

面向新型电力系统的实时仿真平台综述与展望

赵浩然, 孟铃涵, 江艺宝, 李 冰

(山东大学电气工程学院, 济南 250061)

摘 要: 伴随高比例新能源并网和大规模电力电子装置渗透, 电力系统电源结构、电网形态、运行机理和控制基础深刻变革, 电网规模和复杂程度前所未有, 对仿真技术提出了新的要求。电力系统实时仿真作为支撑大规模电力系统仿真加速、开展控保设备半实物测试、推动电力系统数智化转型的重要手段, 近年来得到越来越多的关注。为此, 首先梳理了新型电力系统对实时仿真步长、规模等方面的新需求。接着, 对比了 10 种主流商业化实时仿真平台, 详细探讨了国内外平台在实时机制、硬件架构、高效算法、仿真软件 4 方面的技术现状。然后, 针对新型电力系统电源侧和电网侧, 综述了实时仿真平台构建方案的研究进展。最后, 归纳提出了新型电力系统视域下实时仿真平台未来的发展方向。

关键词: 新型电力系统; 实时仿真平台; 实时机制; 硬件架构; 高效求解; 应用范式

Overview and Prospect of Real Time Simulation Platforms for New-type Power System

ZHAO Haoran, MENG Linghan, JIANG Yibao, LI Bing

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Along with the high proportion of renewable energy integration and the penetration of large-scale power electronic devices, the supply structure of power systems, grid morphology, operation mechanism, and control basis have been profoundly changed. The scale and complexity of grid are unprecedented, posing new challenges for simulation technology. Real-time simulation of power systems is an important means to support the acceleration of large-scale power system simulation, to carry out hardware-in-the-loop tests of control and protection equipment, and to promote the transformation of power system digital intelligence, thus real-time simulation has received more and more attention in recent years. In this paper, we first sort out the new demands for new-type power systems in the aspects of real-time simulation step size, scale, etc. Then, comparing ten mainstream commercial real-time simulation platforms, we discuss the technical status of domestic and foreign platforms in terms of real-time strategy, hardware architecture, efficient algorithms, and simulation software in detail. Thirdly, the research progress of real-time simulation platform technology solutions is summarized around typical scenarios in new-type power systems. Finally, the future development direction of the real-time simulation platform from the perspective of the new-type power systems is summarized.

Key words: new-type power system; real-time simulation platforms; real-time strategy; hardware architecture; efficient solving; application paradigm

0 引言

构建新型电力系统是实现碳达峰、碳中和战略目标的必由之路^[1-2]。相较于同步发电机主导的传统电力系统, 新型电力系统呈现高比例新能源接入、高比例电力电子装备应用的显著特征, 电力电子器件快速开关切换导致的高频段复杂动态过程深刻影响系统运行特性^[3]。目前尚无解析方法能够准确刻

画新型电力系统运行机理^[4]。系统静态特性认知、规划设计方案推演、运行控制策略制定仍高度依赖仿真分析^[4]。

目前电力系统时域仿真主要包括中长期过程、机电暂态、电磁暂态等^[3], 仿真工具可分为单机级软件和平台级软硬件系统。但随着新型电力系统的发展, 其对仿真的效率、准确性和功能性均提出了更高的要求^[5], 使得传统基于单机级软件的离线仿真体系在面对新型电力系统时存在诸多问题。首先, 新型电力系统节点规模大幅增加、设备多样性增强、多尺度动态交织, 导致现有离线仿真的效率难以满

基金资助项目: 国家自然科学基金(52307112); 山东省自然科学基金(ZR2023QE204)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (52307112), Shandong Provincial Natural Science Foundation (ZR2023QE204).

足需求。其次,新型电力系统中新元件新设备涌现,全实物开发模式周期长、成本高、测试反复等问题凸显,离线仿真无法支撑以硬件在环测试^[6]为代表的高置信度场景。最后,在新型电力系统数字化转型背景下,需要不断提升电力系统的可观可测性,离线仿真无法支撑以构建电网孪生映射^[7]为代表的具备广泛信息感知、高速信息传输、海量信息存储、强大信息共享等特征的数字化业务需求。

相较于离线仿真,电力系统实时仿真要求每个步长解算用时小于步长所对应的实际物理时间^[8],保证仿真系统运行速度与实际物理过程推进速度一致,在提升仿真效率的同时,能够经济高效准确地还原真实工程场景,实现仿真系统与实际装置的联合运行,从而开展源网荷储各环节硬件在环测试,支撑电力系统设计、研究与数智化转型^[3,7,9]。电力系统实时仿真平台作为开展实时仿真的载体,共经历了3个发展阶段:动态模拟实时仿真、数模混合实时仿真和全数字实时仿真。动态模拟实时仿真^[10]依据相似性理论,采用实际物理设备搭建仿真系统,可以进行机电、电磁仿真和控保系统测试,但是设备昂贵、扩展性差、危险系数高^[11-12]。相比于动态模拟,数模混合实时仿真既具有数字仿真的灵活性、安全性和经济性,还具备模拟仿真直观可靠、真实反映设备工作性能的优点,是解决继保装置测试评估^[13]、高压直流控制保护^[14]、变流器控制^[15]等问题的重要手段。但受限于平台建模和计算能力,时间常数过小或难以建模的设备仍采用物理模拟的方法,难以适应新型电力系统对实时仿真的要求。随着新型计算设备的涌现,全数字实时仿真应运而生,其既可以完全采用数字模型对系统进行模拟,还可以进行数模混合仿真,具有安全、经济、高效和通用的优势^[16]。

目前,国内外学术界和工业界,如清华大学、上海交通大学、天津大学、中国电科院、南瑞继保电气有限公司、加拿大曼尼托巴 RTDS 公司等围绕建模技术优化^[17-18]、高效仿真算法^[19-21]、硬件平台开发^[22-24]、配套软件设计^[25]等方面,已开展电力系统实时仿真的相关研究工作。而实时仿真平台作为建模、算法等理论研究的落脚和应用,目前缺少从工程实践层面对现有平台进行全面系统的总结。此外,新型电力系统功能定位、系统形态、运行机理、调控体系深刻变革,机遇与挑战并存,亟须厘清新型电力系统视域下实时仿真平台的发展方向与关键

技术,从而更快速地满足当前市场需求,打破国外大型实时仿真公司的垄断地位。

为此,本文着眼于新型电力系统的发展趋势,首先提出了新型电力系统对实时仿真的新需求;其次,选取国内外常用的10种主流商业化实时仿真平台,总结对比其技术方案和现存问题。再次,对新型电力系统下平台的研究进展进行综述,主要聚焦于新需求驱动下的技术方案;最后,归纳凝练了新型电力系统下实时仿真平台未来的发展方向,为国产平台发挥后发优势提供理论基础。

1 新型电力系统下实时仿真新需求

新型电力系统源网荷储深度融合、广泛互动^[1],其全景示意图如图1所示。电源侧清洁低碳能源成为电量供应主体,海量发电单元以电力电子设备为接口并网,新能源单机、场站以及分布式电源实时仿真仍需研究;电网侧大规模交直流混联电网、主动配网、多能微网结构并存^[3],大型新能源基地送出、海上风电多端汇聚、输-配联合仿真等典型场景实时仿真仍需研究;负荷侧需求响应激励、用能主体多样,用能体系呈现强随机性,电-热-冷-气多能转化、多元弹性负荷建模等关键环节精细化实时仿真仍需研究;储能侧覆盖源网荷各环节,跨越多种

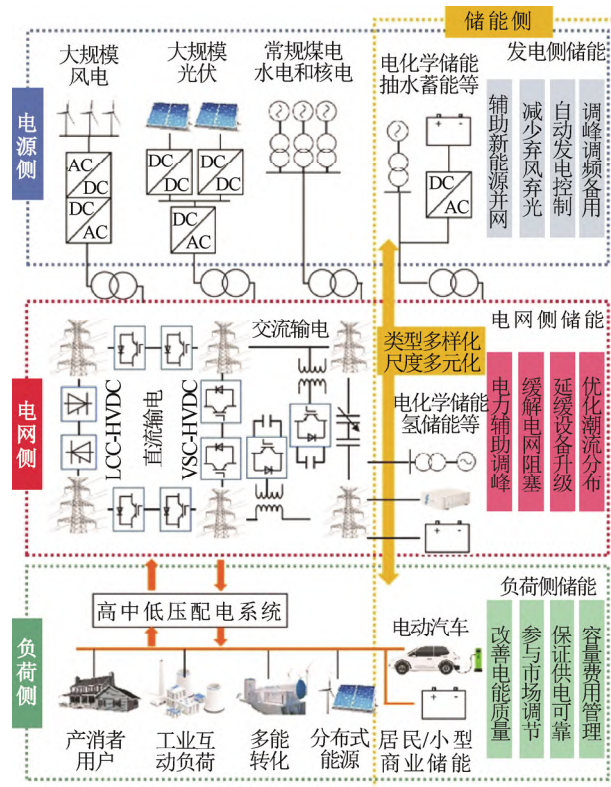


图1 新型电力系统全景示意图

Fig.1 Overview diagram of new-type power system

时间尺度, 电化学储能、压缩空气储能、氢储能形式多样^[26], 其典型机电暂态、电磁暂态结构模型以及参数辨识仍需研究, 挖掘主动支撑潜力。由此可见, 新型电力系统对实时仿真的新需求主要集中于 4 个方面: 一是电力电子设备大量接入, 小步长仿真需求迫切; 二是电网结构形态显著变化, 大规模实时仿真需求迫切; 三是运行场景复杂多变, 源网荷储灵活互动, 同时与气象、信息、社会等外部系统联系愈加紧密, 多时间尺度耦合的精细化实时仿真需求迫切; 四是实时仿真应用场景愈加多元, 应用范式智慧化转型需求迫切。为此, 有必要进一步探讨上述四个方面具体需求, 从而更有针对性地构建面向新型电力系统的实时仿真平台。

1.1 小步长实时仿真需求迫切

为了追求高功率密度和低总体谐波分布^[27], 新型电力系统高比例电力电子设备向着高频开关器件的方向发展, 导致系统数值求解的非线性、切换性和低正则性更强。电力电子设备的微秒级电磁暂态过程与交流系统的毫秒级过渡过程交互影响, 在工频为基础的稳定问题(如功角稳定、电压稳定)之外, 出现了电力电子设备宽频稳定性问题, 迫使仿真步长从毫秒级向微秒级、纳秒级转变, 以期能够更精细地捕捉系统的暂态过程。需要注意的是, 小步长仿真不等于实时仿真, 实时仿真强调仿真进程与物理过程的同步性。因此, 较小仿真步长的实时仿真会显著增加实现难度, 导致单位时间内中断与外设读取、模型计算与更新以及同步次数的增加。这种情况一方面会加大平台的计算压力, 需要提高模型的求解速度才能保证实时性; 另一方面需要平台具备能够支撑更小仿真步长的实时机制, 以缩短实时化调度造成的时间延迟。

