

高等学校教材

电力系统基础

华北电力学院 杨以涵 主编

7-43
62

中国电力出版社

内 容 提 要

《电力系统基础》是高等学校电力系统继电保护及自动运动技术专业专业的专业课教材。

全书共有四个部分，分八章。第一、二章讲述电力系统的基本概念，第三、四、五章讲述电力系统的基本计算，第六、七章讲述稳态运行和调节，第八章讲述电力系统的稳定性。本书取材力求精炼，除着重讲清电力系统基本概念和基本理论，还介绍了借助计算机进行电力系统的基本计算和直流输电的基本概念。

该书供高等学校电力类专业师生使用，也可作为电力生产和科研工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统基础／杨以涵主编．—北京，中国电力出版社，
1986.11（1998重印）

高等学校教材

ISBN 7-80125-654-9

I．电… II．杨… III．电力系统-基础理论-高等学校-
教材 IV．TM71

中国版本图书馆CIP数据核字（98）第04099号

中国电力出版社出版

（北京三里河路6号 邮政编码 100044）

冶金印刷厂印刷

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 2002年7月北京第六次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 14.25印张 318千字

印数 21701—23700 册 定价：13.20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）

前 言

本书为“电力系统继电保护及自动远动技术”专业的专业课教材，是根据1983年1月在青岛召开的电力系统教材编审小组会议上制订的该课程教学大纲编写的。

本书共分八章。第一章、第八章由杨以涵编写，第二章、第三章由毛晋编写，第四章、第五章由郭家骥编写，第六、七章由张维国编写。杨以涵任主编。

山东工业大学邵洪泮教授担任本书主审，在编写过程中随时提出了宝贵意见，对初稿进行了极为细致的审阅，提出许多修改意见，对提高本书的质量作出了重要贡献。

在编写过程中得到各有关同志的支持和帮助，也得到华北电力学院陈志业同志协助，在此表示感谢。

由于编者的经验和能力所限，本书一定存在不少错误和缺点，欢迎批评指正。

编 者

1986年1月

目 录

前 言

第一章 能源与电力系统	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	8
第四节 电力系统运行的特点及要求	11
第五节 电力系统的电压等级和规定	12
第六节 我国电力工业的发展简史	14
第二章 电力系统的接线及设备	16
第一节 电力网的接线方式	16
第二节 电力线路的结构	17
第三节 发电厂和变电站的电气主接线	25
第四节 高压电器设备	34
第五节 隔离开关和电抗器	40
第六节 断路器的控制与信号回路	44
第七节 电力系统中性点接地方式	49
第三章 输电线路及变压器的参数计算	55
第一节 输电线路的电气参数及等值电路	55
第二节 变压器参数及等值电路	60
第四章 电力系统的基本计算	67
第一节 基本概念	67
第二节 开式网的电压、功率计算	72
第三节 两端供电网计算	82
第四节 多级电压闭式电力网计算	90
第五节 远距离输电的稳态运行特性	92
第六节 直流输电	97
第五章 潮流的计算机算法	104
第一节 标么值与标么制	104
第二节 电力系统等值网络	110
第三节 电力网功率方程	113
第四节 节点分类与约束条件	117
第五节 迭代法计算潮流	118
第六节 牛顿—拉夫逊法	126
第六章 电力系统有功功率经济分配与频率控制	136
第一节 概述	136

第二节	目标函数与机组耗量特性	137
第三节	等微增率准则	139
第四节	不计网损时水、火电厂间的经济功率分配	142
第五节	计及网损时电力系统各发电厂间的经济功率分配	143
第六节	负荷的频率静特性和电源的频率静特性	143
第七节	电力系统频率调整的基本概念	153
第七章	电力系统无功功率平衡及电压调整	156
第一节	概述	156
第二节	无功功率平衡	157
第三节	电力系统的电压调整	162
第四节	无功功率的经济分配	174
第八章	电力系统的稳定性	176
第一节	基本概念	176
第二节	同步机的转子运动方程	176
第三节	简单电力系统的静稳定	178
第四节	简单电力系统的暂态稳定	200
第五节	电力系统的振荡、异步运行及再同步	210
第六节	提高电力系统稳定性的措施	213
参考书目		219

第一章 能源与电力系统

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。

十八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。电能出现之后，由于它具有转换容易、输送方便、控制灵活以及洁净、经济等许多独特的优点，从十九世纪七十年代开始已逐步取代了蒸汽机，使社会进入了电气化的崭新时期，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%，水电设备容量约占20%，核能发电设备容量则不足10%。火力发电仍是主要的发电方式。

