



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）



电力系统分析

武 娟 主 编

张兴然 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



电力系统分析

第二版
清华大学出版社



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

电力系统分析

主 编	武 娟	
副主编	张兴然	
编 写	张建军	郭晓敏
主 审	赵兴勇	



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）。

本书内容由浅入深，循序渐进，重点突出，在满足教学及培训对专业知识要求的同时，注重技能的培养。本书不仅包括电力系统分析教学的常规内容，如电力系统等值电路及潮流计算、电力系统的故障分析与计算、电力系统的频率调整、电力系统的电压调整、电力系统的经济运行、架空线路导线截面的选择、电力系统的稳定运行等，还增加了特高压交、直流输电和智能电网等电力新技术，具有一定的先进性。

本书主要作为高职高专电力技术类专业教材，也可作为电力职业资格和岗位技能培训教材，同时可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

电力系统分析/武娟主编. —北京：中国电力出版社，2012.7
普通高等教育“十二五”规划教材. 高职高专教育
ISBN 978-7-5123-3315-4

I. ①电… II. ①武… III. ①电力系统—系统分析—高等职业教育—教材 IV. ①TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 162692 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>）

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 9 月第一版 2012 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.75 印张 408 千字

定价 30.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
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

本书是根据教育部对提高高等职业教育教学质量的有关精神，按照教育部审定的电力类专业主干课程的教学大纲，结合电力职业教育的需求，参照电力行业职业能力标准编写而成。本书以培养优质高端技能型人才为目标，符合高等职业教育要求和规律，具有明显的高等职业教育的特点。

本书内容从理论上坚持“必需、够用”原则，根据电力类专业技术领域和职业岗位（群）的任职要求，参照相关的职业资格标准，把电力行业的相关技术准则、条例、标准、规程规范引入书中，体现了职业性、适用性；不仅适用于高职高专学历教育用书，也可作为电力类专业技术技能人才职业技能考核和岗位培训教材。

本书由山西电力职业技术学院武娟担任主编，保定电力职业技术学院张兴然担任副主编。武娟编写项目一、四、八、九，张兴然编写项目三、六、七，山西电力职业技术学院张建军编写项目二、五和附录，山西电力职业技术学院郭晓敏参加了部分内容的编写和校对工作。全书由武娟统稿，山西大学工程学院赵兴勇主审。主审为本书提出了很多宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，存在的问题和错误难免，诚请读者指正。

编 者

2012年6月

目 录

前言

项目一 电力系统基本知识	1
任务 1.1 认知电力系统	1
任务 1.2 认知电力负荷	7
任务 1.3 确定电力系统的额定电压	12
小结	16
习题	16
项目二 电力系统的等值电路及潮流计算	18
任务 2.1 认知电力线路	18
任务 2.2 确定电力线路的参数及等值电路	24
任务 2.3 确定变压器的参数和等值电路	29
任务 2.4 确定电力系统的等值电路	36
任务 2.5 计算电网的电压降落和功率损耗	41
任务 2.6 计算简单电网的潮流	47
任务 2.7 复杂电力系统的潮流计算机算法	58
小结	76
习题	77
项目三 电力系统的故障分析与计算	80
任务 3.1 认识故障	80
任务 3.2 分析计算无限大容量系统供电电路内三相短路	83
任务 3.3 认识对称分量法	86
任务 3.4 分析计算不对称短路	91
小结	99
习题	99
项目四 电力系统的频率调整	102
任务 4.1 认知电力系统的频率质量标准	102
任务 4.2 电力系统有功功率平衡及备用	103
任务 4.3 认知电力系统的频率静态特性	104
任务 4.4 调整电力系统的频率	110
任务 4.5 经济分配发电厂有功功率	113
小结	116
习题	116
项目五 电力系统的电压调整	118
任务 5.1 认知电力系统的电压质量标准	118

