

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



XIANDAI DIANLI XITONG FENXI
LILUN YU FANGFA

现代电力系统分析 理论与方法

刘天琪 主编



中国电力出版社

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

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

TM711/45

2007

XIANDAI DIANLI XITONG FENXI
LILUN YU FANGFA

现代电力系统分析 理论与方法

主编 刘天琪
编写 邱晓燕 李华强
主审 李庚银



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。

全书共分十章，主要内容包括绪论、电力系统潮流计算、电力系统最优潮流、高压直流输电及柔性输电系统、电力系统安全分析、电力系统故障分析、发电机和负荷的动态模型、电力系统小扰动稳定分析、电力系统暂态稳定分析、电力系统电压稳定。

本书主要作为高等院校电气工程及其自动化专业的研究生教材，也可作为本科高年级教学用书，以及从事电力系统运行、规划设计的工程技术人员或科学技术研究人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代电力系统分析理论与方法/刘天琪主编. —北京: 中国电力出版社, 2007

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5964 - 9

I. 现... II. 刘... 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 (2007) 第 114426 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 8 月第一版 2007 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.75 印张 430 千字

印数 0001—3000 册 定价 28.60 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

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学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

近20年来以及今后10到20年这段时间是我国电力工业高速发展的时期。随着三峡水电站的投运,西部地区能源的进一步开发, $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流及 1000kV 特高压交流输电线路的建设,我国将在已经建成的 $500\text{kV}/330\text{kV}$ 超高压网架上形成全国性特高压互联大电网。随着计算机信息技术、现代应用数学、现代控制理论、电力电子技术、现代通信技术等现代科技成果的不断发展和应用,电力系统正在迅速走向高科技化和现代化。现代电力系统的发展有力地促进了国民经济的快速持续增长,推动了社会的进步。大容量、超大规模、超高压、交直流混合,以及信息化、柔性和市场化标志着现代电力系统时代已经到来。

今天,电力系统及相关学科的迅猛发展对电力系统分析的理论与研究方法产生了深刻影响:其发展已经与计算机信息技术的应用和发展融为一体,密不可分。电力电子技术在电力系统中的大量应用为电力系统提供了更快速、更准确、更柔性化的控制手段,使以前难以实现的控制手段和调节方法成为可能。这些都需要人们对现代电力系统分析的理论、模型和算法进一步研究和完善。

在此背景下我们编写了这本教材。本书能较好地适应目前我国新时期高校电气工程及其自动化专业研究生教学的要求。本书也可作为本科生高年级专业方向课的教学用书,并可作为高级工程人员的参考书。

本书在简明介绍已成熟实用的基本理论和方法的基础上,系统反映与现代电力系统安全稳定、经济运行紧密相关的,有代表性的现代电力系统分析的理论和方法;重点论述以计算机为工具,相应数学理论方法为基础,进行电力系统稳态及暂态分析的原理和方法,特别是在我国电力系统已获得或即将获得应用的新的、有一定前瞻意义的理论和方法。

本书所指的“现代”既表明研究的对象是现代电力系统,也表明讲述的理论和方法将突出现代的含义。本书的编著思想是希望在本电力系统分析理论和方法的基础上,尽可能系统地反映现代电力系统分析所应用的理论和方法。

本书分为稳态分析、故障分析和稳定性分析3个部分。

第一章绪论,简述电力工业发展,归纳现代电力系统的基本特征,概括现代电力系统分析理论方法发展历史和基本概念,引出本书编撰思想和主要内容。

第二章在回顾经典潮流算法牛顿法和 $P-Q$ 分解法的基础上,介绍保留非线性潮流算法和非线性规划潮流算法,且简单介绍了几种特殊性质的潮流计算。

第三章讲述电力系统最优潮流的数学模型和算法。电力市场化的改革对降低电价、改善电力系统运行的经济性提出了迫切要求,而最优潮流是解决电力市场理论和实践中诸如节点

实时电价与辅助服务定价、输电费用计算、网络阻塞管理、可用传输容量估计等重要问题，本章主要介绍电力市场环境下的最优潮流计算。

第四章讲述直流输电系统和柔性交流输电系统的基本原理和数学模型，并重点介绍已较为成熟的交直流混合电力系统和含有柔性交流输电装置的电力系统潮流计算方法。

第五章着重论述静态安全分析，重点介绍较成熟且在实际系统中已有应用的电力系统静态安全分析方法，其中包括电力系统静态等值、静态安全分析的支路开断和发电机开断模拟，以及预想事故的筛选；随后简要介绍静态安全域的概念和动态安全分析的研究。

第六章介绍电力系统故障分析的计算机算法，重点讨论计算故障瞬间电流和电压周期分量的方法。该章在简要回顾简单对称短路和不对称故障的分析计算方法之后，重点介绍短路和断线故障的通用复合序网，以及用于故障分析的两端口网络方程，并且在此基础上，进一步介绍复杂故障的分析计算方法。

作为稳定分析研究的基础，在讲述稳定分析之前，第七章先介绍同步电机、励磁系统、原动机及调速系统，以及负荷的动态模型。

第八章为电力系统的小扰动分析，介绍电力系统各元件的线性化方程和小扰动稳定分析方法，以及状态矩阵的特征行为，其中包括特征值与特征向量及特征值灵敏度分析。第九章介绍电力系统暂态稳定分析的数值解法和直接法。

