



“十三五”普通高等教育规划教材

研究生适用

XIANDAI DIANLI XITONG FENXI LILUN YU FANGFA

# 现代电力系统分析 理论与方法 (第二版)

刘天琪 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

4



“十三五”普通高等教育规划

# 现代电力系统分析 理论与方法 (第二版)

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  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

全书共分四篇十三章, 主要包括现代电力系统及主要元件模型, 电力系统稳态分析及优化运行的电力系统潮流计算和最优潮流, 电力系统故障及稳定性分析的电力系统复杂故障分析, 电力系统小扰动稳定分析, 电力系统暂态稳定分析, 电力系统电压稳定分析, 以及电力系统安全分析。

本书主要作为高等院校电力系统及其自动化专业的研究生教材, 也可作为电气工程及其自动化专业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. —2版. —北京: 中国电力出版社, 2016.9

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-5123-9649-4

I. ①现… II. ①刘… III. ①电力系统—系统分析—高等学校—教材 IV. ①TM711.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 187588 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>)

北京天宇星印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2007 年 9 月第一版

2016 年 9 月第二版 2016 年 9 月北京第八次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.75 印张 480 千字

定价 40.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪

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

本书第一版自 2007 年正式出版以来,已在电气工程—电力系统及其自动化专业研究生教学中连续使用多届。由于该书较好适应了近 10 年我国新时期高校电气工程类研究生教学的要求,因此被很多院校选作研究生或本科高年级学生教学用书。同时,在电力行业内,该书作为专业参考书也深得科研及高级工程技术人员的喜爱。

展望今后 10 年,我们正在迎来国家“十三五”经济社会战略实施、世界能源格局重构、电力系统新发展、信息来源多元化、认知规律多样性等新的挑战。作为高等院校高学历人才教学的基础,教材更新必然提上日程。同时,通过近 10 年教学和研究实践总结、梳理不同读者反馈意见,急需结合新的教学和人才培养目标对第一版教材进行完善,对原版文词错误再次修订、删除陈旧内容、增加新知识、融入新的教学方法等。这些思想和需求共同促成了第二版的出版。

根据教学需要,且便于读者查阅,第二版对体例进行了重新编排,全书归类形成四大篇,各篇之间章节连续编号,起到归大类分章节的作用,使全书逻辑关系更加清晰。其中改动较大的内容包括:绪论;删减了原来第六章电力系统故障分析中偏基础性的第一、二、三节,将复杂故障分拆为两节进行叙述,并将该章调整为第八章;新增了三章,即第二章交流输电线路和变压器模型、第四章风力发电系统和光伏电站模型以及第十三章电力系统动态安全分析。增加的章节使本书知识体例更趋完善。各篇、各章节主要编排如下:

第一篇 现代电力系统及主要元件模型,包括:

第一章 绪论,介绍电力工业发展概述,阐述现代电力系统的基本特征及现代电力系统分析理论与方法。

第二章 交流输电线路和变压器模型,讲解交流输电线路的等值电路和参数、变压器的等值电路和参数。

第三章 常规发电机组及负荷模型,讲述发电机和负荷的静态模型、同步电机的数学模型、发电机励磁系统的数学模型、原动机及调速系统的数学模型、负荷的数学模型。

第四章 风力发电系统和光伏电站模型,叙述风力发电系统模型及参数,简介光伏电站模型。

第五章 高压直流输电及柔性交流输电模型,介绍换流器的工作原理及基本方程、直流输电系统的稳态模型、直流输电系统的控制方式以及柔性输电元件的工作原理及数学模型。

第二篇 电力系统稳态分析及优化运行。

第六章 电力系统潮流计算,包括潮流计算的数学模型、牛顿法潮流计算、 $P-Q$  分解法潮流计算、保留非线性潮流算法以及非线性规划潮流算法。

第七章 电力系统最优潮流,介绍最优潮流的数学模型、最优潮流的简化梯度算法、最优潮流的牛顿算法、最优潮流的内点法以及电力市场环境下的最优潮流计算。

第三篇 电力系统故障及稳定性分析。

第八章 电力系统复杂故障分析,讲解不对称故障的通用复合序网、用于双重故障分析

的两端口网络方程、双重故障分析以及多重复杂故障分析。

第九章 电力系统小扰动稳定分析，讲解电力系统各元件的线性化方程、小扰动稳定性分析、状态矩阵的特征行为。

第十章 电力系统暂态稳定分析，阐述暂态稳定分析的数值解法、网络数学模型及网络操作处理、微分方程的数值解法、暂态稳定分析数值解的计算过程、暂态稳定分析的直接法以及交直流混合系统的暂态稳定分析。

第十一章 电力系统电压稳定，讲解分岔理论、电力系统静态电压稳定、电力系统动态电压稳定、电压稳定性分析与控制的功能要求。

第四篇 电力系统安全分析。

第十二章 电力系统静态安全分析，介绍电力系统的静态等值、静态安全分析的支路开断模拟、静态安全分析的发电机开断模拟、预想事故的自动筛选以及电力系统静态安全域。

第十三章 电力系统动态安全分析，阐述电力系统动态等值、动态安全分析的动态安全域法以及动态安全分析的人工智能法。

全书由刘天琪教授主编、统稿全书，其中刘天琪教授负责编写第一、二、三、四、十、十二、十三章；邱晓燕教授负责编写第五、六、七、八章；李华强教授负责编写第九、十一章。

在本书的编写过程中，得到四川大学电气信息学院及院领导的大力支持，特别表示衷心的感谢。感谢江琴等同学对文稿的校勘。同时，对本书所列参考文献的各位作者表示感谢。

限于编者水平，加之编写时间仓促，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2016年5月于四川大学 望江校园

# 第一版前言

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,±800kV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500kV/330kV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 etc 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。本书的编写思想是希望在基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。

限于编者水平，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  
第一版前言

## 第一篇 现代电力系统及主要元件模型

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	8
第三节 现代电力系统分析理论与方法	12
第二章 交流输电线路和变压器模型	18
第一节 交流输电线路的等值电路和参数	18
第二节 变压器的等值电路和参数	21
第三章 常规发电机组和负荷模型	24
第一节 概述	24
第二节 发电机和负荷的静态模型	25
第三节 同步电机的数学模型	27
第四节 发电机励磁系统的数学模型	40
第五节 原动机及调速系统的数学模型	47
第六节 负荷的数学模型	52
第四章 风力发电系统和光伏电站模型	57
第一节 概述	57
第二节 风力发电系统模型及参数	57
第三节 光伏电站模型简介	63
第五章 高压直流输电及柔性交流输电模型	67
第一节 概述	67
第二节 换流器的工作原理及基本方程	68
第三节 直流输电系统的稳态模型	78
第四节 直流输电系统的控制方式	82
第五节 柔性输电元件的工作原理及数学模型	85

## 第二篇 电力系统稳态分析及优化运行

第六章 电力系统潮流计算	94
第一节 概述	94



第二节	潮流计算的数学模型 .....	95
第三节	牛顿法潮流计算 .....	98
第四节	$P-Q$ 分解法潮流计算 .....	104
第五节	保留非线性潮流算法 .....	109
第六节	非线性规划潮流算法 .....	114
第七节	交直流电力系统潮流计算 .....	118
第八节	含柔性输电元件的电力系统潮流计算 .....	126
第九节	其他潮流计算问题简介 .....	129
<b>第七章</b>	<b>电力系统最优潮流 .....</b>	<b>132</b>
第一节	概述 .....	132
第二节	最优潮流的数学模型 .....	133
第三节	最优潮流的简化梯度算法 .....	135
第四节	最优潮流的牛顿算法 .....	139
第五节	最优潮流的内点法 .....	144
第六节	电力市场环境下的最优潮流计算 .....	148

