



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
21 世纪电力系统及其自动化规划教材

第2版

电力系统综合实验 ——原理与指导

杨德先 陆继明 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
21 世纪电力系统及其自动化规划教材

电力系统综合实验

——原理与指导

第 2 版

主编	杨德先	陆继明
参编	叶俊杰	易长松
主审	涂光瑜	吴希再

机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书系高等学校“电气工程及其自动化”专业以及相关专业的专业实验课教材。内容涵盖“电气工程基础”、“电力系统自动化”、“电力系统继电保护”、“电力系统分析”、“同步发电机运行”等课程的主要实验项目、实验原理和实验方法,同时还介绍了电力系统物理模型的建模方法。

全书共分八章。第一章论述电力系统的研究方法、手段和实践环节在教学中的重要性;第二章介绍电力系统主设备的特性实验;第三章讲述电力系统自动化的主要内容及相关实验;第四章阐述继电保护基本原理和微机保护、常规保护的实验;第五章介绍同步发电机在非正常运行方式下的实验;第六、七章讨论了电力系统静态、暂态稳定性实验;第八章介绍电力系统动态模拟的相似理论和模型参数的建立以及建模计算和实验方法。

该书原理阐述简明扼要,实验指导突出可操作性,适用于高等学校电气工程类师生使用,也可供电力系统工程技术人员参考。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 下载索取。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统综合实验:原理与指导/杨德先,陆继明主编.—2版.—北京:机械工业出版社,2010.2

普通高等教育“十一五”国家级规划教材.21世纪电力系统及其自动化规划教材

ISBN 978-7-111-29790-1

I. ①电… II. ①杨…②陆… III. ①电力系统—实验—高等学校—教材 IV. ①TM7—33

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第028073号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:贡克勤 责任编辑:贡克勤

版式设计:霍永明 责任校对:申春香

封面设计:王伟光 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2010年5月第2版第1次印刷

184mm×260mm·12.75印张·314千字

标准书号:ISBN 978-7-111-29790-1

定价:26.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者服务部:(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

21 世纪电力系统及其自动化规划教材 编 委 会

主任委员：熊信银

副主任委员：尹项根 韩学山 李庚银 刘宪林
李 扬 陈少华 贡克勤 杨德先（兼秘书）

委 员：（以姓氏笔划排序）

尹项根	毛承雄	车仁飞	文明浩	文劲宇
叶俊杰	刘学东	刘宪林	孙丰奇	许 珉
李 扬	李庚银	吴耀武	陆继明	张 利
张 波	杨国旺	杨宛辉	杨淑英	杨德先
陈 卫	陈少华	罗 毅	房俊龙	易长松
赵书强	赵玉林	赵丽平	娄素华	栗 然
盛四清	常鲜戎	梁振光	韩学山	游志成
熊信银	魏 萍			

前 言

实践教学是高等教育结构中的重要组成部分，它承担着科学研究、知识创新、教学改革和教书育人等学校的主体工作，对于学生综合素质的培养具有不可替代的作用，尤其是对于学生创新能力的培养，具有其独特的地位和作用。

本书是根据加强实践教学环节、拓宽专业知识面的教学改革的需要而编写的专业综合实验教材，涉及电力系统工程各个方面，诸如电力系统主设备的电气特性、电力系统综合自动化、电力系统继电保护和微机保护、同步发电机的正常和非正常运行、电力系统静态、暂态稳定性分析、电力系统动态模拟等。为加深对课程内容的理解，书中大部分章末附有复习思考题，附录给出了阅读正文的有关章节时所需的参考资料。

本书的编写力求深入浅出，理论联系实际，重实际应用，并且具有重点突出、层次分明、逻辑性强、便于自学的特点。

本书由华中科技大学杨德先、陆继明担任主编。杨德先编写第一、五、六、七、八章及附录，陆继明编写第三章，叶俊杰编写第二章，易长松编写第四章。董庆、韩萍萍、魏玉玲为本书编写做了大量辅助工作，最后由杨德先负责全书的统稿。本书由华中科技大学涂光瑜教授、吴希再教授担任主审，他们对本书进行了全面仔细的审阅，并提出了许多宝贵意见和建议，在此谨表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中错误及不当之处在所难免，恳切希望使用此书的读者提出意见（ydx@mail.hust.edu.com）。

