



普通高等学校电力工程专业教学指导委员会推荐使用教材

高等学校教材

电力系统基础

(第二版)

华北电力大学 张文勤 主编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书为普通高校电力类专业教学指导委员会推荐使用教材,是继电保护及自动远动技术专业的必修课教材,全书共10章,主要内容有电力系统的基本概念、接线方式、电气设备及配电装置、电力系统元件的电气参数及等值电路、简单电力系统的潮流计算、复杂电力系统潮流的计算机算法、电力系统有功功率的最优分配与频率调整、电力系统的无功功率与电压调整、电力系统静态稳定、电力系统暂态稳定。

本书除供继电保护及自动远动技术专业的在校大学师生使用外,还可供电力类其他专业师生选用,同时适用于相应专业的在职人员培训。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统基础/张文勤主编.-2版.-北京:中国电力出版社,1998
高等学校教材

ISBN 7-80125-321-3

I. 电… II. 张… III. 电力系统-理论-高等院校-教材 IV. TM71

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 04576 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

三河市实验小学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1986年11月第一版

1998年11月第二版 1998年11月北京第二次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 19.75印张 445千字

印数 21701—25830册 定价:19.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

第二版前言

本书是原水利电力出版社 1986 年出版由杨以涵教授主编的《电力系统基础》的修编教材，是“电力系统及其自动化”专业“继电保护及自动远动技术”专业方向的必修专业课教材。在 1994 年电力工程类教学指导委员会审订的该专业方向教学计划中，“电力系统基础”课定为 80 学时，电力类教指委“电力系统”教学组又于 1996 年讨论通过了该课程的教学基本要求，决定对原教材进行修编，并列入了“教材编审出版计划”。根据新拟定的教材修编大纲，本教材内容共计十章，编写分工为：第一、九、十章由张文勤编写，第二、三、四章由梁志瑞编写，第五、六章由李焕明编写，第七、八章由杨淑英编写，张文勤任主编。

山东工业大学李仁俊教授担任本书主审，对书稿进行了细致的审阅，提出了许多宝贵意见，深表感谢。同时对原教材编者及本书后面所列参考教材的各位作者一并致谢。

欢迎对本书的错误和缺点，提出批评指导。

编者

1998 年 4 月

目 录

第二版前言

第一章 电力系统的基本概念	1
第一节 电力系统中电源的构成	1
第二节 动力系统与电力系统	7
第三节 电力系统的负荷	9
第四节 电力系统运行的特点及要求	12
第五节 电力系统的电压等级	13
第六节 我国电力工业的发展简史	15
第二章 电力系统的接线方式	18
第一节 电力网的接线	18
第二节 发电厂和变电所的电气主接线	20
第三节 电力系统中性点的运行方式	31
第四节 直流输电	34
第三章 电气设备及配电装置	42
第一节 同步发电机的运行	42
第二节 电力变压器的运行	45
第三节 高压断路器	50
第四节 隔离开关和电抗器	54
第五节 断路器的控制与信号接线	57
第六节 各类配电装置	59
第四章 电力系统元件的电气参数及等值电路	69
第一节 电力线路的结构	69
第二节 电力线路的电气参数及等值电路	75
第三节 电力变压器的电气参数及等值电路	81
第四节 发电机、电抗器、负荷的参数及等值电路	86
第五节 电力系统的等值电路	88
第五章 简单电力系统的潮流计算	103
第一节 电力系统潮流计算和分析的基本内容	103
第二节 辐射形网络的潮流计算	113
第三节 两端供电网的潮流计算	121

第四节	环形网络中的潮流计算	127
第五节	电力网络潮流的调整控制	132
第六节	远距离输电的稳态运行特性	138
第六章	复杂电力系统潮流的计算机算法	143
第一节	复杂电力网络的数学模型	143
第二节	功率方程、节点分类及约束条件	147
第三节	高斯—塞德尔迭代法潮流计算	150
第四节	牛顿—拉夫逊法潮流计算	156
第五节	P-Q 分解法潮流计算	172
第七章	电力系统有功功率的最优分配与频率调整	179
第一节	概述	179
第二节	发电机组的耗量特性	183
第三节	电力系统有功功率的最优分配	184
第四节	电力系统负荷及电源的频率静态特性	198
第五节	电力系统的频率调整	203
第八章	电力系统的无功功率与电压调整	214
第一节	电力系统无功功率的平衡	214
第二节	电力系统无功功率的经济分布	219
第三节	电力系统的电压调整	223
第九章	电力系统静态稳定	244
第一节	基本概念	244
第二节	同步发电机组的机电特性	245
第三节	简单电力系统的静态稳定	253
第四节	负荷的静态稳定	255
第五节	用小干扰法分析简单电力系统的静态稳定	260
第六节	调节励磁对电力系统静态稳定的影响	263
第七节	多机电力系统静态稳定的近似分析	271
第八节	提高电力系统静态稳定的措施	277
第十章	电力系统暂态稳定	281
第一节	概述	281
第二节	简单电力系统暂态稳定的分析与计算	282
第三节	自动调节系统对暂态稳定的影响	295
第四节	复杂电力系统暂态稳定的计算	297
第五节	提高电力系统暂态稳定的措施	300
参考文献		307

第一章 电力系统的基本概念

能源是社会生产力的重要基础。随着社会生产的不断发展，人类使用的能源不仅在数量上越来越大，在品种及构成上也有了很大变化。

18 世纪蒸汽机的发明使人们掌握了把热能转变成机械能的技术，导致了具有划时代意义的工业革命。电能出现以后，由于它具有能量间转换容易、输送方便、控制灵活以及洁净、经济等优点，从 19 世纪 70 年代开始已由电动机械逐步取代了蒸汽机，使人类社会进入了电气化的新时期，促使生产力得到空前的发展。如今，电能已成为工业、农业、国防、交通等国民经济各部门不可缺少的动力，成了改善和提高人们物质、文化生活的重要因素，并且一个国家电力工业的发展水平已是反映其国民经济发达程度的重要标志之一。

