



普通高等教育“十二五”规划教材

电力系统仿真技术与实验

袁荣湘 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

电力系统仿真技术与实验

袁荣湘 编
陈德树 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

全书共 8 章分为：电力系统仿真原理和电力系统数字仿真实验两部分。第 1~4 章为电力系统仿真原理部分，主要内容有：电力系统仿真基本概念、物理仿真技术、物理仿真实验、电力系统数字仿真技术和各元件数学模型；第 5~8 章为电力系统数字仿真实验，主要内容有：电磁暂态仿真实验、机电暂态仿真实验、中长期全过程仿真、机—网接口、电力系统数字仿真器 RTDS、电力系统运行实验等。

本书可选作高等院校电气工程相关专业的实验教学用书，也可供电力系统相关专业的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统仿真技术与实验/袁荣湘编. —北京：中国电力出版社，2011.6

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-1794-9

I. ①电… II. ①袁… III. ①电力系统—系统仿真—高等学校—教材 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 120257 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 8 月第一版 2011 年 8 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 8.75 印张 211 千字
定价 15.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

电力系统仿真技术是以相似原理、信息技术、系统理论及与电力系统相关的专业技术为基础,以计算机和各种物理设备为工具,利用电力系统模型对实际的或设想的系统进行试验研究的一门综合性技术。通过将复杂的电力系统进行等值建模仿真,研究电力系统各种机电和电磁现象,可以加深对电力系统基本理论的理解,阐明电力系统的基本规律。因此,电力系统仿真在电力系统的研究工作中具有十分重要的意义。

本书介绍电力系统仿真的基本原理与实验方法。全书分为两部分:电力系统仿真原理和电力系统数字仿真实验。第一部分主要介绍电力系统仿真的基本概念、物理仿真技术、物理仿真试验、电力系统数字仿真技术和数学模型;第二部分主要介绍电磁暂态实验、机电暂态实验、中长期全过程仿真、机—网接口、电力系统数字仿真器 RTDS、电力系统运行实验等。本书希望达到理论与实验并重的目的,加深学生对理论知识的理解,把学生的动手能力和创新能力提升到更好的高度,为社会培养适应电力系统现代化建设需要的复合型、应用型工程技术人才。

全书共分 8 章,由袁荣湘主编。张志毅老师、研究生张宗包均参加了部分修改校对工作。感谢贺文涛提供第 3、7、8 章有关资料,钱珞江提供第 6 章的有关资料。感谢武汉大学电气工程学院的领导和同事提供的良好环境和诸多帮助。

特别感谢陈德树先生,他非常认真仔细地审阅书稿,提出了很多非常好的修改意见,先生严谨的治学态度和高尚的人格魅力始终激励着我前行。

由于编者水平和条件有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

作者于珞珈山

2011 年 6 月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 电力学科研究方法	1
1.2 电力系统仿真的分类和发展趋势	2
1.3 电力系统实验教学特点及其重要性	8
第2章 电力系统物理模拟原理	11
2.1 物理模拟的建模依据	11
2.2 同步发电机的模拟	15
2.3 同步发电机其他部分的模拟	18
2.4 变压器的模拟	19
2.5 输电线路的模拟	24
2.6 负荷的模拟	27
2.7 无穷大系统模拟	31
第3章 电力系统物理模拟实验	32
3.1 物理模拟实验的测量与控制	32
3.2 模拟系统元件的电气特性实验	36
3.3 物理模拟实验的基本操作步骤实例	46
3.4 物理模拟计算举例	48
第4章 电力系统数字仿真原理	52
4.1 综合相量和坐标变换	52
4.2 同步发电机数学模型	54
4.3 励磁调节系统数学模型	56
4.4 原动机及调速系统数学模型	57
4.5 负荷数学模型	59
4.6 变压器数学模型	61
4.7 输电线路数学模型	63
4.8 常微分方程数值解法	66
第5章 电力系统数字仿真实验	69
5.1 电力系统电磁暂态仿真	69
5.2 电力系统机电暂态仿真	73
5.3 电力系统的中长期过程仿真	75
5.4 简单电力系统的数字仿真实验	78
5.5 复杂电力系统的数字仿真实验	80

