



技工学校电力系统及运行课

教 学 参 考 书

中国劳动出版社

说 明

为了适应技工学校电工类教学的需要，我们根据劳动部培训司颁发的技工学校电工类教学计划和教学大纲以及统编的电工类教材，组织编写了电工基础、电子技术基础、机械知识、电工仪表与测量、电机与变压器、电力拖动与自动控制、电力系统及运行等课的教学参考书，供技工学校有关教师使用。

《电力系统及运行教学参考书》是按照统编教材《电力系统及运行》的结构体系和章节顺序编写的，每章均以教学要求、教材分析、教学建议等进行叙述。

本书是技工学校有关教师的应备用书，也可作为培训青工时教师的参考书。

本书由曾昭桂编写。

中国劳动出版社

目 录

第一章	电力系统基本知识	1
第二章	工厂企业供电系统	18
第三章	电力线路及运行	42
第四章	电力变压器的运行及事故处理	74
第五章	变、配电所的电气设备及运行	97
第六章	互感器及运行	151
第七章	电气设备的选择	164
第八章	电容器及无功功率补偿	170
第九章	继电保护及二次回路	191
第十章	过电压保护和接地装置	235
第十一章	节约用电	257
第十二章	实验指导	278
附 录		289

第一章 电力系统基本知识

一、教学目的要求

(1) 了解火力发电厂和水力发电厂的生产过程；了解火力发电厂的类型及火力发电厂、水力发电厂主要设备的作用。

(2) 了解电力系统的组成，各组成部门的作用；了解输电网、配电网等概念。

(3) 了解联合电力系统的优越性；了解工厂企业对电力系统的要求；掌握电能质量——电压、周波的允许范围和电能质量超出允许范围时，对工厂企业和电力系统的危害。

(4) 掌握电力网额定电压的概念，掌握电力网中各用电设备的额定电压和电力网额定电压的关系。

(5) 掌握电力系统中性点的接地方式及其工作特点；掌握各中性点接地方式的应用。

二、教学的重点和难点

本章教材分成四节，第一、二节讲述发电厂、电力网、电力系统的基本概念和电力生产过程的基本知识；第三节讲述电力网的额定电压的定义及电力网中各用电设备的额定电压和电力网额定电压的关系；第四节讲述电力系统中性点三种接地方式的特点。

本章的重点是：

(1) 电力系统组成及生产过程。

(2) 电压、周波的允许范围，电压、周波变动时对电

力系统和工厂企业的危害。

(3) 电力网额定电压。

(4) 电力系统中性点三种接地方式的特点及应用。

本章的难点是：

(1) 采用中性点不接地方式当单相发生接地故障时，各相对地电压、对地电容电流的变化情况的分析。

(2) 消弧线圈的工作原理及补偿方式。

为了突破上述难点，我们必须反复复习电工基础课已学过的有关知识，运用向量进行分析。

三、教学内容和课时分配

第一次课 (2 学时)：§ 1-1 电力生产过程。

第二次课 (2 学时)：§ 1-2 电力系统概述。

第三次课 (2 学时)：§ 1-3 电力网的额定电压。

第四次课 (2 学时)：§ 1-4 中性点不接地方式。

第五次课 (2 学时)：§ 1-4 中性点直接接地方式和中性点经消弧线圈接地方式。

在第一次课和第二次课期间，可根据实际情况，挤出一定时间到附近电厂参观，以增强对电力生产过程的了解。

四、教学中应注意的问题

(1) 本章虽然只讲述电力系统的基本知识，但对教材中提出的有关概念必须明确。例如：动力系统、电力系统、电力网等基本概念及其联系。

(2) 为了研究方便，教材又将电力网分为输电网和配电网；开式电力网和闭式电力网；地方网和区域网等。这些概念的建立，教材是以电压等级为依据，通常还是正确的。但随着电力网的发展，上述概念的建立将有新的描述。例如：输电网和配电网的概念，本教材是这样描述的，即将由

