

1063-57

电力工程

西安交通大学主编

806

水利电力出版社

前 言

本书系根据原水利电力部1978~1981年水利电力类高等学校、中等专业学校教材编审出版规划(草案)组织编写的。

根据《高电压技术及设备》专业的特点和培养目标,学生对电力网、电力系统以及发电厂和变电所的电气部分的基本知识和原理应有较全面的了解,对其中与专业关系密切的部分还应深入地进行学习。《电力工程》课正是为此而开设的。

本书在选材上注意了与其他基础课程和专业课程的衔接,并力求做到理论联系实际。此外,对国内外有关的科技新成果以及发展动向也作了相应的介绍。

本书在编写阶段又根据各有关院校的要求,考虑到除“发电厂及电力系统”专业外的其他电力类专业的教学需要,在内容上作了适当的调整(如增加了“高压开关电器”的内容等)。因此本书不仅可供“高电压技术及设备”专业使用,也可供电机、电器、电气绝缘及其他与电力有关的专业选用。

本书的第一、二、三、四、五、六、九章及附录由西安交通大学尹克宁编写,第七、八章由武汉水利电力学院何汉昆编写,黄守盟、陈家礼修改。全书由尹克宁主编,由浙江大学发电教研室主审。黄焕焜、倪保珊、马大强、赵智大、赵杲、戴良璞、韩岳等同志参加审稿并提出了许多宝贵意见。本书在编写过程中还得到西安交通大学、武汉水利电力学院有关教研室的同志给予热情支持和帮助。在此一并致以谢意。

由于编者水平所限,书中难免有不妥与错误之处,恳请读者批评指正。

编 者

1980年9月

目 录

前 言

第一章 电力系统概述	1
第一节 概述	1
第二节 电力系统的组成和特点	1
第三节 发电厂的类型及其生产过程简介	6
第四节 电能的质量指标	11
第五节 电力网的额定电压和电压等级	14
第六节 电力系统的负荷曲线	16
第二章 电力网	20
第一节 电力线路的结构	20
第二节 输电线路的电气参数	30
第三节 电力网计算中变压器参数的计算方法	45
第四节 输电线的等值电路	53
第五节 电力网电压计算	64
第六节 电力系统的无功平衡和电压调节	67
第七节 电力网的功率损耗和电能损耗	76
第八节 电力网的潮流分布计算	84
第九节 输电线路导线截面的选择	91
习题	95
第三章 发电厂和变电所的一次系统	100
第一节 电气主接线图	100
第二节 高压开关电器	112
第三节 配电装置的一般问题	137
第四节 屋内配电装置	141
第五节 屋外配电装置	144
第六节 成套配电装置和组合电器	150
第四章 工作接地和保护接地	154
第一节 概述	154
第二节 电力网的中性点接地	154
第三节 保护接地	165
第五章 电力系统短路	171
第一节 概述	171
第二节 由“无限大”电力系统供电的简单电力网三相短路电流的计算	172
第三节 由同步发电机供电的简单电力网三相短路电流的计算	177
第四节 标么值算法与网络化简	184

第五节	对称分量法	192
第六节	不对称故障的序网图	195
第七节	电力系统中各元件的负序电抗和零序电抗	199
第八节	单相接地(短路)计算	217
第九节	两相短路计算	224
第十节	两相接地短路计算	226
第十一节	电力系统的非全相运行计算简介	230
	习题	233
第六章	电力系统稳定	236
第一节	稳定性问题的提出及其基本概念	236
第二节	电力系统的静态稳定	237
第三节	电力系统的暂态稳定	241
第四节	电力系统振荡与失步时的运行特点	249
第七章	发电厂及变电所的二次回路	252
第一节	二次回路的基本概念	252
第二节	互感器	255
第三节	操作电源概述	270
第四节	断路器的控制和信号回路	271
第五节	闪光装置	274
第六节	信号装置	274
第八章	电力系统继电保护	279
第一节	继电保护的基本知识	279
第二节	电力网相间短路的电流保护	281
第三节	方向过电流保护	291
第四节	电力网接地短路的零序电流保护	295
第五节	距离保护	302
第六节	差动保护	308
第七节	高频保护	313
第八节	自动重合闸	317
第九节	电力变压器的继电保护	321
第九章	远距离输电	327
第一节	超高压远距离输电的发展概况	327
第二节	远距离输电线路的自然功率和输送容量	328
第三节	超高压远距离输电线路的并联补偿和串联补偿	331
第四节	远距离输电线路的环境保护	334
第五节	超高压直流输电简介	340
附 录		345
表 1	钢芯铝绞线的结构及主要技术参数	345
表 2	用钢芯铝线敷设的架空线路的感抗和电阻	346
表 3	用钢芯铝线敷设的架空线路的电纳	346

第一章 电力系统概述

第一节 概 述

电力工业是国民经济的重要部门之一，它既为现代工业、现代农业、现代科学技术和现代国防提供必不可少的动力，又和人民群众的日常生活有着密切的关系。电力是工业的先行。电力工业的发展必须优先于其他的工业部门，整个国民经济才能不断前进。革命导师列宁曾经指出：“只有当国家实现了电气化，为工业、农业和运输业打下了现代大工业的技术基础的时候，我们才能彻底取得胜利”（列宁全集31卷468~469页）。因此，电力工业的发展无疑与我国的社会主义建设和实现四个现代化是有着极其密切的联系。

据记载，世界上第一个发电厂是于1882年在美国纽约市建立的，机组容量只有30千瓦。此后，随着生产和科学技术的进步，电力工业有了迅速的发展，特别是近二、三十年发展得更快。据统计，到1976年底为止，全世界的发电厂的总装机容量已达16亿4千万千瓦。从世界各国经济发展的经验来看，国民经济每增长1%，电力工业就要求增长1.3~1.5%左右。因此，一些工业发达的国家几乎是每7~10年（个别的为5~6年）装机容量就要增长一倍。

