

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.02.010

电力系统硬件在环仿真应用的现状及展望

崔晓丹^{1,2}, 吴家龙¹, 许剑冰^{1,2}, 雷鸣¹, 侯玉强^{1,2}, 薛峰^{1,2}

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106;

2. 南瑞集团有限公司智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106)

摘要:硬件在环仿真(HILS)是提升现代大电网系统仿真准确性、支撑开展高压直流/新能源等装置可靠性验证的有效手段。首先,在介绍HILS基本架构和优势的基础上阐述了HILS在提升电网一次系统仿真准确性、支撑电网二次控制系统测试验证方面的技术及应用现状;然后分析了电力系统HILS平台构建面临的挑战,提出可接入多异构数据模型的灵活架构技术、有限仿真资源下新能源场站等值和大型二次系统等效技术、控制对象接入的通用接口技术等方向;最后,从传统技术深化和与新技术融合发展2个角度探讨了电力系统HILS的未来发展趋势,以期对相关平台研发和仿真实验工作提供一定参考。

关键词:电力系统;硬件在环;实时仿真;应用现状;仿真平台

中图分类号:TM743

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)02-0068-07

0 引言

随着电力系统规模的不断发展扩大,人们主要通过仿真实验来获得对系统特性机理真实、完整而深刻的认知^[1]。尤其近十几年以来,随着交直流输电多区域互联、各类电力电子设备的广泛接入^[2],电力系统呈现出多装备动态交互耦合、机-电效应解耦、非惯性响应、随机概率等诸多复杂特性^[3-5],给电力系统仿真技术提出了更高的要求。

电力系统仿真可以从仿真模型的性质、仿真步长、动态过程响应实时性等不同视角进行划分,例如,数字仿真和物理仿真、机电暂态仿真和电磁暂态仿真、实时仿真和非实时仿真等^[6]。每种仿真方法都有其发展背景和适用的具体问题。从仿真建模的方式来看,由于电力系统日新月异的发展,海量多类控制异构、参数非标准主辅装备的大规模快速接入给电力系统数字建模带来极大困难,电网仿真建模技术阶段性、周期性地滞后于电网生产运行及研究需求已成客观事实。

硬件在环仿真(hardware-in-the-loop simulation, HILS)是一种采用“实际物理模型+虚拟数字模型”构建硬件在回路仿真系统的半实物仿真,又称为数字物理混合仿真或数模混合仿真^[7-8]。利用实时数字仿真软件接入装置实物的HILS,结合了实时数字仿真和动态物理模拟仿真的优点,既能对大规模复杂电网进行实时数字仿真,也能对复杂物理设备进行

精确模拟,可大大提高仿真的效率与性能,为探索研究当下电网特征的新问题、新机理提供有效手段。目前,电力系统HILS在不同层面展开了不同粒度的研究,但其关键技术瓶颈和未来发展尚不够清晰,值得深入探讨。

文中在简要介绍HILS基础上,阐述了HILS在大型电力系统中的应用现状,归纳当前应用面临的挑战,分析提出了电力系统HILS在灵活性的平台架构设计、有限资源下的新能源场站级等值建模、二次系统等效和通用接口等关键技术问题,最后探讨了HILS在电力系统领域深化研究和跨学科融合发展的趋势,可为进一步明晰发展方向、拓展应用提供参考。

1 电力系统HILS架构及优势

HILS系统的组成基本架构见图1,主要用来测试所接入的硬件^[9](实际控制器、装置或系统)。

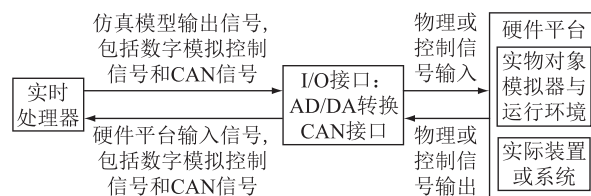


图1 HILS系统组成架构

Fig.1 Composition architecture of HILS system

图1中的硬件平台,从平台构成看,可以是实物装置或系统,也可以是实物对象的模拟器或其模拟运行环境的总成;具体到电力系统方向,可以是某设备的一次或/和二次部分。若仅为某设备的一次或二次部分,则其二次或一次部分通过实时处理器

