



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANLI XITONG FENXI

电力系统分析

(第二版)

夏道止 主 编
程时杰 张伯明 主 审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANLI XITONG FENXI

电力系统分析

(第二版)

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 主 编 | 夏道止 | | |
| 编 写 | 李建华 | 方万良 | 赵登福 |
| | 杜正春 | 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

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书共分九章，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、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的内容有很大帮助。

本书可作为高等院校电气信息类相关专业教材，也可作为高职高专相关专业教材，同时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/夏道止主编. —2 版. —北京: 中国电力出版社, 2010.12

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5123-1201-2

I. ①电… II. ①夏… 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 (2010) 第 245573 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2004 年 9 月第一版

2011 年 2 月第二版 2011 年 2 月北京第六次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22.25 印张 549 千字

定价 37.50 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

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

目 录

前言

第一版前言

| | |
|---------------------------|-----|
| 第一章 电力系统的基本概念 | 1 |
| 第一节 电力系统概述 | 1 |
| 第二节 发电厂的生产过程 | 5 |
| 第三节 电力系统的负荷 | 10 |
| 第四节 我国的电力系统 | 12 |
| 第五节 电力系统的特点和运行的基本要求 | 16 |
| 第六节 电力市场简介 | 18 |
| 第二章 电网的正序参数和等值电路 | 20 |
| 第一节 电力线路的数学模型 | 20 |
| 第二节 变压器的数学模型 | 39 |
| 第三节 标么制和电网等值电路 | 46 |
| 第三章 输电线路运行特性及简单电力系统潮流估算 | 58 |
| 第一节 电网的电压降落和功率损耗 | 58 |
| 第二节 输电线路的运行特性 | 67 |
| 第三节 辐射形网络和简单闭式网络的潮流估算方法 | 70 |
| 第四章 电力系统潮流的计算机算法 | 84 |
| 第一节 网络方程式 | 84 |
| 第二节 潮流计算的节点功率方程和节点分类 | 91 |
| 第三节 潮流计算的牛顿—拉夫逊法 | 93 |
| 第四节 牛顿—拉夫逊法潮流计算中的收敛性和稀疏技术 | 107 |
| 第五节 潮流计算的快速分解法 | 109 |
| 第六节 其他潮流计算方法简介 | 115 |
| 第五章 电力系统正常运行方式的调整与控制 | 117 |
| 第一节 电力系统有功功率和频率的调整与控制 | 117 |
| 第二节 电力系统无功功率和电压的调整与控制 | 129 |
| 第三节 电力系统运行方式的优化 | 148 |
| 第四节 电力系统潮流控制 | 155 |
| 第五节 高压直流输电 | 160 |
| 第六章 同步电机的数学模型 | 170 |
| 第一节 同步电机的转子运动方程 | 170 |
| 第二节 abc 坐标系统下的同步电机方程 | 174 |
| 第三节 派克变换及 dq0 坐标下的同步电机方程 | 178 |

| | | |
|-------------|----------------------------|------------|
| 第四节 | 用电机参数表示的同步电机方程····· | 186 |
| 第五节 | 同步电机的简化数学模型····· | 194 |
| 第六节 | 同步电机的稳态方程式和相量图····· | 197 |
| 第七章 | 电力系统对称故障分析 ····· | 202 |
| 第一节 | 故障种类、原因及后果····· | 202 |
| 第二节 | 无限大功率电源供电的三相短路电流分析····· | 204 |
| 第三节 | 无阻尼绕组同步电机突然三相短路分析····· | 208 |
| 第四节 | 有阻尼绕组同步电机突然三相短路分析····· | 222 |
| 第五节 | 发电机励磁调节系统对短路电流影响的定性分析····· | 228 |
| 第六节 | 电力系统三相短路电流计算方法····· | 231 |
| 第八章 | 电力系统简单不对称故障分析 ····· | 243 |
| 第一节 | 对称分量法原理和分析方法····· | 243 |
| 第二节 | 元件序阻抗和电力系统序网络的形成····· | 246 |
| 第三节 | 不对称短路故障情况下短路点的电流和电压····· | 261 |
| 第四节 | 非故障点的电流和电压计算····· | 276 |
| 第五节 | 非全相运行的分析和计算····· | 283 |
| 第六节 | 电力系统简单故障的计算机算法简介····· | 289 |
| 第九章 | 电力系统稳定性分析 ····· | 291 |
| 第一节 | 电力系统稳定性的基本理论和数学模型····· | 291 |
| 第二节 | 电力系统小干扰稳定性分析····· | 300 |
| 第三节 | 电力系统暂态稳定性分析····· | 310 |
| 第四节 | 提高电力系统稳定性的基本措施及其原理····· | 329 |
| 附录 | 牛顿—拉夫逊法潮流计算程序 ····· | 332 |
| 思考题 | ····· | 347 |
| 参考文献 | ····· | 350 |