10 千伏及以下配电线路和配电变电所组成的 电 力 网称 配 电 网。而目前有些城市将 35 千伏甚至 110 千伏作为配电线路。所以再以电压等级作为电力网分类的依据就不大确切了。因此，应根据电力网的功能来分类。例如：配电网就是应定义为分配电能的电力网。

（3）组织学生到发电厂、变电所参观是一种好的教学方法。使学生在未接触到电气设备之前对电力生产过程，对电力网，特别是工厂电网有一个全面了解。这样，一方面加深学生对本章内容的理解，另一方面为以后各章内容的学习有一个初步认识。

五、教材分析和教学建议

§ 1-1 电 力 生 产 过 程

（一）火力发电厂的生产过程

火力发电厂的生产过程概括起来就是通过高温燃烧把燃料的化学能变为热能，从而将水加热成为高温高压的蒸汽，然后利用蒸汽驱动汽轮发电机，热能转变成电能。这就是物理学描述的能量转换定律。火力发电厂以煤、石油和天然气等作燃料，燃煤电厂约占 70%，燃油电厂约占 25%，其它燃料约占 5%。为了提高石油的经济效益，我国已进行将燃油电厂逐步改成燃煤电厂的工作。

要较详细了解火力发电厂的生产过程，我们必须使学生了解火力发电厂的类型和火力发电厂主要设备的作用。

1. 火力发电厂的类型

教材从各种角度将火力发电厂分成凝汽式发电厂和供热式发电厂；区域性发电厂、地方性发电厂和列车电站。凝汽

式发电厂(命名为××电厂),只生产供给用户的电能;供热式发电厂(命名为××热电厂),不仅生产供给用户的电能,还生产供给用户热能。

火力发电厂的类型除上述的分类方法外,还可以按照蒸汽的参数分类。蒸汽参数主要指蒸汽压力(汽压)和温度(汽温)。由此火力发电厂还可分为低温低压电厂、中温中压电厂、高温高压电厂、超高压电厂、亚临界压力电厂。目前我国火力发电厂采用的蒸汽参数和相应的电厂容量如表 1-1 所示。

表 1-1 蒸 汽 参 数 表 (锅炉)

电厂类型	汽压(大气压)	汽温(℃)	电厂容量或单机容量的大致范围
低温低压电厂	14	350	1万千瓦以下的电厂
中温中压电厂	40	450	1~20万千瓦的电厂
高温高压电厂	100	540	10~60万千瓦的电厂
超高压电厂	140	540	25万千瓦以上的单机电厂
亚临界压力电厂	170	550	60万千瓦以上的单机电厂

2. 火力发电厂主要设备及作用

火力发电厂主要设备如教材图 1-1 所示。有汽轮机、发电机、凝汽器、凝结水泵、除氧器、给水泵、锅炉等。而锅炉、汽轮机、发电机是能量转换的主要设备,其它为辅助设备。但这里也必须指出,辅助设备也是火力发电厂必不可少的设备,只有火力发电厂全部设备完好,才能完成电力生产全过程,才能使火力发电厂正常运行。但对本专业的学生来说,了解锅炉、汽轮机、发电机的作用就可以了。下面分别将叙述锅炉、汽轮机、发电机的作用:

(1) 锅炉设备。锅炉是生产蒸汽的设备，燃料在炉膛内燃烧产生的热量将锅炉内的水加热成一定压力、一定温度的蒸汽，蒸汽通过管道送入汽轮机，这就是完成了化学能转换为热能的过程。锅炉的容量也叫蒸发量，单位为吨/时。目前已运行的国产最大锅炉容量为 935 吨/时。

(2) 汽轮机设备。汽轮机的主要部件是喷嘴和动叶片，如图 1—1 所示。由锅炉送来的蒸汽流过固定的喷嘴后，压力和温度降低，体积膨胀，流速增高，热能转变为动能，高速蒸汽冲击装在叶轮上的叶片，叶片受力，带动转子转动，使热能转变为机械能。