1.2 大规模实时仿真需求迫切

新型电力系统中交直流混联电网融合了柔性交流输电(flexible alternating current transmission systems, FACTS)、传统直流输电(line commutated converter-high voltage direct current, LCC-HVDC)、柔性直流输电(voltage source converter-high voltage direct current, VSC-HVDC)等, 包含海量电力电子设备。以柔直换流站为例, 为提升输送电压等级, 每个换流阀桥臂都由上百个子模块(submodule, SM)串联组成, 而每个 SM 又包含若干电力电子器件, 其网络拓扑高阶, 仿真规模极大。对于大规模新能源场站, 由于包含发电机群、汇集线路、无功补偿装

置、升压变和场站控制系统等, 物理实体众多, 因此也极大推高了仿真规模。且由于电网形态变化, 负荷侧对主网平衡和稳定特性影响加剧, 迫使仿真分析向低电压等级扩展, 仿真设备数量大幅增加。上述特性导致单个仿真步长内算力需求的提高, 需要平台具备能够提供充足算力的硬件架构。

1.3 多时间尺度耦合实时仿真需求迫切

新型电力系统电源侧面临新能源出力与气象条件的深度耦合, 电网侧面临极端天气对供电能力的连锁影响, 负荷侧面临交通、工业、建筑等终端部门的融合互通, 储能侧面临多时间尺度不同类型设备的交织协同。以风电场为例, 虽然我国已经拥有比较完整的数值预报、灾害性天气监测预警业务体系^[28], 但是缺乏气象与电力领域互动, 难以反映两者之间的耦合特性。同时, 新型电力系统将呈现横向多能互补, 纵向源网荷储协同的演化趋势, 未来“冷-热-电-气”多种能源深度耦合的多能互补场景广泛^[26]。多能互补意味着源侧由多种能源的简单叠加过渡为复杂多能流网络联动性、系统性的多时间尺度耦合, 将会给电力系统状态分析、规划设计和运行管理带来极大挑战。上述特性迫使建模和仿真过程中要进一步考虑系统的多时间尺度耦合特点, 需要平台具备能够支撑精细化仿真的仿真算法。

1.4 应用范式智慧化转型需求迫切

实时仿真由于可以与现实世界严格同步, 目前普遍应用于硬件在环测试场景。一方面可以接入控制类硬件进行信号型在环, 对各类控制和保护策略开展近乎工程实际的无损有效验证^[29-30], 在保证安全前提下覆盖极端和故障工况。另一方面也可以接入功率类硬件进行功率型在环, 对光伏、储能、风电等系统开展半实物测试^[31-32], 缩短研发周期, 提高系统可靠性。但是在新型电力系统数字化背景下, 实时仿真应用范式将向智慧化转型^[33]。例如, 依托实时仿真可以在虚拟空间中建立物理实体的数字模型映射, 实现虚拟空间与物理空间的双向互动, 在优化物理实体的同时进化数字模型, 不断赋能其模拟推演能力, 最终构建数字孪生体。除此之外, 依托“可信-可解释-可迁移”的新一代人工智能技术, 可以进一步支撑新型电力系统优化运行、风险评估和智能决策等应用需求^[34]。上述特性对基于实时仿真的数智化应用范式提出了更高要求, 需要平台具备友好易用、服务灵活的仿真软件。

2 现有实时仿真平台总结

目前国内外实时仿真平台多样,按照使用场景,部分专注于电力系统实时仿真,也有部分拥有通用实时仿真能力(航空航天、新能源汽车等领域);按照开发目的,部分为商业化平台,拥有较为完备的软硬件服务,也有部分为自主设计的研发型平台,多用于科研项目。

为此,本文通过筛选和比较,选择了 RTDS、RT-Lab、dSPACE、Typhoon、Speedgoat、RT-Box、远宽能源、ADPSS、CloudPSS、Easygo 这 10 种平台进行总结和对比。上述平台的开发主体覆盖了国内和国外、工业界和学术界,且目前仍在维护,在技术方案上有较强的代表性。同时,为了给读者提供更加直观的选择和设计参考,表 1 对 10 种平台从实时机制、硬件架构、高效算法、仿真软件 4 个方面进行归纳总结,从而能够更好地对应新型电力系统需求,为电力系统实时仿真平台的研究提供更有针对性的经验。

2.1 实时机制

实时机制是实时仿真平台的核心技术之一,其实现方案是在设定仿真步长下定时产生中断信号,从而驱动仿真时间和物理时间同步。现有技术方案的实时机制可分为硬中断和软中断 2 类。

软中断一般采用具备微秒级延迟的实时操作系统(real-time operating system, RTOS)实现。RTOS 通常采用固定任务优先级的确定性调度策略,结合硬件中断来保证及时响应外部事件,从而可以在每个仿真步长完成相应的通信与计算。目前,商业化实时仿真平台多采用 Vxworks^[35]、QNX^[36]等商用 RTOS,通常针对硬件平台进行特殊优化,仿真步长可达到 10 μ s。另外,以 RT-Lab 为代表的平台推出了高性能模式(extreme high performance, XHP),将 RTOS 管理耗时削减到 1 μ s 以下,以轻量化后台保证硬实时约束、高同步精度和最大的数据吞吐量。按照开发经验,RTOS 的仿真步长目前最小可达到 900 ns~1 μ s。新型电力系统背景下,更小的仿真步长会对 RTOS 的调度能力和中断延迟、外设读取延迟、算法执行时间以及外设写入延迟要求更高。

硬中断避免了 RTOS 带来的延迟,通常具备亚微秒级甚至纳秒级调度延迟能力。一般是采用裸核 CPU(bare metal CPU, BM-CPU)或现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)来实现。

RTDS 公司最新的 NovaCor 平台即是在 POWER8 处理器上针对实时应用进行了定制化修改,实现裸核 CPU 运行,其与 RTOS 实时机制的对比如表 2 所示。此外, FPGA 作为可编程逻辑器件,通过硬件描述语言(如 VHDL 或 Verilog)进行设计和编程,烧录至 FPGA 芯片后可实现定制的数字电路和逻辑功能。由于其不存在操作系统,加之稳定的时钟频率,其仿真耗时基本为电路运算时间。一般来说,硬中断的最小仿真步长和最大时钟抖动均小于软中断。按照现有研究, FPGA 的仿真步长目前可达到 20 ns 以下^[37]。正因如此,学术界和工业界均推出了以 FPGA 为核心的电力电子解算器,如加拿大欧泊实时 eHS,中国电科院 ADPSS-STC 等。上述 FPGA 解算器可以与多核 CPU 平台互联, FPGA 专门用来仿真高频电力电子器件。

2.2 硬件架构

平台的处理器作为核心硬件设备,直接影响平台计算能力。随着芯片制造水平的提升,处理器从数字信号处理器(digital signal processor, DSP)^[38-39]等专用处理器逐步发展为以多核 CPU^[16]为代表的通用处理器。相较于专用处理器,通用处理器开发周期短、使用更加灵活。然而目前电力电子设备的开关频率已高达 100~500 kHz,高开关频率在减小输出波形的谐波畸变的同时,要求有足够小的仿真步长(通常应至少设置为开关周期的 1/10^[40],即 500 ns 左右)为了适应仿真步长的要求,近年来将 FPGA 用作接口板卡和处理器的平台迅速发展^[41]。FPGA 拥有丰富的并行计算单元、逻辑单元以及分布式内存单元,依靠流水线架构等使其并行能力远高于多核 CPU,且延迟极低。但以 FPGA 为处理器的平台存在开发难度大的问题,且硬件资源的有限性制约了仿真规模的扩大。为此高层次综合(high level synthesis, HLS)工具的推出简化了开发过程^[42]。文献[43]和文献[44]提出了多 FPGA 实时仿真平台的构建方案,文献[45]给出了多 FPGA 间资源优化配置方法。

伴随摩尔定律的失效,相比于单一处理器设计,平台开始依托异构计算来突破算力瓶颈。异构计算的核心是“面向应用选择架构”,将特定任务分配给最适合处理的计算单元。目前 CPU-FPGA 和 CPU-GPU 异构的平台已成为研究热点。CPU-FPGA 异构架构中, FPGA 适合处理算法流程简单但对运算速率要求高的计算任务,可以在小步长下求解电

表 1 国内外主流实时仿真平台比较

Table 1 Comparison of domestic and international mainstream real-time simulation platforms