我国具有极其丰富的能源资源。据最新调查，全国水能资源的蕴藏量为68000万千瓦（其中可开发利用的约为37000万千瓦），居世界首位。此外，煤、石油、天然气等资源也很丰富。这些优越的自然条件为我国电力工业的发展提供了良好的物质基础。但是，旧中国的电力工业却是非常落后的，到解放前夕，全国的总发电能力还不到200万千瓦。解放后，在党和政府的领导下，我国的电力工业有了很大的发展。解放初期，我国的电力工业居世界的第二十五位，经过三十年建设，1979年全国发电设备的总装机容量已达5200万千瓦以上，年发电量达2819.5亿度。目前，我国的电力工业已跃升到世界的第七位。我们已经在黄河上建起了刘家峡等大型水力发电厂，长江上的葛洲坝水力发电厂也正在建设中，装机容量在25万千瓦以上的大型发电厂全国共有六十多个，中小型发电厂则是星罗棋布，遍布全国。我们已建成了330千伏超高压输电线路，500千伏级的超高压输电线路也即将投入运行，所有这些都说明了我国电力工业建设的伟大成就。

但是，我国的电力工业与世界上一些发达国家相比仍有相当大的差距，按每人平均的用电量来说还是相当落后的，即使从国内经济建设来看，也未能很好地起到先行工业的作用，不能满足国民经济发展和人民生活的需要。所以，摆在我国电力工作者面前的一个重要任务就是在党和政府的领导下，充分开发利用我国丰富的能源资源、大力加速电力工业的建设，为在本世纪内实现我国的四个现代化而做出应有的贡献。

第二节 电力系统的组成和特点

一、电力系统的组成

在电力工业发展的初期，发电厂都建设在用户附近，规模很小，而且是孤立运行的。

随着生产的发展和科学技术的进步,用户的用电量和发电厂的容量都在不断增大。由于电能生产是一种能量形态的转换,发电厂必须建设在动力资源所在地,而蕴藏动力资源的地区与电能用户之间又往往隔有一定距离。例如,水能资源集中在河流落差较大的偏僻地区,热能资源则集中在盛产煤、石油、天然气的矿区;而大城市、大工业中心等用电部门则由于原材料供应、产品协作配套、运输、销售、农副产品供应等原因以及各种地理、历史条件的限制,往往与动力资源所在地相距较远,为此就必须架设输电线路将电能送往负荷中心。同时,要实现大容量、远距离输送电能,还必须建设升压变电所和架设超高压输电线路。而当电能输送到负荷中心后,则必须经过降压变电所降压,再经过配电线路,才能向各类用户供电。

随着生产的发展和用电量的增加,发电厂、输电线路、配电线路、升压变电所、降压变电所等的数目都将不断增加。当把一个个地理上分散在各处、孤立运行的发电厂通过输电线路、变电所等而相互连接形成一个“电”的整体以供给用户用电时,就形成了现代的电力系统。换句话说,电力系统就是指由发电厂、变电所、输配电线路直到用户等在电气上相互连接的这种整体[●]。它包括了从发电、输电、配电直到用电这样一个全过程。另外,还把由输配电线路以及由它所联系起来的各类变电所总称为电力网络(简称电网),所以,电力系统也可以看作是由各类发电厂和电力网以及用户所组成的。

图1-1是现代高压电力系统的一个例子,它具有较大容量的水力发电厂、火力发电厂和热电厂。图中的水力发电厂由于容量较大、输电距离较远,所以把电压升高到220千伏后经线路送出。火力发电厂-1的电经升压至110千伏后由线路送电到变电所-3,并通过线路与110千伏电网相联系。所谓热电厂是指装有供热式汽轮发电机组的发电厂,它除了

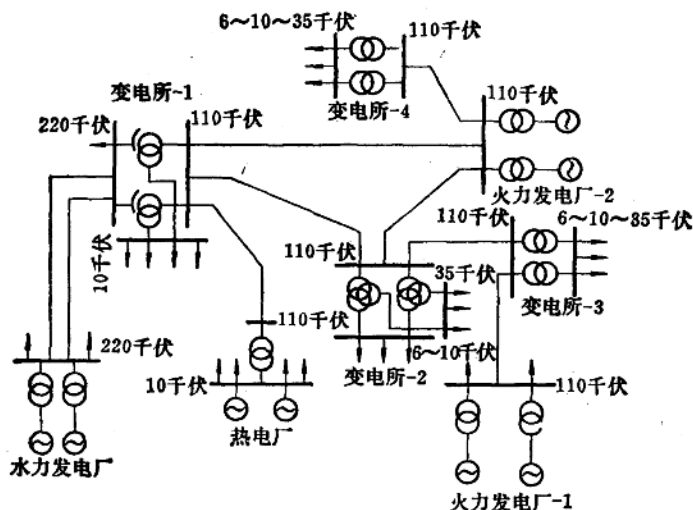


图 1-1 高压电力系统

● 按以往说法还有“动力系统”和“电力系统”的区别。动力系统还包括发电厂的热力部分和水力部分,而电力系统只包括从发电机起的发电厂电气部分以及变电所、线路、用户等,由于本课的重点是电气部分,故本书着重提出电力系统的概念。

发电外，还兼向附近的工厂供热，这样做可以提高热能利用效率。由于它要兼供热，所以总是把热电厂建在用户附近，它除了用10千伏电压供给附近地区用电外，还通过升压变压器与110千伏电网相联系以进行功率交换。图中由变电所-1和变电所-2和火力发电厂-2以及高压线路所构成的110千伏环形电力网是本系统的主要电力网，它是联系发电厂和用户的核心部分。

为了要进一步了解电力系统的组成，就必须了解发电厂、电力网和变电所的组成、分类等情况。关于发电厂的类型及其生产过程将在下一节中介绍。这里先简单介绍一下电力网和变电所的类型。

