面向同步相量数据的 WAMS 控制,而在用电先进测量系统中又以 AMI 测量为主。

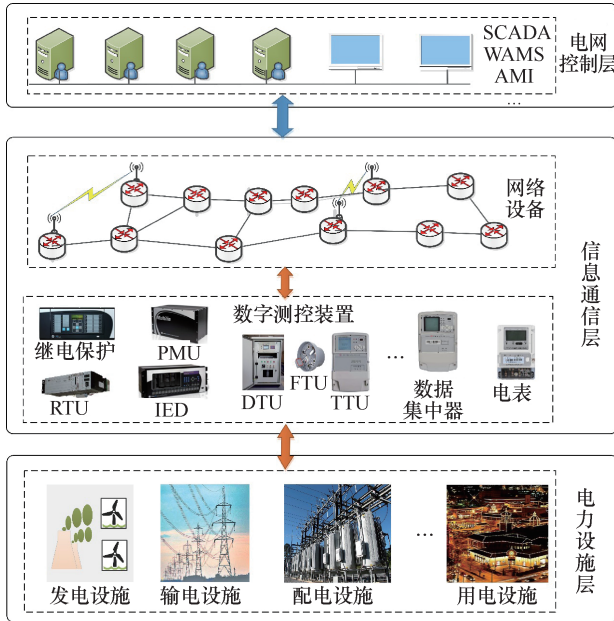


图1 智能电网3层架构示意图

仿真这样一个3层的物理信息电力系统的难点在于,需要模拟或还原出被仿真电网运行过程中的各类重要参数。

- 电力设施层中,各个电网节点或设备的电力参数,如电压、电流、功率、频率等。
- 信息通信层中,电力参数被采样形成测量数据,测量数据封装到通信网络报文,以及数据报文从测量设备传递到控制中心的传输参数,如时延、丢包等。
- 电网控制层中,控制服务器收到电力参数后产生控制指令的响应参数,如时延。
- 控制指令通过信息通信层传输后作用到可控电力设备的响应参数及效果,如动作时延、电力参数变化等。

3 基于 FPGA-Jetson 的硬件联合实时仿真

为实现智能电网的实时仿真,电力设施层的实时仿真是重点,信息通信层和电网控制层的实时仿真是

难点。本文借助 FPGA 的可编程和并行计算能力,完成电力设施层的实时仿真;利用 NVIDIA Jetson 平台的实施操作系统,实现信息通信层的实时模拟,并可完成电力设施层仿真的部分串行计算任务。

3.1 基于 FPGA 的电力系统仿真

电力系统仿真的实质是将每个电力设备的工作过程建模为一个由 R、L、C 组成的(线性或非线性)等效电路;一个电力网络可以看作是由这些设备等效电路构成的主电路,由此可联立求解整体等效电路所形成的常微分方程组,并得到节点电压、电流等电力参数。因此,电力设备的等效电路模型决定了仿真精度,而等效电路求解方法及实现则决定了仿真的速度。FPGA 以其灵活的可编程能力和强大的并行计算能力,可以实现电路方程组的快速并行求解,因此可用于电力系统的实时仿真。事实上,基于 FPGA 平台的电力系统实时仿真已经被广泛研究并应用^[17-18]。本文采用 Xilinx 近年来最新推出的 VCU118 和 VCU128 系列 FPGA 板卡进行电力系统的实时仿真,其优势在于逻辑资源丰富,能够仿真大规模电力系统;存储资源容量大,能够存储大量电路节点的电力参数数据;网络端口资源丰富,能够模拟信息通信层的网络数据报文传输。

3.2 Jetson 实时计算平台

虽然 FPGA 可用于电力设施层的仿真,但其可编程逻辑资源并不适用于信息通信层的仿真。因为信息通信层的数据传输本质上并不是一个计算求解的过程,而是基于 TCP/IP 协议栈的报文解析和转发过程。虽然在文献[19]中,FPGA 的软核处理器(如 Xilinx 系列 FPGA 中的 Microblaze 处理器)被用于信息通信层的仿真,但其处理器的性能和资源容量均难以支持高速的数据报文处理,也不具备良好的可扩展性。本文选择采用 NVIDIA 推出的 Jetson AGX Xavier™实时嵌入式计算平台,其配备了基于 ARM v8.2 的 8 核 CPU 处理器,支持最新 ARM Neon 指令集,主频可达 2.2 GHz,浮点运算能力不亚于同档次 x86 CPU;而且含有 384 个 CUDA 核心和 48 个 Tensor 核心,可以完成高速并行计算。除此之外,Jetson 有多种实时操作系统可以安装,相较于传统分时操作系统拥有更高的计时精度和更低的程序响应时延。因此,Jetson 是实现实时仿真平台的理想选择。