第 6 章 电力系统实时仿真技术与实验	86
6.1 基于并行处理的实时仿真	86
6.2 基于高性能服务器的实时仿真	88
6.3 电力系统实时数字仿真器 RTDS	88
6.4 基于 RTDS 的电力系统实时数字仿真	92
6.5 典型的实时仿真系统简介	99
第 7 章 电力系统运行实验	101
7.1 同步发电机安全运行极限	101
7.2 同步发电机进相运行实验	104
7.3 同步发电机失磁异步运行实验	106
7.4 同步发电机的不对称运行实验	110
7.5 电力系统静态稳定实验	111
7.6 电力系统暂态稳定实验	115
第 8 章 电力系统自动监控	119
8.1 自动监控系统的基本构成	119
8.2 自动监控系统主站	121
8.3 电力系统自动监控系统中的远方测控单元	124
8.4 电力系统自动监控系统实验	128
参考文献	134

第1章 绪 论

1.1 电力学科研究方法

电力学科研究方法和科技领域一样,可以概括为理论分析和科学实验两种途径。理论分析无疑是极其重要的,阐明电力系统的基本规律并探索新原理和新方法。但是由于电力系统及其暂态过程的复杂性,理论分析必须与科学实验相结合才能获得较全面的知识。同时,有些新的原理和规律也往往是从科学实验中总结出来的。

电力系统的科学实验研究可以在实际电力系统(简称原型系统)上进行,也可以在模拟的电力系统(简称模型)上进行。在原型上进行实验研究,可以得到最真实的结果,但是在电力系统原型上进行实验往往受到如时间、经济、安全等多方面因素的限制。同时一些可能造成严重后果的实验项目如电力系统的短路、振荡、失步等,受系统运行条件的限制,不一定都能进行,更不可能进行多次重复性的实验。而发展规划中的工程项目,则更难以在现有的电力系统中进行。因此,模型实验在电力系统的研究工作中具有十分重要的意义。

电力系统的模型实验方法有数学仿真和物理模拟两种。国外将物理模拟、数学仿真统称为 simulation。国内习惯将采用数学方法进行实验研究的方式称为数学仿真,将采用物理方法进行实验研究的方式称为物理模拟。

1.1.1 电力系统数学仿真

数学仿真是建立在数学方程式基础上的一种对原型系统进行仿真研究的方法。进行数学仿真需要写出各种物理现象在一定的假设条件下的运动过程数学方程式,借助专门的数学计算工具进行求解,以得出所需要的结果。

历史上曾出现过的电力系统数学仿真研究方法有以下几种:直流计算台、交流计算台、模拟式电子计算机等。直流计算台以电阻来模拟系统中的各种元件;交流计算台以电阻、电感、电容、变压器、移相装置来模拟系统中的各种元件,以直流电压或中频交流电压为电源,来计算系统中的功率分布、短路电流和系统的稳定性;模拟式电子计算机以运算放大器组成系统各元件的模型,用以分析系统的暂态过程。但由于这种计算机可供使用的元件数量有限,所能研究的系统规模不可能大,所以这类数学仿真始终未能得到广泛的应用。

目前,数字式电子计算机已广泛应用于电力系统的运行、设计和科学研究等方面。无论是复杂电力系统的潮流计算、故障分析、稳定性分析等常规计算还是电力系统的暂态过程仿真、谐波分析、继电保护整定等专业性更强的计算,都已有商业化软件包供选用。而且对硬件条件的要求较过去大为降低,几乎各种型号的微型计算机都可完成以上仿真计算。

