



教育科学“十五”国家规划课题研究成果

电力系统分析

孟祥萍 高 嫵 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

教育科学“十五”国家规划课题研究成果

电力系统分析

孟祥萍 高燃 编著



高等教育出版社

内容提要

本书是教育科学“十五”国家规划课题研究成果之一。

本书共分四篇,第一、第二、第三篇为理论部分,主要包括:电力系统的基本概念、电力网各元件的参数和等值电路、简单电力系统的潮流计算、电力系统的有功功率平衡与频率调整、电力系统的无功功率平衡与电压调整、电力系统的经济运行、同步发电机的基本方程、电力系统三相短路的暂态过程、电力系统三相短路电流的实用计算、电力系统各元件的序阻抗和等值电路、电力系统简单不对称故障的分析和计算、电力系统稳定性的基本概念、电力系统的电磁功率特性、电力系统的暂态和静态稳定性、提高电力系统稳定性的措施。第四篇为电力计算的计算机算法及程序,主要包括:电力网络的数学模型、电力系统故障的计算机算法、电力系统潮流计算的计算机算法、电力系统稳定的计算程序及实现等。

本书可供高等院校应用型本科和高职高专院校电气工程有关专业的学生作为教材使用,也可供电力系统相关专业的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统分析 / 孟祥萍, 高嫒编著. —北京: 高等教育出版社, 2004. 2

ISBN 7-04-013034-3

I. 电... II. ①孟... ②高... III. 电力系统 - 分析
- 高等学校 - 教材 IV. TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 005393 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010-82028899

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 河北省财政厅印刷厂

开 本 787×960 1/16
印 张 28.25
字 数 520 000

版 次 2004 年 2 月第 1 版
印 次 2004 年 2 月第 1 次印刷
定 价 35.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

总 序

为了更好地适应当前我国高等教育跨越式发展需要,满足我国高校从精英教育向大众化教育的重大转移阶段中社会对高校应用型人才培养的各类要求,探索和建立我国高等学校应用型人才培养体系,全国高等学校教学研究中心(以下简称“教研中心”)在承担全国教育科学“十五”国家规划课题——“21世纪中国高等教育人才培养体系的创新与实践”研究工作的基础上,组织全国100余所以培养应用型人才为主的高等院校,进行其子项目课题——“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”的研究与探索,在高等院校应用型人才的教学内容、课程体系研究等方面取得了标志性成果,并在高等教育出版社的支持和配合下,推出了一批适应应用型人才需要的立体化教材,冠以“教育科学‘十五’国家规划课题研究成果”。

2002年11月,教研中心在南京工程学院组织召开了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题立项研讨会。会议确定由教研中心组织国家级课题立项,为参加立项研究的高等院校搭建高起点的研究平台,整体设计立项研究计划,明确目标。课题立项采用整体规划、分步实施、滚动立项的方式,分期分批启动立项研究计划。为了确保课题立项目标的实现,组建了“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题领导小组(亦为高校应用型人才立体化教材建设领导小组)。会后,教研中心组织了首批课题立项申报,有63所高校申报了近450项课题。2003年1月,在黑龙江工程学院进行了项目评审,经过课题领导小组严格的把关,确定了首批9项子课题的牵头学校、主持学校和参加学校。2003年3月至4月,各子课题相继召开了工作会议,交流了各校教学改革的情况和面临的具体问题,确定了项目分工,并全面开始研究工作。计划先集中力量,用两年时间形成一批有关人才培养模式、培养目标、教学内容和课程体系等理论研究成果报告和 In 研究报告基础上同步组织建设的反映应用型人才特色的立体化系列教材。

与过去立项研究不同的是,“21世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践”课题研究在审视、选择、消化与吸收多年来已有应用型人才探索与实践成果基础上,紧密结合经济全球化时代高校应用型人才工作的实际需要,努力实践,大胆创新,采取边研究、边探索、边实践的方式,推进高校应用