任务 5.2 认知电力系统综合负荷的电压静态特性	121
任务 5.3 电力系统的电压和无功功率的管理	123
任务 5.4 调整电力系统电压的技术措施	128
小结	138
习题	138
项目六 电力系统的经济运行	140
任务 6.1 认知电能损耗	140
任务 6.2 计算电网的电能损耗	141
任务 6.3 降低电能损耗的技术措施	148
小结	153
习题	154
项目七 架空线路导线截面的选择	155
任务 7.1 选择架空线路导线截面的基本原则	155
任务 7.2 选择架空线路导线	157
小结	162
习题	162
项目八 电力系统的稳定运行	164
任务 8.1 认知电力系统的稳定性	164
任务 8.2 分析简单电力系统并列运行的静态稳定性	166
任务 8.3 分析电力系统电压、频率及负荷的静态稳定性	175
任务 8.4 提高电力系统静态稳定性的措施	178
任务 8.5 分析简单电力系统的暂态稳定性	184
任务 8.6 提高电力系统暂态稳定性的措施	192
任务 8.7 认识电力系统振荡	200
小结	204
习题	204
项目九 电力新技术	206
任务 9.1 远距离输电技术	206
任务 9.2 高压直流输电技术	214
任务 9.3 特高压输电技术	219
任务 9.4 智能电网技术	225
小结	235
习题	236
附录 A 电网的常用参数	237
附录 B 并联电容器技术数据	255
附录 C 导线的允许载流量	260
参考文献	261

项目一 电力系统基本知识



项目目标

能够列举出电力系统、电网的概念；能简述我国电网发展的历程；能够说出电力系统运行的特点及对电力系统的基本要求；会确定电网中各电气设备的额定电压；能够理解电力负荷分类、各类负荷曲线及其作用；能说出最大负荷利用小时数的意义并根据负荷曲线求最大负荷利用小时数。

电力工业是支撑国民经济和社会发展的基础性产业和公用事业。它不仅能满足人民生活水平的不断提高，还为工业、农业、现代科学技术和国防提供了必不可少的动力。多年来，我国电力建设逐步加强，城乡电网建设与改造取得了显著成效，保障了国民经济和社会发展对电力的强劲需求。从世界各国经济的发展进程来看，国民经济每增加1%，就要求电力工业增长1.3%~1.5%，一些发达国家几乎是每7~10年（个别的是5~6年）容量增加一倍。所以，国民经济要发展，电力工业先行是基础。

任务1.1 认知电力系统

一、电力系统和电网

将自然能转变为电能的过程称为发电，一般在发电厂中进行。煤炭、石油、天然气、水能、核能等自然能称为一次能源，电能是经过人们加工的二次能源。电能与其他能源不同，其主要特点是：不能大规模储存，发电、输电、配电和用电在同一瞬间完成；发电和用电之间必须实时保持供需平衡，如果不能保持实时平衡，将危及电力生产的安全性和连续性。

由于发电厂和负荷之间往往距离很远，这就需要电力线路作为输送电能的通道。在线路输送功率不变的情况下，通过提高线路电压等级输送电能可以减少电流在导线中的功率损耗、电压损耗。电能输送至负荷中心后必须降压，用户才能使用。

电压的升高和降低是通过变压器完成的。安装变压器、断路器等及其测量、保护与控制设备的场所，称为变电所（站）。变电所用于改变电压和联络、汇聚、分配电能。用于升高电压的称为升压变电所；用于降低电压的称为降压变电所。

发电厂、变电所和电力用户之间是通过电力线路来联系的。电力线路分为输电线路和配电线路。我国输电线路电压在220kV及以上，配电线路的电压等级有110、35、10、0.4kV等。输电线路将发电厂发出的电力输送到消费电能的地区（也称负荷中心），或进行相邻电网之间的电力互送，使其形成互联电网或统一电网，保持发电和用电或两电网之间供需平衡。升压变电所、降压变电所及其相连的输电线路连接起来构成输电网。配电线路是在消费电能的地区接收输电网受端的电力，然后进行再分配，输送到城市、郊区、乡镇和农村，并进一步分配和供给工业、农业、商业、居民以及特殊需要的用电部门。所有配电变压器及其配电线路连接起来构成配电网。

电力系统中，由不同电压等级的变电所和输配电线路构成的网络称为电网。

电网是指电网中有从三个或三个以上方向得到电能的变电所或负荷点，又称复杂网。多端电源供电网供电可靠性高，运行、检修灵活，但是接线复杂、投资大，继电保护、运行操作复杂。这类电网主要用于电力系统网架接线，以加强电力系统发电厂之间及发电厂与枢纽变电所之间的联系。供用电网络一般不采用复杂网的接线形式。