以上四种研究工具一般都属于数学仿真,其共同点是必须首先明确要分析研究的电力系统及其各元件的数学表达式,建立起相应的数学模型,然后才能运用它们进行计算分析。

电力系统的数学仿真存在的主要问题是物理概念不够直观,同时它要求对所研究系统的全部环节都必须能列出数学方程式,这在一些新的领域和现象的研究可能会有一定的困难。

1.1.2 电力系统物理模拟

电力系统物理模拟采用和原型系统具有相同物理性质且参数的标幺值一致的模拟元件,根据相似原理建立起电力系统的物理模型。该物理模型是把实际电力系统按一定的比例关系模拟缩小,并且保留其物理特性的电力系统复制品。通俗地说,电力系统物理模拟就是把真实的电力系统缩小到实验室中,是真实电力系统的缩影。电力系统的物理模拟主要由模拟发电机、模拟变压器、模拟输电线路、模拟负荷和有关的调节、控制、测量、保护等模拟装置组成。在电力系统的物理模拟系统中因为有旋转运动的模拟发电机组、模拟动态负荷,故可以模拟电力系统的各种实时运行状态,反映电力系统的动态特性等,所以电力系统的物理模拟也称为电力系统的动态模拟(简称动模)。

电力系统动态模拟的主要特点是能够直观地观测到各种现象的物理过程,便于获得明确的物理概念,特别是某些新的问题和物理现象,由于认识上的限制还不能或不完全能用数学方程式来表示时,利用物理模拟可以探索到现象的本质及其变化的基本规律。物理模拟的实验结果,还可以用来校验电力系统的理论和计算公式以及在建立数学方程式时各种假设的合理性,并为理论的简化指出方向,进而使理论得到进一步的完善和发展。动态模拟的另一个显著特点是可以将新型的继电保护和自动装置直接接入动态模拟系统中,进行各种运行工况下的短路故障实验,考核装置的各种性能。动态模拟的缺点是待研究系统的规模不能过大,而且模型装置的参数调整范围有一定的限制,实验前模拟参数的配置和改变运行方式后的参数调整比较复杂。

综上所述可知,电力系统的各种研究工具都有其特点和适用范围,所以,取长补短、相互配合才是较好的电力系统研究解决方案。

1.2 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,但电力系统仿真却只有几十年的历史。现代电力系统是一个强非线性、高维数的系统,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,解决了电力系统规划、生产、运行、试验、研究和培训等方面的很多实际问题,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,同时对电力系统仿真也提出了更高的要求。

1.2.1 电力系统仿真分类

根据不同的标准,电力系统的仿真可以分成不同的类型。

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、自动调压器(AVR)、调速器、电动机、变压器、输电线路等,用参数成比例缩小的物理元件模拟。物理仿真实验即我们常说的动模实验。

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的变化,动态模拟方法受到了很大的限制。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拟系统，我们把建立电力系统的数学模型并在计算机上做实验的仿真系统称为电力系统的数字仿真。

数字物理混合仿真（又称为数模混合仿真）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。基于不同性质模型的仿真系统具体分类如图 1-1 所示。

