



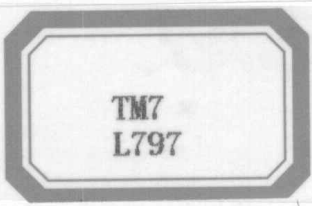
21 世纪电力系统及其自动化规划教材

# 电力工程基础

卢芸 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



郑州大学 \*04010834454X\*

# 21世纪电力系统及其自动化规划教材

## 电力工程基础

卢芸 主编

本书涉及的知识面广，在教材编写过程中力求做到深入浅出、主次分明及重点突出；注重理论教学和工程应用相结合，以掌握理论、强化应用为目的。本书力求做到层次分明、整体连贯，便于学生学习和理解。

全书共分7章，主要内容包括：概论，发电厂和变电所的一次系统，电力系统稳态分析，短路电流的分析与计算，电气设备的选择，发电厂和变电所的二次系统，接地与防雷等。为便于学生理解，书中配有大量例题及习题。

为了便于学生对电能生产、输送、分配及使用的全面了解，本书由电力系统的组成开始，详细地介绍了电力系统负荷的分类及相关计算，对一次设备及主接线进行详细地讲解，详细阐述了输电线路及变压器的参数计算及等效电路，重点针对开式电力网及闭式电力网的电压和功率分布计算进行了讲解，并介绍了电力系统的频率调整及电压调整。在对电力系统的短路故障分析中，就无限大容量系统及有限容量系统短路电流计算进行了阐述，这部分内容的讲解列举了多个例子进行计算，系统地介绍了电气设备选择的一般条件及常用电气设备的选择；介绍了断路器控制回路、信号回路及继电保护整定计算，最后对接地与防雷进行了讲解。



本书由沈阳工业大学卢芸任主编，卢芸编写第1章、第3章、第4章、第6章、第7章及附录，吉林电力高等专科学校李洪波编写第2章及附录。本书由山东大学张文主审。



本书在编写过程中，得到了机械工业出版社的大力支持，在此表示衷心的感谢。

机械工业出版社

TM7  
L797

编者

本书在介绍电力系统基本知识的基础上,系统地讲解了电力工程的基础理论及实用计算方法。全书共分7章,主要内容包括:概论,发电厂和变电所的一次系统,电力系统稳态分析,短路电流的分析与计算,电气设备的选择,发电厂和变电所的二次系统,接地与防雷等。每章后都有思考题与习题。

本书为电气工程类本科专业的专业基础课教材,也可作为电气工程技术人员参考用书。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师发邮件到 jinacmp@163.com 索取,或登录 www.cmpedu.com 注册下载。

## 图书在版编目(CIP)数据

电力工程基础/卢芸主编. —北京:机械工业出版社,2013.2  
21世纪电力系统及其自动化规划教材  
ISBN 978-7-111-40755-3

I. ①电… II. ①卢… III. ①电力工程—高等学校—教材 IV. ①TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第298287号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:吉玲 责任编辑:吉玲 王雅新

版式设计:赵颖喆 责任校对:张媛

责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013年2月第1版第1次印刷

184mm×260mm·12.25印张·296千字

标准书号:ISBN 978-7-111-40755-3

定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

第4章 短路电流的分析与计算	90	5.3.3 导体的选择	133
4.1 电力系统的短路故障	90	5.3.4 电缆与穿墙套管的选择	138
4.1.1 短路产生的原因及后果	90	5.3.5 低压一次设备的选择	141
4.1.2 短路的类型	90	与习题	141
4.2 标么制	91	第6章 发电厂和变电所的二次系统	142
4.2.1 标么值和基准值	91	6.1 二次系统的基本概念	142

# 前 言

《电力工程基础》为电气工程类本科专业的专业基础课教材。本书涉及的知识面较广，在教材编写中，精选教学内容，对于理论知识的叙述力求做到深入浅出、主次分明及重点突出；注重理论教学和工程实际相结合，以掌握理论、强化应用为目的，使学生通过本课程的学习，掌握电力工程的相关概念、理论及应用，提高分析问题及解决问题的能力；在内容的编排上，力求做到层次分明、整体连贯，便于学生学习和理解。

全书共分7章，主要内容包括：概论，发电厂和变电所的一次系统，电力系统稳态分析，短路电流的分析与计算，电气设备的选择，发电厂和变电所的二次系统，接地与防雷等。为便于学生理解所学的内容，关键章节配有详细分析解答的例题，同时每章都配有思考题与习题。

为了便于学生对电能生产、输送、分配和消费的过程有清晰全面的了解，本书由电力系统的组成开始，详细地介绍了电能的生产过程、电力系统负荷的分类及相关计算；对一次设备及主接线进行细致地讲解；详细阐述了输电线路及变压器的参数计算及等效电路，重点针对开式电力网及闭式电力网的电压和功率分布计算进行了讲解，并介绍了电力系统的频率调整及电压调整。在对电力系统的短路故障分析中，针对网络的复杂性介绍了网络的等效变换和简化，就无限大容量系统及有限容量系统进行了三相短路分析，对不对称短路电流计算进行了阐述，这部分内容的讲解尤其注重了与工程实际的结合，列举了多个例子进行计算。系统地介绍了电气设备的发热和电动力、电气设备选择的一般条件及常用电气设备的选择；针对发电厂和变电所的二次系统，介绍了断路器控制回路、信号回路及继电保护，重点对线路电流保护进行了讲解，并举例进行整定计算；最后对接地与防雷进行了详细的论述。

本书由沈阳工业大学卢芸任主编。其中，卢芸编写第1章、第3章、第4章、第6章、第7章及附录，吉林大学孙淑琴编写第2章及第5章。本书由山东大学张文主审。

本书在编写过程中得到机械工业出版社的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中错误或不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

# 目 录

本书在介绍电力系统基本知识的基础上,详细讲解了电力系统稳态分析、暂态分析、短路电流及实用计算方法。全书共分7章,主要内容包括:概论,发电厂和变电所的一次系统,电力系统稳态分析,短路电流的分析与计算,电力系统暂态分析,电力系统继电保护及自动装置,电力系统安全稳定控制。