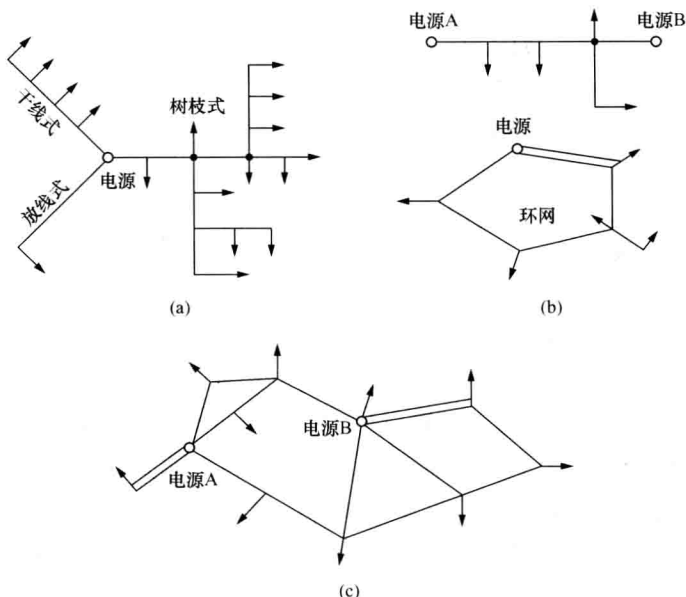


图 1-2 电网的接线图

(a) 开式网；(b) 环网；(c) 复杂网

二、电力系统发展概述

1. 我国电力系统的发展历程

1831 年法拉第的电磁感应定律，从本质上解释了电与磁之间的关系，为电力系统的形成奠定了理论基础。1882 年法国人德普勒将慕尼黑郊外 57km 水电厂的电力输送到慕尼黑，形成了世界上最早、最简单的电力系统。它是一种直流输电系统，其发展受到了许多限制。直至 1891 年生产出了三相异步电动机、三相变压器，建立了三相交流输电系统才奠定了近代输电技术的基础。

三相交流电的出现，以及人们对电力需求的日益增加，使电力系统的容量越来越大、输电电压越来越高、输送功率也越来越大。目前，世界上最高线路电压已达 1150kV（前苏联在 20 世纪 80 年代建成世界上第一条 1150kV 特高压乌拉尔—西伯利亚输电线路）。随着输电距离及容量的不断增大，电力系统运行的稳定性问题也日益突出。20 世纪 50 年代开始直流输电又重新被人们所认识和利用。现在，世界上出现了许多超高压交、直流输电的大型电力系统。

在我国，1882 年上海有了第一座发电厂（容量为 150kW），主要供附近地区的照明负荷用电需要。1949 年以后电力工业逐年发展，尤其在改革开放以来，电力系统的规模也在壮大。1978 年底，全国装机容量仅 5712 万 kW，35kV 及以上输电线路长度仅为 23.1 万 km，变电设备容量为 1.3 亿 kVA。改革开放以来，我国电力系统建设步伐不断加快。截至 2011

年底,全国发电装机容量累计105576万 kW,电网 220kV 及以上输电线路回路长度、公用变设备容量分别为 48.03 万 km、21.99 亿 kVA,其中交流 500kV 等级线路回路长度、公用变设备容量分别为 13.44 万 km、7.58 亿 kVA;750kV 等级线路回路长度、公用变设备容量分别为 9425km、5530 万 kVA。1000kV 等级线路回路长度、公用变设备容量分别为 641km、1800 万 kVA。

随着我国工农业的发展,对电力的需求越来越多。2011 年,全国全社会用电量 46928 亿 kW·h。其中,第一产业用电量 1015 亿 kW·h,第二产业 35185 亿 kW·h,第三产业 5082 亿 kW·h,城乡居民生活 5646 亿 kW·h,工业用电量 34633 亿 kW·h。全国全口径发电量 47217 亿 kW·h,其中水电发电量 6626 亿 kW·h,占全部发电量的 14.03%,火电发电量 38975 亿 kW·h,占全国发电量的 82.54%,核电、并网风电发电量分别为 874 亿 kW·h 和 732 亿 kW·h。