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。目前全世界的地热发电设备容量已达到180万kW；潮汐发电厂的单机容量也达到20万kW，我国也已投产了世界上第二个大容量的潮汐电厂，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。第一台2.5万kW的磁流体发电机正在试运行；示范性的4800kW的燃料电池发电装置也已建成。

用新能源发电和新的发电方式在技术上尚不够成熟，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（以后简称火电厂）分为燃烧煤、燃烧石油和天然气的电厂，欧美国家燃

油电厂居多，但受世界石油危机和油价不断波动等影响，建设燃煤电厂的数量也日趋增多。我国只有很少几个燃油电厂。从目前我国能源资源实际构成情况以及为了发挥资源的最佳经济效益出发，除今后不再建燃油电厂外，现有燃油电厂也要尽可能改为燃煤电厂。

火电厂又可以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。凝汽式电厂则可建在燃料产地，电厂容量也可以是很大的。

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

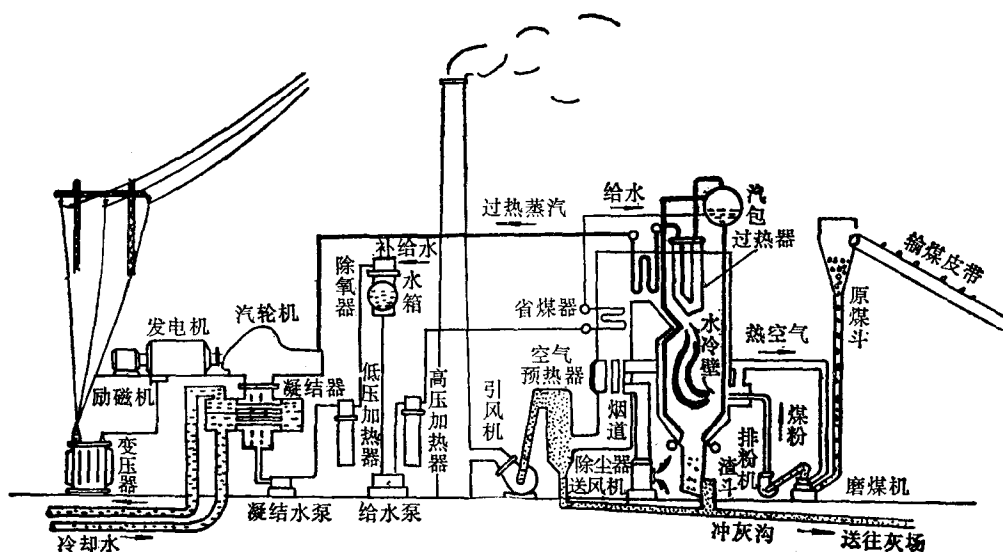


图 1-1 凝汽式火电厂生产过程示意图

原煤从煤矿运到电厂后，先存入原煤场，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四周的水冷壁吸收，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、空气预热器逐渐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，用水冲进冲灰沟排出厂外。

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。做完功的蒸汽在凝汽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之后，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。

凝汽式火力发电厂中，由于做过功的蒸汽（称为排汽）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，因而该种类型电厂效率不高，先进的指标也不过37~40%。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

由于水能不仅价廉，又是一种用之不竭的可再生能源，因此建设水力发电厂，用水的位能发电历来具有强烈的吸引力。

水电厂的发电容量 P 与河流上、下游的水位差（落差） H 和流量 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；

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，以期得到尽可能大的落差。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成坝后式和河床式两种型式。

