

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



POWER SYSTEM ANALYSIS
(SECOND EDITION)

电力系统分析

(第二版)

Hadi Saadat 著
王葵 译



Mc
Graw
Hill Education



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



POWER SYSTEM ANALYSIS
(SECOND EDITION)

电力系统分析

(第二版)

Hadi Saadat 著
王葵 译
陈旭生 校订

 **Education**



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

全书共 12 章和 3 个附录，主要内容有电力系统简介、基本原理、发电机和变压器模型和标么值系统、传输线参数、输电线路模型及其特性、潮流分析、发电量最优分配、同步电机暂态分析、对称故障、对称分量法和不对称故障、稳定性、电力系统控制等。内容深入浅出，并结合实际给出了大量的例题和习题。

本书可作为高等院校电力类专业本科生和研究生的教材或参考书，也可供电气工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统分析：第 2 版/（美）萨阿达特（Saadat, H.）著；王葵译. —北京：中国电力出版社，2008

书名原文：Power System Analysis

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-7692-9

I. 电… II. ①萨…②王… 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（2008）第 104617 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 9 月第一版 2008 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 29 印张 702 千字

定价 49.00 元（含 1CD）

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

译 序

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教育急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为修订教材。

为适应高等学校电气工程专业广大师生和相关专业读者的迫切要求,将电力系统分析和现代计算机仿真教学相结合,译者翻译了这本美国广泛使用的本科教材《电力系统分析》。这是一本内容完整、讲解清楚、特别适合学生自学的好教材。

本书从电力系统基础出发,深入浅出,以数学和物理,包括微分方程和电路理论为基础。需要的基础知识在前三章和附录里都有介绍。本书覆盖面广且重点突出,有稳态分析和暂态分析,还有电力系统的控制与调节,所讲述的内容比较成熟且适应当前电力系统发展的趋势,是一本有关电力系统分析和设计的好教材。

本书的创新在于将计算机仿真应用到《电力系统分析》的教学中来。作者以 MATLAB 为仿真工具,开发了很多电力系统分析的小程序,每一个小程序都是一个知识点,从而帮助学生理解课堂教学内容,使学生不必在编程上花费很多时间,只需集中精力学习理论知识,从而提高分析和设计能力。本书还为读者进一步学习电力系统分析打下了基础。书中包含 140 多道例题,全部用 MATLAB 程序辅助求解,使得计算量大大减轻。书中还附带一张 CD 光盘,包含了所有用到的函数和章节例题,读者可以借助光盘的 M-file 求解课后习题。

本书共分为 12 章和 A, B, C 3 个附录。第一章为对电力系统发展的简单回顾,并介绍了电力系统的主要元件;第二章介绍了功率的概念和三相功率系统;第三章讲述同步发电机和变压器的稳态模型及其标么值系统;第四章讨论多回路传输线线路参数;第五章讨论线路参数和传输线的补偿问题;第六章讨论正常运行状态下互联网络的潮流计算问题,介绍了几种潮流算法;第七章讨论连续函数优化问题的经典解法;第八章介绍同步发电机的暂态分析及其短路模型;第九章介绍对称故障;第十章介绍对称分量法及其在不对称短路故障中的应用;第十一章讨论电力系统稳定问题;第十二章讨论电力系统控制问题;附录 A 主要是 MATLAB 和 SIMULINK 教程,讲述了一些常用函数和绘图指令;附录 B 对控制理论基础做了一个简单回顾,并用 MATLAB 进行仿真;附录 C 列出所有 MATLAB 工具箱的函数和例题。

感谢西雅图大学的陈旭生教授在整个翻译过程中给予的帮助,并感谢他在百忙之中校订了本书译稿。感谢山东大学学员志皓老师、高湛军老师对附录 A 和附录 B 的修订。感谢研究生李建超、陈毅苇、商莹初步翻译部分章节并完成书图扫描工作。

由于编者水平所限,书中不妥及疏漏之处在所难免,恳切希望读者提出批评和宝贵意见。

译者

2008 年 1 月



序

这本电力系统分析的第二版非常畅销，使读者完全了解电力系统分析的框架，以及在实际电网中的应用。文中介绍的电力系统工具箱具有重要的作用。本教材最突出的一个特点是使学生易于进行分析并探讨电力系统设计问题。美国的许多大学和大量的海外院校正在使用这本教材。本教材已被翻译成许多其他语言。王葵教授成功地完成了新的中文译本。作者感谢王教授的辛勤工作，使教材的中文版本在中国顺利出版。