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 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。

尔后,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,它包含发电、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去供给 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。但是从用电设备来说为了安全又不得不采用较低的电压,而直流输电却不能适应这种要求。

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·密勒首次实现了三相交流输电系统,它由 95V、230kV·A 的水轮发电机,经变压器升压至 15 200V,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异步电动机驱动 75kW 的水泵,从而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 100 多年的发展,形成电压愈来愈高、容量和规模愈来愈大的区域性、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、配电网络和用户,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原子能发电厂。此外利用风能、太阳能、地热能 and 潮汐能发电的发电厂正在不断发展,其中,风能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 将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时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,故目前电压为 $\pm 500\text{kV}$ 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下的一分配电网络,而在实际配电网中, 110kV 和 35kV 的线路接线要复杂得多, 10kV (或 6kV)线路的接线更加复杂,而 $380/220\text{V}$ 的线路则是像蜘蛛网那样连接到城市和农村的每一户居民住宅和每个商店。

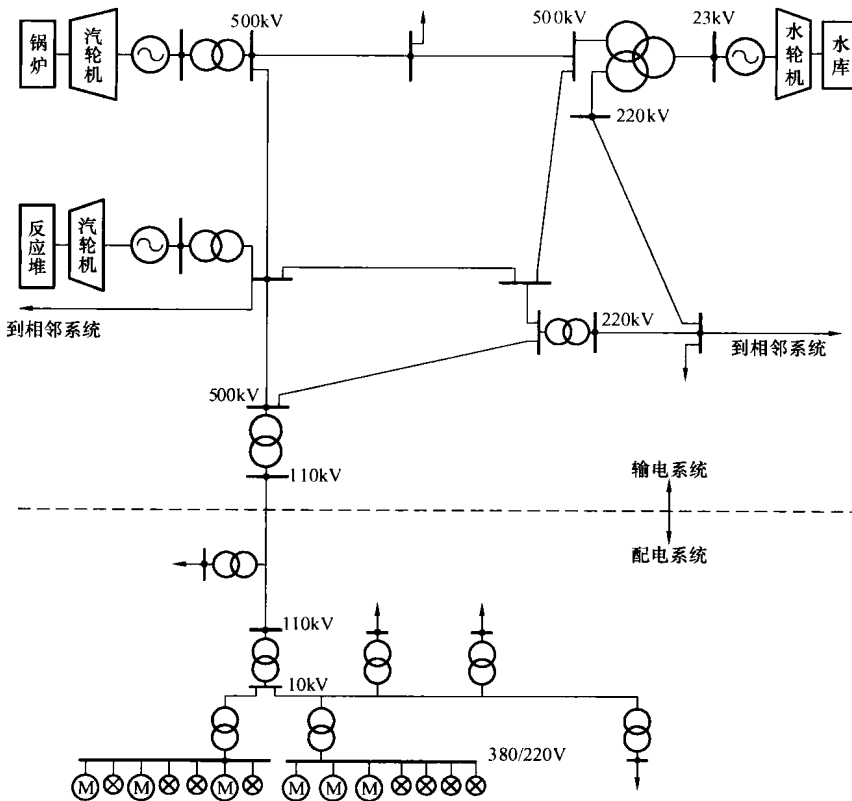


图 1-1 电力系统示意图

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载。动力系统 中的电气部分,即发电机、输电和配电网以及用户的受电器的总体称为电力系统,而将输

