

高等学校教材

# 发电厂电气部分

第二版

四川联合大学 范锡普 主编



ISBN 7-80125-596-8/TM·353

定价：16.60 元



高等学校教材

---

发电厂电气部分

第二版

四川联合大学 范锡普 主编

中国电力出版社

## 内 容 提 要

本书着重讲述发电厂电气主系统设计与运行的理论和计算方法,相应地介绍主要电器的原理和性能。内容包括:电气主接线和厂用电系统的构成及设计;载流导体的发热和电动力理论;导体和电器的选择;配电装置的构成;同步发电机和变压器的运行;以及发电厂和变电所的控制与信号等。每章末附有思考题和习题。

本书为发电配电“电力系统及其自动化”专业的教材,同时亦可供从事发电厂设计、运行及有关的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

发电厂电气部分/范锡普主编. —2版. —北京: 中国电力出版社, 1995. 11 (1998重印)  
高等学校教材  
ISBN 7-80125-596-8

I. 发… I. 范… III. 发电厂-电气设备-高等学校-教材 N. TM62

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第28847号

中国电力出版社出版

(北京三里河路6号 邮政编码100044)

三河市实验小学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经销

1987年11月第一版

1995年11月第二版 2000年1月北京第九次印刷

787毫米×1092毫米·16开本 18印张 404千字

印数130811—135810册 定价16.60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

本书是在总结《发电厂电气部分》第一版教材的基础上，根据1987年高等学校电力工程专业教学委员会通过的“发电厂电气部分课程的基本内容和基本要求”及1992年在成都召开的发电厂教学小组会上通过的“发电厂电气部分第二版编写大纲”进行重新编写的。

本教材第二版编写大纲在广泛征求有关学校意见的基础上，采用了大家从教学中总结出的、更切合本课程教学的新体系。此外，本教材还从教学进程上作了改革，首先阐明物理概念，讲完理论部分，即用实例加以说明和印证，让学生牢固掌握所学内容。新教材除保留了第一版教材行之有效的部分外，还针对我国电力工业的发展，增加了相应的新技术和内容，而且图形符号全部采用新国标。

本教材第一、四、七章由四川联合大学范锡普教授编写；第八、九章由华北电力学院戴克健教授编写；第四（4-8）、五、六章由华中理工大学胡能正教授编写；第二、三、五（5-2）章由西安交通大学李朝阳教授编写。全书由范锡普教授主编，重庆大学阎超教授主审。

在此次编写中，充分吸取了许多学校的教学经验和宝贵意见，并承有关单位提供了不少新的有益资料，对此深表谢忱。

## 第一版前言

本书是根据水利电力部电力类专业编委会1982年9月通过的大纲编写的，作为“电力系统及其自动化”专业《发电厂电气部分》课程的教材。

发电厂是电力系统的重要组成环节，它直接影响整个电力系统的安全与经济运行。本书主要讲述发电厂的电气部分。在发电厂中，电气一次系统是主干系统，处于关键的地位。本书阐述一次系统及其设备的原理、设计和运行方面的内容，力求概念清楚，层次分明，便于自学。每章末附有小结。另外，为了加深理解每章的内容，还附有一定数量的复习思考题和习题。

本教材共分十章：一、绪论；二、载流导体的发热和电动力；三、电气主接线；四、厂用电；五、电气设备的选择；六、配电装置；七、电气主设备的控制和信号；八、高压断路器的运行；九、同步发电机的运行；十、变压器的运行。

参加本教材编写的有：华中工学院范锡普教授（一、二、七章）和胡能正副教授（五、六章），华北电力学院戴克健教授（九、十章），西安交通大学李朝阳副教授（三、四、八章）。全书由范锡普教授主编，南京工学院朱家果副教授主审。