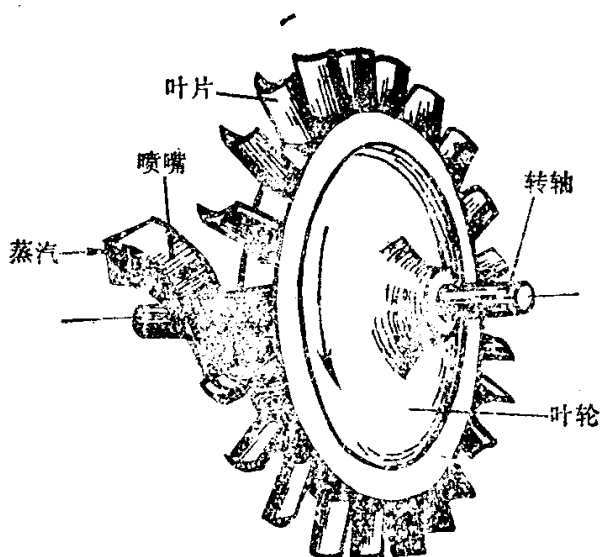


图 1-1 汽轮机工作原理

(3) 汽轮发电机设备。汽轮发电机设备是以汽轮机作为原动机的三相交流发电机。它是把机械能转变为电能的设备。至于发电机结构和原理学生在电机与变压器课程中已学习，本课程不再叙述。

3. 火力发电厂的生产过程

火力发电厂的生产过程，教材中已作了描述。但是必须使学生明确，凝汽式电厂和供热式电厂的生产过程是相同的，但其热效率却不同，凝汽式电厂做功后的蒸汽进入凝汽器，被冷却水汽冷却成水，因此热效率较低。供热式电厂做功后的蒸汽引入给水加热器，使水加热供给热力用户，所以热效率高。

（二）水力发电厂的生产过程

水力发电厂是利用水力资源发电的。我国幅员辽阔，江河纵横，水力资源十分丰富，总蕴藏量达 6.8 亿，居世界第一位。水力资源是取之不尽，用之不竭的能源，水力发电厂还具有效率高，成本低，综合利用等特点。所以，大力发展水电是我国电力工业发展的方向。我国目前最大的水电站是葛洲坝水电站，总装机容量为 270 万千瓦。

1. 水力发电厂的类型

水力发电厂按其水能开发方式主要有坝式、引水式和混合式三种；此外还有经流式、抽水蓄能式、潮汐式水电站等。但是我们只要求学生了解前三种类型的水电站。

2. 水力发电厂主要的建筑和设备

如教材图 1-2 所示，水力发电厂主要由拦河坝和水库、水轮机和发电机、压力水管和尾水管组成。

3. 水力发电厂的生产过程

水力发电厂的生产过程教材已作了叙述。概括来说，就是从大江、河流的高处或水库引水、利用水的流速和压力冲动水轮机旋转，将水能变成机械能，水轮机再带动发电机转动，将机械能变成电能，即水能——机械能——电能的变换过程。

§ 1-2 电力系统

(一) 电力系统组成

从教材图 1-3 可知，电力网位于电力系统之中，电力系统位于动力系统之中。电力系统由发电厂、电力网和用户组成的。发电厂是电力系统的中心环节，其类型和生产过程 § 1-1 节中已经描述，这里应着重使学生了解电力网和电力系统负荷的概念。

1. 电力网的分类

电力网是由各种不同电压等级的电力线路和送变电设备组成的，是发电厂和用户不可缺少的中间环节。

电力网的分类按其作用可分为输电网和配电网；按其本身结构可分为开式网和闭式网；为了研究和计算又可分为地方网和区域网。教材中还提到了电压在 110 千伏及以上的电力网称区域网；电压在 110 千伏以下电力网称地方网；10 千伏及以下电力网称配电网。这里必须使学生明确，这种按电压等级划分方式，其间不存在严格的界线。随着电网的发展，各级电压电网的作用也在发生变化。工厂企业的电源将根据实际情况从某级电压电网引入。

2. 电力系统负荷

电力系统中所有用户的用电设备消耗功率的总和，称为电力系统负荷。可分为有功负荷和无功负荷两种。电力系统负荷加上电力网的损耗功率为发电厂供应的功率，称供电负荷。供电负荷再加上发电厂的厂用电损耗就是各发电厂应发功率，称发电负荷。

