



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21世纪 高等学校本科系列规划教材

发电厂 变电站电气部分

FADIANCHANG BIANDIANZHAN DIANQI BUFEN

(第四版)

主 编 牟道槐 林 莉

非
外
借



重庆大学出版社



普通高等教育“十一·五”国家级规划教材

21世纪 高等学校本科系列规划教材

发电厂 变电站电气部分

FADIANCHANG BIANDIANZHAN DIANQI BUFEN

(第四版)

主 编 牟道槐 林 莉

重庆大学出版社

内 容 提 要

本书主要介绍发电厂、变电站电气一次部分设计与运行的基本理论和计算方法。其主要内容包括:基本概念与定义;配电设备的运行原理与基本参数;电气一次接线及配电装置的结构与运行特性;配电设备的选择计算;测量、信号与控制系统;直流操作电源;同步发电机与异步发电机的运行特性;变压器的负载能力及配电设备的运行与维护。本书的一些章节在定义和讲解上与传统教材有所不同,力求符合工程实际并使概念准确、易于理解;同时,针对我国电力系统的高速发展和技术更新,新版的内容作了相应的增删。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业、电力系统及其自动化专业教材,也可供从事电力工程的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

发电厂、变电站电气部分/牟道槐,林莉主编.—4版.—重庆:重庆大学出版社,2017.3

电气工程及其自动化专业本科系列教材

ISBN 978-7-5689-0005-8

I. ①发… II. ①牟… ②林… III. ①发电厂—电气设备—高等学校—教材②变电所—电气设备—高等学校—教材 IV. ①TM6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 182941 号

发电厂 变电站电气部分

(第四版)

主 编 牟道槐 林 莉

责任编辑:曾显跃 版式设计:曾显跃

责任校对:邹 忌 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:易树平

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023)88617190 88617185(中小学)

传真:(023)88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

重庆升光电力印务有限公司印刷

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:18.75 字数:468千

2017年3月第4版 2017年3月第21次印刷

印数:71 001—73 000

ISBN 978-7-5689-0005-8 定价:46.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

第四版前言

本课程是电力专业学生首先学习的专业课之一,内容十分广泛,理论与实践联系紧密,涉及许多工程概念,因此,易于使缺乏工程实践的学生感觉困难。

为避免烦琐,作者按实用原则选材,着重讲述基本理论与概念。主要内容为:①发电厂、变电站的基本概念与定义;②输配电设备的工作原理与基本参数;③电气一次接线及配电装置的结构形式与运行特点;④配电设备的选择计算;⑤测量、信号与控制系统;⑥发电机、变压器及配电设备的运行操作与调节。作者的愿望是使学生掌握分析问题的基本思想,并形成清晰的概念。

本书出版已 20 多年,在此期间我国电力系统高速发展,技术上取得了很大的进步,本版在内容上作了较大的增删:剔除了陈旧的内容,增加了新的知识,重写了一些章节,并对一些图文作了校正与修改,使其表达更为确切和清楚。

参加本书第一版编写的有:重庆大学牟道槐,陕西理工大学李玉盛,兰州工业学院马良玉,贵州大学李昌宁,昆明理工大学张丽。十分感谢第一版的全部作者,正是由于第一版制订的写作方针为本书奠定了良好的基础,才使本书在 20 多年中得以连续再版。

重庆大学电气工程学院的林莉副教授从事“发电厂电气部分”课程的教学工作 10 余年,在 2~4 版的修订工作中作出了主要的贡献,对本书的文字与内容做了大量的修改与增删。

殷切希望读者对本书的编写提出意见,以便使本书的质量能不断提高。来信请按邮编 400044 寄重庆大学电气工程学院林莉。

最后,对支持本教材编写、出版工作的个人及单位表示衷心的感谢。

编者

2016 年 12 月

目 录

第 1 篇 基本概念与定义

第 1 章 发电厂 变电站的基本形式及电能质量与供电可靠性	1
1.1 火电站	2
1.2 核电站	6
1.3 水电站与抽水蓄能电站	9
1.4 风力发电场	12
1.5 其他能源电站	17
1.6 变电站的分层结构	19
1.7 电能质量与供电可靠性	21
1.8 我国电力系统的现状与发展方向	25
思考题	26
第 2 章 发电厂 变电站电气接线、设备的基本概念与定义	27
2.1 一次接线与二次接线	27
2.2 发电机、变压器的基本形式与参数	29
2.3 输配电设备的功能及分类	38
思考题	41
第 2 篇 输配电设备的工作原理与基本参数	
第 3 章 开关电器	42
3.1 开关电器的电弧及灭弧原理	42
3.2 开关电器的分类与配置原则	51
3.3 开关电器的参数	53
思考题	56
第 4 章 限流电器	57
4.1 限制短路电流的措施	57
4.2 普通限流电抗器与分裂电抗器	59
4.3 分裂变压器的工作原理与参数	62
思考题	64
第 5 章 互感器	55
5.1 互感器的作用与工作特性	65
5.2 互感器的误差分析	67
5.3 电压互感器的分类与参数	74
5.4 电压互感器的配置原则与接线形式	77
5.5 电流互感器的分类与参数	79

