

高等学校教材

电力系统稳态分析

南京工学院 陈珩 编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书系高等学校“电力系统及其自动化”专业的专业课教材。

全书分三部分(六章)，分别讨论电力系统的基本知识(第一、二章)；电力系统的潮流计算(第三、四章)；电力系统的运行和调节(第五、六章)。取材方面，除力求弄清基本概念、基本理论外，也注意介绍国内外先进科学技术和本学科的发展方向，除仔细阐明借助电子计算机计算电力系统的原理外，也注意保留必要的手算方法，并注意用较多例题以比较它们的异同；除侧重于进行运行状态的分析外，还适当涉及某些与规划设计有关的问题。

本书供高等学校电力类有关专业师生使用，也可供从事电力系统运行、设计、科研的工程技术人员参考。

高等学校教材

电力系统稳态分析

南京工学院 陈 珩 编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 16.75印张 380千字

1985年5月第一版 1985年5月北京第一次印刷

印数00001—12500册 定价3.45元

书号 15143·5673

前 言

本书是根据1982年9月高等学校电力工程类专业教材编审委员会电力系统教材编审小组会议上审定的同名教学大纲以及同年12月电力系统教材编审小组扩大会议上制订的相应教材编写大纲编写的。仅需作以下几点说明：

教学大纲中规定“交流远距离输电的概念”和“直流输电的概念”为必修内容。但编写实践中发现，对初学者，这两部分似嫌过深，又因篇幅有限，将其删去。

教学大纲中虽未包括“支路追加法”，但教材编审小组扩大会议上多数与会者主张以小字纳入，编者接受了会议意见。

教学大纲中虽未包括“无功功率的最优补偿”，但编写过程中深感化少量篇幅予以讨论将是有益的，书中以小字对此问题作了简介。

本书初稿完成后，蒙上海交通大学黄家裕仔细审阅，并提出了不少宝贵意见和建议，得益匪浅，谨致谢忱。但因编者水平有限，书中错误和不妥之处仍在所难免，尚希广大读者不吝指正。

编 者

1984年3月

目 录

前言

第一章 电力系统的基本概念	1
1-1 电力系统概述	1
1-1-1 电力系统	1
1-1-2 电力系统发展简史	2
1-1-3 对电力系统运行的基本要求	3
1-1-4 电力系统的负荷	4
1-1-5 电力系统分析课程的主要内容	7
1-1-6 电力系统研究工具简介	8
1-2 电力系统的结线方式和电压等级	9
1-2-1 电力系统的结线方式	9
1-2-2 电力系统的电压等级	11
1-2-3 电力系统中性点的运行方式	12
1-3 电力线路的结构	14
1-3-1 架空线路的导线和避雷线	14
1-3-2 架空线路的杆塔	15
1-3-3 架空线路的绝缘子和金具	18
1-3-4 电缆线路	21
小结	23
第二章 电力网络各元件的参数和等值电路	24
2-1 电力线路的参数	24
2-1-1 铝线、钢芯铝线和铜线线路的电阻	24
2-1-2 铝线、钢芯铝线和铜线线路的电抗	24
2-1-3 钢导线线路的电阻和电抗	30
2-1-4 各类导线线路的电纳	31
2-1-5 各类导线线路的电导	36
2-2 电力线路的等值电路	41
2-2-1 一般线路的等值电路	41
2-2-2 长线路的等值电路	43
2-3 变压器的参数和等值电路	49
2-3-1 双绕组变压器的参数和等值电路	49
2-3-2 三绕组变压器的参数和等值电路	51
2-3-3 自耦变压器的参数和等值电路	53
2-4 电力网络的等值电路	55
2-4-1 多电压级网络中参数和变量的归算	55
2-4-2 标么制	58

2-4-3 电力网络的等值电路	62
小结	63
第三章 简单电力系统的分析和计算	63
3-1 电力线路和变压器中的电压降落和功率损耗	65
3-1-1 电力线路上的电压降落和功率损耗	65
3-1-2 电力线路上的电能损耗	69
3-1-3 电力线路的运行特性	71
3-1-4 变压器中的电压降落、功率损耗和电能损耗	75
3-2 辐射形和环形网络的潮流分布	77
3-2-1 辐射形网络中的潮流分布	77
3-2-2 环式网络中的功率分布	85
3-2-3 两端供电网络中的功率分布	88
3-2-4 环形网络中的电压降落和功率损耗	89
3-2-5 环形网络中功率的强制分布	89
3-3 电力网络的简化	98
3-3-1 等值电源法	98
3-3-2 负荷移置法	106
3-3-3 星-网互换法	102
3-4 电力线路导线截面积的选择	112
3-4-1 按经济电流密度选择导线截面积	112
3-4-2 按允许载流量、电晕和机械强度校验导线截面积	114
3-4-3 按电压损耗选择导线截面积	116
小结	119
第四章 复杂电力系统的潮流计算	120
4-1 电力网络的数学模型	120
4-1-1 节点电压方程	120
4-1-2 回路电流方程	123
4-1-3 多电压级网络和变压器模型	124
4-1-4 节点导纳矩阵的形成和修改	132
4-1-5 节点阻抗矩阵的形成和修改——支路追加法	135
4-2 功率方程和高斯-塞德尔法潮流计算	140
4-2-1 功率方程和变量、节点的分类	140
4-2-2 高斯-塞德尔法潮流计算	144
4-3 牛顿-拉夫逊法潮流计算	148
4-3-1 牛顿-拉夫逊法简介	149
4-3-2 潮流计算时的修正方程式	150
4-3-3 潮流计算的基本步骤	155
4-4 P-Q分解法潮流计算	163
4-4-1 潮流计算时的修正方程式	163
4-4-2 潮流计算的基本步骤	166