本书在编写过程中，曾得到不少单位的支持，并提供了大量的资料和有益的建议，对此表示衷心的感谢。

# 主要符号意义

$A$ ——面积, 吸收率	$S$ ——视在功率, 截面积
$Ac$ ——年费用	$T$ ——年限, 时间常数
$B$ ——磁感应强度	$T$ ——变压器
$C$ ——热稳定系数	TA——电流互感器
$c$ ——比热容	TV——电压互感器
$D$ ——直径	$t$ ——时间, 温度
$E$ ——电动势, 弹性模量, 功率密度	$U$ ——电压, 运行费
$F$ ——力, 表面积, 不可靠度	$W$ ——能量, 截面系数
$F$ ——熔断器	$W$ ——母线
$f$ ——频率, 误差, 互感系数, 单位长度的力	$X$ ——端子
$G$ ——发电机	$x$ ——电抗
$H$ ——高度	$Y$ ——电气操作的机械器件
$I$ ——断面二次矩, 电流	$Z$ ——阻抗
$J$ ——转动惯量, 经济电流密度	$O$ ——总投资
$K$ ——继电器, 接触器, 短路点	$a$ ——换热系数, 相角
$K$ ——系数	$\beta$ ——动应力系数
$L$ ——长度, 电感	$\theta$ ——温度
$L$ ——电抗器, 线路	$\delta$ ——相位差, 厚度
$M$ ——力矩, 互感	$\rho$ ——电阻率, 密度
$M$ ——电动机	$\varepsilon$ ——辐射系数
$m$ ——质量	$\Omega$ ——旋转角速度
$N$ ——系数, 匝数	$\tau$ ——温升
$P$ ——有功功率	$\nu$ ——相对老化率, 粘度系数
$Q$ ——无功功率, 热量	$\varphi$ ——相角, 辐射系数
QF——断路器	$\lambda$ ——故障率
QS——隔离开关	$\mu$ ——修复率
$R$ ——电阻, 可靠度	$\sigma$ ——应力
$r$ ——电阻	$\psi$ ——空载电流超前磁通的相角

## 主要下角标意义

- a——仪表, 自耦, 电弧  
a——有功、年  
ab——全分闸  
al——允许  
av——平均  
b——条, 底层, 效益, 平衡  
br——开断  
c——计算, 接触, 对流, 公共  
ca——套管  
cl——关合  
cr——临界  
Cu——铜  
d——介质, 基准, 阻尼, 需要, 导热  
de——破坏  
e——外, 电磁  
eq——等值  
es——动稳定  
Fe——铁  
f——故障, 最终, 框, 形状, 摩擦、励磁  
fs——熔件  
ft——熔管  
h——热点  
h——高度  
i——内, 开始, 安装  
k——短路  
l——低, 负荷, 线路  
m——同时, 最大, 机械, 电动机  
max——最大  
min——最小  
N——额定  
np——非周期  
o——空, 周围, 大修  
p——周期, 厂, 衬垫  
ph——相  
pr——保护  
r——辐射, 恢复, 检修, 转子  
r——无功  
re——继电器, 剩余  
s——轴, 分裂, 日照, 集肤, 外壳, 稳定, 串联, 定子, 系统  
sh——冲击  
sr——工频恢复  
t——热稳定, 变压, 顶层, 第三  
t——时间  
tr——瞬态恢复  
W——母线



# 目 录

第二版前言	
第一版前言	
主要符号意义	
主要下角标意义	
第一章 绪论	1
1-1 我国电力工业发展概况	1
1-2 发电厂和变电所的类型	3
1-3 发电厂电气设备简述	6
小结	8
思考题	8
第二章 电气主接线	9
2-1 对电气主接线的基本要求	9
2-2 主接线的基本接线形式	11
2-3 发电厂和变电所主变压器的选择	19
2-4 限制短路电流的方法	23
2-5 各种类型发电厂和变电所主接线的特点	27
2-6 主接线的设计原则和步骤	33
2-7 发电厂电气主接线设计举例	44
小结	58
思考题和习题	59
第三章 厂用电	61
3-1 概述	61
3-2 厂用电接线的设计原则和接线形式	62
3-3 不同类型发电厂的厂用电接线	67
3-4 厂用变压器或电抗器的选择	71
3-5 厂用电动机的选择和自启动校验	76
小结	84
思考题和习题	85
第四章 导体的发热、电动力及其选择	86
4-1 概述	86
4-2 导体的发热和散热	87
4-3 导体的长期发热	92
4-4 导体的短时发热	95
4-5 大电流导体附近钢构的发热	98