Hadi Saadat

密尔沃基工学院名誉教授

2008年6月

第三版前言

电力系统分析第一版, 在 1999 年出版, 它是最新引进 MATLAB 和 SIMULINK 的教材之一。利用 MATLAB 和 SIMULINK 及其电力系统工具箱可进行大型电力系统的模拟。我的目标是提供给学生强大的软件工具, 去学习理论, 掌握解题技巧。

第二版和第一版结构相同。我始终相信用计算机方法和手算法同时作练习, 必然能够深入理解电力系统分析的理论。这一版主要的改进是几个图形用户界面程序 (GUI), 可以互动, 并菜单驱动, 学生不必大量计算, 就可解大型题目, 从而加强学习效果。

电力系统工具箱已经被修订和扩展。所有程序、函数和 SIMULINK 框图都升级为运行在最新版本 MATLAB (v6.1)。GUI 程序在早期版本不可运行, 除此以外的所有 MATLAB 程序都可以运行在早期版本。GUI 程序在附录 C 中有列表, 附录 A 增添了 MATLAB 程序的最新发展和图形化特点。

感谢世界各地广大读者的支持, 他们帮助修订了这一新版本。特别感谢 McGraw-Hill 出版社的 Mary Coman 对新版本的支持。

Hadi Saadat

密尔沃基工学院

June 2002

第一版前言

本书为高年级电气工程系学生学习电力系统运行和设计,以及电气工程师参考之用,可以以自学为主。它是多个教师多年教学经验的积累,包括在密西根技术大学、密尔沃基工程学校教师的教学经验。

学习本书的预备知识是数学和物理,包括微分方程和电路理论,电机学的知识也很有帮助,但不是必需的,其他的如 MATLAB 和控制理论在附录中都有介绍。

近年来,电力系统的分析和设计受到广泛应用的个人计算机的影响。个人计算机的功能已十分强大,可以很简单地仿真大型互连系统的稳态和暂态分析问题。它可以提供信息,提出问题,对输入数据做出反应,这便于电气工程学科的教授将它引入教学。讲授电力系统分析这门课遇到的最大困难是不可能将真实的电力系统搬入实验室,这本书提供了计算机仿真的电力系统。我开发了很多电力系统分析的程序,给学生一个很好的工具,让他们集中精力学习分析和设计,减少编程时间。本书还为将来进一步学习电力系统分析打下基础。

MATLAB 是基于矩阵的软件包 (matrix-based software package),用于电力系统分析十分合适。它有数值积分算法,可以获得各种向量矩阵的数值解。MATLAB 对线性的和非线性的动态系统提供了高度互动的环境。我开发了电力系统工具箱,包括一组标准电力系统分析的 M-file。实际上这本书所有的题解和图都是由工具箱的 MATLAB 函数生成,学生可以利用工具箱的文件,而不必自己编程。许多程序,如潮流计算、优化、短路、稳定分析是多年前我在电力公司工作时为大型主机开发的。这些程序被精练成 MATLAB 互动程序。这些程序具有通用性,可以用不同的方法解决同一个问题,因此学生可以探索不同的方法。另外,用户可以组合应用这些程序,解决其他电力系统分析的问题。

本书提供了 140 道以上的例题,例题用 MATLAB 程序辅助求解。每一个例题都讲解了一个概念,通常含有 MATLAB 指令的全文,用于模型的建立和计算。例题都有十分详细的解。随书所附光盘的 M-file 可以拷贝到用户计算机,帮助求解课后习题。

本书分 12 章和 3 个附录。每一章以概述开始,介绍本章讨论的内容。第一章是电力系统发展的简单回顾,并介绍了电力系统主要的元件,如发电厂、变电所和输电线路,输电线路将电能从发电厂传送到用户。第二章回顾了功率的概念和三相功率系统。学生可能已经学习过这部分内容,但是电路理论课程可能没有讲述其中的一些重要概念,在这里要着重强调这些概念。在讲述电力系统之前,我们需要建立各元件的数学模型。第三章讲述同步发电机和变压器的稳态模型,另外讲述标么值系统,用单线图表示三相。

