

电力系统数字仿真技术的现状与发展

汤 涌

(中国电力科学研究院, 北京市 100085)

摘要: 电力系统数字仿真已成为电力系统试验研究、规划设计和调度运行的重要工具。文中介绍了电力系统仿真技术的现状, 讨论了现有电力系统数字仿真软件和系统的发展趋势。认为随着电力系统的发展和 FACTS 等新技术的应用, 电磁暂态与机电暂态混合仿真、全过程动态仿真和大规模实时仿真系统将是我国电力系统仿真技术的主要发展方向。

关键词: 电力系统; 数字仿真; 实时仿真

中图分类号: TM743

0 引言

当今, 世界各国的电力系统发展得越来越庞大, 电力系统的运行也随之越来越复杂, 发生的事故越来越难以用传统的分析方法预测。在我国, 随着三峡电站的建设、西电东送工程的实施和全国联网工程的推进, 我国大陆部分在本世纪初叶将形成规模巨大的全国性的互联电网, 而且, 全国联网系统中既有交流线路, 又有直流线路, 还包括诸如无功静止补偿器之类的电力电子设备和 FACTS 装置, 从而使电网的安全稳定运行控制变得十分复杂。为了提高电网安全稳定运行水平, 对电力系统仿真技术提出了更高的要求。本文讨论了现有电力系统数字仿真软件及系统的现状和发展趋势。

1 电力系统离线仿真技术

电力系统离线仿真是在数字计算机上为电力系统的物理过程建立数学模型, 用数学方法求解, 以进行仿真研究的过程, 其仿真速度与实际系统的动态过程不等。

根据仿真的目的, 电力系统仿真软件所采用的数学模型可以是线性或非线性、定常或时变、连续或离散、集中参数或分布参数、确定性的或随机性的等, 建立数学模型时往往忽略一些次要的因素, 因而常常是一个简化的模型。

目前, 电力系统离线仿真软件, 对不同的动态过程采用不同的仿真方法。主要有电磁暂态过程仿真、机电暂态过程仿真和中长期动态过程仿真 3 种。

1.1 电磁暂态过程仿真

电磁暂态过程数字仿真是用数值计算方法对电

力系统中从数微秒至数秒之间的电磁暂态过程进行仿真模拟。电磁暂态过程仿真必须考虑输电线路分布参数特性和参数的频率特性、发电机的电磁和机电暂态过程以及一系列元件(避雷器、变压器、电抗器等)的非线性特性。因此, 电磁暂态仿真的数学模型必须建立这些元件和系统的代数或微分、偏微分方程。一般采用的数值积分方法为隐式积分法。

由于电磁暂态仿真不仅要求对电力系统的动态元件采用详细的非线性模型, 还要计及网络的暂态过程, 也需采用微分方程描述, 使得电磁暂态仿真程序的仿真规模受到了限制。一般进行电磁暂态仿真时, 都要对电力系统进行等值化简。

电磁暂态仿真程序目前普遍采用的是电磁暂态程序(electromagnetic transients program, 简称为 EMTP), 1987 年以来, EMTP 的版本更新工作在多国合作的基础上继续发展, 中国电力科学研究院(简称电科院)在 EMTP 的基础上开发了 EMTPE。具有与 EMTP 相似功能的程序还有加拿大 Manitoba 直流研究中心的 EMTDC(PSCAD)、加拿大哥伦比亚大学的 MicroTran、德国西门子的 NETOMAC 等。

1.2 机电暂态过程仿真

机电暂态过程的仿真, 主要研究电力系统受到大扰动后的暂态稳定和受到小扰动后的静态稳定性。其中暂态稳定分析是研究电力系统受到诸如短路故障, 切除线路、发电机、负荷, 发电机失去励磁或者冲击性负荷等大扰动作用下, 电力系统的动态行为和保持同步稳定运行的能力。

电力系统机电暂态仿真的算法是联立求解电力系统微分方程组和代数方程组, 以获得物理量的时域解。微分方程组的求解方法主要有隐式梯形积分法、改进尤拉法、龙格-库塔法等, 其中隐式梯形积

