

电力工业学校重点教材

发变电站电气一次系统

成都水力发电学校 陈建亚 主编

China Electric Power Press

中国电力出版社

电力工业学校

发变电站电气一次系统

成都水力发电学校 陈建亚 主编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书为电力工业学校重点教材之一。全书共分两篇十章。第一篇为发变电站一次系统，主要内容为：绪论、电力系统中性点运行方式、电气主接线、发电厂与变电所自用电、配电装置。第二篇为过电压及其保护，主要内容为：波动过程、雷电及防雷设备、输电线路的防雷、发电厂和变电所的防雷保护、内部过电压。

本书除作为电力工业学校有关专业的教材外，还可作为发电厂与变电所技术工人培训的参考教材和技术工人自学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

发变电站电气一次系统/陈建亚主编. —北京: 中国电力出版社, 1999

电力工业学校重点教材

ISBN 7-5083-0011-4

I. 发… II. 陈… III. ①发电厂—一次系统—专业学校—教材 ②变电所—一次系统—专业学校—教材
IV. TM645.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 05920 号

中国电力出版社出版、发行

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

保定列电印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1999 年 8 月第一版 1999 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.25 印张 228 千字

印数 0001—4150 册 定价 16.00 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)

序

近年来，电力职业技术教育在结构改革过程中，创建了将中专和技校融为一体的新型办学模式——形成统一的电力工业学校，与此同时，进行了专业设置、教学计划、课程体系等一系列教学改革。教材作为教与学双边活动过程中不可或缺的信息载体，其改革和建设必然是教学改革的重要组成部分。为了巩固教育、教学改革已经取得的成果，推动改革持续深入发展，满足电力工业学校教学工作的急需，并促进教学质量不断提高，从1996年底开始，便着手组织力量进行教材改革的研究、探索和教材建设的安排部署，先后成立了电力工业学校教材建设研究课题组，制订了《关于电力工业学校教材建设的若干意见》和《电力工业学校教材出版、推荐、评优暂行办法》，组建了电力工业学校教材编审委员会，并于1997年末在电力职业技术教育委员会各教学研究会和网、省电力公司教育部门推荐的基础上，经过审议，遴选确定了电力工业学校第一批（23种）重点教材编审出版计划。

为了加快教材建设步伐，繁荣教材创作局面，电力工业学校教材建设采取点面结合、统分结合的方法，以重点教材带动一般教材。重点教材的建设旨在对教材改革起重点研究、典型引路、以点带面的龙头作用。这批重点教材力求根据职业技术教育的特点和培养应用型人才的教育目标，突出教材的定向性或针对性，以电力行业工作岗位需要的综合职业能力和素质要求，作为界定教材内容的依据，不片面追求学科体系的完整性，而强调贴近生产实际和工作实际，使理论同实践紧密结合，传授知识同培训技能紧密结合；精选教材内容，删繁就简，返璞归真，充实技术性、工艺性、实用性的内容，而且体现先进性和科学性的原则；注重定性分析，阐明物理意义和应用方法，简化某些论证，减少不必要的数学推导；在内容的编排、组合上，一是最大限度地做到模块化，增强教材使用的灵活性，便于不同教学阶段、不同专业采用，二是使理论阐述同实践指导有机结合，便于在教学过程中贯穿能力培养这一主线，采用以实际训练为轴心，把讲授、实验、实习融于一体的教学方式；适应各校功能延伸的新要求，兼顾各种职业培训对教材的需要。

这批教材的出版只是整个教材改革和建设的阶段性成果，仍需再接再厉，继续深化教材改革，推进教材建设。预期经过几年的努力，会形成一套具有电力职业技术教育特色，以职业能力培养为主线，门类比较齐全，形式比较多样，并能与其他教育相衔接，兼顾职工培训需要的教材体系。

中国电力企业联合会教育培训部
电力工业学校教材编审委员会

1998年9月

前 言

《发变电站电气一次系统》是电力工业学校《发电厂及变电站（所）电气运行与检修》（3、4年制）和《发电厂电力系统运行》（4、5年制）专业的一门主要专业课程，是按照中国电力企业联合会教育培训部1996年11月颁发的教学计划（试行）和电气类专业教研会组织审定过的教学大纲为依据进行编写的。

