



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材  
电气工程及其自动化专业规划教材



POWER SYSTEM PLANNING

# 电力系统规划

( 第二版 )

程浩忠 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十二五”普通高等教育本科国家级  
电气工程及其自动化专业规划教材

# 电力系统规划

## (第二版)

程浩忠 主编

张焰 严正 刘东 顾洁 编写



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书第一版为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。现第二版为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

全书共 13 章。主要包括电力负荷预测的理论与方法、电力系统规划的经济评价方法、电源规划的理论与方法、电力系统规划的可靠性评价方法、电网规划方法、不确定性电网规划方法、电网柔性规划、多目标多阶段电网规划、配电网规划、电力系统无功规划、电力系统自动化规划、多适应性电力系统规划。只要具有电力系统基本理论的读者都应能顺利阅读并理解本书的内容。本书可作为普通高等院校电气工程及其自动化专业的高年级本科生和研究生教材,也可作为电力系统及相关领域从事电力系统规划、计划工作的工程技术人员和技术管理人员参考用书和专业培训教材。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统规划/程浩忠主编;张焰等编写. —2 版. —北京:中国电力出版社, 2014. 1

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材. 电气工程及其自动化专业规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 4999 - 5

I. ①电... II. ①程... ②张... III. ①电力系统规划—高等学校—教材 IV. ①TM715

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 232660 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2008 年 4 月第一版

2014 年 1 月第二版 2014 年 1 月北京第五次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.5 印张 475 千字

定价 35.00 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

本书第一版发行已有 5 年了，这 5 年来中国电力系统发生了很大变化，年发电量和装机容量已超过美国跃居世界第一，并且建设运行了特高压交流 1000kV 和直流  $\pm 800\text{kV}$  线路。智能电网、主动配电网和微网也有了很大的发展。为了适应新形势下电力系统规划需要，本书增加了第 13 章多适应性电力系统规划，该内容主要是从规划角度，为适应大规模风电和分布式发电发展，建立合理的规划模型，使电网更好地适应大规模风电和分布式发电接入；另外，在第 3 章经济评价方法中增加了全寿命周期成本计算。

全书在编写体系和叙述上，继承了第一版中侧重规划基础理论和方法的简明阐述，所增加的内容丰富了全书体系。全书首先介绍负荷预测理论与方法、电力系统规划经济评价方法、电源规划理论与方法、电力系统规划的可靠性评价方法等基础性内容，然后进一步阐述电网规划的方法和理论及其相关的不确定性规划、柔性规划、多目标多阶段规划、配电网规划、无功规划和自动化规划，最后讲述了大规模风电、分布式发电、网源联合规划和智能电网背景下电网规划的理念等。

本书第二版由程浩忠主编，张焰、严正、刘东、顾洁编写。本书第 2 章由顾洁副教授编写，第 4 章由严正教授编写，第 5、7 章由张焰教授编写，第 12 章由刘东研究员编写，其余章节由程浩忠教授编写，最后由程浩忠教授统稿。四川大学刘俊勇教授和上海交通大学陈章潮教授主审了本书，提出了许多宝贵意见，在此表示感谢。本书注重理论与实用方法的结合，书中内容经过十多届本科生、研究生的教学试用和完善，并且经过第一版（连续印刷 5 次）的使用，能使读者对电力系统规划问题有一个全面的了解，并可较快地进入这一领域开展研究工作。

本书第二版完善和增加的内容参阅和引用了许多文献和报告，尤其是一些课题报告和论文等研究成果，柳璐、洪绍云博士以及陆惠莹等同志做了大量辅助工作，洪绍云还参与了第 13 章的编写，在此表示感谢。同时对于第一版和第二版完善过程中，许多专家和编者的许多同事、朋友、家人为本书的编写创造了条件并给予关心，在此一并向他们致以衷心的感谢。

鉴于电力系统规划是不断发展的，尤其是智能电网的发展，同时编者水平有限，对于书中不够正确和不完善的地方，恳请读者予以批评指正。

编 者

2013 年 9 月于上海交通大学“电力传输与功率变换控制”教育部重点实验室

## 第一版前言

科学合理的电力系统规划是电力系统安全、可靠、经济运行的前提。在当前国家经济和社会发展背景下,要实现科学合理的电力系统规划,迫切需要解决包括电力负荷预测、电源规划、电网规划及调度自动化规划等多个领域的众多实际课题。

本书从电力系统规划的基本内容、目的、意义出发,比较系统地阐述了有关电力系统规划的基础理论和方法。首先,介绍了电力负荷预测的理论与方法、电力系统规划的经济评价办法、电源规划的理论与方法、电力系统规划的可靠性评价方法等基础性的内容,后面进一步讲述了电网规划的方法和理论及其相关的不确定性规划、柔性规划、多目标多阶段规划、配电网规划、无功规划和自动化规划。本书注重理论与实用方法的结合,书中内容经过多届本科生、研究生的教学试用,能使读者对电力系统规划问题有一个全面的了解并可较快地进入这一领域的前沿。

编著者在电力系统规划方面有着相当丰富的研究经历和扎实的研究基础,有一支具备相当实力的科研团队(该书的全部编者都是该团队的成员),该团队从事电力系统规划研究工作20余年,完成了50多项来自国家自然科学基金、上海市重点科技攻关、曙光计划、启明星计划和上海市重点学科、国家电网公司、华东电网公司、上海市电力公司、上海市区供电公司、上海市东供电公司、市南供电公司等单位的有关电力系统规划方面的课题。本书依托以上项目的报告和论文,结合相关理论和基础工作,对编著者在电力系统规划方面的工作和成果进行整理。随着电力系统的发展和电力工业体制改革和市场化的不断深入,对电力系统规划提出了更高的要求,因此电力系统规划工作必须要有超前的眼光和先进的理论方法作指导。本课程的开设和教材的编写正顺应了这一潮流。

