

电视大学 职工大学教材

发电厂变电所电气部分

郑州工学院 娄和恭 刘宝仁 郭嘉琳

郑州电力学校 于长顺 WJK

合 编

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书为中央广播电视大学、电业职工大学“发电厂及电力系统”、“电力系统及其自动化”专业教材。全书共十三章。讲述发电厂与变电所的有关基本理论；主要电气设备的工作原理及其选择计算方法；发电厂与变电所一次、二次电气系统和装置的构成原理与设计方法；发电机、变压器的运行理论等。书中还反映了新的技术成就。

本书还可供上述专业的本科学学生及工程技术人员参考。

电视大学 职工大学教材

发电厂变电所电气部分

郑州工学院 姜和恭 刘宝仁 郭嘉琳 合编
郑州电力学校 于长顺

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售
北京市地质矿产局印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 24.75印张 559千字

1994年6月第一版 1994年6月北京第一次印刷

印数 0001—3710册

ISBN7-120-01875-2/TM·490

定价17.00元

前 言

本书是根据中央广播电视大学和电业职工大学“发电厂变电所电气部分”课程教学大纲编写的。该大纲是在1986年5月广州召开的“电力系统及其自动化”专业教学计划、教学大纲及教材编写讨论会与1986年8月在南昌召开的“电力系统及其自动化”专业教材编写座谈会上制订的。

全书共十三章，授课时间为70学时。其内容着重原理分析，并注意与其他教学方式（电影、录像）、教学环节（实验、实习）配合，理论联系实际。书中还反映了新技术成就。附录中提供了三个课程实验、两个课程设计参考题目及主要电气设备技术数据，供教材使用者选用。

本教材主要对象是电视大学及电业职工大学“发电厂及电力系统”、“电力系统及其自动化”专业的学生，也可供上述专业本科学生及工程技术人员参考。

本书第一、八、十二、十三章由娄和恭同志编写，第二、三、四、六、七章及附录由刘宝仁同志编写，第五、九、十一章由郭嘉琳同志编写，第十章由于长顺同志编写。全书由娄和恭、刘宝仁两位同志统稿。

本书由西安交通大学杨蔚百教授主审，为本书提供了很多建设性意见。在编写过程中，得到了电力系统有关部门及兄弟院校的协助，并提供了资料。还得到了原水利电力部教育司郝振邦同志和中央广播电视大学李立群同志的支持和帮助，在此一并致以谢意。

由于编者的水平有限，书中难免有缺点和错误，希望给予批评指正。

编 者

1992年3月

目 录

前言	
主要文字符号意义	
第一章 概述	1
第一节 我国电力工业的发展概况	1
第二节 发电厂与变电所的类型简介	2
第三节 发电厂与变电所电气部分概述	6
小结	8
思考题	8
第二章 开关电器的灭弧原理	9
第一节 电弧产生的物理过程	9
第二节 电弧特性	12
第三节 直流电弧的熄灭原理	14
第四节 交流电弧的熄灭原理	16
第五节 提高灭弧能力的基本途径	26
小结	29
思考题	29
第三章 开关电器	31
第一节 高压断路器	31
第二节 断路器的操动机构	42
第三节 高压隔离开关	47
第四节 熔断器	49
第五节 低压开关	52
小结	55
思考题	56
第四章 互感器	57
第一节 互感器的作用	57
第二节 电流互感器	58
第三节 电压互感器	66
小结	73
思考题	74
第五章 电气主接线	75
第一节 概述	75
第二节 基本接线形式	75
第三节 发电厂的电气主接线	87
第四节 降压变电所的电气主接线	93
第五节 电气主接线设计	95

第六节 电气主接线可靠性分析简介	102
小结	114
思考题与习题	114
第六章 发电厂与变电所自用电	117
第一节 概述	117
第二节 厂用电接线	120
第三节 厂用变压器（或电抗器）的选择	127
第四节 厂用电动机的自启动校验	130
小结	133
思考题与习题	133
第七章 配电装置	135
第一节 概述	135
第二节 屋内外配电装置的最小安全净距	136
第三节 屋内配电装置	138
第四节 屋外配电装置	142
第五节 成套配电装置	146
第六节 发电机、变压器与配电装置的连接	149
第七节 发电厂与变电所的电气总平面布置	152
第八节 发电厂与变电所的保护接地	155
小结	158
思考题	158
第八章 载流导体的发热与电动力	160
第一节 概述	160
第二节 载流导体的长期发热	161
第三节 载流导体的短时发热	169
第四节 短路时载流导体间的电动力	178
第五节 大电流导体的发热和电动力简介	186
小结	187
思考题与习题	188
第九章 电气设备选择	189
第一节 电气设备选择的一般条件	189
第二节 母线和电缆的选择	192
第三节 支柱绝缘子与穿墙套管的选择	204
第四节 高压断路器、隔离开关及高压熔断器的选择	207
第五节 限流电抗器的选择	210
第六节 电压互感器的选择	216
第七节 电流互感器的选择	220
小结	223
思考题与习题	224
第十章 发电厂和变电所的二次接线	226
第一节 二次接线的基本概念	226
第二节 测量系统	235