本书是电力工业学校教材编审委员会确定的重点教材，遵照电力职业技术教育课程改革的原则和基本思路，力求贯彻以能力为本位的思想。本书共分十章，前五章内容主要包括：电力系统中性点运行方式、电气主接线、自用电和配电装置，后五章内容主要包括：波动过程介绍、防雷设备、大气过电压和内部过电压的防护等。在编写过程中，注意针对培养目标，努力克服内容“偏多、偏深、偏难、偏向设计”的倾向，力求密切联系实际、突出职业教育的特点，以培养生产第一线应用型人才为出发点。书中每章有学习提示，小结和复习思考题，供学习中参考选用。

随着电力工业的飞速发展，要求教学内容不断更新，本书在有关章节中适当增加了反映新的应用领域的一些内容。在电气制图、图形符号上，均采用我国颁布的新标准。

本书由成都水力发电学校陈建亚主编，并编写第一、二、三、四、五章；成都水力发电学校薛婉瑜参加编写第六、七、八、九、十章。全书由福州高级电力技工学校邱潭生主审。

在编写过程中，得到众多同行的帮助，在此谨表谢意。

本教材的专业性较强。由于我们的教学水平和专业实践经验有限，对于书中存在的缺点和不足之处，恳切希望广大读者批评指正。

编 者

1998年10月

目 录

序
前言

第一篇 发变电站一次系统

第一章 绪论	1
第一节 电力系统及电力网简介	1
第二节 发电厂的类型和特点	3
第三节 变电所的类型和特点	7
小结	7
复习思考题	8
第二章 电力系统中性点运行方式	9
第一节 电力系统中性点运行方式概述	9
第二节 中性点不接地系统	10
第三节 中性点经消弧线圈接地系统	13
第四节 中性点直接接地系统	16
第五节 各种中性点运行方式的综合比较	16
小结	18
复习思考题	19
第三章 电气主接线	20
第一节 概述	20
第二节 单母线接线	22
第三节 双母线接线	26
第四节 其它有母线接线形式	31
第五节 无母线的主接线	33
第六节 电气主接线实例	36
小结	40
复习思考题	41
第四章 发电厂与变电所自用电	43
第一节 发电厂厂用电概述	43
第二节 厂用电接线	44
第三节 变电所自用电	50
小结	52
复习思考题	53

第五章 配电装置	54
第一节 配电装置概述	54
第二节 屋内配电装置	60
第三节 屋外配电装置	64
第四节 成套配电装置	69
小结	75
复习思考题	76

第二篇 过电压及其保护

第六章 波动过程	78
第一节 单根无损线上的波过程	78
第二节 行波的折射与反射	81
第三节 行波穿过电感和从电容旁经过	85
第四节 变压器绕组中的波过程	88
第五节 旋转电机绕组中的波过程	93
小结	94
复习思考题	95
第七章 雷电及防雷设备	96
第一节 雷电放电及雷电的主要参数	96
第二节 避雷针与避雷线的保护范围	100
第三节 避雷器	104
第四节 防雷接地	113
小结	117
复习思考题	118
第八章 输电线路的防雷	119
第一节 线路感应雷过电压	119
第二节 雷击杆顶时的过电压	121
第三节 输电线路的雷击跳闸率	123
第四节 线路防雷的主要原则及各级电压线路的防雷措施	124
小结	126
复习思考题	127
第九章 发电厂和变电所的防雷保护	128
第一节 发电厂和变电所直击雷防护	128
第二节 变压器的防雷保护	130
第三节 变电所的进线段保护	135
第四节 旋转电机防雷	138
小结	141
复习思考题	142
第十章 内部过电压	143

第一节 切除空载线路过电压	143
第二节 电弧接地过电压	146
第三节 切除空载变压器的过电压	149
第四节 铁磁谐振过电压	150
小结	154
复习思考题	155
参考文献	156

第一篇 发变电站一次系统

第一章 绪 论

学习目的

本章对电力系统、电力网、发电厂和变电站（所）进行了简介。通过本章学习，应了解有关电力系统、电力网的基本知识；了解各类发电厂和变电所的类型、特点。

第一节 电力系统及电力网简介

发电厂把其它形式的能量（如燃煤产生的热能，水力的位能等）转换成电能。电能向远距离用户区输送时，为了减少电能损失，应在发电厂将电能升压。电能到达用户区时，为了安全、经济地分配和使用电能，还必须将电能逐级降压，电能到达用户后被各种用电设备转换成其它形式的能量（如机械能、热能、光能等）。上述生产、输送、分配和使用电能几大环节形成的系统称为电力系统。