前言	2.5.1 火力发电厂的典型接线	52
第1章 概论	2.5.2 水力发电厂的典型接线	53
1.1 电力系统的基本概念	2.5.3 变电所的主接线	54
1.1.1 电力系统的组成	思考题与习题	57
1.1.2 电力系统运行的特点和要求	第3章 电力系统稳态分析	58
1.1.3 电力系统的额定电压等级	3.1 输电线路的参数计算及等效电路	58
1.1.4 电力系统中性点接地方式	3.1.1 输电线路的参数计算	58
1.2 发电厂的类型及电能的生产过程	3.1.2 输电线路的等效电路	60
1.2.1 火力发电厂	3.2 变压器的参数计算及等效电路	62
1.2.2 水力发电厂	3.2.1 双绕组变压器的参数计算及等效电路	62
1.2.3 核能发电厂	3.2.2 三绕组变压器的参数计算及等效电路	63
1.2.4 其他能源发电	3.3 开式电力网的电压和功率分布计算	66
1.3 电力系统的负荷	3.3.1 输电线的电压和功率分布计算	66
1.3.1 电力负荷的分类	3.3.2 变压器的电压和功率分布计算	69
1.3.2 负荷的计算	3.3.3 同一电压等级开式电力网的计算	70
思考题与习题	3.3.4 多极电压开式电力网的计算	72
第2章 发电厂和变电所的一次系统	3.4 简单闭式电力网的计算	74
2.1 电网一次系统和二次系统的基本概念	3.4.1 两端供电电力网中的功率分布	74
2.2 电力线路的结构	3.4.2 考虑网络损耗时的两端供电电力网功率和电压分布的计算	76
2.2.1 架空线路	3.4.3 复杂闭式网络的计算方法	76
2.2.2 电缆线路	3.5 电力系统的频率调整	78
2.3 电气设备	3.5.1 频率调整的必要性	78
2.3.1 断路器	3.5.2 电力系统的频率特性	79
2.3.2 隔离开关	3.6 电力系统的电压调整	83
2.3.3 负荷开关	3.6.1 电压调整的必要性	83
2.3.4 高压熔断器	3.6.2 电力系统的无功功率—电压静态特性	84
2.3.5 互感器	3.6.3 电力系统的无功功率平衡	86
2.3.6 低压电器	3.6.4 电力系统的电压管理	87
2.4 发电厂及变电所主接线	思考题与习题	88
2.4.1 电气主接线的基本要求		
2.4.2 电气主接线的基本接线形式		
2.4.3 电气主接线设计		
2.5 电气一次系统接线实例		

<b>第 4 章 短路电流的分析与计算</b> .....	90	5.3.3 导体的选择 .....	135
4.1 电力系统的短路故障 .....	90	5.3.4 电缆与穿墙套管的选择 .....	138
4.1.1 短路产生的原因及后果 .....	90	5.3.5 低压一次设备的选择 .....	141
4.1.2 短路的类型 .....	90	思考题与习题 .....	141
4.2 标么制 .....	91	<b>第 6 章 发电厂和变电所的二次系统</b> .....	142
4.2.1 标么值和基准值 .....	91	6.1 二次系统的基本概念 .....	142
4.2.2 不同基准标么值的换算 .....	92	6.2 断路器控制电路和信号电路 .....	145
4.2.3 变压器联系的多极电压网络 中的标么值计算 .....	93	6.2.1 断路器控制电路 .....	145
4.2.4 网络的等效变换和简化 .....	94	6.2.2 信号电路 .....	147
4.3 无限大容量系统三相短路分析 .....	98	6.3 继电保护 .....	149
4.3.1 短路的暂态过程 .....	98	6.3.1 继电保护的基本原理及要求 .....	149
4.3.2 短路冲击电流和短路容量 .....	99	6.3.2 线路的电流保护 .....	151
4.3.3 无限大容量系统三相短路电 流的计算 .....	101	6.3.3 电力变压器的保护 .....	156
4.4 有限容量系统三相短路电流的实 用计算 .....	102	思考题与习题 .....	160
4.4.1 同步发电机突然三相短路的 暂态过程 .....	102	<b>第 7 章 接地与防雷</b> .....	161
4.4.2 起始次暂态电流和冲击电流 的计算 .....	103	7.1 接地与接零 .....	161
4.5 不对称短路电流计算 .....	107	7.1.1 接地与接零的有关概念 .....	161
4.5.1 对称分量法的应用 .....	108	7.1.2 接地与接零的目的和作用 .....	162
4.5.2 短路回路各元件的序电抗 .....	109	7.2 接地电阻的计算 .....	163
4.5.3 不对称短路的序网络图 .....	110	7.2.1 各种接地电阻值的规定 .....	163
4.5.4 不对称短路的分析计算 .....	111	7.2.2 人工接地装置工频接地电阻的 计算 .....	164
4.5.5 正序等效定则 .....	113	7.3 雷与防雷 .....	166
4.5.6 非故障处电流、电压的计算 .....	116	7.3.1 雷电的形式及其危害性 .....	166
思考题与习题 .....	118	7.3.2 防雷装置 .....	167
<b>第 5 章 电气设备的选择</b> .....	119	7.3.3 防雷装置接地电阻的计算 .....	171
5.1 电气设备的发热和电动力 .....	119	7.4 架空线的防雷保护 .....	171
5.1.1 发热和电动力对电气设备的 影响 .....	119	7.5 变配电所的防雷保护 .....	172
5.1.2 导体的发热和散热 .....	119	7.5.1 对直击雷的防护 .....	172
5.1.3 均匀导体的长期发热 .....	123	7.5.2 对线路侵入雷电波的防护 .....	172
5.1.4 导体的短时发热 .....	124	思考题与习题 .....	174
5.1.5 载流导体短路时电动力的计算 .....	127	<b>附录</b> .....	175
5.2 电气设备选择的一般条件 .....	131	附录 A 变压器的技术参数 .....	175
5.2.1 按正常工作条件选择电气设备 .....	131	附录 B 常用高压断路器的技术参数 .....	178
5.2.2 按短路情况进行校验 .....	131	附录 C 常用高压隔离开关的技术参数 .....	179
5.3 常用电气设备的选择 .....	132	附录 D 常用高压熔断器的技术参数 .....	179
5.3.1 高压一次设备的选择 .....	132	附录 E 常用电流互感器的技术参数 .....	180
5.3.2 互感器的选择 .....	133	附录 F 常用电压互感器的技术参数 .....	181
		附录 G 国内常用规格的导线尺寸及导 线性能表 .....	181
		附录 H 架空绝缘电缆技术要求 .....	185
		<b>参考文献</b> .....	187

# 第1章 概论

## 1.1 电力系统的基本概念

### 1.1.1 电力系统的组成

目前,我国工业、农业以及其他电力用户所需的电能多数是由火力和水力发电厂供给。发电厂可能位于用户附近,也可能与用户相距很远。在一般情况下,电能都是从发电厂经过输电线路输送给用户的,若用户与发电厂相距很远,则电能的输送需要升高电压,以减少电能损耗;同时,在电能的分配和消费时,为了满足用户对电压的要求,又要降低电压。因此,在发电厂与用户之间必须建立升压和降压变电所。