第四章讨论多回路传输线线路参数。以平衡三相系统的一相为基础计算。第五章全面讲解线路参数和传输线的补偿问题。这一章提供了传输线设计的概念和工具。第六章讲述正常运行状态下互联网络的潮流计算问题。首先介绍求解非线性代数方程的迭代方法,然后讲述潮流计算的几种方法。这些技术也是用来解实际系统潮流计算问题的。

第七章讲述连续函数优化问题的经典解法,和它们在发电机间优化负荷分配的应用。这里的程序结合了潮流计算程序。第八章是同步发电机暂态分析。首先推导同步发电机电压方

程。应用派克变换将这些非线性方程变换成线性微分方程。通过拉普拉斯变换可以获得变换后方程的解析解。然而，MATLAB 解非线性同步发电机方程的方法是，直接在时域中求解，可以求解各种运行状态（稳态或动态）的解。因此学生可以观察短路过程中同步发电机的动态响应。这一章的最终目的是开发电力系统故障分析和暂态分析的同步发电机简单网络模型。

第九章是对称故障。讲述节点阻抗矩阵的建立算法，以及故障时的节点电压和线路电流的计算。第十章讲述对称分量法，该方法将一个不对称电路分成一组对称电路，包括对称分量法的图示和一些应用。该方法用于不对称故障，又将三相电路用单相表示。算法可以应用到各种不对称故障。软件模型有单相接地故障、两相故障和两相接地故障三种模型。

第十一章讲述电力系统稳定问题。首先讲述单机小扰动动态行为和线性化模型解析解，很方便地应用 MATLAB 和 SIMULINK 将模型扩展到多机系统；然后，讨论等面积法则暂态分析方法，给出图形化结果，学生可以看到电机动态过程的物理意义。非线性微分方程和它的数值解。用 MATLAB 获得单机摆动方程的数值解，同样可以用 SIMULINK 工具箱求解。给出和潮流计算程序兼容的多机系统暂态分析程序。

第十二章是电力系统控制。要求控制方案能够保证电力系统的稳定运行，给出了适用于控制系统的电力系统元件的简单模型，分析了单区域和多区域系统的自动发电控制 (AGC)，讨论了自动电压调整 (AVR) 和负荷频率控制 (LFC)，给出各种情况下的有功需求响应，带 AVR 的发电机响应。这里的 AVR 有各种补偿，比如速度反馈、比例积分微分控制。AGC 和 AVR 都有几个例题演示，用 MATLAB 获得响应结果。这些分析是由构建 SIMULINK 框图获得，SIMULINK 为模拟提供了高度互动的环境。讨论了基础的现代控制理论，包括极点设置状态反馈设计和最优控制设计，最优控制设计是利用基于黎卡提方程的线性二次型调节器。这些现代技术也用于 LFC 系统模拟。

附录 A 是自学 MATLAB 和 SIMULINK 教程，是与课本对应的电力系统和控制系统。附录 B 是控制理论基础介绍，供没有控制理论基础的同学学习。附录 C 列出所有 MATLAB 工具箱的函数和例题。习题答案在书的最后给出。

课本内容设计为两个学期，也可以灵活地选择内容作为一个学期或 1/4 学期的课程。前六章可以作为一个学期的内容，讲述电力系统基础。第二章讲述功率概念和三相系统。如果学生有电路理论基础的话，可以略去这一章或作为复习之用。同样，如果学生有电机学的基础，可以略去第八章。根据教学大纲的要求选取剩余章节。一种选择是，讲述第七章，发电量最优分配；另一种选择是讲述第九章，第九章要求的发电机电抗可以从 8.7 节学习，不必学习整个第八章。

完成本书的学习，学生可以对电力系统分析有一个总体的了解，还可以了解求解大型互联电力系统的各种数值计算技术。学生会发现 MATLAB 对学习本书特别有帮助，特别是求解后面几章的例题和习题。