1981 年 12 月河南平顶山—湖北武昌 500kV 输变电工程建成投运,以此为标志,我国成为世界上第 8 个拥有 500kV 输电线路的国家。几乎同时,500kV 元宝山—锦州—辽阳—海城输变电工程开工建设,采用国产 500kV 设备,分段调试投运,于 1985 年全线建成。此后,500kV 超高压输电线路逐渐成为除西北地区以外各省级及跨省大区电网的骨干网架。

2005 年 9 月,中国第一个 750kV 输变电示范工程(甘肃兰州东—青海官亭,世界上海拔最高的 750kV 输电线路)正式建成投运。此后,兰州东—白银—银川东 750kV 输变电工程于 2008 年投运。2009 年,新疆电网首批 750kV 输变电工程开工建设。2010 年初,新疆与西北主网联网 750kV 输变电工程开工建设。

2009 年 1 月 6 日,晋东南—南阳—荆门 1000kV 特高压交流试验示范工程建成投运并保持安全运行,验证了特高压输电的可行性、安全性和优越性,标志着我国在特高压输电技术领域取得重大突破。

同时,直流输电发展迅速,中国已经成为世界上直流输电技术领先的国家。1987 年,由我国自主设计、设备全部国产化的±100kV 舟山直流输电工程建成。1985 年,我国首条±500kV 直流输电工程(葛洲坝—上海)开工建设,1989 年 9 月单极建成投运,1990 年双极全部建成投运,首次实现华中、华东两大区域电网的直流联网。“十五”期间,随着三峡工程开工建设和西电东送工程的推进,我国又相继建成天生桥—广州、三峡—上海、三峡—广州等±500kV 直流输电工程和西北—华中灵宝直流背靠背工程。2010 年,云南—广东、向家坝—上海±800kV 特高压直流输电示范工程线路投入运行。

2011 年,我国电网建设成果显著。青藏直流联网工程投入试运行,结束了西藏电网长期孤网运行的历史,标志着我国内地电网全面互联;世界首个±660kV 电压等级的直流输电工程——宁东至山东直流输电工程双极建成投运;特高压 1000kV 交流试验示范工程扩容改造顺利完成,输送容量达到 500 万 kW;中俄直流背靠背联网工程建成投产,有利于中俄两国之间的电力交流与优势互补;世界电压等级最高的智能变电站——国家电网 750kV 陕西洛川变电站顺利建成投运。

我国华北、华中、华东、东北和南方电网形成 1000/500/220/110(66)/35/10/0.38kV 交流电压等级序列,西北电网形成 750/330(220)/110/35/10/0.38kV 交流电压等级序列。1990 年之前,我国各地区主网架为 220kV;2000 年之后,除西北等电网外,各省主网架基本为 500kV,同时交直流 500kV 线路成为跨省跨区输电的重要线路。随着 1000kV 输变电工

程以及直流输电工程的建设,跨区联网逐步加强,特高压交直流线路将承担起更大范围、更大规模的输电任务。

2. 跨省跨区能源资源优化配置能力建设

多年来,我国电网建设以各省电网和各大区跨省电网建设为重点,在20世纪80年代末形成东北、华北、华中、华东、西北、南方电网六大跨省区域电网,福建、山东、川渝、海南、新疆、西藏电网独立运行。以1989年建成的葛洲坝—上海±500kV直流输电工程实现华中与华东电网直流联网为起步,我国大力加强跨区电网的规划和建设,全国联网进程不断加快。

1997年,三峡输变电工程建设全面展开。2000年以后,随着三峡工程的建设,为加大跨省跨区能源资源优化配置能力,缓解电煤运输压力,在六大区域电网的基础上逐步开展了全国联网工作。2001年5月,华北电网与东北电网通过交流500kV线路实现了跨大区联网,同年11月,福建电网与华东电网实现互联。2002年5月,川电东送工程实现川渝电网与华中电网的交流互联。2003年9月,华中与华北联网工程建成投运,形成了东北—华北—华中同步电网。2004年4月,华中电网通过三峡—广州直流输电工程实现与南方电网的互联。2005年3月,山东电网并入华北电网,同年6月,西北电网与华中电网通过灵宝直流背靠背工程实现异步联网,标志着我国主要电网实现全国联网。2008年11月,东北电网与华北电网通过高岭直流背靠背实现异步联网。2009年,华北电网与华中电网通过特高压交流试验示范工程实现联网运行,海南联网工程建成投产,灵宝背靠背扩建工程投产运行,云南—广东特高压直流工程、宝鸡—德阳直流工程单极投运,向家坝—上海特高压直流工程成功带电,电网跨区联系进一步增强。

