

交直流电力系统 仿真技术

中国南方电网公司 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

交直流电力系统 仿真技术



中国南方电网公司 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书结合多年来南方电网交直流电力系统生产、运行、试验和研究实践,对现代交直流电力系统仿真技术及其应用进行了总结和探索,反映了交直流电力系统仿真领域的最新进展。本书是我国第一本系统地介绍和分析交直流电力系统仿真技术的专著,它对我国电力系统仿真技术的发展和提高具有重要的意义。

本书共12章,主要内容包括:介绍和分析了电力系统仿真的分类、概念、发展趋势以及国内外电力系统仿真技术的发展和应用情况;分析了直流输电系统仿真模型及其选用原则;阐述和分析了交直流电力系统电磁暂态仿真、机电暂态仿真、中长期动态仿真、小扰动动态仿真分析和实时数字仿真,并结合前面的分析,提出提高交直流电力系统仿真水平的措施,还根据南方电网 RTDS 应用的一些经验,进行了 RTDS 实时数字仿真技术开发与应用方面的探讨;最后,介绍了南方电网技术研究中心的 RTDS 实时数字仿真系统。

本书可供从事电力系统仿真和交直流电力系统规划、生产、运行、试验、研究、培训及管理工作的相关技术人员使用,也可作为从事电力系统仿真、交直流电力系统研究等领域学习和研究工作的高校本科生、研究生和教师阅读参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

交直流电力系统仿真技术/中国南方电网公司编著.
北京:中国电力出版社,2007
ISBN 978-7-5083-4979-4

I. 交… II. 中… III. 电力系统-系统仿真 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 142805 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 1 月第一版 2007 年 1 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 11 印张 181 千字

印数 0001—2500 册 定价 22.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

《交直流电力系统仿真技术》

编写组织人员

编 委 会

主 任：袁懋振

副主任：王久玲

委 员：赵 杰 饶 宏 刘映尚 韩伟强 洪 潮

编 写 组

主 编：欧开健

参 编：黄立滨 李战鹰 郭 琦 张建设

序

近年来，随着经济社会的持续、快速、健康发展，我国电力工业蓬勃发展。电网互联以及大功率电力电子技术的应用，使得现代电网日趋庞大和复杂，安全稳定问题日益突出，这对电力系统运行和控制技术提出了更高的要求。电力系统仿真作为一种重要的研究手段，对于分析复杂电力系统特性，检验新技术和新设备的性能及其对电网的影响，制定安全可靠运行和控制策略，具有不可替代的作用。

中国南方电网是我国第一个交直流并联运行，超高压、远距离、大容量输电的电网。网内多回交流和多回直流输电系统并联运行，并且应用了可控和固定串补等多项新技术，运行特性非常复杂，这为电力系统仿真技术的发展和应用提供了广阔的空间。

为了适应电网快速发展的需要，统筹建设好仿真系统，中国南方电网公司根据电网的特点和实际需要，在交直流混合仿真技术及其应用方面开展了大量的研究工作，积累了宝贵的实践经验，为南方电网的安全稳定运行起到了重要的保障作用。

目前，国内外的电力系统仿真技术专著还不多见，本书结合多年来南方电网交直流电力系统生产、运行、试验和研究实践，对现代交直流电力系统仿真技术及其应用进行了总结和探索，反映了国内外电力系统仿真领域的最新发展。相信本书为提高我国电力系统的仿真技术水平、增强驾驭交直流电力系统的能力、培养电力系统专业技术人才等将起到积极的作用。

中国南方电网公司董事长

袁慧振

二〇〇六年十二月



前言

电力科学的发展和应用首先是从直流电开始的。19世纪80年代初期,法国物理学家德普勒完成的人类有史以来第一次输电试验,以及爱迪生建成的第一个完整的电力系统,都是直流电系统。此后几年内,直流电系统在上世界上很多大城市投入运行,但直流电系统的局限性也很快显露出来。

与此同时,随着人们对电能需求的不断增长和科学技术的发展,在19世纪80年代和90年代,人们逐步掌握了多相交流电路原理,并制造了交流发电机、电动机、变压器,使交流发电、变压、输送和分配都很方便、经济和可靠。因此,在此后相当长的一段时间内,交流系统几乎完全取代了直流系统,并发展为现在规模庞大的电力系统。