电力网按其供电范围的大小和电压等级的高低可分为地方电力网、区域电力网以及超高压远距离输电网络等三种类型。地方电力网是指电压不超过35千伏、输电距离在几十公里以内的电力网，主要是一般城市、工矿区、农村的配电网络。区域电力网则把范围较广地区的发电厂联系在一起，而且输电线路也较长、用户类型也较多。目前我国，区域电力网主要是电压为110~220千伏级的电力网，基本上各省（区）都有。超高压远距离输电网络主要由电压为330千伏及以上的远距离输电线路所组成，它担负着将远区发电厂的功率送往负荷中心的任务，同时往往还联系几个区域电力网以形成跨省（区）的，甚至国与国之间的联合电力系统。

下面再谈谈变电所的类型。电力网中的变电所除了升压、降压的分类方法外，还可分为枢纽变电所、中间变电所和末端变电所（又名终端变电所）等。枢纽变电所一般都容量较大，处于联系电力系统各部分的中枢位置，地位重要，如图1-1中的变电所-1和变电所-2都属于这种类型。中间变电所则处于发电厂和负荷中心的中间，从这里可以转送或抽引一部分负荷，如图1-1中的变电所-3。终端变电所一般都是降压变电所，它只是负责供应一个局部地区的负荷而不承担转送功率，如图1-1中的变电所-4。

二、电力系统的特点及对电力系统的要求

实践证明，当各孤立运行的发电厂通过电力网连接起来形成并联运行的电力系统后，将在技术经济上带来很大好处，主要如下：

1. 减少系统中的总装机容量 由于负荷特性、地理位置等的不同，电力系统中由各个孤立运行的发电厂供电的最大负荷并不是同时出现的，因此系统的综合最大负荷常小于各个发电厂单独供电时各最大负荷的总和。各孤立发电厂所供负荷的特征愈不同，则系统综合负荷的降低将愈显著。由于系统综合最大负荷的降低，相应地可减少系统中的总装机容量。

2. 合理利用动力资源，充分发挥水力发电厂的作用 如果没有电力系统，很多能源就难以得到充分利用。例如，水力发电厂的出力决定于河流的来水情况，而水流情况却是多变的，有时相差将极其悬殊，很难与电力负荷的需要相适应。对于孤立运行的水力发电厂，如果水库容积不大，则在枯水季节出力将不足，而在丰水季节却要弃水。当把水力发电厂并入电力系统以后，由于系统中有火力发电厂，它们的运行情况就可以相互配合、相互调剂。在丰水季节，可以让水力发电厂尽量多发电以减少火力发电厂的负荷、节约燃

料；而在枯水季节则让水力发电厂担负尖峰负荷（即担负负荷的变化部分），火力发电厂则担负固定的基本负荷。这样既充分利用了水能资源，又提高了火力发电厂的运行效率，降低了煤耗，从而提高了整个系统的经济性。

3. 提高供电的可靠性 通常，孤立运行的发电厂必须单独装设一定的备用容量，以防止机组检修或事故时中断对用户的供电。但当连成电力系统后，如采用同样比例的备用容量，则备用机组台数较多，几台机组同时发生故障的机会很少，而且不同发电厂之间在事故时还可以相互支援，因而可靠性较高。

4. 提高运行的经济性 除了前述可以充分利用动力资源外，在电力系统中还可以通过在各发电厂之间合理地分配负荷，使全系统的电能成本达到最小，这样就显著地提高了运行的经济性。

但是，由于电能生产本身所固有的特点以及连成电力系统后所出现的新问题，决定了电能的生产、输送、分配和使用的过程与其它的工业部门有着许多完全不同的特点，其中主要有：

1. 电能的生产和消费是在同一时间实现的 这就是说电能是不能贮存的，每时每刻系统的发电量取决于同一时刻用户的用电量。这是电能生产的最大特点。在其他工业部门中，一般都可以将成品或半成品累积起来，从而使生产中各工序的相互依赖关系减少，产销关系易于调节平衡。从电能不能贮存的这个特点出发，在运行时就要求经常保持电源和负荷之间的功率平衡；在规划设计时则要求确保电力先行，否则其他工厂即使建成也无法投产。再者，由于发电和用电同时实现，还使得电力系统的各个环节之间具有十分紧密的相互依赖关系，不论变换能量的原动机或发电机，或输送、分配电能的变压器、输配电线路以及用电设备等，只要其中的任何一个元件故障，都将影响到电力系统的正常工作。例如，1965年美国东部电力系统曾发生过一次大面积的停电事故，给纽约等大城市的生产和生活带来了很大的影响，据报导这次事故是由于一个继电器的误动作而引起的。

2. 电能生产与国民经济各部门和人民生活有着极为密切的关系 现代工业、农业、交通运输业等都广泛用电作为动力来进行生产，可以把电力系统视为各工业企业共同的“动力车间”。此外，在人民的日常生活中还广泛使用着各种电器用具。随着现代化的进展，各部门中电气化的程度将愈来愈高。因而，电能供应的中断或不足，不仅将直接影响各个部门的生产，造成人民生活紊乱，在某些情况下甚至会造成政治上的损失或极其严重的社会性灾难。例如，1977年7月美国所发生的第二次纽约大停电事故，就给国民经济带来了巨大的损失。据估计，停电所造成的直接经济损失为5500万美元，而间接经济损失竟达3亿美元左右。

3. 过渡过程十分短暂 由于电是以光速传播的，所以运行情况发生变化所引起的电磁方面和机械-电气方面的变化过程是十分迅速的。电力系统中的正常操作，如变压器、输电线路的投入运行或切除都是在极短时间内完成的；用户的电力设备如电动机、电热设备等的启用、停止或增减负荷的过程也是很快的；电力系统中出现的故障，如短路故障、发电机失去稳定等过程也是非常短暂的，在这些过程中往往要用微秒或毫秒来计量时间。因此，不论是正常运行情况变化时所进行的调整和切换等操作，或者故障时的切除故障或为

把故障限制在一定范围内以迅速恢复供电所进行的一系列调整和切换等操作，仅仅依靠人工操作是不能达到满意效果的，或甚至是不可能的。必须采用各种自动装置来迅速而准确地完成各项调整和操作任务。电力系统的这个特点给运行、操作带来了许多复杂的课题。