3.3 FPGA-Jetson 联合仿真架构

本文提出的基于 FPGA-Jetson 的联合仿真架构

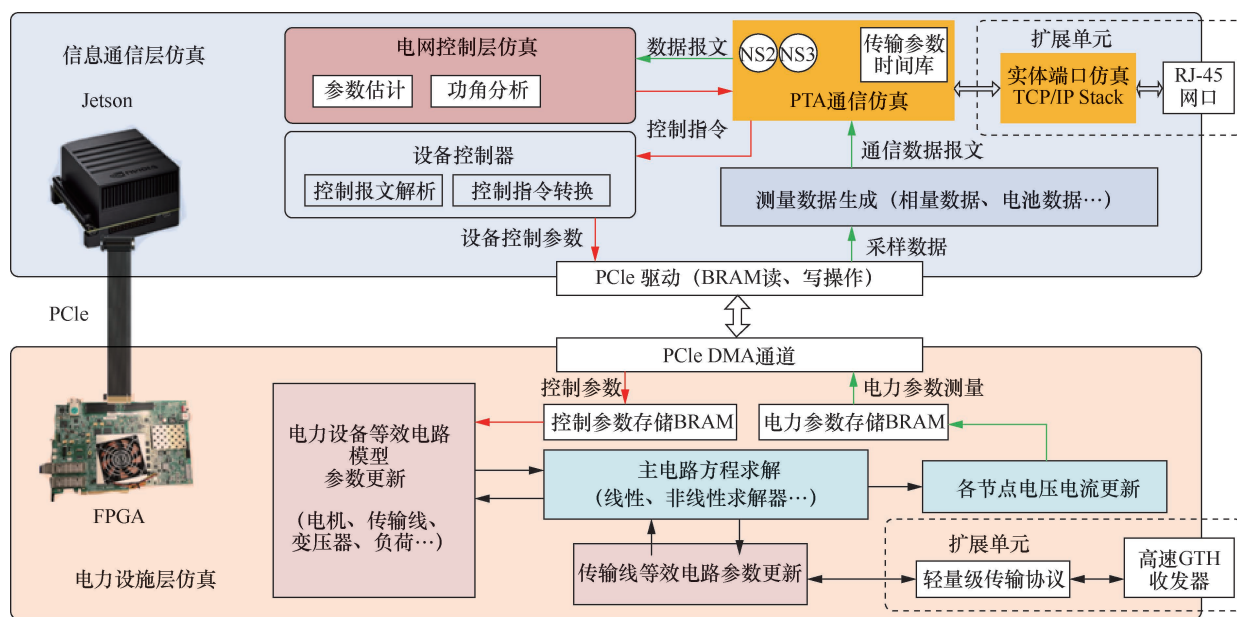


图2 FPGA-Jetson 联合仿真架构

如图2所示。针对电力设施层、电力-信息层之间的信息交互、信息通信层、电网控制层的实时仿真具体如下。

1) 电力设施层仿真

由于基于FPGA的电力设施层实时仿真技术已经较为成熟，在此基础之上需要重点考虑的是仿真步长问题。现有联合仿真方面的研究多采用较大的仿真步长以提升仿真速度，降低仿真难度，但这种方式并不能模拟出电力参数的采样过程。真实电网中，数字测量设备对电力设施的电力参数进行采样的频率可能高达256个/电压周期(在61850规约中的规定^[20])，如果以60 Hz的电压周期来算，采样间隔只有65 μs。这就要求电力设施层的仿真步长不能过大。因此，本文采用20 μs的仿真步长，以满足模拟采样过程的需求，即达到电磁暂态仿真(EMT, electromagnetic transient simulation)的效果。Jetson平台虽然具有一定的实时处理能力，但无法匹配20 μs仿真步长级别的大规模计算，尤其在仿真系统较大时，FPGA强大的并行计算能力更加凸显，能够完成20 μs级别的EMT实时仿真。此外，FPGA上的高速GTH/GTY收发器被用于图2架构中的扩展单元模块，当被仿真系统规模较大时支持多个FPGA板卡之间的互联扩容。

