

电力系统实时仿真技术分析

王占领¹, 郑三立²

(1. 华北电力大学(保定)通信与电子工程学院, 河北省 保定市 071003; 2. 北京交通大学电气学院, 北京市 100044)

摘要: 阐述了电力系统实时仿真技术的应用情况和发展前景。对实时数字仿真系统采用的各种硬件平台进行了分析和比较。结合实际工程项目对实时仿真测试技术的应用情况进行了详细介绍,并阐述了数模混合实时仿真系统的原理、结构和应用情况。提出了先进的集成混合实时仿真系统的架构。该系统对扩大实时仿真系统的规模具有重要意义。

关键词: 实时测试;数字仿真;物理模拟仿真;数模混合仿真;电力系统实时仿真

中图分类号: TM743

0 引言

离线仿真程序和实时仿真系统结合运用,可全面经济地完成项目的仿真和测试工作^[1]。如在 HVDC 和 FACTS 工程实施中,在项目规划和设计阶段,利用离线仿真确定设备的最优容量和最佳安装地点,设计和开发特殊电网结构及运行要求下的适当控制和保护策略等。但完整实施项目还需在设备安装、投运之前利用实时仿真系统对所设计的控制与保护系统进行实时测试,以验证其性能是否满足设计要求。由于实时仿真的系统规模有限,在实时测试前需根据设计要求对相关电网进行简化等值处理。

实时仿真测试的电力系统控制和保护装置可分为两大类:一是传统的控制和保护装置,如继电保护装置、安全自动装置和发电机的励磁和调速装置,通常此类装置的响应速度在几十 ms;二是现代电力电子装置的控制和保护系统,如 HVDC 和 FACTS 装置的控制和保护系统,其响应速度要比传统装置快很多。这 2 类控制和保护系统的闭环测试对实时仿真系统的要求是不同的。本文将阐述各种实时仿真测试技术,特别是实时数字仿真系统的结构、特点及应用。

1 物理模拟仿真系统

物理模拟仿真系统包括暂态网络分析仪(TNA)、动态模拟试验装置以及 HVDC 和 FACTS 模拟仿真器等。

TNA 主要用于电磁暂态过程的研究,动模主要用于机电暂态过程以及后续动态过程的研究。他们主要用于传统控制和保护装置的实时仿真测试。

HVDC 和 FACTS 模拟仿真器则是利用原型 HVDC 换流器以及 FACTS 的物理模拟装置进行 HVDC 和 FACTS 控制和保护系统的实时测试。HVDC 和 FACTS 模拟仿真器建立了许多相关的物理模型。其中晶闸管和可关断晶闸管(GTO)模型是最重要的模型之一。以晶闸管为例,如图 1 所示,由于

晶闸管的压降,造成了与按相似理论建立的小容量模拟系统不成比例的高损耗,须采用补偿措施方能达到可接受的损耗水平。尽管这些补偿措施增加了仿真器在建立、调节和校验方面的难度,但在考虑晶闸管和 GTO 的高频暂态特性时,应用模拟仿真器是合适的。

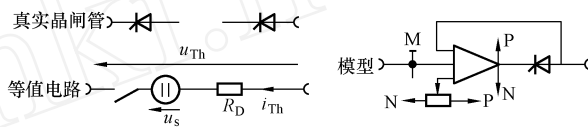


图 1 模拟晶闸管元件模型

2 实时数字仿真系统

2.1 实时数字仿真系统的结构

实时数字仿真系统是大型软件系统与复杂硬件系统的结合体。硬件结构上,由于没有相关的国际标准可以遵循,各企业都在进行独立的开发和生产,选用的硬件平台各不相同。

(1) 基于高速数字信号处理器(DSP)并行的实时数字仿真器—RTDS。RTDS 是国际上第一套商业化的全实时数字仿真装置,采用了 DSP 芯片并行处理的硬件结构^[2]。RTDS 利用数学上可分割子系统的概念在各 DSP 芯片间分配计算任务,1 个 DSP 通常模拟 1 个元件。各子系统之间的连接使用传输线模型或换流器模型。RTDS 这种基于 DSP 硬件扩展的封闭结构,要进行升级和扩展较为困难。