小结	170
第五章 电力系统的有功功率和频率调整	173
5-1 电力系统中有功功率的平衡	173
5-1-1 有功功率负荷的变动及其调整	173
5-1-2 有功功率负荷曲线的预计	174
5-1-3 有功功率电源和备用容量	175
5-2 电力系统中有功功率的最优分配	176
5-2-1 各类发电厂的运行特点和合理组合	176
5-2-2 最优分配负荷时的目标函数和约束条件	179
5-2-3 最优分配负荷时的等耗量微增率准则	182
5-2-4 等耗量微增率准则的推广运用	187
5-2-5 网络损耗的修正	192
5-3 电力系统的频率调整	201
5-3-1 调整频率的必要性	201
5-3-2 自动调速系统及其调节特性	201
5-3-3 频率的一次调整	204
5-3-4 频率的二次调整	208
5-3-5 频率调整厂的选择	213
小结	215
第六章 电力系统的无功功率和电压调整	216
6-1 电力系统中无功功率的平衡	216
6-1-1 无功功率负荷和无功功率损耗	216
6-1-2 无功功率电源	217
6-1-3 无功功率的平衡	220
6-2 电力系统中无功功率的最优分布	223
6-2-1 无功功率电源的最优分布	223
6-2-2 无功功率负荷的最优补偿	228
6-3 电力系统的电压调整——电压管理和借发电机、变压器调压	231
6-3-1 调整电压的必要性	231
6-3-2 电压波动和电压管理	233
6-3-3 借改变发电机端电压调压	236
6-3-4 借改变变压器变比调压	237
6-4 电力系统的电压调整——借补偿设备调压和组合调压	240
6-4-1 借并联补偿设备调压	240
6-4-2 借串联补偿电容器调压	245
6-4-3 几种调压措施的比较	248
6-4-4 几种调压措施的组合——组合调压	249
小结	259
参考书目	261

第一章 电力系统的基本概念

本章阐述电力系统的基本概念和电力线路的结构两个问题。

1-1 电力系统概述

1-1-1 电力系统

在发电机中机械能转化为电能。变压器、电力线路输送、分配电能。电动机、电炉、电灯等用电设备消费电能。在这些用电设备中，电能转化为机械能、热能、光能，等等。这些生产、输送、分配、消费电能的发电机、变压器、电力线路、各种用电设备联系在一起组成的统一整体就是电力系统，如图1-1所示。

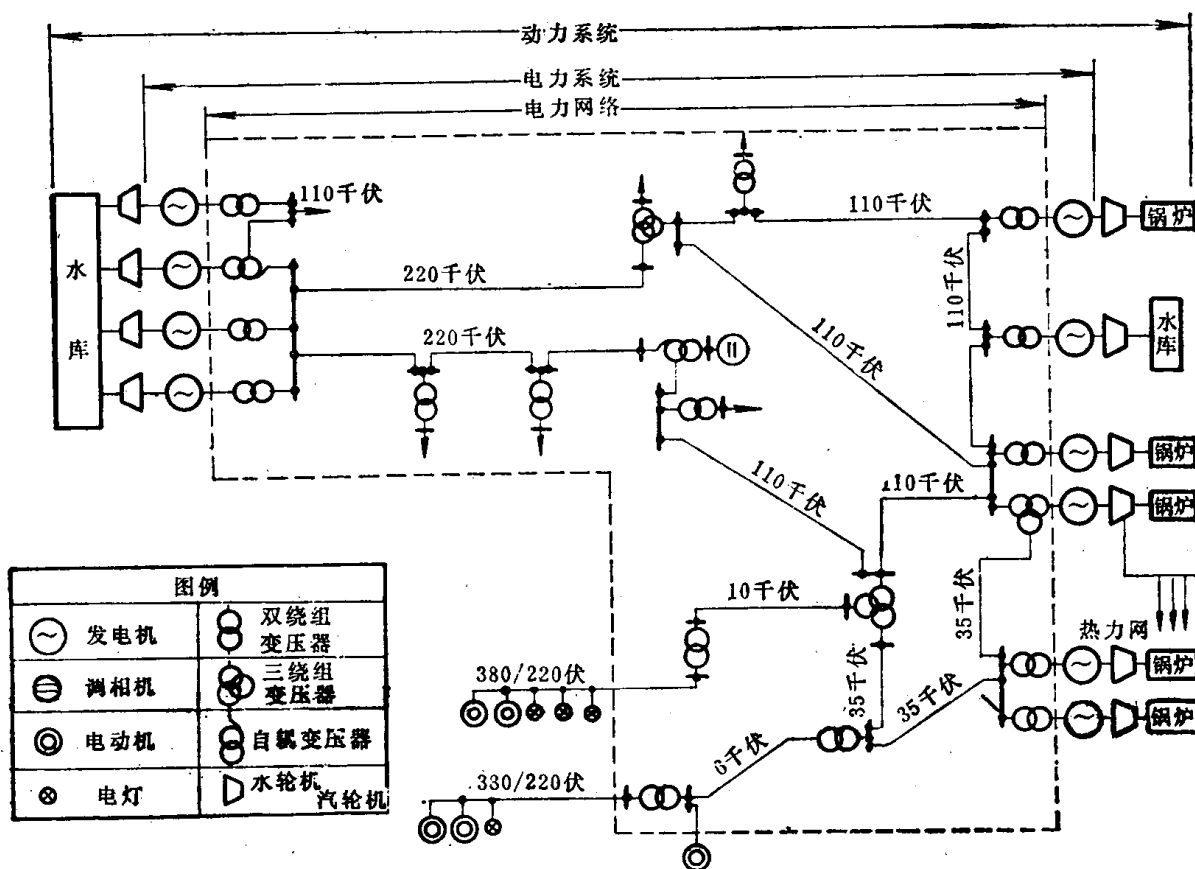


图 1-1 动力系统、电力系统、电力网络示意图

与电力系统相关联还有“电力网络”和“动力系统”。前者指电力系统中除发电机和用电设备外的一部分；后者指电力系统和“动力部分”的总和。所谓“动力部分”，包括热力发电厂的锅炉、汽轮机、热力网和用热设备，水力发电厂的水库、水轮机以及原子能