编 者

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 实践环节在教学中的地位	1
一、高等工程教育的特点	1
二、综合化的专业实践教学	1
第二节 电力系统研究方法	3
一、电力系统的数字仿真	3
二、电力系统的物理模拟	5
三、物理模拟与数字仿真的关系	6
第三节 电力系统教学实验平台的建设	7
一、建设教学实验平台的指导思想	7
二、开放式教学实验平台的特点	8
第二章 电力系统主要电气设备特性	9
第一节 概述	9
第二节 同步发电机实验	10
一、同步发电机空载、短路特性实验	10
二、同步发电机零功率因数负载特性实验	12
三、同步发电机参数测定实验	13
四、同步发电机 V 形曲线测定实验	16
五、励磁绕组时间常数 T_{d0} 的测量	18
第三节 电力变压器实验	18
一、电力变压器空载、短路特性实验	18
二、电力变压器联结组别实验	21
三、电力变压器负载特性实验	23
复习思考题	25
第三章 电力系统自动化	26
第一节 概述	26
第二节 同步发电机自动准同期控制器	27
一、同步发电机自动准同期控制	27
二、准同期控制的理论问题	27
三、合闸控制原理	29
四、微机准同期控制器的工作原理	29
五、准同期并列实验	32
第三节 同步发电机励磁控制系统	34
一、概述	34
二、励磁系统的励磁方式	36

三、励磁调节器的基本组成及其工作原理	37
四、励磁控制系统实验	39
第四节 电力系统调度自动化	47
一、概述	47
二、调度自动化系统的基本构成和功能	48
三、调度自动化的发展	50
四、电力系统有功功率平衡与频率调整	51
五、电力系统无功功率平衡与电压调整	54
六、电力系统调度运行实验	58
复习思考题	65
第四章 电力系统继电保护	66
第一节 概述	66
一、继电保护的任务、作用原理及基本要求	66
二、继电保护的分类	67
三、继电保护的基本构成	67
第二节 常用继电器的特性及测试	69
一、电磁型电流、电压继电器特性与测试	69
二、整流型功率方向继电器的特性实验	72
三、整流型方向阻抗继电器的特性与测试	75
四、差动继电器特性实验	80
五、重合闸与继电器的配合实验	85
第三节 输电线路的电流、电压保护实验	90
一、电流、电压保护实验基本原理	90
二、输电线路电流、电压保护实验	93
三、零序电流保护的基本原理	94
四、双电源线路保护的作用原理及实验	97
第四节 输电线路的阻抗保护实验	98
一、阻抗保护的基本原理及特性	99
二、输电线路阻抗保护实验	101
第五节 变压器保护实验	102
一、电力变压器常见故障及正常运行状态时保护的配置	102
二、变压器纵联差动保护基本原理	103

三、变压器相间短路的后备保护	105	三、网络结构变化对静态稳定的影响	
四、变压器保护实验	107	实验	143
第六节 发电机保护实验	111	四、发电机电动势 E_q 不同时对静态稳定的影响实验	144
一、发电机的保护配置	111	五、串联电容补偿对静态稳定影响实验	144
二、发电机纵联差动保护和后备过电流保护实验	112	复习思考题	146
三、发电机失磁保护原理	113	第七章 电力系统暂态稳定分析	147
复习思考题	115	第一节 电力系统暂态稳定性	147
第五章 同步发电机的非正常运行	116	一、电力系统暂态稳定性概念	147
第一节 同步发电机应具备的能力	116	二、等面积定则	147
第二节 同步发电机进相运行	117	三、短路类型对暂态稳定的影响实验	149
一、进相运行的基本概念	117	第二节 提高系统暂态稳定的措施	150
二、进相运行对系统的影响	118	一、提高系统暂态稳定性的一般方法	150
三、同步发电机进相运行实验	119	二、继电保护的动作时限对暂态稳定影响实验	151
第三节 同步发电机的不对称运行	120	三、强行励磁对暂态稳定影响实验	151
一、不对称运行对系统的影响	120	四、自动重合闸装置对暂态稳定影响实验	152
二、负序电流对发电机的危害	121	复习思考题	153
三、同步发电机的不对称运行实验	121	第八章 电力系统动态模拟	154
第四节 同步发电机失磁异步运行	122	第一节 电力系统模拟理论	154
一、发电机失磁后的机电暂态过程	123	一、模拟理论的基本概念	154
二、失磁后观察到的现象	125	二、相似定理	155
三、发电机失磁异步运行实验	126	三、确立相似判据的方法	157
复习思考题	127	四、各种基本电路的相似判据	158
第六章 电力系统静态稳定分析	128	第二节 同步电机模拟及参数调整方法	162
第一节 电力系统静态稳定性	128	一、同步电机物理模拟的条件	162
一、电力系统静态稳定性基本知识	128	二、模拟同步电机设计方面的主要特点	163
二、简单电力系统的静态稳定实验	131	三、模拟发电机的容量及改变容量对发电机参数的影响	163
三、复杂电力系统的静态稳定实验	132	四、模拟比与标么值的关系	164
第二节 同步发电机安全运行极限	134	五、模拟发电机组参数的调整方法	164
一、同步发电机的运行特性	134	第三节 主要电气设备的模拟	165
二、同步发电机安全运行极限测定	135	一、励磁系统的模拟	166
第三节 发电机功率特性和功率极限测定	137	二、原动机及其调速系统模拟	169
一、发电机的功率特性方程	137	三、变压器的模拟	171
二、无自动励磁调节时功率特性测定	139	四、输电线路的模拟	173
三、采用自动励磁调节器时功率特性测定	140	五、电力系统的负荷模拟	174
第四节 提高电力系统静态稳定性的措施实验	141	第四节 建模计算举例	177
一、保证和提高电力系统静态稳定性的措施	141	一、同步发电机模拟计算举例	177
二、自动励磁调节器对静态稳定的影响实验	142	二、简单电力系统模拟计算举例	180