第一节 电力系统中电源的构成

煤炭、石油、天然气、水利等随自然界演化生成的动力资源是能量的直接提供者，称为一次能源。电能是由一次能源转换而成，称为二次能源。

发电厂是生产电能的核心，担负着把不同种类的一次能源转换成电能的任务。依据使用的一次能源的不同，发电厂被分成许多类型。例如：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，火力发电设备容量占的比重最大，超过 70%，水力发电设备容量约占 20%，核能发电设备容量则不足 10%，火力发电是主要的发电方式。

火力发电消耗的煤、石油、天然气是几亿年形成的矿物资源，它们不仅是能量的提供者，还是很珍贵的化工原料。为了节约这些有多种用途的重要资源，除了积极发展水力发电、核动力发电之外，还正在开发新的能源。如潮汐发电、地热发电、太阳能发电、风力发电等方面都取得了有成效的进展。目前全世界的地热发电设备容量已达到 200 多万 kW，潮汐发电厂的单机容量也达到 20 万 kW，我国也投产了容量较大的潮汐电厂，利用太阳能、风能的小容量试验电厂近年也投入了运行。除了传统的发电方式外，为了提高能源资源的利用率，正在开展新型发电方式的研究，比较引人注意的有磁流体发电机、燃料电池等。当然，用新能源发电和新的发电方式在技术上尚不成熟，在经济上花费也太昂贵，因此尚不能与传统的发电方式媲美。但是，随着技术的不断进步和能源资源构成的不断改变，它们必将逐步被用于生产。

一、火力发电厂

火力发电厂分为燃烧煤，燃烧石油和天然气的电厂，欧美国家燃油电厂较多，但受世界石油危机和油价波动等影响，建设燃煤电厂的数量也日趋增多。从目前我国能源资源的实际构成情况以及为了发挥资源的最佳经济效益出发，一般不建燃油电厂，而尽量发展燃煤电厂和水电厂。

火电厂又可分为凝汽式火电厂和热电厂，凝汽式火电厂是单一生产电能的火电厂，而热电厂是既生产电能、又向用户提供热能。热电厂由于供热距离不能很远，一般建在邻近热负荷的地区，容量也不大。凝汽式火电厂则可建在燃料基地，称为坑口电厂。

下面以燃煤电厂为例，阐明火电厂的生产过程和使用的设备。图 1-1 为一个凝汽式火电厂生产过程示意图。

原煤从煤矿运到电厂后，先进入原煤仓，随后由输煤皮带运进原煤斗，从原煤斗落入球磨机中被磨成很细的煤粉，再由排粉机抽出，随同热空气送入锅炉的燃烧室进行燃烧。燃烧放出的热量一部分被燃烧室的水冷壁吸收，一部分加热燃烧室顶部和烟道入口处的过热器中的蒸汽，余下的热量则被烟气携带穿过省煤器、空气预热器传递给这两个设备内的水和空气。烟气经过除尘器净化处理，由吸风机导入烟囱，并被排入大气。燃烧时生成的灰渣和由除尘器收集下来的细灰，用水冲进灰沟排出厂外。

燃烧用的助燃空气，经送风机进入空气预热器中加热，加热后，一部分被送往磨煤机作为干燥和运送煤粉的介质，大部分送入燃烧室参与助燃。

水、蒸汽是把热能转化成机械能的重要工质。净化后的给水，先送进省煤器预热，继而进入汽包后再降入水冷壁管中吸收燃烧室的热能后蒸发成蒸汽。蒸汽通过过热器时再次被加热，变为高温高压的过热蒸汽，以后经主蒸汽管道进入汽轮机膨胀做功，推动汽轮机转子转动将热能转变为机械能。做完功的蒸汽在凝结器中被冷却凝结成水，凝结水经除氧器去氧，加热器加热后再用给水泵重新送入省煤器预热，以便作为工质继续循环使用。

凝结器需要的冷却水由循环水泵送入，冷却水在凝结器中吸热以后，流回冷却塔散热，然后，再进入循环水泵。

汽轮机转子转动带动发电机转子旋转，在发电机中把机械能转换成电能。发电机发出的电能经过变压器升高电压后送入高压电力网。

在凝汽式火力发电厂中，由于做过功的蒸汽（称为乏汽）中仍含有热量，被凝结成水时，这些热量基本上被循环水带出变成热损失，因而这种类型电厂效率不高，先进的电厂其效率也不过 37%~40%，凝汽式火力发电厂生产过程见图 1-1。

热电厂效率较高，可达 60%~70%，但是受热负荷等条件的限制，建热电厂的数量有限。提高凝汽式电厂效率的有效途径是尽量采用高温、高压力的蒸汽参数和大容量的汽轮机—发电机组。