发电厂的反应堆，等等。所以，电力网络是电力系统的一个组成部分，而电力系统又是动力系统的一个组成部分。这三者的关系也示于图1-1。

1-1-2 电力系统发展简史

1831年法拉第发现电磁感应定律。在此基础上，很快出现了原始的交流发电机、直流发电机和直流电动机。由于当时发电机发出的电能只用于电化工业和电弧灯，而电动机所需电能又来自蓄电池，电机制造和电力输送技术的发展最初集中于直流电。原始的电力线路使用的就是100~400伏低压直流电。由于输电电压低，输送的功率不可能大，输送的距离也不可能远。

第一次高压输电出现于1882年。法国人德普勒将水电厂发出的电输送到57公里外的慕尼黑，并用以驱动水泵。当时他采用的电压是直流1500~2000伏，输送功率约2千瓦。这个输电系统虽很小，却可认为是世界上第一个电力系统，因它具备了电力系统的各个重要组成部分。

生产的发展对输送功率和输送距离提出了进一步要求，以致直流输电已不能适应。于是，1885年在制成变压器的基础上实现了单相交流输电。1891年在制成三相异步电动机、三相变压器的基础上又实现了三相交流输电。

1891年在法兰克福举行的国际电工技术展览会上，俄国人多里沃—多勃列沃列斯基展出的输电系统奠定了近代输电技术的基础。这系统从拉芬镇到法兰克福全长175公里。设在拉芬镇的水轮发电机组功率为230千伏安，电压为95伏，转速为150转/分。升压变压器将电压升高到15200伏。电功率经直径为4毫米的铜线输送至法兰克福。在法兰克福，用两台降压变压器将电压降低到112伏。其中，一台变压器供电给白炽灯，另一台供电给异步电动机，电动机又驱动一台功率为75千瓦的水泵。显然，这已是近代电力系统的雏形。这系统的建成标志了电力系统的发展取得了重大突破。

三相交流制的优越性很快显示出来。运用三相交流制的发电厂迅速发展，直流制很快被淘汰。汽轮发电机组不久便代替了以蒸汽机为原动机的发电机组。发电厂之间出现了并列运行。输电功率、输电电压、输电距离日益增大。大电力系统不断涌现。数十年间，在一些国家中甚至出现了全国性和国际性电力系统。

目前，世界上最高线路电压已超过1000千伏，并继续向更高电压发展；最远输送距离已超过1000公里；最大电力系统的容量已超过20000万千瓦。发电能源的比例也发生了很大变化。除原有的火力发电和水力发电外，出现了原子能发电，且比重愈来愈大。此外，还有地热发电、风力发电、潮汐发电，等等。电力系统的自动化程度愈来愈高，已出现用电子计算机控制的电力系统。这些计算机具有监视、控制电力系统运行的功能。还应指出，为彻底解决同步发电机并列运行的稳定性等问题，又重新采用直流输电。而目前的直流输电距离已超过1000公里，电压已超过±500千伏，输送功率已超过150万千瓦，和一百年前德普勒的试验相比，已有霄壤之别。

在我国，自1882年在上海建立第一个发电厂至1949年六十余年间，电力工业的发展非常缓慢。1949年建国之初，发电设备总容量仅185万千瓦，年发电量仅43亿度。仅东北地区有两个电力系统，总容量为72万千瓦。

建国后，1957年底，第一个五年计划完成时，发电设备总容量增加为464万千瓦；1962年底，第二个五年计划完成时，为1300万千瓦；至1980年底，发电设备总容量为6050万千瓦，占世界第八位；年发电量则为3006亿度，占世界第六位。

建国以来，电力系统的发展也很迅速。至1982年底，发电设备容量超过100万千瓦的电力系统已达13个，其中包括六个跨省电力系统。它们分别是：华东、华北、东北、西南、西北、华中电力系统；不久，还将出现华南电力系统。随着电力系统的发展，输电线路的电压等级也逐渐提高。目前，已运行的输电线路电压已达500千伏。

随着我国国民经济的发展预计不仅上述七个大电力系统将继续发展，而且还将逐步建立或加强它们之间的联系，形成联合电力系统，甚至全国性统一电力系统。

1-1-3 对电力系统运行的基本要求

电能的生产、输送、分配、消费和其它工业的区别在于：

1. 与国民经济各部门的关系都很密切

由于电能与其它能量之间转换方便，宜于大量生产、集中管理、远距输送、自动控制，使用电能较其它能量有显著优点，各部门都广泛使用电能。电能供应的中断或减少将影响国民经济的各个部门。

2. 过渡过程非常短促

发电机、变压器、电力线路、电动机等元件的投入或退出都在一瞬间完成。电能从一处输送至另一处所需的时间仅千分之几甚至百万分之几秒。电力系统从一种运行方式过渡到另一种运行方式的过渡过程非常短促。

3. 电能不能大量储存

电能的生产、输送、分配、消费实际上是同时进行的，即发电厂任何时刻生产的电能必须等于该时刻用电设备消费与输送、分配中损耗电能之和。

根据这些特点，对电力系统运行的基本要求是：

1. 保证可靠地持续供电

供电的中断将使生产停顿、生活混乱，甚至危及人身和设备安全，形成十分严重的后果。停电给国民经济造成的损失远超过电力系统本身的损失。因此，电力系统运行首先要满足可靠、持续地供电的要求。