第十章介绍电压稳定的相关概念和理论，以及电压稳定性分析方法。

本书由刘天琪、邱晓燕、李华强合作编写，刘天琪任主编。第二章、第三章、第四章和第六章由邱晓燕教授负责编写；第八章和第十章由李华强教授负责编写；其余部分由刘天琪教授编写并负责全书统筹。

本书由华北电力大学李庚银教授主审，提出了一些宝贵意见，在此表示感谢。在本书的编撰过程中，得到了四川大学电气信息学院及院领导的支持，得到了李兴源教授的热心帮助，在此谨对他们表示衷心地感谢。感谢周惟婧等硕士研究生对书稿的认真校对，同时对本书所列参考书目的各位作者表示感谢。

由于编者水平有限，加之编写时间仓促，书中不妥之处在所难免，恳请读者给予批评指正。

编者

2007年8月于四川大学

目 录

前言	1
第一章 绪论	1
第一节 电力工业发展概述	1
第二节 现代电力系统的基本特征	7
第三节 现代电力系统分析理论与方法	11
第二章 电力系统潮流计算	17
第一节 概述	17
第二节 潮流计算的数学模型	18
第三节 牛顿法潮流计算	21
第四节 $P-Q$ 分解法潮流计算	27
第五节 潮流计算中负荷静态特性的考虑	32
第六节 保留非线性潮流算法	34
第七节 非线性规划潮流算法	39
第八节 几种特殊性质的潮流计算问题简介	43
第三章 电力系统最优潮流	47
第一节 概述	47
第二节 最优潮流的数学模型	47
第三节 最优潮流的算法	49
第四节 电力市场环境下的最优潮流计算	63
第四章 高压直流输电及柔性交流输电系统	69
第一节 概述	69
第二节 直流输电系统的稳态模型	70
第三节 交直流电力系统潮流计算	87
第四节 柔性输电元件的工作原理及数学模型	94
第五节 含柔性输电元件的电力系统潮流计算	102
第五章 电力系统安全分析	106
第一节 概述	106
第二节 电力系统的静态等值	108
第三节 静态安全分析的支路开断模拟	114
第四节 静态安全分析的发电机开断模拟	119
第五节 预想事故的自动筛选	125
第六节 电力系统静态安全域	127
第七节 电力系统动态安全分析	129
第六章 电力系统故障分析	134
第一节 概述	134

第二节	对称短路的分析计算	134
第三节	简单不对称故障的分析计算	138
第四节	简单不对称故障的通用复合序网	142
第五节	用于故障分析的两端口网络方程	146
第六节	复杂故障分析	149
第七章	发电机和负荷的动态模型	156
第一节	概述	156
第二节	同步电机的数学模型	157
第三节	发电机励磁系统的数学模型	170
第四节	原动机及调速系统的数学模型	177
第五节	负荷的数学模型	182
第八章	电力系统小扰动稳定分析	186
第一节	概述	186
第二节	电力系统各元件的线性化方程	189
第三节	小扰动稳定性分析	198
第四节	状态矩阵的特征行为	201
第九章	电力系统暂态稳定分析	205
第一节	概述	205
第二节	暂态稳定分析的数值解法	206
第三节	网络数学模型及网络操作处理	210
第四节	微分方程的数值解法	217
第五节	暂态稳定分析数值解的计算过程	219
第六节	暂态稳定性分析的直接法	224
第七节	交直流混合系统的暂态稳定性分析	239
第八节	电力系统暂态稳定实例	243
第十章	电力系统电压稳定	246
第一节	电力系统电压稳定性的基本概念	246
第二节	分岔理论	249
第三节	电力系统静态电压稳定性	253
第四节	电力系统动态电压稳定性	260
第五节	电压稳定性分析与控制的功能要求	264
参考文献	270

第一章 绪 论

第一节 电力工业发展概述

一、发电

从 1831 年法拉第发现电磁感应定律到 1875 年法国巴黎北火车站发电厂和世界上第一条（直流，供电半径不足 2km）输电线路的建立，标志着世界电力时代的到来，电力能源真正进入了实用阶段。1879 年开始发电的美国旧金山实验电厂是世界上最早出售电力的电厂。经过 100 年的发展，到 1980 年全世界发电装机总容量已达到 20.24 亿 kW，年发电量达到 82473 亿 kW·h，见表 1-1。

火电：火力发电在所有电能生产中所占的比例始终是最大的，见表 1-2、表 1-3。目前，世界上单机容量最大的汽轮发电机是 1972 年首次在美国投入运行的 1300MW 机组。

水电：早期的水利发电大都是小型水电。随着用电量的增长、超高压输电技术的发展、水轮发电机制造水平及水电建设技术水平的提高，水电厂的建设规模越来越大。目前，世界上最大的水轮发电机组是安装在美国大古力水电厂、伊泰普水电厂和我国三峡水电厂的 700MW 机组。2004 年中国水电装机总容量突破了 1 亿 kW，成为世界水电装机容量最大的国家。

核电：核电被认为是一种“安全、可靠、高效、经济、清洁”的电力。世界上第一台核电机组于 1954 年 4 月在莫斯科近郊奥勃宁斯克核电厂投入运行。根据国际原子能机构（IAEA）的统计数据，截止到 2005 年底，全世界有核电机组 441 台，核能总发电量达 2.63 万亿 kW·h，发电量约占世界总发电量的 16%。2006 年核发电量在总发电量中所占比例超过 20% 的有 18 个国家，其中法国比例最高，为 78.5%；立陶宛次之，占总发电量的 69.6%。在亚洲，核电占总发电量比例最高的是韩国，有 44.7% 之多。