5.6 电流互感器的接线形式与配置原则	83
思考题	84
第6章 导体与绝缘子	85
6.1 长期发热与短时发热的定义及对电气设备的危害	85
6.2 导体发热功率与散热功率的计算	86
6.3 导体的长期发热与容许电流	90
6.4 短路时导体发热最高温度的计算	93
6.5 $\int_0^{t_d} i_d^2 dt$ 的等效计算	94
6.6 通过短路电流时导体热稳固性的工程条件	97
6.7 载流导体间的电动力	98
6.8 短路时硬导体的动稳固性计算	102
6.9 导体的分类与参数	106
6.10 绝缘子的分类与参数	114
思考题	116
第7章 交流输电补偿器	118
7.1 并联补偿电容器与电抗器	118
7.2 静止无功补偿器	121
7.3 可控串联电容器	124
思考题	126
第3篇 电气一次接线、配电装置的结构形式与运行特点	
第8章 电气主接线的结构形式、运行与操作	127
8.1 概述	127
8.2 电气主接线形式的分类	129
8.3 有母线系统的接线	130
8.4 简易联络接线	137
8.5 单元接线	138
8.6 主变压器的台数、容量及类型的选择	140
8.7 电气主接线形式选择的技术经济比较	143
8.8 典型主接线形式的应用	147
8.9 电气主接线设计举例	151
思考题	153
第9章 自用电接线	155
9.1 发电厂自用电系统的工作机械及其运行特性	155
9.2 热电厂的自用电接线	160
9.3 核电站的自用电接线	165
9.4 水电厂的自用电接线	167
9.5 变电站的自用电接线	170
9.6 换流站的自用电接线	171
思考题	171

第 10 章 配电装置的结构形式	172
10.1 概述	172
10.2 配电装置的最小安全净距	173
10.3 屋内配电装置的结构形式	176
10.4 屋外配电装置的结构形式	181
10.5 成套配电装置	183
思考题	187

第 4 篇 配电设备的选择计算

第 11 章 配电设备的选择计算	188
11.1 选择配电设备的通用计算条件	188
11.2 开关电器的其他选择条件	191
11.3 限流电抗器的其他选择条件	193
11.4 互感器的其他选择条件	196
11.5 导体与绝缘子的其他选择条件	200
思考题	205

第 5 篇 电气二次接线

第 12 章 测量、信号与控制系统	206
12.1 二次接线图	206
12.2 测量系统	211
12.3 信号系统	213
12.4 断路器的操动系统与控制电路	216
12.5 应用计算机的自动化监控系统	219
思考题	221
第 13 章 直流操作电源	222
13.1 直流负荷与系统电压	222
13.2 蓄电池的类型与配置	223
13.3 直流系统的接线形式	227
13.4 直流系统的安全监视与保护	228
思考题	230

第 6 篇 电气设备的运行与操作

第 14 章 同步发电机的正常运行与操作	231
14.1 同步发电机的同期系统与并列操作	232
14.2 同步发电机的无功与电压调节及电力系统电压变化的影响	236
14.3 同步发电机的有功与频率调节及电力系统频率变化的影响	242
14.4 同步发电机的解列与停机操作	245
思考题	246

第 15 章 同步发电机的异常运行状态与事故处理	247
15.1 不对称运行特性及其限制	247
15.2 失磁异步运行特性及其限制	248
思考题	251
第 16 章 异步发电机的运行	252
16.1 异步发电机的工作原理	252
16.2 异步发电机的有功输出特性	254
16.3 异步发电机的无功输入特性	256
16.4 异步发电机组的运行稳定性	258
思考题	260
第 17 章 变压器的负载能力	261
17.1 变压器的热状态与绝缘寿命	261
17.2 变压器的额定容量与过载能力	263
17.3 三绕组自耦变压器的功率传输	265
思考题	266
第 18 章 配电设备的运行与维护	268
18.1 开关电器的运行与维护	268
18.2 电抗器的运行与维护	269
18.3 互感器的运行与维护	270
18.4 导体与绝缘子的运行与维护	271
18.5 设备停电检修的安全技术措施	272
思考题	272
附录 电气设备参数	273
参考文献	288

第 I 篇

基本概念与定义

第 I 章

发电厂

变电站的基本形式及电能质量与供电可靠性

在高速度发展的现代社会中,电力工业在国民经济中的作用已人所共知:它不仅全面地影响国民经济其他部门的发展,同时也极大地影响人民的物质与文化生活水平的提高,影响整个社会的进步。