电力系统中的事故将造成计划外的供电中断。形成事故的原因很多，某电力系统的统计资料表明，稳定性破坏事故的直接原因中，设备质量差引起的占32%；自然灾害引起的占16.6%；继电保护误动作引起的占13.2%；人员过失引起的占17%；运行管理水平低引起的占21.2%。因此，减少这种系统性事故也应从多方面着手。防止设备事故的对策在于严密监视设备的运行，及时、认真地维修，防患于未然。为不致产生人为事故则要求运行人员不断提高技术水平，严肃认真工作，而在个别元件发生事故时，能迅速、正确地处理事故。此外，完善电力系统的结构，提高其抗扰动能力；采用电子计算机监视、控制电力系统的运行等都是重要的技术措施。

虽然保证可靠供电是对电力系统运行的首要要求，但并非所有负荷都绝对不能停电。一般，可根据经验，按对供电可靠性的要求将负荷分为三级：

第一级负荷 对这一级负荷中断供电将造成人身事故、设备损坏，将产生废品，使生产秩序长期不能恢复，人民生活发生混乱等；

第二级负荷 对这一级负荷中断供电将造成大量减产，将使人民生活受到影响等；

第三级负荷 所有不属于第一、二级的负荷，如工厂的附属车间、小城镇等；

此外，还有为数极少或持续时间很短的特殊重要负荷要求绝对可靠地不间断供电。

对第一级负荷要保证不间断供电；对第二级负荷，如有可能，也要保证不间断供电。

长期以来，对供电可靠性的分析就是上述以经验为基础的定性分析，只是近年来才开展以概率统计为基础的定量分析的研究。目前，这种研究正在继续深入，但部分成果已能用于生产。

2. 保证良好的电能质量

良好的电能质量指电压正常，偏移不超过给定值，例如，额定值的 $\pm 5\%$ ；频率正常，偏移不超过给定值，例如， $\pm 0.2\sim 0.5$ 赫。电压或频率偏移过大时，同样会引起大量减产、产生废品。严重时，同样会造成人身事故、设备损坏。

过去一段时间，我国某些电力系统中，由于电力供应不足，曾出现过电压和频率长期偏低的情况，给生产和发电设备本身都带来了危害，应引以为戒。而为了杜绝这种情况的再现，除大力增加新发电设备外，还必须继续挖掘潜力，使现有设备充分发挥作用，合理调配用电，节约用电。

在电力供应充足的系统中，电能质量的低劣往往是调度管理不当、运行调整不及时造成的。因此，除提高自动化程度外，加强运行人员工作的责任心，提高他们的技术水平也非常重要。

3. 保证系统运行的经济性

电能生产的规模很大，消耗的一次能源在国民经济一次能源总消耗中占的比重很大。而且电能输送、分配时的损耗，绝对值相当可观。因此，降低每生产一度电所消耗的能源和降低输送、分配时的损耗有极重要的意义。为此，应开展电力系统经济运行工作，使各发电厂所承担的负荷能合理分配。例如，使水力发电厂能充分利用水能，避免弃水；火力发电厂中经济性能好的多发电，差的少发电；避免频繁地开停机组；使功率在系统中合理分布以降低输送、分配时的损耗，等等。

应该指出，以上这些要求是互相关联的，而且往往是互相矛盾、互相制约的。因此，在考虑满足任何一项要求时，必须兼顾其它。

根据以上基本要求，最好将单一系统联合，组成联合电力系统。这可大大提高供电的可靠性，减少为防止设备事故引起供电中断而设置的备用容量。它可更合理地调配用电、降低联合系统的最大负荷、提高发电设备的利用率、减少联合系统中发电设备的总容量。同时，由于个别负荷在系统总负荷中所占比重的减小，其波动对系统电能质量的影响也将减小。它还可更合理地利用系统中各种类型的发电厂，从而提高运行的经济性。联合电力系统容量很大，个别机组的开停，甚至故障，对系统的影响将减小，从而可采用大容量、高效率的机组。但是，也应指出，为使个别系统联合，通常需增加一定的投资。

1-1-4 电力系统的负荷

1. 电力系统负荷的构成

电力系统的总负荷就是系统中千万个用电设备消费功率的总和。它们大致分异步电动机、同步电动机、电热电炉、整流设备、照明设备等若干类。不同行业中，这些用电设备占的比重也不同。表1-1所示是几种工业部门用电设备比重的统计。

表 1-1 几种工业部门用电设备比重的统计

类 型 比重(%)	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	

注 1. 比重按功率计。
2. 照明设备的比重很小未统计在内。

将各工业部门消费的功率与农业、交通运输业和市政生活消费的功率相加就可得所谓电力系统的综合用电负荷。综合用电负荷加网络中损耗的功率就是系统中各发电厂应供应的功率，因而称作电力系统的供电负荷。供电负荷再加各发电厂本身消费的功率——厂用电，就是系统中各发电机应发的功率，称作电力系统的发电负荷。

2. 负荷曲线

负荷曲线反映了某一时间段内负荷随时间而变化的情况。按负荷种类分，可有有功功率负荷和无功功率负荷曲线；按时间段长短分，可分日负荷和年负荷曲线；按计量地点分，可分个别用户、电力线路、变电所、发电厂乃至整个系统的负荷曲线。将上述三种特征相组合，就确定了某一种特定的负荷曲线，例如，电力系统的有功功率日负荷曲线。图1-2为某电力系统的有功功率日负荷曲线。

为掌握电力系统运行，这种有功功率日负荷曲线很有用，因它是制订各发电厂发电负荷计划的依据。不同行业的有功功率日负荷曲线差别很大。三班制连续生产的重工业负荷，如图1-3(a)所示的钢铁工业负荷曲线很平坦，最小负荷达最大负荷的85%。一班制生产的轻工业负荷，如图1-3(b)所示的食品工业负荷曲线变化幅度较大，最小负荷仅达最大负荷的13~14%。农业负荷中，如图1-3(c)所示的农村加工负荷，每天用电仅12小时；但仅在夏季出现的农业排灌负荷，却有相当平坦的日负荷曲线。市政生活负荷曲线如图1-3(d)，其特点是有明显的照明用电高峰。