从经济观点来看,将发电厂设置在燃料或水力蕴藏丰富的地区及附近较为有利,这样不但可取得廉价的动力,而且用线路输送电能,比用运输工具输送燃料有显著的经济效益,因此大型火力发电厂一般都建设在蕴藏燃料的地方。而由于太阳能发电厂不受动力资源的限制,因此其位置可设立在负荷的中心。

所谓电力系统就是将各种类型发电厂的发电机、升压和降压变压器、输电线路以及各种用电设备联系在一起所构成的统一整体。电力系统起着电能生产、输送、分配和消费的作用。一个典型的电力系统如图 1-1 所示。

组成电力系统的优点如下:

- 1) 降低发电厂的造价和运行费用;
- 2) 在各个发电厂之间能对负荷进行经济合理的分配;
- 3) 充分利用当地的动力资源(水力、燃料),减少铁路的运输量;
- 4) 构成电力系统,能提高对用户供电的可靠性;
- 5) 便于集中管理和控制。

电力系统和动力部分构成动力系统。动力部分包括火力发电厂的锅炉、汽轮机,水力发电厂的水库、水轮机以及核发电厂的核反应堆等。

电力网是电力系统的一部分,包括变电所和不同电压等级的输电线路,其作用是输送和分配电能。

### 1.1.2 电力系统运行的特点和要求

电力系统的运行与其他工业生产相比,具有以下明显的特点:

(1) 电能不能大量储存。到目前为止,电能的大量储存问题还没有得到解决,电能的生产、输送、分配和消费,几乎是同时进行的。由于电能具有很高的传输速度,因此发电机在某一时刻发出的电能,经过输电线路会立刻送给用电设备,并由用电设备转换成其他形式的能量,一瞬间完成发电—输电—供电的全过程。而且发电量是随着用电量的变化而变化,生产量和消费量是平衡的。

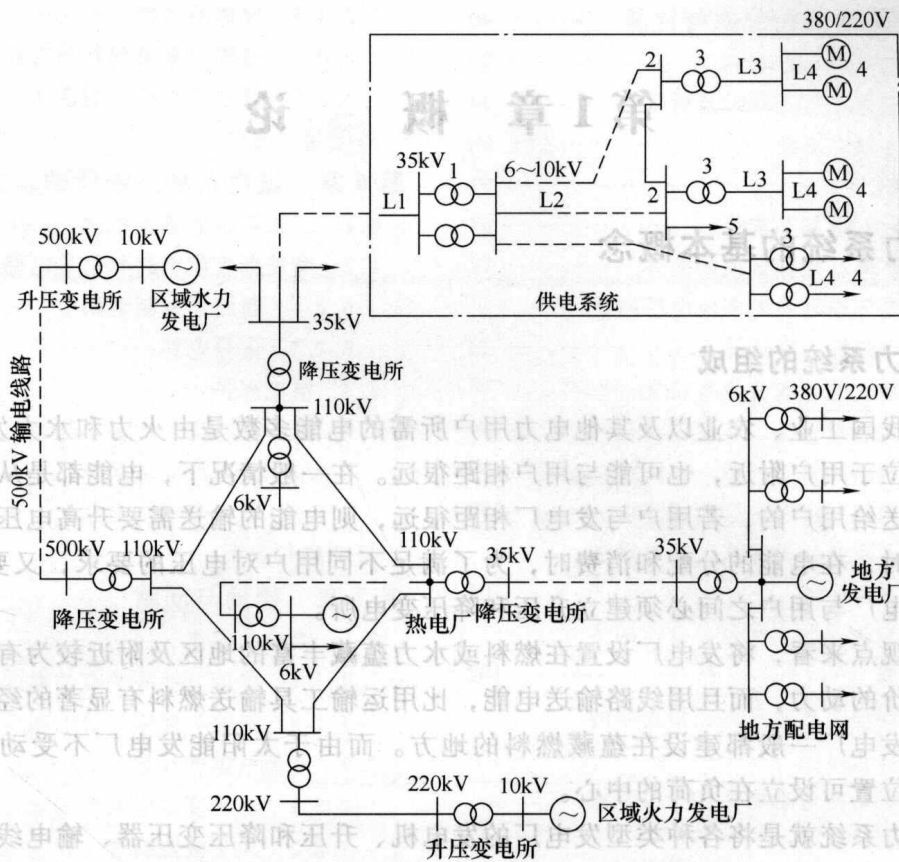


图 1-1 典型的电力系统

(2) 过渡过程十分短暂 电能以电磁波形式传播，有极高的传输速度，如开关切换操作、电网短路等过程，都是在很短时间内完成的。为了保证电力系统的正常运行，必须设置各种自动装置及保护装置等，以便对系统进行灵敏而迅速的监视、测量和保护。

(3) 电力系统的地区性特点较强 我国地域辽阔，自然资源分布很广，使得我国的电源结构有很强的地域特点，有的地区以火电为主，有的地区以水电为主，而且各地域的经济发展情况不一样，工业布局、城市规划等也不相同，因此必须针对不同地区的不同特点，对电力系统规划设计、运行管理、布局及调度等，进行全面考虑。

(4) 电力系统运行与国民经济各部门关系密切 由于电能的生产、输送、分配和消费比较方便，宜于大量生产、远距离输送、集中管理和自动控制等，使用电能较其他能量有显著的优点，因此国民经济各部门广泛使用着电能，电能供应的中断或减少将影响国民经济各部门的正常工作。

根据上述特点，对电力系统有如下基本要求：

(1) 保证电力系统供电的可靠性 供电中断将使生产停顿、生活混乱，甚至危及人身和设备安全，给国民经济造成巨大损失。因此，电力系统运行首先要满足安全发供电的要求。

(2) 保证电力系统的电能质量 电力系统的电能质量指标是以电压、频率及波形来衡量的。电压或频率偏移过大时，不仅会引起电能损耗增大，而且会引起减产、造成大量废品、加速绝缘老化导致缩短电气设备的使用寿命。因此，电力系统不仅要满足用户对电能的



需求，还要保证电能具有良好的质量。

(3) 为用户提供充足的电能 电力系统要为国民经济各部门提供充足的电能，最大限度地满足用户的用电需求。为此，首先应按照电力先行的原则做好电力系统发展的规划设计，以确保电力工业的建设优先于其他的工业部门。其次，要加强现有设备的维护，以充分发挥潜力，防止事故的发生。

(4) 保证电力系统运行的经济性 降低生产电能所消耗的能源及输送、分配过程的电能损耗具有重要意义，为此应力求电力系统经济运行，使负荷在各发电厂之间合理分配。此外，还应考虑电力系统运行的灵活性和扩建的可能性等。

