



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



POWER SYSTEM ANALYSIS

电力系统分析

(第三版)

夏道止 杜正春 主编

程时杰 张伯明 主审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



配套课件

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

电工与电子技术基础（第二版）	彭曙蓉
信号分析与处理（第三版）	崔翔
电机学（第三版）	胡敏强
电机学习题解析（第二版）	胡虔生
电机学（第三版）	戈宝军
电机学学习指导与题解	戈宝军
走进电世界（第二版）	孙元章
电气工程基础（第三版）上册	陈慈萱
电气工程基础（第三版）下册	陈慈萱
电气工程基础习题集	唐飞
电力系统稳态分析（第四版）	陈珩
电力系统暂态分析（第四版）	方万良
电力系统分析（第三版）	夏道止
发电厂电气部分（第五版）	苗世洪
发电厂变电所电气部分（第三版）	刘宝贵
电力系统规划（第二版）	程浩忠
电力系统继电保护原理（第五版）	贺家李
电力系统自动装置原理（第五版）	杨冠城
高电压工程（第三版）	林福昌
现代供电技术（第三版）	王福忠
现代供电技术学习指导	王福忠
架空输电线路设计（第三版）	孟遂民



中国电力出版社官方微信



中国电力教材服务官方微信

▶ 请关注中国电力教材服务官方微信，获取更多教材资源。

中国电力出版社教材中心

教材网址 www.cepp.sgcc.com.cn

服务热线 010-63412548 63412523

ISBN 978-7-5198-0786-3



9 787519 807863 >

定价：49.00 元



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

电力系统分析

(第三版)

主编 夏道止 杜正春

编写 李建华 方万良 赵登福 别朝红 王建学

主审 程时杰 张伯明



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

全书共分十章，主要内容包括电力系统的基本概念、电网的正序参数和等值电路、输电线路运行特性及简单电力系统潮流估算、电力系统潮流的计算机算法、电力系统正常运行方式的调整与控制、直流输电与柔性交流输电、同步电机的数学模型、电力系统对称故障分析、电力系统简单不对称故障分析、电力系统稳定性分析。本书末集中列出了一些具有一定难度的思考题，对于读者掌握和应用有关内容具有很大帮助。

本书为高等院校电气信息类相关专业教材，也可作为从事电力系统工作的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统分析/夏道止, 杜正春主编. —3 版. —北京: 中国电力出版社, 2017. 9

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-5198-0786-3

I. ①电… II. ①夏… ②杜… III. ①电力系统—系统分析—高等学校—教材 IV. ①TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 118879 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 乔 莉 (010-63412535)

责任校对: 郝军燕

装帧设计: 郝晓燕 张 娟

责任印制: 吴 迪

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 2004 年 9 月第一版 2017 年 9 月第三版

印 次: 2017 年 9 月北京第十四次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 23.25

字 数: 570 千字

定 价: 49.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前 言

本书出版十余年来，已被越来越多的高等院校作为教材使用。针对各校在使用中发现的问题和给出的建议以及电力系统的发展，进行了本次修订工作。本着保持原书物理概念清楚、数学模型精确、求解方法严格等原则，主要修改和增删的内容如下：

(1) 在第一章中，更新了我国目前电力系统发展的基本信息；对电力系统可靠性给出了较为准确的分类和说明。

(2) 在第二章中，对带非标准变比的变压器等值电路的论述进行了修订。

(3) 在第四章中，删去了电力网络节点电压方程的推导过程；在潮流模型中，对平衡节点和电压相角参考节点进行了更为准确的论述；增加了线性方程组求解的三角分解方法；对快速解耦潮流模型和算法进行了修订，并解释了其收敛机理。

(4) 在第五章中，重写了引言，便于学生更好地理解 and 掌握频率与电压调整的必要性和过程；增加二次调频的简单介绍。

(5) 新增加了第六章直流输电与柔性交流输电。本章包含了第二版第五章中的第四节和第五节的基本内容，补充了传统双端直流输电的基本模型和控制原理，增加了柔性交流输电的基本结构、运行原理和特性以及控制系统。

(6) 在第七章中，对同步电机标幺制方程的基准值选取进行了修改和更正；将同步电机的模型简化放在第十章讲述，以便与稳定性分析更好结合；对同步电机稳态方程和相量图的论述进行了修订，使之完整且简明易懂。

(7) 在第八章中，对用于实用短路电流计算的发电机模型进行了修订，使得读者便于理解。

(8) 在第九章中，对一些相量图的错误进行了修改，并更正了一些例题的错误。

(9) 在第十章中，对电力系统稳定性的一些基本概念进行了完善和修订；给出了电力系统稳定性分析中同步电机的各种详细和简化模型；增加了单机无穷大系统的低频振荡分析和电力系统稳定器（PSS）对低频振荡的抑制分析。

此外，还对其他个别地方进行了修改和补充。

本书修订工作由西安交通大学王建学和杜正春完成，杜正春负责全书的统稿。

本书仍承蒙华中科技大学程时杰教授和清华大学张伯明教授审阅，提出了很多宝贵的意见和建议，深表感谢。

限于编者水平，书中错误和不妥之处难免，请读者批评指正。

编 者

2017年6月

第一版前言

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材，为电气工程及其自动化专业本科生电力系统分析课程所编写。