尽管不少行业的负荷曲线有较大变化幅度，系统的负荷曲线却依旧相当平坦，因不同

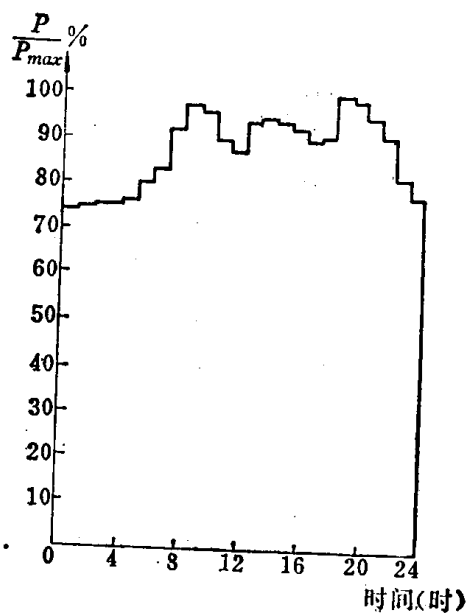


图 1-2 电力系统有功功率日负荷曲线（春季）

行业负荷曲线的高峰不可能都在同一时刻出现。换言之，系统负荷曲线上的最大值恒小于各行业负荷曲线上最大值之和。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。

无功功率日负荷曲线的用途较小。某电力系统的无功功率日负荷曲线如图1-4(b)。对照图1-4(a)、(b)可见，无功功率与有功功率最大负荷不一定同时出现。这一点在作系统的无功功率平衡时十分重要。

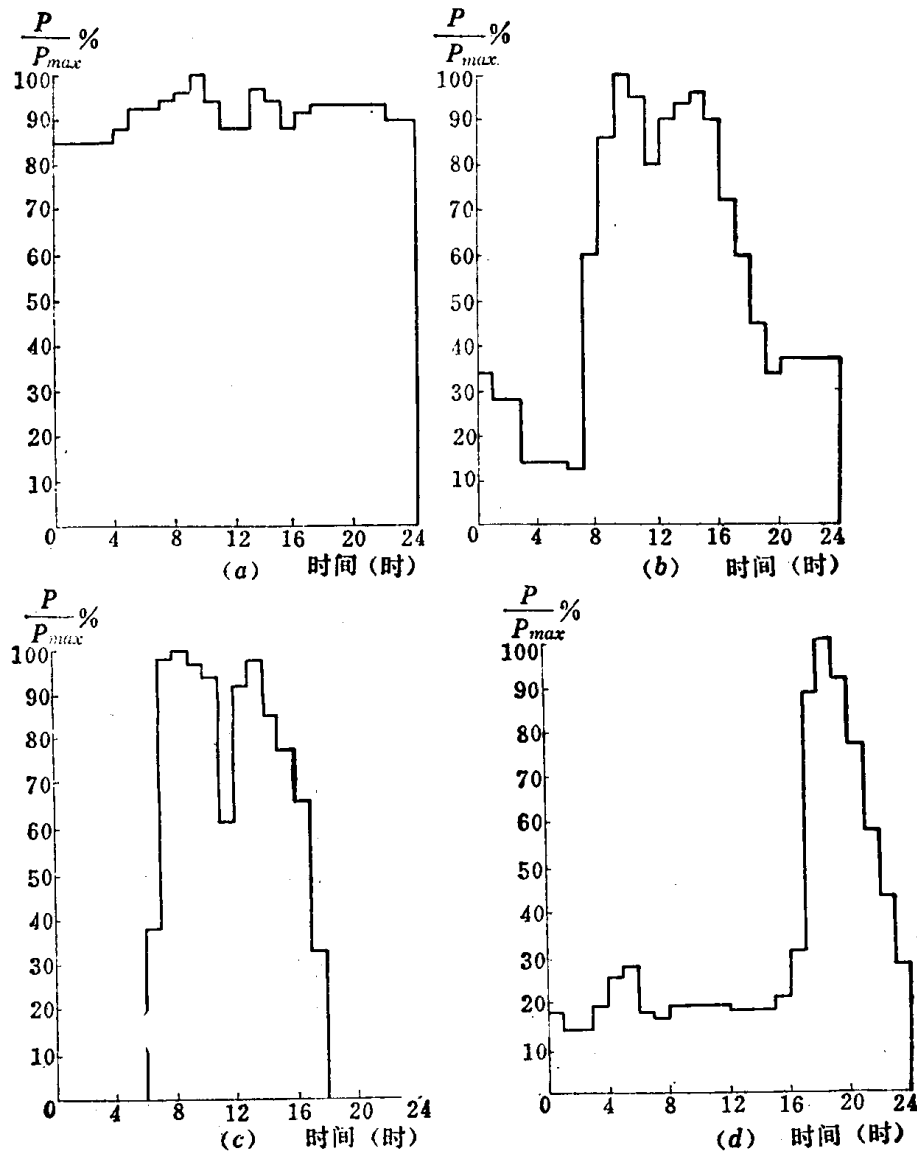


图 1-3 几种行业的有功功率日负荷曲线(冬季)
(a)钢铁工业负荷; (b)食品工业负荷; (c)农村加工负荷; (d)市政生活负荷

有功功率年负荷曲线一般指年最大负荷曲线，即表示一年内每月最大有功功率负荷变化的曲线。在农业排灌等季节性负荷所占比重不大的系统中，如不计因新用户接入而引起的负荷增长，它大体上如余弦曲线——图1-5中曲线1。假设因新用户接入而引起的负荷增长随时间按比例增加——图1-5中直线2，则年最大负荷曲线将如图中曲线3。这曲线常用于制订发电设备的检修计划。