收稿日期:2020-09-25;修回日期:2020-10-26

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5100-201940008A-0-0-00)

仿真模拟或被简化处理甚至忽略。由于 HILS 系统可以详细、灵活地模拟所接入硬件(装置或系统)的运行环境(包括运行方式、故障扰动等),因而可以支持对所接入硬件的功能和性能进行全面测试验证,甚至可以通过进行大量的压力测试或构建随机测试场景,发现所接入硬件的隐性缺陷和多设备协调上的隐性不足,提高整个对象系统实时仿真结果的置信度。

在电力系统领域,通常采用实时数字仿真系统(real time digital simulation system, RTDS)^[10]、实时仿真实验室、全数字实时仿真系统、数字动态实时仿真系统等实时处理器模拟电力一次系统及控制结构相对固化或简单的电力二次系统,利用物理实物来模拟被测对象或逻辑结构复杂、参数难以准确表征的局部系统(电力一次/二次部分)。电力系统 HILS 平台各组成部分间存在实时交互的信息关系:实时处理器将一次电网运行状态(模拟量信号或/和控制信号)实时输出至实际物理模型系统(电网一次设备及其控制系统,或电网二次保护控制系统);实际物理模型系统根据电网模拟参量或控制信号经过其控制逻辑响应,将电气量响应参量或控制信号经公共节点反馈至电网一次系统。

一种典型的电力系统 HILS 平台的框架如图 2 所示。电网三道防线的安全自动装置或系统是需要被严格测试的对象,风光储直变流器控制器等实物的接入用来模拟实际集中或分布式风光储场站的动态行为,从而使整个电力系统的运行状态更加接近实际。这里的集中监视与分析系统属于整个 HILS 平台的辅助部分,用于汇集实时处理器和硬件平台的电气量信息以及硬件平台中相关状态和控制信息,从而可基于大量关联信息对被测对象进行综合分析以及对电力系统复杂问题进行研究。另外,基于几种典型实时处理器技术路线的电力系统 HILS 架构可见文献[12]。

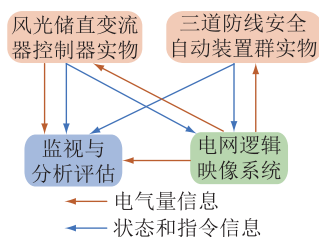


图2 电力系统 HILS 平台典型框架

Fig.2 Typical framework of HILS platform in power system

与电力系统动态模拟仿真和全数字实时仿真相比,电力系统 HILS 的组成与原理决定了其兼具

实时数字仿真快速、灵活方便与装置实物动态过程明确等优势,如表 1 所示。

表 1 不同仿真类型的优缺点比较
Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of different simulation types

仿真类型	优缺点
动态模拟仿真	可较真实反映系统全动态过程,物理意义明确;但所用设备昂贵、占地面积大、可模拟的规模受制于装置自身的规模和元件的物理特性,可扩展性差
全数字实时仿真	计算速度快、使用灵活、扩展方便、成本相对低廉;但对于快速建立控制逻辑复杂、参数非标准化的装备精细化模型难度较大,难以保证部分模型的置信度
HILS	综合了数字仿真和物理仿真优势,能够对大规模复杂电网进行实时数字仿真,也可对复杂物理设备进行快速、精确模拟,能够用于测试被测硬件

2 电力系统 HILS 应用现状

目前,国内外在硬件在环形成数字、物理混合仿真方面已有一定的工作累积经验,并逐步建立了成熟的平台及架构,主要聚焦于提升电网一次系统仿真准确性以及对电网二次控制装置或系统精细化验证 2 个方面。

2.1 电网一次系统的精准仿真

源网荷侧大量的电力电子设备因内含非常复杂的控制逻辑和大量的动态参数,在电网扰动下呈现出复杂的动态特性^[4]。首先需要通过数字建模仿真对其进行逻辑解析,然后根据所分析问题的差异性构建不同的解析模型,不仅难度高、工作量大,且建模的准确性难以适应不同的应用场合(例如,基于基频分析的暂态稳定建模难以适用于宽频带振荡^[13]分析)。