应当指出，上述要求是相互关联、互相制约而又相互矛盾的，因此，在满足某项要求时，必须兼顾其他，以便取得综合的经济效益。

### 1.1.3 电力系统的额定电压等级

电力系统的额定电压等级是根据国民经济发展的需要、技术经济上的合理性、电机电器制造工业的水平等因素，经全面研究分析，由国家制定颁布的。从电气设备制造的角度和电力工业的发展来看，电力系统额定电压等级不宜过多。我国交流电力网和电力设备的额定电压见表 1-1。

表 1-1 我国交流电力网和电力设备的额定电压

	电力网和用电设备 额定电压	发电机额定电压	电力变压器额定电压	
			一次绕组	二次绕组
低压/V	220/380	115	220/127	230/133
	380/660	230	380/220	400/230
	1000(1140)	400 690	660/380	690/400
高压/kV	3	3.15	3 及 3.15	3.15 及 3.3
	6	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6
	10	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11
	20	13.8, 15.75, 18, 20, 22, 24, 26	13.8, 15.75, 18, 20	—
	35	—	35	38.5
	66	—	63	69
	110	—	110	121
220	—	220	242	
330	—	330	363	
500	—	500	550	
750	—	750	—	

注：1. 表中同一组数据中较低的数值是相电压，较高的数值是线电压；只有一个数值者是线电压。

2. 括号中的数值为用户有要求时使用。

额定电压是用电设备、发电机和变压器正常工作时具有最好经济技术指标的电压。从表 1-1 中可以看出，在同一电压等级下，各种设备的额定电压并不完全相等。

(1) 用电设备 为了使用电设备经济有效地运行，要求在制造用电设备时，用电设备的额定电压应与线路的额定电压相等。

(2) 发电机 由于一般用电设备的允许电压偏移规定为  $\pm 5\%$  的额定值, 因此就要求线路首端电压比线路额定电压高  $5\%$ , 这样才能使其末端电压不比用电设备额定电压低  $5\%$ 。由于发电机是接于线路首端, 因此发电机额定电压应比线路额定电压高  $5\%$ 。

(3) 变压器 电力系统中的不同电压等级线路是通过变压器连接起来的。当变压器的一次绕组连接在对应于某一级额定电压线路的末端时, 其相当于用电设备, 它的额定电压应与用电设备额定电压相等。当变压器一次绕组直接与发电机连接时, 其额定电压则应与发电机的额定电压相等, 即比线路额定电压高  $5\%$ 。因为变压器二次绕组向负荷供电, 相当于发电机, 所以二次绕组额定电压应比线路额定电压高  $5\%$ 。又因为变压器二次绕组额定电压规定为变压器空载电压, 当变压器满载时, 约有  $5\%$  的电压降, 如果变压器二次侧供电线路较长, 则变压器二次绕组的额定电压, 一方面要考虑补偿变压器内部  $5\%$  的阻抗电压降, 另一方面要考虑变压器满载时输出的二次电压还要高于线路额定电压的  $5\%$ , 以补偿线路上的电压降, 所以它要比线路额定电压高  $10\%$ ; 如果变压器二次侧供电线路较短或变压器阻抗较小, 则变压器二次绕组的额定电压只需比线路额定电压高  $5\%$ 。

目前, 我国电力系统中,  $220\text{kV}$  以上电压等级多用于大型电力系统的主干线;  $110\text{kV}$  则多用于中、小型电力系统的主干线, 也可用于大型电力系统的二次网络。一般工厂内部多采用  $6\sim 10\text{kV}$  的高压配电电压。从经济技术指标来看, 内部配电电压最好采用  $10\text{kV}$ , 但如果工厂拥有相当数量的  $6\text{kV}$  用电设备时, 也可考虑采用  $6\text{kV}$  电压作为高压配电电压。 $380\text{V}/220\text{V}$  电压等级多作为低压配电电压。表 1-2 列出了电力网的额定电压等级及其相适应的传输功率和传输距离。

表 1-2 电力网的额定电压 (线电压) 等级及其相适应的传输功率和传输距离

线路电压/kV	传输功率/MW	传输距离/km	线路电压/kV	传输功率/MW	传输距离/km
3	0.1 ~ 1	1 ~ 3	110	10 ~ 50	50 ~ 150
6	0.1 ~ 1.2	4 ~ 15	220	100 ~ 500	100 ~ 300
10	0.2 ~ 2	6 ~ 20	330	200 ~ 1000	200 ~ 600
35	2 ~ 10	20 ~ 50	500	1000 ~ 1500	250 ~ 850
60	3.5 ~ 30	30 ~ 100	750	2000 ~ 2500	500 以上

### 1.1.4 电力系统中性点接地方式

电力系统的中性点是指星形联结的变压器和发电机的中性点。电力系统中性点的接地方式分为两大类: 一类是小电流接地系统, 包括中性点不接地或经消弧线圈接地; 另一类是大电流接地系统, 包括中性点直接接地或经小阻抗接地。采用最广泛的中性点接地方式有三种: 中性点不接地、中性点经消弧线圈接地及中性点直接接地。

#### 1. 中性点不接地

我国  $3\sim 60\text{kV}$  的电力系统通常采用中性点不接地方式。中性点不接地电力系统正常运行时的电路和相量图如图 1-2 所示。

如图 1-2a 所示, 假设 A、B、C 三相系统的电压和线路参数都是对称的, 把每相导线的对地电容集中用电容  $C$  来表示, 并忽略导线相间分布电容。由于正常运行时三相电压  $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$  是对称的, 所以三相导线对地电容电流  $\dot{I}_{CA}$ 、 $\dot{I}_{CB}$ 、 $\dot{I}_{CC}$  也是对称的, 三相电容电流相