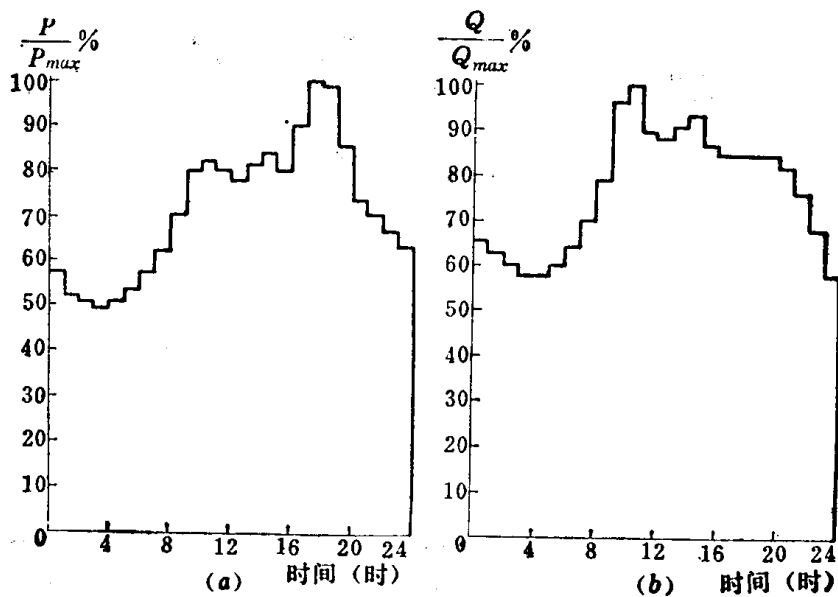


图 1-4 电力系统的日负荷曲线
(a)有功功率负荷, (b)无功功率负荷

3. 负荷特性

负荷特性指负荷功率随负荷端电压或系统频率变化而变化的规律, 因而有电压特性和频率特性之分。它们又都可进一步分静态特性和动态特性两类。前者指电压或频率变化后进入稳态时负荷功率与电压或频率的关系; 后者则指电压或频率急剧变化过程中负荷功率与电压或频率的关系。显然, 由于负荷有功功率和无功功率的变化规律不同, 负荷特性还应分有功功率特性和无功功率特性两种。将上述三种特征相结合, 就确定了某一种特定的负荷特性, 例如, 无功功率静态电压特性、有功功率静态频率特性。图 1-6 为某工业城市负荷的静态电压特性和静态频率特性。这些特性也还可用电压或频率的多项式表示。

1-1-5 电力系统分析课程的主要内容

电力系统分析课程是“电力系统及其自动化”专业的主要专业课程, 在教学计划中起承上启下的作用。它可分为两部分, 即电力系统稳态分析和电力系统暂态分析。

所谓电力系统的稳态, 系指电力系统正常的、相对静止的运行状态。而电力系统的暂态则指电力系统从一种运行状态向另一种运行状态过渡的过程。虽然, 严格说, 电力系统无时无刻不处在过渡过程中, 但为了便于分析问题, 作如上的划分还是可行的, 甚至是必要的。

电力系统稳态分析课程包括三个方面, 即电力系统的基本知识和等值网络; 电力系统正常运行状况的分析和计算; 电力系统有功功率-频率和无功功率-电压的

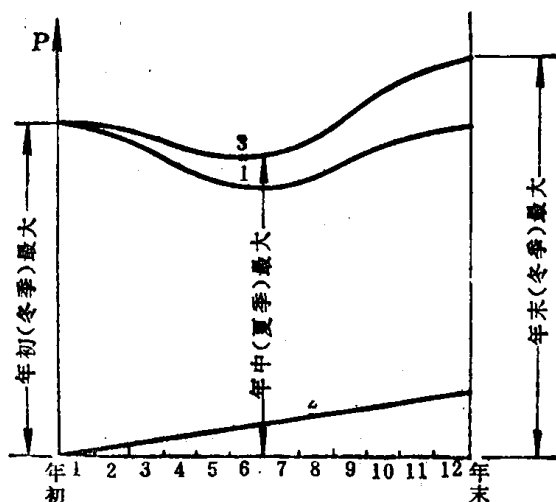


图 1-5 电力系统的有功功率年负荷曲线

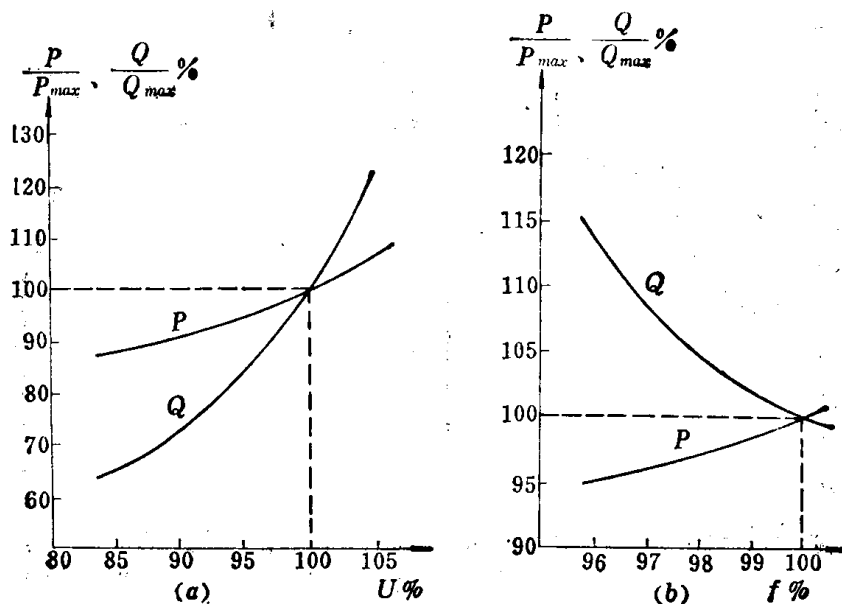


图 1-6 某工业城市负荷的静态特性
(a)静态电压特性; (b)静态频率特性

控制和调整。

电力系统的暂态过程可分为三类——波过程、电磁暂态过程、机电暂态过程。

波过程主要与运行操作或雷击时的过电压有关，涉及电流、电压波的传播。这类过程最短暂。这类过程属高电压技术课程讨论的范畴。

电磁暂态过程主要与短路和自励磁有关，涉及电流、电压，有时也涉及功率角 δ 随时间的变化。这类过程的持续时间较波过程长。机电暂态过程主要与系统振荡、稳定性的破坏、异步运行等有关，涉及功率、功率角、旋转电机的转速 ω 等随时间的变化。这类过程的持续时间最长。这两类过程是电力系统暂态分析课程讨论的内容。