2) 电力设施层和信息通信层交互仿真

需要模拟出电力参数采样数据形成通信数据报文的过程，而该过程则因不同电网通讯场景而

异，这是实时联合仿真的一个难点。例如，在以量测量装置(PMU, phasor measurement unit)为主的广域测量系统(WAMS, wide area measurement system)中，PMU需要根据采样到的电压、电流等电力参数，计算出相应的相量幅值和相角，然后将其封装到通信数据报文中。因此，该过程的模拟由图2中所示的“测量数据生成”模块完成，其根据场景需求和既定数据格式生成相应的数据帧，并将其放入通信数据报文的载荷中。此外，采样数据在FPGA中以仿真结果输出的方式呈现，这些采样数据存储在BRAM中。测量数据生成模块通过PCIe快速数据通道与FPGA中的BRAM相连，并用PCIe驱动函数读取BRAM中的采样数据，用于生成数据报文。

3) 信息通信层实时仿真

不能直接采用现有基于软件的仿真方案，因其运行过程难以做到实时，因此这是实时联合仿真的另一个难点。一种解决方法是，利用FPGA和Jetson板卡上的物理网口，直接做实物通信网络传输，即把一个FPGA当作单个通信节点，但这样做的问题是，需要几十上百个FPGA才能模拟出相当规模的通信网络，这显然是不切实际的。因此针对此仿真难点，本文提出的方案如图2中所示的参数时间抽象-实体端口混合的仿真方式。在这种仿真方式下，将被仿电网分成多个区域，单个区域内部的信息通信层在单个Jetson计算平台内采用参数时间抽象

(PTA, parameter timing abstraction) 的方式模拟, 将数据报文传输过程抽象为由传输参数(如端到端传输时延、丢包率等)定义的过程, 而将传输过程本身省略掉, 从而在联合仿真时利用这些传输参数实现实时的信息传输层仿真。不同区域之间的信息交互则通过不同 Jetson 计算平台的实体端口之间的通信进行直接模拟, 即利用 Jetson 的物理网口直接搭建 TCP/IP 协议栈以完成不同区域之间的数据传输, 这个部分封装在图 2 所示的 Jetson 扩展单元模块中, 因为扩展到多个平台互联时才需要。

虽然基于参数抽象的信息通信层仿真已经在文献[21]中采用, 但其所用到的端到端传输参数是静态的。例如, 从节点 A 到节点 B 的传输时延是一个预设的固定值。而在本文所提的 PTA 仿真中, 这些传输参数是有精确时间戳的, 即 PTA 仿真所用到的传输参数是由网络仿真器提前仿真得到的, 但整个过程的端到端传输参数全被记录到“传输参数时间库”中。例如, 从节点 A 到节点 B 的端到端传输时延是一条随时间变化的幅值曲线, 可以模拟整个通信过程的动态。然后, 在与电力系统的联合实时仿真过程中, 不同时间所对应的端到端报文传输根据传输参数时间库中相应时间的时延等传输参数对数据报文进行延迟或丢包即可。由于 Jetson 实时操作系统的计时更为精确, 这种报文的传输模拟可以做到和实时报文传输相同的效果, 从而达到实时仿真的目的。这种基于 PTA 的仿真方式可行的原因是, 智能电网仿真的核心在电力设施层, 在真实电网中, 无论是信息通信层还是电网控制层, 最终目的都是服务于电力设施层, 使其能够稳定运行且可管可控。因此在仿真实现中, 无论信息通信层和电网控制层的仿真是以何种方式实现的, 核心是要能够真实模拟出其对电力设施层的电力参数造成的影响^[22]。此外, 电力设施层的参数采样一般都是周期性进行的, 因此无论其如何变化, 都只会体现出对报文内部数据的影响, 并不会影响到信息通信层的端到端传输参数, 而包含控制指令的报文则一般在突发风险或异常情况下才会下发且数据量很小, 其对端到端传输参数的影响也不大。因此, 在信息通信层提前仿真得到的传输参数时间库可用于模拟整个仿真过程中的数据报文传输。

4) 电网控制层实时仿真

本文关注的重点是测量数据和控制指令的闭环通路, 而对电网控制层内部的实现逻辑进行了简

化处理, 因为其主要表现在根据具体的电网场景和应用, 在收到电力设施电力参数信息后的自动化分析及处理, 而设计相应的电网控制算法和程序并不是本文实时仿真技术所关注的内容。在电网控制层接收到测量数据、生成控制指令后, 控制指令以数据报文格式发送到“设备控制器”模块, 设备控制器模块用于模拟可控电力设备上的电子通信装置, 其接收到控制报文后, 将其解析并按照通信系统既定的帧格式, 将其对应到相应的设备控制参数, 通过 PCIe 程序写入 FPGA 的存储中, 模拟对电力设施层中可控电力设备的控制过程。

通过以上设计, 可以实现电力设施层、信息通信层、电网控制层以及双层信息交互的实时仿真。总结上述仿真的实现细节, 所提针对智能电网的实时仿真架构的创新之处体现在如下 3 个方面。