其他形式的发电：当今，传统的石化能源与经济、环境的矛盾越来越突出，发展可再生绿色能源（包括风能、生物能、地热能、波浪能、太阳能、氢能等）已成为全球的热点。至 1999 年，世界其他类发电量占总发电量的 1.6%，其中风能发电比较突出。2006 年年底世界风电装机容量已达 75000MW，比上年增长 27%。在丹麦，风力发电占全国电力的 20%，这一比例居世界第一。而德国则继续保持世界风力发电第一的地位，其市场累计安装风力发电设备 18685 台，发电总装机容量 20622MW。其次，太阳能发电也方兴未艾，美国、日本、德国等国均制定了中长期光伏电池发展规划，前景光明。目前世界上装机最大的太阳能发电厂在葡萄牙塞尔帕，2007 年投产，共安装了 5.2 万组太阳能光伏电池，容量为 11MW。

二、世界各国发电比例与构成

据联合国能源统计资料，1997 年世界总发电量为 139487 亿 kW·h，其中火电占 64.0%，水电占 18.4%，核电占 17.2%，地热及其他能源发电占 0.4%；1996 年世界发电装机总容量为 3117680MW，其中火电装机占 65.4%，水电装机占 22.8%，核电装机占 11.4%，地热及其他能源装机占 0.4%。发电量和装机容量的地域分布不均，其中北美洲和

欧洲的发电量占世界总发电量的 61.8%，亚洲占 29.4%，而南美洲、非洲和大洋洲的发电量之和仅占 8.8%；装机容量的地区分布也呈相似的格局。表 1-1 列出了 1980 年至 1996 年世界发电量和装机容量的地区分布状况。从世界发电量的变化可以看出，20 世纪 80 年代的年增长率为 3.1%，而 90 年代以来年增长率下降为 2.1%；但在亚洲，80 年代年增长率为 6.3%，90 年代为 6.5%，仍维持较高的增长速度。

表 1-1 世界发电量和装机容量的地区分布

地区	1980	1985	1990	1996
发电量/亿 kW·h				
非洲	1884	2315	3188	3715
北美洲	28452	31683	36794	42578
南美洲	2719	3525	4460	6002
亚洲	13383	17805	25705	39691
欧洲	21868	24810	28043	40968
大洋洲	1228	1538	1902	2189
前苏联	12939	15441	17464	—
世界	82473	97117	117738	135143
装机容量/MW				
非洲	44530	58550	72990	94110
北美洲	743040	845610	883510	960900
南美洲	68470	91080	116660	134600
亚洲	333440	450840	611060	889520
欧洲	534980	615750	684950	989830
大洋洲	32950	41970	45000	48710
前苏联	266760	314890	343680	—
世界	2024170	2418690	2757850	3117670

注 1. 亚洲、欧洲数据中 1990 年以前未包括前苏联，故前苏联的数据单独列出。

2. 资料来源：联合国历年 Energy Statistics Yearbook。

1996 年末全世界年发电量超过 2000 亿 kW·h 的国家有 12 个，其发电量的总和约占世界总发电量的 71.3%。如按国家排序，美国当年的净发电量为 34599.7 亿 kW·h，居世界首位；20 世纪 90 年代初期居第四位的中国在 1994 年和 1995 年分别超过俄罗斯和日本，上升到第二位；日本居第三位；俄罗斯排第四位；韩国在 1995 年超过乌克兰，排在第十二位。表 1-2 列出了 1996 年这些国家发电量和装机容量的构成情况。

表 1-2 1996 年一些国家发电量和装机容量构成

序号	国家	发电量 /亿 kW·h	水电/%	火电/%	核电/%	装机容量 /MW	水电/%	火电/%	核电/%
1	美国	34599.7	10.0	70.5	19.5	783502	12.5	74.6	12.9
2	中国	10793.6	17.3	81.4	1.3	236542	23.5	75.6	0.9

续表

序号	国家	发电量 /亿 kW·h	水电/%	火电/%	核电/%	装机容量 /MW	水电/%	火电/%	核电/%
3	日本	10121.5	8.8	61.3	29.9	233737	19.0	62.7	18.3
4	俄罗斯	8472.0	19.5	68.8	11.7	210857	20.7	69.2	10.1
5	加拿大	5557.1	63.5	20.8	15.7	113612	58.0	27.6	14.4
6	德国	5444.4	4.9	65.5	29.6	115443	7.7	72.5	19.8
7	法国	4840.0	13.3	8.6	78.1	120740	20.8	23.5	55.7
8	印度	4323.4	17.0	81.1	1.9	96803	21.8	75.9	2.3
9	英国	3273.5	1.4	71.3	27.3	70460	5.8	76.6	17.6
10	巴西	2898.2	91.7	7.5	0.8	60756	87.3	11.6	1.1
11	意大利	2414.1	19.5	80.5	0	68146	29.2	70.8	0
12	韩国	2275.5	2.3	65.2	32.5	39239	7.9	67.6	24.5

根据国电信息中心统计的 2006 年经济发展与合作组织 (OECD) 成员国电力平衡情况, 可以从中了解更多世界电力的发展概况, 见表 1-3。

表 1-3 2006 年经济发展与合作组织 (OECD) 成员国电力平衡统计 (表)