平台名称	实时机制/操作系统	硬件架构/典型产品	仿真算法/加速方案	仿真软件/应用场景
RTDS 加拿大曼尼托巴 RTDS 公司	基于 CPU 硬中断	●多核 CPU 架构或 CPU-FPGA 异构 ●支持多设备并行 ●最新产品为 NovaCor2.0(POWER8)	●采用节点分析法 ●支持 R_{on}/R_{off} 和 ADC 开关建模 ●支持机电-电磁混合仿真 ●支持传输线解耦等	RSCAD 电力系统、电力电子等
RT-Lab 加拿大 Opal-RT 公司	基于 RTOS 软中断 (采用 QNX /OPAL-RT Linux 3 操作系统)	●多核 CPU 架构或 CPU-FPGA 异构 ●支持多设备并行 ●入门版: OP5412(Intel Xeon E3) ●进阶版: OP4610(AMD Ryzen 5) ●专业版: OP5707XG/5033XG(2nd Xeon)	●状态变量法(不使用 SSN 模块) ●状态空间节点法(使用 SSN 模块) ●支持 R_{on}/R_{off} 和 ADC 开关建模 ●支持机电-电磁混合仿真 ●支持 SSN 解耦、传输线解耦等	RT-LAB HYPERSIM 电力系统、电力电子等
dSPACE 德国 dSPACE 公司	基于 RTOS 软中断 (采用 Simulink Real Time 操作系统)	●多核 CPU 架构 ●支持多设备并行 ●入门版: DS6001(i7-6820EQ) ●进阶版: SCALEXIO(Intel E3-1275v6) ●专业版: SCALEXIO(Intel Gold 6208U)	●采用节点分析法 ●支持多速率仿真 ●支持传输线解耦	MATLAB/Simulink Control Desk 电力电子、汽车、航天 等
Typhoon 瑞士 Typhoon HIL 公司	基于 FPGA 硬中断	●FPGA 架构或 ZYNQ 架构 ●支持多 FPGA 级联并行 ●入门版: HIL404(Zynq Ultrascale SoC) ●进阶版: HIL604(Zynq-7 SoC) ●专业版: HIL606(Zynq Ultrascale SoC)	●采用状态变量法 ●支持 R_{on}/R_{off} 开关建模	Typhoon HIL Control Center 电力电子、电动汽车、 船舶工业等
Speedgoat 瑞士 Speedgoat 公司 /Mathworks 的联营 公司	基于 RTOS 软中断 (采用 Simulink Real Time 操作系统)	●多核 CPU 架构或 CPU-FPGA 异构 ●支持多设备并行 ●入门版: Unit(Intel Atom x5-E3940) ●进阶版: Baseline(Intel Celeron) ●专业版: Performance(Intel Xeon)	●采用状态变量法 ●支持多速率仿真	MATLAB/Simulink 电力电子、工业控制、 汽车、机器人等
RT-Box 瑞士 Plexim GmbH 公司	基于 RTOS 软中断	●ZYNQ 架构 ●支持多设备并行 ●入门版:RT-Box1(Xilinx Zynq Z-7030) ●进阶版:RT-Box2(Xilinx Zynq ZU9EG) ●专业版:RT-Box3(Xilinx Zynq ZU9EG)	●采用状态变量法 ●支持基于延迟插入的解耦方法	PLECS 电力电子、航空航天等
MT 系列产品 中国远宽能源公司	基于 RTOS 软中断	●ZYNQ 架构或 CPU-FPGA 异构 ●支持多设备并行 ●入门版:MT6020(Xilinx Zynq-7100) ●进阶版:MT6060(Intel Xeon-Xilinx KU115) ●专业版:MT8020(Intel Xeon-Xilinx KU115)	●采用状态变量法 ●支持 R_{on}/R_{off} 和 ADC 混合建模 ●支持多速率仿真	StarSim HIL 电力系统、电力电子等
ADPSS 中国电科院	基于 RTOS 软中断 (采用基于 Linux 的实 时操作系统)	●多核 CPU 架构、CPU-FPGA 异构 ●支持多设备并行 ●需要依托高性能 PC 机群使用 ●可以使用 Opal-RT 实时仿真平台集群 ●可以使用曙光超级计算节点	●采用节点分析法 ●支持 R_{on}/R_{off} 和 ADC 混合建模 ●支持机电-电磁混合仿真 ●支持传输线解耦、节点分裂法	机电: PSASP 电磁: ADPSS/ETSDAC 电力系统、电力电子等
CloudPSS (CloudPSS-RT) 清华大学	基于 RTOS 软中断	●多核 CPU 架构、CPU-GPU 异构 ●支持多设备并行 ●需要依托高性能 PC、异构算力机群使用 ●可以使用曙光等超级计算节点 ●兼容 x86、ARM、申威众核、GPU 等架构	●采用节点分析法 ●支持 R_{on}/R_{off} 和 ADC 开关建模 ●提供机电-电磁混合仿真接口 ●支持传输线解耦、MATE 法解耦	CloudPSS SimStudio CloudPSS FuncStudio CloudPSS AppStudio 电力系统、电力电子、 综合能源系统等
Easygo 中国森木磊石公司	基于 FPGA 硬中断 + 基于 RTOS 软中断 (采用基于 Linux 的 实时操作系统)	●FPGA 架构、CPU-FPGA 异构 ●入门版:Cbox(主要用于 RCP) ●进阶版:NetBox(Xilinx Kintex-7 325T) ●专业版:PXIBOX(4 核 CPU-Kintex-7)	●采用状态变量法 ●支持 R_{on}/R_{off} 和 ADC 开关建模 ●支持多速率仿真	EasyGo DeskSim 电力系统、电力电子等

磁暂态; CPU 适合处理算法流程复杂但对运算速率要求不高的计算任务, 可以负责慢动态部分的求解以及数据处理。目前 CPU-FPGA 异构平台^[46-47]涌现, 并进一步出现了基于片上系统(system on chip, Soc) 的 ZYNQ/PYNQ/Agilex 系列 FPGA^[48]。CPU-GPU 异构架构中, GPU 拥有大量计算核心, 适合求解算法流程简单但需要大规模并行计算的任务。应当注意的是, GPU 无法独立完成仿真进程控制与数据调度, 需要与 CPU 协同。然而 CPU 与 GPU 之间同步开销和数据传输耗时过大, 制约了 CPU-GPU 异构平台的发展。为了解决此问题, 文献^[49-51]通过合理构建 GPU 并行框架中的核函数(kernel function), 在系统解耦的基础上, 给出完全基于 GPU 的电磁暂态并行仿真算法和复杂控制系统并行仿真算法。

然而随着新型电力系统仿真规模的不断扩大, 仅靠单个平台已无法提供足够算力, 亟需多设备并行仿真技术。目前, 较为成熟的方案可分为云端并行和本地并行 2 类, 如图 2 所示。云端并行可以远程利用超算计算节点或空闲平台, 实现分布式实时仿真, 对未来的云-边融合架构支持性佳, 但是平台间数据交互带来的通信延迟以及仿真敛散性问题无法避免, 尤其是对延迟敏感度高的设备硬件在环测试影响较大。本地并行同样面临低时延通信和时钟同步两大难题。通信方面, 目前平台间通常采用高速串行总线标准(peripheral component interconnect express, PCIe)或者光纤(一般基于 SFP 接口)进行通信, 借助 FPGA 接口板卡和 Aurora 协议(或 FC-AE 协议等), 可以实现速度 5 Gb/s 以上, 时延 1 μ s 以下的高速低时延通信。同步方面, 尽管各时钟的理论频率值可设置相同, 但是固有的时钟偏移积累会导致通信错位。目前同步机制可分为硬同步(如 IRIG-B)和软同步(如 IEEE 1588)两类。硬同步依赖专用硬件设备或外部时钟源, 精度高、可靠性高。软同步使用数字仿真时钟, 根据提前设定的协议来实现同步, 灵活性强, 如利用 FPGA 专门作为主时钟实现多平台互联。此外, 为了进一步缩短同步耗时, CloudPSS 等平台开始使用隐式同步机制(implicit synchronization)^[24], 同步耗时最大可缩减 80%。但受限于多处理器间通信性能、并行同步性和稳定性, 目前本地并行数量存在上限。

2.3 高效算法

新型电力系统双高特性凸显, 仿真规模、仿真

表 2 裸核实时机制与 RTOS 实时机制对比

Table 2 Comparison between bare-metal real-time strategy and RTOS real-time strategy

对比指标	基于裸核的实时机制	基于 RTOS 的实时机制
实时性能	硬实时(高确定性)	强实时(存在抖动)
易用性	可维护性、可扩展性差	易于维护和扩展
硬件调度	可以直接访问硬件	需要通过硬件驱动
开发难度	较高, 需要底层编程	相对较低

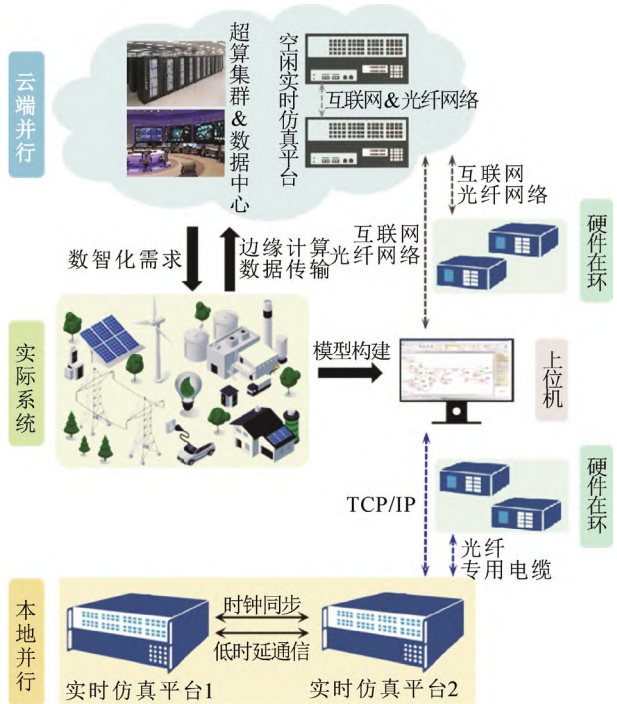


图 2 实时仿真平台多设备并行仿真方案

Fig.2 Multi device parallel simulation scheme for real-time simulation platform

精度、仿真速度 3 者之间矛盾愈发突出, 亟需高效准确的建模和仿真算法支撑精细化实时仿真。

建模算法层面, 倘若进行设备级或者小规模电网研究, 各平台通常需要对设备内部各个开关器件进行建模, 尽可能准确地反映其伏安特性。目前常用的建模方法分为 R_{on}/R_{off} 开关建模和恒导纳开关建模(associated discrete circuit, ADC)。 R_{on}/R_{off} 法采用小电阻代替导通开关, 大电阻代替断开开关。然而, 当系统存在高频电力电子器件时, 系统导纳矩阵则会不停改变, 求逆运算将占用平台大量硬件资源。相比之下, ADC 法采用小电感对开关导通建模, 小电容对开关断开建模, 只要在给定仿真步长下具有相同的等值导纳^[52], 便可在仿真过程中保持系统恒导纳。但使用储能元件建模开关, 开关切换时暂

态过程耗时偏长, 将造成虚拟功率损耗^[53]。尤其在开关频率大于 20 kHz 时, ADC 法往往难以胜任。目前, RTDS、RT-Lab、远宽 MT 系列、ADPSS、Easygo 等仿真平台能够支持上述 2 种建模方式。其中, RT-Lab 将 ADC 法应用于电力电子解算器 eHS 中; RTDS 基于 ADC 法设计了 Smalldt 电力电子元件库; 远宽 MT 系列平台实现了 R_{on}/R_{off} 和 ADC 混合建模, 对于低开关频率, 可以采用 ADC 法, 对于高开关频率, 可以转换为 R_{on}/R_{off} 法。

仿真算法层面, 目前基本的电磁暂态算法分为状态变量法(state space analysis method)^[54]和节点分析法^[55](nodal analysis method) 2 类。状态变量法通过代数-微分方程组来描述系统的电磁暂态特性, 利用合适的数值积分方法直接求解; 节点分析法先形成每个元件的差分电路模型, 然后建立整个系统的节点电压方程并进行求解。2 种仿真算法的对比如表 3 所示。