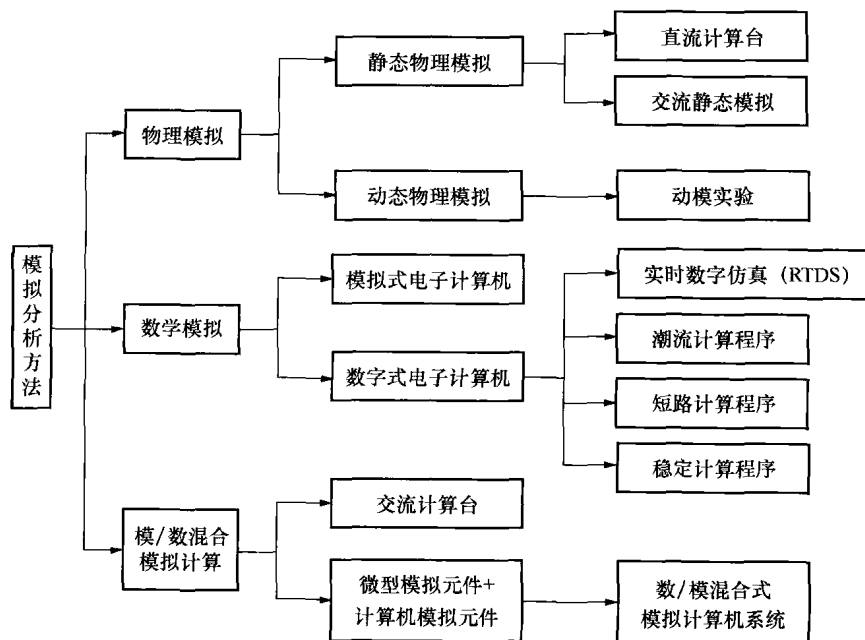


图 1-1 电力系统仿真分类

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的各类过程，并能接入实际物理装置进行实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时间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，电力系统的实时仿真在一定程度上能够做到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，系统仿真计算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往往需要几秒钟甚至几分钟才能仿真计算完成。

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电网监控和数据采集系统（SCADA）或广域动态监测系统（WAMS）提供的实时数据进行仿真计算。

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。

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域的响应情况。频域仿真的范围可从零赫兹到数兆赫兹，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的小干扰特性进行模式分析（特征值分析），也可归纳为系统的频域分析。通过计算系统的特征值，并进行模式分析，进而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。

时域仿真以时间为仿真变量，重点分析电力系统在时域内的动态响应情况。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 1-2 给出了交直流电力系统电磁暂态、机电暂态和中长期动态的时频跨度示意图。

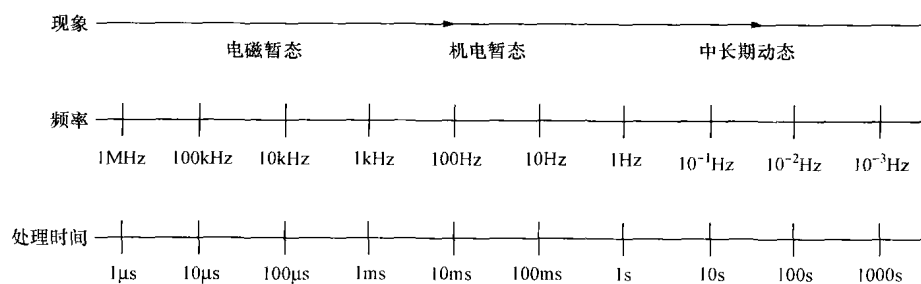


图 1-2 电磁暂态、机电暂态和中长期动态的时频跨度示意图

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。

电磁暂态仿真考虑直流及其控制系统的电磁暂态特性、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，电力系统电磁暂态仿真的数学模型必须建立起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应用 Dommel 算法，通过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，对电力系统通过代数方程、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 装置的复杂系统中的各种元件，如常规晶闸管、低频门极可关断晶闸管（GTO）、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的各种暂态（包括电磁暂态和机电暂态）问题。但是，由于电磁暂态仿真是建立在解微分方程基础上的，求解速度慢，所能够描述的系统规模也相对较小。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 装置的特性时，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、中国电力科学研究院的中国版 EMTP 和德国西门子公司的 NETOMAC 等。其中 PSCAD/EMTDC 是在 EMTP 的基础上

进行的开发。

(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。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系统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的微分代数方程组,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,电力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的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、负序和零序系统),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力网络,对所描述系统的大小没有限制。因此,在实际工程中,特别是在对大型电力系统的稳定研究中,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。