人类社会中所使用的能量的来源分为一次能源与二次能源:一次能源指的是由自然界直接提供的能源。例如,煤、石油、天然气所含的化学能, U_{235} 的同位素所含的核能,流动的风的动能及高处的水的势能等;二次能源指的是将一次能源转换后生成的能源,例如上述一次能源可在发电厂中转换为电能,电能就是二次能源中的一种。

按利用一次能源的形式与转换过程的不同,可将发电厂的形式分为下列四类:

①火电站。其下又分为凝汽式电站和热电站。后者除发电外还兼带供热。此类电站是将燃料燃烧后使其化学能经热能、机械能等中间变换形式最终转换为电能。

②核电站。其使用的燃料为核燃料,因此称为核电站。其能量转换过程的最后部分仍包括热能→机械能→电能的转换,因此,可以视核电站是一种极为特殊的火电站。

③水电站与抽水蓄能电站。其一次能源为水的势能。普通水电站仅实施由水的势能向电能的单向转换,即只能发电。抽水蓄能电站还可在电力系统负荷低谷区将下库尾水抽至上库,即实现电能向水的势能的逆变换,起到了蓄积能量的作用,实质上是一种利用水的势能构建的特大容量的“蓄电池”。

④其他形式电站。风力发电场,太阳能电站,地热电站和潮汐电站。它们都属于清洁能源发电,随着环境保护要求的提高,作为清洁能源电站在电力系统中的比例将迅速增大。

1.1 火电站

火电站是将煤、天然气和重油等燃料的化学能转换为电能的电站,因为有燃烧的锅炉而得名。目前,在我国电力系统中,火电站的装机容量约占总装机的80%,其中以燃煤为主,燃煤电站的最大单机容量已达1 GW。随着单机容量的提高,汽轮机进气参数(压力与温度)的提高,其热效率也随之提高,因此在电力系统中主要承担基荷,其设备利用时间(全年发电量/机组安装容量)一般在5 000 h及以上。

火电站使用的燃料有3种:①固体燃料(例如煤);②液体燃料(例如重油);③气体燃料(例如天然气)。不对外供热的火电站称为凝汽式电站,对外供热的火电站称为热力化电站,简称为热电站。

燃煤火电厂的生产系统如图1.1所示。

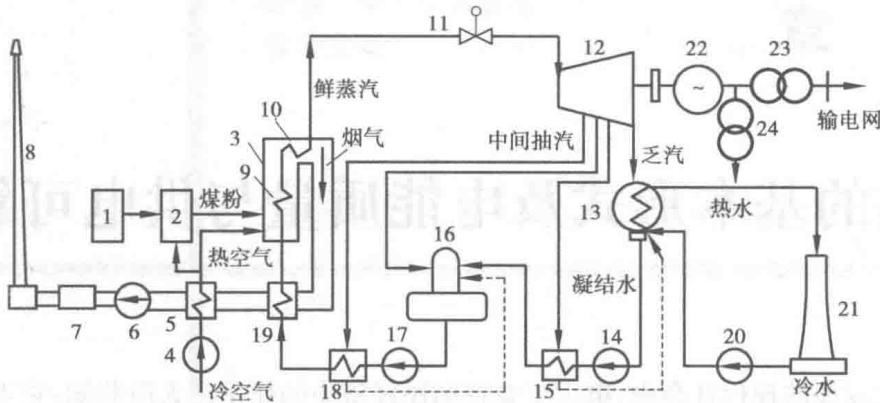


图 1.1 燃煤火电厂的生产系统图

- 1—储煤场;2—制粉系统;3—锅炉;4—送风机;5—空气预热器;6—引风机;
7—脱硫装置;8—烟囱;9—水冷壁;10—过热器;11—调速气门;12—汽轮机;
13—凝汽器;14—凝结水泵;15—低压加热器;16—除氧器;17—给水泵;
18—高压加热器;19—省煤器;20—循环水泵;21—冷却塔;22—发电机;
23—升压变压器;24—自用变压器

由图1.1可见,燃煤电厂的生产系统中包含三个子系统:燃烧与风烟系统、汽水循环系统和电气系统。

(1) 燃烧与风烟系统

各设备的作用为:

- ①储煤场,由于耗煤量很大,大容量发电厂需要一个很大的储煤场。
- ②制粉系统,将煤加工为很细的粉状,以提高燃烧效率,并可利用劣质煤发电。
- ③锅炉,有一个很大的燃烧室,煤粉在其中燃烧,将水冷壁水管中的水加热为蒸汽,容量以每小时的产汽量表示(t/h)。
- ④引风机,将锅炉中燃烧生成的烟气抽出,并使燃烧室的压力低于大气压力,即使燃烧室保持负压状态,提高燃烧效率,并使火焰不会通过燃烧室墙壁向外喷出。
- ⑤脱硫装置,清除烟气中硫的氧化物,减少烟气对大气的污染。
- ⑥烟囱,具有一定的抽风效果,更为主要的是使烟气在一定的高度上排放,减小对近区的污染强度。
- ⑦送风机,将热风送入锅炉帮助煤粉燃烧,同时还送入制粉系统,使煤粉干燥,并推动煤粉在制粉系统中流动。
- ⑧空气预热器,利用烟气的余热加热空气,回收能量。