电力系统中输送和分配电能的环节称为电力网，它包括升、降压变电所（站）和各种电压等级的输配电线路。比电力系统外延更大的是动力系统。图 1-1 是动力系统、电力系统、电力网的外延、内涵关系示意图。

有时人们习惯地把与电能相关的动力系统简称为电网，如东北电网、四川电网等。此时电网的概念显然包含了电能生产、输送、分配和使用各环节以及相关的监控、通讯、调度设施。

电力系统的发展从小到大，从简单到复杂，今天已进入了超高压、远距离、大容量、高度自动化的所谓现代电网时代。随着科技的进步和国民经济的发展，现代电网将进一步形成大区域或跨区域联系，出现更高的交、直流输电电压等级（如交流 750、1200kV，直流 ± 750 kV），出现更多的大容量机组，采用更先进的高度自动化的监控、通信、调度系统（也称为能量管理系统 EMS）。

在各种能源中，电能具有远距离输送快捷、经济，用户分配、控制方便，转换成其它形式能量效率高等显著优点，已成为经济建设和人民生活中最重要的能源形式。1949 年建国时，全国总装机容量 184.9 万 kW，年发电量 43 亿 kW·h，在世界上居 25 位。1997 年总装机容量已达 2.3 亿 kW，年发电量达 11054 亿 kW·h 已跃居世界第二位。相信到下个世纪，我国的电力工业还将有突飞猛进的发展，电能供应不单在数量上，而且在质量上会再上台阶，电力必将在国民经济建设中发挥更大的作用。

