

ELECTRICAL ENGINEERING

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANLI XITONG
FENXI JICHU

电力系统 分析基础

韦钢 编

3



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHI WU WU NIU GUOHUA JIAOCAI

TM 711

31

DIANLI XITONG
FENXI JICHU

电力系统 分析基础

韦 钢 编
程浩忠 主审



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

全书共十二章，主要内容包括电力系统概述、电力系统的等值电路、简单电力系统潮流分布的计算、复杂电力系统潮流分布的计算、电力系统频率的特性及调整、电力系统电压的管理及调整、同步发电机的基本方程及电磁暂态过程、电力系统三相短路故障的实用计算、电力系统简单不对称短路故障的分析计算、电力系统的机电特性、简单电力系统的静态稳定性、简单电力系统的暂态稳定性等方面的内容。

本书可作为电气工程及其自动化专业本、专科学生的教材，也可供从事电力系统及其自动化工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统分析基础/韦钢编. —北京: 中国电力出版社, 2006
普通高等教育“十一五”规划教材
ISBN 7-5083-4073-6

I. 电… II. 韦… III. 电力系统-高等学校-教材 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 005287 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 2 月第一版 2006 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20.75 印张 503 千字

印数 0001—3000 册 定价 32.00 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)

前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划,该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合,本书为新编教材。

电力系统分析作为电气工程及其自动化专业(电力类方向)的主干课程,理论性强,有一定深度。因此本书在内容上作了一定的取舍,合理把握本课程最基本的理论知识,以够用为度,精减了一些繁琐的公式推导。在编写的过程中,注重严格的理论推导以及研究问题的思路和解决问题的方法,力求使学生知道为什么、怎样做。本书对各章节内容的阐述简明,重点突出,对难点进行解释说明。书中选取了大量典型例题及解题步骤,并附有章节小结,归纳本章内容。每章还配有一定数量的思考题来引导学生领会物理概念,又有较丰富的习题供学生巩固所学知识。

本书由上海电力学院韦钢教授编写。上海交通大学的程浩忠教授担任本书的主审,并提出了一些宝贵的修改意见。在此向程浩忠教授以及本书所引用参考书目的所有作者表示衷心的感谢。

限于编者水平有限,书中难免存在缺点和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2006年1月

目 录

前言

第一章 电力系统概述	1
第一节 电力系统的基本组成	1
第二节 电能的产生	2
第三节 电压的变换和电能的传输	5
第四节 电力网络的接线和电压等级	11
第五节 电力系统负荷	13
第六节 电力系统中性点运行方式	16
第七节 电能的质量指标和电力系统的特点	21
小结	24
思考题与习题	24
第二章 电力系统的等值电路	26
第一节 输电线路的参数及等值电路	26
第二节 变压器的参数及等值电路	32
第三节 发电机和负荷的参数及等值电路	39
第四节 电力系统的等值电路	40
第五节 近似计算时电力系统等值电路的简化	51
小结	54
思考题与习题	55
第三章 简单电力系统潮流分布的计算	57
第一节 概述	57
第二节 电力线路和变压器的功率损耗和电压降落	57
第三节 辐射形网络潮流分布的计算	63
第四节 闭式网络潮流分布的计算	69
第五节 电力网的电能损耗及降低网损的技术措施	84
小结	88
思考题与习题	89
第四章 复杂电力系统潮流分布的计算	92
第一节 电力网络的数学模型	92
第二节 功率方程和节点的分类	94
第三节 牛顿—拉夫逊法潮流分布计算	98
第四节 P-Q 分解法潮流分布计算	108
小结	113
思考题与习题	113

第五章 电力系统频率的特性及调整	116
第一节 概述.....	116
第二节 电力系统的频率特性.....	117
第三节 电力系统的频率调整.....	120
第四节 电力系统有功功率负荷的合理分配.....	127
第五节 火电厂间有功功率的经济分配.....	129
小结.....	133
思考题与习题.....	133
第六章 电力系统电压的管理及调整	136
第一节 电力系统无功功率的平衡.....	136
第二节 电力系统电压的管理.....	140
第三节 电力系统电压的调整.....	142
第四节 频率调整与电压调整的关系.....	155
小结.....	156
思考题与习题.....	157
第七章 同步发电机的基本方程及电磁暂态过程	159
第一节 同步发电机的基本方程.....	159
第二节 同步发电机的参数及等值电路.....	164
第三节 同步发电机突然三相短路的物理分析.....	176
第四节 同步发电机突然三相短路后的定子、转子全电流.....	178
第五节 强行励磁对短路暂态过程的影响.....	186
小结.....	188
思考题与习题.....	189
第八章 电力系统三相短路故障的实用计算	191
第一节 电力系统故障的基本概念.....	191
第二节 无限大容量电源供电系统的三相短路.....	193
第三节 电力系统三相短路电流的实用计算.....	199
第四节 运算曲线法的应用.....	213
小结.....	217
思考题与习题.....	218
第九章 电力系统简单不对称故障的分析计算	221
第一节 应用对称分量法分析电力系统的不对称故障.....	221
第二节 电力系统各元件的序参数及等值电路.....	225
第三节 电力系统的各序等值电路.....	234
第四节 不对称短路故障的分析计算.....	238
第五节 不对称短路时网络中电流和电压的分布.....	254
第六节 电力系统的非全相运行计算简介.....	256
小结.....	262
思考题与习题.....	263