第三节	绝缘监察	238
第四节	断路器的控制回路	244
第五节	弱电选线回路	255
第六节	中央信号回路	259
第七节	同期回路	268
第八节	操作电源	276
小结	.....	288
思考题	.....	288
第十一章	发电厂、变电所的计算机控制	290
第一节	计算机控制系统概述	290
第二节	火电厂的计算机控制	294
第三节	变电所微机安全监视系统	300
小结	.....	304
思考题	.....	305
第十二章	电力变压器的运行	306
第一节	概述	306
第二节	变压器的负荷能力	306
第三节	自耦变压器的特点和运行方式	313
第四节	分裂绕组变压器简介	321
第五节	变压器的并联运行	325
小结	.....	335
思考题与习题	.....	336
第十三章	同步发电机的运行	337
第一节	概述	337
第二节	同步发电机的正常运行	341
第三节	同步发电机的进相运行	354
第四节	同步发电机的调相运行	359
第五节	同步发电机的异常运行	360
小结	.....	366
思考题	.....	366
附录 I	发电厂变电所电气部分实验	368
附录 II	课程设计任务书	374
附录 III	主要电气设备技术数据	377
参考文献	.....	386

第一章 概 述

第一节 我国电力工业的发展概况

电能具有许多优点，如可简便地转变成其它形式的能量；输送方便；易于集中和分配等。此外，许多生产部门用电力装置进行控制，容易实现自动化和远动化，是提高产品质量和经济效益的重要途径。所以，目前电力已成为工农业生产不可缺少的动力，并广泛地应用到一切生产部门和日常生活领域。因此，整个国民经济的发展，都与电力工业的发展有密切关系。由此可见，电力工业在国民经济中占有十分重要的地位，在实现四个现代化的过程中，电力必须先行，且应具有较高的发展速度，才能满足工农业生产发展的需要，这是现代化生产的客观规律。

1949年刚解放时，我国电力工业极端落后，全国总装机容量只有185万kW，年发电量仅有43亿kW·h。发电厂绝大多数集中在东北和沿海几个大城市，并且设备陈旧、效率低下、类型庞杂、规格混乱，带有明显的半殖民地性质。那时，仅东北地区有两个电力系统，总容量只有72万kW。新中国成立后，随着整个国民经济的恢复和发展，电力工业也得到了相应的发展。三十多年来，特别是近几年，我国电力工业发展很快，每年有500多万kW新机组容量投入运行。到1987年底全国总装机容量已超过1亿kW，达10193万kW，年发电量达4960亿kW·h，为刚解放时的115倍。各省、区都建立了一定规模的电网，电力系统迅速发展，至今已建立东北、华北、华东、华中、西北、西南六个跨省电力系统，不久还将形成华南电力系统。随着电力系统的发展，输电系统的电压等级也有很大提高，目前，全国已有多个500kV超高压输电系统投入运行。我国自己设计制造的30万kW发电机组，已取得运行经验，60万kW发电机组已投入运行，更大容量的发电机组正在研究试制中。尽管如此，我国电力工业还不能满足整个国民经济发展的需要，电力供应仍十分紧张。电力工业的技术和管理水平与世界上一些工业发达的国家相比，还有较大的差距。因此，加快电力工业的发展，确保其建设速度，提高电力工业的科学技术和管理水平，是摆在我国电力工作者面前的光荣而艰巨的任务。

我国的煤炭、水力、石油等天然能源的储量都十分丰富，这是发展电力工业比较优越的物质条件。为了保证电力工业的快速发展，还必须从我国的实际情况出发，制订合理的能源政策，并且认真贯彻执行。只有这样，才能使电力工业真正发挥作用，当好先行官，做出应有的贡献。

目前我国电力工业开发的方针如下。

(1) 积极发展火电。我国今后一段相当长的时间内，火电仍为主要能源。火电应立足于以煤炭资源发电为主，油和气可少量采用。在山西、内蒙、河南等省和自治区的煤炭基地，有条件时应建设大型坑口火电厂。

(2) 大力开发水电。众所周知，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、水产等各行业进行综合开发利用，经济效益较好。限于地理条件，我国水电资源主要集中在西南和西北地区，在这些地区应多建设水电站，它的发电成本低，应充分发挥其作用。但是，应该指出，这些大型工程往往投资大，建设周期也较长。