### 第三篇 电力系统故障及稳定性分析

<b>第八章</b>	<b>电力系统复杂故障分析 .....</b>	<b>154</b>
第一节	概述 .....	154
第二节	不对称故障的通用复合序网 .....	154
第三节	用于双重故障分析的两端口网络方程 .....	159
第四节	双重故障分析 .....	163
第五节	多重复杂故障分析 .....	168
<b>第九章</b>	<b>电力系统小扰动稳定分析 .....</b>	<b>170</b>
第一节	概述 .....	170
第二节	电力系统各元件的线性化方程 .....	173
第三节	小扰动稳定性分析 .....	182
第四节	状态矩阵的特征行为 .....	185
<b>第十章</b>	<b>电力系统暂态稳定分析 .....</b>	<b>189</b>
第一节	概述 .....	189
第二节	暂态稳定分析的数值解法 .....	190
第三节	网络数学模型及网络操作处理 .....	193
第四节	微分方程的数值解法 .....	201
第五节	暂态稳定分析数值解的计算过程 .....	203
第六节	暂态稳定分析的直接法 .....	208
第七节	交直流混合系统的暂态稳定分析 .....	223
第八节	电力系统暂态稳定实例 .....	227

<b>第十一章 电力系统电压稳定</b> .....	230
第一节 电力系统电压稳定性的基本概念.....	230
第二节 分岔理论.....	233
第三节 电力系统静态电压稳定.....	237
第四节 电力系统动态电压稳定.....	244
第五节 电压稳定性分析与控制的功能要求.....	248

## 第四篇 电力系统安全分析

<b>第十二章 电力系统静态安全分析</b> .....	254
第一节 概述.....	254
第二节 电力系统的静态等值.....	256
第三节 静态安全分析的支路开断模拟.....	262
第四节 静态安全分析的发电机开断模拟.....	267
第五节 预想事故的自动筛选.....	273
第六节 电力系统静态安全域.....	275
<b>第十三章 电力系统动态安全分析</b> .....	278
第一节 概述.....	278
第二节 电力系统动态等值.....	278
第三节 动态安全分析的动态安全域法.....	287
第四节 动态安全分析的人工智能法.....	292
<b>参考文献</b> .....	298

# 第一篇 现代电力系统及主要元件模型

## 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。1882 年, 美国纽约珍珠街电厂建成发电, 6 台直流发电机, 总容量 670kW, 110V 供电灯照明。经过 100 年的发展, 到 1980 年全世界发电装机总容量达到了 20.24 亿 kW, 年发电量达到 82473 亿 kWh。

**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。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的提高, 水电厂的建设规模越来越大。目前(2015 年 12 月), 世界上最大的水轮发电机组是中国金沙江下游河段梯级白鹤滩水电站的单机容量 1000MW 机组。2004 年中国水电装机总容量已突破 1 亿 kW, 成为世界水电装机容量最大的国家。

水能是目前技术最成熟、经济性最高、已开发规模最大的清洁能源。据世界能源理事会统计, 全球水能资源理论蕴藏量约为 39 万亿 kWh/年, 主要分布在亚洲、南美洲、北美洲等地区。

全球水能资源技术可开发量约为 16 万亿 kWh/年, 占理论蕴藏量的 41%, 其中亚洲技术可开发量 7.20 万亿 kWh/年, 占世界总量的 46%; 南美洲 2.87 万亿 kWh/年, 占世界总量的 18%; 北美洲 2.42 万亿 kWh/年, 占世界总量的 16%; 欧洲 1.04 万亿 kWh/年, 占世界总量的 7%。世界各大洲水能资源量见表 1-1。水能资源技术可开发量居前五位的国家分别是中国、俄罗斯、美国、巴西、加拿大, 分别达到 2.47 万亿、1.67 万亿、1.34 万亿、1.25 万亿、0.83 万亿 kWh/年。

表 1-1

世界各大洲水能资源量

单位: 万亿 kWh/年

地 区	理论蕴藏量	技术可开发量
亚洲	18.31	7.20
欧洲	2.41	1.04
北美洲	5.51	2.42
南美洲	7.77	2.87
非洲	3.92	1.84
大洋洲	0.65	0.23