分法由于数值稳定性好而得到越来越多的应用。代数方程组的求解方法主要采用适于求解非线性代数方程组的牛顿法。按照微分方程和代数方程的求解顺序可分为交替解法和联立解法。

目前,国内常用的机电暂态仿真程序是电力系统综合程序(PSASP)^[1]和中国版BPA电力系统分析程序。国际上常用的有美国PTI公司的PSS/E,美国EPRI的ETMSP^[2],以及国际电气产业公司开发的程序如:ABB的SYMPOW程序^[3]、德国西门子的NETOMAC^[4]也有机电暂态仿真功能。

1.3 中长期动态过程仿真

电力系统中长期动态过程仿真是电力系统受到扰动后较长过程动态仿真,要计入在一般暂态稳定过程仿真中不考虑的电力系统长过程和慢速的动态特性,包括发电厂热力系统和水力系统以及核反应系统的动态响应,以及继电保护系统、自动控制系统的动态行为等。长过程动态稳定计算的时间范围可从几十秒到几十分钟,甚至数小时。主要用来分析电力系统较长时间的动态特性。

与电力系统暂态稳定计算一样,电力系统长过程稳定计算也是联立求解描述系统动态元件对的微分方程组和描述系统网络特性的代数方程组,以获得电力系统长过程动态稳定的时域解。但是,电力系统长过程动态的响应时间常数从几十毫秒到100 s以上,是典型的刚性系统,需要采用隐式积分算法。为避免计算时间过长,还必须采用自动变步长计算技术。

目前国际上主要的长过程动态稳定计算程序主要有^[5]:法国电力公司等开发的EUROSTAG程序^[6]、美国电力科学研究院的LTSP程序^[7]、美国通用电气公司和日本东京电力公司共同开发的EXTAB程序^[8];另外,美国PTI的PSS/E程序^[9]、捷克电力公司的MODES程序等也具有长过程动态稳定计算功能。

2 电力系统实时仿真技术

电力系统实时仿真可分为数字仿真、物理仿真以及数模混合式仿真,其仿真速度与实际系统动态过程完全相同。

2.1 电力系统实时仿真技术的发展过程

电力系统实时仿真系统大概经历了以下3个历史阶段,主要有下面3种类型:

a. 基于相似理论的以实际旋转电机为代表的电力系统动态模拟仿真系统

电力系统动模实验仿真系统是最早出现的进行电力系统研究的实时仿真工具。电力系统动模实验

室的硬件通常由若干台按比例缩小的电机、一定数量的 π 型线路模型、电源、负荷、开关模型以及相应的监测、控制系统组成。通常用来进行电力系统机电暂态以及动态过程的实时仿真研究。这些装置的主要优点是直观明了、物理意义明确。缺点是设备昂贵、占地面积大、可模拟的电力系统规模受制于装置自身的规模和元件的物理特性,装置的可扩展性和兼容性差,也难以大量推广。它们在电力系统的发展中曾发挥重要的作用,今后仍将发挥一定的作用。

b. 数模混合式实时仿真系统

数模混合式实时仿真系统,除电机、动态负荷等旋转元件用数字元件模拟外,其余元件基本上与动模采用的元件一致。其使用的灵活性和对电力系统研究范围都有了很大提高,对电力系统的实时仿真范围已经可以覆盖电力系统扰动的全过程,即可仿真电磁暂态过程、机电暂态过程和动态过程的电力系统扰动全过程。数模混合式实时仿真系统的最大优点就是其数值稳定性好,仿真规模取决于硬件规模。在数模混合式仿真系统中,由于线路、变压器等元件皆为模拟元件,通过这些模拟元件,发电机等数字元件相互间完全解耦,因此只要发电机等数字元件本身无数值不稳定问题,则整个仿真系统就不会产生数值振荡问题。