国 家	OECD 30 国 2006 年电力概况/百万 kW·h							
	火电量	核电量	水电量	地热/其他	总发电量	进口	出口	供电量
OECD /10 亿 kW·h	6283.4	2254.1	1329.0	149.4	10016.0	431.7	420.1	10027.6
澳大利亚	221856	—	15923	926	238705	—	—	238705
奥地利	21672	—	35222	1753	58647	21257	14407	65497
比利时	35298	44150	1608	406	81462	18864	8694	91632
加拿大	146502	92398	356930	1919	597749	20868	44049	574568
捷克	50008	24502	3328	47	77885	11931	24037	65779
丹麦	38107	—	24	6109	44240	6767	13703	37304
芬兰	44727	21982	11454	147	78310	14098	2716	89692
法国	55600	429383	62757	2323	550063	8437	71989	486511
德国	354871	160237	27058	27777	569943	49368	65116	554195
匈牙利	19732	12549	185	1353	33819	14972	7765	41026
希腊	47273	—	6259	1691	55223	5705	1694	59234
冰岛	16	—	7249	2447	9712	—	—	9712
爱尔兰	22481	—	1065	1622	25168	1788	—	26956
意大利	248734	—	42769	7497	299000	46737	1714	344023
日本	645941	289436	93746	4135	1033258	—	—	1033258
韩国	246464	141237	5172	92	392965	—	—	392965
卢森堡	3210	—	901	44	4155	6823	3267	7711

续表

国 家	OECD 30 国 2006 年电力概况/百万 kW·h							
	火电量	核电量	水电量	地热/其他	总发电量	进口	出口	供电量
墨西哥	183006	10399	29911	6467	229783	385	938	229230
荷兰	88034	3260	106	2799	94199	27346	5886	115659
新西兰	14051	—	23087	3526	40664	—	—	40664
挪威	954	—	118999	671	120624	9802	8942	121484
波兰	144171	—	3535	254	147960	4789	15775	136974
葡萄牙	31580	—	11753	5543	48876	8565	3179	54262
斯洛伐克	7369	16432	4527	0	28328	8591	10920	25999
西班牙	180922	57635	29645	26394	294596	9463	12767	291292
瑞典	12907	65369	61587	1029	140892	20642	14425	147109
瑞士	3305	26244	32545	24	62118	60067	58950	63235
土耳其	124720	—	43877	210	168807	575	2259	167123
英国	304450	69355	7876	2217	383898	11551	2248	393201
美国	2985451	789572	289928	40016	4104967	42353	24674	4122646

三、输（变）电

发电技术的发展促进了输电技术的发展。1882年，为了给慕尼黑国际博览会装饰喷泉的水泵电动机供电，法国物理学家德普勒将装在米斯巴赫煤矿中的直流发电机以1500~2000V直流电压向远在57km外的负荷输送了1500W电力。这是人类有史以来第一次远距离高压输电。

尽管在电力发展初期直流系统得到了广泛应用，但为了提高输电效率，需要制造更高电压等级的高压直流发电机和电动机等电力设备，而到了19世纪80年代以后，制造业的滞后已经严重制约了直流系统的发展。随着电力变压器的实际应用，昔日直流输电技术的地位很快被交流输电所代替。1891年8月25日世界上第一条三相交流高压输电线路投入运行。该输电线路始于法国劳芬，止于德国法兰克福，全长170km。劳芬水电站安装了一台230kV·A、90V、40Hz的三相交流发电机，一台200kV·A、95/15200V的变压器；法兰克福安装了两台13800/112V降压变压器。交流输电系统很快胜出的原因主要有3点：交流系统的电压水平可以很容易地转换，因而为不同电压的发电、输电和用电提供了灵活性；交流发电机比直流发电机更简单；交流电动机比直流电动机更简单、更便宜。

当第一台30kV电压的高压油浸变压器于1891年由瑞士人布洛制造出来之后，高压输电网得到迅速发展。世界用电负荷的快速增长极大地带动了发电机制造技术向大型、特大型机组发展。而由于供电范围扩大，以大型和特大型发电机组为基础建设的大容量和特大容量电厂越来越向远离负荷中心的一次能源地区发展。为了满足大容量远距离输电的需求，电网的电压等级迅速向超高压、特高压发展。从20世纪50年代开始，330kV及以上的超高压输电线路得到了很快的发展。1952年在瑞典建成世界上第一条380kV超高压线路；1965年加拿大建成世界第一条735kV线路。随后，美国又于1969年建成765kV线路；1985年，前苏联哈萨克的埃基巴斯图兹火电厂至乌拉尔的1150kV特高压输电线投入运行，线路长

1300km, 更是创造了输电电压的新纪录。

虽然交流输电系统一统天下历经半个多世纪, 而且在发电和变电方面, 交流至今仍保持着明显的优势, 但随着现代工业和社会的发展, 直流输电又日益显示出一些优于交流的特性。比如: 交流系统必须考虑同步稳定性问题, 直流没有这个问题; 大容量超远距离输电将大大增加建设投资费用, 相反, 直流系统可能要节约许多投资。一般认为, 当输电距离足够长时(对架空线路, 一般认为交流与直流输电距离的交叉点大约是 500km, 对地下或海底电缆是 50km), 直流输电的经济性将优于交流输电; 随着现代控制技术的发展和直流输电可以通过快速(毫秒级)控制换流器实现对传输功率快速灵活的控制; 直流输电线路可以连接两个不同步或频率不同的交流系统等。因此, 20 世纪 30 年代直流系统又东山再起, 重新受到青睐, 并在 20 世纪 50 年代中期进入工业应用阶段, 不过这时已不是用直流发电机直接发电, 而是采用了交流发电, 通过整流和逆变技术进行直流输电。1954 年, 瑞典在本土与果特兰岛之间建成了世界上第一条工业性直流输电线(94km 海底电缆), 采用汞弧阀作为变流装置。晶闸管整流元件的出现促进了高压直流输电的进一步发展。目前正在建设中的世界最高电压等级的直流线路是我国云南楚雄州禄丰县至广州增城市的云广 ± 800 kV 特高压直流输电线路, 线路全长 1438km, 额定输送容量 5000MW, 2010 年将双极投运。进入 21 世纪, 直流输电进入了新的发展时期。