(2) 汽水循环系统

火电站中,参与能量传递的媒介质称为工质。火电厂中以水作为工质,依靠水汽循环实现能量的传递,水汽循环系统又称为蒸汽动力循环系统。

进入锅炉3中的水在水冷壁9的水管中上下自然循环流动被加热为饱和蒸汽,再经炉顶的过热器10加热变为过热蒸汽,过热蒸汽超过该压力下的饱和温度,因为不含水分又称为干蒸汽。蒸汽的过热程度必须保证蒸汽在汽轮机中不因做功减压降温而产生水滴,因为水滴会击坏汽轮机的叶片。

进入汽轮机的蒸汽流量受调节阀11的控制,该阀门称为调速气门,受自动调速系统(调速器)的控制:当汽轮机转速下降时增大气门开度,转速上升时减小气门开度,在发电机未并入电网时,保证汽轮机的转动频率的稳定;在发电机已并网时,与电网中的其他发电机组一起,共同保证电网电气系统频率的稳定。蒸汽通过汽轮机12的转子叶片释放热能,转换为汽轮机转子的动能。汽轮机将热能转换为机械能的效率为60%~70%。

汽轮机入口处的蒸汽还没有做功,称为鲜蒸汽;汽轮机出口处的蒸汽已经做功,称为乏汽。提高汽轮机进口的温度与压力和降低汽轮机出口的温度与压力,是提高汽轮机热-功转换效率的重要手段。目前GW级大功率汽轮机的蒸汽温度已达600℃,压力达25MPa。

大型汽轮机分为高压和中压两段,经高压段做功后的乏汽需经设置于锅炉烟道中的中间蒸汽过热器再加热,使之超过中压段入口压力下的饱和温度,重新变为过热蒸汽。

凝汽器13紧接在汽轮机的出口,循环水泵20将数十倍于蒸汽质量的冷水打入凝汽器中吸收乏汽的热量,将乏汽冷却为凝结水;同时,保证汽轮机出口蒸汽有很低的压力与温度。循环水带走的热量,称为凝汽损失,它是蒸汽动力循环中最大的一部分热量损失,为蒸汽热量的30%~40%。

凝汽器中的凝结水经凝结水泵14打入除氧器16,中间经低压加热器15加热。低压加热器的热量来自于汽轮机的抽气。由图1.1可见,这部分蒸汽在汽轮机中走过一段行程,将一部分热能转换成汽轮机转子的动能,而其余的热量并未在凝汽器中损失,因此,汽轮机的抽气加热提高了热力循环的效率。

除氧器 16 的作用是用加热的方法除去溶解于水中的空气,以免其中的氧在高温下腐蚀金属设备。为了防止锅炉和管道壁结垢,进入锅炉的水需经除盐处理,除盐后的水称为软水。火电厂有一个水处理系统,生产的软水注入除氧器以补充水汽循环系统中水的损失,例如,为了改善水质在适当的部位排除部分污水的损失,简称排污损失。

除氧后的水由给水泵 17 加压打入锅炉,途经高压加热器 18 和省煤器 19 加热。

与低压加热器类似,高压加热器的作用也是为了提高蒸汽动力循环的效率,省煤器安装于锅炉的排烟道中,回收烟气的热量。

冷却塔 21 的作用是冷却凝汽器流出的循环水,以便重复使用,只有少数紧邻大江的火电厂直接在江中抽取循环水,这时就不需要设立冷却塔。

(3) 电气系统

发电机 22 将汽轮机 12 的动能转换为电能;升压变压器 23 将电压提高,其作用为:对于一定的传输功率减小了输电网的电流,降低电能损耗,提高输电效率;降低电压损耗,提高传输距离。

提高汽轮机进气的压力与温度,可以显著提高汽轮机的效率,因此,火电厂的发展方向是高温和高压,目前 GW 级大功率汽轮机的主蒸汽温度已达 600 °C,压力达 25 MPa。

凝汽式电站中以煤作燃料的电站所占比例最大,为了减少煤的远距离运输,在其他建站条件允许的情况下,应尽可能将电站建在煤矿附近,尽管可能增加输电距离,但在经济上仍然更为合理。建在采煤矿井旁边的火电站称为坑口电站,建设特大容量的坑口电站,将采煤和发电结合在一起,将输煤转变为输电,这种工业基地称为煤电化基地。