二、水力发电厂

由于水能不仅是价廉的能源，又是一种用之不竭的可再生能源，因此建设水力发电厂，用水的位能发电，可给国民经济带来巨大效益。

水电厂的发电容量（功率） P 与河流上、下游的水位差（落差） H 和水的流量 Q 成正比，可用下式表示

$$P = 9.81 \eta QH$$

式中 P ——发电容量，kW；

Q ——水流量， m^3/s ；

H ——水的落差，m；

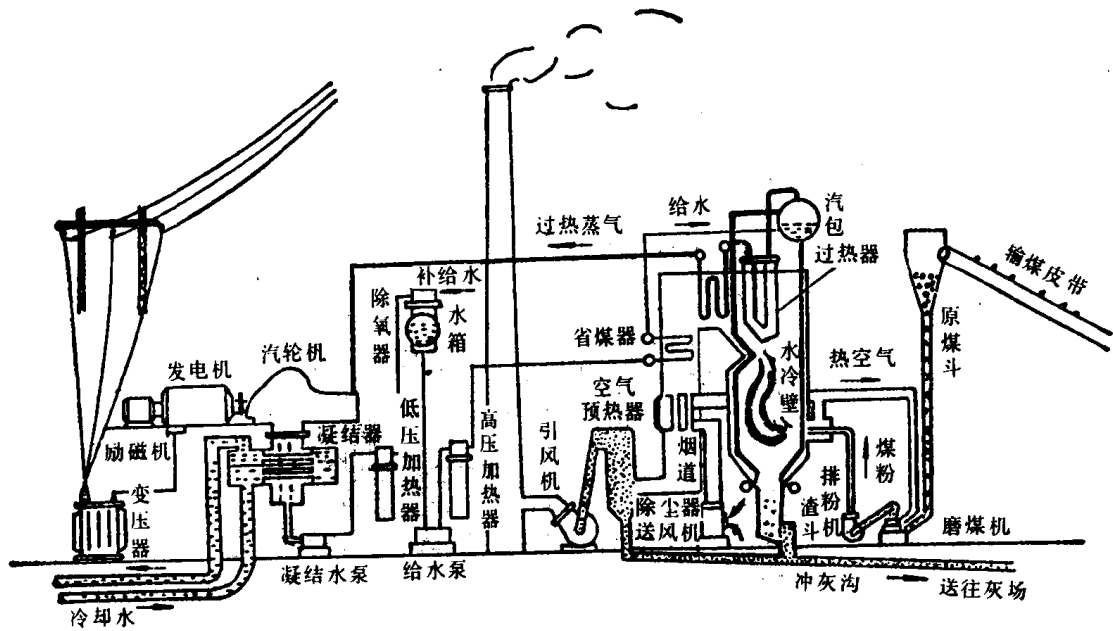


图 1-1 凝汽式火电厂生产过程示意图

η ——水轮机组的效率。

为了充分利用水能，人们针对河流的自然条件建造适合于河流特点的水工建筑物，以期能得到尽可能大的水的落差。按集中落差方式不同，水电厂的开发方式分为堤坝式、引水式及混合式三类。

堤坝式水电厂是用拦河筑坝方式建成水库以维持高水位。堤坝式水电厂又可分为坝后式和河床式两种型式。

坝后式水电厂单独筑坝，坝身高，水位也高，厂房建在坝后，不承受水压，如图 1-2 所示。坝后式在我国应用较多，如三门峡、刘家峡、白山、丹江口等水电厂均属此类。

河床式水电厂适用于河床平缓地区，由于落差小，将厂房和坝建在一起，构成拦河建筑物的一个组成部分。葛洲坝水电厂、西津电厂属于这一类。

在河流上游，当河床坡度较大时，宜于修建隧洞和渠道以获取最大落差，利用这种方式修建的水电厂称为引水式水电厂如图 1-3 所示。引水式水电厂不建坝或只建低坝，该坝只起壅水作用，落差靠引水渠道或隧洞形成。

根据河流特点也可建造兼有堤坝式和引水式两种特点的水电厂，称为混合式水电厂。

无论哪一类水电厂，均是通过压力水管把水引入水轮机的螺旋形蜗壳，推动水轮机转子旋转，带动发电机转动，把机械能变为电能。由上可见，水电厂的生产过程远比火力发电厂简单。