为了兼顾仿真精度和仿真效率, 可进一步采用多速率仿真算法。文献^[56]对多速率混合仿真的方法进行了总结, 其核心是利用新型电力系统中各部分时间常数的不同, 对各部分采用不同的仿真步长, 并通过多速率接口进行数据交互。目前常用的是机电-电磁多速率实时仿真, 其对含电力电子设备的部分采用微秒级的电磁暂态仿真, 对交流系统采用毫秒级的机电暂态仿真, 在交流系统占比较大的大规模交直流混联系统中可以大幅减少平台的运算量。目前, ADPSS、RT-Lab(基于 ePHASORsim 机电暂态工具包)^[57]、RTDS(基于 CBuilder 自定义功能)^[58]等平台支持同构型机电-电磁混合实时仿真, 即同一个平台具备实现混合仿真的能力。除此之外, 平台可以通过增加特定的 I/O 板卡和高速通信接口, 利用现有成熟机电-电磁仿真软件, 实现异构型机电-电磁混合实时仿真。但异构型方案提高了硬件成本且存在数据转换误差。

此外, 也可以对系统解耦分网, 将大系统划分为若干子网并行计算, 提高仿真效率。目前常用的解耦分网方法有: 传输线解耦法^[59]、节点分裂法^[60]、支路切割法^[61]、多区域戴维南等值法(multi-area thevenin equivalent, MATE)^[62]、状态空间节点法(state-space nodal, SSN)^[63]。上述基于子网解耦的方法精度高, 但无法兼顾子网运算量和联络变量运算量的要求。相比之下, 基于延迟插入^[64]解耦方法在慢变状态(如电感电流或电容电压)上引入延迟, 进

表 3 2 种仿真方法优缺点对比

Table 3 Contrast between the advantages and disadvantages of the two methods

仿真方法	优点	缺点
节点分析法	网络方程构建简单; 每步无需迭代, 求解时间短; 可以求解分布参数元件模型	仿真步长调整不便; 可能存在数值振荡问题; 难以求解非线性元件
状态变量法	易于调整仿真步长; 不存在数值振荡问题; 便于处理非线性元件	形成代数-微分方程组复杂; 每步内均需迭代, 求解慢; 不适用于求解分布参数模型

而实现系统间的解耦。这种方法具有分网灵活、信息交互少、联络变量运算量小的优势, 但是由于引入人为延迟, 精度和稳定性还需要进一步研究。

2.4 仿真软件

上位机软件(以下简称软件)是平台进行人机交互的窗口, 也是提供各类数智化应用的枢纽。目前大部分软件仍聚焦于实现图形化建模以及下位机控制, 即利用模型库中的组件, 基于图形界面表示系统, 最后通过硬件平台完成并行化仿真。在模型构建方面, 大部分平台采用自主设计的建模软件, 如 RTDS、Typhoon、远宽能源、CloudPSS 等, 但大部分均支持 Matlab/Simulink、PSCAD 等第三方模型的导入, 从而可以提高使用效率。仿真控制方面, 通常可以根据模型特点进行分核计算(主处理器为多核 CPU)和分设备计算(平台为异构架构), 并配置接口的映射关系。数据分析方面, 商业化平台大多支持 GUI 界面的信号和仿真性能实时监控, 部分可集成自动化测试、实时修改参数、高速录波等工具。非商用平台往往根据需求采取仿真数据异步回传等方式来降低开发复杂度。

但是新型电力系统的不断发展迫使实时仿真应用范式向智慧化转型, 仅实现基本的下位机控制已远达不到要求。目前 RT-Lab^[65]、RTDS^[66]、ADPSS^[67]已可以与 OPNET、EXata CPS 等信息通信仿真软件集成, 初步构建电力系统和信息通信系统联合仿真平台, 对通信系统和网络攻击等对电网的影响进行研究。此外, CloudPSS 可以提供 Matlab、Python、C 的 API 接口, 通过与其他软硬件配合, 快速构建实时仿真驱动的应用定制。同时其可部署于云端(电网侧)和边端(新能源场站), 基于现场数据实现智能决策, 并进一步实现数字孪生功能。由此可见, 开发数字化业务来不断提高平台功能丰富度是现有平台需重点关注的问题。

3 新型电力系统中实时仿真平台研究进展

近年来,学术界和工业界利用商业化平台或自主设计的研发型平台,围绕新型电力系统典型场景进行功能适配和技术迭代,完成仿真分析、系统测试、优化控制等工作。表4对应用商业化平台开展新型电力系统研究的文献进行总结。受限于篇幅,主要列举了近3年1~2个应用实例予以代表。由表4可见,嵌入式实时仿真平台如dSPACE、Typhoon、Speedgoat、RT-Box、Easygo更多用于设备级的数字仿真,在此基础上接入物理装置进行硬件在环,或与模拟系统、其他实时仿真平台连接,实现快速控制原型(rapid control prototype, RCP)。基于高性能服务器的平台,如RTDS、RT-Lab、ADPSS、CloudPSS等则更多地用于系统级全数字仿真,或接入控保装置、FACTS控制器、换流阀等进行大规模数模仿真研究。以ADPSS为例,目前可支持30 000电气节点大电网的实时仿真。除此之外,自主设计的研发型平台由于针对性强,往往能够根据特定场景进行优化,对于构建新型电力系统实时仿真体系也起到重要作用。目前,新型电力系统实时仿真的研究大部分聚焦于新能源发电单元和交直流输配电网络。本章将以自主设计的研发型平台为主综述新型电力系统不同场景下实时仿真平台的构建方案。

3.1 新能源发电单元

新型电力系统电源侧中新能源将成为装机主体,海量风电、光伏单元以电力电子设备为接口并网,系统惯量急剧减小,机电暂态仿真由于特性畸变难以精确表征系统动态,需要考虑单机到场站不同规模的新能源发电单元建模与实时仿真。

针对新能源发电单元单机场景,面向风电机组的实时仿真已有较多研究。风电机组一般分为气动机械子系统和电气子系统两部分,依据实时仿真的使用场景,进行子系统简化。面向机组减载等研究时,气动机械子系统通常基于叶素-动量理论(blade element momentum, BEM)建模或采用局部线性化模型,电气子系统被简化^[69]。面向故障穿越研究时,电气子系统普遍采用详细电磁暂态模型,变流器采用 R_{on}/R_{off} 开关建模,气动机械子系统简化为静态 C_p 模型和两质块轴系模型^[69]。子系统的简化会忽视机组动态,为实现风电机组精细化实时仿真,文献[69-70]采用跨平台联合仿真的方法,分别通过仿真软件Bladed和OpenFAST建立详细气动机械模型,

表4 商业化实时仿真平台在新型电力系统中的功能应用文献

实时仿真平台	Table 4 Articles for the application of commercial real-time simulation platform in new-type power systems					
	应用于电源侧		应用于电网侧		应用于负荷侧	
	系统级	设备级	系统级	设备级	系统级	设备级
RTDS	[68]	[69-70]	[71]	[72]	[73]	[74]
RT-Lab	[75]	[76]	[77]	[78]	[9]	[79]
dSPACE	—	[80]	[81]	[82]	[83]	—
Typhoon	[84]	[85]	—	[86]	[87]	[88]
Speedgoat	[89]	[90]	—	[91]	—	—
RT-Box	—	[92]	—	[93]	—	—
远宽 MT 系列	[94]	[95]	—	[95]	[96]	—
ADPSS	[97]	[98]	[81]	—	—	—
CloudPSS	[99]	[100]	[24]	[100]	—	—
Easygo	—	[101]	—	—	[102]	—

结合机器时钟和实时操作系统保证实时性,采用RTDS建立详细电气模型,借助GTNET实现跨平台通信,最终气动机械模型和电气模型实时仿真步长分别达到10 ms和2 μs。文献[103]、文献[104]分别基于自研CPU-GPU异构和CPU-FPGA异构平台实现,前者通过CUDA架构调用GPU资源,后者设计基于FPGA的电磁暂态求解器,在不重新编译的前提下适应各种电路拓扑。

针对新能源发电单元场站场景,受限于算力资源,目前更多是建立风电场和光伏电站的聚合等值模型,降低模型阶数进而开展实时仿真。文献[68]利用容量加权方法构建单机倍增等值模型,然后采用RT-LAB进行实时仿真。也有文献利用尾流效应、地理位置、辐照度与温度、线路阻抗、控制策略等作为分群指标,然后对同群机组进行聚合等值。上述等值模型主要关注新能源场站对电网呈现的外部特性,无法保证场站内部信息完整度。因此,基于单机电磁暂态模型且保留场站实际拓扑的详细模型实时仿真成为重要的研究方向,对仿真算法和平台运算能力提出严峻挑战。目前场站级详细模型实时仿真主要从模型分割解耦和硬件并行计算两方面展开。利用受控源解耦^[105]、传输线解耦^[105]、半隐式延迟解耦^[106]、嵌套快速求解^[107]等方法,结合多核CPU并行^[107]、CPU-GPU异构并行^[108]、CPU-FPGA异构并行^[109]等硬件方案实现实时仿真。同时上述方案均未考虑风机之间气动交互,因此对于风电场流体系统实时仿真也需进一步研究。

综上, 新型电力系统电源侧实时仿真平台研究要重点关注以下问题: 1) 详细电气模型通常基于一次电路拓扑搭建, 但其实际电磁暂态特性受控制保护策略影响显著, 需精确高效地接入控保策略; 2) 各发电单元极易受环境影响, 运行工况多变, 可基于精细化电力气象实时预报, 关注与气象系统的耦合作用; 3) 发电单元内部不仅有微秒级的电磁暂态过程, 还可能包含毫秒级机械振动等动态过程影响工作特性, 要根据实际需求构建全耦合模型; 4) 大量新能源场站接入使得仿真节点数与仿真步长严重受限, 需打破仿真规模、精度、效率的矛盾三角。

3.2 输配电网侧

新型电力系统电网侧整合传统的输-变-配三环, 交直流之间、多回直流之间、输配电网之间紧密耦合、相互影响, 呈现交直流混联大电网-主动配电网并存格局。对输配电网进行实时仿真, 需要考虑含海量电力电子设备的大电网以及复杂主动配电网的建模与实时仿真, 要按照研究目的选择高精度数模混合仿真或高性能数字仿真技术。

