

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



XIANDAI GAOYA
DIANLI GONGCHENG

现代高压 电力工程

吴广宁 主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

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



TM7/53

2008

XIANDAI GAOYA
DIANLI GONGCHENG

现代高压 电力工程

主编 吴广宁
编写 蒋伟 曹晓斌
主审 张乔根



中国电力出版社

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

北京 100065

Electrical Engineering

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

全书分3篇共14章, 主要包括电力系统概述、电力系统的接线方式、电力系统的基本元件、电气设备的选择、电力系统过电压与绝缘配合、直流输电概论、直流输电的控制系统和保护装置、直流输电设备、直流输电接地、直流输电的过电压及绝缘配合、特高压交流输电概述、特高压交流输电的设备、特高压电网的过电压及保护和特高压交流输电的绝缘配合。本书主要论述了最新的特高压直流与特高压交流输电技术, 并围绕工程实践, 针对工程中关心的问题重点讲述。

本书可作为电力系统及其自动化、高电压与绝缘技术方向的必修教材, 也可以作为专业基础课程教材, 还可以作为新兴学科的特色课程教材, 是培养方案中所列重要课程教材之一。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代高压电力工程/吴广宁主编. —北京: 中国电力出版社, 2008

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-6197-0

I. 现… II. 吴… III. 高压电力系统—电力工程—高等学校—教材 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 178494 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 1 月第一版 2008 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.25 印张 419 千字

定价 26.00 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。

电力是关系国民经济和社会发展的基础产业。目前我国电力工业的规模已居世界第二位，大部分地区初步缓解了多年来电力紧缺的状况。为了国民经济的持续发展，今后数十年我国仍需大力发展电力工业，仍面临着开发大型水电资源、大容量远距离输电和区域电网互联等艰巨任务。随着我国电力系统的发展，超高压交直流输电在电网中得到了广泛应用，500kV 交流线路已成为各大电力系统的骨架和跨省、跨地区的联络线；±500kV 直流输电工程总长度将达 4691km，居世界前列。同时，±800kV 直流输电工程也已经开工，建成后将是世界上电压等级最高的直流输电工程；1000kV 特高压交流输电线路也在建设之中。目前针对特高压输电技术方面的教材非常少，因此本教材紧跟我国电力系统发展的现状，主要针对特高压输电技术，并兼顾了传统输电系统的内容。

本教材编有两个主要原则：第一，紧跟时代发展步伐，注重最新的技术与设备；第二，注重工程实践性。为了体现这两个原则，本书的重心倾向于最新的特高压直流与特高压交流输电；内容主要围绕工程实践性，针对工程中关心的问题重点讲述。本教材为电力系统及其自动化、高电压与绝缘技术方向的必修教材，可以作为专业基础课程教材，也可以作为新兴学科的特色课程教材，是培养方案中所列重要课程之一。

全书共分为 3 篇 14 章，第 1 篇主要介绍传统电力工程的基础知识，包括电力系统的组成及主要设备。第 2 篇主要介绍现代高压直流输电，从其发展、构成、设备、控制以及接地各个方面系统地介绍了高压直流输电系统，主要对直流输电的特有内容如控制系统、换流设备以及接地系统进行了详细介绍。第 3 篇主要介绍特高压交流输电，从特高压架空输电系统的特性出发，重点介绍了特高压输电设备、过电压及防护与绝缘配合。

本书由吴广宁教授任主编，第 1 篇由吴广宁编写，第 2 篇由蒋伟编写，第 3 篇由曹晓斌编写。本书初稿的校对工作得到了王声学、邓明丽、郭小霞、苏黎、叶强、周炜明、何常红、刘君、任志超、彭倩、王云飞、樊春雷等同志的大力帮助，在此一并表示感谢。

本书由西安交通大学张乔根教授担任主审，他为了提高本书的质量付出了大量的精力，提出了不少宝贵的意见，在此向他表示由衷的谢意。

限于作者的水平和条件，书中错误及不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2007 年 10 月

目 录

前言

绪论..... 1

第 1 篇 电力系统的组成

第 1 章 电力系统概述.....	7
1.1 电力系统的发展简史	7
1.2 我国电力系统的特点	9
1.3 电力系统的结构和额定电压	12
1.4 电力系统的负荷和负荷曲线	14
1.5 各类发电厂和生产过程.....	17
思考题	27
第 2 章 电力系统的接线方式	28
2.1 电力网的接线	28
2.2 发电厂和变电站的电气主接线	29
2.3 电力系统中性点的运行方式	39
思考题	41
第 3 章 电力系统的基本元件	42
3.1 发电机.....	42
3.2 电力变压器	42
3.3 开关设备	46
3.4 互感器.....	52
3.5 输电线路	53
思考题	57
第 4 章 电气设备的选择	58
4.1 电气设备选择的基本原则	58
4.2 变压器的选择	63
4.3 开关电气设备的选择	65
4.4 导线和电缆的选择	67
4.5 互感器的选择	71
思考题	74
第 5 章 电力系统过电压与绝缘配合	75
5.1 雷电过电压及防雷保护.....	75
5.2 电力系统的过电压	80

5.3 电力系统的绝缘配合	95
思考题	102

第 2 篇 高压直流输电

第 6 章 直流输电概论	103
6.1 直流输电的发展	103
6.2 直流输电工程的特点	104
6.3 直流输电工程系统构成	106
6.4 直流输电的换流技术	111
6.5 直流输电的应用和工程类型	115
思考题	118
第 7 章 直流输电设备	119
7.1 换流阀	119
7.2 换流变压器	122
7.3 平波电抗器	126
7.4 滤波器	130
7.5 无功补偿装置	137
7.6 换流站的开关设备	137
思考题	139
第 8 章 直流输电接地	140
8.1 接地极的要求及设计	140
8.2 接地极址的选择	153
8.3 接地极电流场的计算	159
8.4 接地极电流对环境的影响	163
思考题	170
第 9 章 直流输电的控制系统和保护装置	171
9.1 控制系统的配置要求	171
9.2 换流器触发相位控制	173
9.3 直流输电控制系统功能	174
9.4 直流输电系统保护装置	179
思考题	184
第 10 章 直流输电的过电压及绝缘配合	185
10.1 直流输电的过电压	185
10.2 换流站的过电压保护	187
10.3 换流站的绝缘配合	191
10.4 换流站防雷保护	199
思考题	200

第 3 篇 特高压交流输电

第 11 章 特高压交流输电概述	201
11.1 特高压交流输电的发展	201
11.2 特高压输电的电压等级选择	207
11.3 特高压交流输电的特点	210
11.4 我国特高压交流输电的发展	212
思考题	215
第 12 章 特高压交流输电的设备	216
12.1 特高压电力变压器	216
12.2 特高压开关设备	219
12.3 特高压互感器	223
12.4 特高压避雷器与套管	224
12.5 特高压输电线路	228
思考题	233
第 13 章 特高压电网的过电压及保护	234
13.1 工频过电压及限制措施	234
13.2 操作过电压	236
13.3 雷电过电压	238
13.4 潜供电流	247
思考题	249
第 14 章 特高压交流输电的绝缘配合	250
14.1 特高压交流输电的电气特性	250
14.2 特高压交流输电绝缘子的选择	258
14.3 特高压交流输电线路空气间隙的选择	264
14.4 特高压交流输电线路变电站空气间隙的选择	265
思考题	267
参考文献	268

绪 论

中国的电力工业在 1882 年至 1949 年期间装机容量只有 1.85GW；而在 1949 年新中国成立后，电力工业得到了迅速的发展，以平均每年 10% 以上的速度增长；到 1998 年全国装机容量已达到 277GW，跃居世界第二位。进入 20 世纪 90 年代以后，我国的电力平均每年新增装机容量 17GW，8 年翻了一番，从而缓解了近 50 年持续缺电的局面；同时，我国从 1998 年开始撤销电力部，成立国家级电力公司，这是中国结束由国家垄断电力的局面，而逐步走向与国际电力改革潮流一致的标志。电力供应缓和的出现、国家电力公司的成立以及电力市场的起步，是我国电力工业在 20 世纪末出现的具有历史意义的大事。

21 世纪以来以信息、电子、生物技术为代表，从集中到分散，从等级结构到网络结构，从简单选择到多种选择，电力将继续发挥其他能源形式所不能替代的作用；而且人们对电力的依赖程度将更高，这对电力供应的数量和品质也将提出更高的要求。

从 1997 年初到 1998 年，我国电力供应紧张的状况有所缓和，但和发达国家相比，平均用电水平还很低。到 1998 年，全国人均占有装机容量 0.22kW，发电量只有 927kW·h，这一水平只相当于世界平均水平的 1/3、发达国家的 1/10~1/6。同时，电网结构也比较薄弱，电网的安全性较差，可靠性低，自动化水平不高，电网调峰容量不足，损耗大，供电质量差，远不能满足 21 世纪信息时代对电力供应的数量和质量的要求。因此，进入 21 世纪以来，我国电力仍将以较高的速度向更大的规模发展，电源和电网的建设任务仍很重，要开发西南水电和西北火电，发展交流 1000kV 和直流 ±800kV 的特高压输电。同时，电力的发展还要合乎可持续发展战略，兼顾生态环境保护，还将接受全球范围内电力体制改革和技术创新能力的挑战，使之在技术、管理上适应电力市场化体制和竞争的需要，迎接全球和地区经济一体化的挑战，不断扩大电网互联的范围。

一、我国电力发展的展望

和我国社会经济发展一样，电力工业同样面临两个方面的任务：一是完善社会主义市场经济机制；二是保持社会经济持续、快速、健康的发展。

首先，只有电力工业保持持续、快速、健康的发展，才能有足够的电力保证国民经济和社会持续、稳定、健康的发展。其次，电力的发展促进电力市场的形成，特别是电网的建设与发展，将为电力市场的建设提供物质基础；发展了电力市场、完善了市场机制，才能进一步促进电力的发展。

在相当长的时期内我国对电力的需求将非常大，要有更大规模的电力建设来满足我国工业化和现代化建设对电力的需要。2000 年全国装机容量超过 300GW，在 21 世纪前 10 年，按照“十五”大的精神，国民经济要翻一番，即要求其增长速度年均要达到 7%~8%，相应的电力增长按 6% 左右的速度是必要的。到 2010 年全国装机容量预计在 540GW，要使电力供应能满足需要，仍需要相当长的时间，节约用电仍是十分重要的任务。即使按上述预计装机容量计算，需要每年新增装机容量约 24GW，对我国来说，这将是一个巨大的压力。21 世纪前 10~20 年，是我国电力发展的关键时期，也是中国电力发展规模最大的时期。我国

从 20 世纪 50~60 年代, 平均每年新增装机在 1.1GW 左右, 而到 70 年代上升为 4.2GW, 80 年代上升为 7.2GW。到了 90 年代, 每年新增装机为 17GW, 21 世纪前 20 年, 平均每年需要新增装机约 30GW。这样到 2020 年, 按人均 0.6kW 计算 (预计 2020 年为 15 亿人口), 全国装机容量将达到 900GW 左右, 这是十分艰巨的任务。即使达到这一装机容量, 我国人均用电水平仍然不高, 只相当于美国 20 世纪 50 年代、英国 20 世纪 60 年代、法国 20 世纪 70 年代、西班牙 20 世纪 80 年代初期的人均用电水平。因此, 我国电力的发展任重而道远。

二、我国电力工业发展的重点

21 世纪前 20 年, 是我国电力发展的关键时期, 重点是加强电网建设, 同时继续加强电源建设, 加快结构调整。

(一) 电网发展的展望

20 世纪 90 年代以来, 随着世界经济、科技的发展, 及世界经济技术合作的不断加强, 经济全球化趋势更加明显, 经济市场化、贸易和投资国际化、区域经济合作化的步伐加快。而电力系统本身具有统一性、同时性和广域性的特点。因此, 全国性、区域性及跨国性的电网互联是电网发展的趋势。21 世纪的电网互联将会得到更快的发展, 其中包括跨大区联网和全国联网, 以及跨国输电和联网, 从而形成全国乃至更大范围内的电力市场。同时, 随着电力系统的不断扩大, 将对电网的一次设备和控制手段、管理方式、电力市场支持技术以及环保技术提出更高的要求。

(1) 我国电网发展的基本思路。首先, 在 21 世纪前 20 年的电力发展中, 必须把电网建设摆到重要的位置。目前, 我国的用电量越来越大, 但电网容量还不够大, 稳定性不够好。因此, 加强电网建设成为当务之急。在我国电网建设中, 要实施抓两头带中间的策略。一头是大型电厂、能源基地的电力外送与全国联网以及跨国联网建设; 另一头是农村电网建设与城市配电网的建设, 这是当前电网建设中十分薄弱的一环, 要兼顾改造、提高和扩大 (电力市场); 而中间, 则主要是指 220kV 电网及各网省电力公司范围内 500kV 电网的建设, 和进一步完善、加强。

其次, 我国电网发展的基本思路和实施的步骤: 一是要以三峡电网为中心, 推进全国联网, 三峡电网向北与华北和西北电网联网, 向南与南方电网联网, 向西则随金沙江、溪洛渡、向家坝电力外送, 使三峡电网继续扩展并进一步加强; 二是要配合大型水电站和火电基地的建设, 进一步加大“西电东送”和“南北互供”的力度, 实现以送电为主的“送电型”联网; 三是在不断加强各大区自身电网结构的基础上, 在适当的时机和地点按照利益均沾、互惠互利的原则, 采用交流或直流, 实现以联网效益为主的“效益型”联网, 并把“送电型”联网与“效益型”联网有机地结合起来, 把全国联网与加强各地区电网自身网架建设结合起来, 最后推进全国联网的形成和发展。与此同时, 还要重视发展我国电网与国外电网的互联。

(2) 我国电网发展的格局。我国电网以 2000 年之前初步形成的 7 个跨省市大区电网和 5 个独立省网的格局进入 21 世纪。到 2010 年前后, 随着三峡电网的建设, 电网互联将逐步得到加强, 形成以三峡电站为中心, 连接华中、华东、川渝 3 个地区电网的中部电网。随着华北煤电基地的开发, 实现华北与东北、华北与山东省网互联; 华北与西北电网之间随着宁夏与内蒙古矿口电厂开发以及陕西神府煤电基地送电华北而联网, 初步形成以华北电网为中心, 包括西北、东北和山东的北部电网。南方联合电网也将随着红水河、龙滩、澜沧江、小

湾等水电开发和贵州煤电基地的开发,与云南电力外送的增加,使结构得到进一步加强。这样到2010年,我国北部、中部和南部三大电网将初具雏形。

北、中、南三大电网之间也将进一步加强南北联网,北部和中部以及中部与南部将实现先以“效益型”为主,后以“送电型”为主的多点联网,到2020年可初步形成除新疆、西藏、中国台湾之外,以三峡电网为中心的全国统一大区互联电网。这一电网的形成,将实现我国水电“西电东送”和煤电“北电南送”的合理能源流动格局。同时,北部、中部电网之间的互联,除送电之外,还可获得以火电为主的北部电网与水电比重大的中部电网之间的水火调剂效益,以及北部电网黄河流域与中部电网长江流域之间的跨流域补偿调节效益。而中部电网与南部电网的互联,也将实现中部电网长江流域与南部电网澜沧江、红水河流域之间的跨流域补偿调节效益。

(3) 三峡电网。建设三峡电网可以将三峡电站电力外送;同时,还可以实现大区电网互联以充分发挥三峡电站的效益。三峡输变电工程规模为:500kV输电线路9100km(其中包括2条直流输电线路共2200km)和24750MV·A输变电容量,以及4个容量为3GW的用于直流输电的换流站。三峡电站一共配置15回出线,并留有2回扩建余地。其中2回向川渝电网送电,送电容量按2GW考虑,相应建设500kV线路1080km,500kV变电站2750MV·A。另外,8回线路送到左、右岸换流站和葛洲坝换流站,从换流站再经过3回直流共计7.20GW(含原来的葛洲坝至南桥1.20GW直流线路)送到华东电网,到华东电网后再配合建设500kV线路850km和8500MVA的变电站。其余5回三峡电站出线,再加上由左、右岸换流站500kV母线上出来的4回线路,即一共9回500kV线路送到华中电网,其送电容量为12GW,相应建设500kV线路4970km,变电容量13500MV·A。

华中、华东和川渝电网的互联,并与原华中、华东、川渝电网一起形成一个沿长江流域东西长2900km,南北宽1500km,涉及华中、华东、四川、重庆10个省(市)的三峡电力系统。以上三大电网1995年的装机容量为8360GW,约占全国容量的40%。三峡系统的装机容量2000年约为100GW,预计2010年约为200GW。这是一个大型的电力系统,预计在2009年建成,并随着金沙江、溪洛渡、向家坝电站的开发及其外送,而使三峡电力系统得到进一步扩大和加强,成为我国最大的电力系统,而且也是全国互联电网的核心。

(4) 跨国联网。跨国电网互联在20世纪90年代已成为电网发展的一种基本趋势,进入21世纪之后,这些联网将会逐步实现。在这种大趋势下,必须要积极促进和发展这种跨国联网,以实现跨地区、跨国的资源优化配置,形成更大范围内的电力市场,适应全球经济一体化发展的形势。

中国与周边国家电网的互联,总格局是北面与俄罗斯西伯利亚电网互联,以实现俄罗斯丰富的水电向中国送电;东面是结合俄罗斯西伯利亚向我国华北、东北送电,实现与朝鲜半岛的联网;西面是新疆与吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦电网的互联,以解决新疆西南部的电力紧缺,并进一步延伸与阿富汗国家电网互联;南面则主要通过开发澜沧江、景洪水电站,经过老挝向泰国送电,实现与东南亚的送电联网。当前的重点是云南景洪向泰国送电,以及俄罗斯伊尔库茨克电网向中国华北、东北电网送电。

总之,21世纪的中国电网,将在北、中、南三大电网的基本格局下,随着北部火电,西部、南部水电和东部核电的发展,在大量的、广泛的新能源发电的基础上,进一步扩大和加强北部、中部、南部电网之间的联网,逐步形成一个统一而“可靠、高效、灵活、开放”

的全国联合大电网。同时,中国也将加强国际联网,向北与俄罗斯,向东与朝鲜半岛和日本,向西与吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦电网,向南与东南亚诸国和印度尼西亚、菲律宾电网互联,在21世纪逐步形成范围广大的亚洲东部联合电网。

(二) 电源发展的展望

我国电源发展的重点是:大力开发西部和西南部水电,减轻对煤炭的压力;加大西部和北部大型煤电基地的开发,以减轻对运输与东部环境的压力,并促进西部地区经济的发展,缩小东西差别;加强核电开发力度,以减少对煤炭和环境的压力;加速新能源开发,特别是风能、太阳能发电的开发;加紧液化天然气(LNG)、天然气等燃气轮机和联合循环机组发展步伐,改善和优化能源结构和发电机组结构;另外,电力供应要放眼全球,迎接全球经济一体化。当然,在加强电力发展的同时,还要特别重视电力的技术改造,合理规划电源点,要重视节约和环境保护。

(1) 水电。水能具有清洁、无污染和可再生的优点。到1998年我国水电装机容量为65.06GW,发电量为204.3TW·h,分别占全国可开发水电容量378GW的17.2%和可开发水电发电量1920TW·h的10.6%,这一水电开发率约为世界平均水电开发率20%的一半,比发达地区如北美开发率60%、欧洲50%低得多。因此,我国在21世纪初20年代内必须加快水电开发,特别是大型水电基地和流域处的开发,这是贯彻我国可持续发展战略的需要,也是我国能源资源平衡和全球环境问题所提出的要求。

目前,我国有14个大型水电基地,1998年在水电容量已达31.83GW,这些机组在2010年前可以全部投产,再加上小水电每年装机1GW以上,到2010年全国水电有可能达到100GW以上。

近年来我国经济发展迅速,对电能的需求很大。加大水电投资是启动经济、扩大内需、促进经济回升的最好选择之一,也是社会、经济、环境效益俱佳的基础项目。现在重点要抓紧几个大型水电基地的建设准备,即长江三峡水电站建设后的金沙江、溪洛渡、向家坝水电站建设,以及清江水布垭的建设;澜沧江在大朝山之后的小湾、景洪水电站的建设;乌江流域在东风水电站后的洪家渡、构皮滩水电的开发,以及天生桥一期以后的龙滩建设;大渡河、雅龚江上的官地、桐子林、瀑布沟的建设;黄河上游李家峡之后的公伯峡、拉西瓦的建设;以及若干老水电站的扩容和抽水蓄能电站的建设。上述电站要求在2010年前尽早开工,以便在2020年前水电装机容量达到170GW左右,即水电开发率争取达到45%左右。

(2) 大型火电基地建设。在我国电源结构中,火电设备容量占总装机的75%以上,在相当长的时期内,这种状况是难以改变的。因此,在2010年全国总装机容量达到540GW,火电装机容量为400GW以上,需要电煤约10亿t,相当于每年需增加用煤量4000万t左右,预计这也是我国可以安排用于电力生产最大的煤量。

火电建设的重点应是积极采用高参数、大容量、高效率、高调节性、节水型,并以600MW为主的设备;要大力开发清洁煤燃烧技术,以减轻对环境的压力;要鼓励热电联产和热、电、冷技术的推广,以提高能源综合利用率;要积极建设矿口电厂,建设煤炭基地的电站群,发挥规模经济效益,而且可以变送煤为送电,以减轻对运输的压力,同时也可减轻对经济发达地区的环境压力。

到2020年预计我国火电装机在600GW左右,约需煤炭14亿t,占计划煤炭量21亿t的66%左右,这将对我国煤炭开发生产造成巨大的压力,为此必须提高电站循环热效率,

降低煤耗,因此,应该加大相关的科研投入。

(3) 核电。在 21 世纪初的 10~20 年内,我国将加大核电在装机容量中的比重。目前,我国核电技术成熟,可大规模建设以替代部分燃煤火电站。当前关键一是要加快核电设备的国产化,否则其造价过高将严重制约我国核电的发展;二是要抢占核电技术发展的制高点,积极实施产、学、研相结合,将高温气冷堆技术转化为生产力,在 2005 年前建成工业性示范堆,力争 2010 年前有小批量投入,2020 年有大批量投入。对于当前核电建设的具体项目而言,除了岭澳一期、江苏连云港以及秦山二期、三期外,对于山东海阳、广东阳江、浙江三门等都要积极开展工作,加快建设速度,争取能多投入一些核电,以减轻对燃煤电站的压力。初步规划目标是,到 2010 年能有 20GW 的核电,到 2020 年能有 40~50GW 的核电,这对确保电力建设规划任务的实现,以及减轻大量燃煤造成的环境问题,都是十分重要的。

(4) 优化发电能源结构。目前,我国的能源结构还不太合理,在电力能源消费构成中,煤电电量占 80%以上,这给环境等带来极大压力,需努力改变电源结构,调整和优化能源结构。除了加快核电建设外,还要尽可能多地利用天然气等优质能源。天然气是常规燃料中的优质能源,从世界范围内的能源消耗来看,其比重在逐年上升,从 1986~1991 年平均年增长率为 3.3%,而从 1991~1996 年增长率为 43%,到 1996 年天然气消耗量已占能源总量的 23%以上,与煤炭消耗量接近(27%左右)。电站燃用天然气的也越来越多,美国近年来新增装机容量的 80%是天然气的。世界上探明的天然气储量也不断增加,到 1997 年达 145×10^4 亿 m^3 ,储采比已达 64,已超过石油的储采比 40.9。因此,在发电能源结构上要尽可能优化,即应该多采用一些天然气(包括 LNG)发电,特别在我国沿海深圳、广州、上海、浙江、江苏等地要尽快地布置若干 LNG 的电厂,扩大建设规模。

(5) 加强新能源发电的开发力度。要加快新能源发电的步伐,就得加强新能源发电的开发力度。我国新能源资源丰富,太阳能全国平均为 $5.9 \times 100 \text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{年})$,青藏高原地区是我国太阳能最丰富的地区。根据专家预测,太阳能将成为下世纪人类主要能源,因此利用太阳能发电的方向是肯定的,太阳能电池板的销售将会迅速增加,特别是其能量转换率将由目前的 12%~13%增加到 17%~20%(目前澳大利亚、美国已分别研究成功达到这一转换率),以及将太阳能电池的生产成本大幅度下降,目前澳大利亚已将其生产成本降低一半,预计可降 80%,使太阳能电池的需求量大大增加。自 1990 年以来,全球太阳能发电装置的市场销售量年增 16%,预计今后还会以更快的速度增加。1995 年我国太阳能光伏电池只有 6MW,西藏有 10kW 和 20kW 的光伏电站,总的来说是刚起步,特别是在边远能源短缺和用电分散地区要优先考虑。

我国风能理论可开发总量约为 3200GW,其中可利用的约有 253GW。在新能源发电中,风力发电在技术上比较成熟,同时也具备较大规模开发的条件。近几年来世界各国风力发展很快,到 1997 年末风电装机容量达到 7.669GW,1996、1997 年连续 2 年增加风机装机容量 26%。1998 年新增 2GW,其增长速度是非常快的,到 2007 年全球新增风电可达 48GW 以上。我国风电这几年发展也很快,1998 年装机容量已达 223.6MW,1998 年一年就新增 56.9MW,约增 25%。如果按这一速度增长下去,原规划到 2010 年达到 5GW 是可望能达到的,但是这需要国家给予政策上的支持,以及大力加快风力发电设备国产化,使之成为一个新的产业。

此外,我国还有地热能、潮汐能以及生物质能,每年约有 7 亿 t 的秸秆的沼气发电和城

市大量的垃圾发电，既可充分利用能源，又可减轻环境的污染，这些也是在今后的电力发展中需予以重视的。

除了开发新能源外，还要注意节约能源，努力提高能源利用率，而这首先需要努力提高电力在终端能源中的供应水平。我国目前在终端能源消费中，电力不到 11%，低于世界平均水平的 16%，与发达国家有很大的差距。第二是大力加强电力需求侧管理（DSM），电力部门要投资节电工程，使之成为比新建电厂更为经济、更为清洁的替代方案。第三是支持发展热电联产，支持气、热、电、冷联产新技术，以及推广采用超临界机组、联合循环机组等新技术。第四，也是最重要的一条，就是大量退役低效、高耗、高污染的小型凝汽式机组和超期服役机组，改造中、高压机组，使火电机组的热效率由目前的 29% 左右提高到 35% 左右。

第1篇 电力系统的组成

电力系统包括发、变、输、配电4个部分，它随着用电量的增加而扩大。电能对我国经济的发展不可或缺，必须确保供电的可靠性和经济性。作为国民经济生活的基础能源，电能具有许多优点：它可以方便地转化为其他形式的能，例如，机械能、热能、光能、化学能等；其输送和分配易于实现；应用规模也很灵活。因此，电能被极其广泛地应用于工农业、交通运输业、商业贸易、通信以及人们的日常生活中。以电作为动力，可以促进工农业生产的机械化和自动化，可以保证产品质量，也可以大幅度提高劳动生产率。此外，提高电气化程度，以电能代替其他形式的能量，是节约总能源消耗的一个重要途径。

电力工业发展初期，电能是直接在用户附近的发电厂中生产的，各电厂孤立运行。随着工农业生产和城市的发展，电能的需求量迅速增加，而热能资源（如煤田）和水能资源丰富的地区又往往远离用电比较集中的城市和工矿区。为了解决这个矛盾，就需要在动力资源丰富的地区建立大型发电厂，然后将电能远距离输送给电力用户。同时，为了提高供电可靠性以及资源利用的综合经济性，又把各种形式的分散的发电厂，通过输电线路和变电站联系起来。这些生产、变换、输送、分配和消费电能的发电机、升压和降压变电站、输电线路以及用电设备有机连接起来的整体，称为电力系统。

在电力系统中，除去发电机和用电设备外的部分称为电力网。电力网包括升、降压变电站和各种不同电压等级的输电线路，负责变换、输送和分配电能。动力系统指电力系统和动力部分的总和。所谓动力部分，包括火力发电厂的锅炉、汽轮机、热力网和用热设备，水力发电厂的水库和水轮机，核电厂的反应堆等。因此，电力网包含于电力系统，而电力系统又包含于动力系统。

第1章 电力系统概述

1.1 电力系统的发展简史

1.1.1 电力系统的发展

1831年法拉第发现了电磁感应定律，促进了发电机和电动机的发明，从而开始了电能的生产和使用。当时所采用的是低压直流，主要供给照明用电，供电范围很小。1882年在法国首先实现了电压在1kV以上的直流输电，虽然输送功率只有1.5kW，但传输距离达到57km，包含发电、输电和用电三部分，形成了世界上第一个完整的电力系统。

为了适应生产的发展，需要传输更大的功率和更远的输电距离，这就需要通过提高电压等级。提高电压可以提高输电效率、减少线路流过的电流，从而降低线路电阻中的损耗。但是，为了用电设备的安全，不得不采用较低的电压，而直流输电既不能适应这种要求，也不

利于形成电网。在1891年制成三相变压器和三相异步电动机的基础上，首次在德国实现了三相交流输电，它由95V、230kV·A的水轮发电机经变压器升压至15.2kV，将功率传送到178km以外的法兰克福，然后用两台变压器降压至112V，分别供给照明负荷和一台异步电动机驱动75kW的水泵，从而形成了现代电力系统的雏形。从此，三相交流制得到了迅速的发展，取代了以前的直流系统，而且逐步在同步发电机之间进行并列运行，在输、配电过程中采用多个电压等级，经过100多年的发展，形成了电压愈来愈高、容量和规模愈来愈大的区域性、地区性、全国性甚至跨国性的电力系统。

1.1.2 电力系统的组成

电力系统主要包含发电厂、变电站、输电线路和配电网4个部分，如图1-1所示为一个简单电力系统的示意图。

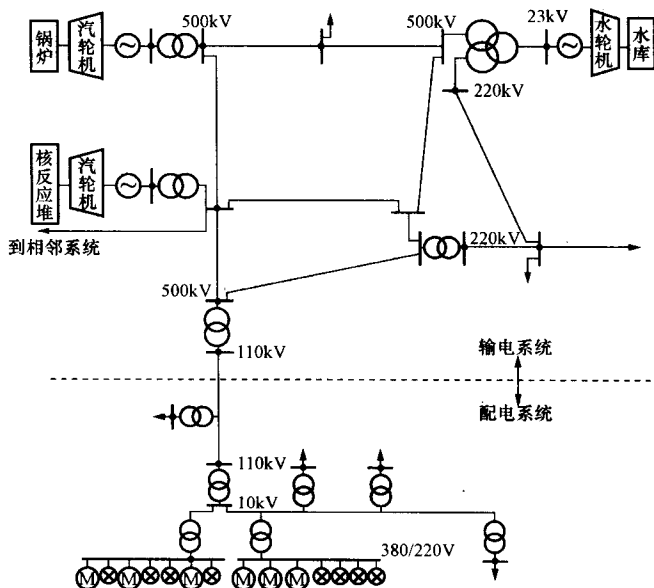


图 1-1 简单电力系统示意图

在目前的电力系统中，主要的发电厂是以煤、石油和天然气作为燃料的火力发电厂、利用水能发电的水力发电厂和利用核能发电的原子能发电厂。此外，利用风能、太阳能、地下热能和潮汐能发电的发电厂正在不断发展之中，有的已经具有一定的规模，并有较好的应用前景。

输电网络包含变电站和输电线路，其作用是将各个发电厂通过较高电压（220、330、500、750kV以及1000kV）的线路相互连接，各同步发电机之间并列运行。同时，将发电厂发出的电能送到各个大的负荷中心。由于每条线路上需要输送功率的大小以及传输距离的不同，在同一个输电网络中可能需要同时采用几种不同等级的电压，这就需要在输电网络中大量采用变压器，将发电机电压通过升压变压器进行升压，并通过变压器连接不同电压等级的线路。在发电厂远离负荷中心而且需要传输大量功率的情况下，采用交流输电将会出现系统稳定性等技术问题，而高压直流输电具有大容量、远距离传输的优点，比采用交流输电更为经济。

电能送达负荷中心以后，需要经过配电网进行电能的分配，将较低电压（如 110、35、10kV 或 6kV 以及 380/220V）供给各个集中的大工厂和分散的中、小工厂以及千家万户。图 1-1 中虚线以下的部分只是一个负荷中心下的一部分配电网，而在实际的配电网中，110kV 和 35kV 的线路接线要复杂得多，10kV（或 6kV）线路的接线更加复杂，而 380/220V 的线路则是像蜘蛛网一般连接到千家万户。

电力系统的用户包括工业、农业、交通运输等国民经济各个部门以及居民，而受电器的种类则有灯泡、电动机、电热器、整流器和电弧炉等，它们将电能分别转换为光能、机械能、热能和化学能等。

在电力系统中，发电机、变压器、输电线路和负荷等直接参与生产、输送、分配和使用电能的电气设备被称为主设备或一次设备，由它们组成的系统称为一次系统。电力系统中的各种测量、保护和控制装置称为二次设备，由它们组成的系统称为二次系统。

1.2 我国电力系统的特点

1.2.1 我国电力系统概况

我国具有丰富的能源资源，如煤、石油和天然气等。煤的预测量约为 4500Mt，其中 90%集中在陕西、山西及内蒙。水力资源的蕴藏量达 676GW，居世界首位。其中可利用的资源约有 378GW，主要集中在西南和西北，包括长江、金沙江、澜沧江、怒江和红水河的中上游以及黄河的上游。可利用的风力资源分布在东南沿海、新疆、甘肃及东北，约为 160GW。这些优良的自然条件为我国电力工业的发展提供了良好的条件。

我国电力工业的发展可以追溯到 1880 年，当时上海就已经建成了第一个发电厂，但在 1949 年，全国的总装机容量仅有 1850MW，年发电量为 4.3TW·h。建国后 50 多年来全国总装机容量和年发电量的增长情况分别如图 1-2 和图 1-3 所示。到 2001 年底，装机容量达 338610MW，年发电量完成 1483.9TW·h，分别是 1949 年的 184 倍和 345 倍，并且自 1996 年起稳居世界第二位。

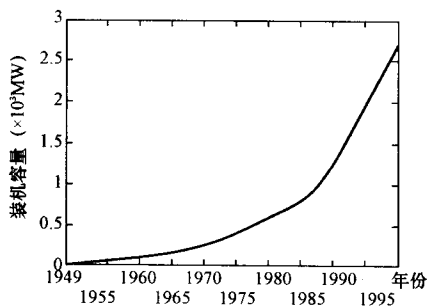


图 1-2 全国总装机容量增长情况

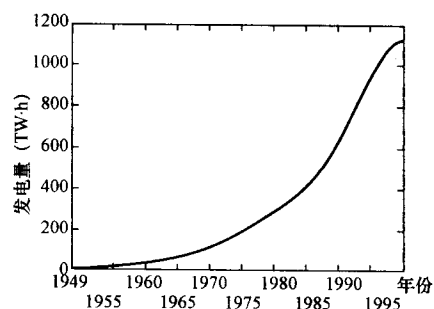


图 1-3 全国年发电量增长情况

随着我国经济的高速发展，对电能的需求量越来越大，这将推动电力工业的发展。发展方针为：继续发展燃煤电厂，提高能源效率，减少对环境的污染；加速水力资源的开发利用和水电厂的建设；发展核电技术并适度发展核电厂；因地制宜开发风力和潮汐等可再生能源；加速建设输、变、配电工程和电力系统，在中、西部地区开发大型水、火电基地，向能

源短缺的东部地区进行远距离、大容量输电,实现电力的“西电东送,南北互供”,促进区域电网之间的互联,并最终形成全国电力系统。2000~2020年全国总装机容量和年发电量的规划如表1-1所示。

表 1-1 2000~2020 年全国总装机容量和年发电量的规划

年份	总装机容量							年发电量						
	总量 (GW)	水电 (%)	火电 (%)			核电 (%)	其他 (%)	总量 (TW·h)	水电 (%)	火电 (%)			核电 (%)	其他 (%)
			燃煤	燃油	天然气					燃煤	燃油	天然气		
2000	305.7	22.1	67.6	6.6	22.6	0.9	0.1	1412.8	15.6	73.2	7.0	3.0	1.1	0.1
2010	535.8	18.7	68.8	5.6	22.8	3.7	0.4	2512.8	2.7	73.3	6.0	3.0	4.8	0.2
2020	790.1	20.2	63.4	6.3	33.2	5.1	11.8	3666.0	13.6	68.3	6.8	3.4	6.8	1.1

我国在电力系统发展规模方面,大体上可以分为5个阶段:20世纪50年代为城市电网发展阶段,20世纪60年代逐渐形成以省为单位的电力系统(即省网),1970~1990年为区域电力系统(区域电网)发展阶段,20世纪90年代以后为区域电网之间的互联阶段,并将逐步形成全国统一电网。

目前已经形成的6个区域电网分别是东北、华北、华东、华中、西北和南方电网。省网包括山东、福建、广东、广西、四川、重庆、云南、贵州、海南、新疆、西藏和中国台湾。2003年已完成东北电力系统、华北电力系统、华中电力系统与川渝电力系统之间的互联。

1.2.2 电力系统的特点和运行的基本要求

一、电能生产、输送、分配和使用的特点

虽然电能也是一种商品,但是电能的生产、输送、分配和使用却有着明显的特殊性,主要表现在以下几点。

(一) 电能与国民经济各个部门、国防和日常生活之间的关系都很密切

由于电能与其他能量之间的转换十分方便,而且容易进行大量生产、远距离输送和控制,因此,目前都非常广泛地使用电能。

(二) 电能不能大量储存

电能的生产、输送、分配和使用实际上是在同一时刻进行的。发电设备在任何时刻所生产的总电能严格等于该时刻用电设备取用的电能和输、配电过程中电能损耗的总和。由于存在这一特点,在系统发生某些故障后,由于没有储存手段,将可能造成局部停电或甚至造成全系统的瓦解,形成一片混乱。2003年下半年,在北美和欧洲的几个国家相继发生的大停电事故便是例证。

(三) 电力系统中的暂态过程十分迅速

在电力系统中,由雷击或开关操作引起的过电压,其暂态过程只有微秒到毫秒数量级;从发生故障到系统失去稳定性通常也只有几秒的时间;因事故而使系统全面瓦解的过程一般也只以分钟计。为了使设备不致因暂态过程的发生而招致损坏,特别是为了防止电力系统失去稳定或发生崩溃,必须在系统中采用相应的快速保护装置和各种自动控制装置。

(四) 对电能质量的要求比较严格

电能质量主要指频率、供电电压偏移和电压波形。我国电力系统的额定频率规定为