第十章 电力系统的机电特性	266
第一节 电力系统运行稳定性概述	266
第二节 发电机转子运动方程	267
第三节 简单电力系统的功角特性	269
第四节 复杂电力系统的功角特性	276
小结	279
思考题与习题	279
第十一章 简单电力系统的静态稳定性	281
第一节 电力系统静态稳定性的基本概念	281
第二节 小干扰法分析电力系统静态稳定性	285
第三节 调节励磁对电力系统静态稳定性的影响	289
第四节 提高电力系统静态稳定性的措施	293
小结	295
思考题与习题	295
第十二章 简单电力系统的暂态稳定性	297
第一节 简单电力系统暂态稳定性的基本概念	297
第二节 发电机转子运动方程的数值计算	301
第三节 提高电力系统暂态稳定性的措施	308
第四节 电力系统负荷稳定性和电压稳定性概念	312
小结	314
思考题与习题	314
附录 短路电流运算曲线	317
参考书目	321

第一章 电力系统概念

第一节 电力系统的基本组成

发电机把机械能转变为电能，电能经变压器和电力线路传送并分配到用户，在那里经电动机、电炉、电灯等用电设备又将电能转变为机械能、热能、光能等。由这些生产、变换、传送、分配、消耗电能的电气设备(发电机、变压器、电力线路及各种用电设备等)联系在一起组成的统一整体就是电力系统，如图 1-1 所示。

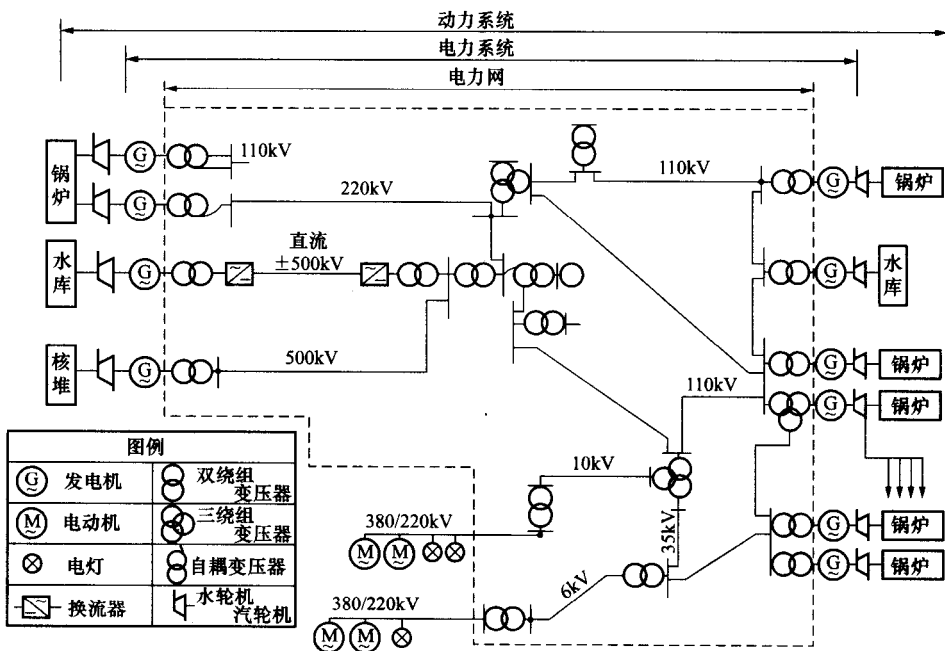


图 1-1 动力系统、电力系统和电力网示意图

与“电力系统”一词相关的还有“电力网”和“动力系统”。前者指电力系统中除去发电机和用电设备外的部分；后者指电力系统和发电厂动力部分的总和。所以，电力网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，三者的关系也示于图 1-1 中。

为了便于分析和讨论，我们常用如图 1-2 所示网络来表示简单电力系统。

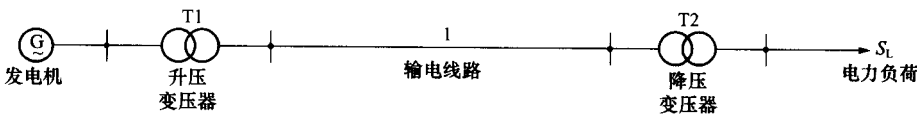


图 1-2 简单电力系统

第二节 电能的生产

煤炭、石油、天然气、水力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的，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不同，发电厂可分成许多类型。例如：燃烧煤、石油、天然气发电的火力发电厂；利用水力能发电的水力发电厂；利用核能发电的核动力发电厂等。