但世界上许多科学家和工程师们没有忽视直流输电的独特优势,并陆续建设了一些试验性工程。随后,高电压大容量汞弧阀的研制成功和交流远距离输电稳定性等局限性的日益明显,为高压直流输电的发展创造了有利的条件。1954年,世界上第一条工业性直流输电线路在瑞典建成,它通过海底电缆将瑞典本土与哥特兰岛互联起来。1972年,加拿大的伊尔河直流输电工程首次采用了晶闸管阀(可控硅阀),由于晶闸管阀较汞弧阀具有一系列优点,从此,直流输电进入大力发展阶段。

我国直流输电技术的研究和应用起步相对较慢,但20世纪80年代后,我国国民经济快速发展,电力需求不断增加,直流输电在远距离大容量输电、电力系统互联、海底电缆输电等方面的优势使其得到了快速的发展。1987年,我国自行研制建设的舟山直流输电试验工程投运;1989年,葛上±500kV、1200MW直流输电工程投运;进入21世纪以来,我国已有多个高压直流输电工程和直流背靠背联网工程陆续投运,交直流混合大电网逐步在我国形成,同时也形成了像南方电网这样的超高压、远距离、大容量、交直流并联输电,多回直流落点邻近的交直流大电网。

如何分析交直流电力系统中诸如交直流之间、各直流之间相互影响以及直流系统控制保护特性等问题,保证交直流电力系统的安全稳定运行,日益成为广大电力工作者面临的重大课题之一。

电力系统仿真作为一种重要的电力系统分析和研究手段一直在交直流电力系统的发展和实际运行中发挥着极其重要的作用。但随着交直流电力系统的快速发展,对电力系统仿真提出了更高的要求。比如,基于基波、单相和相量模拟技术的电力系统机电暂态仿真虽然能仿真规模较大的交直流电力系统,但难以仿真 HVDC 和 FACTS 等电力电子装置的动态特性。而另一方面,电磁暂态仿真虽然能较真实地反映 HVDC 和 FACTS 的动态特性,但受模型与算法的限制,其仿真规模不能太大,需要对电力系统进行等值化简,这在一定程度上丢失了交直流系统的一些固有特性。同时,由于交直流电力系统中各保护之间的相互配合比较复杂以及有功功率和无功功率备用往往比较紧张,应关注其中长期稳定问题。此外,交直流电力系统往往输电容量大、输电距离远、系统结构和运行方式复杂,可能出现低频振荡等小扰动动态稳定问题。所以,要深入分析和研究交直流电力系统,除了要进行机电暂态和电磁暂态仿真外,还需进行中长期动态仿真和小扰动动态仿真分析等等。

在多年的交直流电力系统生产、运行、试验和研究实践中,南方电网仿真技术水平随着南方电网的快速发展而不断提高。本书结合南方电网的实践和实际应用,对现代交直流电力系统仿真技术及其应用进行了总结和探索,反映了交直流电力系统仿真领域的最新进展。

本书共 12 章,各章主要内容如下:

第 1 章系统地介绍了电力系统仿真的各种分类,阐述了各种类型电力系统仿真的含义,并分析了电力系统仿真技术的发展趋势。

第 2 章和第 3 章介绍和分析了国内外主要电力系统仿真软件和装置的主要功能、主要优缺点以及在国内外的应用情况。

第 4 章介绍和分析了交直流电力系统中的直流输电系统仿真模型及其选用原则。

第 5 章至第 9 章分别对交直流电力系统电磁暂态仿真、机电暂态仿真、中长期动态仿真、小扰动动态仿真分析和实时数字仿真进行了探讨。

第 10 章根据前面的分析,提出一些提高交直流电力系统仿真水平的措施。

第 11 章根据南方电网两年来 RTDS 应用的一些经验,进行了 RTDS 实时数字仿真技术开发与应用方面的探讨。

第 12 章介绍了南方电网技术研究中心的 RTDS 实时数字仿真系统。

本书第 2 章第 2 节、第 11 章第 9 节由郭琦编写,第 3 章第 3 节部分内容、第 12 章第 1 节部分内容由张建设编写,第 9 章第 5 节由李战鹰编写,第 11 章

第1节由洪潮编写，第11章第4、5、6、7、8节由黄立滨编写，本书其他部分由欧开健编写，全书由欧开健统稿。韩伟强和洪潮指导了本书的编写工作并审阅了书稿。

在本书编写过程中，南方电网技术研究中心赵杰主任、饶宏副主任、杨华副主任、张弥副总工以及南方电网公司安生部刘映尚副主任等领导给予了热情鼓励和悉心指导，南方电网技术研究中心的同事们也给予了大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