电和配电网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力设备通常称为主设备或称一次设备，由它们组成的系统又称为一次系统。一次设备及其连接的回路称为一次回路。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和二次系统。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，其常用单位用为 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 MW·h（兆瓦时）、GW·h（吉瓦时）或 TW·h（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所的真实地理位置、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，从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，由电气接线图可以获得对系统更详细的了解。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个方面：

(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，虽然电网的接线十分复杂，但是它们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。

无备用接线方式的主要优点是结构简单、经济、运行方便，其最大的缺点是供电可靠性

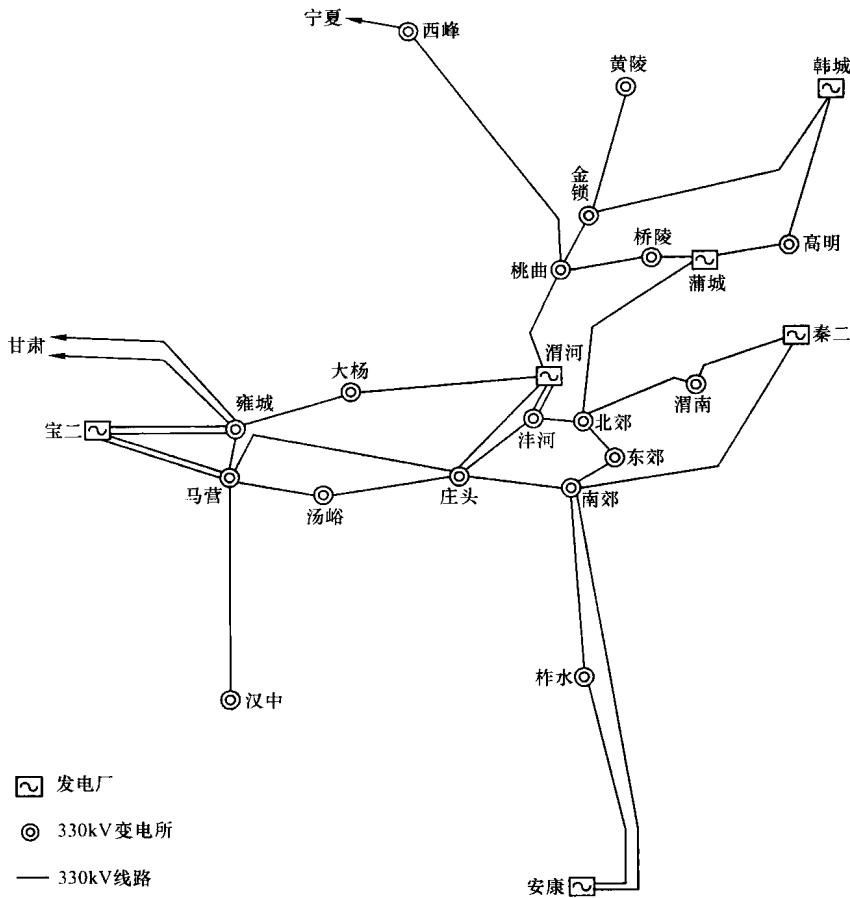


图 1-2 电力系统地理接线图示例

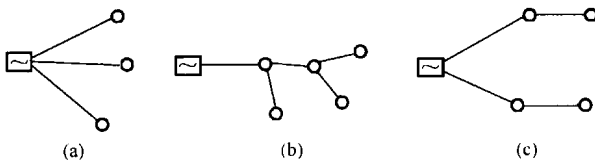


图 1-3 无备用接线方式

(a) 放射式; (b) 干线式; (c) 链式

线式、链式和环形, 以及两端(或多端)供电方式, 如图 1-4 所示。