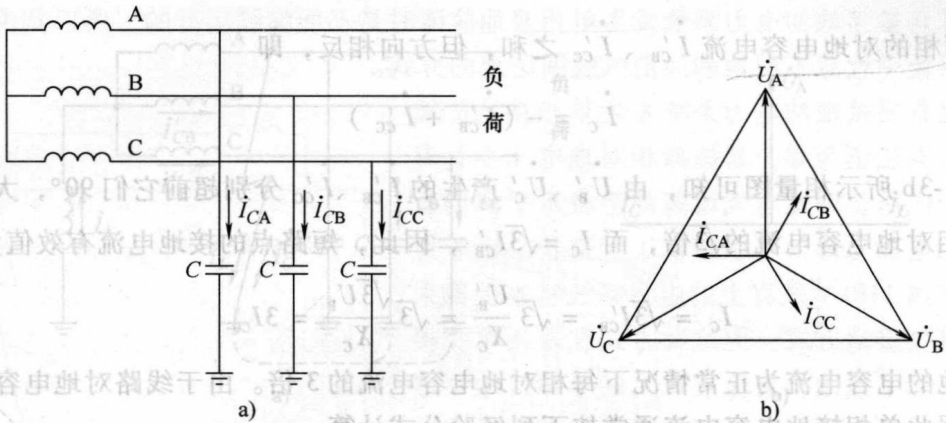


图 1-2 中性点不接地电力系统正常运行时的电路和相量图

a) 电路 b) 相量图

量之和为零，没有电容电流经过大地流动。

如果系统发生单相（如 A 相）接地故障时，如图 1-3 所示，则故障相（A 相）对地电压降为零，中性点对地电压由原来的零升高为相电压，此时，B 相和 C 相对地电压升高为原来的 $\sqrt{3}$ 倍，即变为线电压，如图 1-3b 所示。但此时三相之间的线电压仍然对称，因此用户的三相用电设备仍能正常运行，这是中性点不接地系统的最大优点。但是，发生单相接地后，其运行时间不能太长，因为此时非故障相的对地电压升高到接近线电压，很容易发生对地闪络，从而造成相间短路。因此，我国有关规程规定，中性点不接地系统发生单相接地故障后，允许继续运行的时间不能超过 2h，在此时间内应采取措施尽快查出故障原因，予以排除，否则，就应将故障线路停电检修。

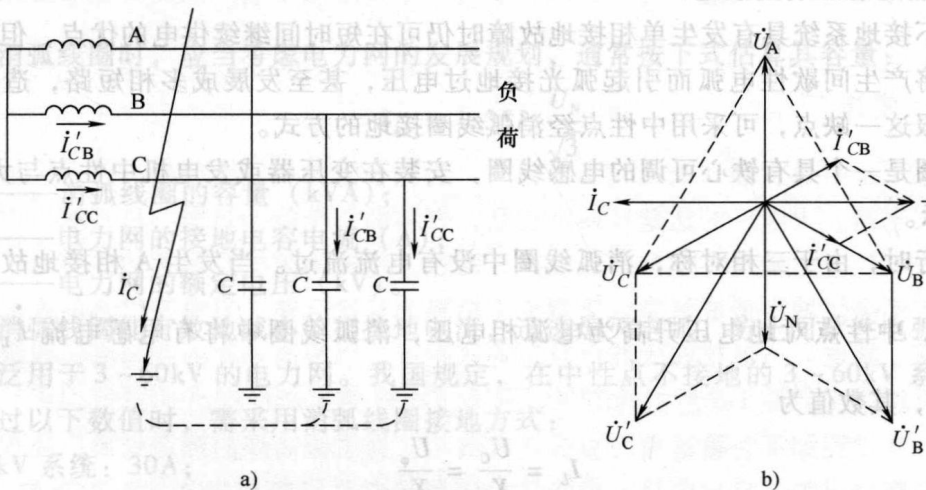


图 1-3 中性点不接地系统发生单相接地故障时的电路和相量图

a) 电路 b) 相量图

中性点不接地系统发生单相接地故障时，在接地点将流过接地故障电流（电容电流）。

例如，A 相发生接地故障时，A 相对地电容被短接，流过接地点的故障电流  $I_c$ （电容电流）

为 B、C 两相的对地电容电流  $\dot{I}'_{CB}$ 、 $\dot{I}'_{CC}$  之和，但方向相反，即

$$\dot{I}_C = -(\dot{I}'_{CB} + \dot{I}'_{CC}) \quad (1-1)$$

从图 1-3b 所示相量图可知，由  $\dot{U}'_B$ 、 $\dot{U}'_C$  产生的  $\dot{I}'_{CB}$ 、 $\dot{I}'_{CC}$  分别超前它们  $90^\circ$ ，大小为正常运行时各相对地电容电流的  $\sqrt{3}$  倍，而  $I_C = \sqrt{3}I'_{CB}$ ，因此，短路点的接地电流有效值为

$$I_C = \sqrt{3}I'_{CB} = \sqrt{3} \frac{U'_B}{X_C} = \sqrt{3} \frac{\sqrt{3}U_B}{X_C} = 3I_{C0} \quad (1-2)$$

即单相接地的电容电流为正常情况下每相对地电容电流的 3 倍。由于线路对地电容  $C$  很难准确计算，因此单相接地电容电流通常按下列经验公式计算：

$$I_C = \frac{(l_{oh} + 35l_{cab})U_N}{350} \quad (1-3)$$

式中  $U_N$ ——电力网的额定线电压 (kV)；

$l_{oh}$ ——同级电力网具有电气联系的架空线路总长度 (km)；

$l_{cab}$ ——同级电力网具有电气联系的电缆线路总长度 (km)。

必须指出，中性点不接地系统发生单相接地故障时，接地电流在故障处可能产生稳定的或间歇性的电弧。如果接地电流大于 30A 时，将形成稳定电弧，成为持续性电弧接地，这将烧毁电气设备和可能引起多相相间短路。如果接地电流大于 5~10A，而小于 30A，则有可能形成间歇性电弧，这是由于电力网中电感和电容形成了谐振回路所致。间歇性电弧容易引起弧光接地过电压，其幅值可达  $(2.5 \sim 3)U_\phi$ ，将危及整个电网的绝缘安全。如果接地电流在 5A 以下，当电流经过零值时，电弧就会自然熄灭。

## 2. 中性点经消弧线圈接地

中性点不接地系统具有发生单相接地故障时仍可在短时间继续供电的优点，但当接地电流较大时，将产生间歇性电弧而引起弧光接地过电压，甚至发展成多相短路，造成严重事故。为了克服这一缺点，可采用中性点经消弧线圈接地的方式。

消弧线圈是一个具有铁心可调的电感线圈，安装在变压器或发电机中性点与大地之间，如图 1-4 所示。

正常运行时，由于三相对称，消弧线圈中没有电流流过。当发生 A 相接地故障时，如图 1-4a 所示，中性点对地电压升高为电源相电压，消弧线圈中将有电感电流  $\dot{I}_L$  (滞后于  $\dot{U}_A 90^\circ$ ) 流过，其数值为

$$I_L = \frac{U_c}{X_L} = \frac{U_\phi}{X_L} \quad (1-4)$$

式中  $U_\phi$ ——电力网的相电压 (kV)；

$X_L$ ——消弧线圈的电抗 ( $\Omega$ )。

电力系统中性点经消弧线圈接地时，有三种补偿方式：全补偿方式、欠补偿方式和过补偿方式。

(1) 全补偿方式 在选择消弧线圈的电感时，使  $I_L = I_C$ ，则接地故障点电流为零，即全补偿方式。此时，由于感抗等于容抗，电网将发生谐振，产生危险的高电压和过电流，可能