4. 电力系统是不断成长壮大的系统 由于工农业生产和人民生活的电气化程度日益提高，电力系统的容量势必逐年增大。前几年世界一些工业发达国家的年电能增长率平均为6~7%，也就是说，十年左右可以翻一番。而个别发展速度最快的国家，年增长率甚至达到13~14%。根据我国实现四个现代化的设想，也要求电力工业必须尽快发展。对此，在系统规划设计与运行管理时都必须予以充分注意并事先作出足够的估计，否则将不能适应形势的发展。

5. 电力系统的地区性特点较强 由于各个电力系统的电源结构与资源分布情况和特点有关，而负荷结构却与工业布局、城市规划、电气化水平等有关，至于输电线路的电压等级、线路配置等则与电源与负荷间的距离、负荷的集中程度等有关，因而各个电力系统的组成情况将不尽相同，甚至可能很不一样。例如，有的系统是以水力发电厂为主，电源与负荷相距远，联系弱；而有的系统则是以火力发电厂为主（或完全没有水力发电厂），电源与负荷距离近、联系紧密等等。因而，在作系统规划设计与实施运行管理时，必须针对本系统特点从实际出发来进行，如果盲目搬用外地系统或外国系统的一些经验而不加以具体分析，则必将违反客观规律，酿成错误。

从电力系统的上述特点出发，根据电力工业在国民经济中的地位和作用，决定了对电力系统有下列基本要求：

1. 最大限度地满足用户的用电需要，为国民经济的各个部门提供充足的电力 为此，首先应按照电力先行的原则作好电力系统发展的规划设计，认真搞好电力工业建设以确保电力工业的建设优先于其他的工业部门，竭力避免因缺电而使工业企业不能充分发挥其生产能力。其次，还要加强现有设备的维护，以充分发挥潜力，防止事故的发生。

2. 保证供电的可靠性 这是电力系统运行中的一项极为重要而又经常的任务。如前所述，供电的中断可能造成的后果往往是较为严重的，而造成供电中断的原因很多，例如可能是由于电力系统中某些元件发生事故（如绝缘击穿所致的短路，雷击，误操作等），也可能是系统中各发电厂之间并联运行的稳定性遭到破坏而引起系统运行的全面瓦解。运行经验表明，电力系统中的整体性事故往往是由于局部性事故扩大而造成的。所以，为保证供电可靠性，首先要保证系统各元件的工作可靠性，这就需要搞好设备的正常运行维护和定期的检修试验。其次，要提高运行水平，防止误操作的发生，在事故发生后应尽量采取措施以防止事故扩大等等。

应当指出，在目前要绝对防止事故的发生是不可能的，而各种用户对供电可靠性的要求也是不一样的。供电中断后，有的会造成恶劣的政治影响，有的会影响人身和设备安全，有的则影响较小。因此，必须根据实际情况区别对待这些不同类型的用户。对于某些重要用户（如某些矿井，连续生产的化工厂，冶炼厂等），当停电会带来人身危险、设备损坏和产生大量废品等后果时，则在任何情况下都必须保证供电不发生中断（计划停电除外）。对于其他用户则可以容许不同程度的短时停电。通常，根据用户对可靠性的要求，

可以将用户分为下列三类:

(1)一类用户 如果对此类用户停止供电,就会带来人身危险,设备损坏,产生大量废品,长期破坏生产秩序,给国民经济带来巨大的损失。

(2)二类用户 如果对此类用户停止供电,就会造成大量减产,工人窝工,城市公用事业和人民生活受到影响等。

(3)三类用户 指不属于第一类、第二类的其他用户,短时停电不会带来严重后果,如工厂附属车间用电,小城镇、农村的用电等。

当系统发生事故,出现供电不足的情况时,就应当首先切除三类用户的用电,以保证一、二类用户的用电。通常,对一类用户都设置有两个或两个以上的独立电源,以便在任一电源故障时,对用户的供电都不致中断。

3.保证电能的良好质量 主要是维持电压和频率的偏差不超出一定的范围,详见本章第四节。

4.保证电力系统运行的经济性 要使电能在生产、输送和分配过程中效率高、损耗小以期最大限度地降低电能成本。具体来说,就是要实现发电厂和电力网的经济运行,最大限度地降低电厂的煤耗(或水耗)、厂用电率以及线路损耗等。电能成本的降低不仅意味着能量资源的节省,还将影响到各用电部门成本的降低,因而对整个国民经济所带来的好处是很大的。而要实现经济运行,除了进行合理的规划设计之外,还须对整个系统实施最佳经济调度。

把上述各点归纳起来可知:保证对用户不间断地供给充足、优质而又经济的电力,这就是电力系统的基本任务。

第三节 发电厂的类型及其生产过程简介

目前发电厂的类型都是根据能源来分类的。以往,电力系统中主要是水力发电厂和火力发电厂,从二十世纪六十年代以来,原子能发电厂(又称核能发电厂)的建设逐年增加,在一些国家的电力系统中已占据有相当的比重。下面将分别介绍这三类发电厂的大致情况。

一、火力发电厂

火力发电厂是以煤、石油、天然气等作为燃料,燃料燃烧时的化学能被转换为热能,再借助汽轮机等热力机械将热能变换为机械能,并由汽轮机带动发电机将机械能变为电能。迄今为止,在世界上的绝大多数国家中,火力发电厂在系统中所占的比重都是较大的,据统计,全世界发电厂的总装机容量中,火力发电厂占了四分之三以上。

火力发电厂所用燃料种类较多。由于煤素称“黑色的金子”,优质煤还是冶金、化工等部门所必需,我国目前的方针是尽量利用低质煤来发电。在世界上其他一些国家由于燃料供求关系等原因,也有不少火力发电厂主要是用石油或天然气作燃料的。我国的煤矿资源极其丰富,根据我国的能源政策,在相当一段时期内,火力发电厂的燃料将主要用煤。