坝后式单独筑坝，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

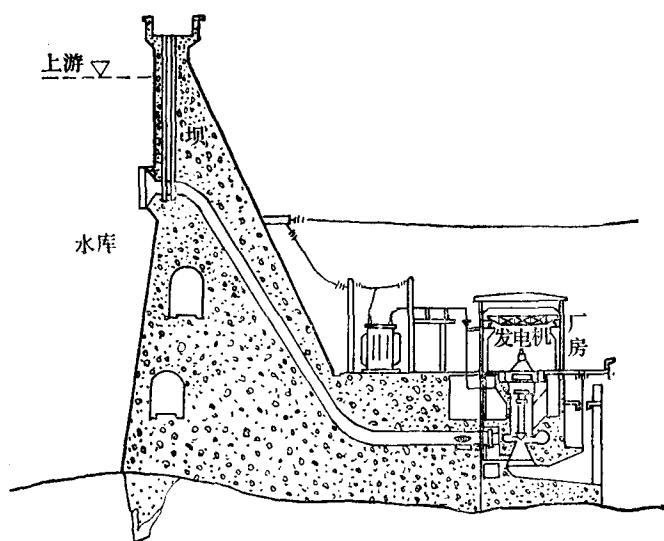


图 1-2 堤坝式水电厂示意图

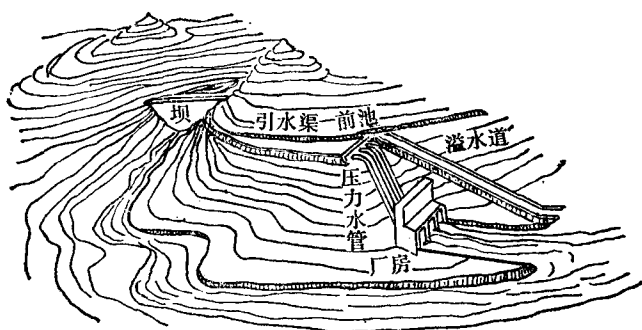


图 1-3 引水式水电站枢纽布置图

取最大落差，利用这种方式建造的水电厂称为引水式水电站，如图 1-3 所示。引水式水电站不建坝或只建低坝，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，称为混合式水电站。

无论哪一类水电站，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，把机械能转变为电能。由上可见，水电站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，每段各自建立水电站，上游的水发电后放入下游供下游各级电厂继续利用发电。这种电厂称为梯级电厂。

有些水电站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，这一过程是把电能再变成水的位能，以备下一天白天负荷高峰时再发电。这种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达 6.8 亿 kW，可利用量约 3.78 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 200 m，年平均流量 $14300 \text{ m}^3/\text{s}$ ，约可装机 2500 万 kW。解放以来，我国非常重视水利资源的开发，在小水电站建设方面的经验举世公认，今后更会加快大中型水电站的建设，为四个现代化提供廉价电力。

三、核电厂

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，与其它类型的电厂比较，核电厂建设的速度最快。

核能的获得有两种途径：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，此时要放出裂变能，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它核也发生裂变，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。目前已用于发电的仅是第一种，第二种尚在研究之中。

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，用减速后的低速中子（热中子）撞击原子核产生裂变时，称为热中子反应堆。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（或增殖堆）。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。

虽有个别国家建成该类型式的可供工业使用的电厂，但当前普遍应用的是热中子反应堆。

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，根据采用的慢化剂不同，热核反应堆又分为许多种，使用最多的有两种：一种是利用高压水做慢化剂和冷却剂的所谓压水堆。另一种是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的不同，核电厂又分成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，沸腾并蒸发成压力是 $6.86 \times 10^6 \sim 7.85 \times 10^6 \text{Pa}$ ，温度是 $280^\circ\text{C} \sim 290^\circ\text{C}$ 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。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。

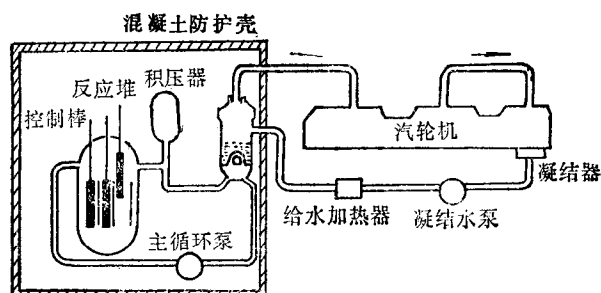


图 1-4 压水堆核电厂示意图

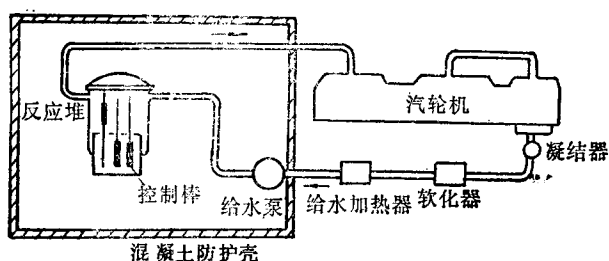


图 1-5 沸水堆核电厂示意图

一回路的冷却水在堆内不汽化，出口压力保持 $1.47 \times 10^7 \sim 1.57 \times 10^7 \text{Pa}$ ，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，但是经过世界上200多个电厂，2000多个堆年的运行，并未发生过放射性物质泄漏及人员伤亡。因此核电厂可谓是一个安全的能源。