感谢以下审阅人，感谢他们有益的评论和建议：Professor Max D. Anderson, University of Missouri-Rolla; Professor Miroslav Begovic, 佐治亚技术学院; Professor Karen L. Butler, Texas A&M University; Professor Levin A. Clements, 伍斯特工业学院; Professor Mariesa L. Crow, University of Missouri-Rolla; Professor Malik Elbuluk, 阿克伦大学; Professor A. A. El-Keib, University of Alabama; Professor F. P. Emad, 马里兰大学; Pro-

fessor L. L. Grigsby, Auburn University; Professor Kwang Y. Lee, 宾夕法尼亚大学; Professor M. A. Pai, University of Illinois-Urbana; Professor E. K. Stanek, 密尔沃基工学院。

真诚感谢 Lynn Kallas, 她校对了第一版手稿。特别感谢 McGraw-Hill 出版社的工作人员: 编辑 Lynn Cox, 感谢她一直的鼓励, 编辑助理 Nina Kreiden, 感谢她的支持, 高级项目主管 Eve Strock, 感谢她在整个出版过程中周密的考虑。

我要感谢密尔沃基工学院的电气工程与计算机学院, 感谢院长 professor Ray Palmer, 感谢他们给我机会准备材料。

最后, 但并非最不重要的, 我要感谢我的妻子 Jila 和孩子们 Dana、Fred 和 Cameron。她们是我力量的源泉。

目 录

译序	
序	
第二版前言	
第一版前言	
第一章 电力系统简介	1
1.1 概述	1
1.2 电力工业结构	1
1.3 现代电力系统	2
1.4 系统保护	6
1.5 能源控制中心	7
1.6 计算机分析	7
习题.....	7
第二章 基本原理	9
2.1 概述	9
2.2 单相交流电路的功率	9
2.3 复功率.....	12
2.4 复功率平衡.....	13
2.5 功率因数校正.....	14
2.6 复功率潮流.....	16
2.7 平衡三相电路.....	19
2.8 Y连接负载	20
2.9 Δ 连接负载.....	21
2.10 Δ Y变换	22
2.11 单相分析	23
2.12 对称三相功率	23
习题	26
第三章 发电机和变压器模型和标么值系统	30
3.1 概述.....	30
3.2 同步发电机.....	30
3.3 隐极式电机的稳态特性.....	34
3.4 凸极同步电机.....	38
3.5 电力变压器.....	39
3.6 变压器等效电路.....	39
3.7 变压器等效电路参数的确定.....	41

3.8	变压器的特性	42
3.9	三相变压器的连接	45
3.10	自耦变压器	46
3.11	三绕组变压器	49
3.12	变压器的电压调节	50
3.13	标么值系统	52
3.14	基准值的换算	53
	习题	57
第四章	传输线参数	61
4.1	概述	61
4.2	架空传输线	61
4.3	线路电阻	62
4.4	单根导线的电感	63
4.5	单相线路的电感	64
4.6	以自感和互感表示的磁链	65
4.7	三相传输线的电感	66
4.8	复合导线的电感	68
4.9	三相双回线路的电感	70
4.10	线路电容	71
4.11	单相线路的电容	71
4.12	多导线结构中的电位差	72
4.13	三相输电线路的电容	73
4.14	分裂的影响	74
4.15	三相双回线路的电容	74
4.16	大地对电容的影响	75
4.17	电磁感应	79
4.18	静电感应	81
4.19	电晕	81
	习题	81
第五章	输电线路模型及其特性	85
5.1	概述	85
5.2	短线路模型	85
5.3	中长线路模型	88
5.4	长线路模型	91
5.5	电压和电流波形	94
5.6	波阻抗负载	95
5.7	输电线的复功率潮流	97
5.8	功率传输容量	99
5.9	线路补偿	100