- 实现 20 μs 级别的电力设施层实时仿真, 能够真实模拟出电力参数被采样的过程。

- 通过 PCIe 的快速数据通道, 可以实时模拟出电力设施层和信息通信层的实时数据交互过程。

- 通过参数时间抽象-实体端口混合的仿真方式, 可以实现实时的信息通信层仿真。

4 应用与仿真案例

基于以上所提实时仿真架构, 本文针对智能电网中的两个典型场景进行了实时仿真, 以验证所提架构的可行性。AC-DC 混合输电网及其对应的 WAMS, 包括 15 节点的微电网及其对应的信息采集控制系统。

4.1 AC-DC 混合输电网

本文仿真的 AC-DC 混合输电网 WAMS 示意如图 3 所示, 其电力设施层由 IEEE 39-Bus AC 输电网、CIGRE DC 输电网中的子域 DCS3 及两个近海风电机构成。这里, 在 FPGA 电力设施层的仿真中, 电力设备的等效电路模型与 PSCAD/EMTDC^[23]中所用的模型相同。电力设施层对应的信息通信层由 WAMS 构成。WAMS 是重要的电力状态测量系统, 其基于分布安装在厂站端的 PMU, 可以得到各个电网节点和母线状态的相量, 直观地了解各个状态之间的相量关系。这里, 假设 AC 系统中的每个厂站节点都安装一个 PMU 子站, 且各个 PMU 子站将相量数据打包并通过信息通信层发送至区域数据汇聚中心 (PDC, phasor data concentrator), 然后 PDC 将对各个相量进行同步和存储, 并发送至全局控制中心, 以实现各种监测、分析、控制等功能应用。