按照热力循环的要求,需要大量的循环水以保证凝汽器正常工作,保证汽轮机排汽压力、温度等参数较低,以提高汽轮机的效率,因此水源是建设火电站最为重要的条件之一。凝汽式电站不可避免的有大量的热能损失于循环水中,加上自身厂用电消耗,凝汽式电站的效率为 32% ~ 40%。

发电厂全年的发电量与发电机额定容量的比值称为年最大负荷运行时间,表达式为:

$$T_{\max} = \frac{W_Y}{P_N} \quad (1.1)$$

式中 T_{\max} ——年最大负荷运行时间, h;

W_Y ——全年的发电量, kW · h;

P_N ——发电机额定容量, kW。

火电厂的运行特点是:

①由于燃料不受季节性的影响,其发电功率也不受季节性的限制,全年均可高负荷运行,因此,年最大负荷运行时间长,一般在 5 000 h 以上,这是目前我国火电机组成为电力系统发电主力的重要原因之一。

②启停缓慢。由于锅炉点火升炉和管道设备需要逐渐升温,以避免热应力引起破坏,火电机组从准备启动到带满负荷需 3 ~ 6 h,因此火电机组不能经常启停。

③有最低负荷限制。由于锅炉在低负荷下燃烧不稳定,汽轮机在低负荷下排气温度升高,导致转轮的尾部叶片变形与震动,因此,一般负荷限制在 65% 以上运行,从而使火电机组参与电力系统负荷调节的能力受到限制。当电力系统用户的最小负荷低于 65% 时,纯火力发电的系统不便于运行调度。

火电厂的煤耗率是火电厂的一个重要经济指标。煤耗率分为两种：

①发电煤耗率,定义为标准煤耗量与发电机发出电量的比值,表达式为:

$$b_G = \frac{B_S}{W_G} \quad (1.2)$$

式中 b_G ——发电煤耗率, $\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$;

B_S ——标准煤耗量, kg ;

W_G ——发电机发出电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

所谓标准煤耗量,指的是按煤的含热率(1 kg 煤的含热量),将实际煤耗量向标准煤折算的数量,表达式为:

$$B_S = B \frac{q}{q_s} \quad (1.3)$$

式中 B ——实际煤耗量, kg ;

q ——实际用煤的含热率, kJ/kg ;

q_s ——标准煤的含热率, $q_s = 29\,308 \text{ kJ}/\text{kg}$ 。

②供电煤耗率,定义为标准煤耗量与发电机对外供电量的比值,表达式为:

$$b_s = \frac{B_S}{W_G - W_s} \quad (1.4)$$

式中 W_s ——发电厂的自用电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

利用煤、石油、天然气等有机燃料的火电站要向大气排放硫和碳的氧化物,这些气体聚集于上层空间产生温室效应使地面变暖,造成世界海洋平面升高,淹没近海大陆,长此下去将造成严重的后果。因此,必须限制有机燃料的燃烧并将节约能源的重要意义提高到维护生态环境的高度。

热电站与凝汽式电站的差别是它除了对外供电外,还要利用在汽轮机中做功后的蒸汽,对近区工业企业及城市供热,以满足其生产、采暖、通风、热水供应的需要。此种热、电联合供应的方式较之于热、电分别独立供应的方式更为经济。一般热水供应半径在 10 km 范围内,郊区热电站以较高的初始温度向市内供应热水时其距离可达 30 km。供应生产用蒸汽在压力为 0.8 ~ 1.6 MPa 的情况下距离应在 2 ~ 3 km。

应根据用户的热负荷容量及参数选择热电站的安装容量及形式。一般情况下,往往选择具有 1 级或 2 级抽气的汽轮机。如图 1.2 所示,由汽轮机低压段抽出的蒸汽进入蒸汽加热器将冷水加热为热水后,由供热泵加压后对用户提供热水。抽气供热方式可以独立地调节供热量与发电量以适应变化的热负荷的要求。

在热量要求很大或较为恒定的情况下,可以将发电后的全部蒸汽均用于对外供热,这种汽轮机排汽温度较高,称为背压式汽轮机。采用背压式汽轮机的电站中没有凝汽器,其发电量取决于供热量,即以供热为主,发电为辅,称为“以热定电”。

由于减少或完全没有凝汽器中的热损耗,因此热电站有很高的经济效益。

热电站应与凝汽式电站、水电站及其他电站联合运行,以适应冬夏两季峰、谷热负荷的要求。热电站所占的比例与当地的气候条件及工业企业的热负荷状态有关,寒冷地区热、电能量比可高达各占一半。