一、火力发电厂

火电厂可以分为凝汽式火电厂和热电厂两大类。凝汽式火电厂是单一生产电能的火电厂；而热电厂则既生产电能，又向热用户提供热能。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，阐述火电厂的生产过程和使用的设备。图 1-3 为一个凝汽式火力发电厂生产过程示意图。

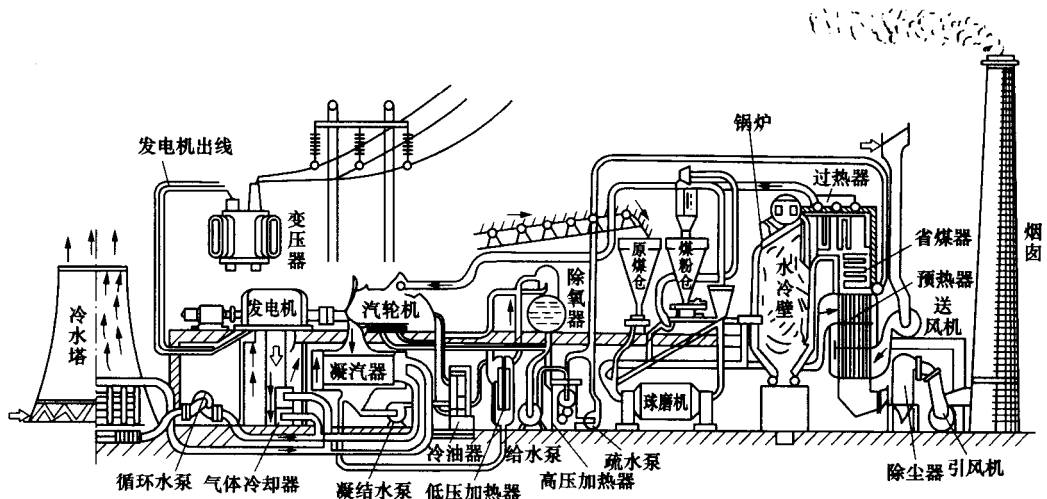


图 1-3 凝汽式火力发电厂生产过程示意图

原煤从煤矿运到电厂后，先存入原煤仓，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，由引风机导入烟囱，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，一部分被送往球磨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介质。净化后的给水，先送进省煤器预热，继而

进入汽包，由汽包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。过热蒸汽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，便可作为介质继续循环使用。

凝汽器需要的冷却水由循环水泵送入，冷却水在凝汽器中吸热之后，流回冷却塔散热，然后，再经循环水泵供给凝汽器。

汽轮机转子转动带动发电机转子旋转，在发电机中又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。

二、水力发电厂

水力发电厂是利用河流所蕴藏的水力能资源来发电，水力能资源是最干净、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较高水位差，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，水力发电厂的形式是多种多样的。

水力发电厂的生产过程要比火力发电厂简单，如图 1-4 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。水轮机转子再带动发电机转子旋转，使机械能变成了电能。而做完功的水则经过尾水管排往下游。发电机发出的电，经变压器升压后由高压输电线路送至用户。

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效益。水力发电厂的另一个优点是不像火力发电厂、核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，所以相对于火电厂来说，建设投资大，工期较长，使用劳力也较多。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。水力发电厂的运行方式还受到气象、水文等条件的影响，有丰水期、枯水期之别，发电出力不如火电厂稳定，也给电力系统的运行带来一定不利因素。

三、核能发电厂

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。与其他类型电厂比较，核电厂建设的速度最快。

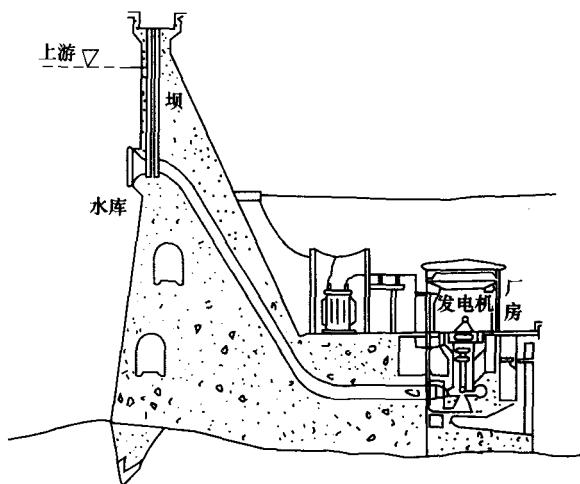


图 1-4 堤坝式水电厂示意图

核能发电的基本原理是这样的：核燃料在反应堆内产生核裂变，即所谓链式反应，释放出大量热能，由冷却剂(水或气体)带出，在蒸汽发生器中将水加热为蒸汽。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。冷却剂在把热量传给水后，又被泵打回反应堆里去吸热，这样反复使用，就可以不断地把核裂变释放的热能引导出来。核能发电厂与火力发电厂在构成上最主要区别是前者用核—蒸汽发电系统(反应堆、蒸汽发生器、泵和管道等)来代替后者的蒸汽锅炉，所以核电厂中的反应堆又被称为原子锅炉。