有时根据自然条件将河流分成若干段，每段各自建立水电厂，上游的水发电后放入下游，供下游各水电厂继续发电，这种电厂称为梯级水电厂。

有些水电厂在下游增设一个大的储水池，白天电力系统负荷处于高峰时电厂发电，并把发过电的水存入储水池，夜间低负荷时把储水池内的水再抽回水库，这一过程是把电能

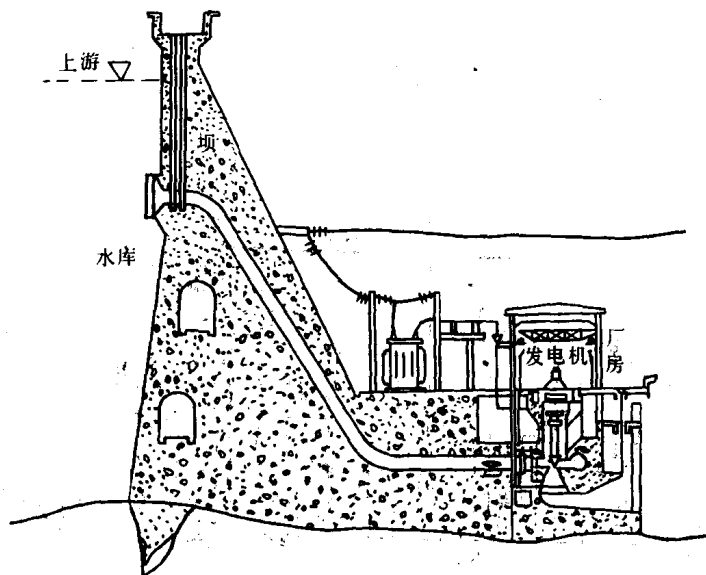


图 1-2 堤坝式水电厂示意图

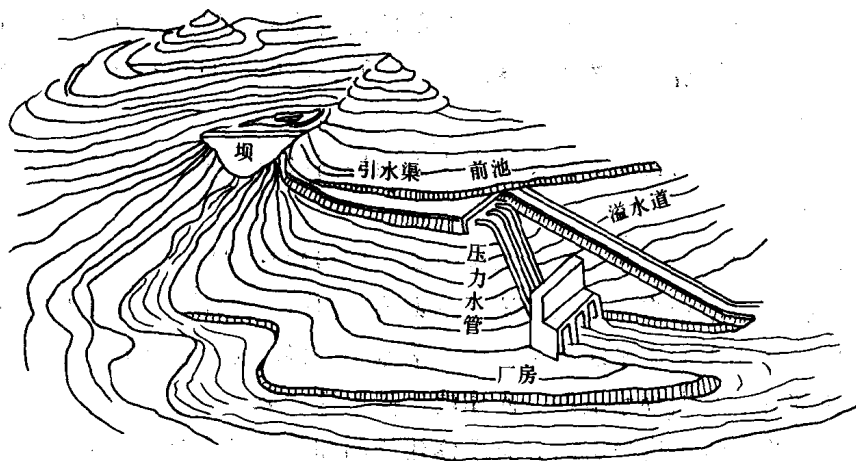


图 1-3 引水式水电厂枢纽布置图

(耗电)再变成水的位能,以备下一天白天负荷高峰时再发电。这种可起调峰作用的水电厂称为抽水蓄能电厂。

我国水利资源丰富,据调查全国水利资源蕴藏量用于发电可达 6.8 亿 kW。特别是黄河、长江水系集中了我国的主要水利资源,仅就三峡而言,水位可达 200m,年平均流量 $14300\text{m}^3/\text{s}$ 。现已开工兴建的三峡水利枢纽工程,坝高 185m,水头 175m,在防洪、通航、发电等方面都有重大效益。三峡水力发电厂将装设 26 台水轮发电机组,每台额定容量 700MW,总装机容量最后可达 18.2GW,能为国民经济建设提供巨大电力。

三、核能电厂

核能是一种新的能源，也是可望长期使用的能源。所以，自1954年世界上第一座核电厂投入运行以来，许多国家纷纷建设核电厂，与其他类型的电厂比较，核电厂建设投产的速度较快。

核能的获得有两个途径：一是用带有一定能量的中子撞击重金属元素的核，如铀、钚的核。核吸收中子之后变为具有激发能的复合核。激发能使复合核中的静电斥力大于核引力时，原子核就发生分裂，因此要放出裂变能，产生2至3个新中子，并放射出射线。如果产生的新中子至少有一个再能引起其他核也发生裂变，裂变就能持续进行，形成所谓链式反应。裂变过程中放出的裂变能就是可利用的核能。另外一种是用不同的轻元素的原子核进行聚合，形成一个新原子核，在聚合过程中要放出所谓聚合能，例如氘和氚聚合成氦放出能量。

反应堆是核电厂的核心，它是一个可以被控制的核裂变装置。若反应堆以铀235为燃料，用减速后的低中子（热中子）撞击原子核产生裂变时，称为热中子反应堆，这是目前应用较普遍的核能发电型式。当以铀238或钚239为燃料，用裂变产生的高速高能中子引起原子核裂变时，则称为快中子反应堆。利用快中子反应堆能节省大量核燃料，效率比热中子反应堆高约100倍，个别国家已建成此类型式的可供工业使用的电厂。

核裂变时产生的是快速、高能中子，为了使其变成慢中子需要慢化剂将其减速，根据采用的慢化剂的不同，热核反应堆又分为许多种，使用最多的有两种：①利用高压水做慢化剂的所谓压水堆；②利用沸腾水做慢化剂和冷却剂的沸水堆，用这两种反应堆的核电厂结构如图1-4和图1-5。

按照把热量从反应堆导入汽轮机的方式不同，该电厂又分为单回路系统与双回路系统两种。图1-5为单回路系统核电厂，水在反应堆内被加热后，沸腾并被蒸发成压力为 $6.86 \times 10^6 \sim 7.85 \times 10^6 \text{Pa}$ ，温度为 $280 \sim 290^\circ\text{C}$ 的蒸汽，经过管道直接送入汽轮机做功。做功之后的乏汽在凝结器中冷却成水后，再用水泵送回反应堆。为防止水汽化后造成污染，除反应堆设有混凝土防护层外，全部热力设备及管道也用防护层屏蔽。

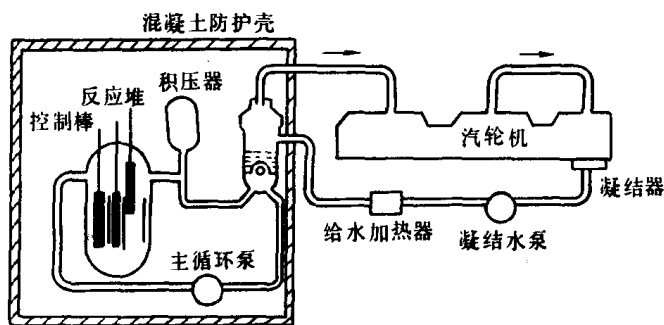


图1-4 压水堆核电厂示意图

双回路系统如图1-4所示，它由一回路及二回路两部分组成，各自独立循环。一回路的冷却水在堆内不汽化，出口压力保持为 $1.47 \times 10^7 \sim 1.57 \times 10^7 \text{Pa}$ 、温度为 $310 \sim 320^\circ\text{C}$ 。蒸汽发生器中的汽压为 $4.90 \times 10^6 \sim 5.88 \times 10^6 \text{Pa}$ 、温度为 $250 \sim 260^\circ\text{C}$ 。一回路用防护层严格屏蔽，二回路无活性污染不加屏蔽。