5.10	线路演示程序	103
	习题	110
第六章	潮流分析	114
6.1	概述	114
6.2	节点导纳矩阵	114
6.3	非线性代数方程的解	117
6.4	潮流计算	125
6.5	高斯-塞德尔迭代法潮流计算	126
6.6	线路潮流与损耗	127
6.7	可调分接头变压器	133
6.8	潮流程序	134
6.9	数据准备	135
6.10	牛顿-拉夫逊迭代法潮流计算	143
6.11	快速解耦法潮流计算	149
	习题	155
第七章	发电量最优分配	161
7.1	概述	161
7.2	非线性函数最优化	161
7.3	火力发电厂的运行成本	166
7.4	无发电机有功出力限制并忽略线路损耗的经济分配	167
7.5	考虑发电机出力限制并不计线路损耗下的经济分配	172
7.6	考虑网损时的经济分配	174
7.7	损耗公式的推导	181
	习题	197
第八章	同步电机暂态分析	201
8.1	概述	201
8.2	暂态现象	201
8.3	同步电机的暂态过程	203
8.4	派克变换	205
8.5	对称三相短路	208
8.6	不对称短路	211
8.7	同步电机暂态分析的简化模型	215
8.8	定子电流的直流分量	218
8.9	暂态常数的确定	219
8.10	负荷电流的影响	222
	习题	225
第九章	对称故障	227
9.1	概述	227
9.2	对称三相故障	227

9.3	短路容量	232
9.4	利用节点阻抗矩阵进行对称故障分析	232
9.5	形成节点阻抗矩阵的算法	235
9.6	zbuild 和 symfault 程序	243
	习题	251
第十章	对称分量法和不对称故障	255
10.1	概述	255
10.2	对称分量法的基本原理	255
10.3	序阻抗	259
10.4	带负荷发电机的序网络	266
10.5	单相接地故障	268
10.6	两相短路故障	269
10.7	两相接地故障	270
10.8	利用节点阻抗矩阵分析不对称故障	274
10.9	不对称故障程序	281
	习题	289
第十一章	稳定性	294
11.1	概述	294
11.2	摆动方程	294
11.3	稳态运行的同步电机模型	296
11.4	静态稳定-小扰动	300
11.5	暂态稳定性-等面积准则	309
11.6	三相短路故障	312
11.7	非线性方程的数值解	317
11.8	摆动方程的数值解	318
11.9	多机系统	322
11.10	多机暂态分析	324
	习题	328
第十二章	电力系统控制	332
12.1	概述	332
12.2	基本发电控制环	332
12.3	负荷频率控制	333
12.4	自动发电控制	340
12.5	带有发电最优分配的 AGC	347
12.6	无功和电压控制	347
12.7	包括励磁系统的 AGC	354
12.8	现代控制应用介绍	356
	习题	363
附录 A	MATLAB 简介	367

A.1	文本工具箱的安装	367
A.2	MATLAB 的运行	367
A.3	变量	369
A.4	输出格式	369
A.5	字符串	371
A.6	矢量运算	371
A.7	基本矩阵运算	373
A.8	复数	376
A.9	多项式求根和特征多项式	377
A.10	绘图	380
A.11	图形硬拷贝	381
A.12	三维图形	385
A.13	图形句柄	388
A.14	循环和逻辑语句	388
A.15	求解微分方程	393
A.16	非线性系统	396
A.17	仿真框图	397
A.18	SIMULINK 简介	398
附录 B	反馈控制系统回顾	406
B.1	控制问题	406
B.2	稳定性	406
B.3	稳态误差	408
B.4	阶跃响应	409
B.5	设计根轨迹	410
B.6	频率响应	417
B.7	控制系统工具箱 LTI 模型和 LTI 观测器	422
附录 C	电力系统工具箱	425
	习题答案	430
	参考文献	441

第一章 电力系统简介

(The Power System: an Overview)

1.1 概述 (Introduction)

电能因为传输效率高、成本合理而成为一种使用最广泛的能源。1882年,托马斯·爱迪生在纽约市珍珠街建立了美国的第一个电站。该电站由直流发电机发电,以地下电缆配电,向曼哈顿地区供应照明直流电。同年,在威斯康星州的阿普尔顿安装了首台水轮发电机。接下来的几年,在爱迪生专利的授权下,成立了许多电力公司,生产照明电能。低压输电时, I^2R 损耗巨大,爱迪生公司的电能仅能传输很短的距离。

随着提升输电交流电压等级的变压器的发明(威廉·史坦利,1885年)以及取代直流发电机的感应电动机(尼卡拉·铁斯拉,1888年)的出现,交流系统的优点开始显现,使交流系统开始盛行。交流系统的另一个优点是,由于在交流发电机中去掉了换向器,在较高的电压下易于产生较大的功率。