核能发电厂的主要优点之一是可以大量节省煤、石油等燃料。核能发电厂的另一个特点是燃烧时不需要空气助燃，所以核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。核能发电厂的主要问题是放射性污染。但随着科学技术的发展，核电厂将会变得越来越安全。图 1-5 所示为压水堆核电厂系统原理示意图。

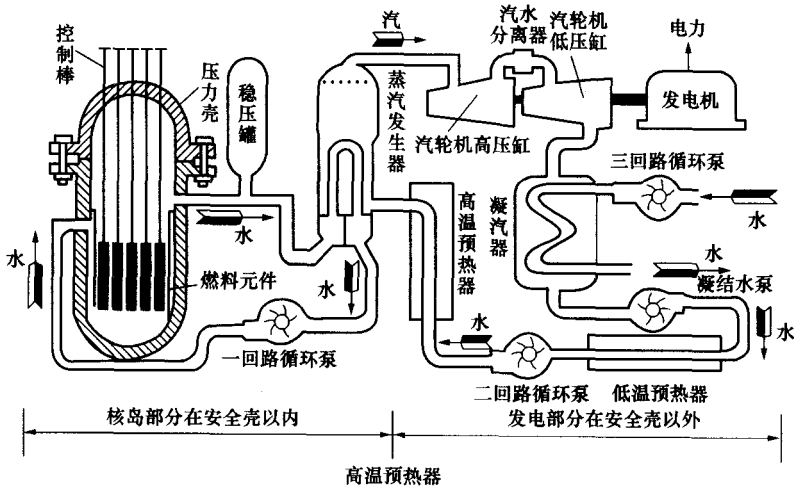


图 1-5 压水堆核电厂系统原理示意图

四、其他能源发电

太阳能发电：太阳能发电方式主要可分为光热发电和光电发电两种方式。光热发电是用反光镜集热产生蒸汽，再用汽轮机来发电；光电发电是用光电池直接把太阳能转化为电能。

风力发电：风力发电是通过风力发电机组将风能转化成机械能，再转化为电能。

潮汐发电：潮汐发电是利用潮汐具有的能量转变成机械能，再转化成电能。

五、发电机

在现代电力工业中，无论以何种能源作为动力，几乎全部都是采用同步交流发电机。电机的电枢置于定子上，励磁绕组置于转子上，做成旋转磁极式。同步发电机的转速 n (r/min) 和系统频率 f (Hz) 之间有着严格的关系，即

$$n = 60f / p \quad (1-1)$$

式中 p ——电机的磁极对数。

根据转子结构型式不同，分为隐极式和凸极式发电机，前者转子没有显露出来的磁极，后者则有显露的磁极。

转子的励磁方式有直流机励磁系统和可控硅励磁系统。后者利用同轴交流励磁机或由同步发电机本身发出的交流电，经可控硅整流后供给转子励磁绕组。直流励磁机有换向问题，

故其制造容量受到限制，所以，在大容量发电机中均采用可控硅励磁系统。

以下简单介绍汽轮发电机和水轮发电机及它们的特点。

汽轮发电机由汽轮机拖动，大、中容量的汽轮发电机的转速均为 3000r/min(50Hz)。由于转速较高，故转子做成隐极式，形状细长。转子本体长度对转子直径的比值约在 3~6.5 之间，随发电机容量的增大而增大。发电机结构无例外是卧式。

早期的汽轮发电机采用空气冷却，第二次世界大战前后出现了氢冷技术，20 世纪 50 年代末期发展了定子、转子双水内冷技术，把冷却技术提高到一个新的水平。功率超过 50MW 的汽轮发电机，广泛采用空气、氢气和水等几种不同冷却介质，分别冷却有关部件。

水轮发电机主要结构型式有卧式和立式两种。通常小容量水轮发电机多采用卧式结构；中容量的采用立式或卧式结构；大容量的则广泛采用立式结构。立式又可分为悬式和伞式两种。发电机推力轴承位于转子上部的称为悬式，位于转子下部的称为伞式。

因为水轮机是属于低速机械，故水轮发电机只得做成多极的，并要求转子具有一定的飞轮转矩 GD^2 ，在电机负荷突然去掉后转速不会升高太快，使自动控制系统来得及动作，减少进水量，以防止转子达到危险转速。低速大型水轮发电机，当定子内径达 15m 时，转子本体长对转子直径的比约为 0.15~0.2。