火力发电厂按其作用来分有单纯发电的和既发电同时又兼供热的这样两种类型，前者即指一般的火力发电厂，后者称为供热式火力发电厂（或称热电厂）。一般火力发电厂应尽量建设在燃料基地或矿区附近，将发出的电用高压线路送往负荷中心，这样既避免了燃料的长途运输，提高了能量输送的效益（燃料中的灰分、杂质可就地处理而不必为此耗费运输力量），还防止了对大城市周围地区的环境污染。通常把这种火力发电厂称为“矿口电厂”，这是今后建设大型火力发电厂（特别是烧低质煤的火力发电厂）的主要方向。热电厂的建设是为了提高热能的利用效率，它由于要兼供热，所以必须建在大城市或工业区的附近。这类发电厂目前在我国的许多城市都有。

一般火力发电厂多采用凝汽式汽轮发电机组，故又称凝汽式发电厂，其生产过程如图1-2所示，大致如下。

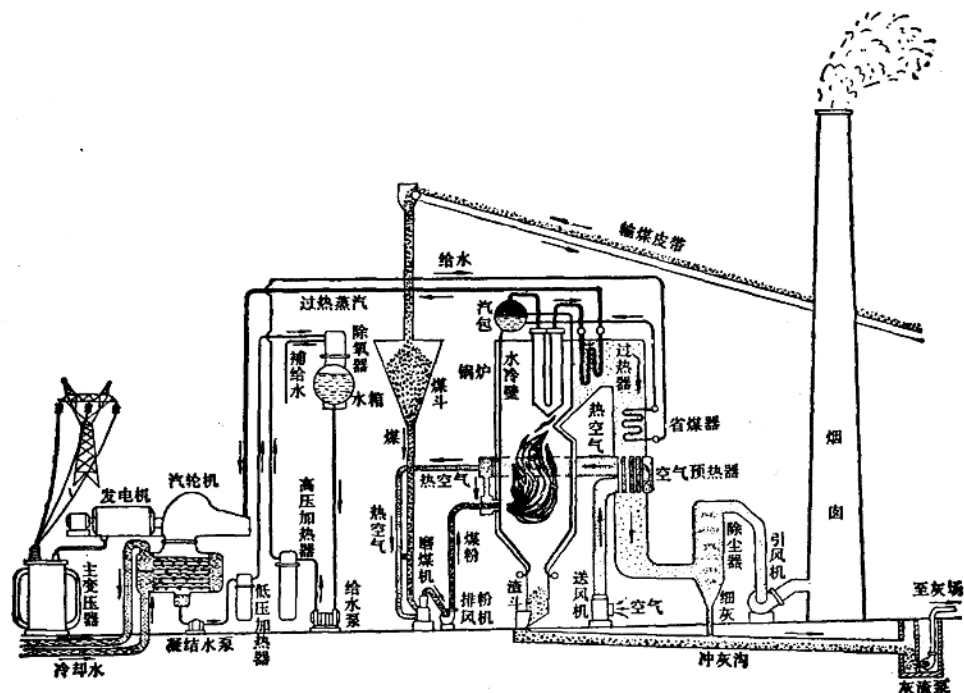


图 1-2 凝汽式火力发电厂生产过程示意

煤先由输煤皮带运送到锅炉房的煤斗中，再由煤斗进入磨煤机被磨成煤粉，在热空气的输送下，经喷燃器送入燃烧室内燃烧。助燃空气由送风机先送入空气预热器加热为热空气，其中一部分热空气进入磨煤机以干燥和输送煤粉，另一部分热空气则进入燃烧室助燃。在燃烧室内燃料着火燃烧并放出热量，其热量的一部分将传给燃烧室四周的水冷壁，并在流过水平烟道内的过热器及尾部烟道内的省煤器、空气预热器时，继续把热量传给蒸汽、水和空气；而被冷却后的烟气则经除尘器除去飞灰，由引风机从烟囱排出大气。另外，通常用水把由锅炉下部排出的灰渣和由除尘器下部排出的细灰冲到灰渣泵房，经灰渣泵排往贮灰场。

在水冷壁中产生的蒸汽在流经过热器时进一步吸收烟气的热量而变为过热蒸汽，然后通过主蒸汽管道被送入汽轮机。进入汽轮机的蒸汽膨胀做功，推动汽轮机的转子旋转，将热能变为机械能，汽轮机带动发电机旋转，将机械能变为电能。在汽轮机内作完功的排汽将进入凝汽器内放出汽化热而凝结为水，凝结水再由凝结水泵经由低压加热器加热送入除氧器。除氧后的水由给水泵打入高压加热器加热进一步提高温度后再进入锅炉。以后又重复上述过程，并不断地生产出电能。

将汽轮机的排汽冷却为水是由循环水泵把冷却水送入凝汽器来实现的。冷却水经循环水泵打入凝汽器的循环水管中，在吸收了蒸汽的热量后，又经排水管排出，从而将热量带走。通常，由于循环水系统带走很大一部分热能，因此一般凝汽式发电厂的效率是不高的，目前比较先进的指标也只达到37~40%。

为了提高这种发电厂的效率，人们自然会想到能否尽量减少被循环水所带走的热能，而把作过功的蒸汽中所含的热能也充分利用起来，这就是发展供热式发电厂的原因。供热式发电厂与凝汽式发电厂不同的地方只是在汽轮机的中段抽出了供热能用户的蒸汽，而这些蒸汽实际上已经在汽机中作了一部分功，再把这些蒸汽引到一个给水加热器去加热供热用户的用水，或把蒸汽直接送给热力用户。这样一来，进入凝汽器内的蒸汽量就大大减少了，于是循环水所带走的热量消耗也就相应地减少，从而提高了热效率。据报导，现代化大型供热式电厂的效率可达60~70%以上，从供电和供热的全局来看，可节约燃料20~25%左右。由于供热网络不能太长，所以供热式发电厂总是建设在热力用户附近。此外，供热式发电厂的发电出力还与热力用户的需热情况有关。当需热量多时，发电厂必须相应多发电；需热量少时，则发电出力也减少。因而，这类发电厂在电力系统中的运行方式远不如凝汽式发电厂灵活。