型人才培养工作,突出重点目标,并不断取得标志性的阶段成果。

教材建设作为保证和提高教学质量的重要支柱和基础,作为体现教学内容和教学方法的知识载体,在当前培养应用型人才中的作用是显而易见的。探索、建设适应新世纪我国高校应用型人才体系需要的教材体系已成为当前我国高校教学改革和教材建设工作面临的十分重要的任务。因此,在课题研究过程中,各课题组充分吸收已有的优秀教学改革成果,并和教学实际结合起来,认真讨论和研究教学内容和课程体系的改革,组织一批学术水平较高、教学经验较丰富、实践能力较强的教师,编写出一批以公共基础课和专业、技术基础课为主的有特色、适用性强的教材及相应的教学辅导书、电子教案,以满足高等学校应用型人才的需要。

我们相信,随着我国高等教育的发展和高校教学改革的不断深入,特别是随着教育部“高等学校教学质量和教学改革工程”的启动和实施,具有示范性和适应应用型人才培养的精品课程教材必将进一步促进我国高校教学质量的提高。

全国高等学校教学研究中心

2003年4月

* 因是专业课教材,考虑到在教师教和学生学中的习惯用语,本书中的部分图形符号和文字符号未完全按国家标准要求执行。——编辑注。

前 言

教学改革是高等学校各项改革的核心,也是改革人才培养模式的主要立足点。一般工科院校培养的是应用型高级专业技术人才,专业课的改革尤为重要。结合多年对“电力系统分析”课程教学改革的经验,我们编写了“电气工程及其自动化”专业主干专业课之一“电力系统分析”的教材。

与以往《电力系统分析》教材不同的是,我们在本课程的教学中注重了学生计算机应用能力的培养,把该课程中电力系统故障计算、潮流计算及稳定计算的计算机算法单独作为一部分,即书中的第四篇,并且加入了我们自己用 MATLAB 语言开发的 13 个电力系计算程序。在教学中,增加了学生上机操作的学时,以提高学生的计算机应用能力,并为学生今后从事电力系统行业的工作打下基础。

考虑到目前专业课学时数普遍减少的情况,我们对前三篇内容进行了调整,把远距离输电线路的基本知识加入到第 2 章输电线路的内容中;略去部分复杂公式的推导;对电力系统故障分析及机电暂态部分内容也做了适当调整。

由于该课程为电力专业考研专业课之一,因此在编写中,我们着重于基本概念及基本计算方法的阐述,同时也注重理论联系实际。本节可分两个学期完成,第一学期讲授前三篇,课内学时数为 70 学时;第二学期讲授第四篇,课内学时数为 30 学时,其中 8 学时为上机学时。

本书 1~6 章由高轶编写,7~11 章由郑文编写,12~16 章由时凤菊编写,17~20 章由孟祥萍编写,全书由孟祥萍教授担任主编。梁志珊教授在百忙中审阅了书稿,提出了许多宝贵意见,特致谢意。由于作者水平所限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作者

2003 年 12 月

于长春工程学院

目 录

第一篇 电力系统的稳态分析

第 1 章 电力系统的基本概念	3
1.1 电力系统的组成和特点	4
1.2 电力系统的电压等级和规定	6
1.3 电力系统的接线方式	8
1.4 电力线路的结构	10
小结	15
第 2 章 电力网各元件的参数和等值电路	17
2.1 输电线路的参数	18
2.2 输电线路的等值电路	23
2.3 变压器的等值电路及参数	27
2.4 标么制	34
小结	38
第 3 章 简单电力系统的潮流计算	39
3.1 基本概念	40
3.2 开式网络电压和功率分布计算	45
3.3 简单闭式网络的电压和功率分布计算	51
小结	60
第 4 章 电力系统的有功功率平衡与频率调整	61
4.1 概述	62
4.2 自动调速系统	63
4.3 电力系统的频率特性	65
4.4 电力系统的频率调整	67