在本书编写过程中，加拿大 RTDS 技术公司 (RTDS Technologies Inc.)、加拿大 TGS (Trans Grid Solutions) 公司彼得·卡福 (Pete Kuffel) 专家、华南理工大学任震教授、加拿大曼尼托巴直流研究中心 (Manitoba HVDC Research Centre)、美国电力技术公司 (Power Technologies Inc.)、国电南京自动化研究院薛禹胜院士、南京南瑞继保电气有限公司田杰博士、广西电力试验研究院有限公司、深圳殷图科技发展有限公司、清华大学张毅威教授和孙宏斌教授、浙江大学徐政教授、中国电力科学研究院宋新立工程师和长沙电力学院曾祥君教授等单位 and 专家提供了一些技术资料或进行了技术帮助，在此也表示衷心的感谢。

我们对本书的素材选取和文字描述尽了很大的努力，由于作者的理论水平和实践经验有限，书中对一些仿真软件和仿真系统的描述和评价不一定十分确切，请相关的单位和软件开发者谅解。另外，本书缺点和错误难免，恳请读者不吝赐教。

编著者

2006年12月

目 录

序

前言

1 电力系统仿真的分类和发展趋势	1
1.1 电力系统仿真的分类	1
1.2 电力系统仿真技术的发展趋势	5
2 国内外电力系统非实时仿真技术分析	10
2.1 国内外主要电力系统离线非实时仿真工具介绍与分析	10
2.2 电力系统在线分析及调度员培训仿真系统	21
3 国内外电力系统实时仿真技术及其应用	25
3.1 电力系统物理实时仿真及其应用	25
3.2 电力系统数字物理混合实时仿真及其应用	28
3.3 电力系统数字实时仿真及其应用	29
3.4 电力系统实时仿真的比较、分析、应用和发展展望	35
4 直流输电系统仿真模型	39
4.1 直流输电系统仿真模型	39
4.2 常用电力系统仿真软件中的直流仿真模型	45
4.3 直流输电系统仿真模型选择原则	47
5 交直流电力系统电磁暂态仿真	48
5.1 交直流电力系统电磁暂态现象	48
5.2 交直流电力系统电磁暂态仿真仿真步长选择	49
5.3 交直流电力系统电磁暂态仿真算法	50
5.4 交直流电力系统电磁暂态仿真模型	52
5.5 交直流电力系统动态等值	53
5.6 交直流电力系统电磁暂态仿真初始化问题	54
5.7 电磁暂态仿真程序在交直流电力系统仿真应用中的局限性	57
6 交直流电力系统机电暂态仿真	59
6.1 交直流电力系统机电暂态仿真算法	59

6.2	交直流电力系统机电暂态仿真模型	60
6.3	机电暂态仿真程序在交直流电力系统仿真应用中的局限性	62
7	交直流电力系统中长期动态仿真	64
7.1	交直流电力系统中长期动态稳定的含义	64
7.2	交直流电力系统中长期动态稳定问题	66
7.3	交直流电力系统中长期动态稳定仿真	66
7.4	交直流电力系统电压稳定动态仿真	68
8	交直流电力系统小扰动动态仿真分析	70
8.1	交直流电力系统小扰动动态稳定的含义	70
8.2	交直流电力系统小扰动动态稳定仿真分析	70
9	交直流电力系统实时数字仿真	73
9.1	RTDS 硬件板卡介绍	73
9.2	交直流电力系统实时数字仿真所需的 RTDS 硬件配置	75
9.3	RTDS 软件介绍	78
9.4	RTDS 改进点火脉冲算法	80
9.5	大规模交直流电力系统实时仿真	85
10	提高交直流电力系统仿真水平的措施	88
10.1	建立结构合理的交直流仿真系统	88
10.2	建立交直流电力系统仿真基础数据库	88
10.3	提高仿真模型和参数的精确性	90
10.4	在机电暂态仿真程序中加入较详细的直流系统模型	93
10.5	扩大电磁暂态仿真程序的仿真规模	94
10.6	机电暂态和电磁暂态混合仿真	94
10.7	建立电网在线实时分析及预决策系统	94
10.8	多种仿真程序相互补充和验证	95
10.9	根据交直流电力系统实际情况确定仿真工具的应用条件	96
11	RTDS 实时数字仿真技术开发与应用	97
11.1	直流控制保护系统功能和动态性能试验	97
11.2	发电机励磁系统试验	105
11.3	输电线路行波故障定位仪试验	108
11.4	串补工程控制保护装置试验	116
11.5	交流线路保护装置试验	130