近年来，火力发电厂发展的主要趋势是采用高温、高压、大容量机组（目前世界上最大机组的容量为130万千瓦）以及建设大容量的火力发电厂，这样可以显著提高火力发电厂的效率。目前世界上最大的火力发电厂容量为440万千瓦，容量在200万千瓦以上的火力发电厂总数已达70个以上。

二、水力发电厂

水力发电厂是利用河流所蕴藏的水能资源来发电，水能资源是最干净、价廉的能源。水力发电厂的容量大小决定于上下游的水位差（简称水头）和流量的大小。因此，水力发电厂往往需要修建拦河大坝等水工建筑物以形成集中的水位差，并依靠大坝形成具有一定容积的水库以调节河水流量，根据地形、地质、水能资源特点等的不同，水力发电厂的型式是多种多样的。

水力发电厂的生产过程要比火力发电厂简单，如图1-3所示。由拦河坝维持在高水位的水，经压力水管进入螺旋形蜗壳推动水轮机转子旋转，将水能变为机械能，水轮机再带动发电机旋转，于是机械能又变成了电能。而作完功的水则经过尾水管排往下游，发电机发出的电则经变压器升压后由高压输电线送至用户。由于水力发电厂的生产过程较简单，故所需的运行维护人员较少，且易于实现全盘自动化。再加之水力发电厂不消耗燃料，所

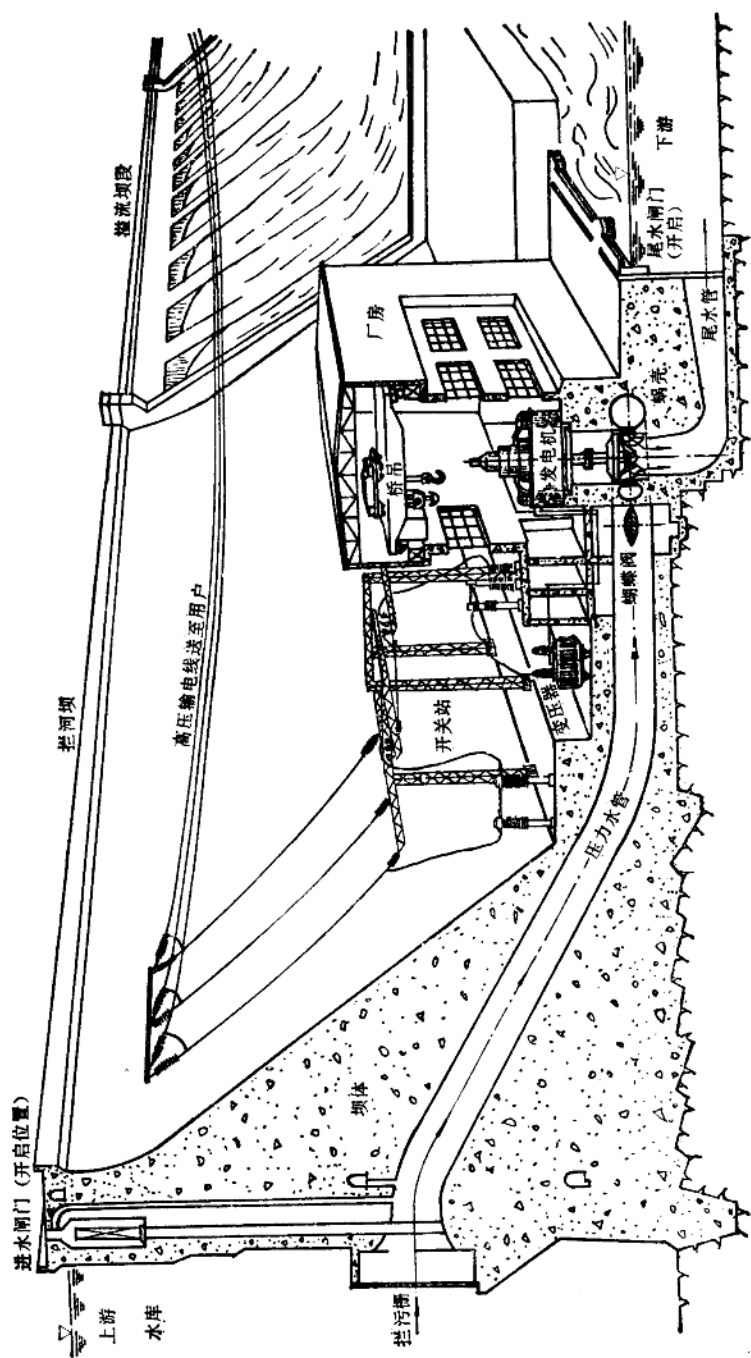


图 1-3 水力发电厂生产过程示意

以它的电能成本要比火力发电厂低得多。此外，水力机组的效率较高，承受变动负荷的性能较好，故在系统中的运行方式较为灵活；水力机组起动迅速，在事故时能有力地发挥其后备作用。再者，随着水力发电厂的兴建往往还可以同时解决发电、防洪、灌溉、航运等多方面的问题，从而实现河流的综合利用，使国民经济取得更大的效益。水力发电厂的另一个优点是不像火力发电厂、原子能发电厂那样存在环境污染问题。但是，由于水力发电厂需要建设大量的水工建筑物，所以相对于火力发电厂来说，建设投资较大，工期较长，占用劳力也较多。特别是水库还将淹没一部分土地，给农业生产带来一定不利影响。加之水力发电厂的运行方式还受气象、水文等条件的影响有丰水期、枯水期之别，也给电力系统的运行带来一定不利因素。这些都是水力发电厂存在的问题。