4-6	导体短路的电动力 .....	101
4-7	大电流封闭母线的发热和电动力 .....	108
4-8	导体、电缆、绝缘子和套管的选择 .....	113
	小结 .....	125
	思考题和习题 .....	125
<b>第五章</b>	<b>电器的原理与选择 .....</b>	<b>127</b>
5-1	电器选择的一般条件 .....	127
5-2	高压断路器的原理与选择 .....	130
5-3	隔离开关的选择 .....	147
5-4	电流互感器的原理与选择 .....	148
5-5	电压互感器的原理与选择 .....	156
5-6	互感器在主接线中配置原则 .....	163
5-7	限流电抗器的选择 .....	164
5-8	高压熔断器的选择 .....	167
	小结 .....	168
	思考题和习题 .....	169
<b>第六章</b>	<b>配电装置 .....</b>	<b>171</b>
6-1	概述 .....	171
6-2	配电装置的安全净距 .....	172
6-3	屋内配电装置 .....	174
6-4	屋外配电装置 .....	179
6-5	成套配电装置 .....	185
6-6	发电机与配电装置(或变压器)的连接 .....	188
6-7	发电厂和变电所的电气设施总平面布置 .....	190
	小结 .....	193
	思考题 .....	193
<b>第七章</b>	<b>发电厂和变电所的控制与信号 .....</b>	<b>194</b>
7-1	发电厂的控制方式 .....	194
7-2	二次接线图 .....	195
7-3	断路器的控制与信号接线 .....	198
7-4	中央信号 .....	200
7-5	发电厂和变电所的弱电控制 .....	202
7-6	变电所微机实时监控系統 .....	204
	小结 .....	205
	思考题 .....	206
<b>第八章</b>	<b>同步发电机的运行 .....</b>	<b>207</b>
8-1	同步发电机的参数及其额定值 .....	207
8-2	同步发电机的正常运行 .....	213
8-3	同步发电机的非正常运行 .....	217
8-4	同步发电机的特殊运行方式 .....	220

8-5 汽轮发电机的扭动稳定 .....	226
小结 .....	231
思考题 .....	232
<b>第九章 电力变压器的运行</b> .....	<b>233</b>
9-1 概述 .....	233
9-2 变压器超过额定容量运行时, 温度和电流的限值 .....	233
9-3 变压器的发热和冷却 .....	235
9-4 变压器的绝缘老化 .....	239
9-5 变压器的正常过负荷能力 .....	241
9-6 变压器的事事故过负荷 .....	245
9-7 多绕组变压器和第三绕组 .....	246
9-8 自耦变压器的特点和运行方式 .....	248
9-9 分裂绕组变压器 .....	257
9-10 变压器的并列运行 .....	259
小结 .....	267
思考题和习题 .....	268
附录 常用数据与系数表 .....	269

# 第一章 绪 论

本章首先阐述我国电力工业的现状和发展远景，介绍当前电力工业开发的方针。为便于开展学习，还简要介绍发电厂和变电所的各种类型和生产过程，以及主要电器的作用。同时，也指出学习本课程的目的、任务和方法。