因此,一种简便有效的方式便是将实物模型直接与数字仿真相结合,构建 HILS 平台。然而,所有的复杂设备均接入实物,不仅经济代价高昂,且需要投入大量的调试时间,实物接入下仿真系统的运行稳定性也面临极大挑战,因此一般将研究对象实物或对所研究问题影响较大的设备进行实物接入。例如,中国电科院将全数字实时仿真系统与高压物理直流仿真装置通过功率放大器相连,建立大电网数模混合仿真系统平台^[14-15],为获得全系统的准确性提供了更准确的直流模型基础。

2.2 电网二次控制系统的测试验证

柔性交流输电系统设备、各类新能源控制器^[16-17]等单一装置的传统现场性能试验存在效率低、工况难模拟等不足,其 HILS 实验是可靠性测试的有效替代途径,且兼备仿真结果可重复、参数易调整、工况易模拟、测试效率高等优点,能够针对标

准及规范中要求的工况开展系列试验,可精确到微秒级小步长。南方电网利用 RTDS、静止无功补偿器(static var compensator,SVC)控制保护屏柜、云广直流实际控保装置等构成闭环实验系统,分别在云广直流联网、孤岛 2 种方式下开展试验,发现并解决了 2 套 SVC 控制不协调工作、交流系统瞬时性故障时 SVC 退出运行等多项功能缺陷问题^[18]。在新能源控制器测试方面,可以利用由光伏阵列或风机、储能电池和实时数字仿真器构建仿真实验平台,开展亚微秒步长级实时仿真,模拟实际工况下控制器的能力,为新能源控制策略验证及优化提供了方法^[19]。在新能源低电压穿越实验方面,通常基于 RTDS 构建包括电压跌落发生器、风机和光伏并网逆变器等设备的 HILS 平台,利用仿真平台对设计出的新能源并网逆变器低电压穿越控制策略进行验证。大量实验结果表明,数字物理混和仿真分析更接近于实际情况,既能在物理平台上对控制策略的性能进行检验和调试,又能实时修正相关控制参数及控制策略,可为实际工程设计提供重要实践依据^[20]。

多装置联合的大型控制系统组成结构和控制逻辑一般较复杂,确保其控制逻辑的正确性和动作响应的及时性极为重要^[21]。为了验证控制系统的各项控制功能与性能指标,文献[22]基于 RTDS 对特高压直流配套稳控系统进行策略验证和系统响应实验。随着高速通信及其组网技术的深入应用,控制系统的硬件在环测试可不再局限于实验室环境。利用电力系统通信网络可将 RTDS 系统和现场实际安装的安全稳定控制装置连接,构建形成一个远程的、广域的、闭环的数字仿真测试系统,如图 3 所示^[23],不仅可提高仿真测试的效率,还具备良好的重用性和扩展性。

为了支撑系统保护^[5]或大型稳控系统的实验验证,国家电网某下属实验室于 2017 年构建了基于 RTDS 的电力系统 HILS 实验平台,并基于此平台先后开展了多个系统保护工程^[24]的硬件在环实验,验证了控制系统识别电网发生不同扰动形式的可靠性以及在扰动冲击后各级控制装置动作的准确性。同时,将典型厂家风光储实物接入平台,以模拟新能源场站特性,拟为开展高比例新能源电力系统的特性机理分析及稳定控制新技术和新装备的实验验证提供基础研究平台。

3 电力系统 HILS 应用的技术发展方向

随着特高压直流、灵活交流输电、储能等技术

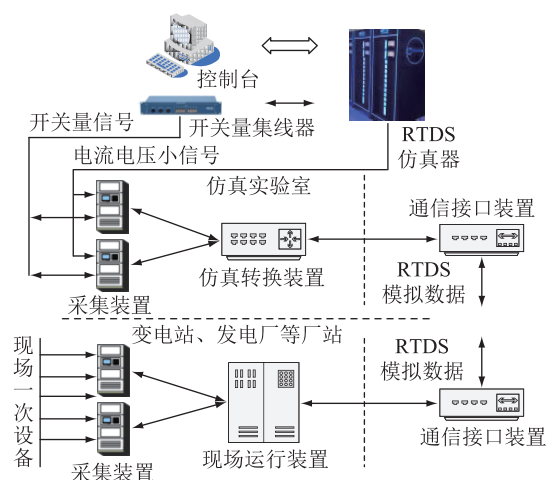


图 3 基于 RTDS 的广域测试实验系统配置

Fig.3 The configuration of wide area test experiment system based on RTDS

在电力系统中的应用愈发广泛,相应设备内部的复杂拓扑结构、海量电力电子开断器件和高速开断频率等对仿真规模、仿真精度、仿真时效性的要求越来越高,现有的电力系统 HILS 技术面临诸多挑战。为了应对这些挑战,需要在 HILS 系统架构设计、一次电网等值建模、二次控制系统等效及通信接口等方面寻求突破,为构建能够灵活远程接入、实时精准仿真的电力系统 HILS 系统提供技术支撑。