随着跨区联网的建设,跨区交易电量逐年提高。2009年,全国跨区交易电量2043亿kW·h。其中,华北通过特高压交流试验示范工程与华中交换电量89亿kW·h,东北送华北70亿kW·h,华中与华东交换电量384亿kW·h,华北送华东166亿kW·h,西北送华中36亿kW·h,西北送华北150亿kW·h,三峡送南方电网150亿kW·h。电网的能源资源优化配置能力逐步得到加强,增强了电网应对严重自然灾害和突发事件的能力。

电压高、输电容量大、输送距离远的联合电力系统在技术和经济上有许多明显的优越性。联合电力系统可以更合理地利用能源提高经济效益;可以采用大机组以降低造价和燃料消耗,加快建设速度;可以互相调剂、互相支援,减少系统总备用容量;可以利用地区时差及水火电之间的调节,取得错峰和调峰效益等。

三、对电力系统的基本要求

1. 电力系统运行的特点

电能是一种特殊的商品,其生产具有特殊性。

(1) 电能的生产、输送、分配和使用同时进行。目前尚不能大量地、廉价地储存电能。发电厂发出的电能还不能做到恰好等于用户所需要的电能和输送分配过程中的电能损耗。当电力系统负荷变化或发生故障使平衡有所破坏时,电力系统会自动调整或经人工干预调整到新的平衡。所以电能的生产、输送、分配和使用必须同时进行,要求统一调度、协调生产,保证整个系统的连续性。

(2) 电能的生产与国民经济及人民生活关系非常密切。由于电能使用和控制方便,能够远距离输送,当今社会电能的使用越来越广泛,各类用户无处不在。如果电能供应不足或中

断将给国民经济造成巨大损失，直接影响工农业生产，给人民生活带来诸多不便。另外，电能的价格还影响产品的成本，从而影响大多数商品和服务价格。

(3) 电力系统运行的过渡过程非常短暂。电能以电磁波的形式传播，其传输速度与光速相同。电力系统中各元件的投、切和电能输送过程几乎都在一瞬间进行，即电力系统从一种运行方式过渡到另一种运行方式的过渡过程非常短暂。在电力系统中，由于雷击或开关操作引起的过电压，其暂态过程只有微秒到毫秒数量级；从发生故障到系统失去稳定通常也只有几秒的时间，因事故而使系统全面瓦解的过程一般也只以分钟计。为了使设备在故障等暂态过程中不致损坏，更为了防止电力系统失去稳定或发生崩溃，因此电力系统要求具有较高的自动化程度，需要继电保护、自动装置的投入，实施实时监控，保证电力系统的安全稳定运行。

2. 对电力系统的基本要求

电力系统的根本任务是：最大限度地为用户提供安全、可靠、优质、价廉的电能。根据电能生产的特点和电力系统的任务，对电力系统有以下基本要求。

(1) 最大限度地满足用户的需求。电力生产要满足现在各个行业及人民生活不断增长的用电需求，并且电力的发展制约国民经济的发展。所以，保障供电是电力部门的首要任务，并要求电力的发展超前其他行业的发展，最大限度地满足人们对电能的需求。

(2) 安全可靠地供电。电力生产必须执行“安全第一、预防为主”的方针，没有安全，就没有生产。可靠的供电就是满足电能生产的连续性，电力系统供电的中断将使生活停顿，生活混乱，甚至危及人身和设备的安全，会造成十分严重的后果。电力系统为了保持高的可靠性，必须具有足够的电源容量（包括一定的备用容量）和合理的布局，电网结构必须合理，使得在某一（或某些）线路、电气设备因故障或检修而退出运行时，不影响或不严重影响对用户的供电。对电力系统可靠性威胁最大的就是系统失去稳定，必须要有保护投入和提高稳定性的措施。