如前所述，我国具有极其丰富的水能资源，但根据新近的统计已开发的仅占可开发总量的4.3%，而世界上一些工业发达国家的水能资源却已基本开发殆尽。目前我国尚有一些自然条件优越，投资少、收效快的水能资源急待开发。为了满足我国的社会主义建设和实现四个现代化对电力的需要，中央已决定今后将把开发我国丰富的水能资源放在优先位置上。据规划，今后准备在金沙江、长江干流、黄河上游、大渡河、澜沧江、沅江等河流上建设十来个大型水力发电基地，并以这些基地为中心，依靠超高压输电线路建立起若干个跨省的现代化大电网。在不远的将来我们还将建设举世无双的长江三峡水力发电厂（计划装机2500~3000万千瓦），实现“高峡出平湖”的宏伟理想，并以三峡水力发电厂为中心，南连广州、北接京津、西达重庆、东至上海，形成一个全国性的大电力系统，为我国的四个现代化事业提供充足、经济、稳定的电力。

三、原子能发电厂

原子能的利用是现代科学技术的一项重大成就。从四十年代原子弹的出现起，原子能就逐渐被人们所掌握并陆续被用到工业、交通等许多部门，从而为人类提供了一种新的巨大的能源。

由于煤、石油等燃料的贮量有限，它们又是重要的化工原料，加之一些国家的水能资源也已基本开发殆尽，故从五十年代起一些国家就转向于研究原子能发电。从1954年世界上第一个原子能发电厂建成迄今，全世界已有几十个国家先后建成了总共二百多个原子能发电厂，总容量在一亿千瓦以上。而正在建设或已定货的原子能发电厂的总容量更达这个数字的几倍以上。近年来，一些资源贫乏的发达国家由于受到“能源危机”的冲击，迫使他们不得不走原子能发电的道路，这是促使它迅速发展的主要原因。

原子能发电的基本原理是把原子核裂变所产生的原子能转变为热能，将水加热为蒸汽，然后同一般火力发电厂一样，用蒸汽推动汽轮机，再带动发电机发电。原子能发电厂与火力发电厂在构成上的最主要区别是前者用核蒸汽发生系统（反应堆、蒸汽发生器、泵和管道等）来代替后者的蒸汽锅炉。

根据原子反应堆型式的不同，原子能发电厂可分为好几种类型。图1-4为目前使用较广的轻水堆型（包括沸水堆和压水堆）原子能发电厂的生产过程示意图，这种反应堆是用水作为载热剂。在沸水堆内〔见图1-4（甲）〕，水被直接变成蒸汽，它的系统构成较为简

单, 但有可使汽轮机等设备受到放射性污染, 以致使这些设备的运行、维护和检修复杂化。为了避免这个缺点, 可采用图1-4(乙)所示的压水堆。这时, 增设了一个蒸汽发生器, 从反应堆中引出的高温的水在蒸汽发生器内将热量传给另一个独立回路的水使之加热成高温蒸汽以推动汽轮发电机组旋转。由于在蒸汽发生器内二个回路的水是完全隔离的, 所以就不会造成对汽轮机等设备的放射性污染。

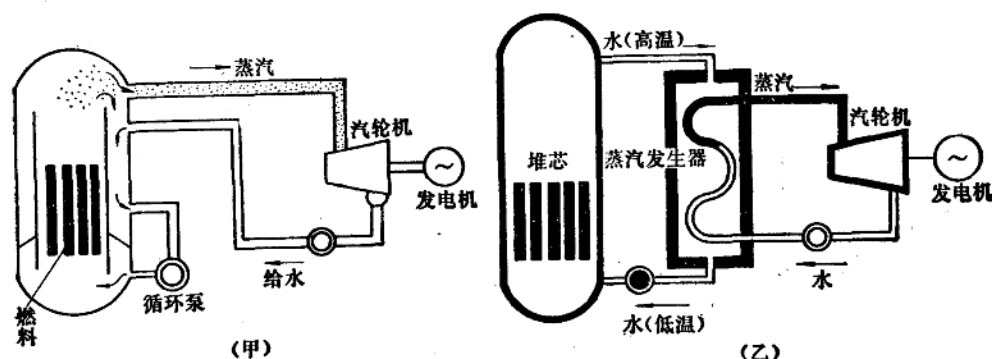


图 1-4 原子能发电厂生产过程示意
(甲)沸水堆型反应堆；(乙)压水堆型反应堆

原子能发电厂的主要优点之一是可以大量节省煤、石油等燃料。例如, 一座容量为50万千瓦的火力发电厂每年至少要烧掉150万吨煤, 而同容量的原子能发电厂每年只要消耗600公斤的铀燃料就够了。可避免大量的燃料运输。原子能发电的另一个特点是燃烧时不需要空气助燃, 所以原子能电厂可以建设在地下、山洞里、水下或空气稀薄的高原地区。此外, 从发电厂的建设投资和发电成本来看, 原子能发电厂所需的固定投资虽较火力发电厂要高, 但长期的燃料费和维护费则比火力发电厂要低, 它的规模愈大则生产每度电的投资费用下降愈快。据国外资料介绍, 如建设一座50万千瓦的发电厂, 则原子能发电厂较之火力发电厂更为合算。目前世界上最大的原子能发电厂的容量已达330万千瓦, 最大的原子能发电机组的单机容量为130万千瓦。

原子能发电厂的主要问题是放射性污染的担心。尽管在发电厂建设时已采取了相应的措施, 但据国外资料介绍, 放射性污染事故仍不断发生, 有的还比较严重。显然, 只有更好地解决了污染的防护问题以及放射性废弃物的处理问题, 原子能发电厂的建设才可能求得更大的发展。目前尽管世界上对原子能发电厂的建设(主要是其安全性)存在着争论, 但是在“能源危机”的冲击之下, 对一些资源贫乏的发达国家来说, 别无其它的选择, 唯有继续执行建设原子能发电厂的计划。因此, 预计在今后相当一段时间内, 对原子能发电有关技术的研究, 仍将继续是人们所关注的中心。