(2) 基于微机的实时数字仿真系统。随着微处理器技术的迅速发展,微机的计算能力不断增强,基于微机的实时数字仿真系统以其成本低、升级容易、发展潜力大等特点引起了人们的广泛关注。目前普通微机已具备利用数字仿真程序对较小规模系统进行实时仿真的计算能力。微机通过输入输出接口与实际物理装置相连,完全可以进行传统保护与控制装置的实时闭环试验。

(3) 基于并行计算机的实时数字仿真系统。目前

微机只能进行小规模系统的实时仿真,要实现较大规模系统的实时仿真,需要采用并行计算机体系结构。

目前用于实时数字仿真系统的并行计算机系统可分为 4 类: 基于共享存储器的对称多处理器 (SMP) 系统。在小规模并行实时数字仿真系统中应用较为广泛。一致性高速缓存非均匀存储器访问 (cdNUMA) 系统,如 SGIO rigin。加拿大魁北克水电局下属的 TransEnergie 公司研制的 Hypersin 就是基于 SGIO rigin 的实时数字仿真系统^[3]。基于分布存储器的大规模并行处理 (MPP) 系统,如 BM SP2 和中国的曙光 3000。法国电力公司 (EDF) 研制的 ARENE 就是基于 HP-Convex 大规模并行计算机的实时数字仿真系统^[4]。机群式并行计算 (Cluster) 系统,如 BM Cluster1300 和中国的联想深腾 1800。与 MPP 相比, Cluster 由于采用通用的精简指令集计算机 (RISC) 工作站或微机,价格较低,具有性能价格比高、便于升级扩展的优点,是今后研制大规模实时数字仿真系统的优良平台。

2.2 传统控制和保护装置测试

实时数字仿真系统与适当的电压、电流放大器结合可进行继电保护装置的实时闭环测试。如图 2 所示,实时数字仿真系统建立所模拟系统的数字仿真模型,进行实时电磁暂态仿真并将保护装置测试所需的电压、电流信号经信号转换及输入输出系统送入电压、电流放大器进行信号放大,最后将其送入保护装置;同时又通过输入输出接口采集保护装置的跳闸或合闸信号,以控制数字仿真模型中断路器的开断,对仿真计算产生影响,从而形成实时交互,构成完整的实时闭环测试系统。

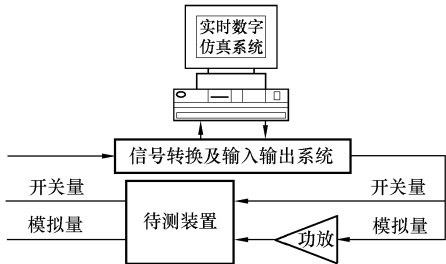


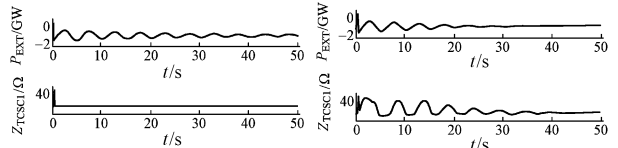
图 2 闭环测试原理图

2.3 快速控制和保护装置测试

实时数字仿真系统可用来测试快速的控制和保护装置,以实现对它们进行闭环动态特性试验和整个电力系统暂态响应的研究。

巴西电力公司在 Serra da Mesa 至 Miracema 全长 1 000 多 km 的 500 kV 线路的南北两端各安装一套可控串补装置,并在线路中分段安装 3 套常规固定串补装置。设备投运前西门子公司利用 RTDS 对这 2 套可控串补的控制及保护系统进行了实际工作特性测试^[5]。测试前对系统进行了简化等值处理。

实时测试的主要目的之一是利用等值系统对实际的可控串补控制装置 POD 测试不同故障情况和系统工作条件下的特性,以确认可控串补控制器 POD 的工作特性是否符合设计要求,是否能够有效阻尼系统的功率振荡,提高系统的暂态稳定性。图 3 为由北向南输送 500 MW 功率,系统发生故障、南端变电站切除 400 MW 负荷情况下的实时仿真结果。图 3 (a) 是在 POD 控制装置闭锁时系统的功率振荡情况;图 3 (b) 则是在 POD 控制装置启动后系统的功率振荡情况。由此可见具有 POD 的可控串补对输电系统功率振荡有着明显的阻尼作用。