(1) 可接入多异构数据模型的灵活架构技术。系统结构决定系统功能。现有电力系统 HILS 系统主要是在计及通信网传输特性基础上,构建机电、电磁等多尺度仿真平台,能够支持各类风光储直等设备集中接入^[25-26],但尚未实现设备广泛接入、对仿真实验过程中的多类数据进行实时集中监控、关联分析和智能诊断等功能。美国可再生能源国家实验室研究设计了基于通用可控电网接口的 HILS 系统架构,将各类风光储设备及控制系统通过通用可控电网接口与实时数字仿真器集群相连,如图 4 所示。该架构还可以将远程分布在不同地理位置的新能源装置及设备灵活接入。同时,结合智能交互、大数据等技术,依托国家(美国)风能技术中心建立实时监测、智能评估与控制中心,对一次电网、接入硬件装置与设备以及可控网格接口进行监控^[27],为在电力系统 HILS 系统中实现广泛接入分布式现场装置与设备、实时输入电网实际运行数据、在线监控仿真状态等功能提供借鉴。

(2) 有限仿真资源下新能源场站等值和大型二次系统等效技术。随着电网风、光等新能源发电的大规模并网,系统动态变量成倍增长,构建涵盖全模型数据的大电网一二次 HILS 平台,数据处理和

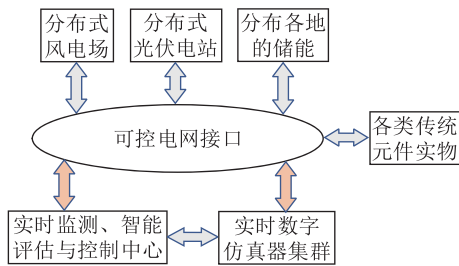


图4 支持远程接入与实时监控分析的HILS平台

Fig.4 HILS platform supporting remote access and real-time monitoring and analysis

计算量十分庞大甚至难以求解,仿真启动和运行稳定性存在极大难题,而且过度占用仿真资源,仿真效率低下。因此,需要协调解决好仿真资源、仿真效率与仿真精度之间的矛盾,对新能源场站模型进行尺度适中的等值处理,对大型二次系统进行功能保留的等效处理。

新能源场站涵盖能量产生单元、主控与变流回路、辅助保护、集电线路及无功补偿等多类主辅设备^[28-29],且设备原理及生产厂家不同,设备型号各异^[30],通过多级串并联汇集并网,使得场站的结构和特性异常复杂^[31]。因此,亟需准确计及场内串并联结构关系、多级传输耗散、多点无功补偿等带来的动态响应特性及其影响,满足多种运行方式和不同典型扰动下对电磁暂态仿真精度的要求。为此,需要突破含多类异构主辅控制器的新能源场站高精度等值技术,并通过融合适量变流器控制器实物和电磁暂态计算单元,构建精度较高的通用化数模混合模型。

在二次系统等效方面,当前控制系统的层次数明显增加,控制节点数可能达到数百上千个,控制可靠性受通信、网络安全的影响不容忽视^[32]。受实验资源及场地等多种因素的限制,无法百分百复原与现场一致的实际工程系统。如果要对控制系统进行基于HILS的全面验证,如何对大量多层次控制设备组成的控制系统进行功能及性能等效也是亟需解决的问题。

(3) 控制对象接入的通用接口技术。研究能够支持各类分布式装置或设备广泛接入的通用通信接口是扩大硬件在环接入规模的关键。但接口的引入往往会给仿真带来时间延迟、畸变等误差^[33-34],从而影响硬件在环稳定性和不同仿真尺度融合的精确性。因此,接口算法的设计就成了保证HILS系统闭环稳定性和仿真精确性的关键。