三、特高压系统模拟计算、设计举例	183	系统	190
复习思考题	187	四、DJZ-ⅢC 型电气控制及继电保护综合	
附录	188	试验台	192
一、功率角测量装置原理说明	188	五、WLZB-Ⅲ 双电源线路微机保护教学	
二、WDT-Ⅲ 型电力系统综合自动化		实验台	193
试验台	189	六、HDDJ-Ⅱ 型电机教学实验台	194
三、PS-5G 型电力系统微机监控试验		参考文献	196

第一章 概 述

第一节 实践环节在教学中的地位

以高新技术为核心的知识经济将在 21 世纪占主导地位，国家综合国力和国际竞争能力越来越取决于教育、科学技术的发展和知识创新的水平，教育将始终处于优先发展的战略地位。当前，许多国家都把振兴教育作为面向新世纪的基本国策。这些动向预示未来教育将发生深刻的变革。

一、高等工程教育的特点

高等工程教育无疑是要培养工程人才，无论是侧重工程技术，还是侧重工程科学，他们都是未来的工程专业人士，都必须以工程实践为基础，以实践作为立足的根本。作为高等教育结构中的重要组成部分——实验（实践）教学，承担着科学研究、知识创新、教学改革和教书育人等学校的主体工作，它对于学生的思想素质、工程素质、科学素质、文化素质、身心素质等综合素质的培养具有极其重要的作用，尤其是对于学生创新能力的培养，具有独特的地位和作用。它是高等学校培养人才这一系统工程中的一个重要环节。

（一）工程教育的本质

“工程是关于科学知识开发应用以及关于技术的开发应用，以便在物质、经济、人力、政治、法律和文化限制内满足社会需要的一种有创造力的专业”，工程的本质是“综合、创造、实践”。首先是它把技术和非技术，科学与非科学联成一个无间隙的有机整体，它需要有经济、政治、人文社科知识，也需要有技术和科学知识乃至非科学、非技术的不知其然的直觉、灵感想象力等。一句话，工程的本身意味着多学科、多知识的综合。另外，由于工程的广度和深度随着时代在变化，它所需要的知识水平和结构也不是昔日的工程所能比拟的。它必须具有创新特征，不仅致力于社会眼前的实际功利，更着眼于长远的发展和进步，需表现出丰富的想象力和创新精神，以使工程专业具有强大的生命力。

（二）工程教育的培养目标

时代在变化，工程的内涵不断丰富和深化，工程专业的社会责任不断加大和发展，工程教育培养的是现代化工程活动中担当大任的人才，并对未来工程教育和实践发挥方向性的影响。因此，学校不仅应使他们的学生具有扎实的基础理论知识，并经过基础科学的严格训练，具备一流工程教育的基础，而且还须经过现代化工程实践训练和多元化的能力和素质培养，这就是所谓能力多元化的教育，只有在多元化教育模式下培养的学生才可能具有竞争力和富于挑战性，才有可能承担现代化综合工程的一切工作，才可能贡献国家，开创未来。

二、综合化的专业实践教学

综合实践教学是素质教育的重要环节，不少教育家认为“没有综合化就不会产生伟大的

人物”。美国的高等教育研究人员也认为，综合性的专业和课程有利于培养现代人才的各种素质和思维能力以及组织、交际和实际工作等方面的能力。目前在高等工程教育中，很多的实践性教学仍基本停留在分散而独立的验证某个概念、理论、方法的低水平上。这种实践教学训练很难培养面向 21 世纪知识经济为核心时代的具有综合思维能力和综合处理问题能力的复合型技术人才。

电气工程 (Electrical Engineering, EE) 是现代科学技术领域的核心学科之一，更是当今高新技术领域的关键学科。电子技术的飞速发展推动了以计算机网络为基础的信息时代的到来，并将极大地改变人类的的生活和工作方式。从某种意义上讲，电气工程的发达程度代表着一个国家的科学进步水平。正因如此，电气工程的教育和科研在发达国家高校中一直占据着十分重要的地位。

(一) 电力系统的组成和特点

电力系统是指由进行电能生产、变换、输送、分配、消费的各种设备按照一定的技术和经济要求有机组成统一系统的总称，它由发电厂、变电所、输配电线路及各种用电设备组成。为了确保电力系统的安全、可靠运行，电力系统还包括继电保护、自动装置、通信、调度自动化及自动监测和控制系统等设备。