第一个单相交流系统建于美国俄勒冈市,由两台220.5kW的水轮发电机发电,并以4kV的电压等级向波特兰输电。1893年,美国南加利福尼亚爱迪生公司首次采用2.3kV等级的三相系统。接着全国范围内成立了许多电力公司。最初,私人公司运行在不同频率上,从25Hz到133Hz不等。然而,由于互联和并联运行的需求越来越明显,美国和加拿大逐渐采用了相同的标准频率60Hz。大部分欧洲国家则选用50Hz。随着输电电压等级的稳步提高,商业使用的超高压(EHV)采用765kV,并于1969年在美国首次投入运行。

对于长距离输电来说,将交流EHV转换成直流EHV也许更加经济,而且一般采用两条输电线输电,并在另一端逆变为交流。研究表明,当传输距离为500km甚至更长时,直流输电比较有利。因为直流线路没有电抗,能比相同导线尺寸的交流线路传送更大的功率。当距离较远的两个大型系统相连时,直流输电的优势更为明显。直流输电线就像两个刚性系统间的非同步连接,可消除交流连接中固有的不稳定性问题。直流输电的主要缺点是会产生谐波,在线路两端需要大量的无功补偿。在美国,首条400kV的直流输电线路——俄勒冈州和加利福尼亚州之间的太平洋联络输电线于1970年建成,全长850英里。

整个美洲大陆相互连接形成一个网络叫做电网(power grid)。小部分的网络由联邦或市政府拥有,大多数则为私人拥有。系统被分为几个地理区域称为电力池(power pools)。在互联系统中,为尖峰负荷和热备用预留的发电机数目很少。此外,由于电能可以由一个区域迅速地传输到另一个区域,所以互联系统使发电和输电更加经济可靠。有时,公司购买邻近电厂的大量电能反而比自己的老发电厂发电要便宜很多。

1.2 电力工业结构 (Electric Industry Structure)

美国大部分电能的生产来自于集体投资人公用事业(IOU-investor-owned utilities),少数发电则为联邦政府拥有,如田纳西河谷管理局(TVA-Tennessee Valley Authority)和巴

那威尔电力管理局 (BPA-Bonneville Power Administration)。目前由两个不同层次的管理机构管理着美国电力系统。其一为联邦能源管制委员会 (FERC-Federal Energy Regulatory Commission), 负责管制电能批发价格、服务项目和运行; 另一个为安全与交易委员会 (SEC-Securities and Exchange Commission), 管制电力的商业交易结构。

在美国和加拿大, 电力传输系统相互连接形成一个大电网, 通称为北美互联电网。电网被分成数个电力池, 每个电力池由数个参与运行、以费用低廉的方式来计划发电的邻近公用事业组成。北美电力可靠性委员会 (NERC-American Electric Reliability) 是一个私人管制机构, 负责维持系统的标准和可靠性。NERC 促使供电者与配电者协同合作, 以确保系统可靠性。NERC 与 FERC 以及其他组织 (如爱迪生电力协会) 共同努力协调。目前在电力上, NERC 有四个区域: 德州电力可靠性委员会 (ERCOT-Reliability Council of Texas)、西部各州协调委员会 (WSCC-Western States Coordination Council)、含洛杉矶以东各州 (除了德州) 及加拿大各省的东部互联 (Eastern Interconnect) 和与东北部直流互联的魁北克水力 (Hydro-Quebec)。这些在电力上分开的区域互相输入及输出电能, 但电气上并不同步。

因为通信、汽油和其他工业撤销了管制规定, 所以美国的电力工业正在进行着基础性的转变。电能交易将很快转变成市场导向。这是过去 10 年美国电力工业发生的最主要变化, 它主要以大型垂直性垄断为特征。输电开放性政策的实施导致了批发和零售市场的产生。未来, 电力工业很可能被分割为发电业、输电业及售电业。发电业可以代替配电业直接售电给用户, 此举将消除目前配电业的垄断现象。配电业将出售配电服务, 而非零售电能本身。电能分配的零售结构将类似于现在电信工业的结构, 用户可以选择出售电能的发电企业。当撤销了对整个电力工业管制规定后, 最终用户即可在全国发电企业中进行选择。电力经纪人和电力市场营销人员将在这全新且富竞争的电力市场中扮演主要角色。现在, 虽然有将电力出售给最终用户的权利, 但是仅有有限的几个州参与试验计划。