针对交直流混联大电网场景, 为了保证仿真规模的同时精细模拟直流输电等电力电子设备特性, 机电-电磁多速率实时仿真已得到工程化应用。文献[110]利用 ADPSS 平台对 ± 800 kV 雅中—江西特高压工程进行机电-电磁混合仿真, 相较电磁暂态等值模型更为准确。但上述方法机电-电磁接口处存在非工频分量交接误差, 且仿真效率随着接口增加显著降低。目前, 交直流混联大电网全电磁暂态实时仿真也已成为研究热点, 文献[111]利用自研 CPU-FPGA 异构平台实现了 12 脉冲 LCC-HVDC 系统的 $1\ \mu\text{s}$ 级实时仿真, 文献[112]设计了一种基于 FPGA 和 RTDS 的联合实时仿真平台, 但是 FPGA 要根据 RTDS 的仿真结果进行 MMC 桥臂阀组的等值计算, 因此存在一定时延。除此之外, 对于直流输电等控制特性较为复杂的系统, 将实际控制器(或功率元件)接入实时仿真平台开展数模混合仿真更加贴合实际特性。文献[77]对白鹤滩—江苏高压直流输电工程进行实时仿真, 构建了 CPU-FPGA 异构的阀控系统、FPGA 架构的阀体模型、使用实时仿真平台接入直流的实际控制保护装置, 最终搭建了白江工程数模混合实时仿真平台。此外, 有较多文献利用 ADPSS、RTDS、RT-Lab 实现大规模交直流电网数模混合实时仿真。需要注意的是, 数模混合实时仿真受限于接口性能与数量, 仿真规模受到一

定限制。

针对主动配电网场景, 由于分布式电源、储能、柔性负荷的接入, 快时间尺度电力电子设备与慢时间尺度配电线路等交织耦合, 呈现多时间尺度特性, 面临计算规模大, 模型复杂的问题。目前主要从多速率分区解耦和硬件并行计算两方面展开研究。文献[113]将分布式发电单元等效为受控源, 基于节点分裂进行解耦, 进而实现全电磁暂态实时仿真。文献[114]考虑多核 CPU 之间计算量和通信量的均衡进行分网解耦。文献[115]提出了通用的配电网多速率离散模型状态空间特征值计算方法, 量化并行解耦位置。在硬件并行求解方面, 已有研究利用基于多核 CPU 的配电网实时仿真机(advanced distribution network simulator, ADN-SIM)^[116]、FPGA^[117]、GPU^[49]等实现主动配电网的高效仿真或实时仿真。此外, 主动配电网中信息通信系统普及, 使得配电网和通信网耦合成为信息物理系统(cyber physical system, CPS)。文献[116]基于 ADN-SIM 实现了 $50\ \mu\text{s}$ 步长信息物理系统联合实时仿真。

综上, 新型电力系统电网侧实时仿真平台研究要重点关注以下问题: 1) 提升面向大规模电网的全电磁暂态仿真能力, 进一步发挥其对与新型电力系统电网侧的安全稳定的支撑作用; 2) FACTS 控制器、直流控保、换流阀等设备数字建模精度有限, 需提升其精确仿真能力, 同时完善数模接口技术(如增加接口规模, 降低通信时延); 3) 输配电网受外部因素影响显著, 需进一步考虑交通系统、信息通信系统、气象系统之间的耦合作用; 4) 伴随电网侧建模仿真范围向低电压延伸, 需考虑不同控制策略导致的分布式发电单元和电力电子负荷特性对输配电网的影响。

4 新型电力系统下实时仿真平台发展方向

新型电力系统的功能定位、系统形态、运行机理、调控体系深刻变革, 需要结合新型电力系统转型时序, 攻关平台的基础理论, 提升平台的硬件算力, 扩展平台的适用场景。构建以电力系统实时仿真平台为核心, 统筹模型、算法、算力、应用的新型电力系统实时仿真体系, 具体内容见图 3。

4.1 全景精细建模

1) 适应新型电力系统形态的全场景建模能力。针对交直流混联电网, 研究高阶快速时变拓扑网络的高效电磁暂态建模方法, 针对海量开关状态判断

困难、系统高维等问题,进一步研究开关状态预测和实时仿真建模方法。针对大规模新能源场站,通过多学科交叉研究发电单元不同时间尺度(如风电场大气边界层,风机气动、机械和电气动态,集电系统动态)下的耦合机理,构建考虑数值稳定的模块间接口算法和步长选取原则。针对多元弹性负荷,通过参数辨识等手段建立分布式电源、电动汽车、虚拟电厂等广义综合负荷模型,实现精细化负荷建模。此外,电力物理系统与信息通信系统的联合实时仿真也是未来重点关注的问题,要研究能量流与信息流之间的相互依赖关系,进一步实现 DoS 攻击、FDI 攻击等外部行为的建模。

2) 完善机理-数据混合驱动的自适应建模方法。

目前基于数据驱动的建模方法主要包括:最小二乘法、神经网络、支持向量机、经验模态分解、模糊宽度学习等。要充分利用新型电力系统运行过程中产生的海量优质数据,发挥数据驱动建模的非线性特性表征能力,实现多层次数字赋能,弥补各设备物理建模等效误差、固有误差和不确定度间的传递。同时要进一步研究数据驱动建模的理想精度边界,构建具有自寻优、自校正和自愈能力的新一代高保真度系统模型。

4.2 模型快速求解

1) 实现普适意义下强非线性系统分模块降阶。借鉴多速率仿真思路,针对大规模强非线性系统中复杂程度较低、动态过程简单、规模较大的模块,研究其通用降阶化简理论与稳定性判别方法。目前对于线性系统的降阶主要基于投影变换思想,如模态(或平衡)截断法、Krylov 子空间法、特征正交分解法等,而非线性系统的降阶由于其难度远高于线性系统,故研究相对较少。此外还需要进一步解决现有降阶方法不能有效反映强非线性系统振荡特性的问题,实现降阶模型稳定性分析。

2) 新型电力系统全场景模型的高效计算方法。设计系统-场站-元件多层次解耦并行框架,研究高效灵活的解耦方法,提高计算并行度。同时从不同子系统多速率并行的角度,进一步研究快慢动态子系统间的高精度交互技术,弥补现有多时间尺度算法的使用场景局限。研究高精度、高稳定、高效率的数值积分方法,针对时变拓扑离散后得到的大规模非线性代数方程组,研究其快速求解方法。同时可进一步研究基于人工智能算法的仿真加速策略,实现仿真参数自适应调整、仿真任务优化分配,同

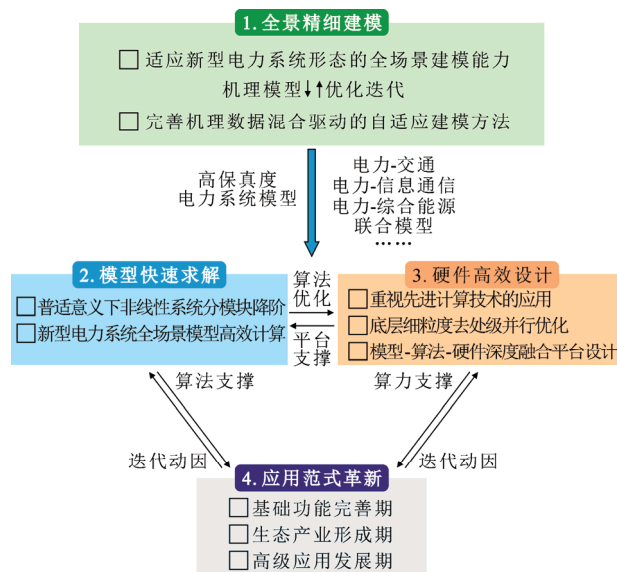


图3 新型电力系统下实时仿真平台发展方向

Fig.3 Development direction of real-time simulation platforms in new-type power systems

时可借鉴 ANSYS 公司推出的 SimAI 产品,推动数值计算大模型与机理仿真的融合,从而提升求解效率。

4.3 硬件高效设计

1) 重视先进计算技术的应用。伴随边缘计算、云计算、量子计算、硅光芯片等技术的不断发展,广连接、大带宽、低延时特性的高效硬件方案将不断出现,从而助推实时仿真平台从量变到质变。同时可以充分利用导纳矩阵和关联矩阵的稀疏性、对称性特点,进一步研究高效数据存取方法,支撑多源多维异构数据的转换和挖掘,促进数据协同和共享。

2) 底层细粒度运算级并行优化。一方面要提高硬件的并行度,通过多线程、流水线处理等技术对基本解算单元进行计算分解,通过数据并行和流水并行、向量化访存、核函数拆分对底层复杂运算进行并行化处理,通过共享内存等方式高效处理线程间耦合;另一方面要提高仿真程序的并行度,要根据代码结构以及平台硬件条件进行有针对性的并行优化,充分利用先进编程技术、高性能库函数,最大化利用硬件的并行计算能力。

3) 模型-算法-硬件深度融合的平台设计。挖掘双高特征下海量设备的同质计算特性,实现面向异构众核计算单元的高并行求解。从硬件结构和计算模式出发,建立实时仿真任务时-空需求模型^[45],研究潜在解耦点位置和优先级排序方法,构建最优分网问题,并进一步建立考虑通信时延的子网算力需

求-计算资源的优化匹配模型, 实现模型、算法、算力三者间的最优匹配, 提高仿真计算速度。

4.4 应用范式革新

1) 基础功能完善期。建立丰富、精细、标准化的元件库, 涵盖“源-网-荷-储”各环节所涉及的电气设备及其二次装置, 解决厂商设备(如控制器)建模问题, 实现不同平台和软件之间的模型转化应用。提高平台的易用性, 降低“模型搭建-仿真设置-结果分析”的复杂度, 提升机电-电磁数据自动转换的精度, 减少代码生成编译和载入的时间, 针对平台的不同使用主体, 设计直观、开放的可视化界面。

2) 生态产业形成期。在单平台基础上, 提供丰富的数据和功能接口, 在兼顾数据安全和隐私的同时, 实现跨平台、跨行业、跨领域协作。建立具备用户黏性的行业生态, 构建仿真资源交易市场, 实现代码、模型、算力、应用的共享共治、快速交易。同时可以进一步接入电力系统规划-建设-调度全过程, 构建电力系统统一建模和仿真平台, 提升平台的完整性和易用性。

3) 高级应用发展期。在前2个阶段的基础上, 增强平台的数智化建设。通过人机混合态势感知以及多形态人工智能方法, 进一步设计仿真优化决策应用。同时以新型电力系统数字孪生体构建为核心, 配套“云大物移智链边”先进数字信息技术, 完善社会物理信息系统的高效实时仿真方法, 完成实时仿真驱动的推演、预测和决策, 全面支撑新型电力系统安全、低碳、高效运行。