(a) 由 POD 控制闭锁 (b) 由 POD 控制启动

图 3 可控串补 POD 控制的实时数字仿真测试

经过实时测试,可控串补装置及其控制和保护系统于 1999 年 2 月在现场进行了安装测试及验收。几次现场的 500 kV 系统故障测试显示,测试结果与数字实时测试非常相近,从而证实了实时数字仿真系统测试的准确性。

3 数模混合实时仿真系统

模拟仿真器与数字仿真系统各有特点和局限性,最优的方法是将二者结合起来,在考虑复杂电力系统的同时也考虑快速的晶闸管和 GTO 器件,形成数模混合实时仿真系统,以达到最优的模拟效果。如图 4 (a) 所示,作为被研究对象的 HVDC 换流器或 FACTS 装置 (包括快速的晶闸管和 GTO 器件、换流变压器、直流电抗器等) 由模拟仿真器模拟;其他 HVDC 和 FACTS 装置及其控制与保护系统以及交流系统 (详细的发电机模型、传输线模型、变压器模型、互感器模型和负荷模型等) 则由数字仿真系统模拟。待测的控制与保护系统与模拟仿真器相连进行实时测试。2 个子系统数字仿真系统和模拟仿真器通过数模混合实时接口连接进行实时仿真^[6]。

模拟仿真器为能量系统,而数字仿真系统则为信号系统。含有电力电子原型模拟仿真器的数模混合实时接口的硬件实现如图 4 (b) 所示。混合接口中,数字系统侧接口处的节点电压由数字仿真系统计算得到后经 D/A 转换送出,通过电压源功率放大器送入 HVDC 和 FACTS 原型模拟仿真器。同时模拟仿真器侧接口处的支路电流经电流互感器测量后作为反馈模拟量经 A/D 转换后注入数字仿真系统,形成闭环交互。

在发电机的励磁和调速系统的测试中,有时希望用一台实际的动模机组来进行实验,系统的其他部分

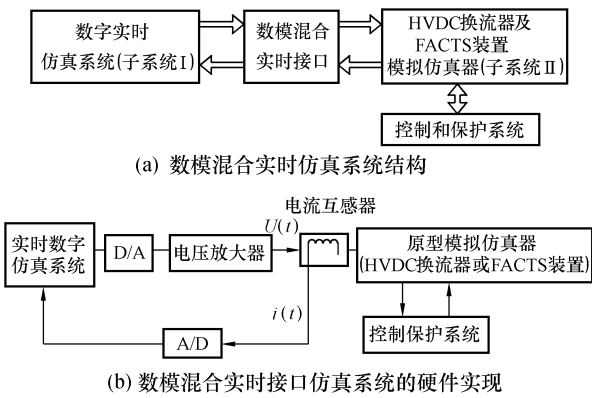


图 4 数模混合实时仿真系统

则采用数字仿真进行模拟。由于电力电子原型模拟仿真器的功率较小,电压放大器就可供给和吸收其能量。但动模机组的功率较大,必须采用能实现四象限功率交换的背靠背变流器。背靠背变流器基本结构包括整流器、逆变器和耦合直流电容,整流与逆变器均采用可控电力电子器件,从而实现完全控制输出电压并实现四象限的功率交换。但此类大功率的背靠背式变流器的实现并不容易,目前要同时连接多台动模机组还存在较大的技术难度。