(3) 适当建设核电。在缺少煤炭和水力资源而电力又十分短缺的地区，如我国沿海地区，宜建设核电厂。这样，可以缓解电力供应紧张的局面，改善能源平衡状况。

(4) 发展联合电力系统。随着电力系统的容量不断增大，宜采用超高压远距离的交流输电或直流输电系统，并逐步形成跨大区域的联合电力系统，以提高供电的可靠性和经济性。

(5) 因地制宜开发多种发电能源。我国是一个大国，应根据不同地区的具体条件，因地制宜、多方面、多渠道地由地方和群众兴办小水电、小火电、风力发电和地热发电等小型电厂，以促进电气化事业的发展。

我国电力工业的技术水平和管理水平正在逐步提高，现在已有许多电厂实现了集中控制和采用计算机监控，电力系统也实现了分级集中调度，所有电力企业都在努力增产节约，降低成本，确保安全运行。随着我国国民经济的发展，电力工业将逐步跨入世界先进水平的行列。

第二节 发电厂与变电所的类型简介

发电厂是把各种天然能源，如燃料的化学能、水能、核能等，转换成电能的工厂。发电厂所生产的电能，一般还要由变电所升压，经高压输电线输送，再由变电所降压，才能供给各种不同用户使用。这种由发电厂、变电所、输电线路和用户联系在一起组成的统一整体，称为电力系统。发电厂是电力系统的中心环节，变电所是联系发电厂和用户的中间重要环节。为了便于了解电能的生产情况和电力系统的运行状态，下面对发电厂和变电所的类型作一些简单介绍。

一、发电厂类型

(一) 火力发电厂

以煤炭、石油或天然气为燃料的发电厂称为火力发电厂。火力发电厂中的原动机，大都为汽轮机，也有少数电厂采用柴油机和燃气轮机作为原动机。

火力发电厂按其工作情况的不同又可分为以下几类。

1. 凝汽式火电厂

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。已作过功的蒸汽，排入凝汽器内冷却成水，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，故一般凝汽式火电厂的效率都很低，即使是现代的高温高压或超高温高压的凝汽式火电厂，效率也只有30%~40%左右。通常简称凝汽式火电厂为火电厂。火电厂的典型布置情况如图1-1所示。

2. 热电厂

它与凝汽式火电厂不同之处主要在于汽轮机中一部分作过功的蒸汽，在中间段被抽出

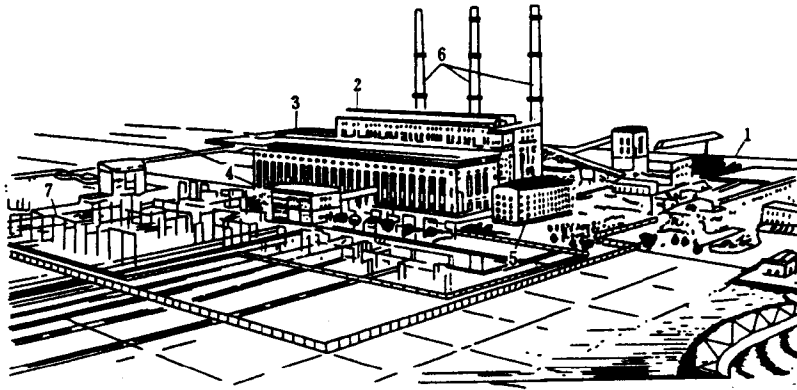


图 1-1 火电厂的布置图

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

来供给热用户使用，或经热交换器将水加热后，供给用户热水。热电厂通常都建在热用户附近，它除发电外，还向用户供热，这样可以减少被循环水带走的热量损失，提高总效率。现代热电厂的总效率可高达60%~70%。

另外，重要的大型厂矿企业往往建设专用电厂作为自备电源，这类电厂的原动机一般为小型汽轮机或柴油机。单独来看，这种发电厂的生产往往不经济，但它可起到后备保安作用，若能和其它能源供应结合起来综合利用，其经济效益将有所提高。

(二) 水力发电厂

水力发电厂是把水的位能和动能转变为电能的工厂，它的原料是水。根据水力枢纽布置的不同，水力发电厂又可分为坝坝式、引水式等。

1. 坝坝式水电厂

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，进行发电，这种水电厂称为坝坝式水电厂。通常，这类水电厂又细分为坝后式水电厂和河床式水电厂两种。

(1) 坝后式水电厂。这种水电厂的厂房建在坝的后面，全部水头压力由坝体承受，水库的水由压力水管引入厂房，推动水轮发电机组发电。坝后式水电厂适合于高、中水头的场合，其布置情况如图1-2所示。

(2) 河床式水电厂。这种水电厂的厂房和挡水坝坝连成一体，厂房也起挡水作用，由于厂房就修建在河床中，故称河床式。河床式水电厂的水头一般较低，大都在20~30m以下，其布置情况如图1-3所示。