原能源部组织的全国高等学校电力系统及其自动化专业教学指导委员会曾经为“电力系统稳态分析”和“电力系统暂态分析”两门课程分别组织编写过相应的教材，本书是在上述教材的轮廓上进行修改和扩充而成，主要有以下几点：

- (1) 舍弃了基于手工计算的各种近似计算方法。
- (2) 增强了基础理论，如有关稳定性的基本概念和基本理论。
- (3) 除了最基本的分析方法以外，简要介绍了有关的发展，以扩大学生的视野。

此外，对直流输电和应用电力电子元器件构成的新型输配电设备，在其结构和工作原理方面进行了介绍。

为了使学生易于接受和掌握有关的原理和分析方法，建议在一开始能组织学生参观变电所，从而对各种电力设备和实际电力系统有一个轮廓性的、感性的认识。

本课程的先修课程为“电路”“电磁场”以及“电机学”，否则难以掌握本教材所涉及的基本理论和基本分析方法。

除了在正文中提出了一些建议读者自行推导的公式和考虑的问题以外，在书末集中列出了一些具有一定难度的思考题，它们对于掌握和应用有关的内容将有很大的帮助。

本书第一章和第五章由夏道止编写，第二、三、四章由李建华编写，第六章由方万良编写，第七章和第八章由赵登福编写，第九章由杜正春编写。全书由夏道止任主编。

本书初稿蒙华中科技大学程时杰教授审阅，提出了很多宝贵的意见和建议，在此深表感谢。

限于编者水平，书中错误和不妥之处难免，请读者批评指正。

编者

2003年12月

第二版前言

本书第一版自出版以来被部分高等院校使用，并提出了不少宝贵的意见，主要集中在基于手工计算的各种近似计算方法方面，认为作为教材还有必要进行适当的介绍。为此，本书在修订时接纳了这一建议，并对其他方面进行了修改和补充。书中主要修改和增删的内容如下：

(1) 改写了第一章的内容，包括对我国目前电力系统的信息进行了更新，增加了对火力发电厂、水力发电厂、核电厂和风力发电厂生产过程的介绍，系统地介绍了负荷曲线，对电力市场作了简要的介绍。

(2) 在第三章中增加了两端供电网络的潮流估算方法，进一步说明了电力系统中有功功率与电压相位差、无功功率与电压有效值差之间的密切关系。

(3) 在第四章中完整地介绍了潮流计算的快速分解法。

(4) 在第五章中增加了中枢点电压管理和电压调整基本方法的介绍。

(5) 在第七章中增加了发电机励磁调节系统对短路电流影响的定性分析，并对复杂系统三相短路电流的计算方法进行比较详细的介绍，包括计算机算法和手工算法。

(6) 在附录中给出了一个完整的极坐标形式的牛顿—拉夫逊法潮流计算程序，在程序中列出了简单的说明并给出了中间结果，以便于读者阅读和调试。

(7) 对于我国规定的标准电压、频率容许偏差和供电电压容许偏差等，都按近年来新颁布的有关国家标准进行了修改。

此外，还对其他个别地方进行了修改和补充。

本书第一章由别朝红修订，第三、四、五章和附录由李建华修订，第七章由王建学修订，全书由夏道止统稿。

本书承蒙华中科技大学程时杰教授和清华大学张伯明教授审阅，提出了很多宝贵的意见和建议，深表感谢。

限于编者水平，书中疏漏和不妥之处在所难免，请读者批评指正。

网站 <http://jc.cepp.com.cn> 提供本书教学课件和附录中程序的下载。

编者

2010年12月

第三节	柔性交流输电	175
第七章	同步电机的数学模型	183
第一节	同步电机的转子运动方程	183
第二节	abc 坐标下的同步电机方程	186
第三节	派克变换及 dq0 坐标下的同步电机方程	190
第四节	用电机参数表示的同步电机方程	198
第五节	同步电机的稳态方程式和相量图	206
第八章	电力系统对称故障分析	209
第一节	故障种类、发生原因及后果	209
第二节	无限大功率电源供电的三相短路电流分析	211
第三节	不计阻尼绕组的同步电机突然三相短路分析	215
第四节	计及阻尼绕组的同步电机突然三相短路分析	229
第五节	发电机励磁调节系统对短路电流影响的定性分析	235
第六节	电力系统三相短路电流计算方法	238
第九章	电力系统简单不对称故障分析	250
第一节	对称分量法原理和分析方法	250
第二节	元件序阻抗和电力系统序网络的形成	253
第三节	不对称短路故障情况下短路点的电流和电压	268
第四节	非故障点的电流和电压计算	283
第五节	非全相运行的分析和计算	290
第六节	电力系统简单故障的计算机算法简介	296
第十章	电力系统稳定性分析	297
第一节	电力系统稳定性的基本理论和数学模型	297
第二节	电力系统小干扰稳定性分析	309
第三节	电力系统暂态稳定性分析	325
第四节	提高电力系统稳定性的基本措施及其原理	341
附录	牛顿—拉夫逊法潮流计算程序	344
思考题		359
参考文献		362