西门子公司为中国天—广高压直流输电项目建立了基于RTDS的数模混合仿真系统,用于直流输电控制与保护系统的实时测试^[7,8]。系统包括两个双极型12脉冲换流站,额定容量为1800MW,直流线路全长为960km,额定电压为±500kV。测试系统总体结构由混合实时仿真系统和天—广HVDC控制与保护系统构成,如图5所示。其中作为被测试对象的HVDC控制与保护系统包括极控制单元、站控制单元和直流系统保护单元的硬件样机和控制软件。混合仿真系统中,等值后的交流系统、交流滤波器、直流滤波器、详细的直流输电线路模型(包括接地极线路模型)以及相关电路的开关均由RTDS模拟。晶闸管阀组和换流变压器以及相关设备由模拟仿真器模拟。RTDS和模拟仿真器通过交流和直流数模混合实时接口相连。

利用数模混合仿真系统可实现与系统的稳态及动态特性相关的控制、保护系统的测试、校验和整定。

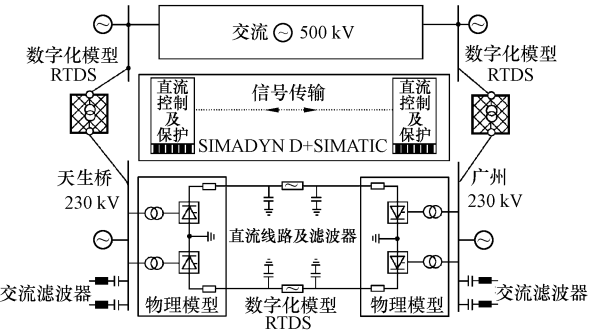


图 5 用于交直流并联运行研究的数模混合仿真系统

其中动态性能测试的目的是为了检验在各种交、直流系统故障条件下极控制单元和直流保护装置的暂态响应,评估极控制单元和直流保护装置的动态特性、结构和参数。测试内容主要包括甩负荷操作、220kV及500kV交流线路故障、直流线路故障、单极闭锁故障、换流器故障(包括各种阀短路故障)、无功补偿设备的投切、变压器磁化及发电机组的启停等。

4 集成混合实时仿真系统

目前利用基于并行机的数字仿真系统进行大系统实时仿真仍存在成本高、实现难的问题,而且还需对原始系统进行简化等值,导致原始系统部分信息丧失。为经济可行地扩大仿真系统规模,充分利用原始系统的信息,提出了如图6所示的先进的集成混合实时仿真系统。

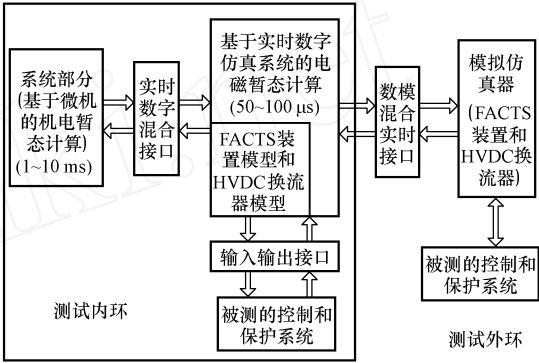


图 6 先进的集成混合实时仿真系统结构图

该系统部分用基于微机的机电暂态程序仿真,以研究系统的动态行为和稳定性。FACTS装置和HVDC换流器用基于数字实时仿真系统的电磁暂态程序精确模拟,以考察装置快速的动态响应行为。2个程序通过实时数字混合接口连接。由于仿真的实时性,数字仿真系统可与实际控制与保护系统相连以便进行实时测试,构成测试内环。通过数模混合实时接口还可外接HVDC和FACTS模拟仿真器。模拟仿真器再与待测的控制与保护系统相连,与测试内环一起构成测试外环。

系统的特点有: 无需简化等值,充分利用了系统信息; 既可考察系统动态行为及稳定性,又可模拟装置的快速响应行为; 数字仿真系统主要模拟装置,可减少计算负担; 与模拟仿真器相连构成测试外环,以便进一步扩展测试范围。

5 结论

实时仿真测试技术的主要特点如下: 实时仿真测试由模拟向数字转变是大势所趋,数字仿真系统的应用前景广阔。实时数字仿真系统的平台从昂贵的专用硬件结构(如RTDS的DSP)向通用型硬件结构(微

机和并行计算机)发展,方便了升级扩展,有效保护了用户投资。混合实时仿真系统可充分发挥模拟和数字各自的特点,实现优势互补,达到优化模拟的效果。实时数字仿真系统与动模机组的连接问题目前正在研究。先进的集成混合实时仿真系统通过数模混合接口和实时数字混合接口,构成内外2个测试环,实现了大系统下的实时测试。

6 参考文献

[1] 郑三立,雷宪章, Retzmann D. 电力系统计算机及实时数字仿真—电力系统实时数字仿真. 电力系统自动化, 2001, 25 (14): 40 ~ 44.