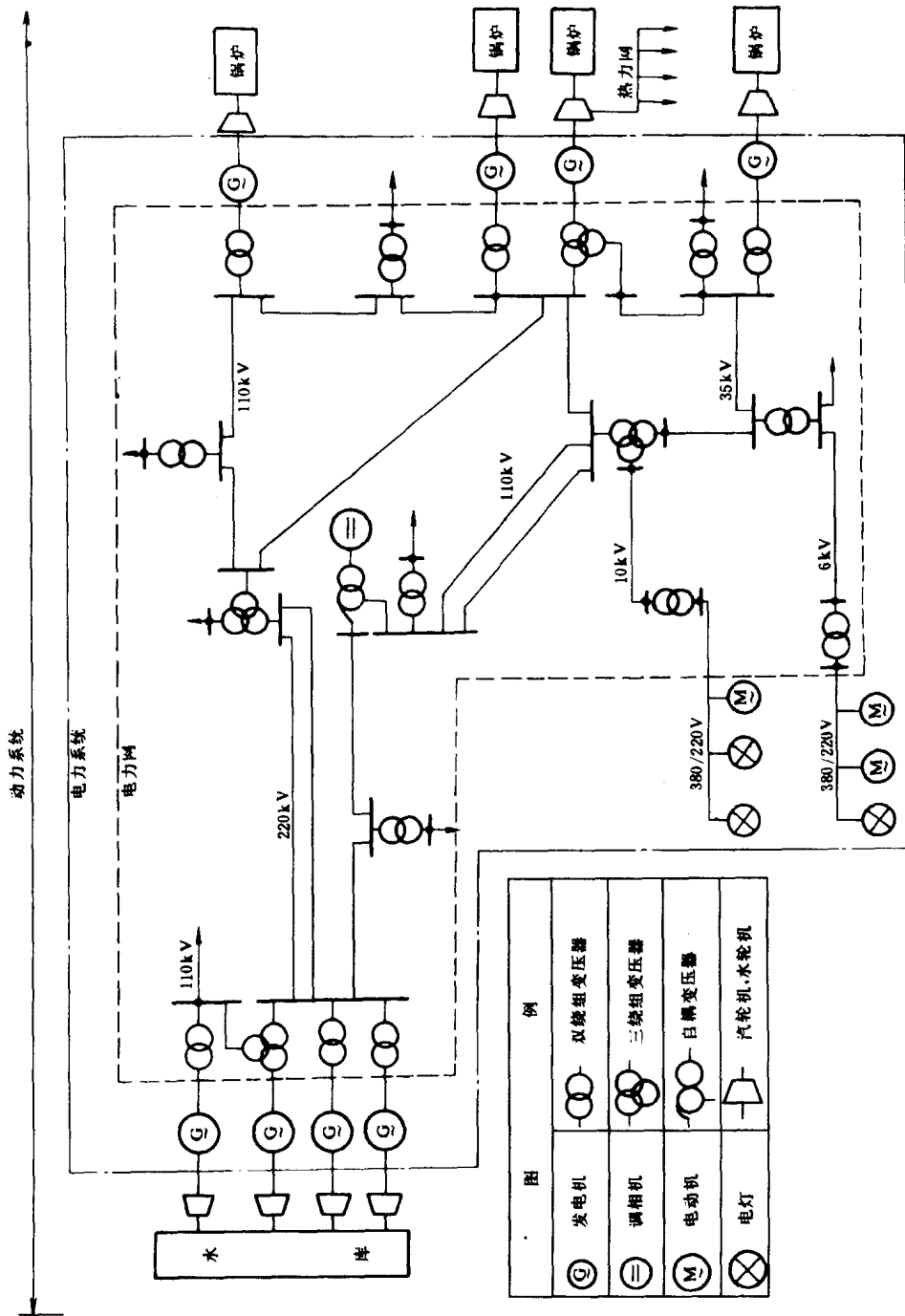


图 1-1 动力系统、电力系统和电力网示意图

第二节 发电厂的类型和特点

发电厂按使用能源不同或转换能源特点，可分为以下基本类型：

一、热力发电厂类

热力发电厂是将燃料所蕴藏的能量转换为电能的电厂，因转换能量时出现了热能这一中间环节，故称为热力发电厂。可以从不同角度去对热力发电厂进行分类，如按使用一次能源分类，可分为石化燃料电厂、原子能电厂等；按电厂容量分类，可分为中小容量电厂、大容量电厂；按原动机类型分类，可分为汽轮机电厂、燃气轮机电厂、内燃机电厂；按汽轮机蒸汽初压分类，可分为中压电厂、高压电厂、超高压电厂（12.75MPa）、亚临界电厂（16.18MPa）以及超临界电厂（22.06MPa）；按供出二次能源的形式，可分为凝汽式电厂（习惯上称其为火电厂）、热电厂等。

热力发电厂有下面一些特点：

(1) 电厂的锅炉和汽轮机都有一个技术最小负荷。锅炉的技术最小负荷约为额定负荷的25%~70%，因锅炉种类和燃种类而异。汽轮机的技术最小负荷为额定负荷的10%~25%。

(2) 热力发电厂的锅炉和汽轮机的退出运行和再投入不仅需要耗费较正常运行更多的能量，而且费时长（起动可达数小时），容易损坏设备。当电厂汽轮机负荷急剧变化时，也有类似问题。

(3) 热力发电厂高温、高压汽轮机比低温、低压汽轮机效率高，但可调节范围比后者小。

(一) 凝汽式热力发电厂

凝汽式电厂仅向用户（外界）提供电能。在这类电厂中，锅炉产生蒸汽，经管道送到汽轮机，带动发电机发电。已作功的蒸汽排入凝汽器内冷却成水后，又重新送回锅炉使用。由于在凝汽器中，大量的热量被循环水带走，故一般凝汽式热力发电厂的效率都很低。习惯上常将凝汽式热力发电厂简称为火电厂。凝汽式热力发电厂是热力发电厂中的主流种类。图1-2是燃煤火电厂的生产过程示意图。

(二) 热电厂

热电厂不仅向用户供电，还向附近的用户供蒸汽或热水。在热电厂中，将汽轮机中段作过功的一部分蒸汽抽出，供给热用户，或把抽出的蒸汽经热交换器将水加热，向用户供热水。这样，可以大大减少进入凝汽器中的蒸汽量，提高热效率，还可减轻大气污染。据统计，目前200MW及以上的大型凝汽式机组的热效率约为37%~40%，而热电机组的热效率则可达60%~70%。

(三) 核电厂

核电厂是利用核裂变能转化为热能，再按火电厂的发电方式来发电的，只不过它的“锅炉”是核反应堆和蒸汽发生器。核电厂所需原料极少，1kg铀²³⁵与2700t标准煤发出的电力大约相等。