## 1-1 我国电力工业发展概况

电是能量的一种表现形式，电力已成为工农业生产不可缺少的动力，并广泛应用到一切生产部门和日常生活方面。电能有许多优点：首先，它可简便地转换成另一种形式的能量。例如：工厂中的电动机，即是电能转换成机械能，拖动各种机械；又如我们日常使用的电灯，是将电能转换为光能，满足照明需要。其次，电能经过高压输电线路，还可输送很远的距离，供给远方用电。另外，许多生产部门利用电进行控制，更容易实现自动化，提高产品质量和经济效益。

1949年建国时，全国总装机容量为184.9万kW，年发电量仅43亿kW·h，在世界上居第25位。经过多年来的发展，1992年底全国总装机容量已达1.7亿kW，年发电量为7400亿kW·h，1992年内共装机1300万kW，这样快的发展速度和规模，在世界上是罕见的。当前，我国总装机容量和发电量均居世界第4位。1992年，电力增长率为10.9%，国民生产总值增长率为12%，二者之比，即所谓电力消费弹性系数为0.908，这表明电力与国民经济未能同步增长，电力尚不能满足经济发展的需要。

现在，我国最大火电机组容量为60万kW，最大水电机组容量为32万kW。同时，电力系统建设也取得显著成就，已形成东北、华北、华东、华中、西北、西南、华南等七个跨省区域性电力系统，前四个电力系统装机容量均超过2000万kW。预计到2000年，全国总装机容量将达到2.5亿kW，年发电量为12500亿kW·h以上。

电是一种二次能源，我国的一次能源（如煤、水力等天然能源）十分丰富，这是我国发展电力工业非常优越的物质基础。

我国目前电力工业发展的方针是：

1. 在发展能源工业的基本方针指导下发展电力工业

我国能源工业发展的基本方针是：开发与节约并重，能源开发要以电力为中心，煤炭为基础，大力发展水电，积极发展核电，积极开发石油和天然气。大力节电、节油和节煤，推广热电联产，发展余热利用，继续执行以煤代油，努力提高能源利用效率，减轻环境污染。

2. 电力工业发展速度必须与国民经济发展速度相适应

电力工业在国民经济中占有十分重要的地位，电力消费弹性系数应在1以上，才能满

足经济发展的需要。今后10年内，国民生产总值年平均增长6%左右，按能源规划，电力年增长率为7%，其弹性系数为1.17，这是必要的。

### 3. 发挥水电优势，加快水电建设

我国水电可开发容量为3.7亿kW，水能是一种再生能源，水资源不但可以发电，还可与航运、灌溉、防洪、水产等进行综合利用。

黄河上游、长江干支流、红水河流域及澜沧江等为当前重点开发大型水电基地，如长江三峡水电站，总容量为1820万kW，是目前世界上开工建设最大的水电站，首批机组计划于2003年发电。

在水能资源条件好、技术经济指标优越，而其它能源资源短缺的地区，积极兴建中型水电站。

此外，在调峰能力弱，系统峰谷负荷相差较大的电网，建设一批抽水蓄能电站，以解决调峰和提高供电质量。

至2000年，水电装机容量将达到7000~8000万kW。

### 4. 建设大型矿口电厂，搞好煤、电、运平衡

目前，我国一次能源主要是煤炭，火电仍为主要电源。煤炭产地主要在山西、内蒙古、河南等省，为了变输煤为输电，把建设大型矿口电厂和港口电厂作为电厂建设的重点。

### 5. 在煤、水能源缺乏地区，有重点有步骤地建设核电站

在天然能源匮乏的缺电地区建设核电站，可改善电力供求平衡。秦山核电站30万kW机组已投入运行。大亚湾核电站，两台90万kW机组亦已发电。

到本世纪末，计划建设9座核电站，总装机容量为600万kW，主要兴建在东南沿海和辽宁等缺能源地区。

### 6. 政企分开，省为实体，联合电网，统一调度，集资办电

为了适应社会主义市场经济和社会化大生产的需要，我国在原有电力系统的基础上，已成立了华北、东北、华东、华中、西北等电力集团，遵循社会主义市场经济的准则，形成电力市场，互相调剂，共同发展。