5 结论

新型电力系统的复杂程度前所未有的, 高比例新能源并网和高比例电力电子设备所具有的低惯性、弱可控性、强非线性对实时仿真提出了新的需求, 如何构建面向新型电力系统的实时仿真平台成为近年来的重大课题。本文系统性梳理了新型电力系统下实时仿真的新需求, 从实时机制、硬件架构、高效算法、仿真软件4个方面回顾总结了现有实时仿真平台的发展现状。然后围绕新能源发电单元和交直流输电网络2个典型场景, 综述了新型电力系统中实时仿真平台构建方案的研究进展。最后从全景精细建模、模型快速求解、硬件高效设计、应用范式革新4个方面展望了平台未来发展方向, 为新型电力系统下平台发展提供参考和借鉴。

参考文献 References

- [1] 康重庆, 杜尔顺, 郭鸿业, 等. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1741-1750.
KANG Chongqing, DU Ershun, GUO Hongye, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1741-1750.
- [2] 盛戈碑, 钱勇, 罗林根, 等. 面向新型电力系统的数字化电力设备关键技术及其发展趋势[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1765-1778.
SHENG Gehao, QIAN Yong, LUO Lingen, et al. Key technologies and development trends of digital power equipment for new type power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1765-1778.
- [3] 陈国平, 李明节, 董昱, 等. 构建新型电力系统仿真体系研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6535-6550.
CHEN Guoping, LI Mingjie, DONG Yu, et al. Research on the simulation technology architecture for the new-type power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6535-6550.
- [4] 董雪涛, 冯长有, 朱子民, 等. 新型电力系统仿真工具研究初探[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 53-63.
DONG Xuetao, FENG Changyou, ZHU Zimin, et al. Preliminary study on simulation tool for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 53-63.
- [5] 田芳, 黄彦浩, 史东宇, 等. 电力系统仿真分析技术的发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2151-2163.
TIAN Fang, HUANG Yanhao, SHI Dongyu, et al. Developing trend of power system simulation and analysis technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2151-2163.
- [6] 毕大强, 郭瑞光, 汪新星. 电力电子与电机系统实时仿真技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2023: 1-6.
BI Daqiang, GUO Ruiguang, WANG Xinxing. Real-time simulation technology of power electronics and motor system[M]. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2023: 1-6.
- [7] 沈沉, 曹仟妮, 贾孟硕, 等. 电力系统数字孪生的概念、特点及应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 487-498.
SHEN Chen, CAO Qianni, JIA Mengshuo, et al. Concepts, characteristics and prospects of application of digital twin in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 487-498.
- [8] FARUQUE M D O, STRASSER T, LAUSS G, et al. Real-time simulation technologies for power systems design, testing, and analysis[J]. IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, 2015, 2(2): 63-73.
- [9] RUHE S, SCHAEFER K, BRANZ S, et al. Design and implementation of a hierarchical digital twin for power systems using real-time simulation[J]. Electronics, 2023, 12(12): 2747.
- [10] 王强. 电力系统动态模拟技术[J]. 高电压技术, 2005, 31(9): 81-83.
WANG Qiang. Dynamic simulation technology of electric power system[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(9): 81-83.
- [11] 李仲青, 周泽昕, 周春霞, 等. 同塔多回输电线路动态物理模拟方法研究[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1095-1100.
LI Zhongqing, ZHOU Zexin, ZHOU Chunxia, et al. Research on dynamic physical simulation method for parallel multi-circuit transmission lines on the same tower[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1095-1100.
- [12] 詹荣荣, 孟江雯, 余越, 等. 半波长交流输电线路保护测试技术[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 37-43.
ZHAN Rongrong, MENG Jiangwen, YU Yue, et al. Research on testing technology of half-wavelength AC transmission line protection[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 37-43.

- [13] 吕虎, 谢国平, 朱艺颖, 等. 青藏直流接入西藏电网数模混合仿真[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 455-459.
GUO Hu, XIE Guoping, ZHU Yiyang, et al. Digital/analog hybrid simulation of Tibet grid integrated with ± 400 kV DC transmission line from Qinghai to Tibet[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 455-459.
- [14] 李函, 韩英铎, 王仲鸿, 等. 利用混合实时仿真器测试 HVDC 控制与保护[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(17): 28-31.
LI Han, HAN Yingduo, WANG Zhonghong, et al. Verification of HVDC controller using an advanced hybrid real-time simulator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(17): 28-31.
- [15] 邓新昌. 新能源发电并网逆变器的建模与仿真研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
DENG Xinchang. Research on modeling and simulation of grid-connected converters in renewable energy generation[D]. Hefei, China: Hefei University of Technology, 2019.
- [16] 田芳, 李亚楼, 周孝信, 等. 电力系统全数字实时仿真装置[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 17-22.
TIAN Fang, LI Yalou, ZHOU Xiaoxin, et al. Advanced digital power system simulator[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 17-22.
- [17] 杭丽君, 闫东, 胡家兵, 等. 电力电子系统建模关键技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 2966-2979.
HANG Lijun, YAN Dong, HU Jiabing, et al. Review and prospect of key modeling technologies for power electronics system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 2966-2979.
- [18] 程改红, 陆韶琦, 邵冲, 等. 大规模交直流电力系统电磁暂态仿真高效建模方法[J]. 电网技术, 2017, 41(6): 1919-1926.
CHENG Gaihong, LU Shaoqi, SHAO Chong, et al. A high efficiency modeling method for electromagnetic transient simulation of large scale AC/DC power system[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1919-1926.
- [19] 董毅峰, 王彦良, 韩估, 等. 电力系统高效电磁暂态仿真技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(8): 2213-2231.
DONG Yifeng, WANG Yanliang, HAN Ji, et al. Review of high efficiency digital electromagnetic transient simulation technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(8): 2213-2231.
- [20] 崔晓丹, 吴家龙, 许剑冰, 等. 新能源高占比电力系统电磁暂态并行仿真的优化分网方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(11): 174-180, 224.
CUI Xiaodan, WU Jialong, XU Jianbing, et al. Optimal grid-division method of electromagnetic transient parallel simulation for high proportion of renewable energy power systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(11): 174-180, 224.
- [21] 姚蜀军, 庞博涵, 吴国阳, 等. 半隐式延迟解耦电磁暂态并行仿真方法(一): 原理及交流分网与并行[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2486-2496.
YAO Shujun, PANG Bohan, WU Guoyang, et al. A method of parallel computing for electromagnetic transient simulation based on semi-implicit latency decoupling technology (part I): theory and AC network partitioning and parallel[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2486-2496.
- [22] 熊卿, 张路寅, 张庆华, 等. 适应新型电力系统的高性能电磁暂态仿真技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 43-52.
XIONG Qing, ZHANG Luyin, ZHANG Qinghua, et al. High-performance electromagnetic transient simulation technology and application for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 43-52.
- [23] 冯漠可, 王傲群, 袁帅, 等. 国产化电磁暂态仿真平台发展方向分析及展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 64-74.
FENG Moke, WANG Aoqun, YUAN Shuai, et al. Analysis and prospect of development of China's independent electromagnetic transient simulation platform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 64-74.
- [24] SONG Y K, CHEN Y, YU Z T, et al. CloudPSS: a high-performance power system simulator based on cloud computing[J]. Energy Reports, 2020, 6: 1611-1618.
- [25] 沈沉, 陈颖, 黄少伟, 等. 新型电力系统仿真应用软件设计理念与发展路径[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 75-86.
SHEN Chen, CHEN Ying, HUANG Shaowei, et al. Design idea and development path of simulation application software for new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 75-86.
- [26] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806-2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2818.
- [27] 周斌, 汪光森, 李卫超, 等. 基于 FPGA 的电力电子系统电磁暂态实时仿真通用解算器[J]. 电工技术学报, 2023, 38(14): 3862-3874.
ZHOU Bin, WANG Guangsen, LI Weichao, et al. An FPGA-Based general solver for electromagnetic transient real-time simulation of power electronic systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(14): 3862-3874.
- [28] 孙荣富, 张涛, 和青, 等. 风电功率预测关键技术及应用综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1129-1143.
SUN Rongfu, ZHANG Tao, HE Qing, et al. Review on key technologies and applications in wind power forecasting[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1129-1143.
- [29] ZHANG X, XIE X R, SHAIR J, et al. A grid-side subsynchronous damping controller to mitigate unstable SSCI and its hardware-in-the-loop tests[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1548-1558.
- [30] NEWAZ A, OSPINA J, FARUQUE M O. Controller hardware-in-the-loop validation of a graph search based energy management strategy for grid-connected distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(1): 520-528.
- [31] 王昌华. 基于模拟器件的硬件在环实时仿真系统[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2022.
WANG Changhua. Hardware-in-the-loop real-time simulation system based on analog devices[D]. Hangzhou, China: Hangzhou Dianzi University, 2022.
- [32] PRABAKAR K, PALMINTIER B, PRATT A, et al. Improving the performance of integrated power-hardware-in-the-loop and quasi-static time-series simulations[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(11): 10938-10948.
- [33] 刘云鹏, 刘一瑾, 律方成, 等. 数字孪生技术在输变电设备中的应用前景与关键技术[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1621-1633.
LIU Yunpeng, LIU Yijin, LÜ Fangcheng, et al. Application prospect and key technology of digital twin in power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1621-1633.
- [34] 郭琦, 卢远宏. 新型电力系统的建模仿真关键技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 18-32.
GUO Qi, LU Yuanhong. Key technologies and prospects of modeling and simulation of new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 18-32.
- [35] SERI B, VISHNEPOLSKY G, ZUSMAN D. Critical vulnerabilities to