2. 引水式水电厂

这种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段，由引水渠道提供水头，且一般不需要修筑坝坝，只修低堰即可，其布置情况如图1-4所示。

应该指出，与火力发电厂相比，水力发电厂的生产过程较简单，易于实现生产过程的自动化，检修工作量也较少，因此所需运行和检修人员较火力发电厂少得多。由于水力发电厂在运行中不消耗燃料，其它运行支出也不多，所以年运行费用很少，因此凡是有条件

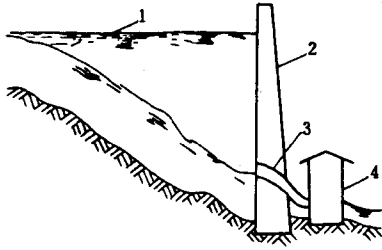


图 1-2 坝后式水电站

1—水库；2—坝；3—压力水管；4—厂房

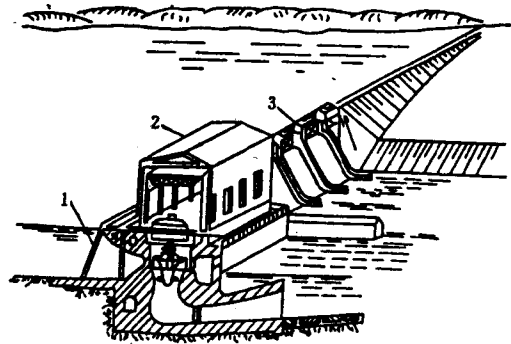


图 1-3 河床式水电站

1—进水口；2—厂房；3—溢流坝

的地方，均应大力开发水电。

(三) 核电站

核电站是利用核裂变能转换为热能，再按火力发电厂的发电方式来发电的工厂。图1-5示出了压水堆核电站发电方式的示意图。在核反应堆内，铀-235在中子撞击下，使原子核裂变，产生巨大的能量，且主要是以热能的形式被高压水带至蒸汽发生器内，产生蒸汽，再送到汽轮发电机组发电。

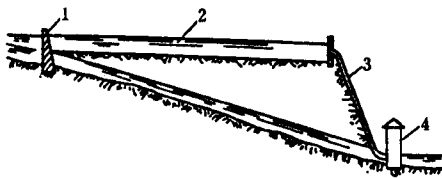


图 1-4 引水式水电站

1—堰；2—引水渠；3—压力水管；4—厂房

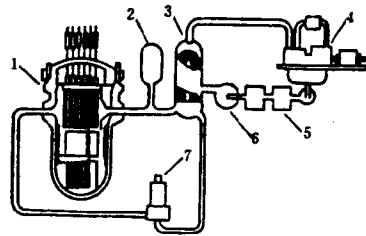


图 1-5 压水堆核电站发电方式示意图

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

1kg铀-235所发出的电力，约等于2700t标准煤所发的电力，因此核电站所需要的原料极少。

(四) 其它发电方式

利用其它能源发电的方式，尚有风力发电、地热发电、潮汐发电、沼气发电、太阳能发电等。另外，还有直接将热能转换成电能的磁流体发电、电气体发电等。

二、变电所类型

在电力系统中，变电所是联系发电厂和用户的中间环节，它起着变换和分配电能的作用。

图1-6示出了某一电力系统的原理接线图。系统中接有大、中容量的水电站和火电厂，

水电厂通过500kV的超高压输电线路接至某枢纽变电所，经此变电所和系统的220kV、110kV电网相联系，系统的220kV电网构成环形网络，这样可以提高供电的可靠性。

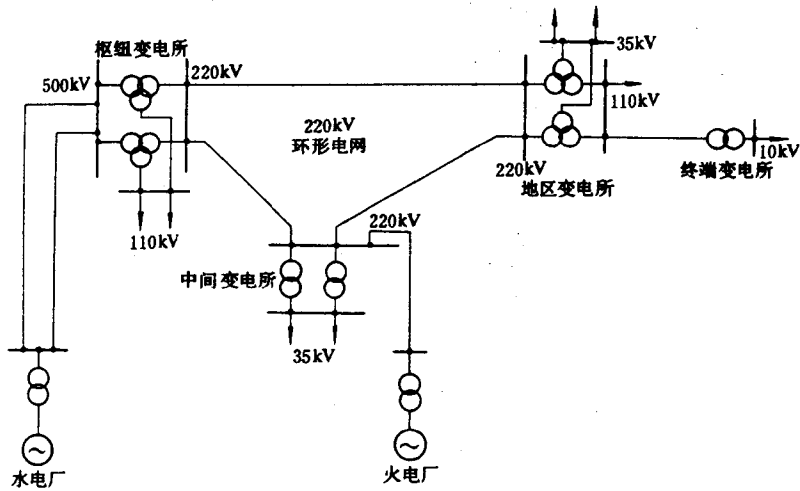


图 1-6 电力系统原理接线图

系统中的变电所，通常按其在系统中的地位和供电范围，分成以下几类。

(一) 枢纽变电所

这类变电所位于电力系统的枢纽点，它连接电力系统高压和中压的几个部分，汇集多个电源，电压等级较高，如330~500kV等。若枢纽变电所发生事故出现全所停电时，将导致系统解列，甚至出现全系统崩溃的灾难局面。