输电电压一般分高压、超高压和特高压。国际上, 高压(HV)通常指 35~220kV 的电压; 超高压(EHV)通常指 330kV 及以上、1000kV 以下的电压; 特高压(UHV)通常指的是 1000kV 及以上的电压。高压直流(HVDC)通常指的是 ± 600 kV 及以下的直流输电电压, ± 600 kV 以上的输电电压称为特高压直流(UHVDC)。

四、电网的进一步发展

从 20 世纪 30 年代开始, 各工业发达国家的高压电网发展迅速。到 20 世纪 50 年代, 瑞典、原联邦德国分别联成 380kV 超高压电网; 法国联成 400kV 电网; 美国、加拿大联成 300~345kV 的电网; 英国联成 275kV 的电网。世界电网进一步朝着大规模、互联方向发展。

随着电力工业的发展, 各工业发达国家电网规模的日益扩大, 现代电力交易需求的发展和不同电源的互补和调剂的需要, 不仅在本国形成统一电网, 而且出现了跨国互联电网, 比如:

美国、加拿大和墨西哥的部分电网已互联形成北美电网, 包括东部、西部、德克萨斯州和魁北克 4 个互联电网。东部电网是全北美互联网中最大的互联电网, 装机约 6 亿 kW, 最大负荷约 5 亿 kW, 从加拿大的新斯科舍至美国的佛罗里达。西部电网居于次席, 该电网与东部电网通过直流输电线路相连。德克萨斯电网是全美大陆唯一的以州为界的独立的交流电网, 供电范围覆盖德州的大部分地区, 该网通过直流线路与东部网连接。魁北克电网位于加拿大境内, 该网通过直流线路与东部电网相连。美国、加拿大和墨西哥各地区之间建有许多联络线。1998 年统计, 美国与加拿大的 7 个省电网之间建有 79 条输电线, 交流互联线路的电压等级有 500、230、115kV 等。此外还有一条多端超高压直流输电线路以及多个直流背靠背联系。美国至墨西哥之间有 27 条输电线路, 大部分为交流输电线路。

俄罗斯境内原有 70 个地区电网, 其中的 65 个已经形成互联, 形成一个巨大的同步电网, 由俄罗斯统一电力系统股份公司(EES)管理。现在俄罗斯境内已经增至 78 个地区电

网, 其中 69 个由 220~1150kV (降压运行) 输电线路连接在一起, 形成整个俄罗斯统一电网, 网内有 500 多座发电厂并网运行。2000 年 6 月, 俄罗斯统一电网和哈萨克斯坦电网恢复同步联网运行 (原苏联解体时解网运行)。同年 9 月, 中亚地区的吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、土库曼斯坦等国家电网通过哈萨克斯坦电网与俄罗斯统一电网实现联网。2001 年 8 月, 乌克兰和摩尔多瓦两国同步联网, 之后与俄罗斯电网联网, 形成了 11 个独联体加盟国互联大电网。

另外, 西欧与东欧之间通过高压输电线于 2004 年 10 月 10 日实现了联网, 这不仅有助于改善东南欧电力供应的稳定性, 还可能进一步向亚洲地区拓展电网, 形成世界上最大的同步电网, 为扩大能源贸易提供了通道。

今天, 发展互联电网已成为世界各国实现电力工业现代化的一项重要技术政策。其主要原因是: 发展电网和电网互联具有显著的技术经济效益; 可以合理开发利用动力资源; 可以减少发电设备的检修和事故备用容量; 可以安装大型机组, 建设大型发电厂, 节约投资和降低运行费用; 可以实现水、火电经济调度和跨流域水库调度; 可以互相支援电力, 提高电能质量和供电可靠性等。电力技术的发展促进了电力工业、电气设备制造工业的建立, 同时带动了全球经济发展, 有力地促进了社会文明的进步。

五、我国电力系统简况

我国的电力工业起步很早, 几乎与世界同步。自 1879 年 5 月上海公共租界点亮第一盏电灯开始写下了中国使用电力照明的历史。1882 年中国第一家公用电业公司——上海电气公司在上海创办。不过后来几十年一直发展缓慢, 至 1949 年, 全国的总装机容量仅有 1850MW, 年发电量仅 43 亿 kW·h, 分别位居世界第 21 位和 25 位。

新中国成立后, 我国电力工业得到迅速发展。到 1978 年, 全国发电装机容量已达 57120MW, 比 1949 年增长 30 倍; 年发电量 2566 亿 kW·h, 增长近 59 倍。装机容量和发电量分别跃居世界第 8 位和第 7 位。