为了改变混合实时硬件仿真的稳定性与精度,目前已有研究提出理想变压器模型、输电线路模型、时变一阶近似和阻尼阻抗法等多种HILS接口

算法,这些接口算法在不同系统中都有其本质特征决定的适用性^[35-36]。当现有接口技术无法满足接入及通信要求时,自定义接口技术是有效的选择。例如,为了克服并联逆变器系统存在阻抗变化时的电压调节和功率共享性能限制,文献[37]提出基于李雅普诺夫函数的分散式控制方案,获得快速的动态响应和跟踪收敛,在不平衡滤波器参数和未知线路阻抗的情况下,负载电流精确自动共享,为分布式能源系统提供了即插即用的功能。

此外,接口不通用、无统一标准也是目前HILS面临的问题。不同技术路线的实时处理器有各自定义的接口形式、实现方式及通信板卡,不同类型的处理器之间难以扩展以支持更大的仿真规模;多类电力系统的一二次设备与实时处理器的接口往往需要自定义或定制,大量硬件接入使仿真运行可靠性和仿真实验效率均面临挑战。由于接口的标准化问题涉及到实时处理器的原理和性能并与接入硬件的构造紧密相关,因此,需要研发人员、设备厂商和相关标准制定机构协同解决。

4 电力系统HILS应用展望

基于对技术现状的分析以及对新技术未来发展的预判,电力系统HILS未来发展方向体现在传统技术深化发展及与新技术融合横向拓展两方面。

(1) 传统技术深化方面。电力系统的新原理、新设备快速迭代,一次设备及其控制系统的逻辑结构复杂,需要接入更多的实物设备以提升整个电力系统仿真的实时性和准确性。因此,大型电力系统HILS平台的构建需要接入更多的实物设备,或基于实物设备进行精准数模混合等效,形成超大规模电力系统高精度数模混合实时仿真平台,实现针对含数十条直流输电、数百个新能源场站、千万个电力电子设备等超大电力系统的HILS实验。

基于实验室集中式摆放一二次设备实物或其物理模型的方式,受限于实验场地及硬件扩展灵活性不足的问题,HILS平台须能够支持远程、分布式实物接入。通过异地多个实时仿真装置的配合和高速通信网络支持,实现多个物理装置的分布式仿真实验,解决电网多道防线的保护控制装置、多个高压直流或柔性交流输电系统控制器等异地实验设备的同步测试及多控制装备协调性测试等问题。

为满足对灵活多变的实际电网运行方式的分析研究需求以及对电网实际故障场景下控制系统的快速分析和运维支撑需求,要求HILS平台能够实时接收电网运行数据,保证系统仿真模型能够及

时跟踪大电网运行状态,甚至是灾害情况下的迅速变化。

(2) 与新技术融合方面。为了将大量异地远程设备接入到 HILS 平台,并满足仿真实时性要求,需要融合 5G 通信^[38]和云计算技术^[39],构建集中与分布式仿真资源相协调的仿真平台,实现仿真分析从以往单场地、单小组独立工作模式向多场地、多小组联合协同模式转变。

在基于大型电力系统硬件在环平台的仿真实验过程中,可以采集到大量电磁暂态数据信息,为了提升对具有成千上万个电网节点、数十个乃至数百个实物接入的大型电力系统 HILS 的实验研究水平及实验研究的效率,需要融合大数据、人工智能技术,对 HILS 实验的大量电气量数据、设备状态及控制信息进行统计分析和关联挖掘分析,提炼海量信息的关联关系和深度特征^[40],为基于 HILS 的系统分析开辟新的思路。进一步地,构建以 HILS 平台为核心的电网全景感知及实时监控、一二次系统故障的智能诊断及电网安全分析预警决策体系。

5 结语

HILS 在新原理、新结构设备的快速接入以及兼顾模型精度与仿真效率上具有很大优势。文中梳理了大型电力系统硬件在环平台构建现状,讨论了可协调满足实时性和准确性的平台构建时的关键技术问题。

随着电网互联的发展以及源网荷侧新设备或新技术(例如,不同能量形式发电通过电力电子设备接入、负荷侧柔性互动等)的广泛密集应用,HILS 将继续发挥其在单装置或控制系统的原理或技术验证方面的优势,并将在大型电力系统的特性认知及控制技术实验研究、新能源并网系统级实验验证方面越来越起到主导作用。

参考文献:

[1] 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.