人们普遍担心核电厂的放射性污染，经世界各国几百座核电厂和我国秦山及大亚湾核电站的实际运行表明，如安全防护措施搞的好，是不会有放射污染的。

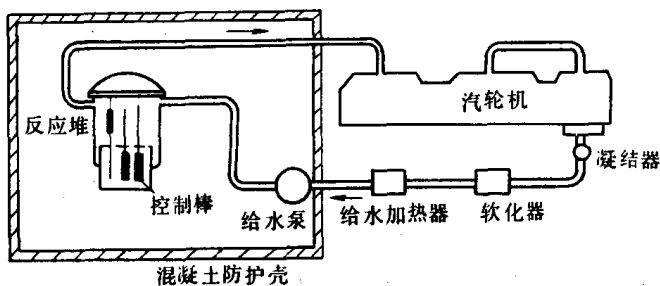


图 1-5 沸水堆核电站示意图

1kg 标准煤含的热量是 $3 \times 10^4 \text{J}$ ，而 1kg 铀 235 裂变产生的热能为 $7.95 \times 10^{10} \text{J}$ ，相当于 2700t 标准煤，可见用核能电厂代替火力发电厂将能大量节约煤炭。

四、其他能源发电

(一) 地热电厂

地下水在地表深处被加热成蒸汽或热水即构成了地热资源。根据地质

条件不同，热水温度约在几十至几百度，如我国西藏羊八井地热电厂水温约 150°C 。利用这种低温热能发电有以下两种方式：

(1) 通过减压扩容法将地下热水变为低压蒸汽，供汽轮机做功，如图 1-6 所示。地下热水经除氧器除氧后，送至第一级扩容器扩容，产生的蒸汽送入汽轮机高压级，未被汽化的水再进入二级扩容器，由于产生的蒸汽压力低于第一级，所以送入汽轮机的中压级做功。

(2) 用地下热水加热低沸点的特殊工质，使其变成气体对汽轮机做功。低沸点工质有氟里昂 12（常压下沸点为 11.7°C ）、异丁烷等。图 1-7 是异丁烷做工质的两级双流地热发电系统。

地球内部蕴藏的热能极大，估计全世界可开采的地下热能就相当于几万亿吨煤，开发利用地热资源的前景是非常广阔的。

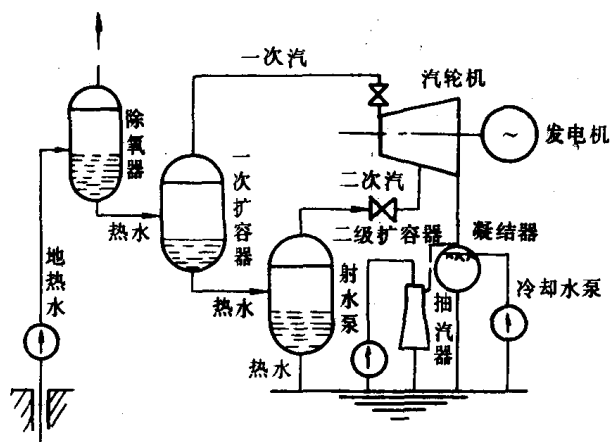


图 1-6 二级扩容地热发电系统

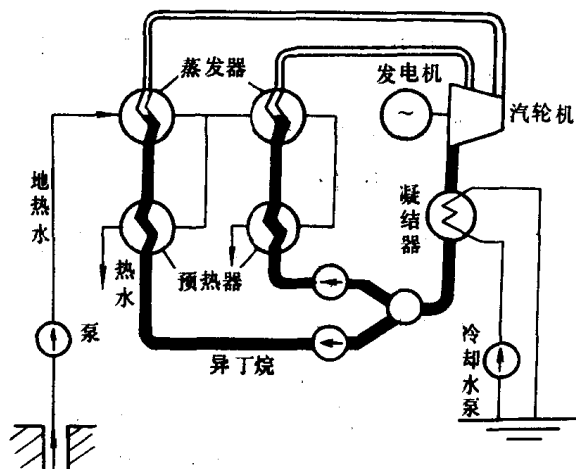


图 1-7 二级双流地热发电系统

(二) 潮汐电厂

海水涨潮、落潮包含着巨大的动能和势能。估计世界上这一能量的发电储备有 10 亿 kW，我国也有 1.1 亿 kW。利用这种能量发电就是所谓潮汐电厂。潮汐发电厂需要建设

拦潮堤坝，因而要求一定的地形条件、足够的潮汐潮差和较大的容水区。理想的建厂地点是海岸边或河口地区，可以拦蓄较大水量，少花费投资。

图 1-8 是一个仅有一个水库的双向潮汐电厂示意图，涨潮时及退潮时均可发电。涨潮时打开闸门 A、B 潮水引入厂内发电。当涨潮将结束前，开启所有闸门储水，让水库储满。退潮后只开 C、D 闸门放水进行发电。

(三) 风力发电

国外比较重视风能发电，100kW 以下的风力发电机组已有成熟的制造技术和运行经验。我国自 60 年代以来，研制风力发电机组，现已能做 10kW 以下的定型产品。风能取之不尽，但质量差、调速困难。为了取得稳定的电能，一般与蓄电池并联运行，大型风力发电机的研制方向是提高运行可靠性和降低成本。