另外，水电站一般离负荷中心较远，需要通过长距离高压线路与系统联结，因此电力系统对水轮发电机的暂态稳定和静态稳定的要求较高。

水轮发电机一般采用空气冷却，特大容量的水轮发电机采用水冷却较为经济合理。

第三节 电压的变换和电能的传输

发电厂产生的电能向用户输送，输送的电能可以表示为

$$A = Pt = \sqrt{3}UI \cos \varphi t \quad (1-2)$$

式中 P ——输送的有功功率，kW；

t ——时间，h；

U ——输电网电压，kV；

I ——导线中的电流，A；

$\cos \varphi$ ——功率因数。

因为电流在导线中流过，将造成电压降落、功率损耗和电能损耗。电压降落与导线中通过的电流成正比，功率损耗和电能损耗与电流的平方成正比。为提高运行的经济性，在输送功率不变的情况下，提高电压，可以减小电流，从而不仅可以降低电压降落和电能损耗，还可以选择较细的导线，以节约电网的建设投资。当电能输送到负荷中心时，又必须将电压降低，以供各种各样的用户使用。在交流电力系统中，电压的变换(升高或降低)是由电力变压器来实现的。

我国的电能传输方式有两类，主要的是交流输电方式，另一类是直流输电方式。

一、电压的变换

电力变压器的主要作用除了升高或降低电压之外，还能起到将不同电压等级的电网相联系的作用。

电力变压器的结构和工作原理在电机学中已有阐述，此处只作简单论述。变压器是根据电磁感应的原理工作的，其结构是两个(或两个以上)彼此绝缘的绕组绕在一个共同的铁芯上，它们之间有磁的耦合，但没有电的直接联系。当一次绕组接通电源时，一次绕组中就有交流电流流过，并在铁芯中产生交变磁通，其频率和外施电源电压的频率一样。这个交变磁通同时交链一次、二次绕组，根据电磁感应定律可知，在一次、二次绕组中将产生感应电动势，二次绕组有了电动势便可向负荷供电，实现了能量传递。一次绕组和二次绕组电动势的频率都等于磁通的交变频率，即一次绕组外施电压的频率。而一次、二次绕组感应电动势的大小之比等于一次、二次绕组匝数之比。因此，只要改变一次或二次绕组的匝数，便可达到改变输出电压的目的。这就是电力变压器利用电磁感应作用，把一种电压的交流电能转换成频率相同的另一种电压的交流电能的基本原理。

变压器按相数分类：有单相式和三相式，实际生产的电力变压器大多是三相式。但特大型变压器从运输等方面考虑，有制成单相式的，安装好后再接成三相变压器组。

变压器按每相绕组数分类：有双绕组变压器和三绕组变压器。前者联络两个电压等级，后者联络三个电压等级。双绕组变压器的结构是高压绕组在外侧，低压绕组在内侧，这主要从绝缘、调节、出线方便等考虑。三绕组变压器的高压侧也都是放在外侧，对于升压变压器，低压绕组放在中间层，中压绕组放在内层；对于降压变压器，中压绕组一般放在中间层，低压绕组放在内层。这主要是由于中间层的绕组因为互感作用其电抗最小，而升压或降压变压器传输电能的方向有所不同。

变压器按线圈的耦合方式分类：有普通变压器和自耦变压器。电力系统中的自耦变压器一般设置有第三绕组或补偿绕组，它是一个低压绕组。高压、中压绕组之间存在自耦联系，而低压绕组与高、中压绕组之间只有磁的耦合。自耦变压器的损耗小、重量轻、成本低，但其漏抗较小，使短路电流增大。此外，由于高、中压绕组在电路上相通，过电压保护要求自耦变压器的中性点必须直接接地。

变压器的高压侧(及中压侧)除了主接头外，还引出有多个分接头，并装有分接开关(电压高，则电流小，易于实现分接头的调节)，以改变有效匝数，使变比得以改变，进行分级调压。图 1-6 所示为用线电压表示的升压、降压变压器分接头电压的基本情况。根据分接开关是否可以带负荷操作，电力变压器又分为有载调压变压器和不加电压时才可切换的无载调压变压器。