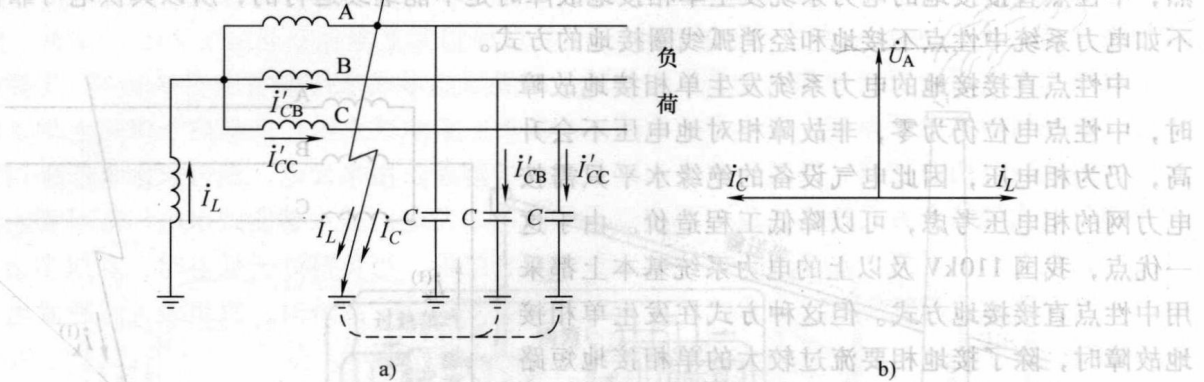


图 1-4 中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障时的电路和相量图

a) 电路 b) 相量图

造成设备的绝缘损坏，影响系统的安全运行。因此，一般电网都不采用全补偿方式。

(2) 欠补偿方式 在选择消弧线圈的电感时，使  $I_L < I_C$ ，此时，接地故障点有未被补偿的电容电流流过。采用欠补偿方式时，当电网运行方式改变而切除部分线路时，整个电力网对地电容将减少，有可能发展成为全补偿方式，导致电力网发生谐振，危及系统安全运行。所以，欠补偿方式很少被采用。

(3) 过补偿方式 在选择消弧线圈的电感时，使  $I_L > I_C$ ，此时，接地故障点有剩余的电感电流流过。在过补偿方式下，即使电力系统运行方式改变而切除部分线路时，也不会发展成为全补偿方式，致使电力网发生谐振。同时，由于消弧线圈有一定的裕度，今后电力网发展，线路增多、对地电容增加后，原有消弧线圈仍可继续使用。因此，实际上大多采用过补偿方式。

选择消弧线圈时，应当考虑电力网的发展规划，通常按下式估算其容量：

$$S_{ar} = 1.35 I_C \frac{U_N}{\sqrt{3}} \quad (1-5)$$

式中  $S_{ar}$ ——消弧线圈的容量 (kVA)；

$I_C$ ——电力网的接地电容电流 (A)；

$U_N$ ——电力网的额定电压 (kV)。

由于消弧线圈能有效地减小单相接地电流，迅速熄灭电弧，防止间歇性电弧引起的过电压，故广泛用于 3 ~ 60kV 的电力网。我国规定，在中性点不接地的 3 ~ 60kV 系统中，当电容电流超过以下数值时，需采用消弧线圈接地方式：

3 ~ 6kV 系统：30A；

10kV 系统：20A；

35 ~ 60kV 系统：10A。

### 3. 中性点直接接地

中性点直接接地的电力系统如图 1-5 所示。当该系统发生单相接地故障时，由于单相接地短路的线路上将流过很大的单相短路电流  $I_k^{(1)}$ ，使线路上安装的继电保护装置迅速动作，断路器跳闸将故障部分断开，因此，可以防止单相接地故障时产生间歇性电弧过电压。显

然，中性点直接接地的电力系统发生单相接地故障时是不能继续运行的，所以其供电可靠性不如电力系统中性点不接地和经消弧线圈接地的方式。

中性点直接接地的电力系统发生单相接地故障时，中性点电位仍为零，非故障相对地电压不会升高，仍为相电压，因此电气设备的绝缘水平只需按电力网的相电压考虑，可以降低工程造价。由于这一优点，我国 110kV 及以上的电力系统基本上都采用中性点直接接地方式。但这种方式在发生单相接地故障时，除了接地相要流过较大的单相接地短路电流，危害设备的运行外，严重时还会破坏系统稳定，中断供电。为了弥补这一缺点，可在线路上装设三相或单相自动重合闸装置，以此来提高供电的可靠性。

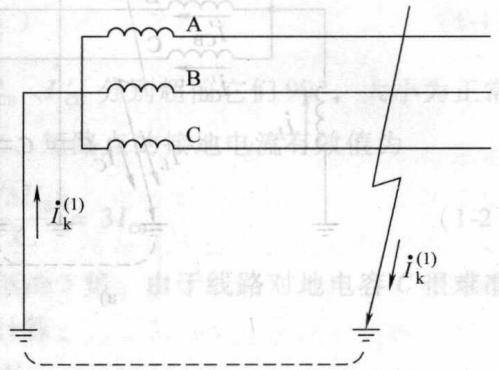


图 1-5 中性点直接接地的电力系统

对于 1kV 以下的低压系统来说，电力网的绝缘水平已不是影响供电系统安全运行的主要矛盾，系统中性点接地与否，主要从人身安全考虑。在 380V/220V 系统中，一般都采用中性点直接接地方式，一旦发生单相接地故障时，可以迅速分断断路器或熔断熔丝，将故障部分切除。

## 1.2 发电厂的类型及电能的生产过程

发电厂是将各种自然资源转化为电能的工厂。按利用能源的类型不同，发电厂可分为火力发电厂、水力发电厂、核能发电厂、风能发电厂、太阳能发电厂以及其他形式能源的发电厂。

### 1.2.1 火力发电厂

火力发电厂是将煤、油、天然气及其他燃料的化学能转换成电能的工厂。火力发电厂简称火电厂或火电站。火电厂的能量转换过程是，燃料的化学能→热能→机械能→电能。单一生产电能的火电厂应尽量建在燃料产地和矿区附近，这样的火电厂也称为矿口电厂或坑口电厂，它的生产不会对城市造成污染，又避免了燃料的长途运输。发电兼供热的火电厂称为热电厂或热电站，热电厂一般建在大城市及工业区附近，以提高热能的利用率。我国火电厂所使用的燃料以煤为主。图 1-6 所示为凝气式火力发电厂的生产过程。