11.6	变压器保护试验	133
11.7	发电机保护试验	136
11.8	安稳装置和失步解列装置试验	138
11.9	交流系统和直流系统现场录波回放	140
11.10	机电暂态仿真程序与 RTDS 仿真系统的实时电磁机电 暂态接口	146
11.11	直流换流站运行人员培训	149
12	南方电网 RTDS 实时数字仿真系统	151
12.1	RTDS 实时数字仿真系统简介	151
12.2	RTDS 实时数字仿真系统的主要功能	157
	参考文献	159

电力系统仿真的分类和发展趋势

电力系统的发展虽然有 100 多年的历史了，但是对于电力系统仿真来说，只有几十年的历史。

电力系统仿真就是根据原始电力系统建立模型，利用模型进行计算和试验，研究电力系统在规定时间内的工作行为和特征。电力系统仿真自诞生以来，一直在电力系统中发挥着举足轻重的作用。

现代电力系统是一个强非线性、高维数的系统，所以，对其进行严格的仿真计算分析十分困难。近几十年来，随着电力系统技术和计算机技术的飞速发展，电力系统仿真技术也取得了巨大的进步，解决了很多电力系统规划、生产、运行、试验、研究和培训等方面的实际问题，在电力系统的发展过程中发挥了独特的作用。另一方面，随着现代电力系统的快速发展，电力系统仿真将发挥更加重要的作用，同时也对电力系统仿真提出了更高的要求。

1.1 电力系统仿真的分类

根据不同的标准，电力系统仿真可以分为不同的类型。

1.1.1 物理仿真、数字仿真和数字物理混合仿真

根据仿真模型性质的不同，电力系统仿真可分为物理仿真、数字仿真和数字物理混合仿真。

物理仿真基于相似理论，将电力系统实际元件，如换流阀、发电机、AVR（自动调压器）、调速器、电动机、变压器、输电线等，用参数成倍数缩小的真实物理元件模拟。物理仿真即我们常说的动模试验。

随着实际系统的发展，电力系统的规模和复杂程度发生了很大变化，动态模拟方法受到很大的限制。同时，随着数字计算机和数值计算技术的飞速发展，出现了用数学模型代替物理模型的新型模型系统，我们把建立数学模型并在计算机上做试验的过程称为电力系统数字仿真。

数字物理混合仿真（又称数模混合仿真），采用的是数字仿真模型和基于相似理论的物理模型。数模混合仿真中，通常采用的仿真方式是用基于微处理器或 DSP 芯片等数字仿真技术模拟电机等旋转元件，而直流换流阀、输电线

路等难以得到其数字仿真模型或易于采用物理模型的电力系统元件仍采用基于相似理论的物理模型进行模拟。

1.1.2 实时仿真和非实时仿真

根据实际电力系统动态过程响应时间与系统仿真时间的关系，电力系统仿真可分为实时仿真和非实时仿真。

实时仿真是指实时模拟电力系统各类过程，并能接入实际物理装置进行试验的电力系统仿真方式。也就是说，实时仿真能在一个计算步长内计算完成实际电力系统在该段时间内的动态过程响应情况并完成数据转换。目前，电力系统实时仿真在一定程度上能够做到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。

而在电力系统非实时仿真中，系统仿真所需的时间往往要比实际电力系统动态过程响应的时间长得多，实际电力系统几毫秒的动态过程响应时间往往需要几秒钟甚至几分钟才能仿真计算完成。