由于其主要部分仍是基于相似理论的物理模型,数模混合式实时仿真装置也具有上述物理模型的缺点,即设备昂贵、占地面积大、可模拟的电力系统规模受制于装置自身的规模和元件的物理特性,装置的可扩展性和兼容性差,难以大量推广。

c. 全数字实时仿真系统

尽管电力系统动模实验仿真系统和数模混合式电力系统实时仿真系统在电力系统的实时研究领域发挥着重要的作用,但由于其建模的周期长、重复性差、试验室占地面积大等原因,人们一直没有放弃对全数字实时仿真系统的探索工作。

在20世纪90年代初,随着商业化高速数字信号处理器(DSP)的问世,加拿大Manitoba直流研究中心RTDS公司率先推出了国际上第1台电力系统全数字实时仿真系统(RTDS)。继RTDS公司后,法国电力公司(EDF)、加拿大魁北克水电研究所的TEQSIM公司等也相继进行了全数字实时仿真系统的开发和研制工作。

所有的全数字实时仿真系统,无论其采用什么样的硬件平台,其共同特点都是基于多CPU并行处理技术,由系统仿真时下载到该CPU的软件来决定该CPU模拟什么电力系统元件,因此,在时间步长和I/O设备的频宽满足要求的情况下,系统的

一次元件模型只取决于软件而与硬件无关。这个显著的特点为用户对未来新元件的仿真提供了充分的发展空间。

但应该注意到,在全数字电力系统实时仿真系统中,由于各并行处理器间的通信、数据交换及模型算法等各方面因素的影响,数值不稳定问题成了限制仿真规模的重要问题。

2.2 我国电力系统实时仿真的应用与发展

我国电力系统实时仿真的发展历程基本跟踪了国际上电力系统实时仿真发展不同阶段的最新技术,基本情况如下:20世纪60年代初,由前苏联援助电科院建成了我国最大的电力系统动态模拟实验室;80年代初,为了对我国正在建设的500 kV输电系统进行电磁暂态方面的分析和研究,电科院和武汉高压研究所从美国PTI公司分别引进了TNA设备;80年代中期,为了配合我国葛上直流工程的系统调试和工程投运后的事故调查与分析及运行人员的培训,从原瑞士BBC公司(现ABB)引进了早期的数模混合式高压直流模拟仿真设备;1996年,为了对我国正在建设的三峡工程的输配电工程进行实时仿真研究,电科院从加拿大TEQSIM公司引进了先进的数模混合式仿真系统;90年代中期,为了跟踪国际上电力系统实时仿真技术发展的潮流和500 kV系统继电保护现场调试及例行检验的需要,少数电力企业和电科院、国家电力公司电力自动化研究院以及一些高校引进了少量的RTDS装置;目前,电科院正致力于开发全数字实时仿真系统。

2.3 典型的全数字实时仿真系统

就全数字实时仿真设备而言,目前国际上主要产品有3个,即加拿大Manitoba直流研究中心RTDS公司的RTDS、法国电力公司(EDF)的ARENE、加拿大魁北克TEQSIM公司的HYPERSIM。

2.3.1 RTDS系统

RTDS是国际上最早研制出的全数字实时仿真装置,其技术主要依托于加拿大Manitoba直流研究中心。

RTDS的并行处理器采用NEC公司的高速信号处理器和AD公司的SHARC AD21062高速信号处理器,处理器主板及软件均自行开发。这样做的好处是可以充分利用DSP的硬件资源,但在计算机芯片技术飞速发展的今天,这种开发模式不利于硬件的升级换代。

RTDS的软件核心是EMTDC,图形界面是PSCAD。

2.3.2 HYPERSIM系统

加拿大魁北克的TEQSIM公司的技术依托于魁北克水电研究所(IREQ)。IREQ建立了目前世界上最大的数模混合式实时仿真系统。TEQSIM公司在其数模混合式实时仿真技术的基础上,为了适应电力系统实时仿真技术发展的潮流,也于近期开发出了全数字电力系统实时仿真系统(HYPERSIM)。