简单的生产过程如下：输送带将原煤送入煤斗，为了提高煤的燃烧效率，将煤斗中的原煤送入磨煤机磨成煤粉，然后由排粉机将煤粉随同热空气经喷燃器送入锅炉燃烧室内燃烧。燃烧时产生的热量使燃烧室四周水冷壁中的水变成蒸汽，此蒸汽再通过过热器进一步吸收烟气的热量而变成高压高温的过热蒸汽。过热蒸汽经过主蒸汽管进入汽轮机，该蒸汽在喷管里膨胀而高速冲动汽轮机的转子旋转，将热能变成了机械能。汽轮机带动联轴的发电机发电，机械能就变成了电能。最后，把在汽轮机中作了功的蒸汽送往冷凝器凝结成水，经除氧器除氧、加热器加热后，由给水泵送进省煤器预热，重新送回锅炉，完成水的重复使用。燃烧室中产生的热量一部分用于加热过热器中的蒸汽，其余的热量由燃烧后形成的烟气携带，穿过

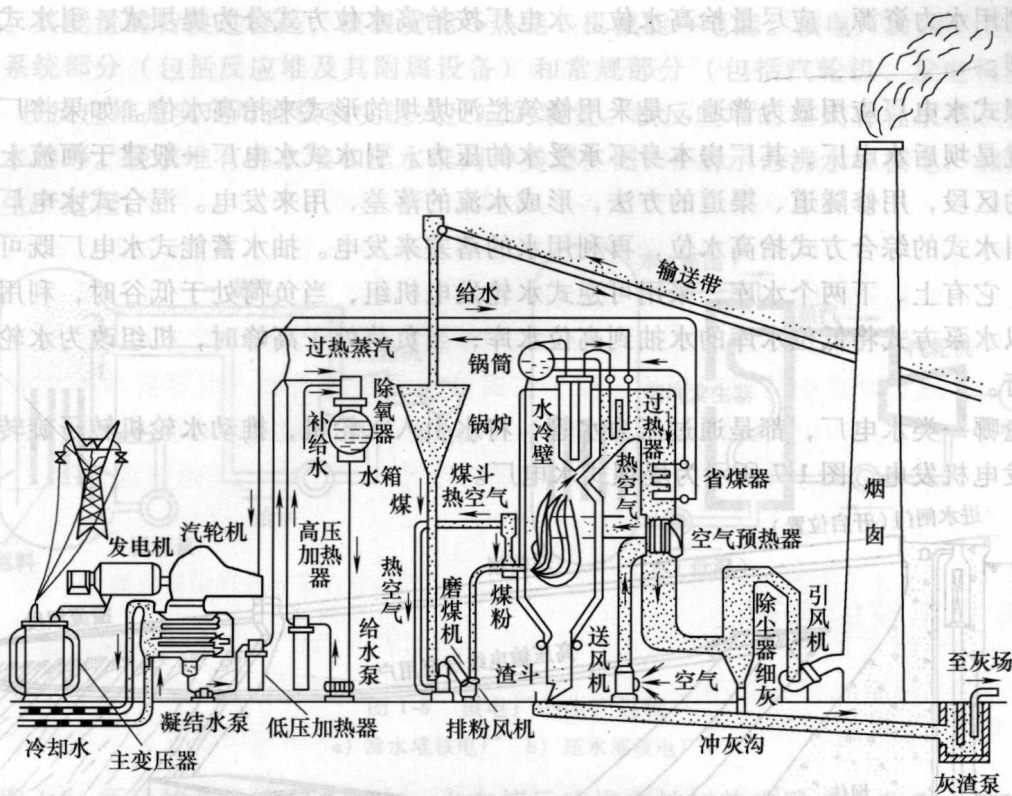


图 1-6 凝气式火力发电厂的生产过程

省煤器、空气预热器，将热量传递给蒸汽、水和空气后，经除尘器除尘，由引风机抽出，通过烟囱排入大气中。炉渣和除尘器下部的细灰，通过冲灰沟水流，由灰渣泵抽出，排往厂外的灰场。

凝气式火力发电厂的主要缺点是热效率不高，原因是作过功的蒸汽仍含有热量，这部分热量由循环水带出变成热损失，使发电厂的效率只能达到 35% ~ 45%。

热电厂的效率较高，一般可达到 60% ~ 70%，这是由于在热电厂中，可以从汽轮机中抽出蒸汽热供给用户，这就使得进入冷凝器中的蒸汽大大减少，使循环水的热损耗大大降低。但由于受热负荷条件的限制，热电厂不可能大量兴建。

### 1.2.2 水力发电厂

水力发电厂是利用水流的位能来生产电能的工厂。水力发电厂简称水电厂或水电站。其能量的转换过程是，水的位能→机械能→电能。

水电厂的发电容量取决于水流的位能差和水流的流量，即

$$P = 9.8\eta QH \tag{1-6}$$

式中  $P$ ——水电厂的发电容量 (kW)；

$\eta$ ——水电厂的效率；

$Q$ ——通过水轮机的水流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )；

$H$ ——上下水位的落差 (m)。

由式 (1-6) 可以看出，在流量一定的条件下，水流落差越大，水电厂出力就越大。为

了充分利用水力资源，应尽量抬高水位。水电厂按抬高水位方式分为堤坝式、引水式和混合式等类型。

堤坝式水电厂应用最为普遍，是采用修筑拦河堤坝的形式来抬高水位。如果将厂房建在坝后，就是坝后水电厂，其厂房本身不承受水的压力。引水式水电厂一般建于河流上游、坡度较大的区段，用修隧道、渠道的方法，形成水流的落差，用来发电。混合式水电厂采用堤坝式和引水式的综合方式抬高水位，再利用水的落差来发电。抽水蓄能式水电厂既可蓄水又可发电，它有上、下两个水库，采用可逆式水轮发电机组，当负荷处于低谷时，利用多余的电力，以水泵方式将低位水库的水抽到高位水库；当负荷处于高峰时，机组改为水轮发电机方式运行。