加强建设500kV骨干输变电工程，辅以±500kV高压直流输电线路。除已建成葛洲坝至上海的直流输电线路外，正待建设宝鸡至成都的直流输电线路。三峡水电站建成后，将出现全国性的联网。

### 7. 因地制宜，多能互补，综合利用，讲求效益

在边远农村和沿海岛屿，因地制宜建设小水电、风力发电、地热发电和太阳能发电，以解决无电、缺电地区的用电问题，重视和做好农村电气化建设。

### 8. 节约能源，降低消耗

减少自身消耗，降低煤耗和水耗、厂用电和线损，发展热电联产。新建电厂应采用高参数、高效率的大机组。从“八五”开始，除部分老厂或受电力系统容量等其它条件限制外，新建电厂都要使用单机容量在30万kW及以上的亚临界或超临界机组。

### 9. 重视环境保护，积极防止对环境的污染

发展能源应与环境保护相协调。积极贯彻“预防为主，综合治理”的方针，合理布局，合

理利用资源。新建和扩建电力项目，要达到国家或地方制定的污染物排放标准。

我国电力工业自动化水平正在逐年提高。20万kW及以上大型机组已采用计算机监控系统，许多变电所已装设微机综合自动化系统，有些已实现无人值班，电力系统已实现调度自动化。迄今我国电力工业已进入了大机组、大电厂、大电力系统、高电压和高自动化的新阶段。

## 1-2 发电厂和变电所的类型

发电厂是把各种天然能源，如煤炭、水能、核能等转换成电能的工厂。电能一般还要由变电所升压，经高压输电线路送出，再由变电所降压才能供给用户使用。为便于了解电能的生产，下面首先简要叙述发电厂和变电所的类型。

### 一、发电厂类型

#### 1. 火力发电厂

这是指用煤（包括用油和天然气）为燃料的发电厂。火力发电厂中的原动机，大都为汽轮机，也有个别地方采用柴油机和燃气轮机。火力发电厂又可分为：

（1）凝汽式火电厂 锅炉产生蒸汽，送到汽轮机，带动发电机发出电能。已作过功的蒸汽，排入凝汽器中冷却成水，又重新送回锅炉。在凝汽器中，大量的热量被循环水带走，所以凝汽式火电厂的效率较低，只有30%~40%。凝汽式火电厂，通常简称为火电厂。火电厂的典型布置图，如图1-1所示。