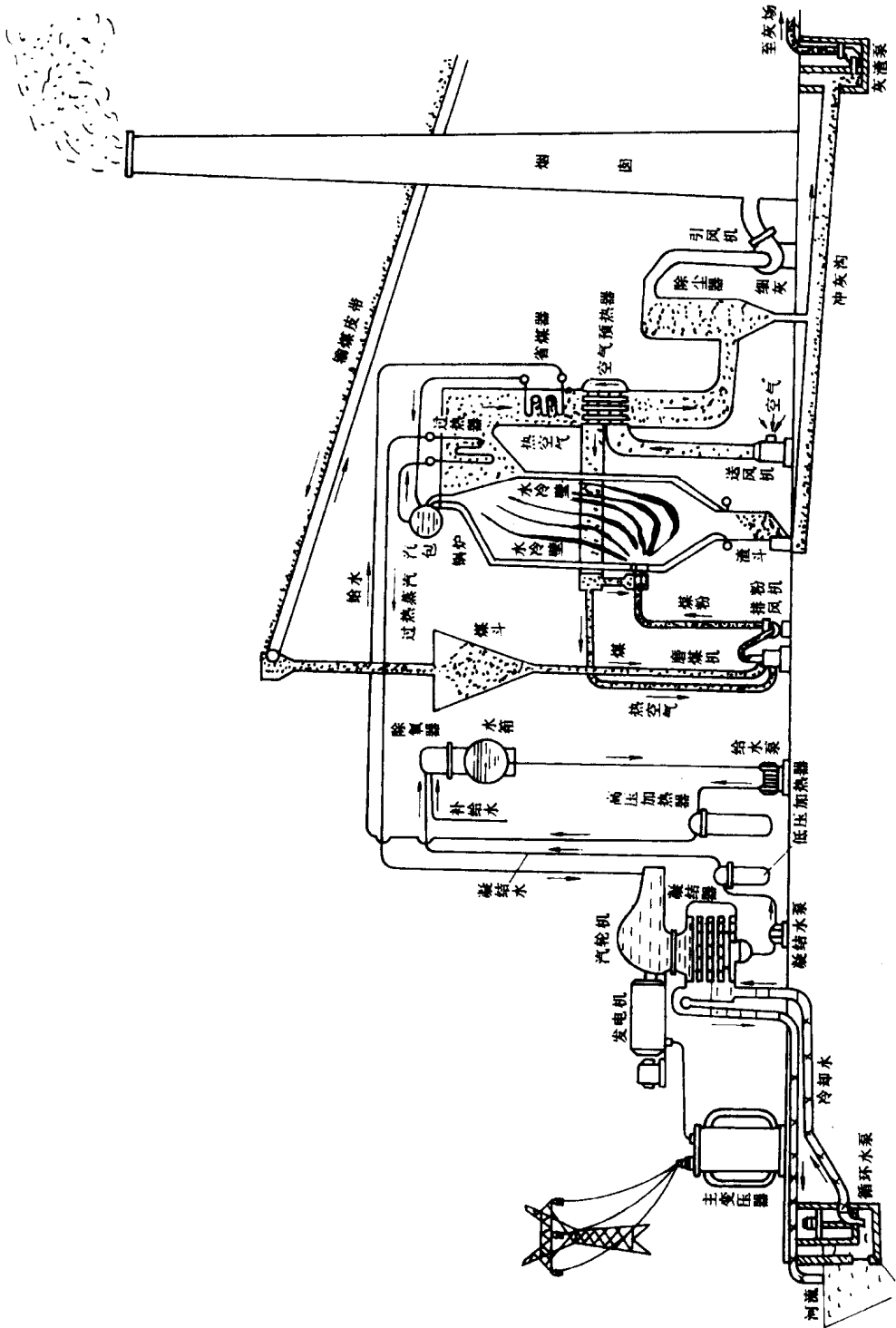


图 1-2 燃煤电厂生产过程示意图

由于核电厂在建设和运行上存在许多特殊问题，我国采取了在确保安全、可靠的前提下适当发展核电的方针。目前我国煤炭和水力资源较少的沿海地区，如浙江和广东已建设了核电厂。

图 1-3 是核电厂生产过程示意简图。图中，高压力的水在核反应堆内被加热后进入蒸汽发生器，将自身的热量传给管外的水，使它变为蒸汽。进行了热交换的水再经由循环水泵、过滤器回到核反应堆，形成了第一个独立循环回路。在蒸汽发生器中，接受了热能的水变为高压、高温的蒸汽，经管道送至汽轮机做功，然后至凝汽器，被冷却成水后再由给水泵送回蒸汽发生器，形成了第二个独立循环回路。