一公斤标准煤含的热量是 $3 \times 10^4 \text{J}$ ，而一公斤铀235裂变产生的热能为 $7.95 \times 10^{10} \text{J}$ ，相当2700t标准煤，用核电厂代替水电厂将能大量节约煤炭。

四、其它能源发电

1. 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两种方式：

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扩容，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

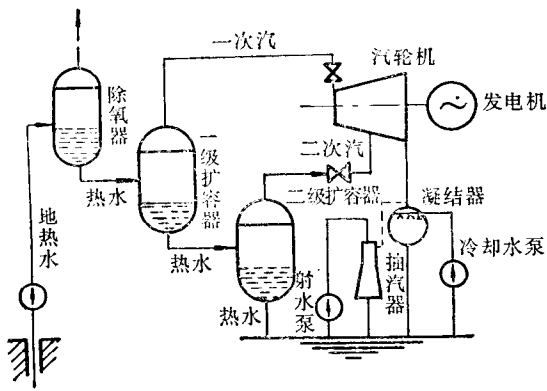


图 1-6 二级扩容地热发电系统

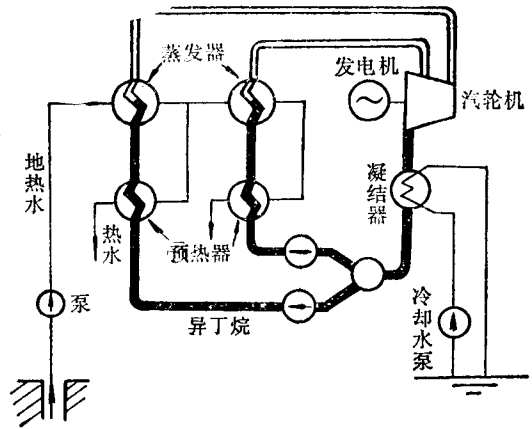


图 1-7 二级双流地热发电系统

做功。

另一种方式是用地下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。如图1-7是异丁烷做工质的两级双流系统。

地球内部蕴藏的热能极大，估计全世界可开采的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。

2. 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、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。

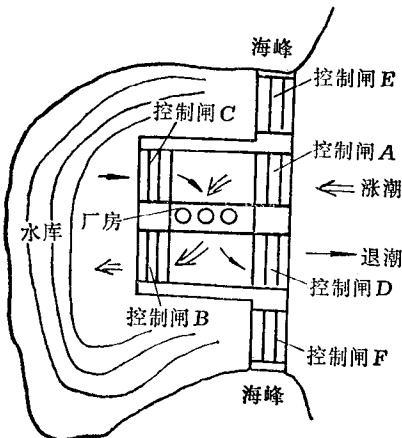


图 1-8 单水库双向潮汐电厂

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将潮水引入厂内发电。当涨潮将结束时，开启所有闸门蓄水。退潮后只开C、D闸门放水进行发电。

3. 风能发电

国外比较重视风能发电，100kW以下的风力机组已有成熟的制造技术和运行经验。我国自六十年代开始研制以来，现已能做1kW以下的定型产品。风能取之不尽，但质量差。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可靠性和降低成本。

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。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地方，燃料资源集中在煤、石油、天然气的矿区；而大工业、大城市和其它用电部门则因原料产地、消费中心或受历史、地理条件的限制，可能与动力资源地区相隔很远。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，但随着机组容量的扩大，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。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、升压及降压变电站、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，包括变电站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上和经济上有十分明显的优越性，主要有以下几方面：

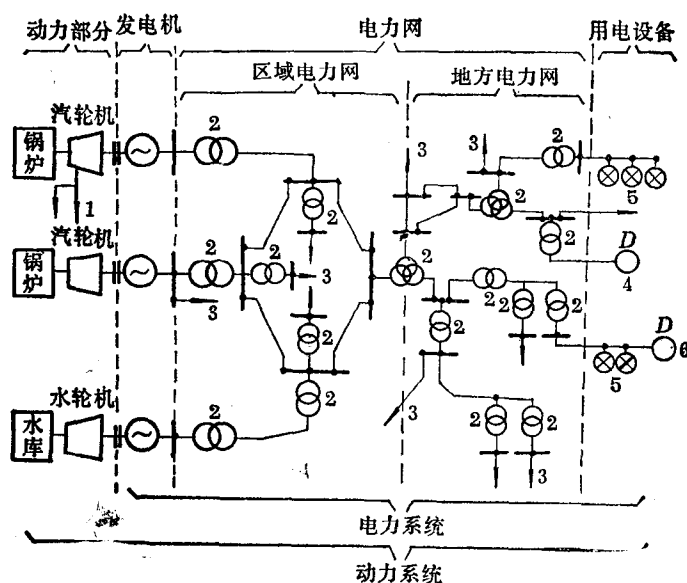


图 1-9 动力系统与电力系统示意图

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

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。如果电力系统中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时，势必引起对一部分用户停电，给用户造成各种损失。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，这部分容量称为备用容量。由于备用容量在电力系统中是可以互相通用的，所以电力系统容量越大，它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，给国民经济带来极大损失。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。