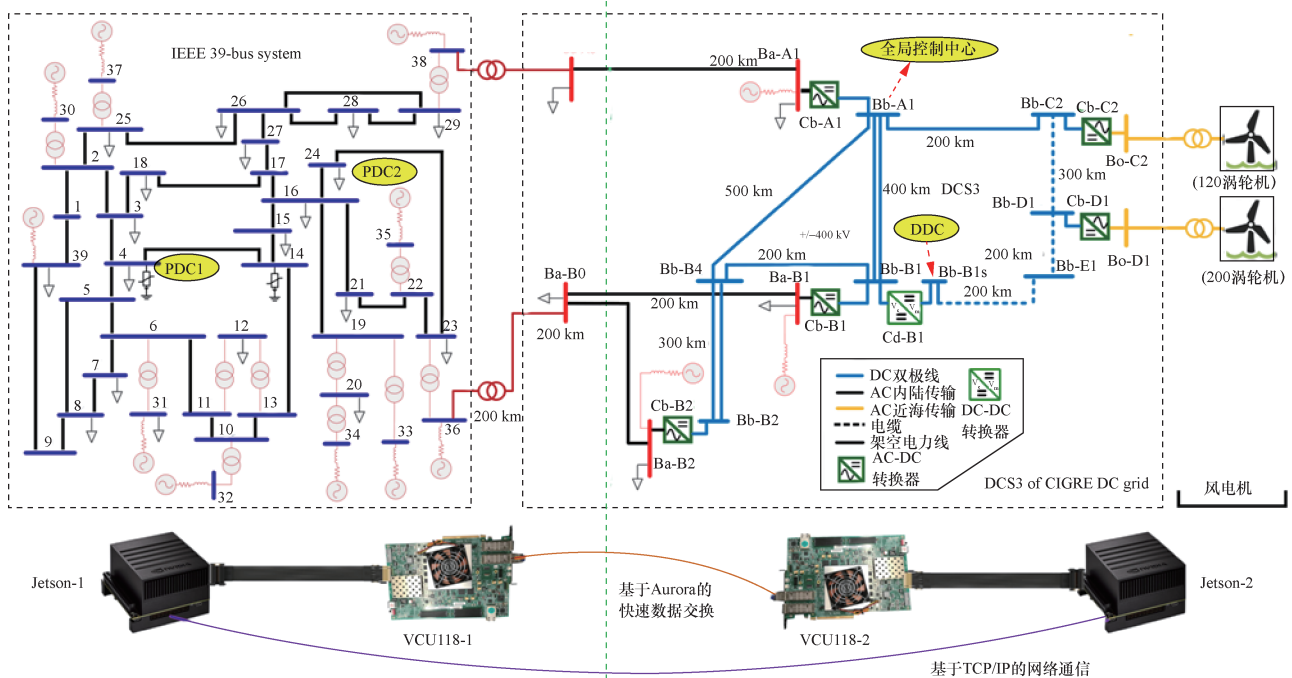


图3 AC-DC混合输电网及WAMS示意图

DC输电系统的各个节点则将DC电力参数(电压、电流)发送到位于Bb-B1s的DC数据汇聚器(DDC, DC data concentrator)。

在信息通信层中,从PMU到PDC的数据报文传输过程采用参数时间抽象(PTA)的方式进行模拟,其传输参数的时间序列在NS-3网络仿真器中提前得到并记录到传输参数时间库中。在NS-3中,假设通信网络拓扑和电力网络拓扑结构相同^[4],这也是一种常用的简化,虽然现实中两者的拓扑结构略有差异。采用60 Hz的电压标准频率,每电压周期80个采样数据,即图2中的“测量数据生成”模块以4 800 Hz的频率读取BRAM中存储的电力参数模拟电力参数采样过程;PMU测量数据报文的发送频率则为30 Hz,即“测量数据生成”模块以30 Hz的频率计算得到对应的相量数据,并封装成标准数据格式发送至电网控制层仿真模块。PMU测量数据的封装格式在C37.118协议^[24]中定义,其可映射到TCP/IP协议栈进行数据报文传输。由于NS-3中的链路带宽和路由器吞吐率均可自定义,因此可根据场景的真实情况进行参数调整,并将仿真得到的传输参数记录到库中。本文采用了1 ms/200 km的链路传输时延和500 Mbit/s的路由器转发速率。

由于所仿真系统的规模较大,本文采用2个

FPGA-Jetson平台互联的方式扩展资源,如图3所示,中间的绿色分割线将整个系统分为两部分,分别在2个FPGA-Jetson平台中进行仿真。在电力设施层,这种扩展可以根据电力传输线模型的等效电路解耦实现,并将传输线模型的数据交互通过基于FPGA高速收发器的Xilinx Aurora链路层快速数据通道完成。而在信息通信层,这种数据报文的交互则直接由Jetson上的RJ-45网口完成。这种扩展接口的设计也展现了本文所提实时仿真平台的良好扩展性。

4.2 微电网

微电网是规模较小的分散的独立系统,将光伏发电、风电、燃气轮机、燃料电池、储能设备等并在一起,直接接在用户侧。微电网的信息采集系统所需采集的信息可分为:发电管理、调度管理、负荷管理、输电管理等,数据通过光纤组网形成完整的数据采集与监控系统。智能微电网的控制系统则根据采集的数据进行分布式微能源、能量管理系统、输配电系统、用户负荷等的管控,如通过控制逻辑来控制柴油发电机、光伏电站、储能系统的投入和切除运行,自动开停机等。