(二) 中间变电所

高压侧以穿越功率为主，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的变电所，称为中间变电所。它一般汇集2~3个电源，电压等级多为220kV，除供系统交换功率外，同时还降压供给所在地区用户用电。因此，这样的变电所主要起中间环节的作用，并由此而得名中间变电所，有时又称穿越变电所。当全所停电时，将引起区域网络解列，影响较大。

(三) 地区变电所

这类变电所的高压侧电压等级一般为110~220kV，其主要任务是对地区用户供电，所以它是一个地区或城市的主要变电所。全所停电后，仅使该地区或城市中断供电，影响面较小。

(四) 终端变电所

位于输电线路的终端，接近负荷点，高压侧电压多为110kV或更低，一般经降压后直接向用户供电的变电所，称为终端变电所。这类变电所若全所停电，影响更小，只是用户受到损失。

有时，还将变电所按其用途分为升压变电所、降压变电所、联络变电所、工厂企业变电所、农村变电所、整流变电所、牵引变电所等。

第三节 发电厂与变电所电气部分概述

为了便于学习本书以后各章的内容，下面对发电厂和变电所的电气系统及其设备作些概略介绍。

一、主要电气设备

发电厂与变电所的主要任务是生产、传输和分配电能。运行中应根据负荷变化的要求，起动、调整和停运机组；对电路进行必要的切换；不断监视主要设备的工作；周期性地检查和维护主要设备；定期检修设备以及快速消除发生的故障等。为满足上述生产需要，在发电厂与变电所中安装有各种电气设备。

(一) 一次设备

通常把直接生产和分配电能的设备称为一次设备，它们包括下列几类。

1. 生产和转换电能的设备

如发电机、电动机、变压器等，这些都是最主要的设备。

2. 接通或断开电路的开关电器

如断路器、隔离开关、自动空气开关、接触器、熔断器、闸刀开关等。它们的作用是在正常运行或事故时，将电路闭合或断开，以满足生产运行和操作的要求。

3. 限制故障电流和防御过电压的电器

如限制短路电流的电抗器和防御过电压的避雷器等。

4. 接地装置

无论是电力系统中性点的工作接地或是各种安全保护接地，在发电厂和变电所中，均采用金属接地体埋入地中或连接成接地网组成接地装置。

5. 载流导体

如母线、电力电缆等。它们按设计要求，将有关电器设备连接起来。

(二) 二次设备

在发电厂与变电所中，除上述一次设备外，还有一些辅助设备，它们的任务是对一次设备进行测量、控制、监视和保护等，这些设备称为二次设备。

1. 仪用互感器

如电压互感器和电流互感器，它们将一次电路中的电压和电流降至较低的值，供给仪表和保护装置使用。

2. 测量仪表

如电压表、电流表、功率表、功率因数表等，它们用于测量一次电路中的运行参数值。

3. 继电保护及自动装置

它们用以迅速反应电气故障或不正常运行情况，并根据要求进行切除故障或作相应的调节。

4. 直流设备

如直流发电机组、蓄电池、整流装置等，它们供给保护、操作、信号以及事故照明等

设备的直流用电。

5. 信号设备及控制电缆等

信号设备给出信号或显示运行状态标志，控制电缆用于连接二次设备。

二、电气主接线

在发电厂与变电所中，各种电气设备必须根据工作的要求和它们的作用，依照一定顺序连接起来而构成电路。其中一次设备连接成的电路称为电气主接线或一次电路，又简称为主电路，二次设备连接成的电路称为二次电路或副电路。通常，均以电路图或电气接线图的形式绘出。

电路图是用规定的图形符号绘制成的三线图或单线图。电气主接线图常画成单线图的形式，即用一条线代表三相电路。它能说明电能的输送和分配关系，表征各种运行方式，所以它是运行操作切换电路的依据。下面以一个火电厂的主接线图为例，说明各种主要电器（一次设备）的连接情况。具有两种电压等级（发电机电压及升高电压）的火电厂主接线图如图1-7所示。