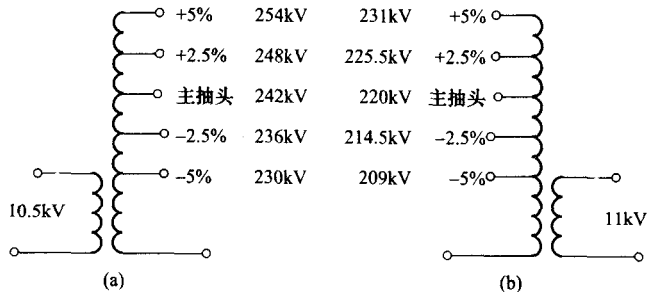


图 1-6 用线电压表示的分接头电压

(a) 升压变压器；(b) 降压变压器

在电力系统中，变压器占据着极其重要的地位，无论是在发电厂或变电所，都可以看到

各种型式和不同容量的变压器，见图 1-7。

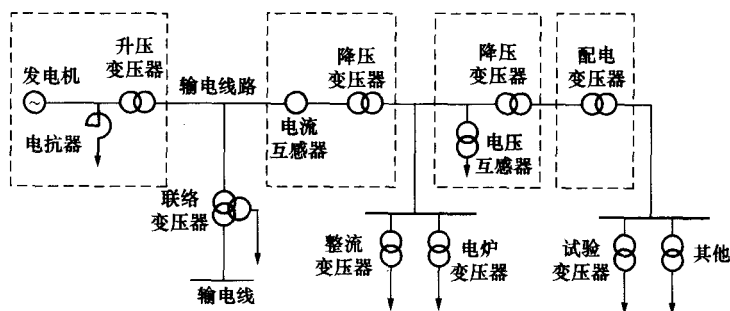


图 1-7 变压器在电力系统中的应用

二、电能的传输

电能的传输是在输电线路上的。输电线路按结构可分为架空线路和电缆线路两类。架空线路是将裸导线架设在杆塔上，电缆线路一般是将电缆敷设在地下（埋在土中或沟道、管道中）或水底。

1. 架空线路

架空线路由导线、避雷线、杆塔、绝缘子和金具等主要元件组成。如图 1-8 所示。

(1) 导线和避雷线。导线和避雷线均采用裸线。导线的作用是传输电能。避雷线的作用是将雷电流引入大地，保护电力线路免受雷击。因此它们都应有较好的导电性能。导线和避雷线均架设在户外，除了要承受导线自身重量、风力、冰雪及温度变化等产生的机械力作用外，还要承受空气中有害气体的化学腐蚀作用。所以，导线和避雷线还应有较高的机械强度和抗化学腐蚀性能。导线常用的材料有铜、铝、铝合金和钢等。

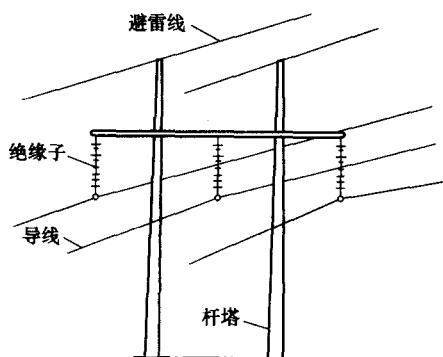


图 1-8 架空线路

裸导线有单股线和由一种材料或由两种材料制成的多股绞线，见图 1-9。由于多股绞线柔性好，机械强度高，便于制造、安装和保管，因此架空线路大多数采用多股绞线。为了增加导线的机械强度、减少架空线路的杆塔数目、节约线路的投资，10kV 以上的线路广泛采用钢芯铝绞线。它是由多股铝线绕在单股或多股的钢导线外层而构成的。铝线是主要载流部分。而机械应力则由钢线和铝线共同承担，这就可以充分利用铝线导电性能好、钢线机械强度高的优点。在 220kV 以上的输电线路中，为了改善输电线路参数和减少电晕损耗，常采用特殊结构的导线，例如扩径导线和每相由多根多股标准导线构成的分裂导线等等，如图 1-9 所示。

多股导线是按规定的标准制造的，导线的标号用汉语拼音字母和数字表示，例如，LGJ-120，字母 LGJ 表示线型为普通钢芯铝绞线，数字 120 表示主要载流部分（对钢芯铝绞线是铝线部分）的标准截面积为 120mm^2 。其他几种常见的线型有：TJ——钢绞线；LJ——铝绞线；LGJJ——加强型钢芯铝绞线；LGJQ——轻型钢芯铝绞线等。

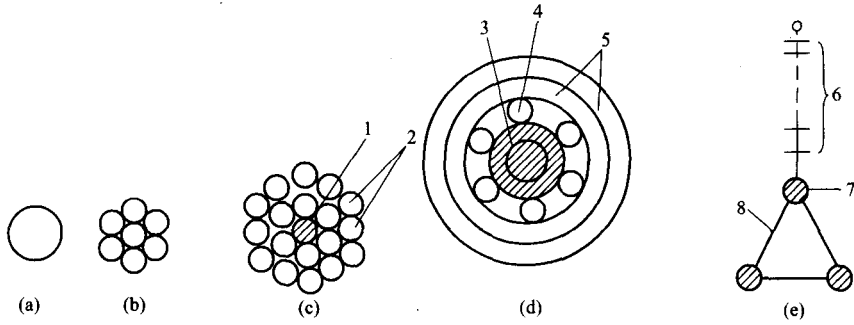


图 1-9 架空输电线路导线的结构示意图

(a)单股线；(b)多股绞线；(c)钢芯铝绞线；(d)扩径导线；(e)一相分裂导线

1—钢线；2—铝线；3—多股钢芯线；4—支撑层6股铝线；5—外层多股铝线；

6—绝缘子串；7—多股绞线；8—金属间隔棒

(2) 杆塔。杆塔用来支持导线和避雷线，并使导线和导线之间、导线与杆塔之间、导线和避雷线之间以及导线与大地之间保持一定的安全距离。按杆塔所承担的任务可分为以下几种，如图 1-10 所示。