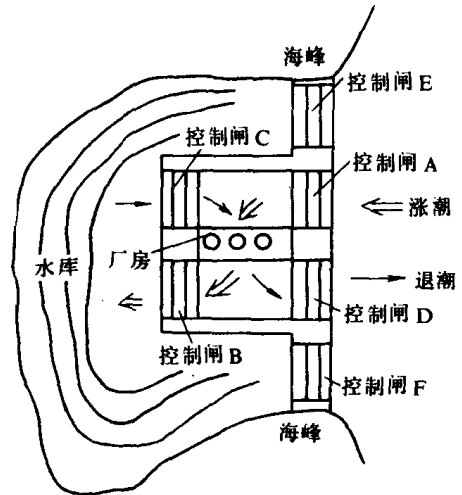


图 1-8 单水库双向潮汐电厂

第二节 动力系统与电力系统

在电力工业发展的初期，发电厂都建在电能用户的附近，电厂的规模很小，而且是孤立运行的。但是，发电用的动力资源和电能用户往往不在一个地区，水能资源集中在河流的水位落差较大的偏远山区，燃料资源则集中在产煤、石油、天然气的矿区。而大城市、大工业和其他用电大户，可能与动力资源地区相距甚远。水电只能通过高压输电线路把电能送到用户地区才能得到充分利用。火电厂虽然能通过燃料运输在用电地区建厂，但随着机组容量的增大，远距离大量运输燃料常常不如输电经济。于是就出现了所谓坑口电厂，即把火电厂建在矿区，通过升压变电站、高压输电线、降压变电站把电能送到离电厂较远的用户地区。水电厂则更要经过远距离输电才能把电能输送到负荷中心。随着高压输电技术的发展，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，后来发展到地区之间互相联系，形成庞大的系统。

发电厂、变电所、电能用户之间用电力线路连接起来，发电厂与热能用户之间用热力管道联系起来，构成电能和热能的统一生产、输送、分配和使用的总体称为动力系统。作为动力系统的一部分，包括发电厂的发电机、升压及降压变电所、电力线路及用电设备则称为电力系统。而电力系统的一部分，包括变电所及不同电压等级的电力线路称为电力网。

动力系统、电力系统和电力网的实际划分可参看图 1-9。电力系统并网运行在技术和经济上有十分明显的优越性，其优点主要有以下几个方面。

1. 减少系统总备用容量的比重

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。如果电力系

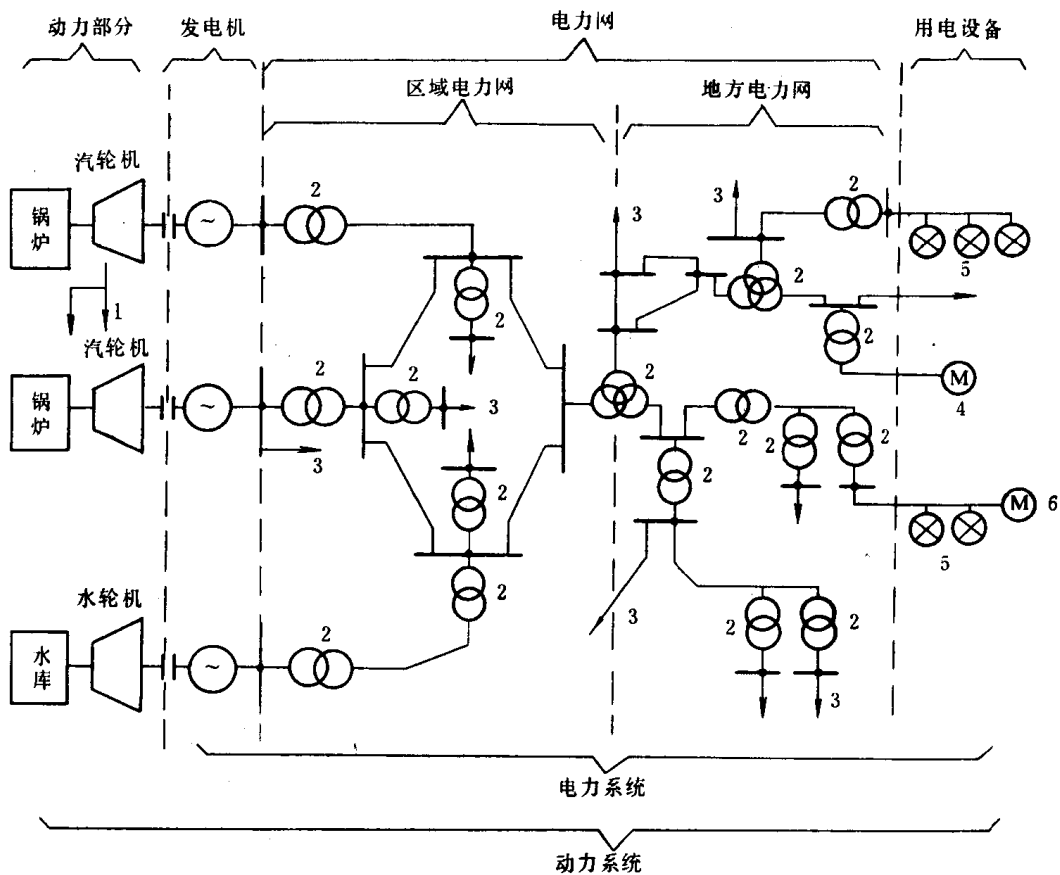


图 1-9 动力系统与电力系统示意图

1—热力网；2—变压器；3—负荷；4—高压电动机；
5—照明负荷；6—低压电动机

统中的总装机容量正好等于该系统的最大负荷，则当某一机组发生故障停运时，势必引起对一部分用户停电，给用户造成损失。为避免这种情况发生，一般都是使装机容量稍大于最大负荷，这部分富余容量就称为备用容量。由于备用容量在电力系统中是可以通用的，所以电力系统容量越大，所需的备用容量在系统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

大容量发电机组效率高，节省原材料，建设占地少，运行经济。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，否则一旦大机组因事故或因检修退出工作，将被迫造成用户停电，给国民经济带来损失。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。