(3) 提供优质的电能。电能的优劣可用电能质量来衡量。对一般用户主要考虑交流电的频率、电压和波形质量。在我国，对于频率的容许偏差、电压的容许偏差以及谐波电流电压闪变等都有相应的标准，在电力系统设计和运行中都不允许超出这些标准。我国电力系统频率偏移一般不超过额定频率的 $\pm(0.2 \sim 0.3)\text{Hz}$ ，电压偏移一般不超过用电设备额定电压的 $\pm 5\%$ ，频率或者电压偏移过大，无论对用户，还是对电力系统本身都会产生不良后果。随着计算机技术、高新技术设备在电力系统中的广泛应用，电能的波形、电压波动和闪变、三相电压不平衡度等也应予以考虑，否则将影响这些设备的正常工作。

(4) 系统运行的经济性。电能生产的规模很大，消耗的一次能源在国民经济一次能源总消耗量中占有很大的比重，因此，提高电力系统运行的经济性具有极其重要的意义。任何产品的生产都讲究其经济性，都要最大限度地降低生产成本。电力系统的经济性应考虑合理分配各发电厂之间的负荷、降低发电厂燃料消耗率和厂用电率、降低电网的电能损耗和管理成本等。

(5) 节能和环保。环境保护问题为人们日益关注。在火力发电厂生产过程中发生的各种污染物质，包括氧化硫、氧化氮、飞灰、灰渣、废水等排放量的限制，也将成为对电力系统运行的基本要求。节能降耗和污染减排是一项全社会任务，是构建和谐社会的重要因素。据测算，线损电量占电网公司总能耗的 97.05% ；其次大楼建筑用能、用水等方面的能耗占

1.43%。因此节能降耗重点在优化调度、降低综合线损、用电侧管理、建筑节能等领域开展。另外,可再生能源的开发利用也是实现节能、降耗、环保、增效的一种重要手段,我国将大力发展风电,适当发展太阳能光伏发电和分布式供能系统。

电力系统即要同时满足以上要求,又要兼顾它们之间的矛盾。比如,最大限度满足用电,就可能影响电力系统的安全和供电的可靠;要满足供电的可靠,提供优质电能,就要投入更多的电力设备,必然影响经济性。

任务 1.2 认知电力负荷

一、电力负荷

1. 电力系统的负荷

电力系统中的总负荷就是系统中千万个用电设备消耗功率的综合,它们大致分为异步电动机、同步电动机、电热电炉、整流设备、照明设备等若干类。根据用户的性质,用户的用电负荷可以分为工业负荷、农业负荷、交通运输负荷和人们生活用电负荷等。在不同行业中,各类用电设备占的比重也不同。表 1-1 所示是几种工业用电设备比重的统计。

表 1-1 几个工业部门用电设备比重的统计 (%)

用电设备	综合性中小工业	纺织工业	化学工业 (化肥厂、焦化厂)	化学工业 (电化厂)	大型机械 加工厂	钢铁工业
异步电动机	79.1	99.8	56.6	13.0	82.5	20.0
同步电动机	3.2		43.4		1.3	10.0
电热设备	17.7	0.2			15.0	70.0
整流设备				87.0	1.2	
合计	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

系统中所有电力用户的用电设备所消耗的电功率总和就是电力系统的负荷,也称为电力系统的综合用电负荷,它是把不同地区、不同性质的所有用户的总负荷加起来而得到的。综合用电负荷加上网络中损耗的功率就是系统中各发电厂应供应的功率,因而称为电力系统的供电负荷。供电负荷再加各发电厂的厂用电,即为系统中各发电机应发的功率,也称为电力系统的发电负荷。

2. 电力负荷的分类

电力系统要为广大用户提供电能,由于用户的用电设备类型不同,对供电的连续性、可靠性要求也不同。根据用户对供电可靠性的不同要求,目前我国将电力负荷分为以下三级。

(1) 一级负荷。一级负荷是非常重要的负荷,对这类负荷的供电中断将发生下列一种或几种严重后果。

- 1) 造成人身伤亡。
- 2) 造成环境严重污染。
- 3) 造成重要设备损坏、连续生产过程长期不能恢复或大量产品的报废。
- 4) 在政治上或军事上造成重大影响。
- 5) 造成重要公共场所秩序混乱。