(二) 联合电力系统的优越性

1. 联合电力系统的概念

首先必须使学生了解什么是联合电力系统。联合电力系统就是用输电线路把几个地区性电力系统连接起来组成大的电力系统，例如，我国目前已形成的东北、华北、华东、华中中等电力系统即为联合电力系统，其容量已超过1000万千瓦。

2. 联合电力系统的优越性

联合电力系统在技术上和经济上具有很大的优越性。我们可从提高供电可靠性和电能质量；减少投资、提高设备利用率和运行经济性进行分析。

（三）用户对电力系统的基本要求

用户对电力系统的基本要求概括起来，就是保证电能的质量，保证供电可靠。

电能质量

要使学生建立电能质量的概念，了解电能质量的指标和允许变动范围；了解超出范围对电力系统和用户有何危害。

电能质量包括电压、周波及波形。而电压和周波是主要指标。

（1）学生应明确，所有的用电设备都是按一定的额定电压制造的。当用电设备的端电压与其额定电压之差超出了允许范围，电力系统和用户的运行就要恶化，用电设备就会受到损坏，电力系统的稳定性就要受到破坏，甚至引起振荡和失步。因此应分别从电压高出允许范围和低于允许范围进行分析其危害。我国允许电压偏移标准为：35千伏及以上电压供电和对电压质量有特殊要求的用户为 $\pm 5\sim 10\%$ ；10千伏及以下高压供电和低压电力用户为 $\pm 7\%$ ；低压照明用户为 $\pm 5\sim -10\%$ 。

(2) 周波的变化, 不仅严重影响电力用户的正常工作, 而且对发电厂及电网本身也有严重的危害。同样, 应从周波高出和低出允许值来分析其危害。我国电力系统的额定周波为 50 周/秒, 其允许变动范围: 在 300 万千瓦及以上的系统为 ± 0.2 周/秒, 在不足 300 万千瓦的系统为 ± 0.5 周/秒。

(3) 电压波形也是电能质量标准之一。特别是目前工厂企业应用的热轧机、电弧炉、电焊机、晶闸管控制的电动机、电解整流装置等设备, 会引起电压非正弦性。根据电工基础可知, 非正弦电压可分解为基波电压和一系列高次谐波电压。这些高次谐波电压可能会引起继电保护、自动装置、电力计算机等设备误动作或不正常工作。因此, 一般要求任一高次谐波电压的瞬时值应不超过同相基波电压瞬时值的 5%。

(4) 在讲述电能质量时, 应尽量结合本地区, 本系统由于电能质量不符合要求时对工厂企业和电力系统危害的实际。

§ 1-3 电力网的额定电压

(一) 电力网额定电压概念

1. 用电设备额定电压

首先应使学生明确, 为了使用电设备生产实现标准化和系列化, 我国规定了用电设备的统一额定电压等级, 如教材中表 1-1 所示。然后应使学生了解, 额定电压是用电设备处于最佳运行状态的工作电压, 即各种用电设备在额定电压下运行, 其技术性能和经济效益最好。

2. 电力网额定电压

一般来说，供电线路正常工作电压应该和线路直接连接的用电设备的额定电压相等。但由于供电线路中有电压损耗，沿线路各点的电压不相等，线路的始端比末端高。为了使所有用电设备运行正常，力求使用电设备端电压尽可能接近线路的正常工作电压，所以取线路始端电压和末端电压的算术平均值作为用电设备的额定电压。此电压也就是电力网的额定电压。此时，就应使学生明确用电设备的额定电压是按电力网的额定电压来规定的。

(二) 发电机、变压器的额定电压的规定

1. 发电机额定电压的规定

用电设备的工作电压一般允许在额定电压的 $\pm 5\%$ 以内变化，电力线路电压损耗一般不超过 10% 。由于发电机处在线路始端，因此，发电机额定电压比接入它的电网额定电压高 5% 。所以教材表 1-1 中电网额定电压为 10 千伏时，发电机额定电压应为 10.5 千伏。