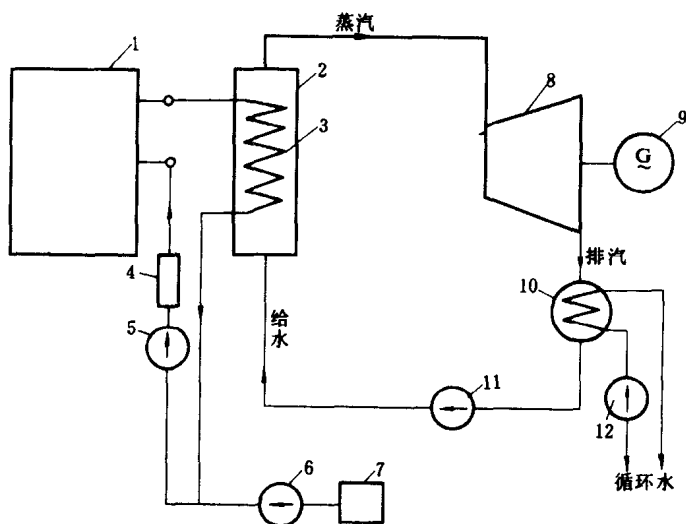


图 1-3 核电生产过程示意简图

1—核反应堆；2—蒸汽发生器；3—水管；4—过滤器；5—循环水泵；6—水泵；7—水箱；8—汽轮机；
9—发电机；10—凝汽器；11—给水泵；12—循环水泵

(四) 燃气轮机电厂

燃气轮机电厂是用燃气轮机作原动机的发电厂。在发电过程中，将燃油或天然气喷入燃烧室，在燃烧中燃料与由压气机送来的压缩空气混合燃烧，产生的高温、高压燃气驱动燃气轮机转子，带动发电机组。

燃气轮机发电成本高，但具有起停灵活的优点。

二、水力发电厂（站）类

我国是世界上利用水力资源最早的国家之一，也是水能资源最丰富的国家，蕴藏量为 6.8 亿 kW。目前世界上最大的水力发电站（简称水电站）是南美的依泰普水电站，装机容量为 1260 万 kW。我国最大的水电站是葛洲坝水电站，装机容量为 271.5 万 kW。正在建设中的山峡水电站装机容量达 1800 万 kW。

目前水力发电的发展趋势是大力发展具有调节能力的电站（包括抽水蓄能电站）；扩大水电站规模，提高单机容量；提高水电站自动化水平。

利用水力发电有下列一些特点：

1. 水资源是再生能源

火力电厂需要消耗煤、石油、天然气或核燃料，从现在的科技水平看，这些都是不能再生的能源，而水能在自然界中循环，是一种用之不竭的再生能源。

2. 水资源的综合利用

兴建水电站，能兼有防洪、灌溉、航运、供水、养殖以及旅游等方面的综合效益。

3. 生产成本较低

水电站不用燃料，机组设备简单，自身耗电少，运行管理费用较低，电能成本仅为火电厂的 1/3 左右。水电站的水能利用率可达 80%，而凝汽式火力电厂的热效率一般只有 30%~40% 左右。

4. 水电站运行灵活

水电站机组起停方便、迅速（起动约需几分钟），且设备简单，极易实现自动化，适合于承担电力系统的调峰、调频、调相任务，并可作为事故备用容量。

5. 水力发电具有可逆性

在必要时，可建抽水蓄能电站，将电能转化为水位能，达到蓄能目的。

6. 水电站不污染环境

水电站不产生烟气和废渣，故不会污染环境。相反，水库周围往往是旅游和度假胜地。

7. 水电站电能生产的不均衡性

许多水电站在丰枯期发电量差异很大，对电力系统电力平衡带来一定困难。在我国水力资源非常丰富的地区，由于水电站装机容量在系统中所占比重较大，这个问题更加突出。

8. 水电站建设受自然条件影响较大

水电站由于受地形、地质条件、季节、交通及库区淹没损失等因素影响，整个枢纽工程较复杂，施工工期较长，建设费用较大。

可以从不同角度对水电站进行分类，如按水电站对来水的调节或水能的蓄存，可分为无调节水电站、有调节水电站（又可细分为短期、中期、长期调节）和抽水蓄能水电站；按水头高低可分为低水头（30~40m 以下）、中水头（40m~100m）、高水头（100m 以上）水电站；按装机容量可分为小型、中型、大型水电站；按水力枢纽布置和建造的不同，可分为坝式水电站、引水式水电站、混合式水电站。