[2] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等. 电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架[J]. 电力系统自动化,2011,35(16):1-8.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, XUE Yusheng, et al. Modeling analysis and control research framework of cyber physical power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16):1-8.

[3] 李伟林,张晓斌,董延军. 电力系统综合仿真方法研究(一):

VPNET[J]. 中国电机工程学报,2012,32(13):95-102,196.
LI Weilin, ZHANG Xiaobin, DONG Yanjun. Study of co-simulation methods applied in power systems (part I): VPNET[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(13):95-102,196.

[4] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术,2016,40(4):985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology,2016,40(4):985-991.

[5] 宁阳天,罗翠云,赵梓淇,等. 计及核电调峰的新能源电力系统两阶段随机优化调度[J]. 电力工程技术,2020,39(2):66-74,126.
NING Yangtian, LUO Cuiyun, ZHAO Ziqi, et al. A two-stage stochastic optimization for power system nuclear power plants participating in peak regulation with the consideration of renewable energy uncertainty[J]. Electric Power Engineering Technology,2020,39(2):66-74,126.

[6] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展[J]. 电力系统自动化,2002,26(17):66-70.
TANG Yong. Present situation and development of power system simulation technologies[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(17):66-70.

[7] AYASUN S, FISCHL R, VALLIEU S, et al. Modeling and stability analysis of a simulation-stimulation interface for hardware-in-the-loop applications[J]. Simulation Modelling Practice and Theory,2007,15(6):734-746.

[8] 朱艺颖. 电力系统数模混合仿真技术及发展应用[J]. 电力建设,2015,36(12):42-47.
ZHU Yiyang. Development and application of power system digital-analog hybrid simulation technology[J]. Electric Power Construction,2015,36(12):42-47.

[9] WU J, CHENG Y, SRIVASTAVA A K, et al. Hardware in the loop test for power system modeling and simulation[C]//2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition. Atlanta, GA, USA. IEEE,2006:1892-1897.

[10] NOH H, LEE B, SONG J, et al. Automatic preprocessing scheme for real-time digital simulation[C]//2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS). Portland, OR. IEEE,2018:1-7.

[11] PARMA G G, DINAVAH V. Real-time digital hardware simulation of power electronics and drives[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2007(22):1235-1246.

[12] MARTI JR, LINARES LR, HOLLMAN JA, et al. OVNI: Integrated software/hardware solution for real-time simulation of large power systems[C]// Proceedings of the 14th Power Systems Computation Conference,2002. Sevilla, Spain:1-7.

[13] 胡一中,吴文传,张伯明. 采用频率相关网络等值的 RTDS-TSA 异构混合仿真平台开发[J]. 电力系统自动化,2014,38(16):88-93.
HU Yizhong, WU Wenchuan, ZHANG Boming. Development of a frequency dependent network equivalent based RTDS-TSA hybrid transient simulation platform with heterogeneous archi-