需要指出，电力系统的这三类暂态过程有时是相互关联的。例如，雷击造成短路而导致系统稳定性破坏的全过程中，既包括了波过程，也包括了电磁暂态过程和机电暂态过程。

1-1-6 电力系统研究工具简介

由于电力系统及其暂态过程的复杂，研究电力系统时，常需借助一定的工具。这些研究工具大致分两类——电力系统的数学模拟和电力系统的物理模拟。

最简单的电力系统数学模拟是直流计算台。它是一种由直流电源和若干可变电阻组成的计算工具。借调整各电阻值来模拟系统各元件参数，并按给定的结线图将它们相互连结，再在各电源点施加直流电压，就可用表计测量模拟系统中的电流、电压分布。这种计算台主要用以计算系统中发生短路时的短路电流，但也可作近似的功率分布计算。

交流计算台的工作原理和直流计算台相似。只是交流计算台可分别以电阻和电抗模拟系统各元件，而且施加在各电源点的交流电压的相位也可调节。因此，交流计算台的用途远较直流计算台广。它可用以计算系统中的功率分布、短路电流以及系统的静态和暂态稳定性等。

通用模拟式电子计算机也可用以研究电力系统。按描述发电机、电动机、自动调节装

置等的方程式组将它的积分元件、加法元件、乘法元件等组合为系统各元件并组成整个电力系统的模拟后，就可运用示波器观测以电压表示的、连续变化的、表征系统运行状态的各个变量。因此，这种计算机适合于分析系统的暂态过程，尤其是有自动调节装置时的暂态过程。它的缺点是可供使用的元件数量有限，以致待研究的系统不能过于复杂。

通用数字式电子计算机已广泛用于电力系统的运行、设计和科学研究各个方面。自1956年成功地运用它计算功率分布以来，几乎所有主要的电力系统计算都已使用这种计算机。因此，本书有关章节中将介绍应用这种研究工具的计算方法。

上列四种研究工具一般都认为属数学模拟。它们的共同点是必须先明确系统及其各元件的数学表示方式方能运用它们进行计算分析。

除数学模拟外还有物理模拟。电力系统动态模拟就往往被认为属物理模拟，虽然它只是一种不完全的物理模拟。这种模拟可看作是一种具体而微的电力系统。其中，发电机、变压器、电动机等都用相应的实物模拟。将它们按给定的结线方式组成模拟系统后，就可运用表计或示波器直接观测其中出现的各种物理现象。因此，不仅系统各元件的数学表示式不明确时就可进行动态模拟试验，而且动态模拟的试验结果还可用以检验拟定的数学表示式是否正确。此外，在动态模拟上还可进行自动调节、控制装置的实物试验。这一功能也是各种数学模拟所不具备的。动态模拟的缺点也是待研究系统的规模不能过大，而且模拟装置的参数调整范围有一定的限制。

综上所述，各种研究工具都有其特点和适用范围。取长补短、互相配合才是正确的发展方向。正是沿这一方向，近年来又陆续出现了模拟计算机和数字计算机的组合、模拟计算机和交流计算台的组合以及数字计算机、模拟计算机和动态模拟的组合等新型研究工具。

1-2 电力系统的结线方式和电压等级

1-2-1 电力系统的结线方式

1. 电力系统的结线图

电力系统的结线图有两种：电力系统的电气结线图和电力系统的地理结线图。电力系统的电气结线图就如图1-1。在电气结线图上较详细地表示出电力系统各主要元件之间的电气联系，但不能反映各发电厂、变电所的相对地理位置。电力系统的地理结线图如图1-7。在地理结线图上，各发电厂、变电所的相对地理位置，乃至各条电力线路的路径都按一定比例有所反映，但各主要元件之间的电气联系却往往难以表示。因此，这两种结线图常配合使用。

2. 各种结线方式的特点

电力系统的结线方式大致可分无备用和有备用两类。无备用结线包括单回路放射式、干线式和链式网络，如图1-8所示。有备用结线包括双回路放射式、干线式、链式以及环式和两端供电网络，如图1-9所示。

无备用结线的主要优点在于简单、经济、运行方便，主要缺点是供电可靠性差。因

此，这种结线不适用于一级负荷占很大比重的场合。但一级负荷的比重不大，并可为这些负荷单独设置备用电源时，仍可采用这种结线。这种结线方式之所以适用于二级负荷是由于架空电力线路已广泛采用自动重合闸装置，而自动重合闸的成功率相当高。