（一）坝式水电站

坝式水电站的水头是靠挡水大坝抬高上游水位而形成的。若厂房布置在坝的后面，则称为坝后式水电站，如湖北的丹江口水电站、贵州的乌江渡水电站；若厂房本身就是挡水坝的一部分，则称为河床式水电站，如广西的大化水电站、湖北的葛洲坝水电站。

（二）引水式水电站

引水式水电站的水头是由引水建筑物（主要指渠道或隧洞）集中而形成的，如四川的渔子溪一级水电站。

（三）混合式水电站

混合式水电站的水头是由坝和引水道共同形成，如安徽的梅山水电站。

三、其它种类的发电厂

利用其它形式能源发电的电厂有风力、地热、潮汐、太阳能发电等。其中太阳能发电将受到特别的重视。

第三节 变电所的类型和特点

变电所(站)起着改变电能电压和分配电能的作用。进行升压的变电所实际上和发电厂紧密结合在一起,习惯上所说的变电所主要指降压变电所(站)。

根据变电所(站)在系统中的地位、作用和供电范围,可将变电所(站)分以下几类。

一、枢纽变电所

这类变电所位于电力系统的枢纽点。所谓枢纽点,意指连接了电力系统高压和中压的几个部分,汇集了多个大容量电源。枢纽变电所的电压等级高(如220kV、500kV)、变电容量大、进出线数目多,全所停电时,将导致系统解列,造成大面积停电。

二、中间变电所

高压侧以穿越功率为主(这部分功率不通过变压器,只是路过本所的高压侧),在系统中起交换功率的作用或使高压长距离输电线路分段,故有时又称穿越变电所。这种变电所同时还将部分电能降压向所在地区的用户供电。

三、地区变电所

这类变电所的主要任务是对地区用户供电,是一个地区或城市的主要变电所,其高压侧电压一般为110~220kV。全所停电后,仅使该地区或城市中断供电,影响面较枢纽变电所小。

四、终端变电所

位于输电线路的终端,接近负荷点,高压侧多为110kV或更低,经降压后直接向用户供电。这类变电所停电的影响更小。

除上述常见分类外,有时还将变电所按其用途分类为升压变电所、降压变电所、联络变电所、工厂变电所、农村变电所、整流变电所及牵引变电所等。

图1-4是各类变电所的示意图。

小 结

电力系统包括了电能的生产、输送、分配和使用几个环节,电力网是电力系统的一部分,它包括电能的输送和分配两个环节。

发电厂可以划分为热力发电厂、水力发电厂及其它形式发电厂。热力发电厂中,凝汽式电厂和核电厂是两个最重要的种类;水力发电厂可以划分为坝式、引水式和混合式几种类型,在有条件的地区,水力发电特别是有调节能力的水电站,应摆在优先发展的地位。