目前,国内外常用的机电暂态仿真程序有中国电力科学研究院的中国版 BPA、电力系统综合程序 PSASP、美国 PTI 公司的 PSS/E、美国电科院的 ETMSP、ABB 公司的 SIM-POW 等,另外,德国西门子公司的 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的动态仿真,要计入一般暂态稳定仿真过程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、水力系统或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范围内的动态特性。

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来获得电力系统长过程的动态时域解。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的计算技术。

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 EUROSAG 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 程序也具有中长期动态稳定计算的功能。

6. 研究用电力系统仿真和培训用电力系统仿真

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电力系统仿真和以培训运行人员为目的的培训用电力系统仿真。

研究用电力系统仿真主要应用于电力系统规划、生产、运行、实验和研究等。培训用电力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,要求仿真器的操动机构、仪表、信号和音响等与实际系统相同或相似,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,提高运行技术和操作能力。相对而言,培训用电力系统仿真对动态过程的计算精度和数学模型的要求不高,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。

1.2.2 电力系统仿真技术发展趋势

电力系统的发展对其运行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须随着电力系统的发展而发展。目前,电力系统仿真正在向以下几个方向发展。

1. 电磁暂态和机电暂态混合仿真

(1) 电磁暂态和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 等电力电子装置的动态特性,但受模型和算法的限制,仿真规模不大,在进行电磁暂态仿真时,一般都要对电力系统进行等值化简,这在一定程度上会丢失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和机电暂态的混合仿真。

(2) 电磁暂态和机电暂态混合仿真的发展趋势。

电磁暂态和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需要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具有电磁暂态仿真功能的方向发展。主要思路是在机电暂态仿真程序中对电磁暂态仿真过程有重要影响的电力电子等元件的快速暂态过程和非线性特性进行模拟,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。主要思路是对直流输电系统、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;而对交流系统利用机电暂态仿真程序进行计算,步长可以取大一些。这样可以计及直流输电系统、FACTS 等电力电子元件的电磁暂态特性。

(3) 电磁暂态与机电暂态混合仿真的关键技术问题。

进行电力系统电磁暂态和机电暂态混合仿真需要解决的关键问题主要包括以下四方面。

1) 电磁暂态和机电暂态混合仿真的接口问题。电磁暂态仿真计算的步长为微秒级(如 $50\sim 100\mu\text{s}$),机电暂态仿真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之间如何相互表达以及它们之间的数据交换方式问题。

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假设三相对称,需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。在电磁暂态和机电暂态混合仿真的数据交换过程中会存在一个机电暂态仿真步长的延迟,而电磁暂态仿真步长与机电暂态仿真步长相差很大,因此,必须利用预测技术,以提高仿真精确性并保持仿真数值的稳定性。

2. 电力系统的全过程动态仿真

在电力系统的远距离输送容量不断增加、输电网络重载问题日益突出的情况下,电力系统的暂态稳定及在暂态稳定之后的长过程动态稳定性(包括电压稳定性)将逐步成为影响电力系统安全稳定运行的重要问题。分析电力系统的长过程动态稳定性问题,避免发生大面积的停电事故,以便研究防止事故扩大的有效措施,必将成为电力系统计算分析的一项重要内容。因此,对电力系统长过程动态仿真程序的开发是非常必要的。

早期的电力系统长过程动态仿真软件,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过程)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,在长过程动态仿真中,必须考虑机电暂态过程仿真功能。

电力系统全过程动态仿真就是要把电力系统的机电暂态过程、中期过程和长期过程,甚至电磁暂态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的统一。因电力系统是典型的刚性系统,故需要采用具有自动变阶变步长的刚性数值积分方法。

3. 大规模复杂电力系统的实时仿真系统

电力系统中存在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)都要经过实时仿真实验才能投入实际电力系统使用。因此,发展数字式或数模混合式电力系统实时仿真装置是必要的。另一方面,由于现代的交流电力系统越来越庞大,运行越来越复杂,大规模复杂电力系统实时仿真系统作为一种高效、强大的分析工具也越来越受到重视。