本文针对CIGRE 15节点的微电网^[25]进行了实时仿真,其包含8组太阳能发电机和1组风力发电机,15节点微电网及能源监测系统示意图如图4所

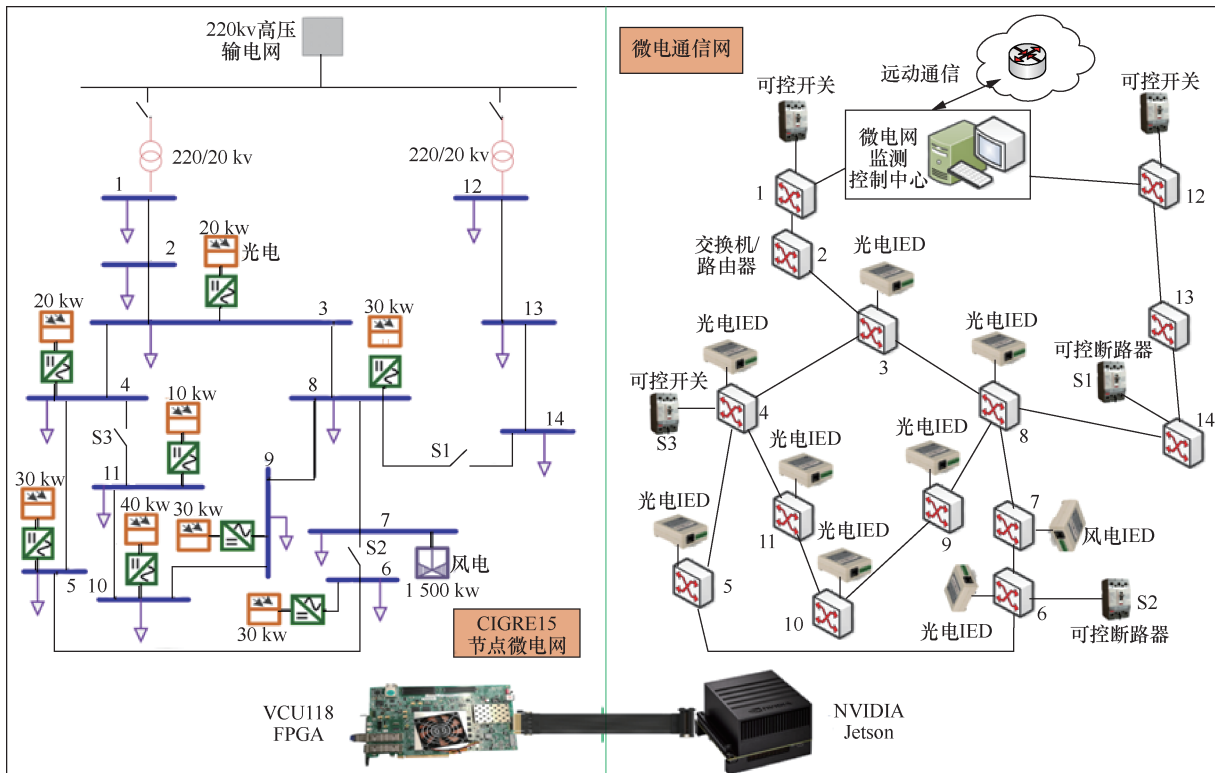


图4 15节点微电网及能源监测系统示意图

示。所模拟的场景为微电网的能量监测系统,即实时采集各个风电、光电模块的发电参数以及负荷情况,并通过可控开关对微电网进行控制。因此,在信息通信层中,包括了监测各个发电、逆变模块的智能电子设备(IED, intelligent electronic device)、可控开关(S1、S2、S3),部署在各个电网节点的交换机,以及连接各个交换节点的通信链路。依然假设每个电网节点部署一台网络数据转发设备,它们之间的连接关系也和电力传输线路相同。电网控制层则为局部的微电网监测控制中心,与转发节点1和转发节点12相连,并通过远动通信与上层控制中心相连。在信息通信层仿真中,还需要规定具体的数据帧格式。事实上,目前微电网并没有一个业界统一的通信标准,本文采用配电网调度控制中常用的IEC 104通信规约,其基于TCP/IP协议栈,在应用层的数据帧格式则继承了IEC 101的标准。通过在应用层对测量数据进行相应报文格式的封装,可在NS-3中模拟出从IED到微电网测控中心,以及从微电网测控中心到可控开关的相应端到端传输参数,并记录到传输参数时间库中。

电力设施层仿真的重点则是对光电、风电机模块的等效电路建模,因为传输线、变压器、负载的

电路模型都已较为成熟。本文采用的光伏电池模型参考MATLAB Simulink[®]中的模型,以适配Simulink中的模型参数^[26]。在实时EMT仿真的实现中,光伏二极管被当作电流源接入仿真电路,通过一个时间步长的时延进行解耦计算,利用上一步长的电压值计算下一步长的电流源输出,使得每个光伏电站二极管等效的非线性迭代可以在FPGA中并行独立进行。风电模型为同步风力发电机,用通用电机模型(universal machine model)建模,分为机械部分和电磁部分。电磁部分即为永磁电机模型,其机械转矩由机械系统提供,并且机械结构亦可等效为RLC电路^[27]。在实时仿真中和主电路联合求解时,一般采用一个步长的时延,并等效为带补偿电阻的诺顿电路的方法(参考PSCAD/EMTDC[®]电机方案)。光伏和风电站均通过逆变器接入微电网。

由于仿真的微电网规模较小,在此场景下仅需一套FPGA-Jetson平台即可,两个仿真场景的FPGA逻辑及存储资源消耗见表1。其中,输电网场景下用到了两块VCU118 FPGA板卡,而微电网场景则只用了一块FPGA板卡。由资源利用率可以看出,输电网场景的资源消耗远高于微电网,因为其包含

的节点和传输线更多,所需的计算资源也更多。也可以发现,通过双 FPGA-Jetson 平台互联,可以有效扩展资源容量,完成大规模电路的实时仿真。

表 1 两个仿真场景的 FPGA 逻辑及存储资源消耗

场景	FPGA 板卡	LUT	FF	BRAM	DSP
输电网	VCU118-1	90.3%	95.2%	57.1%	91.2%
	VCU118-2	93.1%	89.1%	50.3%	96.9%
微电网	VCU118	76.1%	78.5%	49.1%	77.3%