由于发电和用电同时进行，并且发电、配电、用电之间功率平衡，各个设备环节之间具有十分紧密的相互依赖关系。不论生产和变换能量的原动机、发电机，还是输送、分配电能的变压器、输配电线路以及用电设备等，只要其中的任何一个元件设备发生故障，都会影响电力系统正常工作。电能生产与国民经济各部门有着极为密切的关系。因此，在电力系统中要求进行快速控制和快速切除故障，否则将危及整个电力系统的安全稳定运行。

根据电力系统的上述特点以及电力工业在国民经济中的重要地位和作用，对电力系统提出了下列基本要求：

- 1) 保证安全可靠的供电。
- 2) 保证良好的电能质量。
- 3) 保证系统运行的经济性。

(二) 电力工业对人才的要求

在实现西电东送，全国联网的建设进程中，具有特高压、大机组、大电网、远距离输电特色的中国电力工业，由于自动化程度越来越高，工程趋于系统化以及机、炉、电的一体化使得电力企业的岗位由孤立、分散、专一变为更加具有复合型，电力企业中管理、生产、经济相融合，使得既懂现代科学技术，又懂经营管理的高素质的复合型人才将成为最受电力企业欢迎的人才。

随着我国大容量发电机组的投入运行以及特高压交流和直流远距离输电的混合电网的建设，以三峡电网为中心的全国性电力系统逐渐形成，全国电网已经发生巨大的变化。电力系统的不断扩大，使电力系统的结构和运行方式变得越来越复杂多变，对电力系统的综合科学技术水平的要求也越来越高，使得电力系统的技术更新速度大大加快，不同技术之间的相互渗透、相互融合也越来越普遍。因此，作为面向 21 世纪的电气工程将对学生提出更高的要求，即更应具有知识的广泛性、思维的创造性和对未来社会的挑战性。

因此，只有站在新时代对人才的新要求高度，确定创新、复合型人才为培养方向，必须从今后的工程技术和生产的发展实际出发，把对人才的素质和特点的要求作为考虑问题的依

据,以系统观点和系统方法去观察研究和解决问题。通过综合化的专业实践性教学,使学生成为具有综合思维能力和综合处理问题能力的创新、复合型技术人才。

第二节 电力系统的研究方法

电力系统的研究方法和其他科技领域一样,可以概括为理论分析和科学实践两种途径,理论分析无疑是极端重要的,它能够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,仅靠理论分析往往难以得到全面的知识。因此,必须与科学试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,也往往是在科学试验的启发下总结出来的。

电力系统的科学试验研究可以在实际电力系统(简称原型)上进行,也可以在模拟的电力系统(简称模型)上进行。在原型上进行科学试验研究,可以得到最真实的结果,但是在电力系统原型上进行试验往往受到很多条件限制。如时间、经济、安全等多方面因素制约。同时对一些比较严重性试验项目(如短路、振荡、失步等),由于系统运行条件的限制不一定都能进行,更不能进行多次重复性的试验,特别是对于一些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,模型试验在电力系统的研究工作中具有十分重要的意义。

电力系统的模型试验方法有数字仿真和物理模拟两种。在国外模拟仿真统称为 simulation。在国内一般将采用数学方法进行试验研究的方式习惯称为数字仿真,将采用物理方法进行试验研究的方式习惯称为物理模拟。

一、电力系统的数字仿真

数字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。对于各种物理现象,在一定的假设条件下写出其运动过程的数学方程式,借助专门的数学求解工具进行求解,以得出所需要的结果。历史上曾经出现过的电力系统数字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各元件,交流计算台以电阻、电感、电容、变压器、移相装置模拟系统各元件,以直流电压或中频交流电压为电源,用以计算系统中的功率分布、短路电流和系统的稳定性。这些功能目前已完全由数字式电子计算机所取代。模拟式电子计算机以其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,因此,这类数字仿真始终未能得到广泛应用。

目前,通用数字式电子计算机已广泛用于电力系统的运行、设计和科学研究各个方面。自1956年成功地运用它计算潮流分布以来,几乎所有主要的电力系统计算都已使用这种计算机。目前,复杂系统的潮流分布、故障分析、稳定性分析等常规计算或暂态过程仿真、谐波分析、继电保护整定等专业性更强的计算,都已有商品化软件包可供选用。而这些计算对硬件条件的要求也较过去大为降低,几乎各种型号的微型计算机都可用以作此类计算。

上面所述研究工具一般都属数字仿真,它们的共同点是必须先明确要分析研究的电力系统及其各元件的数学表示方式,建立起相应的数学模型,才能运用它们进行计算分析。下面介绍在国际上较为流行的电力系统实时数字仿真装置——RTDS和目前在我国最先进的电力