但是,目前的实时仿真装置(包括全数字和数模混合式)的仿真规模不大,在进行大电网的仿真实验时,都要进行大规模的等值简化,因此实时仿真装置的应用,特别是在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。

由于受实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、计算机技术的不断提高、仿真技术的日益完善,在今后一段时间内,电力系统实时仿真装置对大规模复杂电力系统的实时仿

真能力将会不断增强。

4. 电力系统数字仿真

与物理仿真（动模）和数模混合仿真相比，电力系统数字仿真具有占地面积小、建设周期短、可扩展性好、重复实验方便等优点，是电力系统仿真的主要发展方向。

同时计算机软件和硬件技术的快速发展使复杂电力系统元件的模拟精确度也得到了重大改进，而且，随着微处理器技术、现代数字信号处理技术、并行处理技术和电力系统数字计算并行算法的发展，数字仿真计算速度也大大加快。因此，电力系统数字仿真将会得到越来越广泛的应用。

5. 大规模电网的在线实时分析及预决策

大规模电网的实时仿真计算也一直是电力系统研究、分析追求的目标，如果能够达到实时或超实时的仿真计算，就可以重现或者复制实际运行中的电力系统，这对电力系统的运行和分析、研究是非常有意义的。

电网在线实时分析及预决策可以利用灵敏度技术在参数空间中得到稳定域的边界。同时，应用计算机领域中的可视化技术将传统方式的信息表达为动态图像信息，再通过先进的图形技术、显示技术将用数字、表格等传统方式表达的信息转换为实时图形、图像信息，这样就可以将电力系统的潮流、电压稳定域、不稳定域和暂态稳定域等用形象直观的可视图形表达出来。不论系统中相继发生了多少条支路的开断和多少个注入量的切除，运行人员都能够清楚地把握住系统的实际稳定程度并采取必要的稳定控制措施。

另外，当系统发生故障时，在线分析工具能在线采集到实际的运行工况，并能在很短的时间内对该运行工况进行详尽的研究，不断刷新控制措施表，快速搜索对应于给定故障集的、满足一定的系统稳定裕度的、控制代价最小的控制策略。

6. 数字电力系统

所谓数字电力系统，就是以三维空间信息技术为基础，将某一实际运行的电力系统的规划设计、物理结构、物理特性、技术性能、经济管理、环保指标、人员状况、科教活动等数字化、可视化、实时或准实时地描述与再现。

数字电力系统可以增加电力系统规划、生产、运行和电力系统研究的效率，其包含的内容很多，工程庞大，但随着现代信息技术、计算机技术的快速发展，数字电力系统也将会得到更快的发展和普及。

1.3 电力系统实验教学特点及其重要性

1.3.1 实验教学在高等教育中的重要地位

21 世纪迎来了知识经济时代，知识已成为经济发展的核心动力。社会的发展、知识的不断创新、高新技术的发展和产业化，都依赖于具有创新、创造力和善于运用知识的人。经济和科技的竞争，是人才的竞争，更是人才创新精神和创造能力的竞争。这就要求调整过去那种“传道、授业、解惑”的传统教学模式，把培养学生的创新能力放到应有的高度。

实验教学是高等教育中理论联系实际的重要教学环节，对培养学生的独立工作能力、创新能力，巩固和验证所学的理论知识具有重要作用。

第一，从认识论的角度看，实践教育在高等教育中占有重要地位。实践是认识的基础，

对认识活动起着重要的作用。学校是传授知识的场所,但学生要获得这些知识,并在已有的理论基础上创新,都离不开实践。实践是激励和引导学生学习和掌握知识的动力源泉,是学生获得完全的知识而不是抽象的、片面的知识的必要条件,是促进学生知识转化的必要途径。因此,实践教育是创新人才培养过程中贯穿始终的、不可缺少的重要组成部分。