4.5 电力系统中有功功率的平衡	74
小结	77
第 5 章 电力系统的无功功率平衡与电压调整	79
5.1 电压调整的必要性	80
5.2 电力系统的无功功率平衡	81
5.3 电力系统的电压管理	87
5.4 电压调整的措施	90
小结	98
第 6 章 电力系统的经济运行	99
6.1 电力系统负荷和负荷曲线	100
6.2 电力系统有功功率负荷的经济分配	103
6.3 电力网中的电能损耗	109
6.4 降低电力网电能损耗的措施	115
小结	119

第二篇 电力系统的电磁暂态

第 7 章 同步发电机的基本方程	123
7.1 同步发电机的原始方程	124
7.2 d 、 q 、 0 坐标系统的发电机基本方程	129
7.3 基本方程的拉普拉斯运算形式	137
7.4 同步电机的稳态运行	140
小结	142
第 8 章 电力系统三相短路的暂态过程	143
8.1 短路的基本概念	144
8.2 无限大功率电源供电系统的三相短路分析	146
8.3 无阻尼绕组同步发电机突然三相短路的分析	150
8.4 计及阻尼绕组的同步电机突然三相短路分析	157
8.5 强行励磁对同步电机三相短路的影响	161
小结	164

第 9 章	电力系统三相短路电流的实用计算	165
9.1	交流分量电流初始值的计算	166
9.2	起始次暂态电流和冲击电流的计算	168
9.3	计算曲线法	173
9.4	转移阻抗及电流分布系数	180
	小结	184

第 10 章	电力系统各元件的序阻抗和等值电路	185
10.1	对称分量法	186
10.2	对称分量法在不对称故障分析中的应用	188
10.3	同步发电机的负序和零序电抗	190
10.4	异步电动机的负序电抗和零序电抗	191
10.5	变压器的零序电抗	192
10.6	架空输电线的零序阻抗	197
10.7	电缆线路的零序阻抗	201
10.8	电力系统的序网络	203
	小结	208

第 11 章	电力系统简单不对称故障的分析和计算	209
11.1	单相接地短路	210
11.2	两相短路	212
11.3	两相短路接地	215
11.4	正序等效定则的应用	217
11.5	非故障处电流和电压的计算	219
11.6	非全相运行的分析计算	224
	小结	229

第三篇 电力系统的机电暂态

第 12 章	电力系统稳定性的基本概念	233
12.1	电力系统静态稳定的基本概念	234
12.2	电力系统暂态稳定的基本概念	237
12.3	发电机转子运动方程	238
12.4	负荷稳定的概念	241