4.3 优势与缺点评估

在以上两个仿真案例的验证中,重点是在电力设施层电路模型和信息通信层通信模式设计的基础之上,在 FPGA 端的 FMC 扩展槽上利用 FMC-DAC (digital-to-analog converter adapter) 适配器连接到了示波器进行观测并记录指定节点的输出电压-电流波形,得到的波形中各时间点对应的幅值与 PSCAD/EMTDC 上搭建系统得到的仿真波形数据相同,从而验证仿真结果的实时性。然而,本文并未将所提架构与现有的仿真器进行精细量化的对比。主要原因有两个方面:一方面,本文所提架构和仿真案例的最大优势是用一套全新的硬件架构实现了贴近真实物理信息电力系统运行过程的实时仿真,这种优势难以体现在仿真波形等可视化图表中;另一方面,现有的联合仿真器均不是开源的,而且是基于各种平台实现的,因此难以将本文所提的架构与现有的仿真器进行精细的仿真时间对比。但可以肯定的是,本文所提的实时仿真架构和方法在两个典型的智能电网场景仿真中均可以达到实时仿真的效果,而且采用了贴合真实电网运行的参数配置和设计,这正体现了所提仿真架构的实时性和真实性。

在以上两个仿真案例设计的过程中,基于 FPGA-Jetson 的实时仿真平台也表现出以下不足之处,一方面,通信网的跨域传输通过 Jetson 平台之间物理网口互联进行模拟,其通信性能是由物理实体所规定的,因此无法实现通信链路参数的可配置,仿真灵活性不足。这种半物理的仿真方式是基于实时仿真要求的考虑。事实上,所有基于物理设备实体的仿真都存在灵活性不足的问题;另一方面,非 MAC/IP 承载的工控通信协议难以精准模拟。本文针对两个典型电网场景进行了实时仿真,均采用了基于 MAC 或 TCP/IP 承载的网络协议。如果需

要仿真如 RS485 等基于串口通信的工控协议,则需要在 Jetson 端的信息通信层仿真中进行额外的定制,尤其是传输参数时间库的设计。一种可能的解决思路是,单个 Jetson 内的通信系统仿真可以基于工控协议的传输时间参数库,模拟从电力设备测量传感器端到区域数据汇聚器的通信过程;而多个 Jetson 之间的数据交互则可依然可以采用物理网口进行基于 MAC 承载的数据传输,用于模拟多个区域之间的通信,因为在区域数据汇聚器到控制中心之间的通信也通常是基于 MAC 承载的。

5 结束语

本文借助 FPGA 的可编程计算能力和 Jetson 的实时操作系统,设计了基于 FPGA-Jetson 的智能电网硬件实时联合仿真平台,在 FPGA 板卡内进行电力系统仿真,在 Jetson 平台中完成通信系统仿真,通过 PCIe 快速通道模拟双域的信息交互。通过充分利用各个模块的计算和数据传输能力,可以实现对电网+通信网双域联合的实时仿真。为验证所提仿真架构的有效性,本文针对智能电网中两个典型的场景案例(广域 AC-DC 混合输电网、微电网场景)设计了相应的仿真平台并介绍了实现细节。通过对其电力设备模型、通信传输机制的模拟,可以在充分利用板卡资源的情况下完成对相应场景的实时仿真。本文所提实时仿真架构可用于各类智能电网场景下的状态模拟、数据分析、操作控制,也对未来搭建与智能电网对应的实时数字映射系统具有较高的参考价值。

参考文献:

- [1] ABE R, TAOKA H, MCQUILKIN D. Digital grid: communicative electrical grids of the future[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 399-410.
- [2] 刘俊勇, 潘力, 何迈. 能源物联网及其关键技术[J]. 物联网学报, 2020, 4(4): 9-16.
LIU J Y, PAN L, HE M. Internet of energy things and its key technologies[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(4): 9-16.
- [3] METS K, OJEA J A, DEVELDER C. Combining power and communication network simulation for cost-effective smart grid analysis[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(3): 1771-1796.
- [4] IEEE TASK FORCE ON INTERFACING TECHNIQUES FOR SIMULATION TOOLS, MÜLLER S C, GEORG H, et al. Interfacing power system and ICT simulators: challenges, state-of-the-art, and case studies[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 14-24.
- [5] HOPKINSON K, WANG X R, GIOVANINI R, et al. EPOCHS: a