第二,从人才培养的角度看,实践教育对高校培养创新拔尖人才尤其重要。实践教育对培养有较高的思想素质、较好的知识结构和较强的创新能力的学术大师、治国之士和兴业之才,有着至关重要的作用。

第三,从世界范围看,加强实践教育已经成为高等教育发展的潮流。据了解,尽管各国高等教育有其独特的文化背景和发展轨迹,国外教育教学与课程建设发展、改革的经验对我们未必有直接的适用性,然而上面谈到的实践教育的两点,实际上已经成为各国高等教育发展的共识。

总之,实践教育是人才培养不可缺少的重要环节。无论是对学生的业务培养、还是对学生思想素质的提高,无论是对理工科学生、还是对人文社会科学领域的学生,实践教育都是非常重要的。

1.3.2 电力系统实验课的特点

1. 电气工程及其自动化专业对实验教学的基本要求

高校电气工程及其自动化专业是要培养适应电力系统现代化发展的具有创新精神的复合型、应用型工程技术人才。该专业所学内容涉及面较广,综合了微电子、电力电子、计算机、传感器技术、检测与转换、控制等多项技术,系统理论发展很快,知识结构综合程度也很高。电气工程及其自动化专业实验教学要求学生既要牢固掌握基础理论,又能掌握研究问题的方法,具备较强的理解能力、动手能力和科研能力。

现代电力系统是人类所建立的最复杂的工业系统之一。电力系统是由多台发电机、变压器、输电线路和负荷等电气元件组成,电网规模可能达到几万个节点和几十万条支路。在实验教学中需要建立一个高度自动化的多机复杂电力系统模型,使它能够反映和仿真现代电能的生产、传输、分配和使用的全过程,充分体现现代电力系统高度自动化、信息化、互动化的特点,实现电力系统检测、控制、监视、保护、调度的自动化。这样才能加深学生对理论知识的理解并进行理论应用思考,提高学生的综合素质和创新能力,使之成为适应电力系统现代化建设需要的复合型、应用型工程技术人才。

2. 电力系统实验教学目标和要求

实验教学目标:为电气工程及其自动化专业学生从事电力系统运行、工程、设计和理论研究建立必要的实践基础,提高其工程实践动手能力。

实践教学的设计思想:对课程重点内容的基本原理进行验证,帮助学生理解课程重点内容,培养学生对工程问题的观察和分析能力。

实验教学要达到的效果:一是要优化实验教学体系,培养学生的创新能力,激发学生对科学实验的兴趣,发挥学生的想象力和创造性,激发学生的创新潜能。二是通过做综合性实验项目,让学生了解电力系统发电、输电、配电、用电的全过程,对电力系统有全局认识,加强工程概念。三是实验教学,既注重学生纵向知识的系统性,又注重学生横向知识的相互渗透,同时可以增强学生的计算机应用能力。

3. 电气工程及其自动化专业的实验室建设和发展

电力系统及其自动化专业的实验教学环境可分课程实验环境和综合仿真实验环境。相关实验室有：电力系统动态模拟实验室、电力系统数字仿真实验室和电力系统实时仿真实验室等。

实验室的建设思想是将课程实验与综合实验、实践教学与科学研究结合起来，充分发挥设备的使用效率。这些实验室既是电气工程学科学生的课程实验和综合实验环境，也是学生和教师的科研环境。

电力系统仿真实验平台是电力系统的物理模拟，是真实电力系统的缩影。由模拟发电机、模拟变压器、模拟输电线路、模拟负荷、元件级数字控制装置、系统级数字监控系统等设备组成，反映了电力系统电能生产、输送、消费三大环节，同时也模拟了原动机特性及调速特性、发电机励磁特性，可以模拟现代电力系统中各实时运行状态，反映电力系统的动态特性。因此，是研究电力系统的重要工具之一，能够复现实际电力系统的各种运行情况（包括各种静态和动态过程）。同时，为了能进行大规模电力系统的教学实验，电力系统仿真实验平台还同步建成了电力系统全数字仿真系统，将大规模复杂电力系统用特高阶微分代数方程组描述，对物理系统的运动轨迹实施实时数字跟踪仿真，逼真模拟电力大系统的稳态、机电暂态和由此引发的保护和自动装置的动作过程。该数字仿真系统可 24 小时连续运转，是实际电力大系统的“影子系统”。通过该实验课，学生可以自己独立动手完成发电机的并列、有功无功调节、系统稳定运行、暂态运行、失磁等与理论课结合紧密的研究型实验。通过实验方案的设计、参数计算、电网接线、参数调整、正常运行方式的建立、实验研究，直到数据整理、实验结果分析和撰写实验报告等一整套工作，培养学生的动手实践能力、综合科研能力、团队合作精神和创新精神。在该实验课中也可将若干部分实验内容组合成一个课题深入研究，这样可以充分发挥在科学实验方面的主动性和创造能力，提高实验教学的水平和质量。

电力系统规划、设计、运行、控制和理论研究等都离不开电力系统仿真。电力系统数字仿真实验室一般都配置有电力系统分析综合程序等电力系统数字仿真软件及电力系统数字仿真研究平台，可以进行电力系统的各种潮流分析实验、同步发电机的静态安全运行极限实验等，可以为培养电气工程与自动化专业学生从事电力系统运行、工程、设计和理论研究建立必要的基础。

将现代仿真技术应用在电气工程及其自动化专业的实验教学中，为学生提供一种系统化的、与现实十分接近的实验环境，让学生在其中进行综合性的实验训练，已成为电气工程及其自动化专业实验教学的鲜明特色。

第2章 电力系统物理模拟原理

电力系统物理模拟是建立在相似原理的基础上,反映实物物理过程的模拟研究方法。电力系统物理模拟是保证在模型上反映的过程和实际系统中的过程相似,并且模型上的过程和原型的过程具有相同的物理实质。电力系统物理模型能够考虑许多在数学模拟中难以计及的因素,如参数随电流及频率变化的非线性关系、电机内部过程的影响等,不受列数学方程式或求解整个系统复杂的高阶微分方程式的限制。但是动态模拟也有不足之处,主要是难以模拟大规模系统,而且模型机组必须专门设计制造,参数的调整和改变比较麻烦,灵活性不够,而且准确度也不太高等。所以,应根据研究的对象和问题以及数学模拟和物理模拟各自适宜的应用特点和范围,选择合适的研究方法。但是,对电力系统的研究必须理论和实验相结合,数学模拟和物理模拟相互补充配合,以促进研究和解决电力系统中的各种复杂问题。

2.1 物理模拟的建模依据

2.1.1 相似理论

1. 相似第一定理

相似第一定理最简洁的表述为:相似现象的相似指标等于1。

【例2-1】 设有两个RL电路,如图2-1所示。

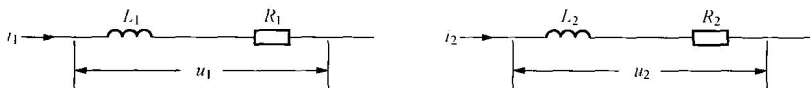


图2-1 RL电路示意图

对于左边电路有

$$u_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt_1} \quad (2-1)$$

对于右边电路有

$$u_2 = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt_2} \quad (2-2)$$

式(2-1)、式(2-2)也可写为

$$\frac{u_1}{i_1 R_1} = 1 + \frac{L_1}{i_1 R_1} \frac{di_1}{dt_1} \quad (2-3)$$

$$\frac{u_2}{i_2 R_2} = 1 + \frac{L_2}{i_2 R_2} \frac{di_2}{dt_2} \quad (2-4)$$

如果这两个电路的电过程相似,则必在各对应的物理量之间存在着一定比例关系,如式(2-5)所示。