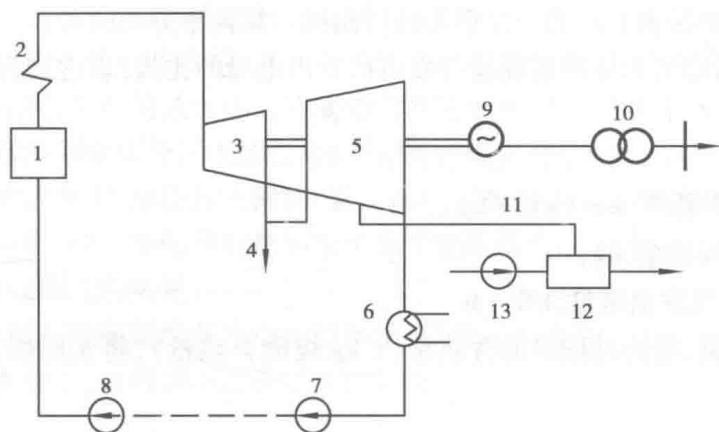


图 1.2 热电站的生产过程图

1—锅炉;2—蒸汽过热器;3—汽轮机高压段;4—生产抽气;5—汽轮机低压段;6—凝汽器;
7—凝结水泵;8—给水泵;9—发电机;10—主变压器;11—供热抽汽;12—蒸汽加热器;13—供热泵

1.2 核电站

核电站是利用核燃料裂变反应释放出的热能将水加热为蒸汽推动汽轮发电机组发电的电站,一般使用的核燃料为 U_{235} 的同位素,在天然铀中其含量约为 0.714%。用于核电站发电的 U_{235} 的低浓度为 2% ~ 3%。

U_{235} 原子核捕捉一个正在穿过的中子的概率非常高,在正常工作的核反应堆中(称为临界状态),每次裂变释放出的中子都会导致另一次裂变的发生,而且捕捉中子并发生分解的过程非常迅速,单位为 ps(10^{-12} s)。中子轰击 U_{235} 原子核时,使原子核裂变并产生 2 ~ 3 个中子,这些中子又轰击其他的 U_{235} 原子核产生更多的中子,称为链式反应,使核裂变得以保持,并有巨大的能量通过热和伽马辐射的形式释放出来。例如,用于核动力舰艇的 1 kg 高浓度铀的能量约等于 38×10^5 L 汽油提供的能量。

核反应堆是核电站最为重要的设备,在核反应堆中需要对核裂变的强度进行控制,使之与发电功率相平衡。当前核电站所采用的核反应堆大多为热中子反应堆(即慢中子反应堆),须要进行的控制为:①将核裂变产生的快中子减速为慢中子;②控制慢中子的浓度,以控制核裂变的强度;③控制传热工质的流量,将反应堆中的热量带出。传递核反应堆热量的工质对核反应堆的冷却至关重要,因此,通常将其称为核反应堆的冷却剂。

按减速剂和冷却剂的不同,当前采用的核反应堆分为轻水反应堆和石墨反应堆两类。前者减速剂和冷却剂均为带压力的普通水;后者减速剂为石墨,冷却剂为普通水。目前的核电站中大多采用提高了压力的轻水作减速剂和冷却剂,称为压水堆。

图 1.3 示出核电站的热力循环过程。由图 1.3 可见,核电站有两个热力循环系统:

(1) 一回路系统

一回路系统,即冷却剂循环系统。它由核反应堆 1、稳压器 2、蒸汽发生器 3 和主循环泵 4 等设备组成。核燃料在核反应堆 1 中裂变释放出热能。冷却剂在主循环泵的驱动下使轻水进入核反应堆被加热为高温水,然后进入蒸汽发生器时将热量转交给二回路系统;同时,冷却剂

中加入可溶化学物质,这些化学物质流过反应堆时使中子减速。

目前,大多数压水堆的压力约为 15 MPa,冷却剂在核反应堆进口的温度为 280 ~ 300 ℃,与之对应的出口的温度为 310 ~ 330 ℃,即进出口温差为 10 ~ 50 ℃。

稳压器的作用是调节一回路系统冷却剂的压力与温度,将其保持在正常范围内;当发电负荷突然减小,冷却剂的温度与压力升高时,通过喷水降温、减压;当发电负荷突然增大,冷却剂的压力与温度降低时,通过电加热器升温、加压。

为了保证安全,一回路系统的全部设备都安装在由钢筋混凝土建造的安全壳内,它的强度能够承受喷气式飞机的撞击,图 1.4 示出 1 000 MW 的核电机组一回路安全壳及其内部设备的布置概况。