改革开放后, 1987 年, 电力装机容量达 10 亿 MW, 1995 年突破 20 亿 MW。到 1996 年, 全国装机容量达 25 亿 MW, 年发电量达 11320 亿 kW·h, 跃居世界第二位, 成为世界电力生产和消费大国。2000 年总装机容量再次跨上 30 亿 MW 台阶, 到 2005 年全国装机容量已达到 50 亿 MW, 发电量为 24747 亿 kW·h。2006 年全国装机容量超过 60 亿 MW, 发电量达到了 28344 亿 kW·h。

2003 年 7 月 10 日, 举世瞩目的长江三峡水电站首台机组正式并网发电, 2009 年全部机组投入运行后它将成为世界上最大的水电站。2020 年, 中国水电装机容量可望发展到 25 亿 MW, 水能资源开发程度达到 46%, 将成为真正的水电强国。

此外, 核能、风能、太阳能、地热能等新能源发电也相继发展。90 年代初相继投产的秦山核电站和大亚湾核电站填补了我国核电空白, 2003 年核电装机容量 6190MW, 核电年发电量已达 470 亿 kW·h, 而且还在继续发展, “十一五”国家核能建设将按照“加快核电发展”的方针快速发展。

2001 年全国新能源和可再生能源发电装机就已经达到了 360MW。风电发展更快, 截至 2006 年 9 月, 全国除台湾省外累计风电机组达 1864 台, 装机容量 1266MW。

在制造业方面我国已经取得了突破性进展, 600、900MW 超临界机组已经投产发电。2006 年 11 月 28 日, 我国首台国产百万千瓦超超临界燃煤机组——浙江华能玉环电厂 1 号

机组正式投入商业运行。这标志着我国已经掌握当今世界最先进的火力发电技术，也标志着我国发电设备制造能力和技术水平已经迈上一个新台阶。通过引进国际先进技术，国内合作生产的 300MW 大型循环流化床锅炉发电设备、9F 级联合循环燃气轮机、600MW 级压水堆核电站和 700MW 三峡水轮机组等发电设备在性价比上也具有了国际竞争力。

在输变电方面，1949 年，我国 35kV 及以上电压等级输电线路仅有 6475km。到 1978 年，全国 330、220kV 电网已初具规模。1982 年 1 月河南平顶山—湖北双河—武昌 500kV 输变电工程投产，这标志着我国开始步入超高电压时代。今天，500kV 输电网络已经成为全国各大电网的主干电网。1988 年，我国自行设计建设的第一条 ± 100 kV 直流高压输电工程竣工投运，该线路从浙江镇海到舟山岛，全长 53.1km（其中海底电缆 11km）。1989 年，建成 ± 500 kV 葛洲坝水电站到上海南桥的远距离超高压直流输电线路，全长 1080km，实现了华中与华东两大区域系统的直流联网。2001 年底，全国输电线路总长达 781854km，其中 500kV 线路 31486km，330kV 线路 9177km，220kV 线路 135935km，110kV 线路 220051km；总变电容量达 $1117710\text{MV}\cdot\text{A}$ ，其中 500kV 变电容量 $117310\text{MV}\cdot\text{A}$ ，330kV 变电容量 $15270\text{MV}\cdot\text{A}$ ，220kV 变电容量 $340260\text{MV}\cdot\text{A}$ ，110kV 变电容量 $402380\text{MV}\cdot\text{A}$ 。2003 年 9 月，东北、华北、华中和川渝电网实现互联，南北跨距超过 4600km。到 2003 年底，全国 220kV 及以上输电线路已经达到 80.7 万 km，变电容量达到 59.8 亿 $\text{MV}\cdot\text{A}$ 。2005 年 9 月 26 日，西北 750kV 输电线路正式投入运行。云广 ± 800 kV 特高压直流输电线路已于 2006 年 12 月 19 日已正式开工。2010 年三峡全部投运后将实现以三峡为中心的全国联网。在 2020 年前后，国网公司将建成覆盖华北—华中—华东的坚强的交流特高压同步电网，它将与同时建设的西南大型水电基地 ± 800 kV 高压直流送出工程，共同构成连接各大电源基地和主要负荷中心的特高压交直流混合电网。

第二节 现代电力系统的基本特征

今天，电力系统已经进入大电网、大电厂、大机组、超特高电压、远距离输电、交直流输电、高度自动控制和市场化营运的具有强烈现代特征的电力系统新时代。新技术、新材料和新工艺的不断发展应用，可持续发展战略的不断深化都将继续提高电网的输变电能力；提高发输配电效率；提高供电可靠性和电能质量；降低电力生产过程对自然环境的污染和对生物链的影响。百年电力将以崭新的姿态为世界文明续写着它辉煌的篇章。

一、现代电力系统的基本组成

无论从规模还是结构上看，电力系统无疑是人类所建立的最复杂的工业系统之一，是一个实现能量转换、传输、分配的复杂、大型、强非线性、高维数、分层分布的动态大系统。

现代电力系统虽然也由发电、输电、配电、用电等电气设备以及各种控制设备组成，但与传统电力系统相比，各部分或者环节都已经有了很大的改变。现代电力系统的基本构成如图 1-1 所示。

发电系统：发电系统由原动机、同步发电机和励磁系统组成。原动机将一次能源（化石燃料、核能和水能等）转换为机械能，再由同步发电机将它转换为电能。发电机为三相交流同步发电机。现代发电技术包括超临界和超超临界的发电技术，高效脱硫装置、循环流化床（CFBC）和整体煤气化联合循环（IGCC）等清洁煤燃烧技术，大型水电技术装备和低水头