1.1.3 在线仿真和离线仿真

根据仿真所采用的数据来源，电力系统仿真可分为在线仿真和离线仿真。

在线仿真是根据实际运行电力系统中的电网监控和数据采集系统（SCADA）提供的实时状态数据进行仿真计算。

离线仿真是对电力系统的物理过程建立数学模型，再根据所搭建的仿真模型进行仿真计算，它与实际运行的电力系统没有直接联系。

1.1.4 频域仿真和时域仿真

根据仿真变量的不同，电力系统仿真可分为频域仿真和时域仿真。

频域仿真以频率为仿真变量，重点分析电力系统在频率领域的响应情况。频域仿真的范围可从 0Hz 到数兆赫兹，可覆盖从次同步振荡、暂态及次暂态过程直到系统行波的研究。利用系统特征向量及特征值对系统小干扰特性进行模式分析（特征值分析）也可归纳为系统频域分析。通过计算系统的特征值并进行模式分析，从而能够研究系统的振荡特性，并测定和计算大型电力系统的稳定性、可控性及状态变量的衰减和振荡。以此为基础，能够方便地设计某些控制器以改善系统的某些动态特性，例如电力系统稳定器（PSS）以阻尼系统振荡，并建立仅考虑主导状态变量的小干扰动态模型。

时域仿真以时间为仿真变量，重点分析电力系统在时间领域的动态响应情况。

根据考察的动态过程的不同，电力系统时域仿真可分为电磁暂态仿真、机

电暂态仿真和中长期动态仿真，图 1-1 给出了交直流电力系统电磁暂态、机电暂态和中长期动态示意图。

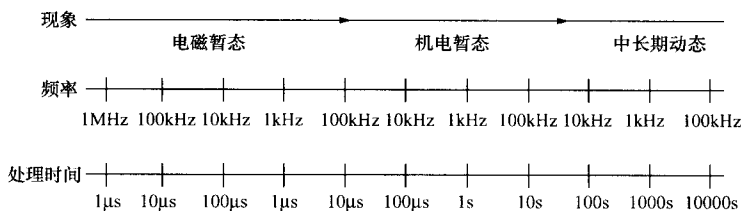


图 1-1 电磁暂态、机电暂态和中长期动态示意图

1.1.5 电磁暂态仿真、机电暂态仿真和中长期动态仿真

(1) 电磁暂态仿真。电磁暂态仿真必须考虑直流及其控制系统电磁暂态特性、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。电磁暂态仿真程序一般都基于 Dommel 算法，通过采用隐式梯形积分法将描述电力系统的微分方程、偏微分方程化为差分方程。

电磁暂态仿真模式下，系统通过代数方程、微分方程和偏微分方程进行完整描述，系统参数可以分相输入并可独立修改。电磁暂态仿真模式采用瞬时值方式进行计算，可以精确地模拟含有 HVDC 和 FACTS 装置的复杂系统的各种元件，如常规晶闸管、低频门极关断晶闸管（GTO）甚至高频绝缘栅双极晶闸管（IGBT）。因此，电磁暂态仿真模式能比较准确地分析交直流电力系统各种暂态（包括电磁暂态和机电暂态）问题。但是，由于电磁暂态模式是建立在解微分方程的基础上，它的求解速度较慢，所能够描述的系统也相对较小。所以，采用这种仿真模式进行大规模交直流电力系统仿真分析或研究 HVDC 和 FACTS 装置特性时，应根据所研究的重点和研究目的进行系统等值。

目前，国内外常用的电磁暂态仿真程序有 EMTP（Electro-Magnetic Transient Program）、加拿大 Manitoba 直流研究中心的 PSCAD/EMTDC、中国电力科学研究所的 EMTPE 和德国西门子公司的 NETOMAC 等。其中 PSCAD/EMTDC 和 EMTPE 都是在 EMTP 的基础上进行开发的。

(2) 机电暂态仿真。机电暂态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能。其中暂态稳定仿真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需要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。代数方程的求解方法主要有：进行迭代求解的牛顿—拉夫逊法、基于导纳矩阵形式的高斯—塞德尔法和基于稀疏三角分解的直接解法。微分方程的求解方法可采用显式积分法或隐式积分法，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。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。

机电暂态仿真模式下，采用有效值方式进行计算，电网络用基于复阻抗的代数方程描述。因此，机电暂态仿真模式下系统是一个纯基波模型。同时，在这一仿真模式下，发电机和其他电机既可以用完整的，也可以用降阶的微分方程来表示。由于引入了对称分量法（正序、负序及零序系统），机电暂态仿真模式也可以计算系统的不对称故障。这种仿真模式采用代数方程描述电网络，对所描述系统的大小一般没有限制。因此，在实际工程中特别是对于大型电力系统的稳定研究，机电暂态仿真程序如 PSS/E 及 BPA 程序得到了广泛的应用。但是，由于这些程序采用纯基波模型，在使用上也有一定的局限性，特别是它无法处理电力系统非线性特性等。