2. 变压器额定电压的规定

教师在讲述变压器额定电压规定时，必须说明变压器具有发电机和用电设备的双重地位。即它的一次线圈是接受电能的，相当于用电设备，二次线圈送出电能，相当于发电机。所以一次线圈额定电压等于电网的额定电压，而二次线圈额定电压应比电网额定电压高 5% 。由于考虑变压器带上额定负载后产生的阻抗压降，所以在电压等级较高的电网中，变压器二次线圈额定电压应比电网额定电压高 10% 。

§ 1-4 电力系统中性点的接地方式

电力系统的中性点即是电源（发电机或变压器）的中性

点。在讲述中性点接地方式之前，应使学生复习在《电工基础》课程中学过的有关三相电源连接的方式和三相电路对称及不对称概念。

三相电源（发电机或变压器）的连接方式，有星形连接和三角形连接，如图 1-2 所示。在星形连接中，三相绕组的

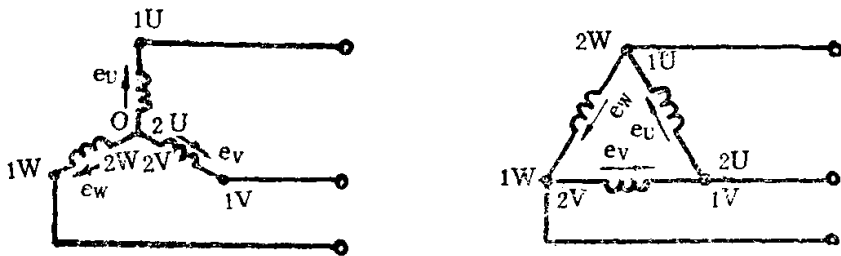


图 1-2 三相电源的连接

末端 2U、2V、2W 连接在一起，成为一个公共点，此公共点称中性点。若由中性点引出一根导线，称中性线。同样，三相负载也有星形连接和三角形连接两种连接方式。当各相阻抗相等的三相负载，叫做对称三相负载。（如三相电动机），这样的三相电路叫做对称三相电路。当各相阻抗不相等时，叫做不对称三相负载，对于三相照明负载来说，一般为不对称三相负载，这样的三相电路叫做不对称三相电路。

在《电工基础》课程中，我们还知道，对称三相电路，中性线没有电流通过，中性点电位为零。不对称三相电路，中性线中有电流通过，中性点电位不为零。

在具有上述知识后，再分析中性点接地方式及特点。

（一）中性点不接地方式

1. 正常运行

首先应使学生明确，电力线路三相导线对地之间，存在着电容，电网电压愈高，线路愈长，电容愈大。正常运行

时, 各相对地电压 $\dot{U}_u$ 、 $\dot{U}_v$ 、 $\dot{U}_w$ 是对称的, 各相对地电容电流 $\dot{I}_{cu}$ 、 $\dot{I}_{cv}$ 、 $\dot{I}_{cw}$ 也是对称的, 如教材图 1-5 所示。所以, $\dot{I}_{cu} + \dot{I}_{cv} + \dot{I}_{cw} = 0$, 电源中性点 N 电位为零 (即为地电位)。

2. 单相接地故障

单相接地故障, 是电力系统常见的故障, 存在完全接地 (金属性接地) 和不完全接地 (经一定电阻接地) 两种。

本教材应用向量图分析了中性点不接地系统, 当一相发生完全接地后, 各相对地电压的变化和接地电流的大小的问题。

由教材图 1-6 可知, 当 U 相发生完全接地时, U 相对地电压变为地电位 (即为零)。而中性点 N 的电位不再为地电位了, 即中性点 N 发生了电位移。中性点对地电压 $\dot{U}_N = -\dot{U}_u$, 即中性点对地电压大小和 U 相电压相等, 方向相反。