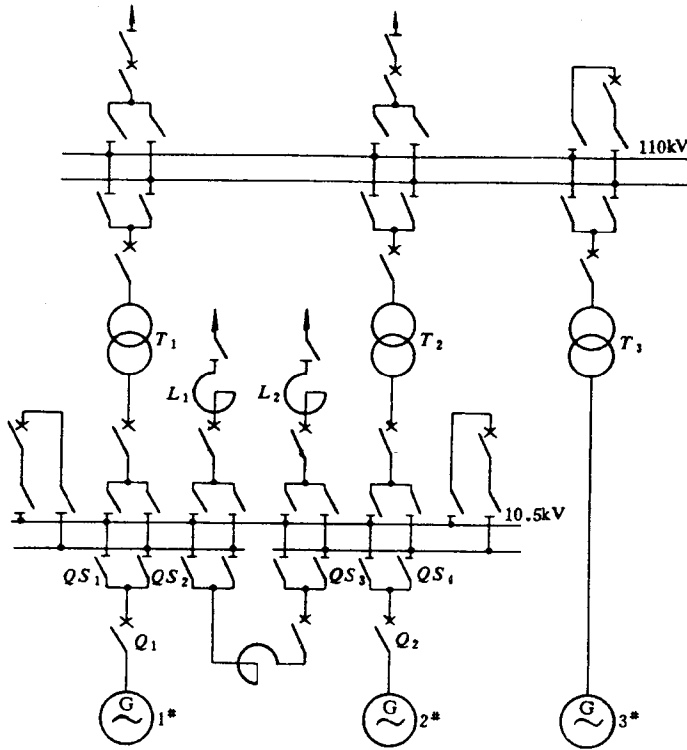


图 1-7 火电厂的主接线图

1*、2* 发电机所发出的电力经断路器 Q_1 和 Q_2 以及隔离开关 $QS_1 \sim QS_4$ 送至10kV母线。断路器具有灭弧装置，正常运行时可以接通或断开电路，故障情况时，在继电保护装置的作用下，能自动断开电路。隔离开关因为没有灭弧装置，不能用来接通和断开有负荷电流的电路，其作用是在电路中的一次设备需要停电检修或更换时，使这些设备与带电部

分可靠地隔离起来，以保证工作人员的安全。因此，电路接通或断开时，只有在断开断路器之后，才可以接通和断开隔离开关。

母线起汇集和分配电能的作用。图1-7中的10kV母线为分段的双母线，工作母线分为两段，备用母线不分段。发电机送来的电能其中一部分由电力电缆送给近区用户，在这些出线上装有电抗器 L_1 和 L_2 ，用以限制短路电流。另一部分电能则通过升压变压器 T_1 和 T_2 送到110kV母线上，然后通过高压架空线路向远方用户送电，并与系统并列。另一台发电机(3^{*})和变压器 T_3 单独接成发电机—变压器单元，直接连接至高压110kV母线上。高压母线亦为双母线接线。

发电厂和变电所的电气主接线是根据其容量、电压等级、负荷情况等条件确定的，先提出几种可行方案，经过详细的技术经济比较之后，选择出最优方案。关于电气主接线的设计和电气设备的选择，将在本书以后有关章内详细叙述和讨论。

本课程是“发电厂及电力系统”和“电力系统及其自动化”专业的主要专业课程之一。其主要目的和任务是：通过课堂讲授、电化教学、课程设计、实验、习题以及生产实习等教学环节，使学生树立工程观点，初步掌握发电厂与变电所电气系统的基本知识和设计方法，并在分析、计算和解决实际工程问题能力诸方面得到一定的训练，为以后从事设计、运行等各项工作奠定基础。

小 结

电能是目前使用的最重要能源，其优点很多。电力工业的发展与国民经济的发展有很密切的关系，这就要求电力工业必须先行。

解放后，尽管我国电力工业发展很快，仍不能满足各方面日益增长的对电能的需求，因此加快电力工业的发展，提高其技术和管理水平，认真贯彻执行改革、开放的政策和精神，是十分必要的。

现在我国发电的主力仍为火电，在不少地区电力建设也仍以火电为主。应该注意到，我国水力资源极为丰富，且地形地质条件较好，而开发的数额很少，所以今后在具备条件的地区要大力开发水电。在自然能源匮乏而又缺电的地区，应有步骤地建设核电厂。

一次和二次电气设备，都是发电厂和变电所的重要组成部分。一次设备对运行的可靠性和检修的方便性要求很高，设备价格较贵，其投资在整体工程费用中占很大份额，故应合理选用和布置，并精心施工；二次设备对运行也起着十分重要的作用，工作中必须给予足够重视。

思 考 题

1. 电能的主要优点是什么？电力工业在国民经济发展中的作用如何？
2. 目前我国电力工业的开发方针是什么？
3. 何谓电力系统？发电厂和变电所的类型有哪些？
4. 哪些设备属于一次设备？哪些设备属于二次设备？试举例简述其功能。
5. 本课程的主要目的和任务是什么？