本书由程浩忠主编,张焰、严正、刘东、顾洁参编。本书第2章由顾洁副教授编写,第4章由严正教授编写,第5、7章由张焰教授编写,第12章由刘东研究员编写,其余章节由程浩忠教授编写,最后由程浩忠教授统稿。本书承蒙熊信银教授、陈章潮教授主审,提出了许多宝贵意见,在此表示感谢。

本书参阅和引用了不少前辈和同行的工作成果,是他们的一些工作成果使得本书能够比较系统、全面地反映一些有关电力系统规划的最新研究成果。本书在编写的过程中,范宏、张节潭、孔涛、武鹏、唐陇军博士以及朱坚强、姜翠珍等同志做了大量辅助工作;同时,上海交通大学的许多领导、专家和编者的许多同事、朋友、家人为本书的编写创造了条件并给予关心,在此一并向他们致以衷心的感谢。

鉴于目前国内外有关电力系统规划方面内容全面且深入的书籍较少,涉及应用需要的更少,同时电力系统规划领域又有许多问题尚在研究和探讨之中,且编者水平有限,因此,不完善、不正确的地方在所难免,恳望读者见谅,并请予以批评指正为盼!

编者

2008年1月于上海交通大学

# 目 录

## 前言

## 第一版前言

|                              |    |
|------------------------------|----|
| <b>1 绪论</b> .....            | 1  |
| 1.1 中国电力系统的发展历程及发展趋势 .....   | 1  |
| 1.2 电力系统规划的重要性及基本要求 .....    | 6  |
| 1.3 电力系统规划的任务及分类 .....       | 9  |
| <b>2 电力负荷预测的理论与方法</b> .....  | 14 |
| 2.1 概述 .....                 | 14 |
| 2.2 电力负荷预测的数据处理技术 .....      | 19 |
| 2.3 确定性负荷预测方法 .....          | 24 |
| 2.4 不确定性负荷预测方法 .....         | 32 |
| 2.5 空间负荷预测 .....             | 45 |
| 2.6 基于气温影响分析的年最大负荷预测 .....   | 48 |
| 2.7 电力负荷预测的综合评价 .....        | 51 |
| <b>3 电力系统规划的经济评价方法</b> ..... | 56 |
| 3.1 概述 .....                 | 56 |
| 3.2 资金的时间价值 .....            | 58 |
| 3.3 最小费用法 .....              | 61 |
| 3.4 净现值法 .....               | 63 |
| 3.5 内部收益率法和差额投资内部收益率法 .....  | 64 |
| 3.6 折返年限法及相关算法 .....         | 64 |
| 3.7 财务评价方法 .....             | 65 |
| 3.8 国民经济评价方法 .....           | 66 |
| 3.9 不确定性的评价方法 .....          | 67 |
| 3.10 各类方案比较宜考虑的因素 .....      | 67 |
| 3.11 全寿命周期成本经济评价方法 .....     | 69 |
| <b>4 电源规划的理论与方法</b> .....    | 73 |
| 4.1 概述 .....                 | 73 |
| 4.2 电源规划数学模型 .....           | 73 |
| 4.3 含新能源的电源规划数学模型 .....      | 80 |
| 4.4 电源规划的数学优化方法 .....        | 82 |
| 4.5 电源规划应用软件介绍 .....         | 90 |

|      |                      |     |
|------|----------------------|-----|
| 4.6  | 电力市场环境下的电源规划         | 92  |
| 5    | 电力系统规划的可靠性评价方法       | 96  |
| 5.1  | 概述                   | 96  |
| 5.2  | 电气设备可靠性分析方法          | 98  |
| 5.3  | 发电系统规划的可靠性评价方法       | 101 |
| 5.4  | 电网规划的可靠性评价方法         | 107 |
| 5.5  | 变电站电气主接线的可靠性评价方法     | 118 |
| 6    | 电网规划方法               | 121 |
| 6.1  | 概述                   | 121 |
| 6.2  | 电网的电压等级选择            | 125 |
| 6.3  | 电力电量平衡               | 126 |
| 6.4  | 变电站的站址及容量选择          | 130 |
| 6.5  | 网络结构规划的常规方法          | 132 |
| 6.6  | 架空送电线路导线截面及输电能力      | 135 |
| 6.7  | 逐步扩展法                | 138 |
| 6.8  | 逐步倒推法                | 141 |
| 6.9  | 满足确定性安全准则的启发式网络规划    | 143 |
| 6.10 | 满足概率性安全准则的启发式网络规划    | 144 |
| 6.11 | 电网规划的线性规划方法          | 150 |
| 6.12 | 水平年电网规划的数学模型         | 151 |
| 7    | 不确定性电网规划方法           | 155 |
| 7.1  | 电网规划中的不确定性影响因素及处理方法  | 155 |
| 7.2  | 考虑模糊性不确定性影响因素的电网规划方法 | 158 |
| 8    | 电网柔性规划               | 169 |
| 8.1  | 电网柔性规划、不确定性信息、柔性约束规划 | 169 |
| 8.2  | 电网规划中不确定性信息盲数模型的建立方法 | 171 |
| 8.3  | 电网规划中的盲数潮流计算方法       | 174 |
| 8.4  | 基于盲数模型的电网柔性规划        | 176 |
| 8.5  | 基于等微增率准则的电网柔性规划      | 181 |
| 8.6  | 考虑线路被选概率的电网柔性规划      | 186 |
| 8.7  | 电网柔性约束规划             | 191 |
| 9    | 多目标多阶段电网规划           | 199 |
| 9.1  | 多目标电网规划的数学描述         | 199 |
| 9.2  | 多目标电网规划的一般最优化模型      | 200 |
| 9.3  | 多目标电网规划的分层最优化模型      | 203 |
| 9.4  | 多阶段电网规划的数学模型         | 204 |
| 9.5  | 多阶段电网规划数学模型的求解方法     | 205 |

|           |                         |            |
|-----------|-------------------------|------------|
| 9.6       | 算例及分析 .....             | 208        |
| <b>10</b> | <b>配电网规划</b> .....      | <b>214</b> |
| 10.1      | 配电网规划的特点与模型 .....       | 214        |
| 10.2      | 变电站站址确定 .....           | 216        |
| 10.3      | 配电网的接线模式 .....          | 220        |
| 10.4      | 配电网规划的主要内容 .....        | 224        |
| 10.5      | 配电网规划的具体步骤 .....        | 228        |
| <b>11</b> | <b>电力系统无功规划</b> .....   | <b>230</b> |
| 11.1      | 概述 .....                | 230        |
| 11.2      | 电网电压标准 .....            | 230        |
| 11.3      | 无功补偿规划原则 .....          | 231        |
| 11.4      | 无功补偿优化模型及解算方法 .....     | 232        |
| 11.5      | 无功补偿容量的配置 .....         | 242        |
| 11.6      | 配电网无功补偿容量的确定 .....      | 244        |
| <b>12</b> | <b>电力系统自动化规划</b> .....  | <b>249</b> |
| 12.1      | 概述 .....                | 249        |
| 12.2      | 电力通信系统规划 .....          | 251        |
| 12.3      | 电网调度自动化系统规划 .....       | 257        |
| 12.4      | 变电站自动化系统规划 .....        | 260        |
| 12.5      | 配电自动化系统规划 .....         | 263        |
| 12.6      | 电力系统信息一体化规划 .....       | 266        |
| <b>13</b> | <b>多适应性电力系统规划</b> ..... | <b>270</b> |
| 13.1      | 概述 .....                | 270        |
| 13.2      | 大规模风电规划 .....           | 271        |
| 13.3      | 适应大规模风电的电力系统规划 .....    | 274        |
| 13.4      | 分布式发电选址定容规划 .....       | 279        |
| 13.5      | 分布式发电与配网适应性联合规划 .....   | 283        |
| 13.6      | 微网多适应性规划 .....          | 286        |
| 13.7      | 面向智能电网的多适应性规划 .....     | 289        |
| 附录 A      | 18 节点系统图及其参数 .....      | 292        |
| 附录 B      | 19 节点系统图及其参数 .....      | 294        |
|           | <b>参考文献</b> .....       | <b>296</b> |



# 1 绪 论

本章主要介绍中国电力系统发展的简要历程、发展趋势，阐述电力系统规划的重要性及电力系统规划的任务、基本要求及分类。

## 1.1 中国电力系统的发展历程及发展趋势

### 1.1.1 基本概况

中国的电力工业起步很早，但在 1949 年以前发展缓慢。早在 1882 年德波列茨进行第一次高压输电试验时，英国商人 C.M.Dyce, G.E.Low, W.S.Wetmore 便在上海投资 5 万两白银，创办了上海电气公司（SEC）并在上海乍浦路老同孚洋行建起了装机容量为 12kW 的发电厂，在上海外滩亮起了五盏明灯。初步形成了具有生产、输送、分配、消费电能的由发电机、变压器、电力线路、用电设备联系在一起组成的统一整体的电力系统雏形。其后，1911 年英美在上海开办了杨树浦发电厂，1913 年投入运行；至 1924 年该厂装机 12 台，总容量 121MW，成为当时远东第一大电厂。中国的发电机装机容量、发电量、世界排名（装机）见表 1-1、表 1-2。

表 1-1 中国电力系统初期的装机容量、发电量、世界排名（装机）

| 年份   | 装机容量   | 发电量（亿 kW·h） | 中国在世界排名（装机） |
|------|--------|-------------|-------------|
| 1882 | 12kW   |             |             |
| 1936 | 1285MW | 38          | 14          |
| 1949 | 1849MW | 43          | 25          |

表 1-2 1949 年以后中国电力系统的装机容量、发电量、世界排名（装机）

| 年份   | 装机容量（MW）  | 发电量（亿 kW·h） | 中国在世界排名（装机）    |
|------|-----------|-------------|----------------|
| 1949 | 1849      | 43          | 25             |
| 1978 | 57120     | 2566        | 7              |
| 1980 | 60500     | 3006        | 8              |
| 1987 | 100000    | 4960        | 5~6            |
| 1993 | 170000    | 8364        | 4              |
| 1995 | 200000    | 10069       | 4（前三名分别为美、日、俄） |
| 1998 | 270000    | 11670       | 2              |
| 2000 | 319320.9  | 13685       | 2              |
| 2005 | 517184.8  | 24975       | 2              |
| 2011 | 1055760.0 | 46928       | 2              |

注 据美国能源信息局统计，美国发电设备容量 2011 年度 115314 万 kW，2012 年度估计 11.6 亿 kW。据中国电力企业联合会统计，中国发电设备容量 2011 年度 105576 万 kW，2012 年度 11.45 亿 kW；2012 年度中国净发电量已超过美国，2013 年中国电力装机容量将超美国。

1949年,当时除东北有一条220kV线路和几条154kV线路、京津唐和台湾省建有规模不大的地区高压电网和上海市建有33kV电压等级的电网外,其他地区只有以城市供电区为中心的发电厂,全国没有一个超高压电网。到1978年,我国建成了330kV输电线路535km和220kV输电线路2267km,相应变电设备容量分别为490MV·A和24790MV·A。1998年220kV及以上线路14.37万km,变电容量3.29亿kV·A,分别是1978年的6.2倍和13倍,年均递增9.5%和13.7%。2007年,全国220kV及以上输电线路长度达到32.71万km,同比增长14.20%,220kV及以上变电设备容量达到114445万kV·A,同比增长18.71%。中国已经形成一个比较完善并具有相当规模的电力工业体系。截至2011年底,中国220kV及以上输电线路长度、公用变电容量分别为48.0万km、21.99亿kV·A。

### 1.1.2 电源的发展

中国电源建设在“大力发展水电,优化发展火电,适当发展核电,因地制宜发展新能源发电,开发与节约并重”方针的指导下,得到了迅速发展。从1988年开始全国每年新投产发电机组都超过10000MW,1990年后每年新投产大中型发电机组都超过10000MW,到1998年全国装机容量到2.7亿kW,发电量达到11600亿kW·h。2005年全国装机容量达5.1718亿kW,发电量达到24975.26亿kW·h,发电装机超过10GW的有河北、山西、内蒙古、山东、上海、江苏、浙江、安徽、福建、河南、湖北、四川、重庆、陕西、宁夏、广东、贵州及广西共18个省市自治区直辖市。2011年全国装机容量达10.56亿kW,发电装机容量不到10GW的有北京、海南和西藏,其他都已经超过10GW。各种容量发电机组首台投产时间、地点见表1-3。

表 1-3 第一台不同容量发电机组投产时间、地点

| 时间       | 地点        | 容量 (MW) |
|----------|-----------|---------|
| 1956年4月  | 淮南田家庵电厂   | 6       |
| 1958年8月  | 重庆电厂      | 12      |
| 1958年12月 | 闸北电厂      | 25      |
| 1959年11月 | 辽宁电厂      | 50      |
| 1967年2月  | 北京高井电厂    | 100     |
| 1969年9月  | 上海吴泾电厂    | 125     |
| 1973年4月  | 辽宁朝阳电厂    | 200     |
| 1974年11月 | 上海望亭电厂    | 300     |
| 1989年    | 安徽平圩电厂    | 600     |
| 1994年    | 广东大亚湾核电厂  | 900     |
| 2002年    | 广东岭澳核电厂   | 1000    |
| 2007年    | 浙江华能玉环火电厂 | 1000    |

2005年全国200MW及以上机组达到789台,总容量252539.3MW,占全部装机容量的48.8%,其中600MW及以上机组达到84台,总容量55491MW。到2010年底,全国200MW及以上机组1419台,总容量556050MW,占全部装机容量的80.18%,其中

600MW 及以上机组达到 394 台,总容量 255470MW。从 2005 年和 2010 年的数据看,这五年期间大机组发展较快。截至 2011 年,中国已运行的机组中,最大的核电机组达到 1060MW,最大火电机组达到 1000MW,最大水电机组达到 700MW。近些年来,中国已经形成了具有自己特色并适合国情的电力设备制造体系,能生产制造 1000MW 及以下容量的系列发电机组,并建成成套发电设备的生产基地:上海闵行、哈尔滨、四川德阳。

百万千瓦大厂到 1978 年时全国只有 2 座,合计装机容量 2325MW,占全国装机容量的 4.1%;2005 年全国达到 128 座,总装机容量 191934MW,占全国装机容量的 37.11%;截至 2011 年初,百万千瓦及以上电厂 305 座,总装机容量 501GW,占全国装机容量已突破 50%。1986 年以前,中国每年投产水电机组都在 1000MW 左右徘徊,20 世纪 80 年代中后期,水电建设高潮迭起。水电机组 1987 年投产 2530MW,1993 年投产 3680MW,1994 年投产 4030MW,连续跨上年投产 2000、3000、4000MW 的台阶。这期间水电建设的“五朵金花”:广州抽水蓄能、岩滩、漫湾、水口、隔河岩水电站等 5 个百万千瓦级水电站相继开工建设或投产,装机容量 3300MW 的二滩水电站已于 1998 年投产第一台 550MW 机组。1994 年中国自行设计、制造、施工的浙江秦山核电站和中外合作引进法国机组建设的广东大亚湾核电站相继建成投入商业化运行,结束了中国内地长期无核电的历史。1993 年中国开始投产大型抽水蓄能机组。1994 年 12 月 14 日中国开工建设举世瞩目的长江三峡工程,2003 年如期实现发电,2009 年所有工程如期完工,总装机容量达到 2250 万 kW,年发电量约 1000 亿 kW·h。

在开发新能源和可再生能源发电方面,我国从 20 世纪 50 年代开始研制风力发电机,80 年代以来相继研制成功 50~200W 的微型风力发电机组并安装在内蒙古、甘肃、新疆、青海、西藏等省区的牧区草原和沿海电网延伸不到的地区;1986 年山东省荣成市组成了中国第一个风电场;近些年来,中国风电发展较快,截至 2011 年,中国风电装机容量达 62GW,位居世界第一。1970 年前后,全国兴建了十几座潮汐电站,包括江夏潮汐试验电站和白沙口潮汐电站,装机容量分别为 3200kW 和 960kW,1989 年 5 月又投产了福建平潭岛的幸福洋潮汐电站。到 2005 年,全国已建成 8 座潮汐电站和 1 座潮洪电站,总装机容量为 10650kW,截至 2013 年初,该总装机容量没有变化。1977 年在西藏羊八井建成的地热电站,1998 年底装机容量已达到 25.18MW,截至 2011 年,累计发电量跨越 24 亿 kW·h。在光伏发电方面,中国已具备建设兆瓦级的光伏发电站能力。目前,我国光伏发电装机容量累计超过 14 万 kW。

### 1.1.3 电网的发展

#### 一、输变电发展

建国后,中国电网由小变大,由低压、高压到超高压,由弱联系逐步过渡到强联系,其发展过程大体是:首先发展了城市孤立电网,然后形成地区电网,再发展成省内电网,并进一步发展为大区电网,今后要加快大区电网互联。从 20 世纪 50 年代开始,随着大型水、火电站的相继建成,各地区开始建设 110kV 和 220kV 线路。1970~1980 年期间,先后形成了 17 个 220kV 的跨省地区电网或省电网。1972 年,中国第一条 330kV 超高压输变电工程——刘家峡经天水到陕西关中的全长 534km 的刘天关线路投运,1981 年又建成从河南平顶山到湖北武汉的中国第一条全长 595km 的 500kV 线路。此后,在普遍建设 220kV 地区电网的基础上,500kV (包括 330kV) 电网工程在许多省份和大区内的省际间迅速发展,逐步形成了

东北、华北、华中、华东、西北、南方 6 个跨省区电网;1989 年中国建成了第一条跨大区远距离 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路——葛沪线,其中华东电网和南方联营电网装机容量分别达到 44750MW 和 44970MW;独立省电网有海南、新疆、西藏 3 个。大电网已覆盖全国的所有城市和大部分乡村。1978 年全国输电线路总长为 22762km,变电容量 24790MV $\cdot$ A,1998 年分别达到 117447km 和 24951MV $\cdot$ A,比 1978 年增长了 5.1 倍和 10.1 倍;1978 年全国 330kV 输电线路 535km,变电容量 490MV $\cdot$ A,1998 年分别达到 7126km 和 10320MV $\cdot$ A;1978 年中国还没有 500kV 输电线路和变电设备,到 1998 年 500kV 交流输电线路和变电设备却已达到 18104km 和 66410MV $\cdot$ A, $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路 1044.5km,换流站容量为 2400MW。华东、华北、东北、华中已形成 500kV 跨省市主干电网;西北电网已形成结构紧密的 330kV 网络。2005 年 9 月,我国第一个 750kV 输变电工程正式投入运行。2009 年初我国第一个 1000kV 特高压交流试验示范工程投入运行(晋东南—南阳—荆门)。华中与西北联网的灵宝直流工程、三峡电站及相应的输变电工程、山东青州输变电工程、江苏电网第三回 500kV 过江输变电工程等一批重点工程陆续投产,全国六大区域电网已实现互联。截至 2011 年初,我国交流 1000、750、500、330、220kV 电压线路长度分别达 1006、6685、135180、20338、277988km,相应变电设备容量达 600、3870、69843、6457、118247 万 kV $\cdot$ A;直流高压 $\pm 800$ 、 $\pm 600$ 、 $\pm 500\text{kV}$ 线路长度分别达 3334、1095、8081km。未来国家电网计划在“十二五”和“十三五”期间,加快构建以华北、华中和华东为中心的“三华”特高压互联电网,计划 2015 年形成“三横三纵”特高压“三华”电网,2020 年形成“五纵六横”特高压“三华”主网架。

三峡输变电工程的第一个单项工程四川长寿至万县的 500kV 输变电工程已于 1998 年 5 月建成投产。三峡输变电工程在华中、华东、川渝电网内建设 500kV 交流线路 6900km,变电设备容量 24750MV $\cdot$ A, $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路 2200km、换流站(两端)12000MW,以及其他二次系统设施。三峡工程于 2009 年全部竣工,已经形成中国坚强的中部电网,成为全国联合电网的核心。随着“十二五”和“十三五”期间“三华”特高压互联电网形成,国家电网将基本实现坚强互联电网。

## 二、城乡电网建设与改造

1998 年开始,国家决定加快基础建设,投入 3000 亿元人民币进行为期三年左右的城乡电网大规模建设改造,并将其列入国债建设管理。截至 2000 年底,全国城网项目工程形象进度已完成 760 多亿元(约占城网总投资 1200 亿元规模的 60%),农网完成约 1100 亿元(约占农网总投资 1800 亿元规模的 61%)。用这笔资金建设和改造全国 2400 多个县级农村电网,通过改革农电管理体制、建设和改造农村电网,进而实现城乡用电同网同价,大幅度降低农村电价,减轻农民负担;对全国 280 个地级以上城市电网进行改造,以开拓电力市场,增加用电量。1998~2000 年,电力工业发、输、配投资比例约为 1:0.37:0.69,这种投资结构比以往有了很大改善,趋同国际发达国家发、输、配投资比例。

1998~2000 年城网规模平均增长率高于“八五”增长率,城网供电能力有了较大提高。部分竣工城网经初步评估或估测,2000 年 35~220kV 城网网架初步建成,网络结构得到加强,基本满足 N-1 安全供电准则要求。高压配电网变压器容载比由 1.5~1.7 上升到 1.8~2.0,供电能力比 1995 年增长近 50%,中压配电网容量增长约 25%。1999~2000 年北京、上海、山东、广东、江苏等省市城网经历连年夏季高峰负荷两位数的快速增长,基本没有发

生过负荷、烧设备问题,没有限电。

城乡电网建设与改造发展较快,截至 2011 年初,全国县供电企业拥有 3~220kV 高压线路 392 万 km,低压线路 836 万 km;35~220kV 变电设备容量 10.93 亿 kV·A,配电变压器容量 9.14 亿 kV·A。

### 三、农村电气化

在农村电气化方面,到 1997 年底,中国在广大农村和边远地区建起了 45047 座小型水电站、1057 座小型火电厂、86084 万座柴油机发电站和 67278 台风力发电机组,总装机容量达到 43830MW,建成 274.5 万 km 高压线路、613.4 万 km 低压线路和配电设备容量 263210MV·A。到 1997 年底,全国农村地区乡、村和农户通电率达到 99.03%、97.66% 和 95.86%,全国已有 14 个省(直辖市、自治区)实现了村村通电,同时建成农村电气化县 832 个。

2005 年农村水电新增装机突破 500 万 kW,达到 530 万 kW,一年投产超过“八五”期间 5 年投产总量,超过改革开放前 30 年投产总量,超过投产 7 台三峡机组容量;年发电量 1380 亿 kW·h,在建规模 2000 万 kW。“十五”期间,农村水电累计完成投资 1500 亿元,新增装机 1600 万 kW,发电量 5600 亿 kW·h,实现工业增加值 2800 亿元,税利 350 多亿元,解决了 1200 万无电人口的用电问题。

农村电气化已经取得一定发展,截至 2011 年初,中国乡(镇)、行政村、农村居民用户合计通电率分别达到 99.72%、99.76%和 99.83%,尚未实现乡(镇)全部通电的有四川、青海和西藏 3 个供电区域,四川、黑龙江、蒙东、青海、新疆、西藏和云南 7 个供电区域未实现“村村通电”,四川、黑龙江、蒙东、甘肃、青海、新疆、西藏、云南和蒙西 9 个供电区域未实现“户户通电”。

### 四、信息化发展

中国电网五级调度体系已经在分阶段实现计算机化。与此同时,电网的规划、设计、设备制造、施工、运行、管理、科研试验等方面都取得了长足的进步,对中国电网的发展和现代化起到了重要的推动和促进作用。

在统一规划下,具有坚强的网架结构、先进的技术装备和调控手段,担负着电力输送和各类发电厂联合运行、互相调剂,发挥综合效益的现代化大电网正在不断形成。中国的电网建设已经进入跨大区联网送电、逐步实现全国统一联合电网的新阶段。

#### 1.1.4 科技进步与电力体制改革及法制建设

中国已经掌握了先进的 300、500MW 和超临界 600MW 火电机组、1000MW 级核电机组和 1000kV 交流和±800kV 直流输变电工程的设计、施工、调试和运行技术,掌握了高 180m 级的各类大坝的筑坝和大型抽水蓄能电站的设计、施工技术,有能力建设像二滩、三峡水电站那样的大型水电工程,开发了先进的大型水、火电厂分散控制系统。各大电力系统的计算机监控调度系统进入实用化阶段,使电力系统运行和调度实现了自动化。目前正在开展 1000kV 的特高压试验示范推广工程。

电力工业贯彻国务院提出的“政企分开、省为实体、联合电网、统一调度、集资办电”和“因省、因网制宜”的方针,以集资办电为突破口开始了不断深化的电力体制改革,打破了长期以来形成的依靠中央政府一家办电的格局,形成了多渠道、多层次、多形式集资办电的局面,开拓出了一条符合中国国情的有利于加速电力工业发展从而满足国民经济发展和人

民生活水平日益提高对电力旺盛需求的新路。

《电网调度管理制度》已于1993年11月1日开始实施,《电力法》也于1996年4月1日在全国范围实施,它们为电力工业进一步深化体制改革,实行公司制改组、商业化运行、法制化管理奠定了法律基础。同时,《供用电管理条例》也于1996年施行。

2002年3月,国务院批准了《电力体制改革方案》,并成立了电力体制改革工作小组,负责组织电力体制改革方案实施工作,进行资产重组。根据改革方案,为在发电环节引入市场竞争机制,首先要实现“厂网分开”,将国家电力公司管理的电力资产按照发电和电网两类业务进行划分。发电环节按照现代企业制度要求,将国家电力公司管理的发电资产直接改组或重组为规模大致相当的5个全国性的独立发电公司,逐步实行“竞价上网”,开展公平竞争。电网环节分别设立国家电网公司和中国南方电网有限责任公司。国家电网公司下设华北、东北、华东、华中和西北5个区域电网公司。另外,还设立国家电力监管委员会,对电力产业实施必要的监管。2002年12月29日,中国电力新组建(改组)的11家公司宣告成立。通过产业重组,我国电力产业内实现了厂网分开,初步引入了竞争机制。

2006年11月1日,国务院常务会议审议并原则通过《关于“十一五”深化电力体制改革的实施意见》。“十五”期间,我国电力体制改革取得重大进展,政企分开、厂网分开基本实现,发电领域竞争态势已经形成,新型电力监管体制初步建立。“十一五”期间,深化电力体制改革的基本原则是:坚持以改革促发展,坚持市场化改革方向,坚持整体规划、分步实施、重点突破;主要任务是:第一,抓紧处理厂网分开遗留问题,逐步推进电网企业主辅分离改革。第二,加快电力市场建设,着力构建符合国情的统一开放的电力市场体系,形成与市场经济相适应的电价机制,实行有利于节能环保的电价政策。第三,进一步转变政府职能,坚持政企分开,健全电力市场监管体制。“十二五”期间,将进一步充实“十一五”关于电力改革的内涵建设,完善电力市场制度改革,切实提高电力资源优化配置能力。

## 1.2 电力系统规划的重要性及基本要求

### 1.2.1 电力系统规划的重要性

用户对电能需求的不断增长,只有通过电力工业本身的基本建设,不断扩大电力系统的规模才能满足。要满足国民经济发展的需要,电力工业必须先行,因此做好电力工程建设的前期工作,落实发、送、变电本体工程的建设条件,协调其建设进度,优化其设计方案,意义尤为重大。电力系统规划正是电力工程前期工作的重要组成部分,是关于单项本体工程设计的总体规划,是具体建设项目实施的方针和原则,是一项具有战略意义的工作。电力系统规划工作应在国家产业和能源政策指导下,在国民经济综合平衡的基础上进行,首先应该进行长期电力规划,经审议后在此基础上从电力系统整体出发,进一步研究并提出电力系统具体的发展方案及电源和电网建设的主要技术原则。

电力工业的发展速度及其经济合理性不仅关系到电力工业本身能源利用和投资使用的经济效益和社会效益,同时也将对国民经济其他行业的发展产生巨大的影响。正确、合理的电力系统规划实施后可以最大限度地节约国家基建投资,促进国民经济其他行业的健康发展,提高其他行业的经济效益和社会效益,因而其重要性是不可低估的。

电网由输电、变电、配电等环节组成,电网规划是电力规划的重要组成部分,它和电源

规划有着密切联系。往往只有在全盘考虑电源与电网的条件下,才能找到最合理的供电方案。例如,在离负荷点远处有较经济廉价的电源,近处则有较不经济的电源,若它们之间进行比较和选择时,就必须全盘考虑电源与电网才能选出合理的方案。

### 1.2.2 电网规划的基本要求

电网规划的目的是力求在规划期末使电网达到一个较理想的结构。一个理想的电网结构应满足以下基本要求:

(1) 输、变、配电比例适当,容量充裕。要求电网在各种运行方式下都能满足将电力安全经济地输送到用户,并有适当的裕度。在电网上既没有薄弱环节,造成发电能力不能充分利用的现象,也不存在设备能力闲置、积压资金现象。

(2) 电压支撑点多。电压支撑点的设置数量要能保证在正常及事故情况下电力系统的安全及电能质量。电网规划必须考虑全系统的安全,在绝大多数可能出现的故障情况下仍能持续供电,不引起系统不稳定及电网解列,也不导致不允许的电压及频率降低或甩负荷。在某些罕见的复合故障下可限制其后果。例如允许系统分块解列运行,以保障重要供电不中断并能较快地恢复正常运行;对停电的时间及范围有所限制,但不允许出现全系统失步、电压崩溃等导致系统瓦解的重大事故。为此,在电网规划中要考虑各种措施。如单回线的送电容量不得超过受端容量的 35%~50%。又如对大容量、远距离输电应采用双回线或多回线,同路径或同杆塔线路在中途分段并互相连接,设置中间开关站。这样,如一点发生故障时可以分段切除,只失去一回路中的一段,其他部分仍可继续运行,可以显著地提高运行安全性。

(3) 保证用户供电的可靠性。对于供电中断将会造成国民经济或人民的生命财产重大损失的一级负荷及重要供电地区,必须设置两个及以上彼此独立的供电电源;对于无重要用户的三级负荷及供电地区,规划中一般不考虑备用电源;介于上二者之间的二级负荷及供电地区,是否设置备用电源,应视系统情况权衡停电损失及装备备用电源增加的综合投资成本后确定。

(4) 系统运行的灵活性。电网结构应能适合多种可能的运行方式,包括正常及事故情况下、高峰及低谷负荷时的运行方式;有大水电站或水电比重大的系统应分别考虑丰、平、枯水时的运行方式。

(5) 系统运行的经济性。电网中潮流分布合理,无迂回倒流或送电距离过长等现象,线路损失小,投资及运行费用低。

提高线路的输送容量是降低单位容量造价、提高输电线路效益的重要措施。超高压线路输送容量应按照超过自然功率设计。各种电压线路的自然功率见表 1-4。

表 1-4 各种电压线路的自然功率

| 线路电压 (kV) | 自然功率 (万 kW) |       |       |       |       |
|-----------|-------------|-------|-------|-------|-------|
|           | 单导线         | 双分裂导线 | 三分裂导线 | 四分裂导线 | 八分裂导线 |
| 220       | 12          | 16    |       |       |       |
| 330       | 27          | 36    |       |       |       |
| 500       |             |       | 90    |       |       |
| 750       |             |       |       | 200   |       |
| 1000      |             |       |       |       | 500   |

提高输送容量主要采用串联感性补偿或并联电容补偿,或两者并用。串联补偿对提高输送容量效果显著,但需注意避免发生次同步谐振;并联补偿可以控制线路波阻抗,提高输送容量并控制过电压。为了维持线路电压恒定,要求其阻抗在轻载时为感性,重载时为容性。

(6) 便于运行,在变动运行方式或检修时操作简便、安全,对通信线路影响小等。一般在电力系统规划中先进行系统中最高一级电压网络的规划。当系统中新采用高一级电压,其电网尚未充分发展时,要同时考虑原系统中最高一级电压与新出现的电压网络的规划,在地区供电规划中再考虑较低电压等级的网络规划。

确定一个较理想的电网结构方案是涉及多方面因素的复杂问题,应在考虑各种因素下制定出若干可行方案,经过充分的系统分析及比较后选定。

### 1.2.3 电力系统规划中的重大举措

#### 一、实现全国联网

大电网互联是世界电力发展的共同经验,是我国适应“西电东送”格局的重要措施。

2003年,以三峡电站建设为中心,首先形成我国的中部电网。2010年,已经基本形成北、中、南3个跨区互联电网,其中北部电网由华北、东北、西北和山东电网组成,中部电网由华中、华东、川渝和福建电网组成,南部电网由广东、广西、云南、贵州、香港、澳门电网组成。2010~2020年期间,将形成基本覆盖全国的统一联合电网。

#### 二、加快城市电网和农村电网的建设改造

##### 1. 城市电网采用现代化技术

(1) 利用现代化技术促进城网装备现代化,提高供电可靠性,提高新建住宅区内配线供电能力。

(2) 中心城区大力推广变、配电所与建筑物相结合和地下变电所,以减少占地面积和接近电力负荷中心,推进电缆线路供电。

##### 2. 深化农电体制改革 加快农村电网改造

(1) 全国实现一县一公司。

(2) 全国推行“五统一”(统一电价、统一发票、统一抄表、统一核算、统一考核)和“三公开”(电量公开、电价公开、电费公开),逐步实现电力销售到户、抄表到户、收费到户、服务到户。

(3) 规范电网投资管理,努力控制工程造价,降低建设成本,减轻农民负担。

#### 三、树立优良的社会形象,全心全意为用户服务,严格执行《电力法》

(1) 电力工业应当根据国民经济和社会发展的需要适当超前发展。

(2) 国家鼓励国内外经济组织和个人依法投资开发电源,兴办电力生产企业,实行谁投资谁受益。

(3) 电力设施和电能受国家保护。

(4) 电力建设和电力生产要依法保护环防治公害。

(5) 国家鼓励和支持利用再生能源和清洁能源发电。

(6) 电力企业依法实行自主经营、自负盈亏并接受监督。

(7) 国家帮助和扶持少数民族地区、边远地区和贫困地区发展电力工业。

(8) 国家鼓励采用先进的科技技术和管理方法发展电力工业。

#### 四、建立科学合理的电价形成机制

建立科学合理的电价形成机制可实现：

- (1) 促进电力企业改善自身的经营状况，使电力企业获得应有的利润，从而积累资金，走向良性循环。
- (2) 约束电力工程造价，降低建设成本，消除盲目投资，减少资金积压和浪费。
- (3) 约束电力生产成本，降低发电能源进价。
- (4) 投资者获得较高的回报，从而也确保了电力建设和改造资金的来源。
- (5) 用户公平负担。
- (6) 推动电力企业经营者、生产者的素质提高，促进人才流动。

#### 五、特高压试验示范工程

2006年8月19日，特高压试验示范工程1000kV晋东南—南阳—荆门工程正式奠基，2009年初正式投运，这是我国首个特高压交流试验示范工程。该试验示范工程包括三站两线，起于山西省长治市境内的晋东南变电站，经河南省南阳市境内的南阳开关站，止于湖北省荆门市境内的荆门变电站，线路全长约653.8km。工程可行性研究报告估算静态投资约为58亿元（2004年价格水平），动态总投资约为60亿元。系统额定电压为1000kV，最高运行电压1100kV，自然输送功率约500万kW·A。

晋东南变电站1000kV配电装置采用气体绝缘金属全封闭开关设备（Gas Insulated Switch, GIS），南阳开关站、荆门变电站1000kV配电装置采用紧凑型SF<sub>6</sub>全封闭组合电器设备（Hybrid Gas Insulated Switch, HGIS）。

晋东南—南阳线路途经山西、河南两省，在河南省孟州市境内跨越黄河。线路长度约363km，其中一般线路359.5km，黄河大跨越约3.5km。线路长度山西省境内约115.2km，河南省境内约247.8km。

南阳—荆门线路途经河南、湖北两省，在湖北省钟祥市境内跨越汉江。线路全长290.8km，其中一般线路约288km，汉江大跨越约2.8km。线路长度河南省境内约104km，湖北省境内约186.8km。

全线采用单回路，导线截面为8×500mm<sup>2</sup>，分裂间距400mm，一根地线采用OPGW—150，另一根采用LBGJ—150—20AC铝包钢绞线。

在试验示范过程中，国家电网公司按照建设“安全可靠、先进适用、经济合理、环境友好、世界一流”精品工程的目标，认真做好特高压交流试验示范工程实施工作。试验示范工程的建成，拉开了我国特高压电网建设的序幕，标志着中国电网发展进入了一个新阶段。“十一五”和“十二五”特高压坚强电网规划，也正是在特高压试验示范工程基础上展开的。

### 1.3 电力系统规划的任务及分类

#### 1.3.1 电力系统负荷预测

电力系统负荷一般可以分为城市民用负荷、商业负荷、工业负荷、农村负荷以及其他负荷等，不同类型的负荷具有不同的特点和规律。

(1) 城市民用负荷。城市民用负荷主要是指城市居民的家用电器用电负荷。它具有年年增长的趋势和明显的季节性波动特点，而且还与居民的日常生活和工作的规律紧密相关。