- platform for agent-based electric power and communication simulation built from commercial off-the-shelf components[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 548-558.
- [6] BERGMANN J, GLOMB C, GÖTZ J, et al. Scalability of smart grid protocols: protocols and their simulative evaluation for massively distributed DERs[C]//2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Piscataway: IEEE Press, 2010: 131-136.
- [7] LIN H, SAMBAMOORTHY S, SHUKLA S, et al. Power system and communication network co-simulation for smart grid applications[C]//ISGT 2011. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [8] NUTARO J. Designing power system simulators for the smart grid: Combining controls, communications, and electro-mechanical dynamics[C]//2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [9] LIN H, VEDA S S, SHUKLA S S, et al. GECO: global event-driven co-simulation framework for interconnected power system and communication network[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(3): 1444-1456.
- [10] AALAMIFAR F, SCHLOGL A, HARRIS D, et al. Modelling power line communication using network simulator-3[C]//2013 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2013: 1-6.
- [11] GEORG H, MÜLLER S C, REHTANZ C, et al. Analyzing cyber-physical energy systems: the INSPIRE cosimulation of power and ICT systems using HLA[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 2364-2373.
- [12] WANG Q, TAI W, TANG Y, et al. Architecture and application of real-time co-simulation platform for cyber-physical power system[C]//2017 IEEE 7th Annual International Conference on CYBER Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER). Piscataway: IEEE Press, 2017: 81-85.
- [13] CAO G, GU W, GU C X, et al. Real-time cyber-physical system co-simulation testbed for microgrids control[J]. IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications, 2019, 4(1): 38-45.
- [14] CHEN B, BUTLER-PURRY K L, GOULART A, et al. Implementing a real-time cyber-physical system test bed in RTDS and OPNET[C]//2014 North American Power Symposium (NAPS). Piscataway: IEEE Press, 2014: 1-6.
- [15] TONG H Q, NI M, ZHAO L L, et al. Flexible hardware-in-the-loop testbed for cyber physical power system simulation[J]. IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications, 2019, 4(4): 374-381.
- [16] 刘建明, 赵子岩, 季翔. 物联网技术在电力输配电系统中的研究与应用[J]. 物联网学报, 2018, 2(1): 88-102.
- LIU J M, ZHAO Z Y, JI X. Research and application of Internet of Things in power transmission and distribution system[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2018, 2(1): 88-102.
- [17] CHEN Y, DINAHAHI V. FPGA-based real-time EMT[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2): 892-902.
- [18] CHEN Y, DINAHAHI V. Hardware emulation building blocks for real-time simulation of large-scale power grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(1): 373-381.
- [19] DUAN T, HUANG Z, DINAHAHI V. RTCE: real-time co-emulation framework for EMT-based power system and communication network on FPGA-MPSoC hardware architecture[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 2544-2553.
- [20] MACKIEWICZ R E. Overview of IEC 61850 and benefits[C]//2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. Piscataway: IEEE Press, 2006: 623-630.
- [21] DUAN T, CHENG T S, DINAHAHI V. Heterogeneous real-time co-emulation for communication-enabled global control of AC/DC grid integrated with renewable energy[J]. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2020, 1: 261-270.
- [22] MORADI-PARI E, NASIRIANI N, FALLAH Y P, et al. Design, modeling, and simulation of on-demand communication mechanisms for cyber-physical energy systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 2330-2339.
- [23] EMTDC[®] User's Guide: A Comprehensive Resource for EMTDC (Version 4.7)[R]. Manitoba HVDC Research Centre, Canada, 2010.
- [24] IEEE Power & Energy Society. IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power System: C37.118.1[S]. 2011.
- [25] STRUNZ K, ABBASI E, FLETCHER R, et al. TF C6.04.02: TB 575: benchmark systems for network integration of renewable and distributed energy resources[EB]. 2014.
- [26] GOW J A, MANNING C D. Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies[J]. IEE Proceedings - Electric Power Applications, 1999, 146(2): 193.
- [27] LAUW H K, MEYER W S. Universal machine modeling for the representation of rotating electric machinery in an electromagnetic transients program[J]. IEEE Power Engineering Review, 1982, PER-2(6): 24-25.

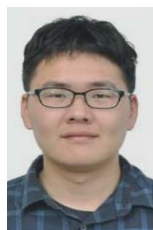
[作者简介]



段通 (1992-), 男, 博士, 国家数字交换系统工程技术研究中心助理研究员, 主要研究方向为智能电网、能源互联网、电力系统仿真、数字孪生、工业互联网等。



Venkata Dinavahi (1971-), 男, 博士, 加拿大阿尔伯塔大学教授, IEEE Fellow, 主要研究方向为电力系统仿真、物理信息电力系统。



程天石 (1995-), 男, 加拿大阿尔伯塔大学博士生, 主要研究方向为智能电网、电力系统仿真、仿真软件设计开发等。