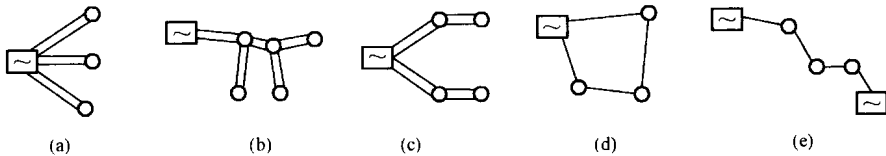


图 1-4 有备用接线方式

(a) 放射式; (b) 干线式; (c) 链式; (d) 环形; (e) 两端供电

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

有时将无备用接线方式的电网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，它们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，它们不能再生，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。由于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2009年年底，并网总量已累计达到1613万kW，成为世界第三。

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，火电厂分又为汽轮机发电厂、蒸汽机发电厂、内燃机发电厂和燃汽轮机发电厂等。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。

水和蒸汽是热能转化为机械能的主要介质。经过净化后的给水先进省煤器预热，然后

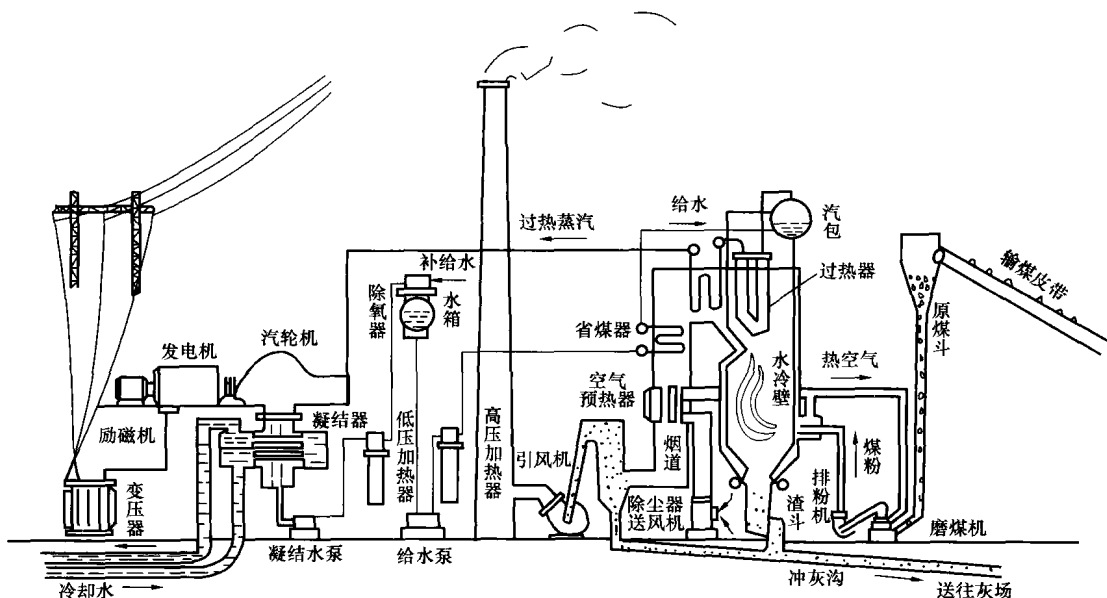


图 1-5 燃煤凝汽式火电厂的生产过程示意图

进入汽包，再降入水冷壁管从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电压后送入电网。

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。当汽轮机出口蒸汽温度一定时，根据热力学原理，汽轮机入口蒸汽温度越高，热效率越高。为了提高热效率，火电厂均尽量提高蒸汽的温度和压力，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。