[2] Kuffel R, Giesbrecht J, Maguire T, et al. RTDS—A fully digital power system simulator operating in real-time. In Conference Proceedings of ICD 95, College Station, Texas, USA, 1995, 19 ~ 24.

[3] Do V Q, Soumagne J C, Sybille G, et al. Hypersim, an integrated real-time simulator for power networks and control systems. In Conference Proceedings of ICD 99, Västerås, Sweden, May 1999.

[4] Fromont H, Levacher L, Strunz K. An efficient parallel computer architecture for real time simulations of electromagnetic transients in power systems. 31th North American Power Symposium, San Luis Obispo, USA, October 1999.

[5] Bergmann K, Braun K, Kuhn G, et al. Advanced fully digital

TCSC real-time simulation in comparison with computer studies and on-site testing. In Conference Proceedings of ICD 99, Västerås, Sweden, May 1999.

[6] Wang X, Giesbrecht J, Woodford D A, et al. Enhanced performance of a conventional HVDC analogue simulator with a real-time simulator. Proceeding of the 1993 Power System Computation Conference, 1993, Vol 1, 663 ~ 669.

[7] 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. 电力系统自动化, 2000, 24 (17): 28 ~ 31.

[8] Claus M, Messner H, Retzmann D, et al. Verification of HVDC controller using an advanced hybrid real-time digital simulator. POWERCON '98 (session paper), International Conference on Power System Technology, Beijing, China, Aug 1998.

收稿日期: 2005-09-12

作者简介:

王占领 (1972-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统仿真与通信的应用;

郑三立 (1976-), 男, 博士, 从事电力系统数字仿真的开发及应用研究工作。

(责任编辑 赵杨)

Analysis of Power System Real Time Simulation Technologies

WANG Zhan-ling¹, ZHENG San-li²

(1. Communication and Electronic Engineering School, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. Electricity School, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The application and prospect of power system real-time simulation technologies were introduced. The various hardware architectures used by digital real-time simulators were analyzed and compared in this paper. With practical examples, the applications of the real-time simulation testing technologies were introduced. The principle and application of hybrid real-time simulators were presented. As an economic way to handle large-scale testing systems in real time, the Advanced Real-Time Integrated Hybrid Simulator is proposed in this paper.

Keywords: real-time testing; digital simulation; physical simulation; hybrid simulation; power system real-time simulation

· 综合信息 ·

首台脱硫脱硝装置同步投运机组诞生

2006年1月20日,国华太仓发电有限公司7号60万kW超临界机组的脱硫、脱硝装置与发电机组同步完成了168h试运行后,正式投运,创下了我国新建大型发电机组发电、脱硫、脱硝“三同步”的纪录。

新建燃煤发电机组同步安装脱硫、脱硝装置,以减少烟气中的二氧化硫、氮氧化物排放是我国建设环境友好型社会的重要举措。如果火电厂排放的二氧化硫、氮氧化物得不到有效控制,将直接影响我国大气环境质量的改善和电力行业的可持续发展。为此,国家规定在报请核准发电机组建设前必须先通过环

境影响评价,而环评报告中对脱硫、脱硝装置的建设及指标都有明确的规定。据介绍,国华太仓7号机组的脱硫、脱硝工程由江苏苏源环保工程股份有限公司总承包,建设中该公司采用了其自主研发的O₂技术。168h的试运行情况表明,该机组排放的烟气中,二氧化硫、氮氧化物分别减少了98%和80%,达到了国家环评报告中的指标要求,其中脱除烟气中二氧化硫的指标还比要求提高了3个百分点。据悉,该项脱硝工程是我国首个采用自主知识产权技术和首个由国内企业实施总承包建设的工程。