HYPERSIM硬件采用基于共享存储器的多CPU超级并行处理计算机如SGI2000或多CPU的并行计算用的Alpha工作站。主要用于电力系统电磁暂态仿真,仿真的规模可以相当大,也可以用于装置试验。其中基于SGI3200服务器的HYPERSIM也可用于直流系统动态特性仿真。

HYPERSIM的软件核心是EMTP程序。

2.3.3 ARENE系统

ARENE是法国电力公司(EDF)研究开发的全数字实时仿真系统。该系统的硬件平台为HP公司生产的基于多处理器的HP-CONVEX并行处理计算机。到目前为止,该并行处理计算机的最大CPU数量已达到64个。

ARENE系统的硬件全部采用市场上能买到的标准组件(如HP的并行处理计算机、I/O接口板等),EDF只研究用于实时仿真电力系统的算法及相关软件。同时,该实时仿真系统还提供了基于C语言的用户自定义功能,使用该功能,用户可以自己定义新的元件模型。

ARENE的软件核心也是EMTP程序。

2.3.4 基于PC平台的实时仿真系统^[10]

目前比较成熟的电力系统全数字实时仿真系统硬件设备采用DSP或基于RISC技术的工作站、服务器,硬件设备开销比较大。为了节约硬件设备开销,电科院、日本三菱电公司、加拿大哥伦比亚大学等单位正在采用商用微机(PC)作为硬件平台来开发研制电力系统全数字实时仿真系统。

该系统由多台高档微机通过高速网络连接实现并行处理的集群计算机。其优点是价格便宜,可扩展性好,但技术相对复杂。目前均处于研究阶段,还没有形成产品,但这项技术是未来全数字实时仿真的一个发展方向。

3 电力系统仿真技术的发展趋势

随着电力系统的发展,对电力系统的安全可靠提出了更高的要求;同时,随着电力系统大量先进的控制装置的应用,如FACTS和电力电子装置、直流输电系统、继电保护装置、安全稳定监控装置等,对电力系统仿真技术提出了新的要求。

3.1 电磁暂态与机电暂态混合仿真

基于基波、单相和相量模拟技术的电力系统机电暂态仿真程序不能仿真 HVDC 和 FACTS 等电力电子装置的快速暂态特性和 MOV 等非线性元件引起的波形畸变特性。目前的仿真程序对 HVDC 和 FACTS 的模拟采用的是准稳态模型。

电磁暂态仿真程序受模型与算法的限制,其仿真规模不大,一般进行电磁暂态仿真时,都要对电力系统进行等值化简。

随着直流输电和 FACTS 等电力电子装置和其他非线性元件广泛应用于电力系统,这些元件引起的波形畸变及其快速暂态过程对系统机电暂态过程的影响越来越大,相互独立的电力系统电磁暂态仿真程序和机电暂态仿真程序,已难以适应现代电力系统对仿真的要求。因此,很有必要开发能进行仿真电磁暂态过程和机电暂态过程混合仿真的电力系统仿真软件。

电磁暂态与机电暂态混合仿真的发展有两种趋势:一种是由成熟的电磁暂态程序向机电暂态方向发展,使电磁暂态程序同时具备机电暂态过程的数学模型和仿真能力,以克服电磁暂态程序仿真规模小的不足。主要思路是把大规模电力系统分为需要进行电磁暂态仿真的子系统和仅进行机电暂态仿真的子系统,分别进行电磁暂态仿真和机电暂态仿真,在各子系统的交界处进行电磁暂态仿真和机电暂态仿真的交接^[11,12]。另一种趋势是由成熟的机电暂态程序向电磁暂态方向发展,主要思路是在机电暂态程序中对电力电子等元件对机电暂态过程有重要影响的快速暂态过程和非线性特性进行电磁暂态模拟,以提高机电暂态程序的仿真精度。