系统全数字仿真装置——ADPSS，这两种电力系统数字仿真装置的照片如图 1-1 所示。

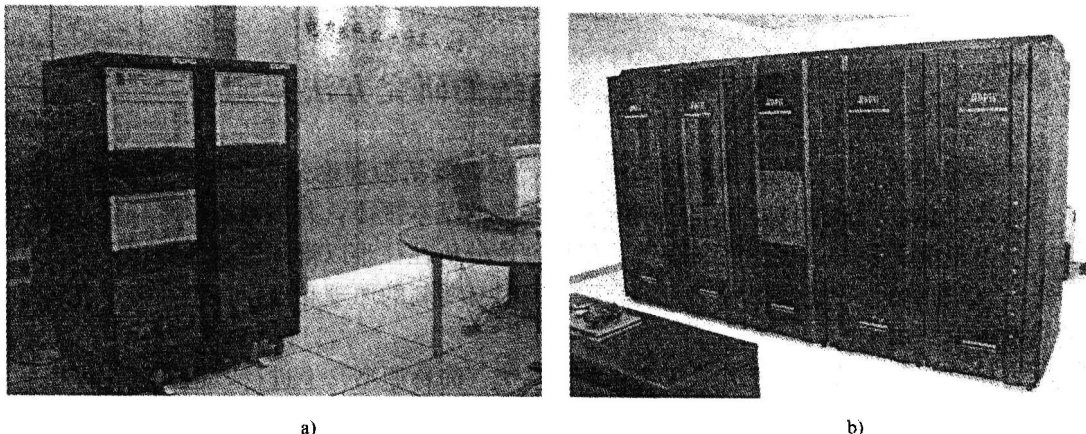


图 1-1 电力系统数字仿真装置照片

a) RTDS 装置 b) ADPSS 装置

(一) RTDS

实时数字仿真装置 (Real Time Digital Simulation, RTDS) 是加拿大 Manitoba 直流研究中心推出的电力系统实时数字仿真系统。该系统以电力系统电磁暂态计算理论为基础, 采用多处理器的并行计算方法, 通过适当的任务分配方式和通信技术, 实现电力系统的实时数字仿真。RTDS 具有如下特点:

1) RTDS 的元件库中提供了丰富的电力系统元件模型, 包括主要交流元件的数学模型、测量元件 CT 和 CVT 以及 PT 的数学模型、直流系统数学模型、电力电子器件宏模型以及控制系统模型, 可以满足大多数数字仿真任务的需要。通过 RSCAD 图形化编程接口, 用户可以非常方便地建立研究用仿真系统数学模型。

2) RTDS 由 RSCAD 工作站和用于计算的 RACK 组成。每个 RACK 由多个多处理器计算插件和通信控制插件通过总线方式组成, 通信控制插件用于协调计算插件之间以及 RACK 与 RSCAD 工作站之间的数据通信。用户基于 RSCAD 建立的数字仿真模型经过编译和任务分配处理后, 执行代码分配到各个计算插件的 DSP 处理器, 按照并行计算的模式运行, 从而大大提高了计算速度, 达到实时仿真的目的。实时仿真运行过程中, 用户可以通过 RSCAD 中提供的一些运行控制元件对仿真系统实行调节控制等操作, 来改变系统运行状态。

3) RTDS 提供了 D/A 和 A/D 转换输入与输出接口, 仿真系统的运行变量 (电压电流) 可以通过 D/A 转换输出, 通过功率放大装置后与继电保护装置接口; 自动控制装置的控制信号也可以通过 A/D 转换接口输入到仿真系统, 用于控制系统的运行状态, 从而实现数模混合仿真。这一特点为继电保护和自动控制装置技术以及电网运行控制的实验室仿真研究提供了非常有效的手段。

目前 RTDS 装置已经在全球范围的电力系统相关部门、企业以及高等院校得到了应用, 研究领域包括继电保护和自动控制装置性能测试、电网运行与控制模拟、新型输电技术的数模混合仿真研究、先进控制理论在电力系统应用中实用化的仿真研究等。

(二) ADPSS

电力系统全数字仿真装置 (Advanced Digital Power System Simulator, ADPSS) 是由中国电力科学研究院研发的基于高性能 PC 群的全数字仿真系统, 由服务器机群、管理网络、计算网络、物理接口箱、功率放大器和终端工作站等组成。该系统利用机群的多节点结构和高速本地通信网络, 采用网络并行计算技术对计算任务进行分解, 并对进程进行实时和同步控制, 实现了大规模复杂交直流电力系统机电暂态和电磁暂态的实时和超实时仿真以及外接物理装置试验。ADPSS 装置具有如下特点:

1) ADPSS 核心仿真软件是基于成熟的商用软件“电力系统分析综合程序”(PSASP), 具有很高的可靠性和可信度; 系统软件采用 Linux 操作系统, 稳定可靠; 用户界面可跨平台 (Windows/Linux/UNIX) 运行。