第四节 电能的质量指标

如前所述, 电力系统的基本任务就是要保证不间断地供给各种用户以优质而又经济的

电能。通常衡量电能质量的基本指标是电压、频率和波形，特别是前两者更为重要。

一、电 压

电压质量对各类用电设备的安全经济运行都有直接的影响。图 1-5 表示照明负荷的电压特性。从图上可以看出，对照明负荷来说，白炽灯对电压的变化是很敏感的。当电压降低时，白炽灯的发光效率和光通量都急剧下降；当电压上升时，白炽灯的寿命将大为缩短。

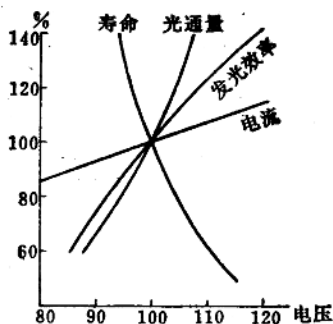


图 1-5 照明负荷（白炽灯）的电压特性

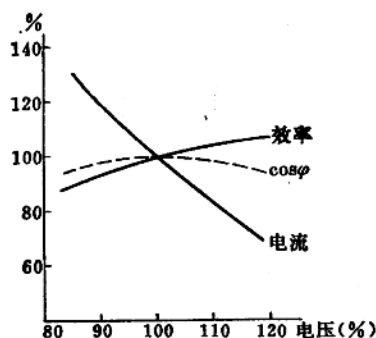


图 1-6 输出功率一定时异步电动机的定子电流、功率因数和效率与电压的关系
(图中的100%表示额定值)

对电力系统的动力负荷来说，目前主要是异步电动机，它的运行特性对电压的变化也是很敏感的。当输出功率一定时，异步电动机的定子电流、功率因数和效率随电压而变化的特性如图1-6所示。从图上可以看出，当端电压下降时，定子电流增加很快。这是由于异步电动机的最大转矩是与其端电压的平方成正比的，当电压降低时，电机转矩将显著减小，以致转差增大，从而使得定子、转子电流都显著增大，导致电动机的温度上升，甚至可能烧毁电动机。反之，当电压过高时，对于电动机、变压器一类具有激磁铁芯的电气设备而言，随着电压的提高，铁芯磁密将增大以致饱和，从而激磁电流与铁耗都大大增加（这种状态称为过激磁）。这样将使电机过热，效率降低，波形变坏，甚至可能产生高频谐振。

对电热装置来说，这类设备的功率也与电压的平方成正比，显然过高的电压将损伤设备，过低的电压则达不到所需要的温度。

此外，对电视、广播、电传真、雷达等电子设备来说，它们对电压质量的要求更高。电子设备中的各种电子管、半导体元件、磁芯装置等都是在一一定的特性曲线下工作的，电压过高或过低都将使特性严重改变而影响正常运行。例如，对收音机与电视机来说，电压过高将烧毁，电压过低将影响灵敏度与收听（看）效果。

由于上述各类用户的工作情况均与电压的变化有着极为密切的关系，故在运行中必须规定电压的容许变化范围，这也就是电压的质量标准。据统计，目前世界上许多国家根据运行实践所规定的电压容许变化范围均为额定电压的 $\pm 5\%$ ，少数国家也有高到 $\pm 10\%$ 或低到 $\pm 3\%$ 的。

按“全国供用电规则”的规定，我国目前所规定的用户处的容许电压变化范围为：

1. 由35千伏及以上电压供电的用户以及对电压质量有特殊要求的用户 $\pm 5\%$ 。
2. 由10千伏以下的高压供电的用户和低压电力用户 $\pm 7\%$ 。
3. 低压照明用户 $+5\% \sim -10\%$ 。

由于电力网中存在电压损失，为了保证电压质量合乎标准，需要采取一定的调压措施，关于这方面的情况在第二章中将进一步加以介绍。

二、频 率

频率的偏差同样将严重影响电力用户的正常工作。对电动机来说，频率降低将使电动机的转速下降，从而使生产率降低，并影响电动机的寿命；反之，频率增高将使电动机的转速上升，增加功率消耗，使经济性降低。特别是某些对转速要求较严格的工业部门（如纺织、造纸等），频率的偏差将大大影响产品质量甚至产生废品。另外，频率偏差对发电厂本身将造成更为严重的影响。例如，对锅炉的给水泵和风机之类的离心式机械，当频率降低时其出力将急剧下降，从而迫使锅炉的出力大大减小，甚至紧急停炉，这样就势必进一步减少系统电源的出力，导致系统频率进一步下降。因此，如果系统频率急剧下降的趋势不能及时被制止，势将造成恶性循环以致整个系统发生崩溃。

此外，频率的变化还影响到其他一些用户，如影响电钟的正确使用及其它电子器械的精确度等等。

目前国外多数国家主张对频率变化的容许偏差应规定为不超过 ± 0.5 赫（周/秒），也有少数国家主张规定为不超过 $\pm 0.1 \sim 0.2$ 赫的。

我国的技术标准规定频率变化的容许偏差为 ± 0.5 赫。

为了保证电力系统的频率变化范围不超过规定值，首先应维持系统的有功功率平衡，其次还要采取相应的调频措施。

三、波 形

通常，要求电力系统的供电电压（或电流）的波形应为较严格的正弦波。为此，要求发电机首先发出符合标准的正弦波形电压。其次，在电能输送和分配过程中不应使波形产生畸变（例如，当变压器的铁芯饱和时，或变压器无三角形接法的线圈时，都可能导致波形畸变）。此外，还应注意消除电力系统中可能出现的其他谐波源（如整流装置，输电线的电晕等）。

当电源波形不是较严格的正弦波时，必然包含着各种高次谐波成分，这些谐波成分的出现将大大影响电动机的效率和正常运行，还可能使系统产生高次谐波共振而危及设备的安全运行。此外，谐波成分还将影响电子设备的正常工作并造成对通讯线的干扰以及其他不良后果等等。

通常，保证严格的波形的问题在发电机、变压器等的设计制造时即已考虑并采取了相应的措施。因此，只要在运行时严格遵照有关的规程，则保证波形质量是不成多大问题的。但是，随着电力系统的发展和扩大，还要注意新出现的一些谐波源并及时采取措施加