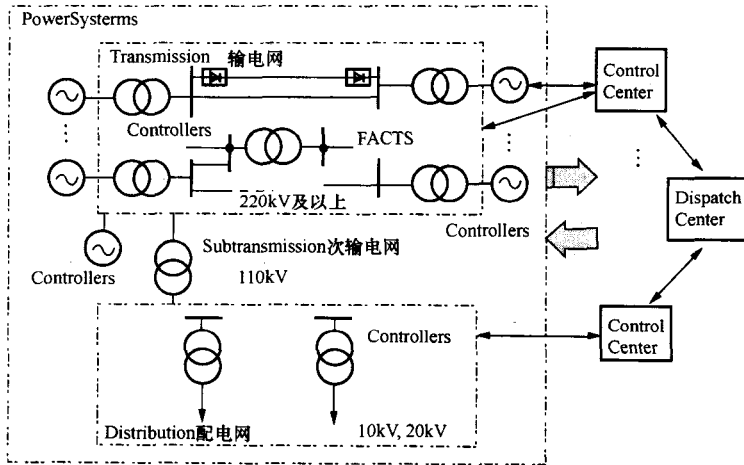


图 1-1 现代电力系统基本构成示意图

贯流机组、抽水蓄能机组制造技术，核电技术等。

输电系统：输电系统（又称电网）由输电和变电设备组成。输电设备主要有输电线、杆塔、绝缘子串等。变电设备主要有变压器、电抗器、电容器、断路器、开关、避雷器、互感器、母线等一次设备以及保证输变电安全可靠运行的继电保护、自动装置、控制设备等。通常，电网又按照电压等级和承担功能的不同分为 3 个子系统，即输电网络、次输电网络和配电网。

(1) **输电网络。**输电网络连接系统中主要的发电厂和主要的负荷中心。输电网络通常是将发电厂或发电基地（包括若干电厂）发出的电力输送到消费电能的地区，又称负荷中心，或者实现电网互联，将一个电网的电力输送到另一个电网。输电网络形成整个系统的骨干网络并运行于系统的最高电压水平。发电机的电压通常在 $10\sim 35\text{kV}$ 的范围内，经过升压达到输电电压水平后，由特高压、超高压或高压交流或直流输电线路将电能传输到输电变电站，在此经过降压达到次输电水平（一般为 110kV ）。发电和输电网络经常被称作主电力系统（bulk power system）。现代电网中，输电网的特征主要是特高压、超高压、交直流输变电、大区域互联电网、大容量输变电设备、超特高压继电保护、自动装置、大电网安全稳定控制、现代电网调度自动化、光纤化、信息化等。

(2) **次输电网络。**次输电网络将电力从输电变电站输往配电变电站。通常，大的工业用户直接由次输电系统供电。在某些系统中，次输电和输电回路之间没有清晰的界限。比如一些超大的工业用户也有直接通过 220kV 系统供电，然后再由内部进行电力分配。当系统扩展，或更高一级电压水平的输电变得必要时，原有输电线路承担的任务等级常被降低，起次输电的功能。现代电网中，次输电网的特征主要是高压、局部区域内电网互联、大电网安全稳定控制辅助执行控制、无油化、城市电缆化、变电站自动化及无人值班、地区电网调度自动化、光纤化、信息化等。

(3) **配电网。**配电网是将电力送往用户的最后一级电网，也是最复杂的一级电网。一次配电电压通常在 $4.0\sim 35\text{kV}$ 之间。较小的工业用户通过这一电压等级的主馈线供电。二次配电馈线以 $220/380\text{V}$ 电压向民用和商业用户供电一些欧美国家为 $100\sim 110\text{V}$ 。现代电网中，配电网的特征主要是中低压、网络复杂化、城市电缆化、绝缘化、无油化、小型化、

配电自动化、光纤化、信息化等。

二、现代电力系统运行的特点和要求

电力系统的功能是将能量从一种自然存在的形式（一次能源）转换为电能（二次能源）的形式，并将它输送到各个用户。能量很少以电的形式消费，而是将其转换为其他形式，如热、光和机械能。电能的优点是输送和控制相对容易，效率和可靠性高。电能的生产、输送、分配和使用与其他工业产品相比有着明显不同的特点，其主要区别如下。

(1) 同时性。电能不易储存，发电、输电、变电、配电、用电是同时完成的，必须用多少，发多少。

(2) 整体性。发电厂、变电站、高压输电线、配电线路和设备、用电设备在电网中形成一个不可分割的整体，缺一不可，否则电力生产不能完成。各个孤立的设备离开了电力生产链，也就失去了存在的意义。

(3) 快速性。电能是以电磁波的形式传播的，其速度为 30 万 km/s，当电网运行发生变化时其过渡过程十分迅速，故障中的控制更是以微秒、毫秒来计算时间的。电力生产的暂态过程十分短暂。

(4) 连续性。不同用户对电力的需求是不同的，用电的时间也不一致，也就要求电力生产必须具有不间断性持续生产的能力，需要对电网进行连续控制和调节，以保证供电质量和可靠供电。