注 资料来自世界能源理事会, World Energy Resources: 2013 survey。

从各大洲看,截止 2013 年底,水电装机容量最大的是亚洲,达到 3.7 亿 kW,占世界水电总装机容量的 36.7%;其次是欧洲,为 2.5 亿 kW,占 24.8%;北美洲水电装机容量 2.0 亿 kW,占 19.8%;大洋洲水电装机容量 0.2 亿 kW,占 2.0%。1990—2013 年,全球水电年发电量从 2.21 万亿 kWh 提高到 3.19 万亿 kWh,年均增长 1.6%。2013 年世界各大洲水电装机容量及发电量情况见 1-2。

表 1-2 2013 年世界各大洲水电装机容量及发电量

地区	装机容量		发电量	
	水电装机容量 (亿 kW)	水电装机容量 占全球容量比 (%)	水电发电量 (万亿 kWh)	水电发电量占全球 发电量比 (%)
世界总计	10.1	100	3.19	100
亚洲	3.7	36.7	1.07	33.5
欧洲	2.5	24.8	0.60	18.8
北美洲	2.0	19.8	0.68	21.3
南美洲	1.4	13.7	0.72	22.6
非洲	0.3	3.0	0.08	2.5
大洋洲	0.2	2.0	0.04	1.3

注 资料来自世界能源理事会, World Energy Resources: 2013 survey; BP, Statistical Review of World Energy 2014。

中国是世界上水能资源最为丰富的国家,技术可开发装机容量达到 5.7 亿 kW,年发电量 2.47 万亿 kWh/年。截至 2013 年底,中国水电装机容量 2.8 亿 kW,约为技术可开发装机容量的  $1/2$ <sup>[144]</sup>。

**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) 统计数据,截止到 2005 年底,全世界有核电机组 441 台,总发电量达 2.63 万亿 kWh,发电量约占世界总发电量的 16%。2006 年核电发电量在国内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,为 69.6%。在亚洲,核电占国内总发电量比例最高的是韩国,有 44.7% 之多。截至 2013 年底,全球 30 个国家或地区,在运的核电机组共有 434 台,总装机容量约为 3.7 亿 kW。

**其他能源的发电:**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,世界其他能源发电量仅占总发电量的 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%,这一比例位居世界第一;德国则继续保持世界风力发电第一的地位,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能电池发展规划,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,1996年世界发电装机总容量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1-3是1980-2013年世界发电量和装机容量的地区分布状况。

表 1-3 1980-2013 世界发电量和装机容量的地区分布

地 区	1980 年	1985 年	1990 年	1996 年	2013 年
发电量 (亿 kWh)					
非 洲	1884	2315	3188	3715	7030
北美洲	28452	31683	36794	42578	51808
南美洲	2719	3525	4460	6002	12365
亚 洲	13383	17805	25705	39691	96697 (亚太)
欧 洲	21868	24810	28043	40968	53241
大洋洲	1228	1538	1902	2189	—
苏 联	12939	15441	17464	—	—
世 界	82473	97117	117738	135143	225000
装机容量 (亿 kW)					
非 洲	0.44530	0.58550	0.72990	0.94110	1.6
北美洲	7.43040	8.45610	8.83510	9.60900	14.1
南美洲	0.68470	0.91080	1.16660	1.34600	2.6
亚 洲	3.33440	4.50840	6.11060	8.89520	24.4
欧 洲	5.34980	6.15750	6.84950	9.89830	13.9
大洋洲	0.32950	0.41970	0.45000	0.48710	0.8
苏 联	2.66760	3.14890	3.43680	—	—
世 界	20.24170	24.18690	27.57850	31.17670	57.3

注 1. 亚洲、欧洲数据中1990年以前未包括苏联,故苏联的数据单独列出。

2. 资料来自联合国历年 Energy Statistics Yearbook

1996年末全世界年发电量超过2000亿kWh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3.46万亿kWh,居世界首位;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;俄罗斯排第四位;韩国在1995年超过乌克兰,排在第十二位。2011年,中国净发电量总额达到4.47万亿kWh,超过美国的净发电量(为4.1万亿kWh),跃居世界第一。

世界发电装机容量与发电量持续快速增长。20世纪90年代以来,随着全球经济的快速发展及各类发电技术的不断突破,世界电力装机和发电量大幅提升。1990-2013年,全球发电装机容量由27.6亿kW增加到57.3亿kW,年均增长率约为3.2%;年发电量由11.77万亿kWh增长到22.5万亿kWh,年均增长率约为3.1%。

由于经济体量和电力消费水平不同，各大洲内部各国电力发展存在较大差异。截至2013年底，世界各大洲主要国家发电装机容量及年发电量见表1-4。

表 1-4 世界各大洲主要国家发电装机容量及年发电量

大 洲	国 家	装机容量 (亿 kW)	(亿 kWh)
亚洲	中国	12.5768	53721
	日本	2.9523	10523
	俄罗斯	2.4310	10499
欧洲	德国	1.8462	5964
	法国	1.2806	5508
	意大利	1.2423	2706
北美洲	美国	10.6790	42745
	加拿大	1.3420	6520
	墨西哥	0.6214	2982
南美洲	巴西	1.1713	5525
	阿根廷	0.3381	1348
	委内瑞拉	0.2571	1221
非洲	南非	0.4417	2551
	埃及	0.3005	1644
	阿尔及利亚	0.1155	512
大洋洲	澳大利亚	0.6322	2470
	新西兰	0.0949	425
	巴布亚新几内亚	0.0069	35

全球发电装机结构仍以煤电、气电等化石能源发电为主，但逐步呈现清洁化趋势。截至2013年底，世界发电总装机容量达到57.3亿kW，其中化石能源发电装机容量占总装机容量的比重为66.1%。近年来，清洁能源发电装机比重快速提升。截至2013年底，核能、水能、风能、太阳能等清洁能源发电装机总容量约为19.4亿kW，占世界发电总装机容量的33.9%。1990-2013年世界发电装机结构变化如图1-1所示。

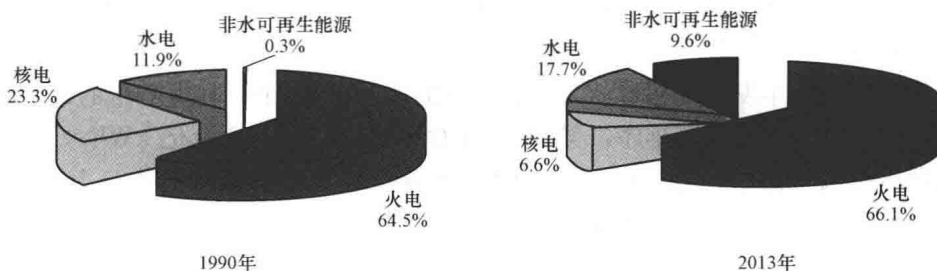


图 1-1 1990-2013 年世界发电装机结构变化

### 三、输(变)电

发电技术的发展促进了输(变)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在德国投入运行。该输电线路始于劳芬,止于法兰克福,全长 170km。劳芬水电站安装了一台 230kVA、90V、40Hz 三相交流发电机,一台 200kVA、95/15 200V 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三点: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。大容量远距离输电的需求,使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,加拿大建成世界上第一条 735kV 线路。随后,美国又于 1969 年建成 765kV 线路;1985 年,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,更是开创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,交流输电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输电的特性。比如:交流系统必须考虑同步稳定性的问题,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。现代控制技术的发展,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 50 年代中期进入工业应用阶段,不过这时已不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。最早投入运行的世界最高电压等级直流线路是我国云南楚雄至广州增城市的云广 $\pm 800$ kV 和向家坝至上海的向上 $\pm 800$ kV 特高压直流输电线路均于 2010 年投运。云广直流线路全长 1438km,额定输送容量 5000MW;向上直流线路全长 1907km,额定输送容量 6400MW。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 $\pm 600$ kV 及以下的直流输电线

压,  $\pm 600\text{kV}$  以上的电压称为特高压直流 (UHVDC) 输电。

#### 四、电网的进一步发展

从 20 世纪 30 年代开始, 各工业发达国家高压电网发展迅速。到 50 年代, 瑞典、原联邦德国分别连成  $380\text{kV}$  超高压电网, 法国连成  $400\text{kV}$  电网, 美国、加拿大连成  $300\sim 345\text{kV}$  的电网, 英国连成  $275\text{kV}$  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, 各工业发达国家的电网规模日益扩大, 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, 而且跨国互联, 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、德克萨斯电网和魁北克电网四个互联电网。东部电网是全北美互联网中最大的互联电网, 装机约 6 亿  $\text{kW}$ , 最大负荷约 5 亿  $\text{kW}$ , 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, 通过直流线路与东部电网连接。魁北克电网位于加拿大境内, 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 条输电线路, 交流互联线路的电压等级有 500、230、 $115\text{kV}$  等, 此外还有一条多端超高压直流输电线路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  $220\sim 1150\text{kV}$  输电线路连接在一起 (其中  $1150\text{kV}$  线路为降压运行), 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 (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互联。2001 年 8 月, 乌克兰和摩尔多瓦两国电网同步互联, 之后与俄罗斯电网互联, 形成了 11 个独联体加盟国互联大电网。另外, 西欧电网与东欧电网之间通过高压输电线路于 2004 年 10 月 10 日实现了互联, 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通道。截至 2013 年底, 世界  $220\text{kV}$  及以上输电线路总长度约 250 万  $\text{km}$ , 变电容量约 120 亿  $\text{kVA}$ 。

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; 可合理开发利用动力资源; 可减少发电设备的检修和事故备用容量; 可安装大型机组, 建设大发电厂, 节约投资和降低运行费用; 可实现水电、火电经济调度和跨流域水库调度; 可互相支援电力, 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, 有力促进了社会的文明进步。

#### 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。1879 年 5 月上海公共租界点亮了第一盏电灯, 开始写下中国使用电力照明的历史。1882 年中国第一家公用电业公司在上海创办上海电气公司。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  $1850\text{MW}$ , 年发电量仅 43 亿  $\text{kWh}$ , 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, 全国发电总装机容量已达



57120MW,比1949年增长30倍;年发电量2566亿kWh,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年的全国发电总装机容量达10.28万MW,1995年突破20万MW。到1996年,全国发电总装机容量达25万MW,年发电量达11320亿kWh,跃居世界第二位,成为世界电力生产和消费大国。2000年全国发电总装机容量跨上30万MW台阶,到2005年全国发电总装机容量已达到50万MW,发电量为24747亿kWh。2006年全国发电总装机容量超过60万MW,发电量达到了28344亿kWh。目前,中国已经成为世界第一大电力生产国。截至2013年底,中国发电总装机容量达到125.8万MW,年发电量5.37万亿kWh。

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年全部机组投运,成为世界上最大的水电站。

此外,核能、风能、太阳能、地热能等新能源发电也相继发展。20世纪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,核电年发电量达470亿kWh,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已经达到360MW。风电发展相对更快,截至2006年9月,全国除台湾省外累计风电机组达1864台,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,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设备、9F级联合循环燃气轮机、600MW级压水堆核设备和700MW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,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输变电工程投运,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,我国自行设计建成第一条±100kV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±500kV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,实现华中电网与华东电网两大区域电网的直联联网。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1117710MVA,其中500kV变电容量117310MVA,330kV变电容量15270MVA,220kV变电容量340260MVA,110kV变电容量402380MVA。2003年9月,东北、华北、华中电网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MVA。2005年9月26日,西北750kV输电线路正式投入运行。云广、向上±800kV特高压直流输电线路已于2010年正式投入运行。2010年三峡全部投运后实现以三峡为中心的全国联网。在2020年前后,国家电网公司将建成覆盖华北—华中—华东的坚强交流特高压同步电网,同时建设多条西南大型水电基地±800kV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。