火电厂的特点是：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（额定出力的 50%~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 (kW) 决定于上下游的水位差 H （或称水头，单位为 m）、通过水轮机的流量 Q (m^3/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、引水式和抽水蓄能式等类型。

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、刘家峡和丹江口等水电厂。

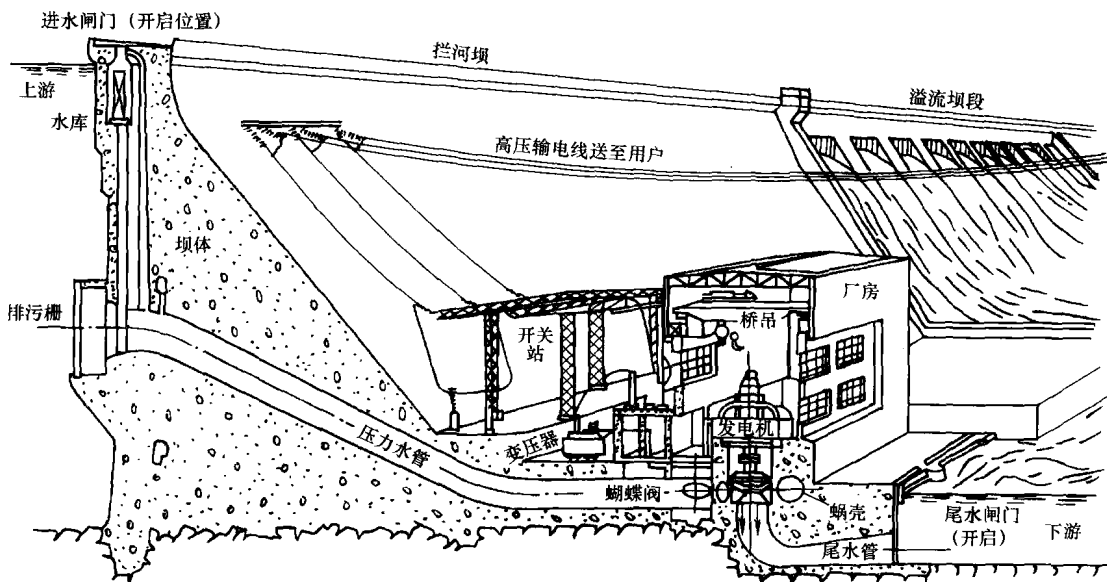


图 1-6 坝后式水电厂示意图

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 20~30m，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。

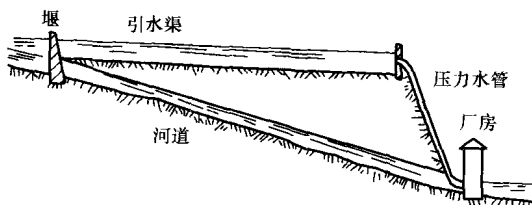


图 1-7 引水式水电厂示意图

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。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2009年8月,我国已建成抽水蓄能电厂20座,总装机容量1184.5万kW,在建的11座,总容量1308万kW,其发展潜力很大。

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,且易于实现全盘自动化。其次,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,承受负载变化的性能较好,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。水力发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,发电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。它的发电过程与火力发电厂过程相似,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,如图1-8所示。