(5) 实时性。由于电能输送的快速性，因此电网事故的发展也是非常迅速的，而且涉及面很广、对社会、经济的影响巨大，因此必须对电力生产状态进行实时监控。

(6) 随机性。负荷的变化是随机的、难以控制和调节的，电网设备故障和系统故障存在一定的随机性，完全做到可控是非常困难的。

电力工业时刻与国民经济各部门和人们的生活相关联，也是现代社会的基本特征。一个设计完善和运行良好的电力系统应满足以下基本要求。

(1) 系统必须能够适应不断变化的负荷有功和无功功率需求。因而，必须保持适当的有功和无功旋转备用，并始终给予适当的控制。

(2) 系统供电质量必须满足规定，即电压、频率在规定范围内，且具有（维持）一定的系统安全水平和供电可靠性。

(3) 由于快速性要求，电力系统的正常操作，如发电机、变压器、线路、用电设备的投入或退出，都应在瞬间完成，有些操作和故障的处理必须满足系统实时控制的要求。

(4) 最低成本供电。要求采用高效节能的发、输、配电设备；优化电源配置和电力网络设计；大力开展电力系统中的经济运行；充分利用水电资源，合理调配水、火电厂的出力，尽可能减小对生态环境的破坏和有害影响等。电能生产与消费的规模都很大，降低一次能源消耗和输送分配时的损耗对节约资源具有重要意义。

(5) 电力系统运行和控制必须满足在发电、输电和供电分别独立经营的条件下，保持电网的安全稳定运行水平。电力系统运营的市场化使得电力系统的运行方式更加复杂多变，电力传输网络必须具有更强的自身调控能力。

(6) 电网互联。互联大电网的稳定问题并不是小系统稳定问题的简单叠加，特别是经弱联络线连接的互联电网，它很容易在故障中失去稳定。电网的互联形成了区域振荡模式，其动态行为非常复杂，甚至可能产生混沌。系统规模的扩大、快速控制装置的引入可能会使系

统的阻尼减少，发生持续的功率振荡。因此，互联大电网对安全稳定分析与控制的要求更高。

三、现代电力系统的控制

现代电力系统的控制主要包括发电控制、输电控制、调度控制和信息系统，如图 1-2 所示。

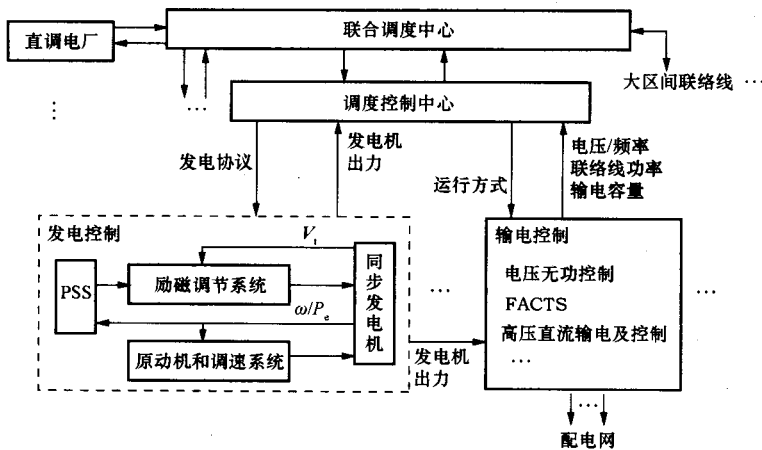


图 1-2 现代电力系统控制示意图

(1) 发电控制。发电控制由励磁调节系统和原动机调速系统组成，根据发电协议和机组优化方案控制发电机组输出的有功功率。其中，励磁调节系统控制发电机机端电压和无功功率输出；原动机调速系统控制传动同步发电机的机械能（同步发电机输入机械能）的大小，从而控制发电机组输出的

有功功率。系统发电控制的首要任务是维持整个系统的发电与系统负荷和损耗的平衡，从而保证发电协议的执行，且维持系统频率及联络线潮流（与相邻系统的交换功率）在允许范围内。同时发电控制对调控整个系统的运行状态起着至关重要的作用。

(2) 输电控制。输电控制包括功率和电压控制设备，例如静止无功补偿器、同步调相机、串/并联电容器和电抗器、有载调压变压器、移相变压器，以及柔性交流输电 (FACTS) 和高压直流输电控制等。柔性交流输电技术利用大功率电力电子元器件构成的装置来控制或调节交流电力系统，从而达到控制系统的目的。其优点突出表现在：在不改变现有电网结构的情况下，可以极大地提高电网的输电能力；提高系统的可靠性、快速性和灵活性；扩大系统对电压和潮流的控制能力；有很强的限制短路电流、阻尼振荡的能力，能有效提高系统暂态稳定性；对系统的参数既可断续调节又可连续调节。

(3) 调度控制和信息系统。电网调度自动化系统是确保电网安全、优质、经济地发供电，提高电网调度运行管理水平的重要手段，是电力生产自动化和管理现代化的重要基础。随着电力工业技术的发展，规模扩大和网络互联、FACTS 的大量应用，各种发电体制的加入以及营运体制的改革，电网的运行和控制越来越依赖于完善、先进和实用的调度自动化系统以及先进的信息网络和完善的通信手段。现代电网调度自动化系统的内涵也在不断丰富、发展，不仅包括能量管理系统 (EMS)、配网管理系统 (DMS)、水调自动化系统等，还将包括电力市场技术支持系统、电力信息 MIS、变电站自动化、数字化变电站、互联网等现代化手段和技术的支撑。

综上所述，现代电力系统的特征主要体现在以下几个方面。

- (1) 大容量、高参数发、输、变电设备；
- (2) 发、输、变电设备制造工艺和材料的现代化和高科技化；