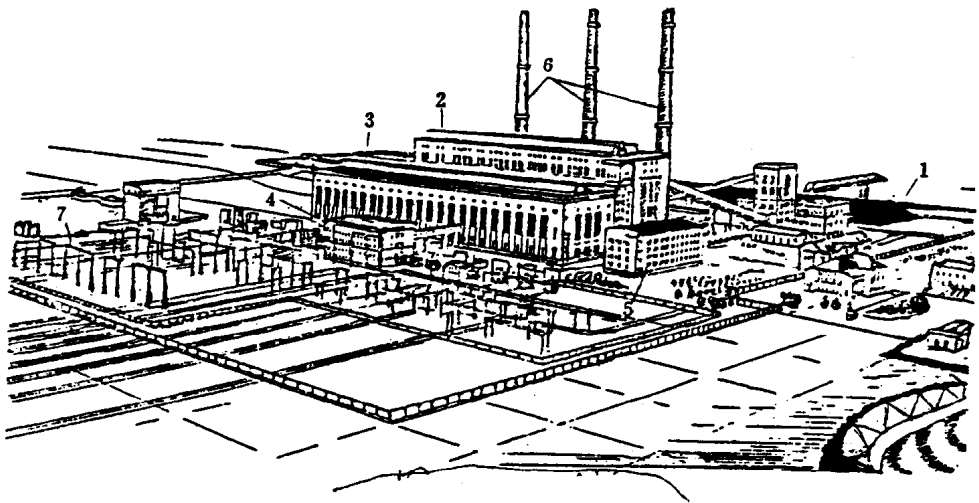


图 1-1 火电厂布置图

1—煤场； 2—锅炉房； 3—汽机房； 4—主控制室； 5—办公楼；  
6—烟囱； 7—屋外高压配电装置

（2）热电厂 热电厂与凝汽式火电厂不同之处在于：汽轮机中一部分作过功的蒸汽，从中间段抽出供给热用户，或经热交换器将水加热后，再把热水供给用户。这样，便可减少被循环水带走的热量损失，现代热电厂的效率高达60%~70%。

## 2. 水力发电厂

水力发电厂把水的位能和动能转变成电能，通常简称水电厂或水电站。根据水力枢纽布置的不同，水电厂又可分为堤坝式、引水式等。

(1) 堤坝式水电厂 在河床上游修建拦河坝，将水积蓄起来，抬高上游水位，形成发电水头，这种开发模式称为堤坝式。堤坝式水电厂又可分为坝后式和河床式两种。

1) 坝后式水电厂。这种水电厂的厂房建筑在坝的后面，全部水压由坝体承受。水库的水由压力水管引入厂房，转动水轮发电机发电。坝后式水电厂适合于高、中水头的情况，如图1-2所示。

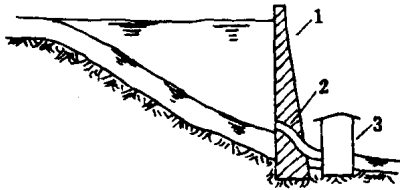


图 1-2 坝后式水电厂

1—坝；2—压力水管；3—厂房

2) 河床式水电厂。这种水电厂的厂房和挡水堤坝联成一体，厂房也起挡水作用，因修建在河床中，故名河床式。水头一般在20~30m以下，如图1-3所示。

(2) 引水式水电厂 水电厂建筑在山区水流湍急的河道上，或河床坡度较陡的地方，由引水渠道造成水头，而且一般不需修坝或只修低堰，如图1-4所示。

上面讲到的水电厂是专供发电用的。另外，尚有一种特殊形式的水电厂，叫做抽水蓄能电厂，如图1-5所示。

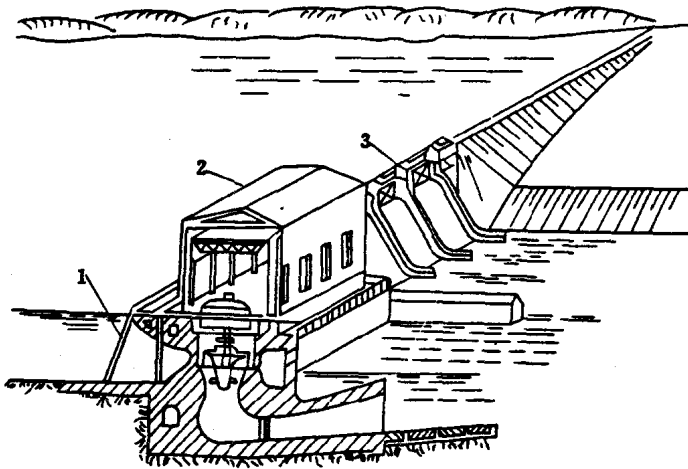


图 1-3 河床式水电厂

1—进水口；2—厂房；3—溢流坝

抽水蓄能电厂中，有一种是单纯起蓄水作用的，然而更多的是既可蓄水又可发电。后者是当电力系统处于低负荷时，系统尚有多余电力，此时，机组以电动机-水泵方式工作，将下游水库的水抽至上游水库储存起来，待系统高峰负荷到来时，机组便按水轮机-发电机方式运行，使所蓄的水用于发电，以满足调峰的需要。此外，抽水蓄能电厂还可作调频、调相、系统备用容量和生产季节性电能等多种用途。