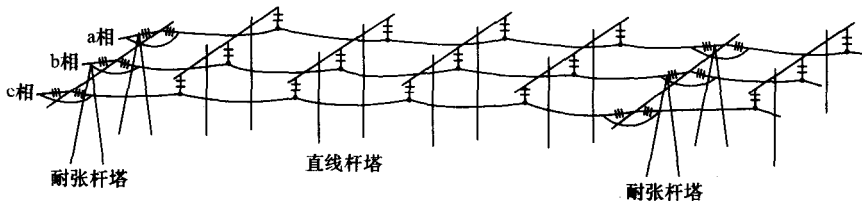


图 1-10 架空线路示意图

直线杆塔，又称为中间杆塔，主要用来悬挂导线，是线路上用得最多的一种杆塔。

耐张杆塔，又称为承力杆塔，主要用来承担线路正常及故障(如断线)情况下导线的拉力，同时又可使线路分段，便于施工和检修，限制故障范围。在耐张杆塔上，绝缘子串不像直线杆塔上那样与地面垂直，而是呈与导线相同的走向。杆塔两边同一相导线是通过跳线来接通的。

终端杆塔，它是最靠近变电所的一座杆塔，用来承受最后一个耐张档距导线的单向拉力。如果没有终端杆塔，则拉力将由变电所建筑物承担，这将增加变电所的造价。

转角杆塔，它用于线路拐弯处，能承受侧向拉力。拐角较大时做成耐张杆塔的形式，拐角较小时也可做成直线杆塔的形式。

特种杆塔，它是在特殊情况下使用的一种杆塔，如导线换位后用的换位杆塔，跨越河流山谷等跨距很大的跨越杆塔等。

(3) 绝缘子和金具。绝缘子用来支持或悬挂导线并使导线与杆塔绝缘，因此，它必须具有良好的绝缘性能和足够的机械强度。架空线路上用的绝缘子有针式、悬式等各种型式(见图 1-11 所示)。针式绝缘子应用在电压不超过 35kV 的线路上，悬式绝缘子可以根据线路电压的高低用不同数目的绝缘子组成绝缘子串。当使用 X-4.5 型瓷绝缘子时，35kV 线路不少于 3 片、110kV 不少于 7 片、220kV 不少于 13 片、330kV 不少于 19 片。棒式绝缘子，是实心整块的瓷棒，可以用来代替悬式绝缘子串。瓷横担，既起绝缘子作用又起横担作用的瓷棒。

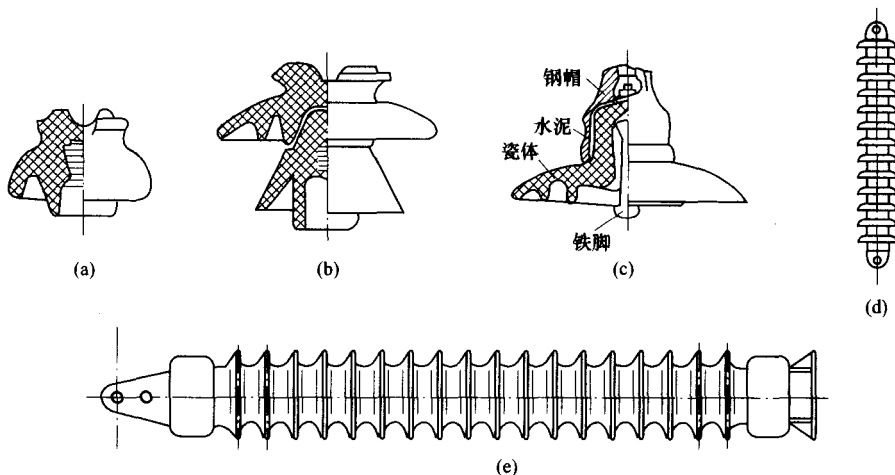


图 1-11 架空电力线路的绝缘子和瓷横担

(a) 10kV 针式绝缘子; (b) 35kV 针式绝缘子; (c) 悬式绝缘子; (d) 棒式绝缘子; (e) 瓷横担

金具是用来组装架空线路的各种金属零件的总称。其品种繁多，用途各异。如结合金具用来连接悬式绝缘子串，连接金具用来连接导线；固紧金具用来将导线固定在悬式绝缘子串上；保护金具中的防震锤用以防止导线因震动而损坏等。

2. 电缆线路

电力电缆的结构主要包括导体、绝缘层和保护包皮三个部分。

电缆的导体通常采用多股铜绞线或铝绞线，以增加电缆的柔性，使之能在一定程度内弯曲而不变形，根据电缆中导体数目不同，可分为单芯、三芯和四芯电缆。单芯电缆的导线截面总是圆形的；三芯或四芯电缆的导体截面除了圆形外，还有扇形的，如图 1-12 所示。