应用向量合成方法, 可给知 V、W 相对地电压 $\dot{U}'_v$ 、 $\dot{U}'_w$ 分别为

$$\dot{U}'_v = \dot{U}_v - \dot{U}_u = \sqrt{3} \dot{U}_v$$

$$\dot{U}'_w = \dot{U}_w - \dot{U}_u = \sqrt{3} \dot{U}_w$$

即 V、W 两相对地电压变为线电压。此时必须使学生明确, 相间电压 $\dot{U}_{uv}$ 、 $\dot{U}_{vw}$ 、 $\dot{U}_{wu}$ 仍保持不变。

由于 V、W 相对地电压升高 $\sqrt{3}$ 倍, 即导线对地电容上的电压升高 $\sqrt{3}$ 倍, 所以电容电流也较正常值 I_{CN} 升高 $\sqrt{3}$ 倍。由教材图 1-6 可知, U 相接地电流 $\dot{I}_u$ 为 V、W 相电容电流 $\dot{I}'_{cv}$ 、 $\dot{I}'_{cw}$ 的向量和, 即

$$\dot{I}_u = -(\dot{I}'_{cv} + \dot{I}'_{cw})$$

通过计算可得:

$$I_U = 3I_{CN}$$

即单相接地时的接地电流等于正常时一相对地电容电流的三倍。

接地电流 I_U 的大小与电网电压、频率及电网的结构、布置方式、线路长度有关。线路的接地电流可近似地按下式计算：

$$\text{架空线路: } I_U = \frac{Ul}{350}$$

$$\text{电缆线路: } I_U = \frac{Ul}{10}$$

式中 U ——电网电压，千伏；

l ——线路长度，公里。

中性点不接地系统，若发生一相不完全接地时，接地相对地电压大于零小于相电压；非故障相对地的电压大于相电压小于线电压；其接地电流也要小一些。

除了应用向量图来分析发生单相接地故障时，电压和接地电流的变化情况外，还可以应用复数分析方法，这里不再描述。

3. 不接地方式的应用

在讲述不接地方式应用之前，应使学生了解不接地方式的优点及存在的问题。

电力线路通常有两种不同性质的接地故障。一种是永久性接地故障，如绝缘被击穿、线路受外力破坏并接地，此种故障不能自动切除，必须通过检修才能恢复正常。另一种是瞬时性接地故障，如鸟害和雷害引起的接地故障，此种故障很难在故障点形成稳定的电弧，因此，此故障能自动切除。

无论是永久性或瞬时性接地故障，电力网的线电压保持不

变，因此接在线电压上的用电设备仍正常运行。此时，一方面寻找故障，另一方面进行倒闸操作或带电检修，从而供电不受影响，大大提高了供电的可靠性，这就是不接地方式的优点。

因为中性点不接地方式有上述优点，所以在电力系统发展初期，线路不长时，得到广泛应用。随着电网发展，电压的升高，线路增长。中性点不接地方式出现一些问题，主要是接地电流增大，即是瞬时性接地故障时，也会造成间歇电弧，而产生弧光接地过电压，这时不但不能自动消除故障，而会威胁电力系统和用户的安全运行。

根据中性点不接地方式存在着上述的优缺点，当接地电流小于 30 安的 6~10 千伏电力网和接地电流小于 10 安的 20~60 千伏的电力网常采用中性点不接地方式。

（二）中性点直接接地方式

讲述中性点直接接地方式及特点时，应和中性点不接地方式和特点进行对照，便于学生理解。

1. 单相接地故障

中性点直接接地方式如教材图 1—7 所示。当发生单相接地故障时，中性点仍保持地电位，非故障相的对地电压也基本上不变。此时，故障点电流不再是对地电容电流，而是单相接地短路电流，由故障相直接经大地与中性点形成短路。由于单相短路电流值很大，使继电保护装置动作，跳开断路器，切除故障线路，供电停止。为了弥补这一缺点，中性点直接接地系统中广泛采用自动重合闸。当系统发生瞬时接地故障时，断路器跳开，重合闸动作，断路器重新合闸。在这段时间里，瞬时接地故障一般都能消除，则合闸成功，不影响供电。如果是永久性接地故障，继电保护能再次动作