第一章 电力系统的基本概念

本章主要介绍电力系统的形成和发展情况、各类发电厂的生产过程、我国电力系统 60 多年来的发展历程和现状, 阐述电力系统的基本概念, 包括电力系统的组成、基本参量、接线图、电压等级以及电力系统的特点和运行的基本要求, 最后对电力市场作简单介绍。

第一节 电力系统概述

一、电力系统的形成和发展

1831 年, 法拉第发现了电磁感应定律, 促进了发电机和电动机的发明, 从而开始了电能的生产和使用。当时所采用的是低压直流, 主要供给照明用电, 供电范围很小。

1882 年在法国首先实现了电压在 1000V 以上的直流输电, 虽然输送功率只有 1.5kW, 但传输距离达到 57km, 形成了世界上第一个完整的电力系统, 包含发电、输电和用电。同年, 爱迪生在美国纽约的珍珠街建成了世界上第一个中心电站, 装有 6 台蒸汽式直流发电机, 通过地下电缆将 110V 的直流电输送到 1 英里外的曼哈顿中心供给 59 个照明用户, 共 1284 盏电灯。

随着生产的发展, 对传输功率和输电距离提出了更高的要求, 特别是为了提高输电效率, 需要采用更高的输电电压, 以便减少线路流过的电流从而降低线路电阻中的损耗; 但是从用电设备的角度而言, 为了安全又不得不采用较低的电压。然而, 直流输电却不能满足这种要求。

于是, 在 1891 年制成三相变压器和三相异步电动机的基础上, 德国工程师奥斯卡·冯·密勒首次研制了三相交流输电系统。该系统由 95V、230kVA 的水轮发电机发电, 经变压器升压至 15200V, 将功率传送到 178km 以外的法兰克福, 然后用两台变压器降压至 112V, 分别供给照明负荷和一台驱动 75kW 水泵的异步电动机, 这便形成了现代电力系统的雏形。从此, 三相交流制得到了迅速的发展, 而且逐步在同步发电机之间进行并列运行, 在输、配电过程中采用多个电压等级, 经过一百多年的发展, 形成电压越来越高、容量和规模越来越大的区域性、地区性、全国性, 甚至跨国性的电力系统。

二、电力系统的组成

电力系统主要包含发电厂、输电网络、配电网络 and 用户。图 1-1 给出了一个简单电力系统的示意图, 用以说明它们之间的相互关系。

在目前的电力系统中, 主要的发电厂为以煤、石油和天然气作为燃料的火力发电厂、利用水能发电的水力发电厂和利用核能发电的核电厂。此外利用风能、太阳能、地热能和潮汐能发电的电厂正在不断发展之中, 其中, 风力发电已经具有一定的规模。

输电网络的作用是将各个发电厂通过较高电压 (如 220、330、500、750kV 甚至 1000kV) 的线路相互连接, 使所有同步发电机之间并列运行, 并同时 will 发电厂发出的电能送到各个大的负荷中心。由于每条线路上需要输送功率的大小以及传输距离的不同, 在同一

个输电网络中可能需要同步采用几种不同等级的电压,这就需要在输电网络中采用大量的变压器,将发电机电压通过升压变压器进行升压,并通过变压器连接不同电压等级的线路。在发电厂远离负荷中心而且需要传输大量功率的情况下,采用交流输电将会出现系统稳定性等技术问题,在此情况下高压直流输电将比采用交流输电更为经济,故目前电压在 $\pm 500\text{kV}$ 和 $\pm 800\text{kV}$ 的高压直流输电已经成为大功率远距离输电的主要手段之一。

电能送到负荷中心以后,需要经过配电网进行电能的分配,用较低电压(如 110 、 35 、 10kV 或 6kV 以及 $380/220\text{V}$)的线路供给各个集中的大工厂和分散的中、小工厂以及千家万户的生活用电。图 1-1 中虚线以下的部分只是一个负荷中心的一部分配电网,而在实际配电网中, 110 、 35kV 的线路接线要复杂得多, 10 (或 6) kV 线路的接线更加复杂,而 $380/220\text{V}$ 的线路则是像蜘蛛网一般连接到城市和农村的每一户居民住宅和每个商店。