为促使效率更高, 需要更加努力地创造极富竞争力的电力市场环境。因此, 电力工业面临着很多新问题, 其中可靠性问题就是最应首先解决的问题之一, 即为所有的电力用户提供一个稳定无干扰的电力供应。电力工业的重组和调整以及最近在技术方面的努力, 为电力系统研究带来了前所未有的挑战与机会, 同样给年青一代的电力工程师开辟了新的领域。

1.3 现代电力系统 (Modern Power System)

如图 1.1 所示, 现代电力系统是一个复杂的互连网络, 可分为发电、高压输电及次高压输电、配电、负荷四个部分。

1.3.1 发电 (Generation)

1. 发电机

三相交流发电机是电力系统的主要元件之一, 即通常所说的同步发电机或交流发电机。同步电机有两个同步旋转磁场: 一个是以同步转速驱动, 直流电流励磁的转子产生的磁场; 另一个则是三相电枢电流在定子绕组中产生的磁场。转子绕组的直流电流由励磁系统提供。在较老旧的机组中, 励磁机为同轴安装的直流发电机, 并通过集电环提供励磁。现在的系统则使用附有旋转整流器的交流发电机, 即所谓的无刷励磁系统。发电机励磁系统用以维持发电机机端电压及调节无功功率。由于去掉了换向器, 交流发电机可在较高的电压下 (通常为

30kV) 发出更大的功率。在发电厂, 发电机的功率为 50~1500MW 不等。

机械功率来源于原动机, 可能为利用水能的水轮机, 燃烧煤、汽油及核燃料以取得能量的蒸汽轮机, 燃气轮机或较少使用的烧油的内燃机。表 1.1 给出了 1998 年美国的估计装机容量。

表 1.1 1998 年美国估计装机容量统计表

类 型	容量, MW	百分比, %	原 料
蒸汽机	478800	63	煤, 天然气, 汽油
核能	106400	14	铀
水力和抽蓄发电	91200	12	水
燃气轮机	60800	8	天然气, 汽油
复循环机组	15200	2	天然气, 汽油
内燃机	4940	0.65	天然气, 汽油
其他	2660	0.35	地热, 太阳能, 风力
合计	760000	100	

蒸汽轮机转速相对较高, 一般为 3600r/min 或 1800r/min。隐极式发电机, 两极时以 3600r/min 的转速运行, 四极时以 1800r/min 的转速运行。水轮机压力低, 运转速度慢, 水轮发电机通常为凸极式多级发电机。在发电厂几台发电机并列运行于电网中, 并提供总的功率需求, 其所连接的公共节点, 称为母线。

现在美国总的装机容量大约为 760000MW。假定美国有 27000 万的人口, 则

$$\text{人均装机容量} = \frac{760 \times 10^9}{270 \times 10^6} = 2815 \text{ (W)}$$

为了说明这个数据含义, 考虑人均用电量大约为 50W, 因此 2815W/人的装机容量等效于

$$\frac{2815}{50} = 56 \text{ (倍)}$$

在美国, 年消耗电能约为 $3550 \times 10^9 \text{ kWh}$, 公司投入的资产约为 2000 亿美元, 雇用近 50 万人。

在提倡环保和节能的环境下, 人们考虑利用可再生能源来发电, 如太阳及地球的能源。一些可再生能源, 如太阳能、地热能、风能、潮汐能及生物能现在在某种程度上已经得到了使用。未来有望利用核聚变发出大量电能。如果核聚变能被经济地控制, 将从丰富的燃料(也就是水)中获得清洁能源。

2. 变压器

电力系统的另一个主要元件是变压器。它能高效率地把电能从一个电压等级转换到另一个电压等级。除了变压器损耗以外, 传递到二次侧的其他能量几乎和一次侧相同, 即二次侧的 $VI^{\text{①}}$ 乘积几乎和一次侧的 VI 乘积相等。因此, 用变比为 a 的升压变压器, 可将二次侧电流降为原来的 $1/a$ 。此举可减少线路损耗, 并使长距离输电成为可能。

由于绝缘需求及其他实际的设计问题限制了发出机电压的电压等级(通常为 30kV), 因

① 本书电压符号均为 V。