2) 硬件系统基于高性能 PC 群服务器, 性价比高、扩展性好; 机电暂态和电磁暂态混合并行, 能实现大规模交直流电网的机电暂态和电磁暂态混合实时和超实时仿真, 兼顾仿真的规模和准确性。

3) 10000 节点、1000 台发电机、13000 条线路 (或变压器) 网络规模的机电暂态实时仿真, 仿真步长 $\leq 10\text{ms}$; 6 台发电机和 30 条线路网络规模 (发电机采用 Park 方程模型) 的电磁暂态实时仿真, 仿真步长 $\leq 50\text{ }\mu\text{s}$; 模拟输入输出分辨率 16bit, 同步精度 $\leq 1\text{ }\mu\text{s}$; 数字输入时标精度 $\leq 1\text{ }\mu\text{s}$ 。

利用 ADPSS, 可以进行 1000 台机、10000 节点的大系统交直流电力系统机电暂态仿真以及机电—电磁暂态混合仿真研究, 可以与调度自动化系统相连取得在线数据进行仿真, 可接入继电保护、安全自动装置、FACTS 控制装置以及直流输电控制装置等实际物理装置进行闭环仿真试验, 可接入 MATLAB 等商用软件进行局部和子任务计算, 接入用户自定义模型以完成用户指定功能和任务。

数字仿真存在的主要问题是物理概念不够直观, 同时它要求对研究系统的全部环节都必须能建立数学模型列出数学方程式, 这对于一些新的领域和现象的研究, 可能会产生一定的困难。

二、电力系统的物理模拟

电力系统动态模拟属电力系统的物理模拟, 它是采用了与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来的电力系统物理模型。该模型是基于相似原理把实际电力系统按一定的模拟比例关系缩小并保留其物理特性的电力系统复制品。通俗地说: 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, 称之为电力系统物理模拟。

电力系统动态模拟主要由模拟发电机、模拟变压器、模拟输电线路、模拟负荷和有关调节、控制、测量、保护等模拟装置组成。因为有旋转运动的模拟发电机组、模拟负荷机组, 故可以模拟电力系统各种实时运行状态, 反映电力系统的动态特性。例如, 原动机的调速特性、发电机的励磁特性、负荷随电压频率变化的动态特性等, 所以称为电力系统动态模拟 (简称动模)。在模拟系统中, 如没有旋转运动的模拟发电机组、模拟负荷机组, 该模型不反映电力系统动态特性, 则称之为电力系统静态模拟 (简称静模)。

图 1-2 为目前国内高校中规模最大的电力系统动态模拟实验室 (物理模拟) 的动模主控

制室和动模实验大厅照片。

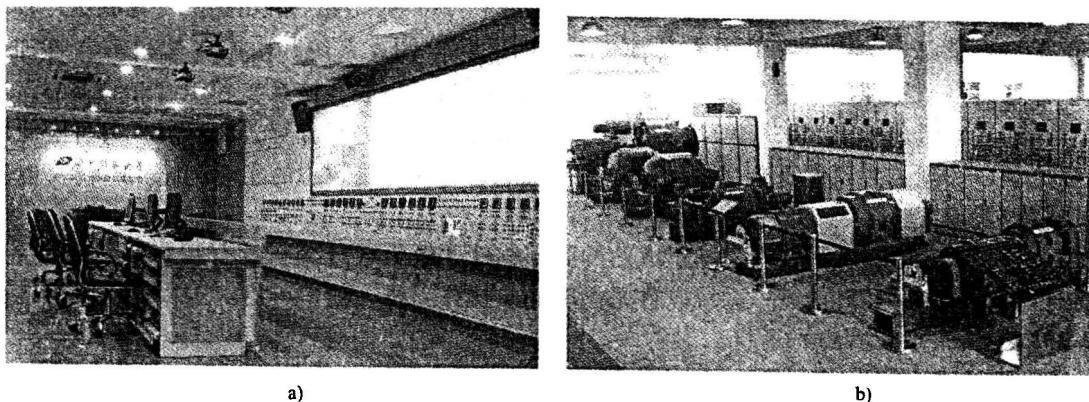


图 1-2 电力系统动态模拟实验室照片

a) 动模主控制室 b) 动模实验大厅

电力系统动态模拟的主要特点是能够直接观察到各种现象的物理过程，便于获得明确的物理概念，特别是对于某些新的问题和物理现象，由于认识上的限制，不能或不完全能用数学方程式表示时，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，物理模拟的试验结果，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、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完善和发展。

动态模拟的另一个显著的特点是可以将新型的继电保护和自动控制装置，直接接入动态模拟系统中，进行各种工况运行和短路故障试验，考核各装置的各种性能。

动态模拟的缺点是待研究系统的规模不能过大，而且模拟装置的参数调整范围有一定的限制，试验前模拟参数的配置和改变运行方式的调整比较复杂。

我国电力系统运行部门非常重视动模实验，特别是继电保护实验，颁布了中华人民共和国“DL/T 871—2004 电力系统继电保护产品动模试验”电力行业标准，针对新研制的保护装置入网，无论该保护装置进行过何种数字仿真实验，使用单位最关心该装置是否通过动模实验考核，因此动模实验在电力系统研究中具有不可替代的地位。

三、物理模拟与数字仿真的关系

物理模拟是在根据相似原理建立起来的电力系统物理模型上进行仿真研究的方法，数字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，它们之间的关系如表 1-1 所示。

表 1-1 物理模拟与数字仿真对比

项 目	物 理 模 拟	数 字 仿 真
模型与理论的关系	以实验为基础，检验和推动理论研究	以理论为指导，结果依靠理论
实验研究的前提条件	只需物理过程的物理量，不需数学模型	必须确定物理过程的数学模型
模型物理量	与原型系统相同，不改变性质	可以与原型系统不同
物理过程	直观、真实	不直观

(续)

项 目	物 理 模 拟	数 字 仿 真
建模的工作	物理模型建立、参数的调整	数学模型建立、仿真算法的设计
与实际装置相连	直接接入	不能或者通过功率放大器相连
模型通用性	较差、参数修改较难	较强、参数修改容易
模型的规模	规模不能过大	规模可以很大
模型的投资	投资较多	投资可大可小
模型的使用	操作复杂、不安全	操作简单、安全

综上所述,各种研究工具都有其特点和适用范围,即使不断推陈出新的数字式电子计算机也难尽善尽美。因此,取长补短、相互配合才是较好的解决方案。

国外不少大企业之所以乐于使用它们自身研制的研究工具,正是由于这些工具体现了上述思想,诸如,模拟计算机和数字计算机的组合,模拟计算机与交流计算台的组合,以及模拟计算机、数字计算机与动态模拟装置的组合等。

第三节 电力系统教学实验平台的建设

一、建设教学实验平台的指导思想

建设综合型教学实验平台的指导思想是站在现代电力系统不断发展和提高素质教育中实验环节落后局面的高度来考虑,要建立一个高度自动化的多机电力系统综合实验平台,使它能够反映现代化电能的生产、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、数字化的特点,体现电力系统的检测、控制、监视、保护、调度的自动化,使之成为电气工程学科提高素质教育水平的基础建设。

综合型教学实验平台是具有先进性、系统性、综合性的开放式电力专业公共教学实验平台,它有利于提高学生创新思维与实践能力,能更好地培养出高素质的复合型人才。

(一) 先进性

电力工业是国家先进行业,电气工程的内涵较之其他工程更广和更深,它不仅涉及科学与社会的各学科知识,而且一些最新、最先进的技术常常是先在此得到应用。以数字电力系统(DPS)为代表的计算机技术、通信技术、控制理论及信息处理技术等的高度发展,使得中国电力系统正经历着一场以市场经济为导向的巨大变革。

综合型教学实验平台的各种控制装置,应紧跟时代步伐将最先进的电力科学技术融入 to 教学实验系统之中,应具备手动和自动双重功能,其控制参数可调,并且所有自动控制装置都应采用数字化设备,微机监控系统应具有很好的开放性,这样使学生既能掌握理论知识,同时了解先进的科学技术。

(二) 系统性

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,这里首先强调它是一个系统,任何电气元件缺一不可,电力系统自动控制装置、继电保护、调度自动化系统都是为电力系统的经济、安全稳定运行服务,故此电力专业教学实验,都应在此大系统上进

行, 让学生了解发电、输电、配电、用电的全过程, 并对系统有一个全局的认识。

综合型教学实验平台应由多机电力系统组成, 它应具备能改变网络结构和系统联络阻抗等功能, 有利于实验分析比较。并且发电机的功率角和系统稳态及暂态运行参数应在多方位能观察到, 以提高系统实验的可视化。

(三) 综合性

纵观世界各国目前教学改革的特点无一不是“综合化”, 电力专业的实验教学也应在教学内容、教学方法等方面向综合化方向发展, 以形成自己独特而综合的实践教学体系。综合型教学实验平台所开设的实验应覆盖全部专业课程的教学实验, 如“电力系统分析”、“电力工程”、“电力系统自动化”、“电力系统微机保护”、“电力系统自动装置原理”、“电机学”、“电力系统运行”等。还应能作课程设计、毕业设计实验, 能做研究生的某些研究课题实验, 以及本科生的生产实习。

二、开放式教学实验平台的特点

开放式教学实验平台是一个将主要专业课程的理论与实践相结合, 既能进行各专业课程的教学实验, 又能进行专业知识的综合性应用与研究的实验教学基地, 以便于学生巩固所学知识, 培养学生实际动手能力、综合应用能力和创新能力。开放式教学实验平台的特点主要表现在:

(一) 一次系统的结构灵活可变

一次系统应是具有多个节点的环形电力网, 通过投切线路, 能灵活地改变接线方式, 如切除某一条线路, 电力网则变成了一个辐射形网络; 如将另一条线路断开, 则电力网变成了T形网络等。

在不改变网络主结构前提下, 通过分别改变发电机有功、无功来改变潮流分布, 可以通过投切负荷改变电力网潮流的分布, 也可以将双回线路改为单回线路输送来改变电力网潮流的分布等。

(二) 控制系统体现先进科学技术

在这个多机运行的电力系统中, 每台发电机组都应配有完整的自动控制系统, 要能实现电力系统的各种运行方式, 且参数可调。每台原动机自动调速装置都具有各种保护功能, 每台发电机自动励磁调节器, 都具有调差、强励、各种励磁限制等功能。除此以外, 每台发电机还应配有自动准同期装置, 输电线路还配有微机过电流保护和重合闸装置。

每套自动控制装置都应有多种控制方式供选择, 并且运行方式和运行参数可在线修改。每台发电机的电流、电压都留有标准接口, 对发电机组的调频、调压控制也应留有接口, 供实验研究人员使用。

(三) 微机监控系统实行开放式

综合型开放式教学实验平台的计算机监控系统应是多目标、多参数、多功能的实时系统, 监控系统应具有良好的开放性, 考虑实验系统的发展, 应采用分层分布式系统。这样才具有很好的扩展性。上位机和现地控制单元(LCU)之间采用RS-485通信网络结构, 可通过局域网与上层监控中心通信。

第二章 电力系统主要电气设备特性

第一节 概 述

同步发电机和电力变压器是电力系统的主要电气设备之一，其在电力系统中的作用是非常重要的，它们的稳定运行对维持电网的稳定有着十分重要的作用，为了更好地利用和保护它们，必须清楚地了解它们的运行特性和主要参数。

表征同步发电机稳定运行性能的主要数据和参数有：短路比、直轴和交轴同步电抗、保梯电抗和漏电抗。短路比是表征发电机静态稳定度的一个重要数据，短路比小，说明同步电抗大，电机造价便宜。当短路发生时，短路电流较小，但当负载变化时发电机的电压变化较大，且并联运行时发电机的稳定度较差；短路比大则电机性能较好，但电机造价较高，电机气隙较大，励磁电流和转子用铜量增大，通过空载和短路特性可确定直轴同步电抗 X_d 不饱和值，进而可求出短路比的大小。各个电抗参数是定量分析电机稳定运行状态的有用工具，由零功率因数特性和空载特性可确定定子漏抗和电枢反应磁动势等参数。所以，空载特性、短路特性和零功率因数负载特性是测量发电机参数用的特性曲线，其实验测定具有重要的实用价值。

在测定空载特性曲线时，由于转子剩磁情况不同，当改变励磁电流 I_f 从零到某一最大值，再反过来由此最大值减小到零时，会得到上升和下降两条不同曲线，这种现象反映了铁磁材料中的磁滞现象，测定参数时通常使用其下降曲线，其曲线最高点取 $U_0 \approx 1.3U_N$ ，延长曲线的直线部分使之与横轴相交，交点的横坐标绝对值 Δi_0 作为校正量，在所有试验测得的励磁电流数据上加上此校正量，即可得到一条通过原点的校正曲线。通常在发电机设计时，取其空载特性与常规空载特性相接近，设计得太饱和会使励磁绕组用铜太多，且电压调节会较困难；若设计饱和度太低，负载变化时电压变化较大，且磁通密度偏低说明硅钢片利用率较低，电机铁心消耗材料较多。

同步发电机短路特性是指发电机电枢绕组作三相稳定短路，其短路电流 I_k 与励磁电流 I_f 间的关系。短路发生时，限制短路电流的仅是发电机的内部阻抗，由于同步发电机的电枢电阻会远小于其同步电抗，通常认为短路电流是纯感性的，电枢磁动势基本上是一个纯去磁作用的直轴磁动势，短路时合成电动势只等于漏抗压降，发电机的磁路处于不饱和状态，短路特性曲线是一条直线。

零功率因数负载特性通常用三相纯电感性负载实验测出。实验时，把同步发电机拖动到同步转速，电枢接至一可调的三相纯电感性负载，使 $\cos\varphi=0$ ，然后同时调节发电机的励磁电流和负载电抗的大小，使负载电流总保持为一常数（例如 $I=I_N$ ），记录不同励磁下发电机端电压，即可获得零功率因数负载特性曲线。当发电机较大，无法用电抗器试验时，可以将发电机并联运行于 $U=U_N$ 的电网上，发电机的有功功率应为零，调节发电机的励磁电流，使它发出的无功电流达到 I_N ，这样即可得到零功率因数负载特性上 $U=U_N$ 的一点，再让发