抽水蓄能电厂的机组常用的有：三机式—即同步电机、水轮机和水泵三者联成一套同轴机组；二机式—即同步电机和可逆式水轮机（此种水轮机可工作于水轮机状态，亦可工

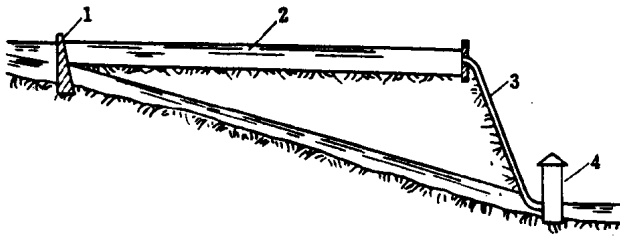


图 1-4 引水式水电站

1—堰； 2—引水渠； 3—压力水管；  
4—厂房

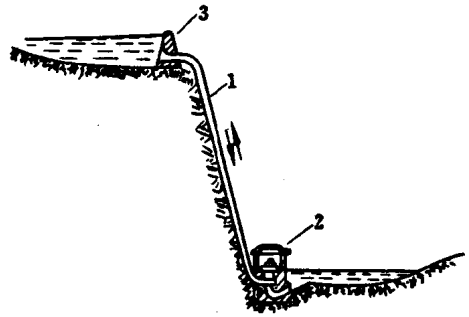


图 1-5 抽水蓄能电站

1—压力水管； 2—厂房； 3—坝

作为水泵状态) 组成一套机组。

前述水电站的布置方式，无论堤坝式或引水式，同样也适用于抽水蓄能电站。

### 3. 核电站

核电站是利用核裂变能转化为热能，再按火电厂的发电方式，将热能转换为电能，它的原子核反应堆相当于锅炉。核反应堆中，除装有核燃料外，还以重水或高压水作为慢化剂和冷却剂，所以，反应堆又可分为重水堆、压水堆等。图1-6为压水堆核电站发电方式示意图。

核反应堆内，铀-235在中子撞击下，使原子核发生裂变，产生的巨大能量主要是以热能形式被高压水带至蒸汽发生器，在此产生蒸汽，送至汽轮发电机组。

1kg铀-235约等于2700t标准煤所发出同样多的电力。

### 4. 其它发电方式

利用其它一次能源发电的，尚有风力发电、潮汐发电、地热发电、太阳能发电等。此外，还有直接将热能转换成电能的磁流体发电等。

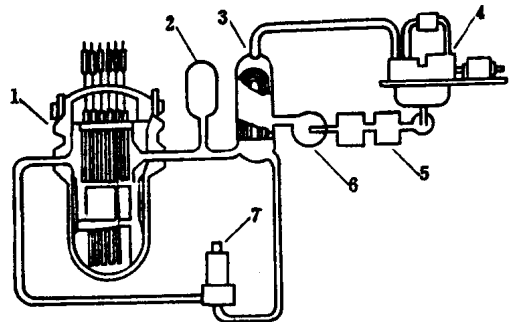


图 1-6 核电站发电方式示意图

1—核反应堆； 2—稳压器； 3—蒸汽发生器；  
4—汽轮发电机组； 5—给水加热器； 6—给水  
泵； 7—主循环泵

## 二、变电所类型

电力系统由发电厂、变电所、线路和用户组成。变电所是联系发电厂和用户的中间环节，起着变换和分配电能的作用。

图1-7是一个电力系统的原理接线图。在这个电力系统中，接有大容量的水电站和火电厂，水电站发出的电力经过500kV超高压输电线路送至枢纽变电所。220kV的电力网构成环形，可提高供电可靠性。