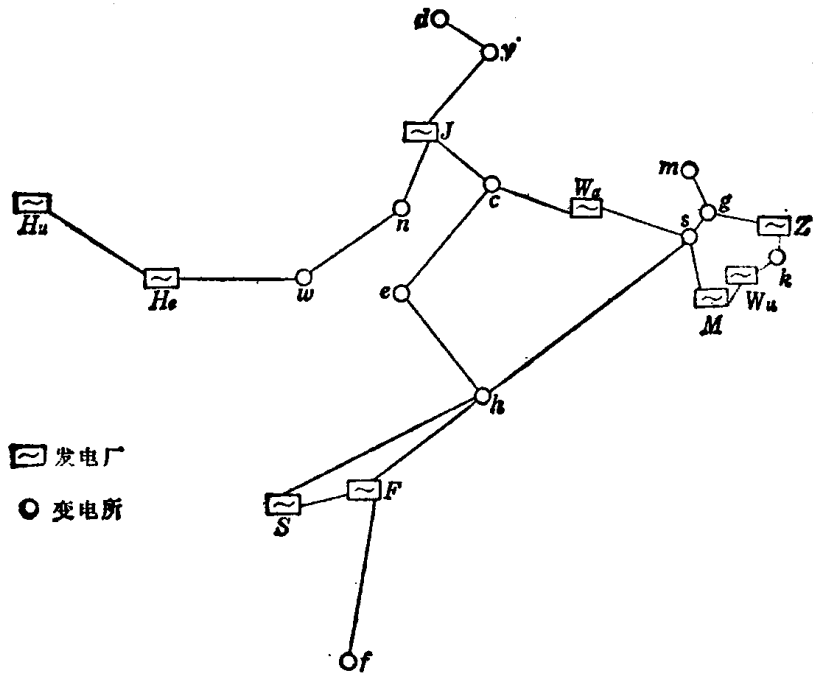


图 1-7 电力系统的地理结线图

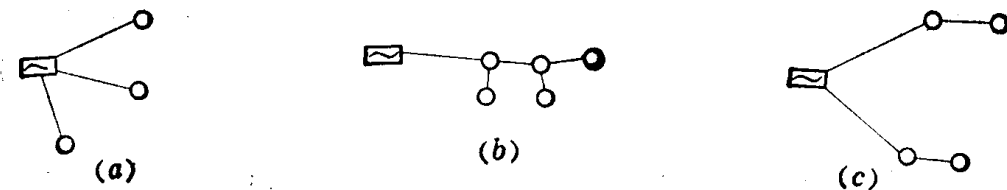


图 1-8 无备用结线方式
(a)放射式；(b)干线式；(c)链式

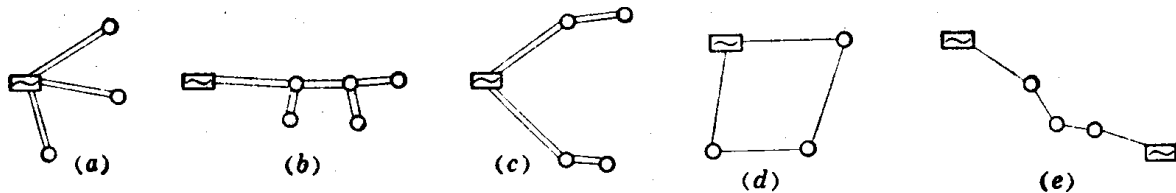


图 1-9 有备用结线方式
(a)放射式；(b)干线式；(c)链式；(d)环式；(e)两端供电网络

有备用结线中，双回路的放射式、干线式、链式网络的优点在于供电可靠性和电压质量高，缺点是可能不够经济。因双回路放射式结线对每一负荷都以两回路供电，每回路分担的负荷不大，而在较高电压级网络中，往往由于避免发生电晕等原因，不得不选用大于这些负荷所需的导线截面积，以致浪费有色金属。干线式或链式结线所需的断路器等高压

电器很多。有备用结线中的环式结线有与上列结线方式相同的供电可靠性，但却较它们经济，缺点为运行调度较复杂，且故障时的电压质量差。有备用结线中的两端供电网络最常见，但采用这种结线的先决条件是必须有两个或两个以上独立电源，而且它们与各负荷点的相对位置又决定了采用这种结线的合理性。

结线方式需经技术经济比较后方能确定。所选结线除保证供电可靠、有良好的电能质量和经济指标外，还应保证运行灵活和操作时的安全。

1-2-2 电力系统的电压等级

1. 电力系统的额定电压等级

图1-1所示系统中，各部分电压等级不同。因三相功率 S 和线电压 U 、线电流 I 之间的关系为 $S = \sqrt{3}UI$ ，输送功率一定时，输电电压愈高，电流愈小，导线等载流部分的截面积愈小，投资愈小；但电压愈高，对绝缘的要求愈高，杆塔、变压器、断路器等绝缘的投资也愈大。综合考虑这些因素，对应一定的输送功率和输送距离有一最合理的线路电压。但从设备制造角度考虑，为保证生产的系列性，又不任任意确定线路电压。甚至，规定的标准电压等级过多也不利于电力工业的发展。考虑到现有的实际情况和进一步的发展，我国国家标准规定的标准电压（又称额定电压）如表1-2所示。选择电力线路电压时，只能选用国家规定的电压等级。

表 1-2 额 定 电 压 等 级 (单位: 千伏)

用电设备额定线电压	交流发电机线电压	变 压 器 线 电 压	
		一 次 绕 组	二 次 绕 组
3	3.15	3及3.15	3.15及3.3
6	6.3	6及6.3	6.3 及6.6
10	10.5	10及10.5	10.5 及11
	15.75	15.75	
35		35	38.5
(60)		(60)	(66)
110		110	121
(154)		(154)	(169)
220		220	242
330		330	363
500		500	

- 注 1. 变压器一次绕组栏内3.15、6.3、15.75千伏电压适用于与发电机端点直接连接的升压变压器和降压变压器。
 2. 变压器二次绕组栏内3.3、6.6、11千伏电压适用于阻抗值为7.5%及以上的降压变压器。
 3. 如证明在技术经济上有特殊优点时，水轮发电机的额定电压允许用非标准电压。
 4. 计划选750千伏为更高一级额定电压。

表中，用电设备、发电机、变压器的额定电压之所以不一致以及它们与线路额定电压之间的关系有待说明。

经线路输送功率时，沿线路的电压分布往往是始端高于末端。例如，图1-10中，沿线段 ab 的电压分布可能如直线 U_a-U_b 所示。从而，图中用电设备1~6的端电压将各不相同。所谓线路的额定电压 U_N 实际就是线路的平均电压 $(U_a+U_b)/2$ ，而各用电设备的额定电压