目前国外已制造投产了 130 万 kW 的大型发电机组，我国投入运行的单台发电机组容量已达 60 万 kW。

3. 可充分利用水电厂的水能资源

水电厂发电受季节影响较大，在夏、秋丰水期水量过剩，在冬、春枯水期水量短缺。

水电厂单独运行或在地区性系统中水电厂容量占的比重较大时，将造成枯水期缺水，丰水期弃水的后果。组成大电力系统后，水火电厂联合运行，丰水期水电厂多发电，火电厂少发电，并适当安排机组检修。枯水期火电厂多发电，水电厂少发电并安排检修。这样扬长避短，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，因而有水电厂的电力系统调频问题往往比较容易解决。

4. 可减少总负荷的峰值

不同的地区由于生产、生活及时差、季节差等各种条件的差异，地区最大用电负荷出现的时间不同，如一个区域最大负荷出现在 17 时，另一个区域最大负荷出现在 17 时 30 分，两个区域电网联成一个系统后，则总的最大负荷小于两个区域系统最大负荷之和，因而减少了需要的装机容量。

5. 提高供电可靠性

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。但是，因为系统中所有电厂同时发生事故的的概率远较单一电厂发生事故的的概率小的多，所以组成电力系统后增加了对用户的供电可靠性，特别是增加了对重要用户的供电可靠性。

正是由于上述这些优点，世界上工业发达国家大多数都建立了全国统一电力系统。甚至相邻国家间的电力系统也用联络线联接起来，组成所谓国际互联系统，如西欧国家互联电力系统。

近年来随着电力工业的发展，我国的电力系统也有很大发展。至今，已建成的跨省电力系统有五个，即东北系统、华北系统、华东系统、华中系统和西北系统。目前各系统总装机容量除西北系统为 1000 多万 kW 以外，其余四个系统总装机容量都为 2000 多万 kW。而覆盖广东、广西两省的华南系统则不仅已建立了强有力的省际联系，而且这种联系已延伸至贵州、云南两省。省属电力系统尚有山东、福建、海南和台湾系统。此外，大区电力系统之间也已出现了互联，如华中、华东系统之间经 $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路和交流 500kV 线路的互联，甚至将来会形成全国统一电力系统。

第三节 电力系统的负荷

电力系统中接有为数众多、千差万别的用电设备，它们大致可分为异步电动机、同步电动机、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、居民区等，统称为电力系统的用户。用户是电力系统服务的对象，电力系统运行的好坏，归根到底要看对用户供电的质量如何而定。

用电设备从电力系统中取用的功率（有功与无功）称为负荷，因为用户用电设备的投入或停运对电力系统而言完全是随机的，所以用电负荷的大小是随时间而变化的。对一大批用电设备，其负荷的变化虽仍有随机性，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大小随时间变化的曲线图。

用电设备的负荷包括有功负荷及无功负荷，因而负荷曲线也分成有功负荷曲线及无功

负荷曲线。每类负荷曲线按时间段划分的不同还可以分为日负荷曲线、年负荷曲线。按描述的负荷范围不同还可分为用户的负荷曲线、地区电网的负荷曲线以及电力系统的负荷曲线。实际的负荷曲线是一条不间断的连续曲线，但在实际绘制时由于只能得到离散时间的实测（或估计）值，一般用折线法或阶梯法描绘。图 1-10 及图 1-11 表示出了用这两种方法绘成的日有功负荷曲线。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情况。日有功负荷曲线应用最广，故把它简称为负荷曲线。负荷曲线的最高点和最低点分别代表日最大负荷和日最小负荷，是电力系统运行中必须掌握的重要数据。日负荷曲线随着时间延伸到 8760h，就构成了年有功负荷曲线。

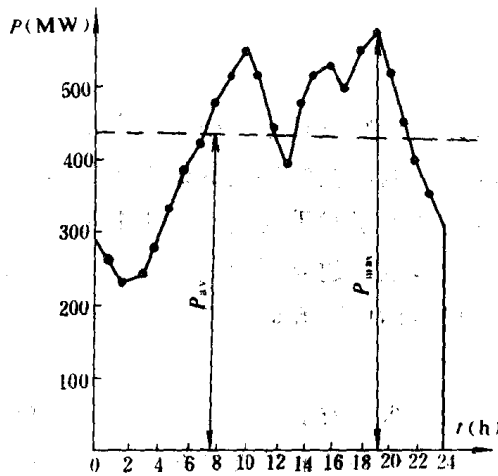


图 1-10 有功日负荷曲线（折线法）

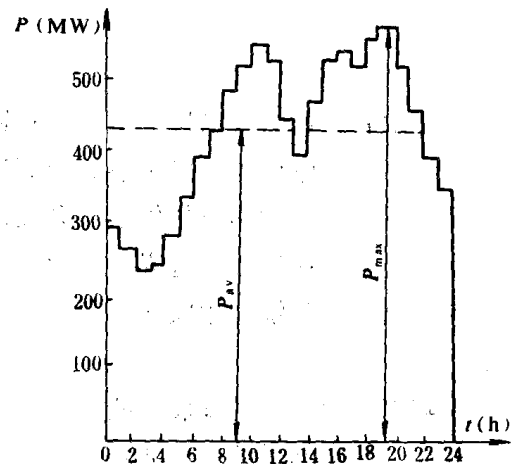


图 1-11 有功日负荷曲线（阶梯法）

和有功负荷相似，无功负荷也在一天中不断变化，但变化较平缓，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。

根据负荷曲线可以计算出系统中用户的日用电量

$$W = \int_0^{24} P dt$$

进而可以求出日平均负荷

$$P_{av} = \frac{W}{24} = \frac{1}{24} \int_0^{24} P dt$$

为了反应负荷曲线的起伏变化情况，引入一个负荷率的概率

$$K_p = \frac{P_{av}}{P_{max}}$$

负荷率 K_p 为日平均负荷有功功率与日最大负荷有功功率之比， K_p 值小表明负荷曲线起伏大，发电机的利用率差。

负荷曲线对电力系统的运行有很重要的意义，它是安排日发电计划，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。