电缆的绝缘层用来使各导体之间以及导体与包皮之间绝缘。绝缘层使用的绝缘材料种类很多，如橡胶、聚乙烯、纸、油、气等，一般多采用油浸纸绝缘及充油、充气绝缘。

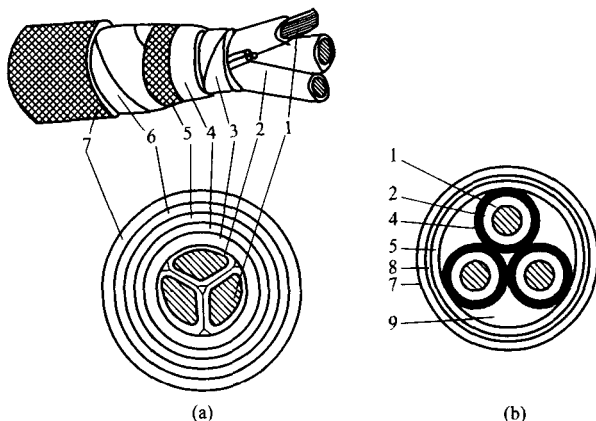


图 1-12 电缆结构示意图

(a) 三相统包型; (b) 分相铅包型

1—导体; 2—相绝缘; 3—纸绝缘; 4—铅包皮; 5—麻衬; 6—钢带铠甲;

7—麻被; 8—钢丝铠甲; 9—填充物

电缆的保护包皮用来保护绝缘层,使其在运输、敷设和运行过程中不受外力损伤,并防止水分侵入。在油浸纸绝缘电缆中还有防止绝缘油外流的作用。常用的有铅包皮和铝包皮。为防止外力破坏,有的电缆最外层还有钢带铠甲。

电缆除按芯数和导体截面形状分类外,还可分为统包型、屏蔽型和分相铅包型。统包型的三相芯线绝缘层外有一共同的铅包皮。这种电缆内部电场分布不均匀,不能充分利用绝缘强度,它只用于 10kV 以下的电缆。屏蔽型的每相芯线绝缘层外都包有金属带。分相铅包型的各相分别铅包。电压为 110kV 及以上的线路,多采用充油式或充气式电缆。

三、直流输电

直流输电是将发电厂发出的交流电经过升压后,由换流设备(整流器)转换成直流,通过直流输电线路送到受电端,再经过换流设备(逆变器)转换成交流,供给受电端的交流系统,如图 1-13 所示,需要改变输电方向时,只需让两端换流器互换工作状态即可。换流设备是直流输电系统的关键部分。早期的换流器大多采用汞弧阀,自 20 世纪 70 年代以来新建的直流输电工程已普遍应用可控硅换流元件。

与交流输电相比较,直流输电的主要优点有:

(1) 造价低。对于架空线路,当线路建设费用相同时,直流输电的功率约为交流输电功率的 1.5 倍;对于电缆线路,直流输电与交流输电功率的比值更大。

(2) 运行费用低。在输送功率相等的条件下,直流线路只需要两根导线,交流线路需要三根。所以,直流线路的功率损耗和电能损耗比交流线路约小 1/3。由电晕引起的无线电干扰也比交流线路小得多。

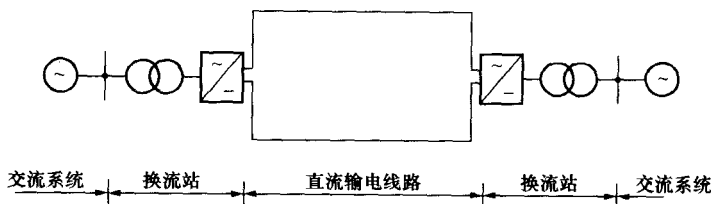


图 1-13 直流输电系统示意图

(3) 不需串、并联补偿。直流线路在正常运行时,由于电压为恒值不变,导线间没有电容电流,因而也不需并联电抗补偿。由于线路中电流也是恒值不变,也没有电感电流,因而也不需要串联电容补偿。这一显著优点,特别是对于跨越海峡向岛屿供电的输电线路,是非常有利的。另外,直流输电沿线电压的分布比较平稳。

(4) 直流输电不存在稳定性问题,由直流线路联系的两端交流系统,不要求同步运行。所以直流输电线路本身不存在稳定性问题,输送功率也不受稳定性限制。如果交、直流并列运行,则有助于提高交流输电的稳定性。

(5) 采用直联联络线可以限制互联系统的短路容量。由于直流系统可采用“定电流控制”,用其连接两个交流系统时,短路电流不致因互联而明显增大。

但直流输电存在以下缺点:

(1) 换流站造价高。直流线路比交流线路便宜,但直流系统的换流站则比交流变电所造价高得多。若计及线路造价和年运行费用等经济指标,直流输电与交流输电经济的等价距离,