▽+50 000

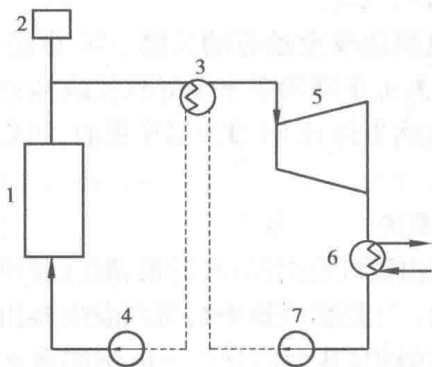


图 1.3 核电站的热力循环示意图

- 1—核反应堆;2—稳压器;3—蒸汽发生器;
4—主循环泵;5—汽轮机;6—凝汽器;
7—给水泵

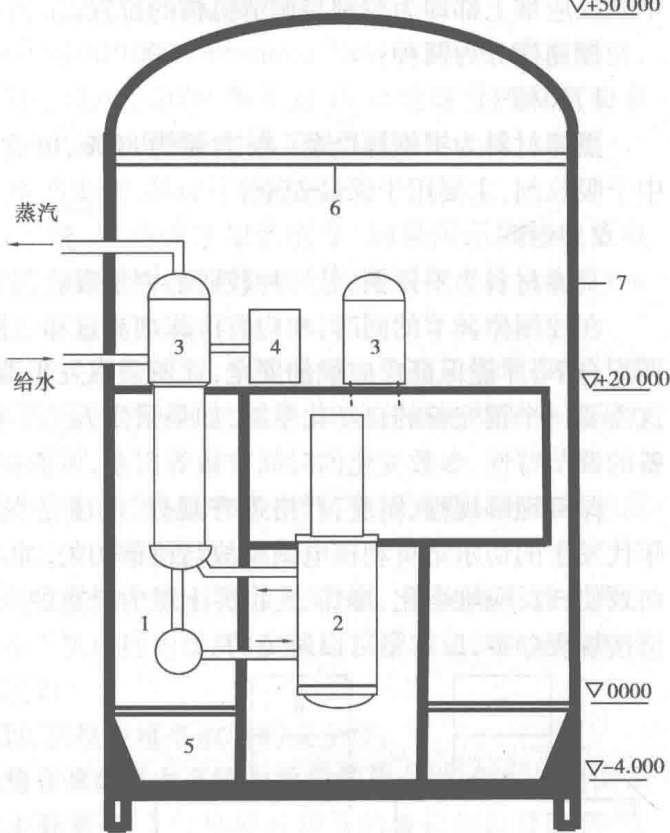


图 1.4 核电站一回路设备布置示意图

- 1—主循环泵;2—核反应堆;3—蒸汽发生器;
4—稳压器;5—通风室;6—吊车;7—安全壳

为了提高核反应堆的安全,还采取了以下措施:

①主循环泵装有很大的飞轮,增加其转动惯量,在主循环泵突然断电时,能短时间保持冷却剂的流量,保证安全停堆。

②蒸汽发生器的位置高于反应堆位置,以便使冷却剂有足够的自然循环能力。

③循环系统由多个并联的支路组成,减小冷却剂循环全停的概率,但稳压器不必增加。

表 1.1 列出了几个核电站的冷却剂循环系统的支路参数。

表 1.1 冷却剂循环系统的支路参数

核电站 编号	单机功率 /MW	一条冷却支路功率 /MW	单支冷却剂流量 /(t·h ⁻¹)	支路数
核电站 1	900	300	17 550	3
核电站 2	1 000	250	16 100	4
核电站 3	1 300	650	23 300	2

核反应堆中有数十根控制棒,由插入核燃料堆中的深度控制和调节核反应的强度,图 1.4 中核反应堆上部即为控制与调节机构的位置。

控制棒分为两种:

1) 黑棒

黑棒材料为银铟镉合金(Ag 含量为 80%、In 含量为 15%、Cd 含量为 5%),是一种强力的中子吸收剂,主要用于保证安全。

2) 灰棒

灰棒材料为不锈钢,是一种较弱的中子吸收剂,主要用于调节。

在控制棒调节的同时,相应冷却剂流量和二回路中的给水流量的调节,在三者很好地协调配合下,才能保证反应堆的安全,并使蒸汽发生器输出的参数和流量满足发电要求。显然,这需要一个很完善的自动化系统,如果采用人工手动调节,需要十分丰富的经验来考虑各个设备的调节特性、参数变化的时间常数等因素,可能存在很大的风险。

深刻理解规程、制度,严格遵守规程、制度是保证核电机组安全运行的关键。20 世纪 80 年代发生的切尔诺贝利核电站事故与违章相关,加之采用人工手动调节不当导致反应堆失控而致使核反应堆熔化、爆炸,是世界上最为严重的一次核电站事件,这一事件是罕见的,如果严格按规程办事,原本是可以避免的。