随着生产的发展、生活的改善以及季节气候的变化，每日的最大负荷是不同的，一般是

年初低年末高,夏季小于冬季,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,见图 1-12。这种负荷曲线主要用来指导制订发电检修计划和制订新建、扩建电厂的计划等。

上一节已经述及,为了确保系统中因有机组检修或个别机组突然发生故障退出运行时不减少对用户供电,系统中装设的机组总容量应当大于系统的最大负荷,如图 1-12 所示。多出的部分称为备用容量。显而易见,检修机组应安排在负荷最小的时段,而且随着负荷的增长,还应当不断装设新的发电设备。

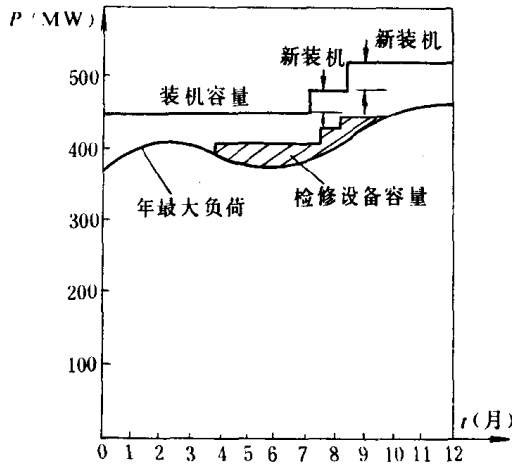


图 1-12 有功功率年最大负荷曲线

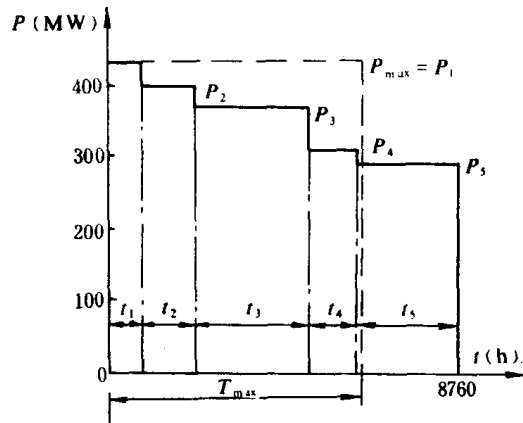


图 1-13 年持续负荷曲线

在电力系统运行分析中,还经常用到年持续负荷曲线,如图 1-13 所示,是把一年内每个小时的负荷按功率大小为先后顺序排列而成。它用于安排发电计划及进行可靠性估计。按此曲线可求出全年的电能消耗量为

$$W = \sum_{i=1}^n P_i t_i$$

其中 i 为由大至小出现的不同负荷的序号。

最大负荷利用时间定义为

$$T_{\max} = \frac{W}{P_{\max}} = \sum_{i=1}^n P_i t_i / P_{\max}$$

即负荷按最大有功 P_{\max} 使用,则在 T_{\max} 时间内消耗的电能,等于负荷全年的电能消耗量 W 。

不同性质的用户、不同的生产班次,其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的不同班次的最大负荷利用时间都有一个大致的范围,如表 1-1 所示。若已知某一类用户的最大负荷,再从表上查出相应的最大负荷利用时间,就可算出该类用户全年用电量的近似值。

表 1-1

各类用户年最大负荷利用小时

负荷类型	T_{\max} (h)	负荷类型	T_{\max} (h)
照明及生活用电	2000~3000	三班制企业	6000~7000
一班制企业	1500~2200	农业用电	1000~1500
二班制企业	3000~4500		

第四节 电力系统运行的特点及要求

一、电力系统运行的特点

电能的生产、输送、分配和使用与其他工业产品相比有明显的不同的特点，这些特点主要有以下三方面。

1. 电能不能储存

电能的生产、输送、分配和使用可以说是在同一时刻完成的。发电厂在任何时刻生产的电能恰好等于该时刻用户消耗的电能（包括输送分配环节的损耗），即电力系统中的功率每时每刻都是平衡的。与其他产品不同，电能不能大量储存。

2. 暂态过程非常迅速

电能以电磁波的形式传播，传播速度为 30 万 km/s。发电机、变压器、线路、用电设备的投入或停运，都在一瞬间完成，故障的发生和发展时间都十分短促，电力系统的暂态过程非常迅速。

3. 电力和国民经济各部门间的关系密切

由于电能具有使用灵活、控制方便等优点，国民经济各部门都广泛使用电能作为生产动力，人民的生活用电也日益增加。电能供应不足或突然停电将给国民经济造成巨大损失，给人民生活带来不便。

二、对电力系统运行的要求

根据上述特点，对电力系统提出以下几方面要求。

1. 保证供电可靠性

中断用户供电，会使生产停顿、生活混乱，甚至危及人身和设备的安全，给国民经济和社会生活造成极大损失。停电给国民经济造成的损失远远超过电力系统少售电量造成的损失。一般认为，由于停电引起国民经济的损失平均值约为少售电量损失的 30~40 倍。因此，电力系统运行的首要任务是满足用户对供电可靠性的要求。

造成对用户停止供电的原因可能是由于电力系统的元件（如发电机、变压器、线路等）发生了故障，也可能是因为电力系统运行的全面瓦解（如系统稳定性的破坏）。前者属于局部事故，停电范围和造成的损失较小；后者是全局性事故，停电范围大，重新恢复供电需要很长时间，引起的损失很大。

保证供电可靠性，首先要求系统元件的运行具有足够的可靠性，元件发生事故不仅直