3.2 全过程动态仿真

在电力系统远距离输电容量不断增加、输电网络重载问题日益突出的情况下,暂态稳定及电力系统在暂态稳定之后的长过程动态稳定性(包括电压稳定性问题)将逐步成为电力系统安全稳定运行的主要问题,威胁电力系统的安全稳定运行。分析电力系统的长过程动态稳定性问题,避免发生大面积停电事故(如 1996 年美国西部联合电网发生的两次大面积停电事故),以及研究防止事故扩大的有效措施(即第 3 道防线),必将成为电力系统计算分析的一项重要内容。因此,电力系统长过程仿真程序的开发是非常必要的。

早期的电力系统长过程仿真软件,一般都忽略了扰动开始阶段的机电暂态过程,假设全网的机电振荡已平息,系统频率一致等。然而,电力系统的动态过程(从机电暂态过程到长过程动态)是一个连续

的过程,并不是截然分开的。机电暂态过程对中长期过程有影响,中长期过程对后续新的暂态过程也有作用。因此,在长过程仿真中,必然要对机电暂态过程进行仿真。因此,要求开发实用的电力系统全过程动态仿真软件。

电力系统全过程动态仿真就是把电力系统的机电暂态过程、中期过程和长期过程有机地统一起来进行仿真。其特点是要实现快速的机电暂态过程和慢速的中长期动态过程统一仿真。这是典型的刚性系统,需要采用具有自动变阶变步长技术的刚性数值积分方法。

3.3 大规模实时仿真系统

电力系统大量先进的控制和测量装置,如 FACTS 控制装置、直流输电控制装置、继电保护装置、安全稳定监控装置(包括广域测量装置等)都要由电磁暂态和机电暂态的实时仿真装置进行试验验证,才能投入实际系统使用。因此,发展数字式或数模混合式电力系统实时仿真装置都是必须的。

但是,目前的实时仿真装置(包括全数字和数模混合式)的仿真规模都不大,在大电网仿真试验时,都要进行大规模的等值化简,使实时仿真装置的应用,特别是大电网机电暂态和动态特性仿真研究方面,受到了很大的限制。因此,需要发展大规模电力系统实时仿真装置。

由于受试验室规模和物理设备的限制,数模混合式电力系统实时仿真装置的仿真规模不可能无限扩大。然而,随着计算机软硬件技术的快速发展、计算技术的不断提高、仿真技术的日益完善,全数字式电力系统实时仿真装置可望具备对大规模电力系统进行实时仿真的能力。

4 结语

就目前的技术水平而言,电力系统实时仿真系统的特点是模拟电力系统实时过程,能够统一模拟电力系统的电磁暂态过程、机电暂态过程以及后续的动态过程,能够接入实际的物理装置进行模拟试验;但由于仿真实时性的要求和仿真系统硬件规模的限制,一般实时仿真系统所能够模拟的电力系统规模总是有限的。实时数字仿真主要适用于详细研究大电力系统的主干网络和局部系统的暂态和动态过程,以及物理装置的试验研究。

电力系统离线仿真的规模基本不受限制,能够较完整地模拟大规模电力系统,适用于研究大电力系统复杂的暂态和动态过程。但离线计算程序不能接入实际的物理装置进行仿真,对于新型电力系统物理装置的模拟需要准确的数学模型,而数学模型

的获得除理论分析外,还需要仿真试验来验证。因此,电力系统实时数字仿真系统和离线计算程序是相辅相成的,两者还不能相互替代。

最后,应该指出的是,正确选择电力系统数学模型和参数是电力系统仿真的基础。大量的电力系统工程研究和事故仿真表明,模型与参数对电力系统仿真精度与可信度有重大影响^[13]。因此,电力系统模型与参数的研究,是电力系统仿真技术发展中的重要基础,应该深入研究。