目前，国内外常用的机电暂态仿真程序有中国版 BPA 电力系统分析程序、中国电科院的电力系统综合程序 PSASP、美国 PTI 公司（现被德国西门子公司并购）的 PSS/E、美国电科院的 ETMSP、ABB 公司的 SIMPOW，另外，德国西门子公司 NETOMAC 也有机电暂态仿真功能。

(3) 中长期动态仿真。中长期动态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，电力系统中长期稳定计算也是联立求解描述系统动态元件的微分方程组和描述电力网络特性的代数方程组，以获得电力系统长过程动态的时域解。但是，电力系统长过程动态的响应时间常数从几十毫秒到 100s 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，中长期动态仿真程序在国内也有所应用，但应用还不广泛。国际上

主要的中长期动态仿真程序有法国电力公司等开发的 EUROSTAG 程序、美国电科院的 LTSP 程序、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。另外，美国 PTI 公司的 PSS/E 程序和捷克电力公司的 MODES 程序等也具有中长期动态稳定计算功能。

1.1.6 研究用电力系统仿真和培训系统仿真

根据仿真目的的不同，电力系统仿真可分为以分析研究为目的的研究用系统仿真和以培训运行人员为目的的培训系统仿真。

研究用系统仿真主要应用于电力系统规划、生产、运行、试验和研究等。

培训系统仿真以培训运行、操作人员为目的，要求培训仿真环境尽可能逼真，要求仿真器的操作机构、仪表、信号和音响等与实际系统相同，使学员有身临其境的感觉，培养学员对系统环境的反应能力和判断能力，提高运行技术水平和操作水平。相对而言，培训系统仿真对于动态过程的计算精度和数学模型的要求不高，只由培训的要求决定。目前用于电力系统培训的仿真系统有电力系统调度培训仿真系统、发电厂单元机组培训仿真系统、变电站培训仿真系统和变电运行/继电保护培训仿真系统等等。

1.2 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 HVDC、FACTS、安全稳定装置等大量先进技术的应用，对电力系统仿真技术也提出了新的要求，电力系统仿真技术必然也会随着电力系统的发展而快速发展。

目前，电力系统仿真正在向下列几个方面发展。

1.2.1 电磁暂态与机电暂态混合仿真

1.2.1.1 电磁暂态与机电暂态混合仿真的必要性

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，机电暂态仿真程序对 HVDC 和 FACTS 的模拟采用的是准稳态模型，这难以真实反映其动态特性。

而另一方面，电磁暂态仿真程序虽然能较真实地反映 HVDC 和 FACTS 的动态特性，但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，这在一定程度上丢失了电网的一些固有特性。

随着 HVDC 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。另一方面, 随着电网规模的不断扩大, 利用电磁暂态仿真程序分析电网需要进行越来越多的等值简化。因此, 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, 有必要进行电磁暂态与机电暂态混合仿真。

1.2.1.2 电磁暂态与机电暂态混合仿真的发展趋势

电磁暂态与机电暂态混合仿真有三种发展趋势:

(1) 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。

(2) 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) 电磁暂态程序与机电暂态程序进行接口。主要思路是直流输电系统、FACTS 等电力电子装置和其他非线性系统利用电磁暂态程序进行计算, 步长较小; 而交流系统利用机电暂态程序进行计算, 步长可以取大一些。这样可以计及直流输电系统、FACTS 等的电磁暂态特性。

1.2.1.3 电磁暂态与机电暂态混合仿真的关键技术问题

电磁暂态与机电暂态混合仿真需要解决的关键技术问题主要包括:

(1) 电磁暂态和机电暂态混合仿真的接口问题。电磁暂态计算的步长为微秒级(如 $50\sim 100\mu\text{s}$), 机电暂态计算的步长为毫秒级(如 10ms), 两者相差百倍以上, 因此, 必须开发两者之间的数字混合接口, 并选择适当的接口位置, 以保证混合仿真的实时性和数值稳定性。

(2) 混合仿真中电磁部分和机电部分相互之间如何表达以及数据交换方式问题。

(3) 电磁暂态和机电暂态混合仿真的数据交换算法问题。电磁暂态仿真采用瞬时值, 含有谐波并可能三相不对称, 而机电暂态仿真采用基波相量并且三相对称, 因此, 要解决两者之间的实时数据交换问题。

(4) 混合仿真的预测技术问题。在电磁暂态和机电暂态混合仿真的数据交