小结.....	247
---------	-----

第 13 章 电力系统的电磁功率特性 249

13.1 简单电力系统的功角特性.....	250
-----------------------	-----

13.2 自动励磁调节器对功角特性的影响.....	253
---------------------------	-----

13.3 复杂电力系统的功角特性.....	257
-----------------------	-----

13.4 网络接线及参数对发电机功角特性的影响.....	261
------------------------------	-----

小结.....	265
---------	-----

第 14 章 电力系统的暂态稳定性 267

14.1 暂态稳定分析计算的基本假设.....	268
-------------------------	-----

14.2 简单电力系统暂态稳定的分析计算.....	268
---------------------------	-----

14.3 发电机转子运动方程的数值解法.....	276
--------------------------	-----

14.4 复杂电力系统暂态稳定的分析计算.....	280
---------------------------	-----

14.5 电力系统的异步运行.....	282
---------------------	-----

小结.....	283
---------	-----

第 15 章 电力系统的静态稳定性 285

15.1 小扰动法原理.....	286
------------------	-----

15.2 自动励磁调节器对静态稳定的影响.....	289
---------------------------	-----

小结.....	290
---------	-----

第 16 章 提高电力系统稳定性的措施 291

16.1 提高电力系统静态稳定性的措施.....	292
--------------------------	-----

16.2 提高电力系统暂态稳定性的措施.....	294
--------------------------	-----

小结.....	299
---------	-----

第四篇 电力系统计算的计算机算法

第 17 章 电力网络的数学模型 303

17.1 代数方程组的解法.....	304
--------------------	-----

17.2 电力网络的基本方程式.....	317
----------------------	-----

17.3 节点导纳矩阵及其算法.....	319
----------------------	-----

17.4 节点阻抗矩阵及其算法.....	329
----------------------	-----

17.5 节点编号顺序优化及其程序.....	340
------------------------	-----

小结.....	345
第18章 电力系统故障的计算机算法	347
18.1 概述.....	348
18.2 对称故障的计算机算法.....	348
18.3 简单不对称故障的计算机算法.....	366
小结.....	384
第19章 电力系统潮流计算的计算机算法	385
19.1 概述.....	386
19.2 潮流计算的基本方程.....	386
19.3 牛顿-拉夫逊法潮流计算.....	389
19.4 PQ 分解法潮流计算	406
小结.....	418
第20章 电力系统稳定的计算程序及其实现	421
20.1 简化模型的暂态稳定计算.....	422
20.2 简化模型的静态稳定计算.....	429
小结.....	432
附录 短路电流周期分量计算曲线数字表	433
参考文献	439

第 一 篇

电力系统的稳态分析

第 1 章

电力系统的基本概念

引子：

一个人追求的目标越高，他的才能就发展得越快，对社会就越有益。——高尔基

本章提示

1. 电力系统、动力系统、电力网的基本概念；
2. 发电机、变压器额定电压的确定；
3. 架空线路的结构，架空线路导线型号的表示法。

1.1 电力系统的组成和特点

1.1.1 电力系统的组成

能源是社会生产力的重要基础,随着社会生产的不断发展,人类使用的能源不仅在数量上越来越多,在品种及构成上也发生了很大变化。煤炭、石油、天然气、水力等随自然界演化生产的动力资源是能量的直接提供者,称为一次能源;电能是由一次能源转换而成,称为二次能源。

发电厂把其他形式的能量转换成电能,电能经过变压器和各种电压等级的输电线路输送并分配给用户,再通过各种用电设备转换成适合用户需要的其他形式的能量,如机械能、热能、光能、化学能等。把这些生产、输送、分配和消费电能的各种电气设备连接在一起而组成的整体称为电力系统,它包括从发电、变电、输电、配电直到用电这样一个全过程。电力系统加上发电厂的动力部分,就称为动力系统。火电厂的动力部分包括汽轮机、锅炉、供热管道和热用户;水电厂的动力部分包括水库和水轮机;核电厂的动力部分包括反应堆和汽轮机。电力系统中输送和分配电能的部分称为电力网,它包括升、降压变压器和各种电压的输电线路。可见,电力系统是动力系统的一部分,电力网又是电力系统的一部分。

交流电力系统都是三相的,但一般为简单、清晰地表示设备之间的连接状况,常将其接线图画成单线图(单相均表示三相)。图 1.1 所示为动力系统、电力系统和电力网的示意图。

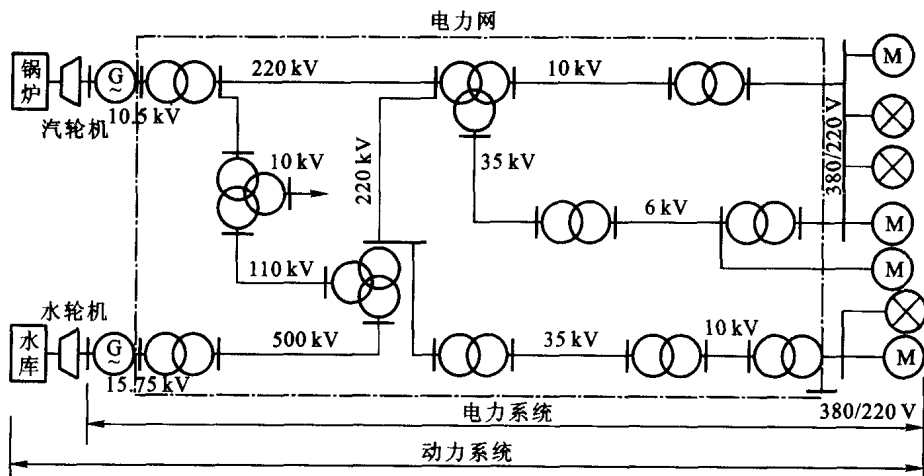


图 1.1 动力系统、电力系统和电力网的示意图

1.1.2 电力系统运行应满足的基本要求

1. 电力系统的特点

电能是现代社会中最重要、也是最方便的能源。电力系统是由电能的生产、输送、分配和消费的各环节组成的整体,它与其他工业系统相比较,具有以下的特点:

(1) 电能的生产与消费具有同时性

由于电能的生产 and 消费是一种能量形态的转换,要求生产与消费同时完成,因此电能难于储存。从这个特点出发,在电力系统运行时就要求发电厂在任何时刻发出的功率,必须等于该时刻用电设备所需的功率、输送和分配环节中的功率损耗之和。

(2) 电能与国民经济各部门和人民日常生活关系密切

由于电能可以方便地转化为其他形式的能,且易于远距离输送和自动控制,因此得到广泛的应用。供电的突然中断会产生严重的后果。

(3) 电力系统的过渡过程非常短暂

由于电能以光速传播,所以运行情况发生变化所引起的电磁和机电过渡过程十分短暂。电力系统正常操作和发生故障时,从一种运行状态到另一种运行状态的过渡极为迅速,这就要求必须采用各种自动装置(包括计算机)来迅速而准确地完成各项调整和操作任务。

2. 对电力系统运行的要求

从电力系统的上述特点出发,根据电力工业在国民经济中的地位和作用,决定了对电力系统运行有以下的要求:

(1) 保证安全可靠地供电

电力系统供电中断将使生产停顿、生活混乱,甚至危及人身和设备安全,给国民经济带来严重的损失。为此,首先应保证电力设备的产品质量,努力搞好设备的正常运行维护;其次,要提高运行水平和自动化程度,防止误操作的发生,在事故发生后应尽量防止事故扩大,等等。

当然,要绝对防止事故的发生是不可能的,而各类电力负荷对供电可靠性的要求也是不同的。首先是保证第一类负荷,然后保证第二类负荷,最后保证第三类负荷。当系统发生事故,出现供电不足的情况时,应当首先切除第三类负荷,以保证第一、第二类负荷的用电。通常,对第一、二类负荷都设置有两个或两个以上的独立电源,以便在任一电源故障时,保证供电不致中断。

(2) 保证良好的电能质量

电能质量的指标是频率、电压和交流电的波形。当三者 in 允许的变动范围之内时,为质量合格的电能;当上述三者偏差超过容许范围时,不仅严重影响用

户的工作,对电力系统本身的运行也有严重危害。因此,保证良好的电能质量,是电力系统运行的重要任务。

(3) 保证电力系统运行的经济性

电能生产的规模很大,消耗的能源在国民经济能源总消耗中占的比重很大,而且电能又是工农业生产的主要动力,因此,提高电能生产的经济性具有十分重要的意义。表征电力系统经济性的指标有煤耗、网损率和厂用电率。煤耗是指发电厂生产 1 kWh 电能所消耗的标准煤量;网损率是指电力网中损耗的电量占向电力网供电量的百分比;厂用电率是指发电厂自用电量占发电量的百分比。

1.2 电力系统的电压等级和规定

1.2.1 电力系统的额定电压

为了使电力设备生产实现标准化和系列化,方便运行、维修,各种电力设备都规定有额定电压。由于各种用电设备以及发电机、变压器都是按照额定电压设计和制造的,因此它们在额定电压下运行时,技术、经济性能指标都将得到最好的发挥。

我国国家标准规定的电力系统额定电压见表 1.1。

表 1.1 电力系统的额定电压(单位:kV)

用电设备额定线电压	交流发电机额定线电压	变压器额定线电压	
		一次绕组	二次绕组
3	3.15 *	3 及 3.15	3.15 及 3.3
6	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6
10	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11
	13.8 *	13.8	
	15.75 *	15.75	
	18 *	18	
35		35	38.5
110		110	121
220		220	242
330		330	363
500		500	550

注:带 * 号的数字为发电机专用。

由表 1.1 可以看到: