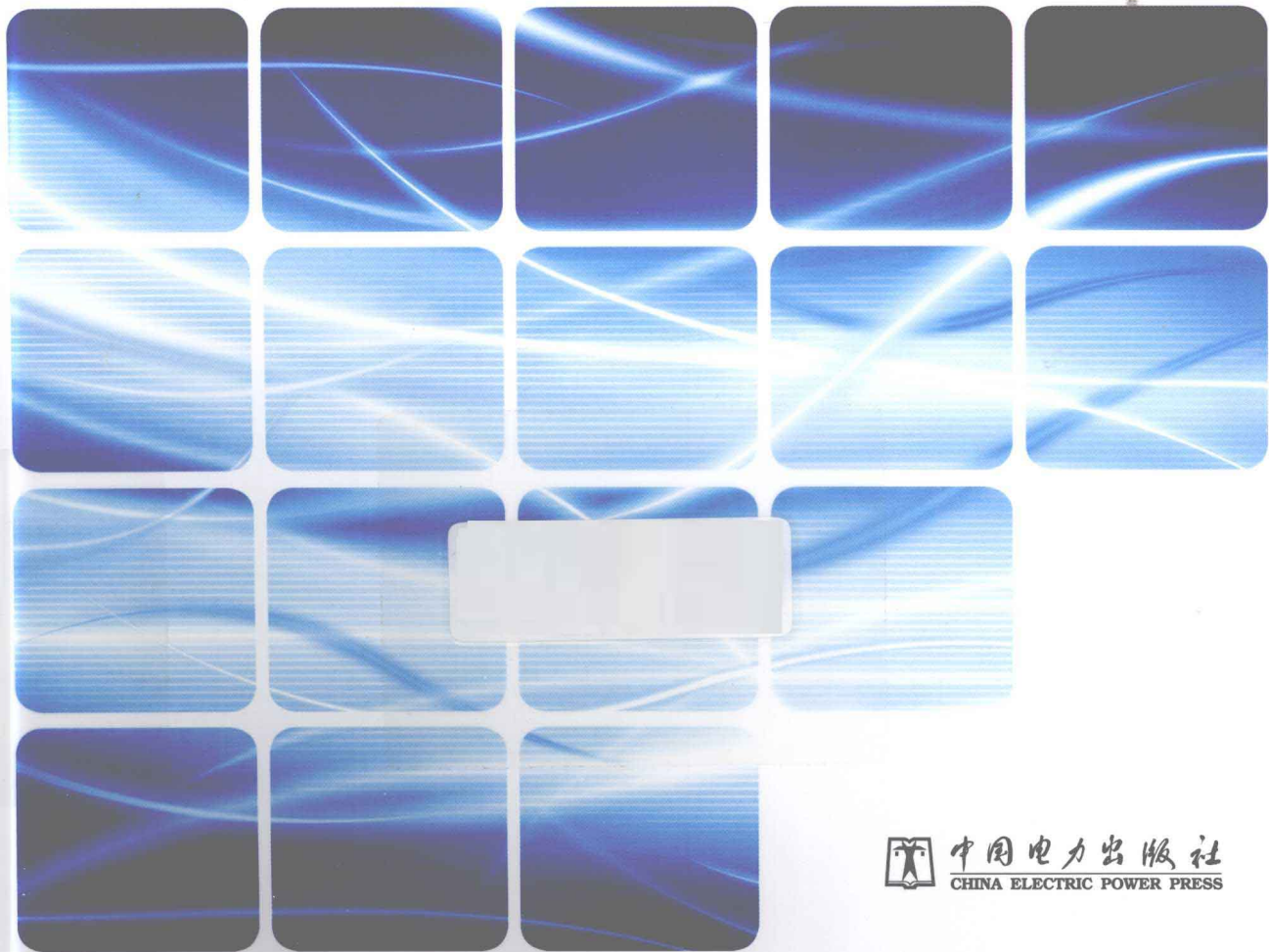




全国电力职业教育规划教材  
职业教育电力技术类专业培训用书

# 电力系统基础

黄院臣 编著  
陈家瑁 张冠昌 主审



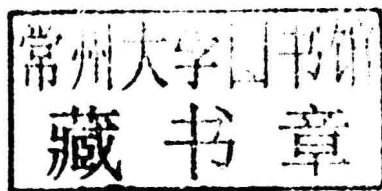
中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



全国电力职业教育规划教材  
职业教育电力技术类专业培训用书

# 电力系统基础

编著 黄院臣  
主审 陈家瑁 张冠昌  
参审 吕亚明 黄河



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书为全国电力职业教育规划教材。全书共分为 10 章，主要内容包括电能与电力系统，电力系统基本接线方式，主要元件的特性参数、运行参量和数学模型，电力系统潮流及其稳态分析，电力系统潮流的调整控制，电力系统有功功率平衡及频率调整，电力系统无功功率平衡及电压调整，电力系统经济运行分析，电力系统静态稳定性概述，特高压电网展望及高压直流输电介绍。

本书主要可作为电气工程技术人员培训教材，也可作为职业院校电力技术类相关专业的教学用书，还可供对电气工程知识有兴趣的读者自学参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统基础 / 黄院臣编著. —北京: 中国电力出版社, 2012.8

全国电力职业教育规划教材

ISBN 978-7-5123-3092-4

I. ①电… II. ①黄… III. ①电力系统—高等职业教育—教材 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 107957 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2012 年 9 月第一版 2012 年 9 月北京第一次印刷  
787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.125 印张 420 千字  
定价 32.00 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

---

随着社会经济的发展，现代社会的各个方面对电能的需求越来越大，对电气工作人员的素质要求也越来越高，所以普及和提高电气方面的科学知识很有意义。然而，“电学”具有抽象性，较难掌握。鉴于此，编者作为一名对实际工作和教培工作有着深刻感受的电气工程师，编写了这本《电力系统基础》，以为广大电气工作者提供一本可读性较强的读物。

绝大部分电能的供应来源于电力系统。“电力系统”作为一门电气工程专业的基础课程，讲述和研究电力系统的基本构成、电能（电力）生产、应用的基本过程、电力系统运行的基本特性及相关的计算和分析等内容。总体分为基本部分、稳态分析、暂态分析三大方面。本书共分为十章，较系统地讲述了电力系统的基础知识，在稳态分析之基础上增加了静态稳定性和系统振荡概述以及特高压电网展望及高压直流输电介绍等章节。

电力系统的运行状态分稳态和暂态两种情况。

稳态又叫静态。所谓稳态是指系统正常的、相对静止的运行状态（稳态过程），在这个过程中有关的电气量都是不随时间变化的常量，一般是指没有电气故障的运行状态。

暂态又叫动态。所谓暂态是指系统受到干扰后变动的运行状态（暂态过程），在这个过程中出现了“状态变量”，情况更为复杂，一般是指有电气故障的运行状态。

我们在分析、研究问题时，一定要注意前提。因为在不同的情况下，各种量的特性及相互关系可能是不一样的，其分析方法和结果也是大不相同的。

编者集多年的学习和工作实践，力求知识的理性、系统、明晰，对知识的认知、分析和表述方面进行了探索性的思考，并融汇多方优点，积极创作，编写了本书。本书在编写上突出了以下特点：

（1）虽以教科书的体例编写，但注重与实际的结合，立足于普及读物，比较适合于高职高专学生和广大现场工作人员学习使用。

（2）力求相关知识的完整性、全面性，希望一书在手，知识全面。

（3）注重知识结构的系统性和相关性，逻辑清晰，便于学习掌握。

（4）在普及知识之基础上续接了适当的知识提高部分，启发大家进一步学习。

本书在编写过程中参阅了有关文献，并得到有关人士的大力支持，在此一并致谢。

由于经验和能力所限，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。若有意见或建议，可通过电子邮箱 [hh236@163.com](mailto:hh236@163.com) 与作者联系。

编者  
2012年8月

# 目 录

前言	
第一章 电能与电力系统	1
第一节 电能	1
第二节 电力系统概述	2
第三节 电力系统的负荷	7
第四节 电力系统运行的基本特点及要求	13
第五节 电力系统的电压等级及规定	16
第二章 电力系统基本接线方式	21
第一节 电力网的接线方式	21
第二节 发电厂和变电站的电气主接线	24
第三节 用户配电网络的接线	34
第四节 厂(站)运行中的有关问题	36
第五节 电力系统中性点运行方式	41
第三章 主要元件的特性参数、运行参量和数学模型	53
第一节 发电机稳态特性参数及数学模型	53
第二节 电力线路的特性参数及数学模型	54
第三节 变压器特性参数及数学模型	64
第四节 电力负荷的静态特性及数学模型	75
第五节 电力网络的数学模型	78
第四章 电力系统潮流及其稳态分析	81
第一节 负荷(功率)的表示法	82
第二节 输电线路的运行计算	83
第三节 变压器的运行计算	94
第四节 网络潮流计算的准备知识	98
第五节 辐射式网络(开式网)的潮流计算	99
第六节 闭式网络的潮流计算	109
第七节 复杂网络的简化方法及其应用	133
第五章 电力系统潮流的调整控制	144
第六章 电力系统有功功率平衡及频率调整	150
第一节 概述	150
第二节 电力系统有功功率平衡	151
第三节 电力系统的频率调整	159
第七章 电力系统无功功率平衡及电压调整	172
第一节 概述	172
第二节 电力系统无功功率平衡	178

第三节	功率因数的提高	183
第四节	电力系统的电压管理	184
第五节	电力系统的调压措施	189
<b>第八章</b>	<b>电力系统经济运行分析</b>	<b>204</b>
第一节	电能（电量）损耗计算	204
第二节	线损率（网损率）和输电效率	212
第三节	降低电力网损失电量的技术措施	213
第四节	电力系统有功功率最优分配	219
第五节	电力系统无功功率最优分配	237
<b>第九章</b>	<b>电力系统静态稳定性概述</b>	<b>245</b>
第一节	概述	245
第二节	简单电力系统的静态稳定	247
第三节	提高电力系统静态稳定性的措施	251
第四节	电力系统振荡、异步运行及再同步	254
<b>第十章</b>	<b>特高压电网展望及高压直流输电介绍</b>	<b>259</b>
第一节	特高压电网展望	259
第二节	高压直流输电介绍	262
	<b>参考文献</b>	<b>268</b>

## 电能与电力系统

众所周知，能源是人类社会的重要物质基础。随着社会生产力的不断发展，人类所能掌握并使用的能源在数量、品种及构成上也在不断地变化和发展。电能就是科技发展而带来的一种新型能源。

18世纪被称为是蒸汽机时代，代表社会主要生产动力的是蒸汽机技术，它孕育了人类文明史上具有重大意义的工业革命。但19世纪之后，人类对自然的认识进入更高层次的阶段，电的发明应用更具划时代的意义，使人类社会进入了电气化的崭新时代，促使生产力得到空前的发展。如今，电能已在现代生产、生活以及科学领域中得到广泛应用，已成为现代社会不可缺少的重要基础和发展动力。仅对一个国家或地区的经济而言，国民经济每增长1%，就要求电力增长1%以上，可见电能的社会效应是不言而喻的。

### 第一节 电 能

电能的发明和研究经历了漫长的历程。由电学中我们知道，无论“静止电荷”的静电属性，还是“运动电荷”的动电属性，都具有能量的体现。电既然具有能量属性，人类就会加以应用。但其主要应用方面则是它的动电属性，因为电荷的流动可以传递信息（弱电信息应用）、驮载更大的能量（强电电力应用）。

人们对电的能量性应用，就形成一种新的能源——电能。在自然界中，由于“自然演进”而生成的能源称为一次能源（如风力、水流、地热、石油、煤炭、天然气、潮汐等），由一次能源转换而来的能源就是二次能源。电能就是通过自然界中各种可利用的一次能源转换而来的无形的优质的二次能源。它是在原能源的“驱动”下使物质中微观粒子（电子）发生特定运动而表现出来的一种能量形式（即带了电）。

电能之所以得到大量、广泛的应用，是由于它具有其他能量所无法比拟的优点和特点：

#### 1. 转换的方便、多样性

自然界中各种形式的能量，均可以通过专门的发电装置转换成电能，而且又可以方便地转换成其他形式的能量加以应用，解决了一次能源在利用上的局限性和单一性问题。电能为我们提供了一种全新的能源，极大地提高和扩展了人类对自然界的掌握程度。

#### 2. 传送的高效、快速性

电既可以无线传播，也可以有线传输，导体是有效传输较大电能的载体。而且电能是以电磁波的形式传递的，其速度为 $3 \times 10^8$  m/s，从一处传输到另一处所需的时间仅千分之几秒甚至百万分之几秒，极大地缩短了时空距离，实现了定点生产、集中控制、远距离输送、多处使用的社会化和网络化应用体系。

#### 3. 应用的广泛、重要性

电是物质运动的一种形态，所以在物质世界中得到广泛应用。它既可以作为能源动力、又可以用于信息处理等多种形式，应用于社会的方方面面。电能的应用开创了电气化、电脑

化时代，极大地改变了人类的生产、生活方式，延伸了人们的脑和手。

#### 4. 控制的灵活性

电可以实现高度自动化的控制过程。

#### 5. 洁净环保和经济性

电能是优质的二次能源，可以有效地利用一次能源，达到洁净环保，提高整体社会效益。

#### 6. 技术性和理论性

电是物质微观世界运动的一种表象，包含有高度的技术性和理论性。掌握好这门学科需要一定的基础知识。

## 第二节 电力系统概述

现代社会的各个方面都离不开电能，但如何获得和应用巨大电能呢？

### 1. 发电方式

获得电能的方法虽然很多，如化学能电池、光电池等，但这些电源都是有限的。1831年英国科学家法拉第发现“电磁感应现象”，为生产较大电能提供了可能。至目前，产生较大电能的有效方法仍是“电磁感应原理”发电机。当然，随着科学技术的进一步发展，除了传统的发电方式之外，正在开发研究新的发电方式，比较引人注目的有磁流体发电机和燃料电池等。

### 2. 电源构成

大量电能的生产来源于各种类型的发电厂（其中的核心部分是发电机）。它担负着把不同种类的一次能源转换成电能的任务。无论是哪一种发电厂，都是利用一次能源产生的热能、动能、位能来驱动发电机转换为电能。所以，依据使用的一次能源的不同，发电厂可分为许多类型。现在主要采用的有：燃烧煤、石油、天然气发电的火力发电厂；利用水能发电的水力发电厂；利用核能发电的核动力电厂等。目前全世界的电源构成中，火力发电厂容量占的比重最大，超过70%，仍然是主要的发电形式。水力发电容量约占20%，核能发电容量则不足10%。但火力发电要消耗大量的不可再生的一次能源，且环保性能差；水力发电相对来说有很多优越性，但一次性投资大，且要受到水利资源和枯水期、丰水期的限制；核能发电技术含量高、投资大，但能源利用率高。所以，现在除了积极发展水力发电、核动力发电之外，还正在努力开发新的发电能源。如在潮汐发电、地热发电、太阳能发电、风力发电技术等方面都取得了有成效的进展。

当然，用新能源发电和新的发电方式在技术上尚不够成熟，经济上花费也比较昂贵，因此目前尚不能与传统方式相媲美。但是，随着技术的不断进步和能源资源构成的不断改变，必将有不断的变化和发展。

发电厂作为大型电源，可以“生产”强大的电能，然后通过输、变、配电设备将电能输送到各种电力用户加以应用。所以，为了生产和应用巨大电能而形成强大电力，组成了电力系统。

### 3. 电力系统

电力系统其内涵是电能应用的一个体系和场所，是电力生产、输送、分配和使用同时进行的统一系统。它由电源系统、输送设备、分配装置和使用电器四个方面构成。



(1) 电源系统——生产电能的设备：由发电厂中的发电机及相关设备组成。它将其他形式的能量转换为电能。

(2) 输送设备——传输电能的设备：由高压输电线路和升、降压变压器，换流站等组成。它将电能传输到远距离的负荷中心。

(3) 分配装置——分配电能的设备：由各种高低压配电装置和配电网组成。它将电能分配到各个用电点。

(4) 使用电器——消耗电能的设备：由各种用电器组成。它将电能转换成其他所需的能量形式加以应用。

由此从结构上讲，电力系统是把这些发电、输送、变换、分配和消耗电能的各种电气设备连接起来的一个整体。

从电路的角度讲，电力系统其本身就是一个元件多样、电流强大、状态复杂的庞大电路，遵循“电路理论”的基本规律。研究电力系统的理论基础离不开电工学和电机学。

就电力系统的发展史来看，也是在不断完善中前进的。自 1882 年由法国工程师德普勒建成世界上第一个直流电力系统以来，已有 100 多年的历史。该系统是将 2kW 的功率用 2kV 高压直流线路输送到 57km 外的用户。但由于受到当时直流输电技术的限制，电压不能升高，远远不能满足社会生产对输送功率及输送距离的要求。于是在 1891 年出现了由俄国科学家多里沃·多勃列沃斯基建造的第一个三相交流电力系统（见图 1-1），奠定了近代电力系统的雏形。

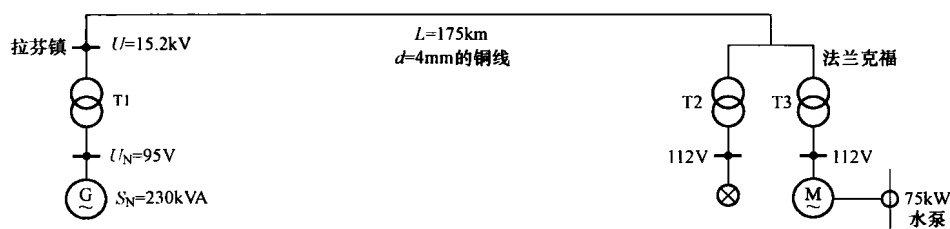


图 1-1 第一个三相交流电力系统图

交流电的优点是可以通过变压器方便地改变电压，便于输送和使用。而三相系统又有其明显的技术性和经济性，即在相同的投资下达到最佳的输送功率，可以方便地产生旋转磁场等。三相交流系统的显著优越性，得到了世界的公认，促使了输电功率逐步增大，输电电压逐步提高，输电距离逐步增长，电力系统日益扩大，以致三相交流输电技术几乎完全代替了直流系统。在近几十年当中，交流发电、变电、输电等电力工程技术得到了迅速发展，形成了强大的近代电力系统。

但是，事物的发展总是循序渐进的，随着电力系统的电压、容量及输送距离不断增大，由于交流电的特点所引起的大型电力系统运行稳定性问题也越来越严重。于是，高压直流输电技术又重新被人们所重视，并经过不断的研究和技术发展，出现了在交流电的基础上——经整流——直流输电——经逆变——还原交流的系统（见直流输电章节）。从发展的角度看，新的高压直流输电技术出现，为现代电力系统的构建和完善开辟了新的途径。当然，这不等于说直流输电要完全替代交流输电，目前的电力系统还是以三相交流输电为主导。在现代大型电力系统中，往往是超高压交、直流输电在发挥各自优越性的情况下同时并存的新局面。

#### 4. 电力网和动力系统

与电力系统相关联的还有电力网络（简称电力网）和动力系统两个概念。前者是指电力系统中除去发电机和用电设备之外的部分，也就是发电机母线至用户接电点这一主网架部分，它包括各级输、配电线路和升、降压变电站、换流装置；后者是指“电力系统”和“发电厂动力部分”的总和，它包括电力系统和动力部分的所有设备。所以整个动力系统可以说是从一次能源到二次能源应用的全部过程。

显然，电力网是电力系统中的一部分，而电力系统又是动力系统中的一部分，三者的关系见图 1-2。

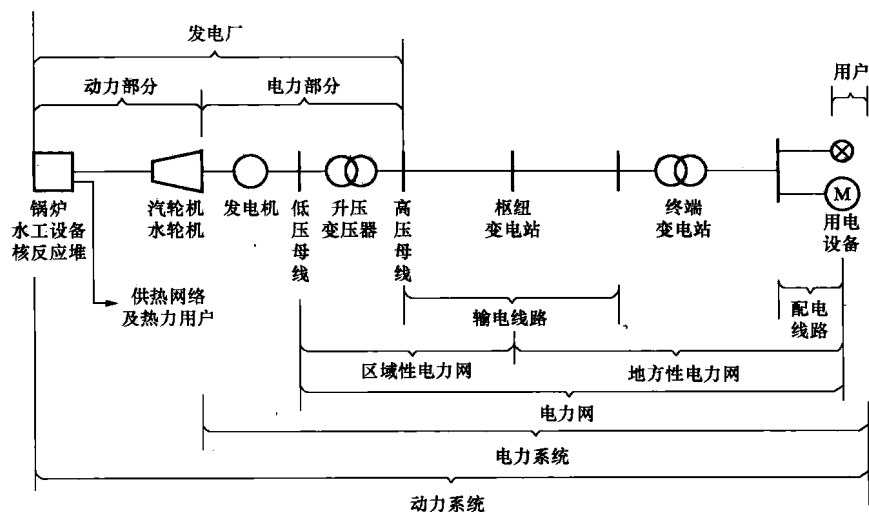


图 1-2 动力系统、电力系统、电力网示意图

发电厂是电力系统的第一个环节。我们知道，发电厂都是由动力部分和电力部分两方面组成。所谓“动力部分”是指一次能源提供部分（如火电厂的锅炉、汽轮机部分，供热管网部分；水电站的水工设备、水轮机部分；核电厂的核反应堆）。由动力部分提将一次能源转变成机械能，再由机械能带动发电机转换成电能（见图 1-3）。由于技术上的原因，发电机的结构一般不会做得很复杂，其输出电压不会很高（一般为 10.5~26kV 左右）。但电能的输送要求更高的电压，所以在发电厂中还须有升压变电站把电压升高，然后才能接到输电线路路上。

输电线路是电力系统的第二个环节，它是电能输送的主干线，用高电压将电能传输到负荷中心枢纽变电站。

另外，为了满足各种用户的需要，还需将输电线路送来的高电压通过降压变电站逐级降压，然后再由配电线路和配电装置将电能分配到各个用户。

所以从整体角度讲，电力系统是一个紧密结合的有机整体，运行中每个环节的状态都将直接影响整个系统，保持电力系统正常运行是全系统的共同责任。

#### 5. 电力系统的电压、相线、波形及频率

目前我国电力系统主要采用各个电压等级的对称三相、50Hz 正弦波交流电。

(1) 电压。电力系统中的各级电压均为国标规定的“额定电压系列”（包括直流和交流两类）。一般交流设备所标注的额定电压值为线电压的有效值。

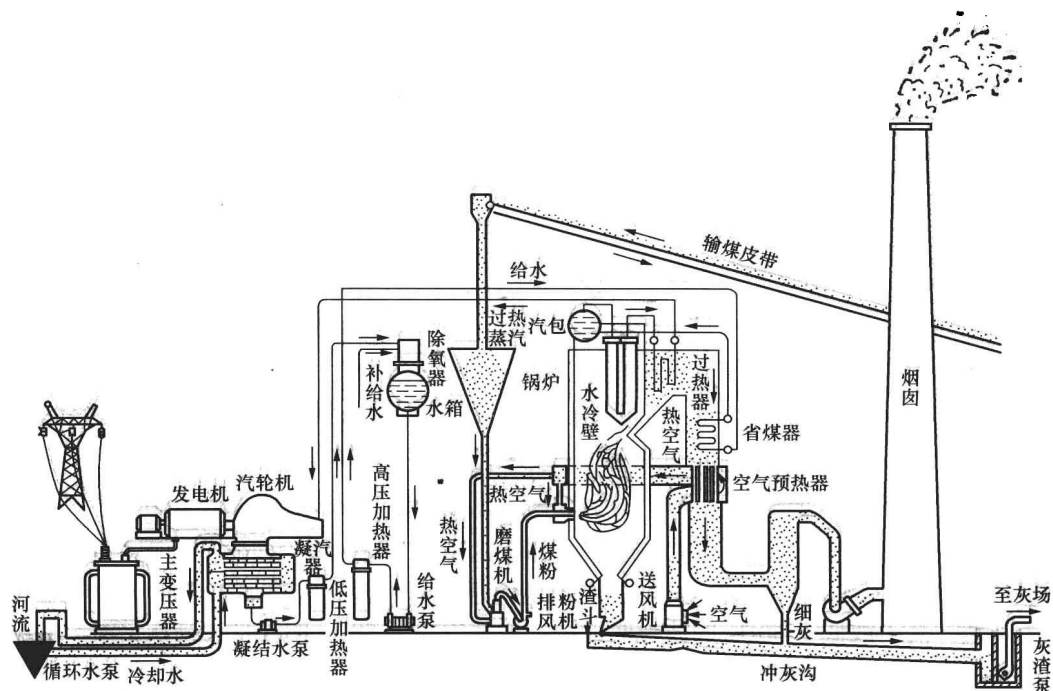


图 1-3 火力发电生产过程示意图

对于输电电压，区域间的远距离输电一般是采用 500kV 超高压系统（世界最高为 1000kV 交流、±800kV 直流特高压系统）；区域内的输电采用 220kV 高压系统；地（市）内输电采用 110kV 高压系统。当输送功率较大时，可能采用较高一级的电压等级。对用户供电一般采用 35kV 及 10kV（6kV）高压。高压用户用电为 3kV，低压用户用电为 380/220V。

关于高压直流输电，目前我国已建成±800kV 直流输电系统。

在一些辅助设备中采用更低电压的直流电（见额定电压一节）。

(2) 相线。电力系统中高压系统多采用交流三相三线制（过去在 35kV 及以下还曾采用过两线一地制）；低压系统除三相三线制外，为了获得相电压，常采用三相四线制（380/220V），还有两相三线制和单相两线制；直流系统为两线制。

一般交流发电机电源为三相对称的正弦交流电，即三相电动势（电压）大小相等、角度相差 120°。对称的三相电源作用于对称电路时，所产生的三相电流也是对称的，而且三相电气量为正序量。但当三相系统发生不对称故障或者是三相负荷不对称时，系统将出现不对称状况（如电气化铁路就是一个典型的不对称负荷）。

对于三相不对称相量，电工学中采用“对称分量法”对其进行分解。分解后的结果为：一组三相不对称的相量等于三组对称分量的叠加（见图 1-4），即

$$\text{正序分量} + \text{负序分量} + \text{零序分量}$$

正序分量大小相等，角度相差 120°，相序按顺时针方向 a-b-c 排列；负序分量大小相等，角度相差 120°，相序按逆时针方向 a-b-c 排列；零序分量大小相等，角差为 0°。从电工理论上讲，正是因为负序、零序分量的出现影响了三相对称度。

(3) 波形及频率。我国电力系统规定正弦交流电的频率为 50Hz（其他国家有采用

60Hz 的)。

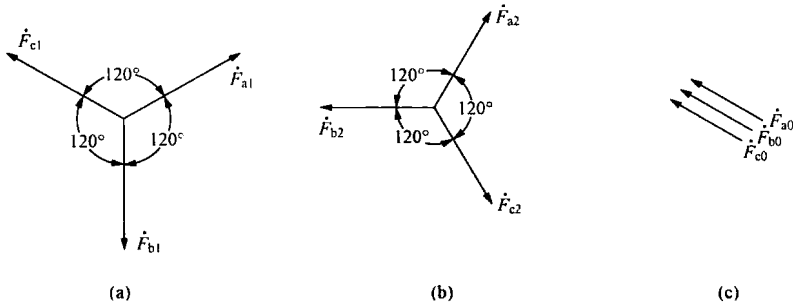


图 1-4 三相不对称相量所对应的三组对称分量

(a) 正序分量; (b) 负序分量; (c) 零序分量

正弦电动势作用于线性电路时, 所产生的电流也是正弦波。但是在实际运行中, 电压、电流的波形可能偏离正弦波 (称为畸变)。那么, 对于“畸变波”如何分析呢? 电工学中采用“傅里叶级数”对其进行分解, 分解的结果是由于波形中含有或叠加了谐波 (50Hz 的正弦波称为基波, 高于或低于 50Hz 的波形叫谐波。谐波中高于 50Hz 的波形为高次谐波, 低于 50Hz 的波形为低次谐波。奇数倍的为奇次谐波, 偶数倍的为偶次谐波, 分数倍的为分次谐波)。

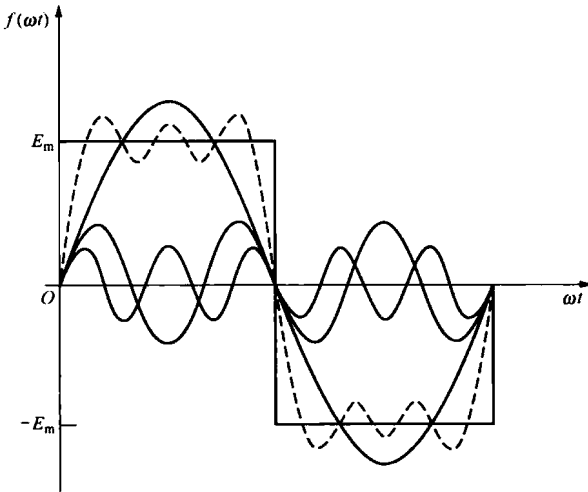


图 1-5 谐波合成示意图

从制造工艺上讲, 发电机发出的交流电不可能是绝对的正弦波, 但对波形影响不大。引起波形畸变的主要原因是系统中存在有大量的其他“谐波源”, 即存在有大量非线性阻抗特性的电子、电磁设备产生的谐波 (如晶闸管设备、变频调速装置、感应炉、电弧炉、电抗器、变压器、电视机、微波炉等都是谐波源), 引起系统波形畸变。图 1-5 所示为谐波合成示意图。

可见, 电力系统在运行中, 对其电压值、三相对称度、波形及频率的偏移应有严格的规定。

## 6. 联合电力系统的优越性

自 1891 年世界上出现第一个三相交流电力系统至今, 在 100 多年间, 电力系统发展所以如此之快, 是因为它具有明显的优越性。在电力工业发展初期, 发电厂都是建在电能用户的附近, 电厂、电网的规模也较小。随着高压输电技术的发展和整体效应的需求, 在地理上相隔一定距离的发电厂就逐步联系起来并列运行, 其规模越来越大, 开始是在一个地区之内, 后来发展到各地区之间互相联网, 形成庞大的联合电力系统。

电力系统并网运行在技术上和经济上有着十分明显的优越性, 主要有以下几个方面:

(1) 减少总备用容量的比重。电力系统在运行中难免有些发电机要发生故障, 有些发电机要停机检修。为了应付这种情况发生, 一般都是使装机容量稍大于最大负荷, 这部分容量

称为备用容量。电力系统容量越大，备用容量在总装机容量中占的百分比就越小。

(2) 可以采用高效率的大容量机组。大容量机组效率高，节省原材料，占地少，运行费用也少。但是，孤立运行的电厂或者总容量较小的电力系统，因为没有足够的备用容量，不允许采用大机组。否则，一旦机组因事故或因检修退出工作，将造成大规模停电，给国民经济带来巨大损失。大电力系统，特别是大型联合电力系统，拥有足够的备用容量，非常有利于采用高效率的大容量机组运行。

(3) 可充分利用各种能源资源。各种形式的电厂可相互配合，充分利用动力资源。如水电厂发电受到季节的影响，在夏、秋丰水期水量过剩，在冬、春枯水期水量短缺，将造成枯水期缺电，丰水期弃水的后果。组成大电力系统后，水、火电厂互补，可充分利用水能资源，减少煤炭消耗。不仅如此，水电厂进行增减负荷的调节比较简单，因而有水电厂的系统调频问题往往比较容易解决。目前我国仍是以水、火电厂为主干，其他形式的电厂做补充，核能发电是逐步发展。

(4) 减少总负荷的峰值。不同的地区由于生产、生活及时差、季差等各种条件的差异，它们的最大负荷出现的时间不同，如一个区域最大负荷出现在 17 时，另一个区域出现在 17 时半。两个区域联成系统后，最大负荷小于两个区域系统最大负荷之和，因而减少了所需的装机容量。

(5) 提高供电可靠性和运行质量（因为调节范围大）。电力系统中有大量的发电机、变压器和输电线路，这些设备运行中难免发生故障。因为系统中所有电厂同时发生事故的几率远较单一电厂事故的几率小得多，所以组成大电力系统后增加了对用户供电的可靠性，特别是增加了对重要用户供电的可靠性。同时由于系统调节范围大，负荷的变化不会影响  $U$ 、 $f$  的显著变化，更好地保证了运行质量。

(6) 提高运行的经济性。大系统可采用大容量机组，其本身效率是很高的，同时减少了备用容量，使得参与运行的每台发电机都可在接近于额定负荷下运行。因为发电机在额定负荷下运行，其效率才能充分发挥，而在低负荷下运行其效率是很低的。同时，可根据各发电厂的发电成本的高低，合理分配各机组的所担负负荷，实现更经济的运行（见后面经济运行章节）。

正是由于上述这些优点，世界上工业发达国家大多都建立起全国统一的电力系统。甚至相邻国家间的电力系统也有联络，组成所谓互联系统。我国也在加紧电力系统的发展工作，已形成东北、华北、华东、华中等区域性大型电网。

当然，电力系统并网运行，也出现一些新的技术问题，如系统稳定问题等，将在后面章节中专门讨论。

### 第三节 电力系统的负荷

#### 1. 负荷观念

组成电力系统的最终目的是应用电能。电力系统中接有为数众多、千差万别的用电设备，大致可分为异步电机、同步电机、各类电炉、整流设备、电子仪器、电灯等。它们分属于不同的工厂、企业、机关、居民等，即所谓电力系统用户。用户是电力系统服务的对象，电力系统运行得好坏，归根到底要视对用户供电的情况而定。表 1-1 为不同行业中各类用电设备

所占比例的统计。

所有用电设备在某个时刻从系统中取用的功率，称为**电力系统的负荷**。

表 1-1 不同行业中各类用电设备所占比例的统计（按功率计算）

%

行业类别 用电设备	综合性中小工业	棉纺工业	化学工业—化肥 厂、焦化厂	化学工业—电化厂	大型机械加工工业	钢铁工业
异步电动机	79.1	99.8	56.0	13.0	82.5	20.0
同步电动机	3.2		44.0		1.3	10.0
电热电炉	17.7	0.2			15.0	70.0
整流设备				87.0	1.2	
合计	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

用电负荷从物理性质上讲，包括有功负荷和无功负荷两种。有功负荷由耗能元件（电阻或电导）引起，消耗有功功率，它是真正转换为其他形式的能量而做了功的那部分功率，所以叫做有功功率  $P$  (W、kW、MW)；而无功负荷由储能元件（电感或电容）引起，消耗无功功率，它是系统中电磁元件用来建立电场、磁场所需用的那部分功率，因为没有参与做功，所以叫做无功功率  $Q$  (var、kvar、Mvar)，但它是电气设备或电力系统工作所必须的。 $P^2+Q^2=S^2$  ( $S$  为总功率或叫视在功率)，三者之间构成功率直角三角形，遵循“勾股定律”关系。运行中希望无功功率尽量少一些，也就是功率因数 ( $\cos \varphi=P/S$ ) 尽量高一些，系统综合功率因数一般在 0.85 左右。

从整个电力系统讲，各种用户纯消耗的总功率叫做综合负荷，加上网损功率叫供电负荷，再加上发电厂自身消耗功率（厂用电）后的总和叫发电负荷。

然而，用户用电设备的启动或停止对电力系统而言完全是随机的，在整个过程中如何保持功率平衡将在后面章节中专门讨论。

## 2. 负荷曲线

负荷的变化虽然带有随机性，但却能显示出某种程度的规律性，这一规律性通过负荷曲线的描述可以看得比较清楚。所谓负荷曲线就是指在某一段时间内用电负荷随时间变化的曲线图。它反映了某一时段内负荷随时间而变化的规律。我们研究负荷曲线，就是要掌握负荷的变化情况。

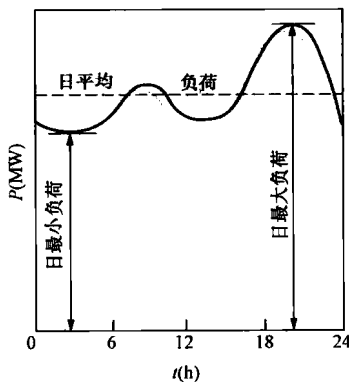


图 1-6 有功日负荷曲线

对应着有功负荷和无功负荷，负荷曲线也分成有功负荷曲线和无功负荷曲线。每类负荷曲线按时段划分还可分为日负荷曲线、年负荷曲线，按描述的负荷范围还可分为用户负荷曲线、地区负荷曲线以及电力系统负荷曲线。实际的负荷曲线是一条不间断的连续曲线，如图 1-6 所示。

但是我们在具体绘制负荷曲线时，由于只能得到离散时间的实测（或估计）值，所以一般采用折线法或阶梯法进行描绘。图 1-7 及图 1-8 表示出了用这两种方法绘成的日有功负荷曲线。其横坐标以小时为单位，长度为 24h，表示一天之内有功负荷的变化状况。日有功负荷曲线应用是最为广泛的，故常把它直称为负荷曲线。负荷曲线的最高点代表日最大负

荷（高峰负荷），一般出现在 9~11 时或 19~22 时，称为早高峰或晚高峰；负荷曲线的最低点代表日最小负荷（低谷负荷），一般出现在夜间。两点之差为峰谷差，是电力系统运行中必须掌握的重要数据。各行业最大负荷相加后，应乘以小于 1.0 的“同时系数”，方为系统的最大综合用电负荷。

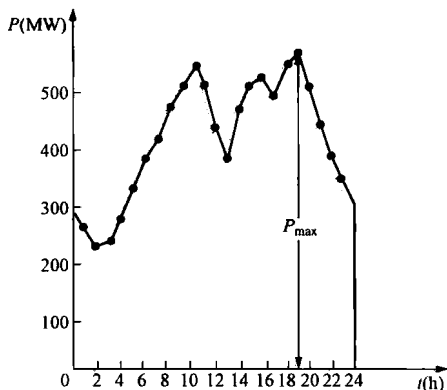


图 1-7 有功日负荷曲线（折线法）

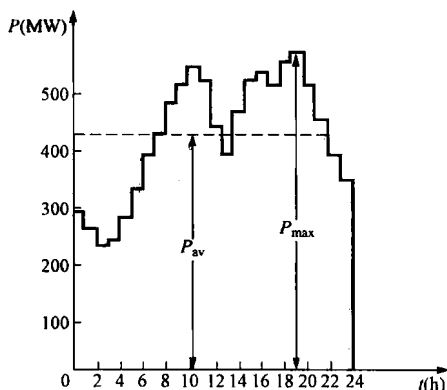


图 1-8 有功日负荷曲线（阶梯法）

和有功负荷相似，无功负荷也在一天中不断变化，但变化相对平缓（见图 1-9），因为像电动机和变压器这类设备，其励磁所需的无功功率仅与电压有关，并不随有功功率变化。且有功和无功最大负荷不一定同时出现。这一点在分析系统无功功率平衡时十分重要。

根据负荷曲线可以计算系统中用户的日用电量，也就是该负荷曲线所包围的面积。计算时就是功率  $P$  对时间  $t$  的积分（非均匀变化的求和），如

$$W = \int_0^{24} p dt \quad (1-1)$$

进而可以求出一日平均负荷

$$P_{av} = W/24 = 1/24 \int_0^{24} p dt \quad (1-2)$$

为了反映负荷曲线的起伏情况，引入一个负荷率的概念，它是一定时期（日、月、年）内平均负荷与最大负荷的比值

$$K_p = P_{av}/P_{max} \quad (1-3)$$

负荷率  $K_p$  值较小，表明负荷曲线起伏较大，发电机的利用率较差。

日负荷曲线对电力系统运行有很重要的意义，它是掌握电力系统运行状况，安排日发电计划，确定各发电厂发电任务以及确定系统运行方式等的重要依据。

日负荷曲线随着时间延伸到 8760h，就构成年负荷曲线。一年中负荷的季节变化也比较明显，一般是年初负荷较小，年末负荷较大，夏季负荷小于冬季负荷。另外，把每天的最大负荷抽取出来按年绘成曲线，称为年最大负荷曲线，如图 1-10 所示。图中可见，系统总装机容量应大于系统最大负荷，并留有一定的备用容量，检修机组应安排在负荷最小的时间。这种负荷曲线主要用来掌握全年情况、了解负荷走向、指导制订发电设备检修计划和制订新建扩建电厂计划等。

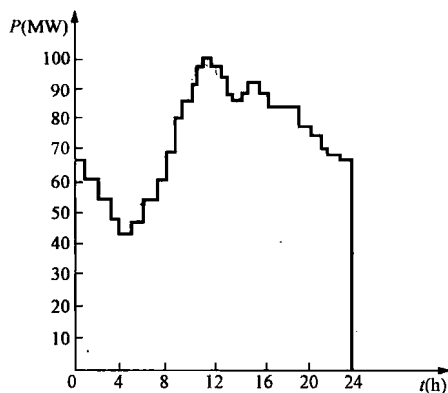


图 1-9 无功日负荷曲线

在电力系统的运行分析中，还经常用到年持续负荷曲线，如图 1-11 所示，它不是负荷随时间延伸的函数曲线，而是把一年内每个小时的负荷按其大小为先后排列而成。图中可以清楚地看到每级负荷的利用时间或每个时间段对应的负荷。它主要用于具体分析，安排年发电计划及可靠性估计。按此曲线也可求出全年的电能消耗量为〔每级负荷  $P_n$  乘以利用时间  $t_n$  为对应时间电量  $W_n$ ，而后累加得全年电量  $W$ （即虚线所包围的面积）与年负荷曲线包围的面积是相等的〕

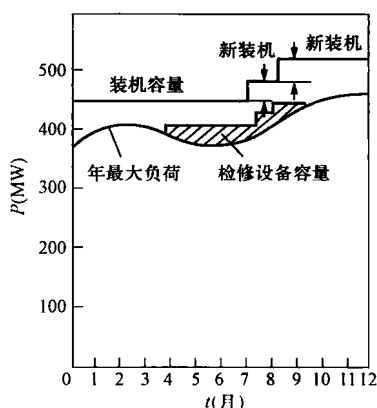


图 1-10 有功功率年最大负荷曲线

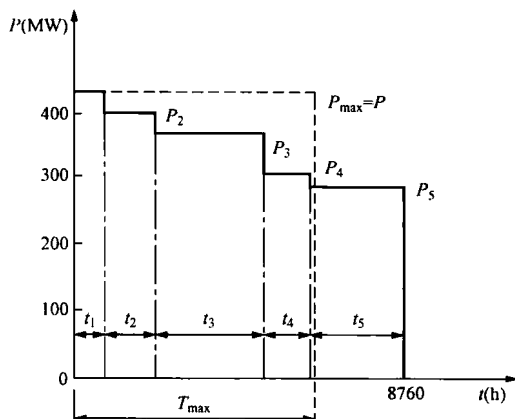


图 1-11 年持续负荷曲线

$$W = \sum_{i=1}^n p_i t_i = \int_0^{8760} p dt \quad (1-4)$$

其中  $i$  为由大至小出现的不同负荷的序号。

**最大负荷利用时间：**它是在年持续负荷曲线中，以最大负荷连续运行  $t$  小时，当它所消耗的电正好与年持续负荷曲线的实际消耗电量相等时，则该时间  $t$  即称为最大负荷利用时间，记作  $T_{\max}$ （见图 1-11）。最大负荷利用时间的意义也可用计算式表示为

$$T_{\max} = W/P_{\max} = \sum p_i t_i / P_{\max} = \int_0^{8760} p dt / P_{\max} \quad (1-5)$$

最大负荷利用时间的长短，在一定程度上反映了实际负荷在一年内的变化程度。如果负荷曲线比较平坦，则最大负荷利用时间的值较大。如果负荷变化剧烈，则该值就较小。另一方面也可以用它来衡量电气设备的利用情况，因为一般电气设备是按最大负荷考虑的，最大负荷利用时间长说明该设备利用得比较充分，反之说明它的利用率就较低。

不同性质的用户，不同的生产班次，最大负荷利用时间不同。根据运行经验统计出的不同类用户不同班次的最大负荷利用时间都有一个大致的范围，如表 1-2 所示。若已知某一类用户的最大负荷，可以从表上查出相应的最大负荷利用时间，从而求出该类用户全年用电量的近似值。

表 1-2

各类负荷的最大负荷利用时间  $T_{\max}$ 

负荷类型	$T_{\max}$ (h)	负荷类型	$T_{\max}$ (h)
户内照明及生活用电	2000~3000	三班制企业用电	6000~7000
单班制企业用电	1500~2200	农业用电	1000~1500
两班制企业用电	3000~4500		



电力系统的负荷管理是一项复杂而重要的工作，因为负荷变化总体是随机而不规则的，但可以进行分解，掌握一些规律。分析和掌握负荷情况，是系统运行的基础。所以在运行中要实测编制负荷曲线，还要进行负荷  $P_3$  预测工作（其方法见本节后面）。其中有功负荷曲线的用途较多，而对于无功功率多是编制平衡表或各枢纽点的电压曲线（一般隔一段时间制作一次）。对无功功率的管理之所以与有功功率不同，原因在于两者本身性质的不同。总之，要掌握负荷情况及变化规律，为有功功率及频率调整、无功功率及电压调整以及对用户的调荷措施提供依据，即合理分配各发电厂的负荷、鼓励用户削峰填谷，尽量使负荷曲线平缓，是系统稳定、经济运行的基础。

### 3. 根据用户对供电可靠性要求的不同将负荷用户分类

第一类负荷：对供电可靠性要求最高，供电中断将可能造成人身危害、设备损坏、产品报废、生产秩序长期不能恢复、市政生活混乱等。

第二类负荷：该类负荷供电中断将造成大量减产，人民生活受到影响等。

第三类负荷：不属于一、二类负荷的就是三类负荷，如工厂的附属车间、小城镇及农村公用负荷等。

电力管理部门要根据不同类型的负荷用户，采取相应措施。首先要保证重要用户的供电可靠性。

### \*4. 负荷预测

电力负荷预测是指在正确的理论指导下，在调查并掌握大量翔实资料的基础上，运用可行的方法和手段对电力负荷的发展趋势做出科学合理的推断。它是电力规划工作的重要组成部分和基础，同时也是运行调度的依据。它影响到电网运行的安全可靠、优质和经济运行以及电力工业的发展水平。因此，电力负荷预测是一项十分重要的工作。

(1) 电力负荷预测的内容有：

1) 最大有功负荷及其分布。最大有功负荷的大小是确定电力系统装机容量的基础数据，是电源规划的依据。有功负荷的分布是输电线路、变电站、配电网规划设计的主要依据。

2) 无功负荷及其分布。无功负荷的大小及分布是确定电力系统无功电源规划的基础，也是影响电力系统安全经济运行的重要因素。

3) 需电量。它是进行能源供需平衡的主要依据。

4) 电力负荷曲线及其特征值。它是确定电力系统中电源结构、调峰容量需求、运行方式及能源平衡的主要依据。

(2) 电力负荷预测的方法：为了做好负荷预测工作，必须对系统负荷的现状和历史统计资料进行调查，搜集研究规划期各行业用户的发展资料及发展规律。此外，尚需对电力负荷水平与反映经济和社会情况的变量影响进行分析，这些变量包括人口、经济形势、经济政策、经济指数、市场情况、物价因素、电价因素、家电使用、燃料供应及其价格、气象条件等。

近年来已普遍采用科学的统计分析方法进行负荷预测，常用的方法有下列几种：

1) 弹性系数法。电力弹性系数  $K$  是指用电负荷年均增长率  $K_1$  与国民经济平均增长率  $K_K$  之比，即  $K=K_1/K_K$ 。电力弹性系数受多方面因素影响。根据弹性系数与国民经济平均增长率  $K_K$  即可预测规划期末所需的电量，即

$$W_t = W_0 (1 + K K_K)^t \quad (1-6)$$