变电所根据它在系统中的地位，可分成下列几类：

### 1. 枢纽变电所

位于电力系统的枢纽点，连接电力系统高压和中压的几个部分，汇集多个电源，电压



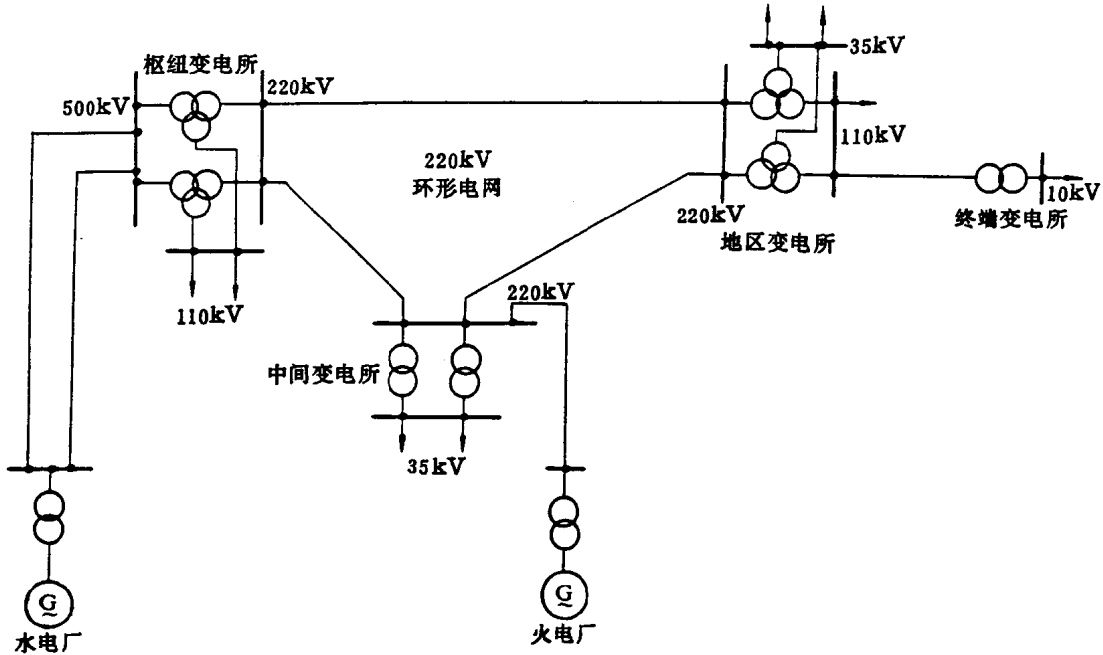


图 1-7 电力系统原理接线图

为330~500kV的变电所，称为枢纽变电所。全所停电后，将引起系统解列，甚至出现瘫痪。

#### 2. 中间变电所

高压侧以交换潮流为主，起系统交换功率的作用，或使长距离输电线路分段，一般汇集2~3个电源，电压为220~330kV，同时又降压供给当地用电，这样的变电所主要起中间环节的作用，所以叫做中间变电所。全所停电后，将引起区域电网解列。

#### 3. 地区变电所

高压侧电压一般为110~220kV，向地区用户供电为主的变电所，这是一个地区或城市的主要变电所。全所停电后，仅使该地区中断供电。

#### 4. 终端变电所

在输电线路的终端，接近负荷点，高压侧电压多为110kV，经降压后直接向用户供电的变电所，即为终端变电所。全所停电后，只是用户受到损失。

### 1-3 发电厂电气设备简述

为满足生产需要，发电厂中安装有各种电气设备。通常把生产和分配电能的设备，如发电机、变压器和断路器等称为一次设备。它们包括：

(1) 生产和转换电能的设备 如发电机将机械能转换成电能，电动机将电能转换成机械能，变压器将电压升高或降低，以满足输配电需要。这些都是发电厂中最主要的设备。

(2) 接通或断开电路的开关电器 例如：断路器、隔离开关、熔断器、接触器之类，