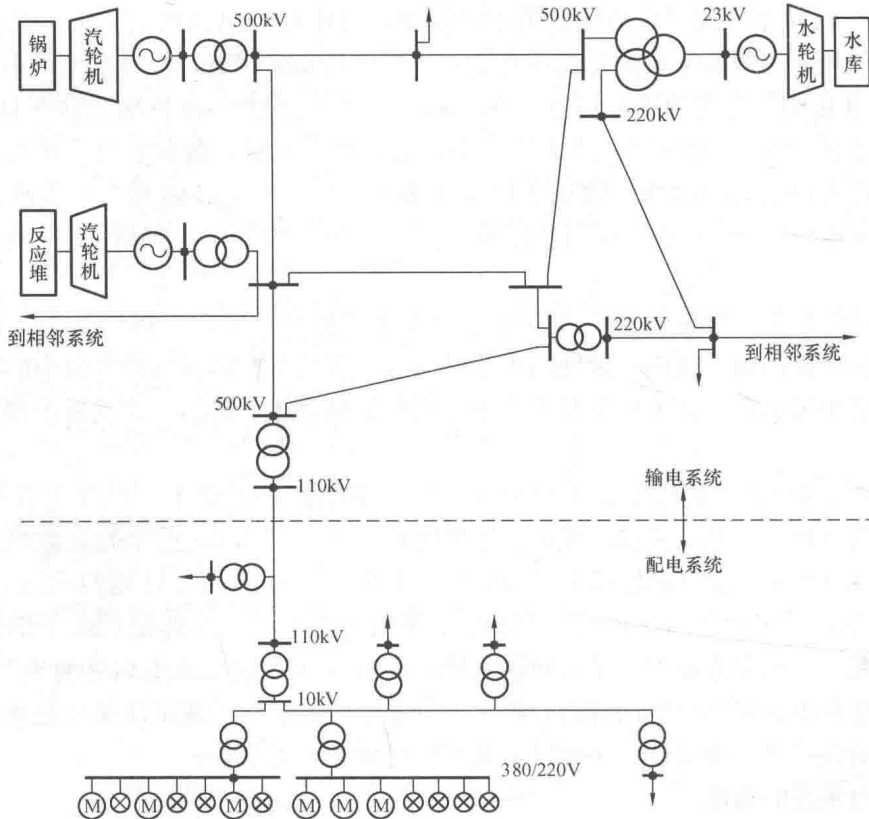


图 1-1 电力系统示意图

电力系统的用户包括工业、农业、交通运输业等国民经济各个部门以及日常生活用电,而受电器的种类则有灯泡、电动机、电热器、整流器和电弧炉等,它们将电能分别转换为光能、机械能、热能等。

按照传统的定义,将电能生产、输送、分配和使用过程中所涉及的全部元件的总体称为动力系统。它包括发电厂的全部动力部分(如锅炉、反应堆、水库、汽轮机、水轮机、风力机等)、所有的发电机、输电和配电网、用户的受电器以及由它们所带的负荷。动力系统

的电气部分,即发电机、输电网络和配电网络以及用户的受电器的总体称为电力系统,而将输电网络和配电网络统称为电力网络或简称电网。然而,现在习惯上所用的术语却比较随便和混乱,动力系统这个名称基本上已不再使用,电力系统与电网的含义也基本相通。

在电力系统中,发电机、变压器、线路、断路器、隔离开关和受电器等直接参与生产、输送、分配和使用电能的电气设备通常称为主设备或称一次设备,由它们组成的系统称为一次系统。一次设备及其连接的电气回路称为一次回路。实际上,在电力系统中还包含各种对一次设备进行测量、保护、监视和控制的设备,习惯上将它们称为二次设备。二次设备通过电压互感器和电流互感器从一次设备取得电压和电流的信息。二次设备按照一定的规则连接起来以实现某种技术要求的电气回路称为二次回路。

三、电力系统的基本参量和接线图

衡量一个电力系统的规模和大小,通常用总装机容量、年发电量、最大负荷和最高电压等级等基本参量来描述。

电力系统的总装机容量是指系统中实际安装的发电机组额定有功功率的总和,其常用单位为 kW (千瓦)、MW (兆瓦) 或 GW (吉瓦)。

电力系统的年发电量是指系统中所有发电机组全年实际发出电能的总和,其常用单位为 MWh (兆瓦时)、GWh (吉瓦时) 或 TWh (太瓦时)。

最大负荷是指电力系统总有功负荷在某段时间内,如一天、一月或一年内的最大值,以 kW (千瓦)、MW (兆瓦) 或 GW (吉瓦) 计。

最高电压等级是指电力系统中所采用的最高额定电压,以 kV (千伏) 计。

为了表示电力系统中各个元件之间的相互连接关系,通常采用两类接线图(又称结线图),一类是地理接线图,另一类是电气接线图。地理接线图主要表示系统中各个发电厂和变电站的真实地理位置、电力线路的路径以及它们之间的相互连接关系,如图 1-2 所示。因此,由地理接线图可以对系统的主要情况有一个比较清晰的了解。但是,在地理接线图上很难表示各个电气元件之间的详细电气连接关系。电气接线图主要用单线图来显示系统中各个发电机、变压器、母线、线路等元件(有的还包括断路器和隔离开关等)之间的电气连接关系而不反映它们的地理位置。因此,用电气接线图可以对系统了解得更详细、更全面。图 1-1 中表示发电机、变压器、母线和线路相互连接的部分实际上便是一种电气接线图。对一个电力系统进行了解时,这两种接线图各有用处。

四、电网的接线方式

电网的接线方式通常需要考虑以下几方面:

(1) 必须满足运行可靠性的基本要求,对于可靠性要求较高的用户,应保证当某个元件故障时,其余的元件仍能对其继续供电。

(2) 应能灵活地适应各种运行方式。

(3) 力求减少设备费用和运行费用。

在实际系统中,虽然电网的接线方式十分复杂,但基本上可以分成无备用和有备用两种接线方式,而实际系统的接线则是这些基本接线方式的组合。

1. 无备用接线方式

无备用接线方式是指负荷只能从一回线路取得电源的接线方式。这种接线方式包括单回路的放射式、干线式和链式,如图 1-3 所示。

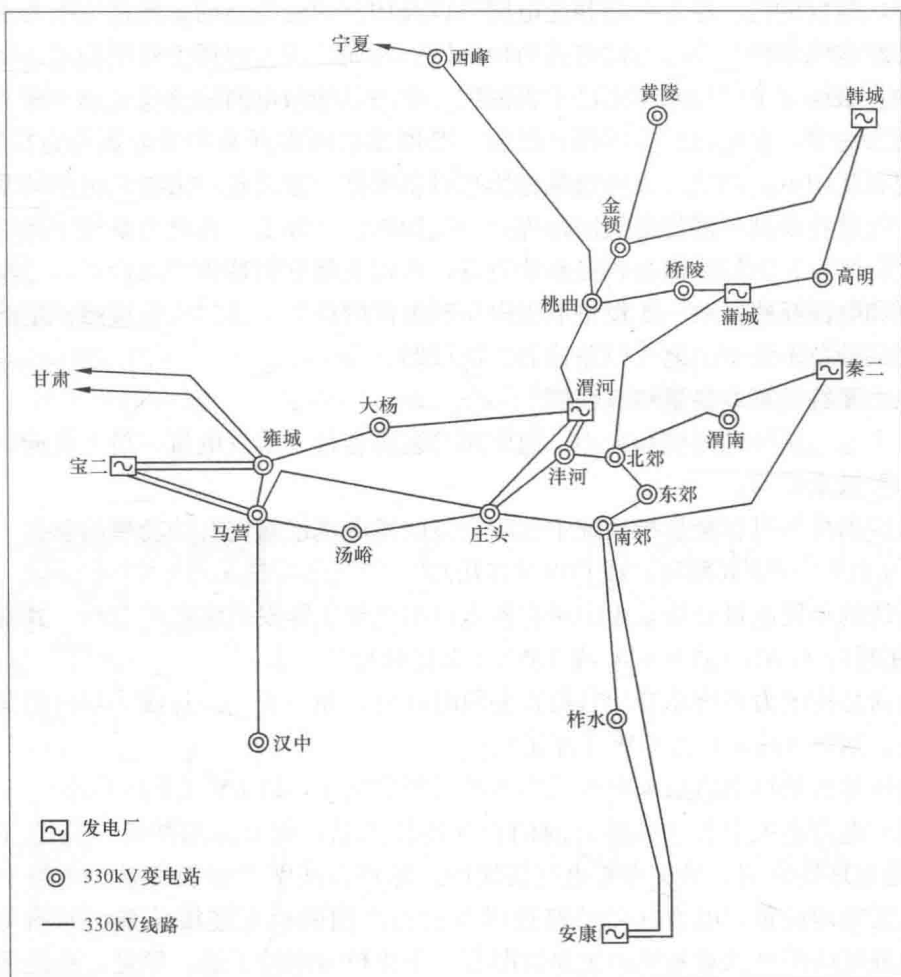


图 1-2 电力系统地理接线图示例

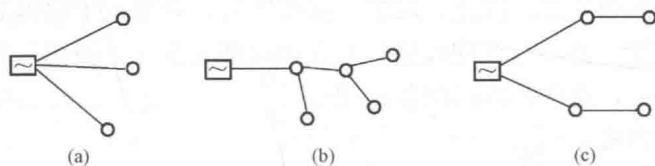


图 1-3 无备用接线方式

(a) 放射式; (b) 干线式; (c) 链式

无备用接线方式的主要优点是结构简单、经济、运行方便；最大的缺点是供电可靠性差，当任何一条线路发生故障时，将使一部分负荷停电。

2. 有备用接线方式

有备用接线方式是指负荷可以从两回或两回以上线路取得电源的接线方式。这种接线方式有双回路放射式、干线式、链式和环形，两端（或多端）供电，如图 1-4 所示。

有备用接线方式的优点在于供电可靠性高，缺点是线路的投资和运行费用大。在有备用接线方式中，可能会在某些地方（变电站）接入放射式、干线式或链式网络。

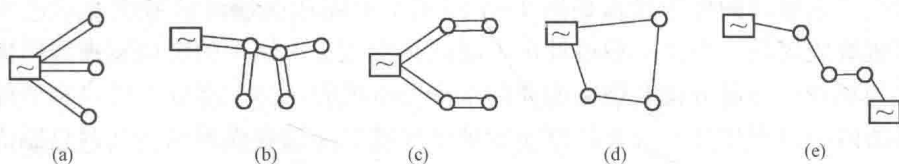


图 1-4 有备用接线方式

(a) 双回路放射式；(b) 双回路干线式；(c) 双回路链式；(d) 环形；(e) 两端供电

有时将无备用接线方式的网络和有备用接线方式的放射式、干线式和链式网络称为开式电网，而将两端（或多端）供电及环形网络称为闭式电网。

第二节 发电厂的生产过程

发电厂的生产过程实质上是将一次能源转换成电能（二次能源）的过程。所谓一次能源是指直接取自自然界而没有经过加工转换的各种能量和资源，包括煤、石油、天然气、油页岩、核能、太阳能、水能、风能、波浪能、潮汐能、地热能、生物质能和海洋温差能等。一次能源可以进一步分为可再生能源和非再生能源两大类。可再生能源包括太阳能、水能、风能、生物质能、波浪能、潮汐能、海洋温差能等，在自然界可以循环再生。非再生能源包括煤、石油、天然气、油页岩、核能等，不能再生，用一点就少一点。

按照所使用一次能源种类的不同，发电厂可以分为：以煤、石油、天然气为燃料的火力发电厂；利用水能发电的水力发电厂；利用核能发电的核电厂；利用风能、太阳能、潮汐能、地热能、生物质能发电的电厂等，它们统称为新能源发电厂。为了节约非再生能源和环境保护的需要，大力发展新能源发电势在必行。为了促进可再生能源的开发利用，增加能源供应，改善能源结构，保障能源安全，保护环境，实现经济社会的可持续发展，我国制定了《可再生能源法》，并于 2006 年 1 月 1 日起实施。近几年，我国在风力发电、太阳能发电、生物质能发电等方面发展迅速，特别是风力发电，截至 2014 年年底，风电并网总量已累计达到 1.49 亿 kW，位居世界第一。

下面将简要介绍火力发电厂、水力发电厂、核电厂以及风力发电厂的主要生产过程。

一、火力发电厂

根据所使用燃料的不同，火力发电厂（简称火电厂或火电站）分为燃煤、燃油和燃气等不同的类型。我国煤炭资源比较丰富，因此，燃煤火电厂是目前主要的火电厂。按原动机种类的不同，火电厂又分为汽轮机发电厂、蒸汽机发电厂、内燃机发电厂和燃气轮机发电厂等。目前，大容量的火电厂多为汽轮机发电厂。根据作用的不同，火电厂可分为单纯发电的电厂和既发电又供热的电厂，前者一般采用凝汽式汽轮机—发电机组，故又称为凝汽式火电厂，后者称为供热式发电厂（简称热电厂）。下面主要介绍凝汽式火电厂的生产过程。

所有火电厂的能量转换过程都是燃料的化学能→热能→机械能→电能。因此，火电厂主要组成部分为：

- (1) 锅炉及附属设备，将燃料的化学能转换为热能。
- (2) 汽轮机及附属设备，将热能转变为机械能。
- (3) 发电机及励磁机，将机械能转换为电能。

燃煤凝汽式火电厂的生产过程如图 1-5 所示。原煤从煤场经输煤皮带运进原煤斗，然后落入磨煤机磨成煤粉，再由排粉机抽出，随同热空气送入锅炉的燃烧室进行燃烧。燃烧过程中所产生的热量，一部分被燃烧室四周的水冷壁所吸收，另一部分对燃烧室顶部和烟道入口处的过热器内的蒸汽加热，余下的热量则被烟气携带穿过省煤器和空气预热器传递给这两个设备内的水和空气。烟气经过除尘器和脱硫装置净化处理后，由引风机导入烟囱，排向大气。燃烧所生成的灰渣和由除尘器收集到的细灰，用水冲进冲灰沟排出厂外。

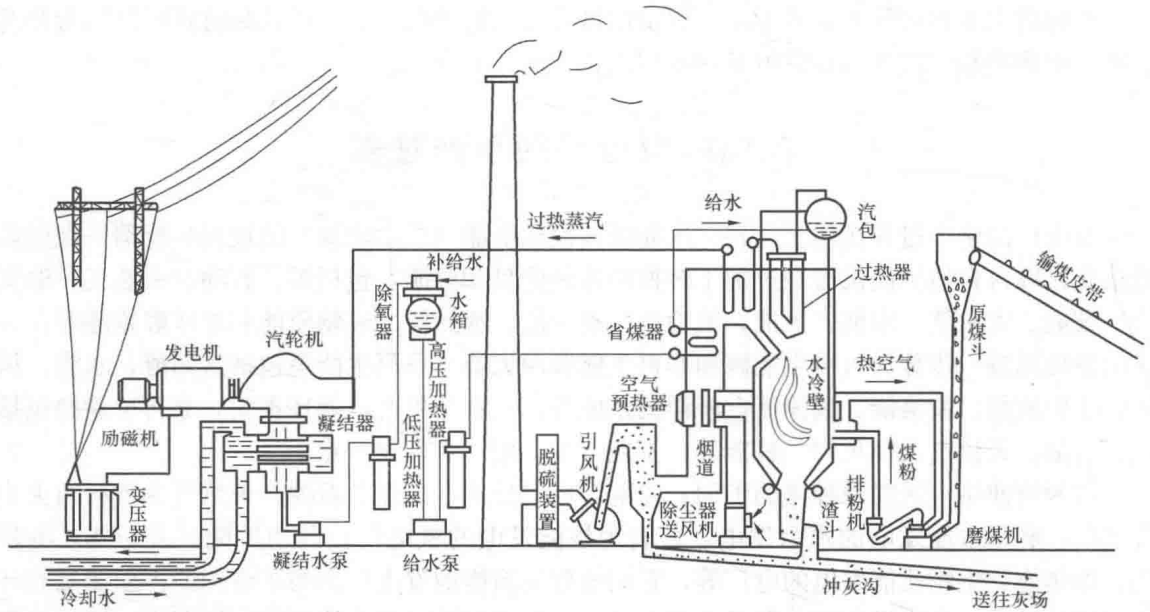


图 1-5 燃煤凝汽式火电厂的生产过程示意图

水和蒸汽是热能转化为机械能的主要介质。经过净化后的补给水先送进省煤器预热，然后进入汽包，再降入水冷壁管中吸收燃烧室的热能而蒸发成蒸汽。蒸汽通过过热器时，再次被加热变成高温高压的过热蒸汽。过热蒸汽经过主蒸汽管道进入汽轮机进行膨胀做功，推动汽轮机转子转动，将热能转变为机械能。做完功的蒸汽在凝结器中被冷却凝结成水。凝结水经过除氧器去氧，再经过加热器加热后，由给水泵重新送入省煤器循环使用。

汽轮机转子带动发电机转子旋转，在发电机内将机械能转换成电能。发电机发出的电能直接或经过变压器升压后送入电网。

由于在冷凝过程中要将蒸汽中的大量热量释放给冷却水，因而降低了凝汽式火电厂的热效率。为了提高热效率，火电厂均尽量提高蒸气的温度和压力，向高参数、大容量、低能耗机组发展。目前，国际上最大的汽轮发电机组单机容量达 130 万 kW，我国制造的 100 万 kW 发电机组也已投入运行。

火电厂的优点是布局比较灵活，影响其输出功率和发电量的因素较少，建设周期短且一次性投资比水力发电厂和核电厂小得多。其缺点是火电机组启动时间较长（几小时到几十小时），因而不宜经常启停，而且为了避免锅炉燃烧不稳定，燃煤火电机组的最小技术输出功率较高（额定输出功率的 40%~60%），从而限制了其负荷调节能力。特别是火电厂的排放

物中包含大量的硫氧化物、氮氧化物、二氧化碳和飞灰等，对环境污染严重。

二、水力发电厂

水力发电厂（简称水电厂或水电站）的能量转换过程只有两次：水的位能→机械能→电能，所以在能量转换过程中的损耗小，发电效率比火电厂高。

水电厂发出的功率 $P(\text{kW})$ 决定于上下游的水位差 H （或称水头， m ）、通过水轮机的流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$ 以及水轮发电机组的效率 η ，即

$$P = 9.8QH\eta$$

因此，为了充分利用水力资源，水电厂往往需要修建拦河坝等水工建筑物以形成集中的水位差，并依靠大坝形成具有一定容积的水库，以调节河水流量。

水电厂可以分为坝式、引水式水电厂和抽水蓄能电厂等类型。

1. 坝式水电厂

坝式水电厂主要依靠拦河筑坝来集中落差以提高河段的水位，形成发电水头。根据厂房位置的不同，坝式水电厂又分为坝后式和河床式两种。

坝后式水电厂的厂房建在坝的下游。其结构如图 1-6 所示。水库中的水经过压力水管进入螺旋形蜗壳，推动水轮机转子旋转，将水能转变成机械能。水轮机的转子带动发电机转子旋转，将机械能转换为电能，而做完功的水则经过尾水管排往下游。坝后式水电厂适合于高、中水头的情况，如我国的三峡、三门峡、刘家峡水电厂和丹江口水电厂等。

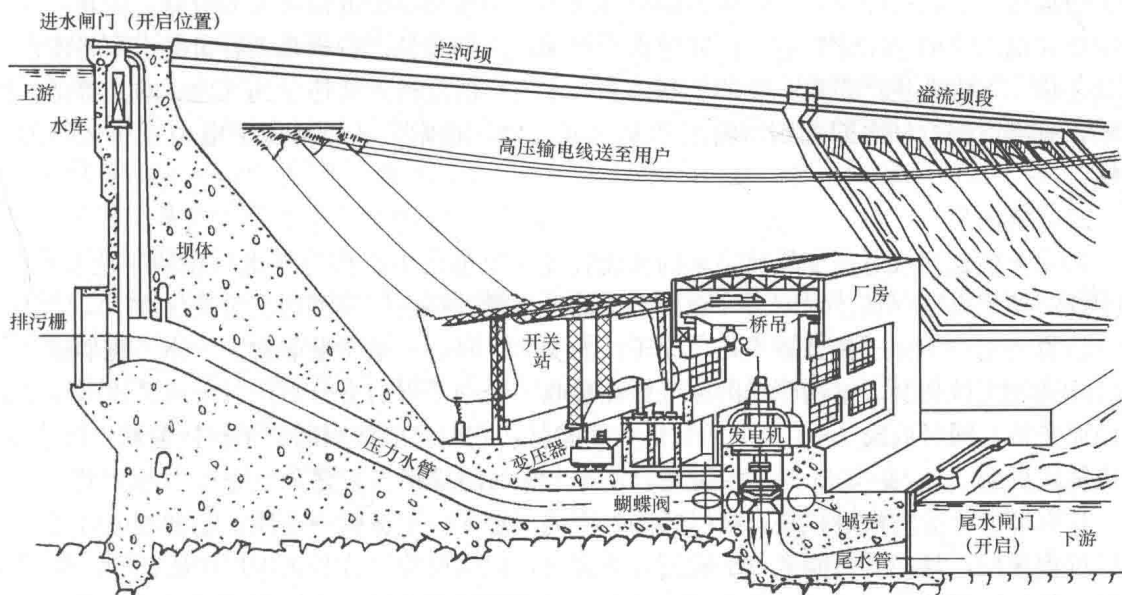


图 1-6 坝后式水电厂示意图

河床式水电厂的厂房和坝体连在一起，厂房本身也起到挡水的作用，而水流直接由厂房进水口引入水轮机。这种水电厂一般建在河道平缓的地段，水头为 $20\sim 30\text{m}$ ，如我国的葛洲坝水电厂。

2. 引水式水电厂

引水式水电厂一般建在河流具有高落差的地段，在急流河道处修建低堰，由引水渠形成

水头, 将水通过压力水管流入水轮机, 如图 1-7 所示。这种水电厂没有水库, 大都用于山区的小水电厂。

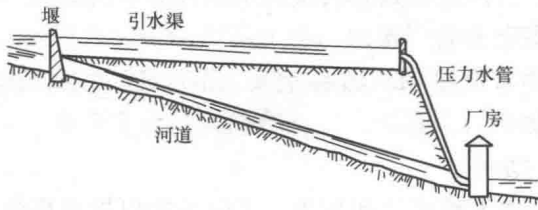


图 1-7 引水式水电厂示意图

电动机—水泵方式运行, 将下水库中的水抽回到上水库去, 以便发电时再度使用。这种既能吸收电能又能发出电能的电厂对于系统的频率调整、水火电互补、调峰填谷以及事故备用都可以起到十分重要的作用。为此, 近年来抽水蓄能电厂的规划和建设大大加快, 截至 2014 年底, 我国已建成抽水蓄能电厂 24 座, 总装机容量 2181 万 kW, 占水电总装机比重约 7.2%。

总的来说, 水电厂的生产过程比火电厂简单得多, 所需运行维护人员很少, 易于实现全盘自动化。而且, 水电厂不消耗燃料, 无污染, 电能成本比火电厂低得多。此外, 水力机组的效率较高, 承受负荷变化的性能较好, 故在系统中的运行方式较为灵活, 且水力机组启动迅速, 在系统事故时能有效地发挥后备作用。水电厂的兴建往往还可以同时发挥防洪、灌溉、航运等多方面的作用, 实现河流的综合利用, 使国民经济取得更大的效益。但是, 水电厂需要建设大量的水工建筑物, 因此建设投资大, 工期较长。特别是大容量的水库将淹没一部分土地, 给农业生产带来一定的不利影响。水电厂的运行方式还受到气象、水文等条件的影响, 有丰水期、枯水期之别, 输出功率不如火电厂稳定, 从而增加了电力系统运行的复杂性。

三、核电厂

将原子核裂变或者聚变释放出来的核能转变为电能的电厂称为核电厂或原子能发电厂。由于控制核聚变还存在技术障碍, 因此目前商业运营的核电厂都利用核裂变反应。

核裂变是一个原子核分裂成几个原子核的变化, 只有一些质量非常大的原子核如铀、钚等, 才能发生核裂变。这些原子的原子核在吸收一个中子以后会分裂成两个或者更多质量较小的原子核, 同时放出 2~3 个中子和很大的能量, 它们又能使别的原子核接着发生核裂变, 形成链式反应。1g 铀-235 完全核裂变后释放出来的能量相当于完全燃烧 2.5t 标准煤。

核电厂的能量转换过程是: 核燃料的裂变能→热能→机械能→电能。它的发电过程与火电厂过程相似, 只是其热能来自于核燃料的裂变, 以核反应堆代替火电厂中的锅炉。按反应堆慢化剂的不同, 核电厂可以分为轻水堆型、重水堆型和石墨气冷堆型等。目前世界上的核电厂大多为轻水堆型, 它又分为压水堆和沸水堆两种。轻水堆核电厂生产过程如图 1-8 所示。

沸水堆核电厂的生产过程是: 冷却剂(水)在循环泵的作用下由堆芯下部进入反应堆, 在沿堆芯上升的过程中从燃料棒周围得到热量从而变成蒸汽和水的混合物, 再经过汽水分离器和蒸汽干燥器, 用分离出来的蒸汽推动汽轮发电机组。压水堆核电厂具有两个循环系统, 它们的生产过程是: 高压(120~160 个大气压)冷却剂在主泵的作用下进入反应堆, 将核裂变放出的热能带出并进入蒸汽发生器, 然后由主泵送回反应堆, 形成一回路循环系统。在

3. 抽水蓄能电厂

抽水蓄能电厂是一种特殊形式的水电厂。它具有上、下两个水库, 既可以作为电源, 又可以作为负荷。当作为电源时, 用上水库中所储蓄的水进行发电, 使机组以水轮机—发电机方式运行, 以满足系统高峰负荷期间的功率需求。作为负荷时, 使机组以电