参考文献

- 1 Wu Zhongxi, Zhou Xiaoxin. Power System Analysis Software Package (PSASP)——An Integrated Power System Analysis Tool. In: Proceedings POWERCON '98. Beijing: 1998
- 2 Fankhauser H R, Aneros K, Edris A-A, et al. Advanced Simulation Techniques for the Analysis of Power System Dynamics. IEEE Computer Applications in Power, 1990, 3(4)
- 3 Lei X, Lerch E, Povh D, et al. A Large Integrated Power System Software Package——NETOMAC. In: Proceedings POWERCON '98. Beijing: 1998
- 4 Kundur P, Morison G K, Balu N J. A Comprehensive Approach to Power System Analysis. In: CIGRE. Paris: 1994. Session Paper 38-106
- 5 CIGRE Task Force 38.02.08. Tools for Simulating Long-term Dynamics. Electra, 1995(163): 151~165
- 6 Evard C, Bihain A. Powerful Tools for Various Types of Dynamic Studies of Power System. In: Proceedings

POWERCON '98. Beijing: 1998

- 7 Long-term System Dynamic Simulation Methods. EPRI EL-3894. Research Project 1469-1 Final Report. 1985
- 8 Sanchez-Gasca J J, Aquila R D, Paserba J J, et al. Extended-term Dynamic Simulation Using Variable Time Step Integration. IEEE Computer Applications in Power, 1993, 6(4)
- 9 deMello F P, Feltus J W, Laskowski T F, et al. Simulating Fast and Slow Dynamic Effects in Power System. IEEE Computer Applications in Power, 1992, 5(3)
- 10 Fujimoto Y, Bin Y, Taoka H, et al. Design and Implementation of a Real-time Power System Simulator Using PC Cluster. In: International Conference on Digital Power System Simulators, ICDS'99. Vasteras Sweden: 1999
- 11 Sultan M, Reeve J, Adapa R. Combined Transient and Dynamic Analysis of HVDC and FACTS Systems. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4)
- 12 Kevin K W, Chan Laurence, Snider A. Electromagnetic Electromechanical Hybrid Real-time Digital Simulator for the Study and Control of Large Power Systems. In: Proceedings POWERCON 2000. Perth, WA (Australia): 2000
- 13 Kosterev D N, Taylor C W, Mittelstadt W A. Model Validation for the August 10, 1996 WSCC System Outage. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3)

汤涌(1959—),男,电力系统研究所副所长,教授级高级工程师,1995年获国务院颁发的政府特殊津贴,从事电力系统分析软件开发和电力系统分析工程的研究。E-mail: tangyong@epri.ac.cn

PRESENT SITUATION AND DEVELOPMENT OF POWER SYSTEM SIMULATION TECHNOLOGIES

Tang Yong

(Electrical Power Research Institute of China, Beijing 100085, China)

Abstract: Digital simulation has proved to be an effective tool for research and testing, planning and operating of power systems. This paper introduces the present situation of power system simulation technologies, and discusses the development of power system simulation software and real-time simulation system. As the new development of power system and the application of new techniques, such as FACTS, in power systems, the main tasks of power system simulation will be the hybrid simulation of electric-mechanical transient and electro-magnetic transient, full dynamic simulation including electric-mechanical transient, mid-term and long-term simulation, and the large scale real-time simulation.

Key words: power systems; digital simulation; real-time simulation

电力系统计算机网络安全新技术研讨会召开

2002年8月7日~10日,“电力系统计算机网络安全新技术研讨会”在昆明召开,国家计算机网络入侵防范中心的专家及电力行业各级信息主管参加了此次会议。会议主要围绕主流网络攻击技术、加密技术、身份认证技术、安全网络的体系结构、网络应急处理和灾难恢复方法等18个主题展开了广泛讨论。与会人员对特别为电力系统客户设计的东方DF-NS310物理隔离网关产生了浓厚的兴趣。该产品采用非Intel芯片、Linux操作系统及非标准数据传送协议,利用内外网物理隔离技术,能够安全、方便地将调度系统中的SCADA数据对外发布,最大程度地保证了系统数据的安全。此次会议的成功召开为来自电力行业的各级信息主管制定网络安全策略提供了有力的技术支持。

(陈俊华 烟台东方电子信息产业股份有限公司 264000)