第二章 开关电器的灭弧原理

电弧是电力系统及电能利用工程中常见的物理现象。例如，随处可见的电弧焊接机是利用电弧产生的高热能进行焊接的电力设备，电弧炼钢炉也是利用电弧的大型用电设备。对于电力系统中的开关电器，当开断有电流通过的电路时，在断开的触头间也会产生电弧。显然，开关电器中的电弧是不希望产生的，要求尽快地熄灭。在高电压大电流下，快速熄灭电弧有一定困难，因此电弧的产生对电力装置的正常操作与安全运行带来不利影响。

本章讲述电弧产生的物理过程、电弧特性以及熄灭电弧的基本原理和过程，学习中，要着重理解其物理概念。电流从金属导体（触头）通过空间气体导体，从而产生弧光放电现象，电弧的电特性与金属导体的电特性有很大差异。随着电弧的产生与熄灭，触头间的空间气体将由绝缘体向导电的等离子体转化，继而由等离子体向绝缘体转化，转化中，电能—热能的转换起着重要的作用。所以，要综合原子物理、电学、热学等基础知识，才能学好本章内容。

本章将以交流电弧的特性和熄灭原理为重点作较详细的讲解。读者应对交流电弧的发生、燃烧（重燃）直至熄灭的全过程有较透彻的理解。对于直流电弧的熄灭，应从基本概念出发，掌握直流电弧灭弧的基本原理和方法。

第一节 电弧产生的物理过程

开关电器的功用是开断或接通电力电路。实验证明，被开断电路的电压大于 $10\sim 20\text{V}$ ，电流大于 $80\sim 100\text{mA}$ 时，在开断的触头间即发生电弧。电弧的形式如图2-1所示，它实为沿电离后而导电的气体介质流动的电流。此时，触头虽已分开，但由于触头间存在电弧，电路仍处于接通状态，待电弧熄灭后，电路才真正断开。

电弧的温度很高，会烧坏触头和电弧周围的绝缘部件，如果较长时间不能熄灭，开关本身就有损坏或爆炸的危险，影响电力系统的可靠运行，所以开关断开时必须尽快地熄灭电弧。



图 2-1 电弧

开关触头分开以后，触头间本应立即被绝缘介质填充，是什么原因使绝缘介质在瞬间变成了导电性很强的气体？这是由于在触头开断之初，间隙中已产生部分自由电子，随即发生连续地碰撞游离，并很快地发展成为弧光放电。

一、电弧产生的物理过程

(一) 触头开断初瞬间自由电子的生成

开关触头分离后产生碰撞游离，是由于开断的瞬间，间隙中即已产生少量的自由电子。

触头刚分离时，由于间隙很小，其间形成很高的电场强度，当电场强度超过 3×10^6 V/m时，阴极触头表面的自由电子在强电场力的作用下，被拉出金属表面，这种靠电场力的作用将自由电子拉出而进入空间的现象称为强电场发射。发射电子数决定于电场强度的大小。

另外，阴极表面温度较高时，热能可以使金属表面的自由电子获得足够的动能，发射到四周空间，这种现象称为热电子发射。当开关触头开始分离时，触头间的接触压力和接触面积减小，接触电阻增大，从而使接触表面剧烈发热，局部温度很高，使此处自由电子获得动能发射出来。阴极表面发射电子数与表面温度和触头材料有关。

由于阴极触头表面电子的上述两种发射，使阴极附近出现了少量自由电子，这就是开关触头刚分离时发生的现象。

(二) 碰撞游离形成电弧

从阴极表面发射出来的自由电子，在触头间电场的作用下获得加速度，从而积累起动能，当这些具有一定数量动能的电子撞击到间隙中的气体中性质点时(原子或分子)，将其能量传递给中性质点，使其外层电子受到激发跳出原子壳层，成为自由电子，原中性质点成为正离子，这种游离过程称为碰撞游离。产生碰撞游离必须使原中性质点接受足够的动能，使外层电子能够克服原子核的束缚，这一动能用电子伏或伏表示，称为游离电位，它为使中性质点游离必须具有的最小动能，表2-1示出了几种物质的游离电位。

碰撞游离有时分两级进行。当被加速的自由电子尚未积聚足够的能量即撞击到中性质点时，不足以使其游离，但它已处于激励状态，能量的注入使外层电子跑到更高能级的外层轨道上运行。如果这些质点继续受到电子的撞击，接受了足够的游离能，则马上游离。