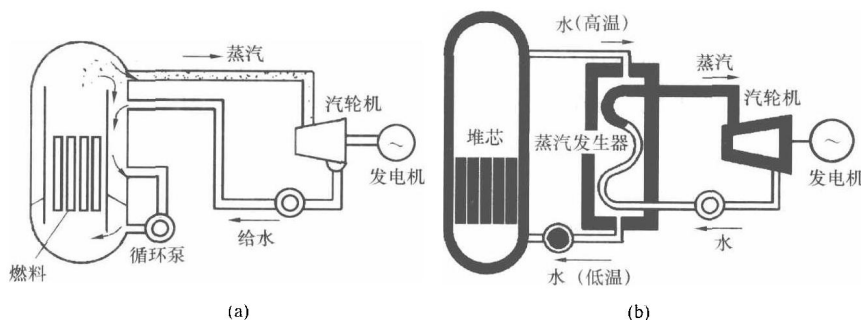


图 1-8 轻水堆核电厂生产过程示意图

(a) 沸水堆; (b) 压水堆

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,它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。在蒸汽发生器中，通过传热管将冷却剂所带的热量传递给管外的水使它沸腾而产生高温高压蒸汽，它推动汽轮发电机组发电后在冷凝器中凝结成水，再由凝结给水泵送入加热器 [图 1-8 (b) 中未画出]，重新加热后送回蒸汽发生器，形成二回路循环系统。

由于压水堆核电厂中一回路系统与二回路系统完全隔离，分别形成密闭的循环系统，因此汽轮机不受放射性的污染而更加安全和容易维修。我国的核电厂以压水堆型为主。

核能是有望长期使用的能源，从已探明的能源储量来看，地球上可开发的核燃料所提供的裂变能可供人类使用几千年，核聚变能则几乎是用之不竭。然而，石油和天然气在今后几十年内将被用完，煤炭也只能再用几百年。因此，核电厂的迅速发展对解决世界能源问题有着重大的意义。世界最大的核电厂是日本的福岛核电厂，装机容量为 909.6 万 kW。截至 2009 年底，我国核电厂总装机容量为 908 万 kW，占全国总装机容量的 1.04%。为了调整我国的能源结构，“十二五”规划和 2020 年电力发展的基本方针已由适度发展核电转变为积极发展核电。目前在建的有辽宁红沿河、广东阳江、山东海阳等近十座核电厂。

四、风力发电厂

风能是洁净的可再生能源，因此，在能源日益紧缺和对环境保护日益重视的今天，世界各国都在大力推进风力发电的发展。我国风能资源丰富，总储藏量约 32 亿 kW，可用于发电的开发容量约 2.5 亿 kW，居世界首位。2009 年，我国的风电装机容量已达 1613 万 kW，位居世界第三。预计到 2020 年装机容量将达到 30GW，届时将占总发电装机容量的 3% 左右。

风力发电厂将风能通过风力机转化为机械能来驱动发电机发电，其结构示意图如图 1-9 所示。目前风力机的单机容量为兆瓦级，所采用的发电机有常规的异步发电机、双馈型异步发电机和同步发电机。

早期的风力发电机组由于规模和技术条件的限制大多为独立运行。随着风力发电技术的进步，在同一场地上装有几台甚至上百台大型风力发电机组，并将其并联运行共同向电网供电的大规模风电场已经成为风力发电的主要形式，它弥补了风能能量密度低的弱点，降低了设备投资和发电成本，成为大规模开发利用风能经济而有效的方式。然而，由于风的能量与风速的 3 次方成正比，风力机组的输出功率将随着风速的频繁波动而不断变化，因此风电场的并网必然给系统带来许多新的问题。这些问题包括并网过程对电网的冲击，风速变化对系统功率平衡和频率变化的影响等。因此，含有大量并网风电的电力系统在规划和运行时，必须充分注意风电的波动性和不确定性对系统带来的影响。

除了风力发电以外，新能源发电还有太阳能发电、地热能发电、潮汐能发电等。太阳能发电的主要方式为光热发电和光电发电两种。光热发电是用反光镜集热来产生蒸汽，再用汽轮机来发电；光电发电是用光电池直接将太阳能转化为电能。地热能发电是通过热流体将地下热能携带到地面，再经过专门的装置将热能转换为电能。潮汐发电是利用潮汐具有的能量转变成机械能，再转化成电能。