- ture[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16):88-93.
- [14] 胡涛,朱艺颖,印永华,等. 含多回物理直流仿真装置的大电网数模混合仿真建模及研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7):68-75, 193.
HU Tao, ZHU Yiyong, YIN Yonghua, et al. Modeling and study of digital/analog hybrid simulation for bulk grid with multi-analog HVDC simulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7):68-75, 193.
- [15] 刘道伟,李柏青,邵广惠,等. 基于大数据及人工智能的大电网智能调控系统框架[J]. 电力信息与通信技术, 2019, 17(3):14-21.
LIU Daowei, LI Baiqing, SHAO Guanghui, et al. Intelligent control system framework based on big data and artificial intelligence for large power grid[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2019, 17(3):14-21.
- [16] 徐琳,舒军,甄威,等. 基于 RTDS 的 SVG 控制器硬件在环测试技术研究[J]. 电力电子技术, 2017, 51(1):118-120.
XU Lin, SHU Jun, ZHEN Wei, et al. Research on hardware-in-the-loop testing technology of SVG controller based on RTDS[J]. Power Electronics, 2017, 51(1):118-120.
- [17] 尹晨旭,孙建军,刘邦,等. 控制器硬件在环混合仿真系统延时及补偿方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9):151-155.
YIN Chenxu, SUN Jianjun, LIU Bang, et al. Time-delay and compensation for CHIL simulation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9):151-155.
- [18] 张建设,韩伟强,胡蓉. 楚雄 SVC 控制保护系统功能和动态性能的 RTDS 试验[J]. 南方电网技术, 2011, 5(1):38-41.
ZHANG Jianshe, HAN Weiqiang, HU Rong. RTDS test on the SVC functions and dynamic performance at Chuxiong converter station[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(1):38-41.
- [19] 孟超,吴涛,刘平,等. 光伏和储能并网物理数字混合仿真实验系统方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6):90-95.
MENG Chao, WU Tao, LIU Ping, et al. A physical digital hybrid simulation experimental scheme for photovoltaic and energy storage grid-connected system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6):90-95.
- [20] 杨苹,许志荣,宋嗣博,等. 基于 RTDS 的风光发电系统数字物理混合仿真分析[J]. 现代电力, 2016, 33(5):52-58.
YANG Ping, XU Zhirong, SONG Sibao, et al. Hybrid simulation analysis of wind/photovoltaic system based on real-time digital simulator[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(5):52-58.
- [21] 杨丽,李先允,万芳茹. 大电网紧急控制系统实验验证评估体系[J]. 电气技术, 2016(6):56-61.
YANG Li, LI Xianyun, WAN Fangru. Assessment system of testing the emergency control system of grid[J]. Electrical Engineering, 2016(6):56-61.
- [22] 郭琦,韩伟强,贾旭东,等. 云广直流输电工程安稳装置的 RTDS 试验方法研究[J]. 南方电网技术, 2010, 4(2):43-46.
GUO Qi, HAN Weiqiang, JIA Xudong, et al. Study on the RTDS simulation test of the system stability control of Yunnan—Guangdong ± 800 kV DC transmission project[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(2):43-46.
- [23] 徐柯,白杨,任祖怡,等. 基于 RTDS 的稳定控制远程测试试验系统研究[C]//中国电机工程学会继电保护专业委员会保护和控制学术研讨会. 中国电机工程学会继电保护专业委员会, 2015.
XU Ke, BAI Yang, REN Zuyi, et al. Research on remote control test system for stability control based on RTDS[C]//Symposium on Protection and Control of Relay Protection Committee of Chinese Society of Electrical Engineering. Relay Protection Professional Committee of Chinese Society of Electrical Engineering, 2015.
- [24] 钱君霞,罗建裕,江叶峰,等. 适应特高压电网运行的江苏源网荷毫秒级精准切负荷系统深化建设[J]. 中国电力, 2018, 51(11):104-109.
QIAN Junxia, LUO Jianyu, JIANG Yefeng, et al. Deepening construction of Jiangsu source-network-load millisecond-level precise load control system suitable for UHV power grid operation[J]. Electric Power, 2018, 51(11):104-109.
- [25] GEVORGIAN V, WALLEN R, MCDADE M. NREL controllable grid interface for testing of renewable energy technologies[J]. 3rd Annual International Workshop on Grid Simulator Testing of Energy Systems and Wind Turbine Powertrains, Florida, 2015.
- [26] ZENI L, GEVORGIAN V, WALLEN R, et al. Utilisation of real-scale renewable energy test facility for validation of generic wind turbine and wind power plant controller models[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(8):1123-1131.
- [27] KORALEWICZ P, GEVORGIAN V, WALLEN R, et al. Advanced grid simulator for multi-megawatt power converter testing and certification[C]//2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Milwaukee, WI. IEEE, 2016:1-8.
- [28] 张元,郝丽丽,戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6):138-146.
ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6):138-146.
- [29] 孙元存,刘三明,王致杰,等. 基于 IGWO-K-means 的风电场动态等值建模[J]. 现代电力, 2018, 35(5):49-55.
SUN Yuancun, LIU Sanming, WANG Zhijie, et al. Dynamic equivalent modeling of wind farm based on IGWO-K-means method[J]. Modern Electric Power, 2018, 35(5):49-55.
- [30] 张磊,朱凌志,陈宁,等. 风力发电统一模型评述[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12):207-215.
ZHANG Lei, ZHU Lingzhi, CHEN Ning, et al. Review on generic model for wind power generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12):207-215.
- [31] 陈钊,夏安俊,汪宁渤,等. 适用于低电压穿越仿真的风电场内集电线路等值方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8):51-56.