- remotely compromise VxWorks, the most popular RTOS[J]. White Paper, ARMIS, URGENT/11, 2019.
- [36] DUFOUR C, ABOURIDA S, BELANGER J. Hardware-in-the-loop simulation of power drives with RT-LAB[C]//2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2005: 1646-1651.
- [37] 孙宗辉, 郭希铮, 王诗楠, 等. 基于开关状态预测矫正的高频电力电子变换器实时仿真建模方法研究[J/OL]. 中国电机工程学报, 2023: 1-12[2023-12-28]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230781>.
- SUN Zonghui, GUO Xizheng, WANG Shinan, et al. Research on the real-time simulation modeling method for high switching frequency power electronic converter based on predicting and correcting the switch status[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023: 1-12 [2023-09-18]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230781>.
- [38] RUBAAI A, OFOLI A R, COBBINAH D. DSP-Based real-time implementation of a hybrid H_∞ adaptive fuzzy tracking controller for servo-motor drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(2): 476-484.
- [39] LV J X, LI B B, HAN L J, et al. DSP-based real-time simulation technology of modular multilevel converter[C]//2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). Nanjing, China: IEEE, 2021: 3350-3354.
- [40] 陈鹏伟, 卢亮, 刘念, 等. 直流配电系统动态相量-电磁暂态混合仿真与误差机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2283-2295.
- CHEN Pengwei, LU Liang, LIU Nian, et al. Dynamic phasor-electromagnetic transient hybrid simulation and error mechanism analysis of DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2283-2295.
- [41] 徐晋. 通用电力电子实时仿真方法研究及应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- XU Jin. Research and application of general power electronic real-time simulation methods[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [42] MONTANO F, OULD-BACHIR T, DAVID J P. An evaluation of a high-level synthesis approach to the FPGA-based submicrosecond real-time simulation of power converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(1): 636-644.
- [43] MILTON M, BENIGNI A, MONTI A. Real-time multi-FPGA simulation of energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(4): 2198-2208.
- [44] LI P, WANG Z Y, WANG C S, et al. Synchronisation mechanism and interfaces design of multi-FPGA-based real-time simulator for microgrids[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(12): 3088-3096.
- [45] 付浩, 李鹏, 富晓鹏, 等. 面向多FPGA实时仿真器的资源优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(11): 88-100.
- FU Hao, LI Peng, FU Xiaopeng, et al. Optimal resource allocation method for real-time simulator based on multiple field programmable gate arrays[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(11): 88-100.
- [46] 吴盼, 汪可友, 徐晋, 等. 基于CPU-FPGA异构平台的虚拟同步并网逆变器实时仿真算法设计[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14): 85-94.
- WU Pan, WANG Keyou, XU Jin, et al. Real-time simulation algorithm design of a virtual synchronous grid-connected inverter system based on a CPU-FPGA heterogeneous platform[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14): 85-94.
- [47] OULD-BACHIR T, SAAD H, DENNETIERE S, et al. CPU/FPGA-based real-time simulation of a two-terminal MMC-HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 647-655.
- [48] BARTIK O. The implementation of the real-time model of the asynchronous motor and the two mass mechanical load at ZYNQ-7000[C]//2017 7th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE). Penang, Malaysia: IEEE, 2017: 150-155.
- [49] 陈颖, 宋炎侃, 黄少伟, 等. 基于GPU的大规模配电网电磁暂态并行仿真技术[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 82-88.
- CHEN Ying, SONG Yankan, HUANG Shaowei, et al. GPU-based techniques of parallel electromagnetic transient simulation for large-scale distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 82-88.
- [50] 高海翔, 陈颖, 于智同, 等. 基于平均化理论的PWM变流器电磁暂态快速仿真方法(三)适用于图像处理器的改进EMTP并行仿真算法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 43-48, 79.
- GAO Haixiang, CHEN Ying, YU Zhitong, et al. Fast electromagnetic transient simulation method for PWM converters based on averaging theory part three improved EMTP parallel algorithm for graphic processing unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 43-48, 79.
- [51] 宋炎侃, 黄少伟, 陈颖, 等. 应用有向图分层的控制系统暂态仿真并行算法及其GPU实现[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 137-143.
- SONG Yankan, HUANG Shaowei, CHEN Ying, et al. Layered directed acyclic graph based parallel algorithm for control system transient simulation and its GPU realization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 137-143.
- [52] 朱景璐. 基于恒导纳法的DC/DC变换器建模仿真研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
- ZHU Jinglu. A research on modeling and simulation of DC/DC converter based on constant admittance method[D]. Beijing, China: China University of Petroleum (Beijing), 2021.
- [53] 许明旺, 姚逸凡, 宋文达, 等. 一种基于指数积分的电力电子开关恒导纳模型[J]. 电网技术, 2022, 46(4): 1519-1528.
- XU Mingwang, YAO Yifan, SONG Wenda, et al. A constant admittance model of power electronic switch based on exponential integral[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1519-1528.
- [54] IYER T S K V. Circuit theory[M]. New Delhi, India: McGraw-Hill, 1985.
- [55] DOMMEL H W. EMTP theory book[M]. Vancouver, Canada: Microtran Power System Analysis Corporation, 1996.
- [56] 张明新. 面向电力电子系统的实时多速率联合仿真技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- ZHANG Mingxin. Research on real-time multi-rate co-simulation technology for power electronic system[D]. Beijing, China: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [57] 张能. 宽频带机电-电磁暂态混合仿真接口模型研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- ZHANG Neng. Research of hybrid simulation interface model for wide-band equivalents electromechanical-electromagnetic transient[D]. Wuhan, China: Wuhan University, 2019.
- [58] 杨洋, 肖湘宁, 陶顺, 等. 基于RTDS/CBuilder的机电-电磁暂态混合仿真接口建模研究[J]. 现代电力, 2016, 33(6): 51-55.
- YANG Yang, XIAO Xiangning, TAO Shun, et al. Research on interface modeling for hybrid electromechanical and electromagnetic transient simulation based on RTDS/CBuilder[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(6): 51-55.

- [59] 李永佳, 李 健, 郝正航, 等. 基于传输线解耦法的 MMC 交直流系统多速率仿真[J]. 现代电子技术, 2021, 44(4): 54-58.
LI Yongjia, LI Jian, HAO Zhenghang, et al. MMC AC/DC system's multi-rate simulation based on transmission line decoupling method[J]. Modern Electronics Technique, 2021, 44(4): 54-58.
- [60] WU F. Solution of large-scale networks by tearing[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1976, 23(12): 706-713.
- [61] LAU K, TYLAVSKY D J, BOSE A. Coarse grain scheduling in parallel triangular factorization and solution of power system matrices[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 708-714.
- [62] MARTI J R, LINARES L R, CALVINO J, et al. OVNI: an object approach to real-time power system simulators[C] // POWERCON'98. 1998 International Conference on Power System Technology. Beijing, China: IEEE, 1998: 977-981.
- [63] 王伟华, 朱 晋, 李 炜, 等. 基于 SSN 解算器的 MMC-HVDC 系统 RT-LAB 实时仿真[J]. 南方电网技术, 2015, 9(6): 22-27.
WANG Weihua, ZHU Jin, LI Wei, et al. SSN-based RT-LAB simulation of MMC-HVDC system[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(6): 22-27.
- [64] 陈蔚然, 徐 晋, 汪可友, 等. 基于分块延迟插入法的三相输电网络细粒度并行化电磁暂态仿真[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2577-2587.
CHEN Weiran, XU Jin, WANG Keyou, et al. Fine-grained parallel electromagnetic transient simulation of three-phase transmission network based on block latency insertion method[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2577-2587.
- [65] 汤 奕, 王 琦, 邵 伟, 等. 基于 OPAL-RT 和 OPNET 的电力信息物理系统实时仿真[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 15-21, 92.
TANG Yi, WANG Qi, TAI Wei, et al. Real-time simulation of cyber-physical power system based on OPAL-RT and OPNET[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 15-21, 92.
- [66] GONG P, YANG H W, WU H Q, et al. Co-simulation platform with hardware-in-the-loop using RTDS and EXata for smart grid[J]. Electronics, 2023, 12(17): 3710.
- [67] WANG Y, XU S, XU Y, et al. The research and implementation of power CPS simulation platform based on ADPSS[C]//The 16th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2020). IET, 2020: 706-711.
- [68] 任智君, 郭红霞. 基于 RTDS 的风电场等值建模与验证分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(7): 196-199, 125.
REN Zhijun, GUO Hongxia. Research and verification analysis of wind farm equivalent modeling based on RTDS[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(7): 196-199, 125.
- [69] 贾 锋, 蔡 旭, 李 征, 等. 风电机组精细化建模及硬件在环实时联合仿真[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1239-1251.
JIA Feng, CAI Xu, LI Zheng, et al. Refined modeling of wind energy conversion systems and real-time co-simulation with hardware-in-loop[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1239-1251.
- [70] LI B, ZHAO H R, GAO S N, et al. Digital real-time co-simulation platform of refined wind energy conversion system[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 117: 105676.
- [71] 卫 鹏, 刘建坤, 周 前, 等. 基于 RTDS 特高压直流控仿真实平台的锦苏特高压直流建模及仿真[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 134-139.
WEI Peng, LIU Jiankun, ZHOU Qian, et al. Modeling and simulation of UHVDC transmission system from Jinping to Sunan based on the RTDS simulation platform of UHVDC control and protection[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 134-139.
- [72] 刘崇茹, 林雪华, 李海峰, 等. 基于 RTDS 的模块化多电平换流器子模块等效模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(12): 92-99.
LIU Chongru, LIN Xuehua, LI Haifeng, et al. An equivalent sub-module model for modular multilevel converter in RTDS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(12): 92-99.
- [73] BANSAL Y, SODHI R. PMUs enabled tellegen's theorem-based fault identification method for unbalanced active distribution network using RTDS[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(3): 4567-4578.
- [74] ZARGAR B, WANG T, PITZ M, et al. Power quality improvement in distribution grids via real-time smart exploitation of electric vehicles[J]. Energies, 2021, 14(12): 3533.
- [75] 董建政, 李 征, 蔡 旭. 基于 RT-LAB 的双馈风电场动态建模[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 83-89.
DONG Jianzheng, LI Zheng, CAI Xu. Dynamic modeling of wind farm with doubly-fed induction generators based on RT-LAB[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 83-89.
- [76] ZHANG X, HE G Q, LI Y, et al. Electromagnetic transient modeling and verification of DFIG unit and wind farm based on RTLAB[C]//2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Nanjing, China: IEEE, 2022: 302-307.
- [77] 雷 霄, 杨立敏, 朱艺颖, 等. 白鹤滩—江苏特高压混合级联直流工程数模仿真平台构建及特性研究[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 434-442.
LEI Xiao, YANG Limin, ZHU Yiyang, et al. Digital-analog hybrid simulation platform construction and characteristic research of Baihetan-Jiangsu hybrid cascaded UHVDC project[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 434-442.
- [78] 熊 岩, 赵成勇, 刘启建, 等. 模块化多电平换流器实时仿真建模与硬件在环实验[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 84-89.
XIONG Yan, ZHAO Chengyong, LIU Qijian, et al. Modeling of real-time simulation and hardware-in-the-loop experiments for modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 84-89.
- [79] BADJI A, ABDESLAM D O, CHABANE D, et al. Real-time implementation of improved power frequency approach based energy management of fuel cell electric vehicle considering storage limitations[J]. Energy, 2022, 249: 123743.
- [80] 闫培雷, 葛兴来, 王惠民, 等. 弱电网下新能源并网逆变器锁相环参数优化设计方法[J]. 电网技术, 2022, 46(6): 2210-2221.
YAN Peilei, GE Xinglai, WANG Huimin, et al. PLL parameter optimization design for renewable energy grid-connected inverters in weak grid[J]. Power System Technology, 2022, 46(6): 2210-2221.
- [81] TANG A H, LU Z J, YANG H Y, et al. Digital/analog simulation platform for distributed power flow controller based on ADPSS and dSPACE[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(1): 181-189.
- [82] YU L J, WANG G Y, WU T, et al. Variable DC voltage based reactive power enhancement scheme for MMC-STATCOM[J]. IET Smart Grid, 2023, doi: 10.1049/stg2.12147.
- [83] 刘慧雯. 含电动汽车充电站的直流微网稳定性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
LIU Huiwen. Research on the stability of DC microgrid with EV charging station[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2022.
- [84] 周 波, 石 鹏, 魏 巍, 等. 基于改进固有时间尺度分解算法的实时次同步振荡监测方法[J]. 现代电力, 2023, 40(1): 27-34.
ZHOU Bo, SHI Peng, WEI Wei, et al. A real-time subsynchronous oscillation monitoring method using improved intrinsic time-scale decomposition algorithm[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(1):