新能源发电都属于清洁、廉价的可再生能源，是未来能源的主要形式，但它们的特性各

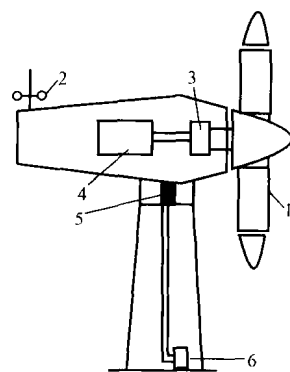


图 1-9 风力发电机组结构示意图
1—叶片；2—风速传感器；3—增速箱；
4—发电机；5—调向机构；6—控制柜

不相同,接入电力系统后将给系统的运行带来许多新的研究课题。

第三节 电力系统的负荷

一、负荷的构成

电力系统中的用电设备包括异步电动机、同步电动机、电热器、电炉、照明和整流设备等,对于不同的行业,这些设备的构成比例有所不同。在工业部门的用电设备中,异步电动机所占的比例最大。所有用户消耗的功率之和常称为电力系统的综合用电负荷。综合用电负

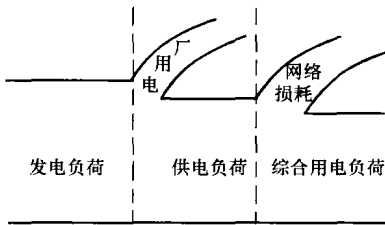


图 1-10 电力系统负荷间的关系

荷加上传输和分配过程中所产生的电网损耗后称为电力系统的供电负荷,即发电厂应该送出的功率。供电负荷加上各发电厂本身需要的厂用电功率便是发电机应该发出的功率,称为电力系统的发电负荷。这些负荷之间的关系如图 1-10 所示。

二、负荷曲线

在进行电力系统的分析和计算以及调度部门安排系统运行方式时,都必须知道用户的功率即负荷的大小。由于电力系统的负荷随时间不断变化,因此,电网中的功率分布、功率损耗及电压损耗等都随着负荷的变化而变化。为此,必须了解和掌握负荷随时间变化的规律。

电力系统的负荷是随时间不断变化的,通常用负荷曲线来反映它们的变化规律。获得负荷曲线的方法之一是通过运行中的测量记录来作出以往的负荷曲线,而对于未来的负荷曲线则需要根据已有的和进一步收集到的各种负荷资料,应用科学的计算方法或者经验加以编制。

常用的负荷曲线有以下几种。

1. 日负荷曲线

日负荷曲线反映负荷在一天中随时间变化的规律。典型的日负荷曲线如图 1-11 所示,其中一种是连续形的,另一种是阶梯形,后者反映一天中各个小时平均的负荷(或者是各个整点负荷)的变化情况。由于夜晚具有大量的照明负荷而上午工厂的负荷较大,因此在一天当中通常出现两次高峰负荷,而半夜的负荷通常较小,形成负荷的低谷。不同地区由于负荷的组成不同,其负荷曲线也各不相同。因此,各级调度和计划部门都需要有自己的日负荷曲线。一天之内最大的负荷称为日最大负荷 P_{\max} ,最小负荷称为日最小负荷 P_{\min} ,最小负荷以下的部分称为基本负荷,简称基荷。

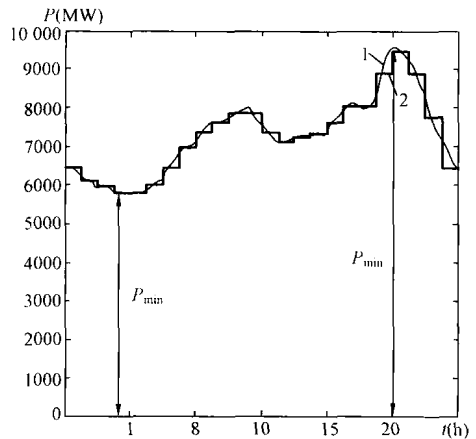


图 1-11 有功功率日负荷曲线

1—连续形; 2—阶梯形

日负荷曲线除了表示负荷随时间变化的规律以外,还可以表示电能的多少。由于在时段 Δt 内的电能 ΔA 等于有功功率 P 与 Δt 的乘积,因此,在一天内的总电能为