- CHEN Zhao, XIA Anjun, WANG Ningbo, et al. Collector network equivalent method of wind farm for low voltage ride through simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016,40(8):51-56.
- [32] 王琦, 邵伟, 汤奕, 等. 面向电力信息物理系统的虚假数据注入攻击研究综述[J]. 自动化学报, 2019,45(1):72-83.
WANG Qi, TAI Wei, TANG Yi, et al. A review on false data injection attack toward cyber-physical power system[J]. Acta Automatica Sinica, 2019,45(1):72-83.
- [33] LAUSS G, STRUNZ K. Multirate partitioning interface for enhanced stability of power hardware-in-the-loop real-time simulation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019,66(1):595-605.
- [34] REN W, STEURER M, BALDWIN T L. Improve the stability and the accuracy of power hardware-in-the-loop simulation by selecting appropriate interface algorithms[J]. 2007 IEEE/IAS Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference, 2007:1-7.
- [35] 马智远, 刘欣, 尹晨旭, 等. 一种改进硬件在环仿真稳定性与精度的接口算法[J]. 电测与仪表, 2016,53(14):28-33.
MA Zhiyuan, LIU Xin, YIN Chenxu, et al. An interface algorithm of improved the stability and accuracy of the power hardware in loop simulation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016,53(14):28-33.
- [36] 周瑜, 林今, 宋永华. 适于分布式发电装置接入测试的功率硬件在环接口装置及其控制策略[J]. 电网技术, 2015,39(4):995-1001.
ZHOU Yu, LIN Jin, SONG Yonghua. A power hardware in loop interface device and the control strategies for distributed energy resources integration testing [J]. Power System Technology, 2015,39(4):995-1001.
- [37] WANG K Y, HUANG X, FAN B, et al. Decentralized power sharing control for parallel-connected inverters in islanded single-phase micro-grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018,9(6):6721-6730.
- [38] MORGADO A, HUQ K M S, MUMTAZ S, et al. A survey of 5G technologies: regulatory, standardization and industrial perspectives[J]. Digital Communications and Networks, 2018,4(2):87-97.
- [39] WNAG Lizhe, LASZEWSKI G, YOUNGE A, et al. Cloud computing: a perspective study [J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2009,39(1):50-55.
- [40] JARECKI S, JUTLA C, KRAWCZYK H, et al. Outsourced symmetric private information retrieval [C]//CCS & Apos; 13: Proceedings of the 2013 ACM SIGSAC Conference on Computer & Communications Security. 2013:875-888.

作者简介:



崔晓丹

崔晓丹(1981),男,博士,研究员级高级工程师,从事电力系统安全稳定分析及控制相关工作(E-mail: cuixiaodan@sgepri.sgcc.com.cn);
吴家龙(1987),男,硕士,工程师,从事新能源高占比电力系统的建模与仿真相关工作;
许剑冰(1971),男,博士,研究员级高级工程师,从事电力系统安全稳定分析及控制相关工作。

Current status and prospect of hardware-in-the-loop simulation in power system

CUI Xiaodan^{1,2}, WU Jialong¹, XU Jianbing^{1,2}, LEI Ming¹, HOU Yuqiang^{1,2}, XUE Feng^{1,2}

(1. NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

2. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Operation Control, NARI Group Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: Hardware-in-the-loop simulation (HILS) is an effective method to improve the accuracy of current large-scale power grid system simulating, and enhances reliability of the high voltage direct current/new energy device verification. First of all, on the basis of the basic architecture and its advantages of HILS for power systems, the technical characteristics and application of HILS in traditional power system are introduced, such as improving the accuracy of primary system modeling and reliability of secondary system controlling. Then, the challenges of HILS application in the power system are analyzed and the key technologies for these problems solution are proposed, such as the flexible architecture technology for accessing multi-heterogeneous data models, the equivalent and the control system modeling of power system, and the universal interface technology for control object integration. Finally, from the perspectives of deep research on traditional technologies and new technologies development, the trend of hardware-in-the-loop simulation for power systems is discussed to provide valuable suggestions for development and validation of related platforms.

Keywords: power system; hardware-in-the-loop; real-time simulation; application status; simulation platform

(编辑 钱悦)