- 27-34.
- [85] 徐韵扬. 振荡频率耦合下风电机组的阻抗建模与并网稳定性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- XU Yunyang. Impedance modeling and stability analysis of the grid-connected wind turbine system under frequency-coupled oscillations[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2021.
- [86] 王贵峰, 武泽文, 祝莘莘, 等. 基于有限集模型预测控制的UPQC预测直接控制策略[J]. 电网技术, 2023, 47(12): 5206-5215.
- WANG Guifeng, WU Zewen, ZHU Xinxin, et al. Predictive direct control strategy of UPQC based on FCS-MPC[J]. Power System Technology, 2023, 47(12): 5206-5215.
- [87] YELEM S, GOLI P, ALHASHEM M, et al. OpenDSS and typhoon HIL co-simulation for real-time evaluation of a distribution network[C]/2023 North American Power Symposium (NAPS). Asheville, USA: IEEE, 2023: 1-6.
- [88] 吕志鹏, 周 珊, 刘海涛, 等. 基于固态变压器的电动汽车集群柔性并网控制方法[J]. 应用科技, 2023, 50(2): 122-127.
- LYU Zhipeng, ZHOU Shan, LIU Haitao, et al. Flexible grid-connected control of electric vehicle cluster based on cascaded power electronic transformer[J]. Applied Science and Technology, 2023, 50(2): 122-127.
- [89] TOBÓN A, PELÁEZ-RESTREPO J, MONTANO J, et al. MPPT of a photovoltaic panels array with partial shading using the IPSM with implementation both in simulation as in hardware[J]. Energies, 2020, 13(4): 815.
- [90] CHEN Z Y, SHI T N, SONG P, et al. Improved pitch control strategy for the robust operation of wind energy conversion system in the high wind speed condition[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 153: 109381.
- [91] CARPIUC S, SCHIESSER M, VILLEGAS C. Current control and FPGA-based real-time simulation of grid-tied inverters[C]/2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe). Lyon, France: IEEE, 2020: 1-7.
- [92] 张 军, 张新慧, 彭 克, 等. 基于零序电压正反馈控制的多分布式电源孤岛检测方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 3040-3050.
- ZHANG Jun, ZHANG Xinhui, PENG Ke, et al. Multi-distributed generation island detection method based on zero-sequence voltage positive feedback control[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 3040-3050.
- [93] MILASI R M. A nonlinear adaptive control for a bidirectional DC-AC converter with parameter uncertainties[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(8): 9551-9558.
- [94] HUANG Y H, CHEN F E, WANG D, et al. Small signal modeling and interaction analysis of Multi-VSCs system connected to weak grid[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2023, 8(1): 74-86.
- [95] ZHANG S F, LIU C G, SHI Y T, et al. Grid-forming inverter primary control using robust-residual-observer-based digital-twin model[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2024, 20(1): 638-648.
- [96] ZENG Y J, ZHANG Q J, LIU Y C, et al. Hierarchical cooperative control strategy for battery storage system in islanded DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 37(5): 4028-4039.
- [97] 耿龙海. 基于 ADPSS 的大规模光伏并网暂态稳定性研究[D]. 林芝: 西藏大学, 2021.
- GENG Longhai. Study on transient stability of large scale photovoltaic grid connected system based on ADPSS[D]. Nyingchi, China: Tibet University, 2021.
- [98] XU Q S, RUAN B, ZHAO H S, et al. Research on modeling and simulation of direct drive wind turbine based on ADPSS/ETSDAC[C]/2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Taiyuan, China: IEEE, 2021: 2724-2729.
- [99] ZHANG X, HE G Q, WANG J, et al. New energy cluster and large-scale power grid co-simulation application based on RTLAB and CloudPSS[C]/2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Hefei, China: IEEE, 2023: 699-703.
- [100] 张 芮, 宋炎侃, 于智同, 等. 基于同步开关预判的半桥型 VSC 快速电磁暂态建模方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(20): 148-156.
- ZHANG Rui, SONG Yankan, YU Zhitong, et al. Fast electromagnetic transient modeling method for half-bridge-type voltage source converter based on synchronous switch prediction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20): 148-156.
- [101] WU C, LYU Y S, WANG Y, et al. Transient synchronization stability analysis of grid-following converter considering the coupling effect of current loop and phase locked loop[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2024, 39(1): 544-554.
- [102] 徐万万, 王 斌, 张良力, 等. 孤岛微电网中制氢负荷谐波功率分配策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(12): 45-52.
- XU Wanwan, WANG Bin, ZHANG Liangli, et al. Harmonic power distribution strategy of hydrogen production load in islanded microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(12): 45-52.
- [103] MONESS M, MAHMOUD M O, MOUSTAFA A M. A real-time heterogeneous emulator of a high-fidelity utility-scale variable-speed variable-pitch wind turbine[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(2): 437-447.
- [104] LI B, ZHAO H R, JIANG Y B, et al. Real-time simulation for detailed wind turbine model based on heterogeneous computing[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 155: 109486.
- [105] 王 焱, 邹 明, 许建中, 等. 基于受控源映射和传输线分割的风电场快速仿真模型[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2023: 1-8[2024-02-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.tm.20231010.0952.002.html>.
- WANG Yan, ZOU Ming, XU Jianzhong, et al. A fast simulation model for wind farms based on controlled source mapping and transmission line segmentation[J/OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2023: 1-8[2024-02-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.tm.20231010.0952.002.html>.
- [106] 曾子文. 风电场站电磁暂态解耦与并行仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2022.
- ZENG Ziwen. Research on electromagnetic transient decoupling and parallel simulation of wind farm station[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2022.
- [107] 刘逸凡, 许建中, 赵成勇, 等. 面向规模化海上风电场站实时仿真的精细化建模方法[J/OL]. 中国电机工程学报, 2023: 1-14[2024-02-04]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230611>.
- LIU Yifan, XU Jianzhong, ZHAO Chengyong, et al. Refined modeling method for real-time simulation of large-scale offshore wind farm stations[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2023: 1-14[2024-02-04]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230611>.
- [108] LIN N, DINAVAH V. Exact nonlinear micromodeling for fine-grained parallel EMT simulation of MTDC grid interaction with wind farm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(8): 6427-6436.
- [109] 雷 肖, 龚文明, 张斯翔, 等. 基于 FPGA 的直驱型风电场详细电磁暂态建模方法[J]. 广东电力, 2021, 34(11): 42-50.
- LEI Xiao, GONG Wenming, ZHANG Sixiang, et al. Research on de-

- tailed electromagnetic transient modeling method of direct drive wind farm based on FPGA[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(11): 42-50.
- [110] 熊华强, 杨程祥, 马 亮, 等. 含分层接入特高压直流的交直流混联电网机电——电磁暂态混合仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 145-153.
- XIONG Huaqiang, YANG Chengxiang, MA Liang, et al. Electromechanical-electromagnetic transient hybrid simulation of an AC/DC hybrid power grid with UHVDC hierarchical connection mode[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 145-153.
- [111] LI R L, LI D Y, GAO Y, et al. FPGA-based real-time simulation of LCC-HVDC systems with C-NAM method[J]. Journal of Power Electronics, 2023, 23(6): 913-922.
- [112] 王 宇, 刘崇茹, 李庚银. 基于 FPGA 的模块化多电平换流器实时仿真建模与硬件在环实验[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(13): 3912-3920.
- WANG Yu, LIU Chongru, LI Gengyin. FPGA-based real-time modeling of modular multilevel converters and hardware-in-the-loop simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3912-3920.
- [113] 邓 潘, 盛万兴, 刘科研, 等. 有源配电网典型暂态模型及区域分割并行仿真方法研究[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1211-1219.
- DENG Pan, SHENG Wanxing, LIU Keyan, et al. Methods of transient model and parallel simulation of region segmentation in active distribution network[J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1211-1219.
- [114] 王照琪, 唐 巍, 张 博, 等. 基于优化分网策略的有源配电网多速率并行暂态仿真分析[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 673-682.
- WANG Zhaoqi, TANG Wei, ZHANG Bo, et al. Multi-rate parallel transient simulation of active distribution network based on optimization decomposition strategy[J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 673-682.
- [115] 刘科研, 叶 华, 裴 玮, 等. 基于特征值分析的配电网多速率暂态仿真性能评估方法研究[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4088-4095.
- LIU Keyan, YE Hua, PEI Wei, et al. Research on computational performance of multi-rate transient simulation in distribution network based on Eigen-value analysis[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4088-4095.
- [116] 朱 丽, 叶学顺, 孙 勇. 基于触发同步的配电网信息物理系统实时仿真方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(4): 127-134.
- ZHU Li, YE Xueshun, SUN Yong. Real-time simulation method of distribution network cyber physical system based on trigger synchronization[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(4): 127-134.
- [117] 丁承第. 基于 FPGA 的有源配电网实时仿真方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- DING Chengdi. FPGA-based real-time simulation for active distribution system[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2014.



ZHAO Haoran
Ph.D., Professor



MENG Linghan



JIANG Yibao
Ph.D.
Corresponding author

赵浩然

1983—, 男, 博士, 教授, 博导
研究方向为新能源发电与并网、新型电力系统建模与仿真、综合能源优化运行与控制
E-mail: hzhao@sdu.edu.cn

孟铃涵

2001—, 男, 硕士
研究方向为电力系统实时仿真平台开发, 风电场实时仿真与优化控制
E-mail: linghanmeng@mail.sdu.edu.cn

江艺宝(通信作者)

1993—, 男, 博士, 助理研究员
研究方向为风力发电、数字孪生和综合能源系统
E-mail: yjiang@sdu.edu.cn

收稿日期 2023-10-03 修回日期 2024-02-26 编辑 何秋萍