随着触头的继续拉开，碰撞游离在不断地进行，碰撞游离产生的电子同原来电子一起参加了新的碰撞游离，这一过程发展很快，因为电子、正离子对将呈 $k2^n$ 规律增殖(k 为最初电子数， n 为碰撞的级数)，发展成为“雪崩”，如图2-2所示。雪崩式碰撞游离的结果是触头间隙充满了电子和正离子，成为电导较大的空间等离子体。在外加电压作用下，介质被击穿而流过电流，转瞬之间完成了从绝缘体向导电气体的转化。经历了上述过程之后，电流又继续通过，这种通过空间导电体的电流所通过的区域温度很高，发出强烈的白光，故称弧光放电为电弧。

表 2-1 几种物质的游离电位

气 体	N ₂	H ₂	CO ₂	金属蒸气
游离电位 (V)	16.3	15.8	14.3	7.5

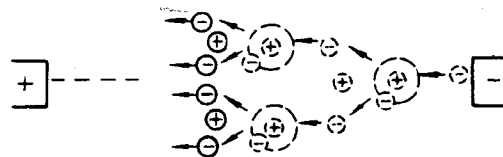


图 2-2 碰撞游离过程示意图

电弧产生后，由于电源不断地输送能量，弧柱的温度很高，中心区温度可以达到 10000 K 以上，弧柱表面温度也有 3000 ~ 4000 K。此时，弧柱中的气体介质的原子和分子产生强

烈的分子热运动，具有较大的热分子动能，它们之间不断地发生碰撞，互相传递能量，其结果使原子或分子游离成为正离子和电子，此即所谓热游离。电弧形成以后，弧隙电导很大，弧隙电压和电场强度很低，碰撞游离大大减小或停止。但是，由于电弧温度很高，此时的主要游离形式为热游离，气体介质已成为离子浓度很高的等离子体。

据分析，气体分子一般在温度达9000K时发生热游离，由于弧隙存在金属蒸气，温度在5000K时热游离即可发生。介质中具有一定浓度的金属蒸气是由于开关触头的熔化蒸发而产生的，采用耐高温的合金触头可降低金属蒸气的浓度。

(三) 电弧的维持与平衡

触头间在发生了雪崩式碰撞游离之后，才发展为电弧放电，因此碰撞游离是产生电弧的条件。电弧放电使弧隙处于高温状态，从而发展为热游离。很明显，热游离强度是绝对温度的函数，即电弧的高温是热游离发生和维持的条件。热游离给弧隙提供了大量的电子和正离子，电流得以通过，所以热游离使电弧得以维持和稳定燃烧。

另一方面，由于热平衡，电弧温度达到某一高值后不再上升，电导率达到某一值后也不再升高，就是说热游离将在一定强度下稳定下来，达到平衡状态。

二、电弧熄灭的物理过程

这里首先解答上面谈到的问题，即电弧何以能达到某种平衡而稳定燃烧。这是由于弧隙中不但进行着游离过程，同时还进行着去游离过程。去游离过程是指自由电子和正离子相互吸引而中和的过程。在稳定燃烧的电弧中，一定的弧温之下，新增加的离子数与电子、正离子的中和数相等，使弧隙正负离子总数保持恒定，电导不变，从而达到平衡。如果去游离的强度大于游离的强度，弧隙等离子体中的导电离子数减少，电导下降，电弧将愈来愈小，弧温下降，致使热游离下降或停止，最终导致熄灭。

去游离的主要方式是复合与扩散。

异性带电质点相遇，电荷中和成为中性质点的现象称为复合。实际上，由于自由电子的运动速度很快，可以比正离子大千倍，不容易被正离子“捕获”，直接复合的可能性很小，往往是电子先附着在中性质点上，成为质量大的负离子，运动速度大大减慢，这时正负离子间复合要容易得多。了解这个道理很重要，它可以指导我们设计出合理的开关灭弧结构，使复合过程得到加强。例如利用吹弧使电弧迅速冷却，离子的运动速度下降，从而更易于复合；增加弧隙介质的压力，气体分子密度加大，离子间自由路程缩短，因而复合的概率也增加。

扩散是弧柱中的自由电子和正离子散逸到弧柱以外，并与周围未被游离的冷介质相混合的过程。一般地说，凡浓度不同的物质之间均有扩散现象，尤其是流体更为明显。在温度很高的弧柱中，热运动很强烈的带电质点，势必要向不带电的温度很低的周围介质中扩散。不难想像，弧柱区与周围介质的温度差和离子浓度愈大，则扩散也愈强烈。扩散出来的离子被周围介质冷却，很快复合为中性质点。实际开关装置中常用高压气体强烈地吹动电弧，带走弧柱中的热量及大量电子和正离子，以加强其扩散。

去游离强度决定于弧柱温度、介质抗电强度、介质导热系数等。此外，介质压力和触头材料等对去游离强度也有很大影响，这些因素均会在开关类型和优化其灭弧装置的设计中体现出来。