目前国外已制造投产了单机容量为130万kW的大型机组，我国已装设并已投入运行的单台发电机容量也已达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，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，并适当安排检修。枯水期火电厂多发电，水电厂少发并安排检修。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，因而有水电厂的系统调频问题往往比较容易解决。

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点，另一个区域出现在17点半，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。因为系统中所有电厂同时发生事故的几率远较单一电厂发生事故的几率小的多，所以组成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。

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，组成所谓互联系统，目前世界上最大的系统是苏联的国内系统，总装机容量22340万kW。并有9条线路和东欧七国互联。

我国近年也十分重视电力系统的发展工作，在原有的小地区系统基础上已发展了总装机容量在100万kW以上的大系统十三个，其中华东、东北、华北、华中达到了1000万kW以上。

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，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、居民等——所谓电力系统的用户。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而定。

用户用电设备的起动或停止对电力系统而言完全是随机的，无法估计一个单独的用电设备在某个时刻从系统中取用的功率，这一功率称为负荷。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时间内用电负荷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成用户的负荷曲线、地区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。横座标以小时为单位，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最广，故常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。

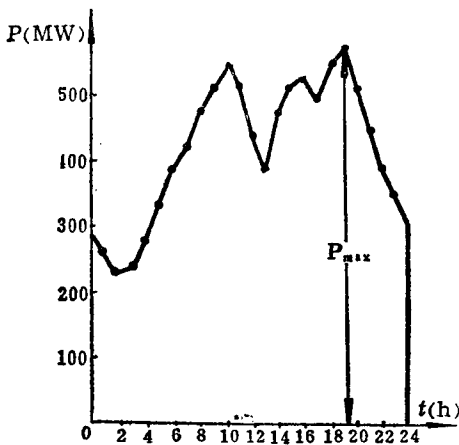


图 1-10 有功日负荷曲线（折线法）

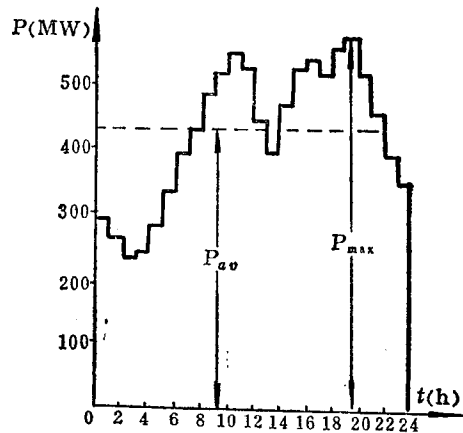


图 1-11 有功日负荷曲线（阶梯法）

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情况引入一个负荷率的概念：

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

负荷率 K_P 值小表明负荷曲线起伏大，发电机的利用率较差。

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的变化，每日的最大负荷不尽相同，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设备检修计划和制订新建、扩建电厂的计划等。

上一节已述及，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间；而且随着负荷的增长还应当不断装设新的发电设备。