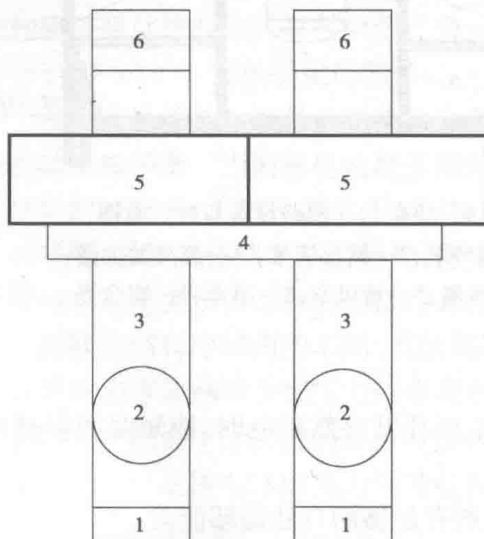


图 1.5 核电站的总平面示意图

1—燃料站房;2—核反应堆;3—辅助站房;
4—主控制室;5—汽轮机站房;6—升压变电站

(2) 二回路系统

二回路系统由蒸汽发生器、汽轮机、凝汽器和给水泵等设备组成。二回路系统中的蒸汽发生器相当于常规火电站的锅炉,其余部分与火电站的蒸汽动力循环系统几乎相同,因而,二回路系统所在地又称为常规岛。不同之处是核电站的蒸汽压力较低,一般为 5~7 MPa,汽耗率约比火电站的汽轮机高一倍,多数级工作在湿汽区,因此,汽轮机的结构也有特殊的考虑。

一回路系统与二回路系统在蒸汽锅中没有直接的联系。在设备布置上两个循环系统的设备也不在一起,一回路系统设备所在地称为核岛,二回路系统设备所在地称为常规岛。

图 1.5 为核电站的总平面示意图。

世界上核电站的发展概况如下:

1954年,苏联建成功率为5 000 kW的实验性核电机组;1957年,美国建成功率为 9×10^4 kW的希平港原型核电机组。这些机组称为第一代核电机组。

20世纪60年代后期以来,国外陆续建成电功率在300 MW以上的压水堆、沸水堆、重水堆等核电机组,进一步证明了核能发电技术可行性,也使核电可与火电、水电相竞争的经济性得以证明。20世纪70年代,因石油涨价引发的能源危机,促进了核电的发展,目前世界上商业运行的400多台核电机组大部分是在这段时期建成的,被称为第二代核电机组。

在发生切尔诺贝利核电站事故之后,核电发展进入长达20多年的低潮,提高核电站的可靠性引起了更大的关注。尽管如此,由于核电站不燃烧有机燃料,因此不向大气排放硫和氮的氧化物以及碳酸气,从而降低了可能导致全球气候变化的环境污染。由于环境保护的需求,从人类生态环境考虑,减少火电、发展核电仍然是电力工业的发展方向。

历经20年的研究,美国西屋电气公司设计的AP1000(Advanced Passive PWR)技术问世,它是一种非能动的压水堆核电站,是第三代核电机组。2009年4月19日全球首座发电功率为1 250 MW的AP1000核电机组(浙江三门核电站1号机)主体工程开工。

AP1000考虑了多种严重事故,提高了系统的安全,其设计特点如下:

①主要安全系统(如余热排出系统、安注系统、安全壳冷却系统等)均采用不依赖交流电源的非能动式冷却,显著提高安全壳的可靠性。堆芯熔化概率和放射性释放概率分别为 5.1×10^{-7} /堆年和 5.9×10^{-8} /堆年,远小于第二代的 1×10^{-5} /堆年和 1×10^{-6} /堆年的水平。

②通过冗余多样的卸压措施,能可靠地降低一回路压力,从而避免发生高压熔堆事故。采用将水注入压力容器外壁和其保温层之间,保证压力容器不被熔穿,将堆芯熔融物保持在压力容器之内。

③简化的非能动设计,大幅度减少了安全系统的设备和部件,经济分析表明,AP1000的发电成本小于3.6美分/kW·h,具备和天然气发电竞争的能力。

为保证安全,一回路系统与二回路系统在蒸汽锅中没有直接的联系。在设备布置上两个循环系统的设备也不在一起,一回路系统设备所在地称为核岛,二回路系统设备所在地称为常规岛。

限制核电站单元容量的主要因素是考虑其核反应堆事故时的安全性。

由于核电站生产工艺上的要求,目前此类电站在电力系统中承担基荷,设备年利用时间在6 500 h以上。由于核电站不燃烧有机燃料,因此不向大气排放硫和氮的氧化物以及碳酸气,从而降低了可能导致全球气候变化的环境污染。

发展核电站是我国电力工业的前景之一,目前我国正在沿海地区高速发展核电站。一些国家核电站生产的电能已超过总电量的一半,其中法国大约为75%。

极少数核电站的事故教训提醒设计者必须进一步提高核电站的安全性,不应将其建立在人口稠密地区和地震活动地区。尽管如此,从人类生态环境考虑,核电站仍应为电站发展的方向。

1.3 水电站与抽水蓄能电站

水电站是将水的势能转换为电能的电站。水轮机将水的势能转换为动能,然后带动发电机旋转再转换为电能。