电能的升压是在发电厂中的升压站完成的,其它独立的变电所实际上是降压变电所,降压变电所也可以划分为枢纽变电所、中间变电所、地区变电所和终端变电所等。

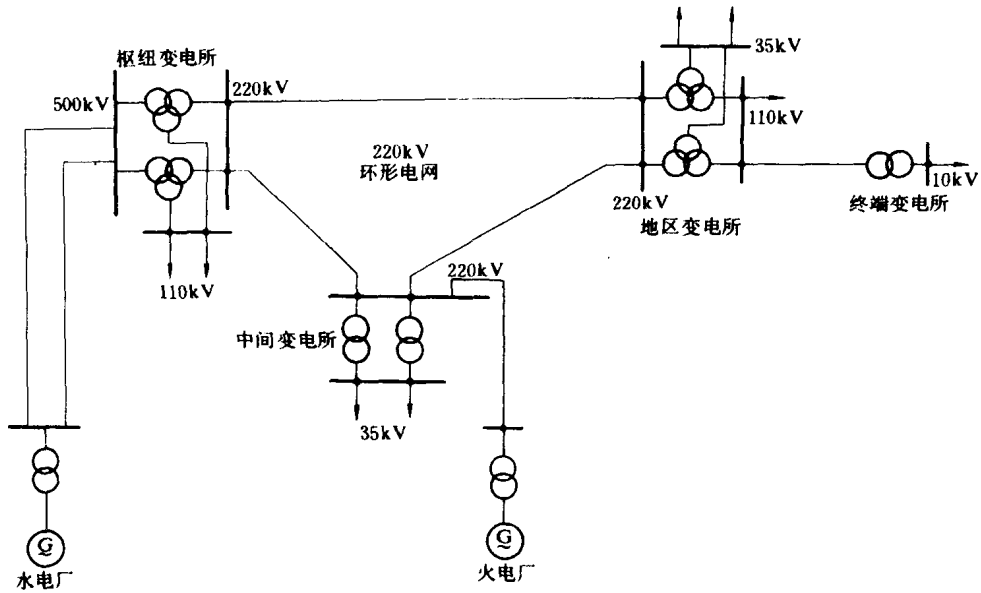


图 1-4 各类变电所示意图

学习提示

本章介绍的主要是电力系统、发电厂和变电所一些常识性的知识。关于发电厂、变电所的更多的知识可通过观看录像等方式进行更为直观的介绍。

复习思考题

- 1-1 什么叫电力系统，什么叫电力网？它们相互的划分关系是怎样的？
- 1-2 现代电网的发展趋势是怎样的？
- 1-3 发电厂有哪些常见分类？
- 1-4 凝汽式电厂和热电厂有哪些主要不同点？
- 1-5 试比较说明热力发电厂和水力发电厂的主要优缺点。
- 1-6 为什么在水电建设中，有较大库容的水电站和抽水蓄能水电站应重点发展？
- 1-7 试说明枢纽变电所、中间变电所、地区变电所、终端变电所各自的分类特点。

第二章 电力系统中性点运行方式

学习目的

本章是重点内容之一，它与电力系统的运行、故障分析、继电保护配置、绝缘配合等均密切相关。采用哪一种中性点运行方式，直接影响到电网的绝缘水平、系统供电的可靠性和连续性、电网的造价以及对通讯线路的干挠程度。通过本章的学习，应熟悉电力系统中性点的常见运行方式、特点，掌握好有关结论。

第一节 电力系统中性点运行方式概述

电力系统中的发电机及各电压等级的变压器的中性点，都是电力系统的中性点。

所谓电力系统中性点运行方式，是指上述电力系统中性点与大地之间连接的方式。目前，我国电力系统中性点常见运行方式有三种：中性点不接地运行方式、中性点经消弧线圈接地运行方式和中性点直接接地运行方式。

由于电力系统有许多个电压等级，在讨论电力系统中性点运行方式时，总是明确地针对某一个有直接电联系的电压等级来分析的，例如通常所说的某 10kV 电网中性点运行方式，或某 220kV 电网中性点运行方式等。

即使在电网中某一个确定的电压等级中，由于可能有许多变压器或发电机的中性点，也就是有许多中性点，因此有必要作出一些界定，习惯上当一个有直接电联系的电压级中所有中性点都与大地绝缘时，就称其为中性点不接地系统；当一个有直接电联系的电压等级中，一部分中性点不接地，一部分中性点经消弧线圈接地时，就称其为中性点经消弧线圈接地系统；当一个有直接电联系的电压等级中，一部分或全部中性点直接接地时，就称其为中性点直接接地系统。

从电力系统运行分析的角度看，“中性点直接接地系统”这个术语定义不太确切。因为所谓变压器中性点直接接地，发电机中性点直接接地，实质上都是经过其零序电抗接地的，随着一个电压等级中的中性点接地数目的不同，系统的接地有效程度会有很大差异，具体表现为，当发生一相接地故障时，流过接地点的故障电流的数值有很大差异，未接地的两相对地电压升高的情况有很大差异。因此，有时候用零序电抗 X_0 和正序电抗 X_1 的比值 X_0/X_1 来表示系统中性点接地的程度，一般将 $X_0/X_1 \leq 3$ 的系统称为“中性点有效接地系统”，不符合此条件的称为“中性点非有效接地系统”。按照这种划分，中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统均属于“中性点非有效接地系统”，而实际运行中的中性点直接接地系统属于“中性点有效接地系统”。

应当注意的是，上述划分是在比较深入地讨论时才有价值，它要求读者具有一些电力系统故障分析的专门知识，才能深刻理解其含义。对初学者而言，采用中性点不接地、中