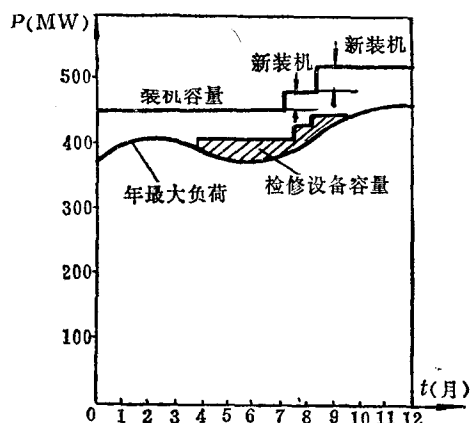


图 1-12 有功功率年最大负荷曲线

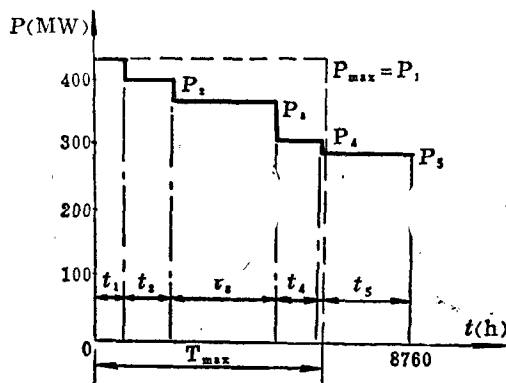


图 1-13 年持续负荷曲线

在电力系统的运行分析中，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其大小为先后排列而成。它用于安排发电计划及可靠性估计。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：

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

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1-1所示。若已知某一类用户的最大负荷，可从表上查出相应的最大负荷利用时间求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

电能的生产、输送、分配和使用与其它工业部门产品相比有明显的、不同的特点，主要是：

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，即电力系统中的功率每时每刻都是平衡的。

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300km/ms。发电机、变压器、线路、用电设备的投入或退出运行，都在一瞬间完成，故障的发生和发展时间都十分短促。

3. 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，国民经济各部门广泛使用电能作为生产的动力。人民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。

根据这些特点，对电力系统提出的要求是：

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三十到四十倍。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，也可能是因为系统运行的全面瓦解（如稳定性破坏）。前者属于局部事故，停电范围和造成的损失比较小；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接造成供电中断，而且可能发展成为全局性的事故。经验表明，电力系统的全局性事故往往是由于局部事故扩展而成。其次，要求提高系统运行的稳定性，增强抗干扰能力，保证不发生或不轻易发生造成大面积停电的系统瓦解事故。为此，除了要不断提高运行人员的技术水平和责任心外，要采用现代化的监测、控制设备。

随着技术的进步,供电可靠性正在不断提高,但是保证所有用户的供电绝对可靠是困难的。考虑到不同用户因停电造成的损失相差很大,按其供电可靠性的要求不同,将负荷分成三类:

第I类负荷:这类用户停电将造成人身事故、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II类负荷:该类负荷供电中断将造成大量减产,使人民生活受到影响。

第III类负荷:不属于第I、II类的负荷,如工厂的附属车间,小城镇及农村公用负荷等。

依据这种分类,供电部门可以采用不同的技术措施,满足各自的供电可靠性要求。

2. 保证电能质量

电能质量以电压、频率以及正弦交流电的波形来衡量。用电设备是按额定电压设计的,实际供电电压过高或过低都会使用电设备的运行技术指标、经济指标下降,甚至不能正常工作。一般规定,电压偏移不应超过额定电压值的 $\pm 5\%$ 。频率的变化同样影响用电设备的正常工作。以电动机为例,频率降低引起转速下降,频率升高则转速上升,对转速有严格要求的部门,如纺织厂,其产品的质量可能降低。电力系统规定,频率偏移应不超过 $\pm 0.2\sim 0.5\text{Hz}$ 。

随着自动化及电子技术应用的发展,接入系统整流设备的增多,引起谐波比重增大,如不采取严格的滤波措施,将对用户产生不利影响。因此检测和控制谐波开始成为维持电能质量的重要一环。

3. 提高电力系统运行的经济性

节约能源是当前各国普遍关注的一个大问题。电能生产的规模很大,消耗大量一次能源,在电能生产过程中应力求节约,减少能源消耗,最大限度地降低电能成本。为了达到运行经济的目的,要首先采用高效、节能的发电设备,提高发电运行的经济性,降低发电过程中的能源消耗;要合理发展电力网,降低电能输送、分配过程中的损耗;要大力开展电力系统中的经济运行工作,合理分配电厂之间的负荷,让经济性能好的发电厂多发,差的少发电;充分利用水电资源,注意水、火电厂之间的合理调配,力求以少的水耗获得更多的电能。

第五节 电力系统的电压等级和规定

各种用电设备以及发电机、变压器都是按一定的标准电压设计和制造的。因此它们运行在标准电压下时,它们的技术、经济性能指标都将发挥得最好。此标准电压就称为额定电压。

要满足用电设备对供电电压的要求,电力网应有自己的额定电压,并且规定电力网的额定电压和用电设备的额定电压相一致。

图1-14中,线路 a 、 b 有功功率通过时,将有电压降存在,因而首、末端电压不等,分别为 U_1 和 U_2 。接在线路中的用电设备 LD_1 至 LD_4 所承受的电压也各不相同,为了使用电设