无论哪一类水电厂，都是通过压力水管，将水引入水轮机，推动水轮机转子旋转，水轮机带动发电机发电。图 1-7 所示为堤坝式水电厂。

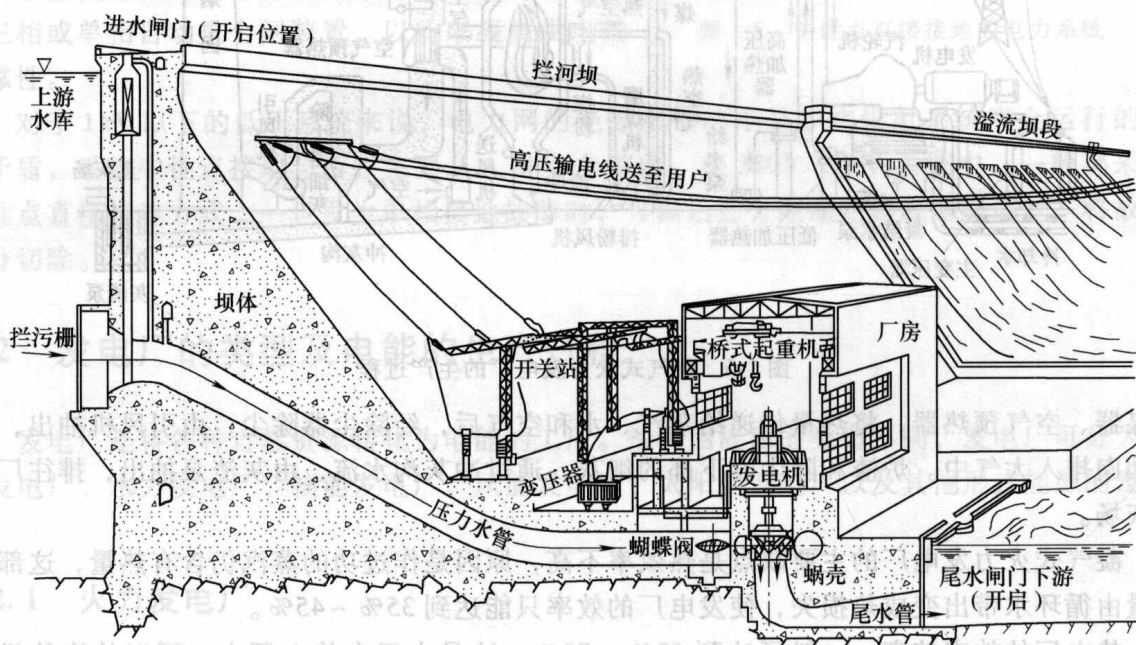


图 1-7 堤坝式水电厂

在图 1-7 中，由拦河水坝将水位抬高，水流由高水位流向低水位，经过压力水管进入水轮机，推动水轮机转子旋转，水轮机转子再带动同轴发电机发电，将机械能变成了电能。水流对水轮机做功后，经尾水管排往下游。

与火电厂相比，水电厂的生产过程要简单得多。水电厂不消耗燃料，无环境污染，生产效率高，发电成本仅为火电厂的 25% ~ 35%。水电厂也容易实现自动化控制与管理，并能适应负荷的急剧变化。然而，水电厂也存在投资大，建设工期长，受季节水量变化的影响较大的缺点，同时，建设水电厂还会涉及因淹没农田而带来的移民问题，并可能会出现破坏人文景观、生态平衡等一系列问题。

### 1.2.3 核能发电厂

核能发电厂是利用核能来发电的工厂。核能发电厂简称核电厂或核电站。核电厂的生产过程与火电厂大体相同，它以核反应堆代替火电厂的燃煤锅炉，以少量的核燃料代替了大量



的煤炭。其能量的转换过程是，核裂变能→热能→机械能→电能。核电厂由两个主要部分组成：核系统部分（包括反应堆及其附属设备）和常规部分（包括汽轮机、发电机及其附属设备）。核反应堆是实现可控核裂变链式反应的装置。核反应堆的型式有轻水堆、重水堆及石墨冷水堆等。轻水堆有沸水堆和压水堆两种类型。图 1-8 所示为沸水堆核电厂和压水堆核电厂的生产过程。

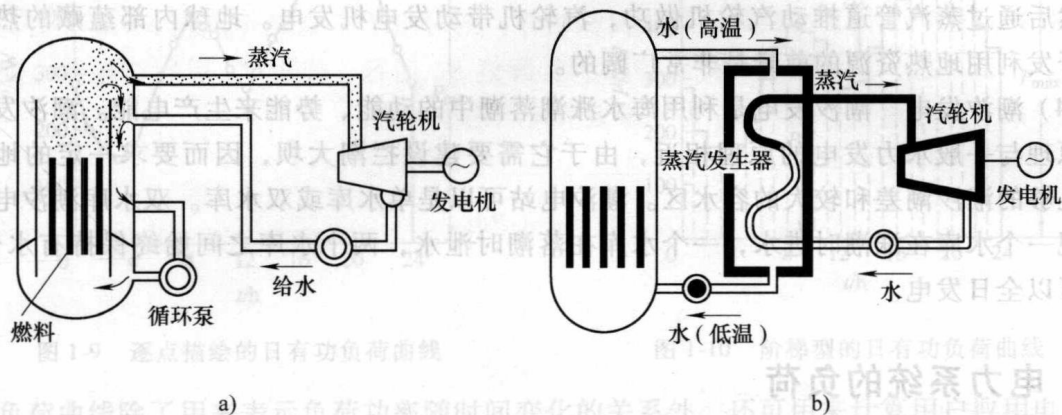


图 1-8 核电厂的生产过程

a) 沸水堆核电厂 b) 压水堆核电厂

在图 1-8a 所示的沸水堆核电厂中，水在核反应堆中被加热沸腾成为蒸汽，然后直接引入汽轮机做功，汽轮机带动发电机发电，做完功的蒸汽经冷凝成水后，再用泵打回核反应堆。沸水堆的系统结构简单，但整个热力系统仅由单回路构成，因而有可能造成汽轮机等设备受放射性污染，使得这些设备的运行、维护及检修等变得复杂和困难。在图 1-8b 所示的压水堆核电厂中，水在核反应堆中不沸腾，它的第一回路向蒸汽发生器供热，蒸汽发生器将第二回路中的水加热变成高压蒸汽，推动汽轮机做功，进而带动发电机发电，做完功的蒸汽经冷凝成水后，再用泵将水输送回蒸汽发生器。由于在这种形式中，两个回路各自独立循环，因此，不会造成设备的放射性污染，对运行和维护都比较方便。我国核电厂以压水堆核电厂为主。

#### 1.2.4 其他能源发电

除火力发电、水力发电及核能发电外，利用风能、太阳能、地热及潮汐等能源生产电能的研究及应用也在不断发展中。

(1) 风力发电 风力发电是利用风的动能来生产电能。风力发电的过程是，当风使旋转叶片转子旋转时，风的动能就转变成机械能，再通过升速装置驱动发电机发出电能。随着世界能源消耗的加快、传统能源储量的减少，风力发电这种绿色能源越来越得到重视。近几年，我国的风电产业也得到了飞速发展，从引进技术到自主研发，国产化率得到大幅提高，国产风电机组已占主导地位，发展大容量风电机组已成为目前我国风电发展的总体趋势。

(2) 太阳能发电 太阳能发电是利用太阳光能或太阳热能来生产电能。太阳光能是利用太阳能电池将太阳光能直接转化为电能。太阳热能发电有直接热电转换和间接热电转换两种形式。温差发电、热离子和磁流体发电等，属于直接热电转换方式发电；将太阳能集中或分散地聚集起来，通过热交换器，将水变成蒸汽驱动汽轮机发电，属于间接热电转换方式发