对于一级负荷，必须由两个或两个以上的独立电源供电。所谓独立电源，就是不因其他电源停电而影响本身供电的电源。此外，除正常供电电源外还应配保安电源。

(2) 二级负荷。二级负荷是比较重要的负荷。对此类负荷中断供电，将造成工厂大量减产、工人窝工、城市中大量居民的正常生活受到影响等后果。

对于二级负荷，可由两个电源供电或专用线路供电。

(3) 三级负荷。不属于一级、二级负荷，受停电影响不大的其他负荷都属于三级负荷。如工厂的附属车间、次城镇和农村的公共负荷等。对这类负荷中断供电不会造成什么损失，所以对供电不作特殊的要求。

二、负荷曲线

负荷用电是随时间变化的，而且有很大的随机性。所以，电力系统的供电负荷是时刻在变化着的，相对应的电力系统的功率（或电流）分布、母线电压、系统频率、功率损耗以及

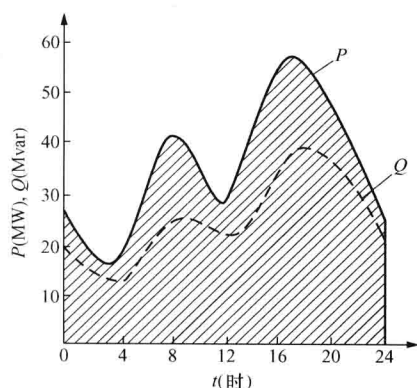


图 1-3 有功及无功日负荷曲线图

电能损耗等也在变化。因此在分析和计算电力系统时，首先必须了解负荷随时间变化的规律。用户、变电所、发电厂及电力系统的负荷随时间变化的规律，通常以负荷曲线来表示。一般用直角坐标系的横坐标表示时间，以时、日、月等时间为单位，纵坐标表示有功功率、无功功率、视在功率或者电流。负荷曲线可以分为有功功率日负荷曲线、无功功率日负荷曲线、年最大负荷曲线、年持续负荷曲线等类型。一般常用的负荷曲线有日负荷曲线和年负荷曲线。

1. 日负荷曲线

图 1-3 表示用户或地区的日负荷曲线，它可以由自动记录式仪表、电力生产系统软件或运行人员运行记录日志的有关数据画出。日负荷曲线描述了电力负荷 24 小时的变化情况。

日负荷曲线包括有功日负荷曲线与无功日负荷曲线。由于用户取用有功功率的同时也取用无功功率，无功日负荷曲线与有功日负荷曲线形状基本相似。不过，当有功负荷降低时，由于变压器、电动机取用的励磁无功功率只与电网电压有关而与负荷无关，所以无功负荷并不成比例下降。因此，在最小负荷时，无功负荷减少的程度比有功负荷要小一些。同时，由于照明负荷取用的无功功率甚少，有功负荷因照明而出现峰值时，无功负荷比有功负荷增加的程度要低些。因此，无功负荷曲线比有功负荷曲线平坦。

为了简化计算和便于在运行中绘制负荷曲线，常把连续变化的负荷看成在测量的那一小段时间内不变。因此，将连续变化的曲线绘制成阶梯形的负荷曲线，如图 1-4 所示。

日负荷曲线用来描述电力负荷 24 小时的变化情况，可以根据有功日负荷曲线计算一日的总耗电量，即

$$W_d = \int_0^{24} P dt \quad (1-1)$$

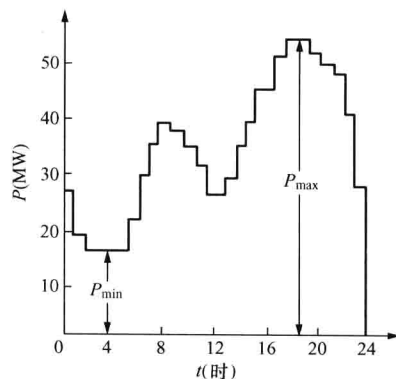


图 1-4 阶梯形有功日负荷曲线图

很明显,这就是日有功负荷曲线下面所包围的面积,即图 1-3 中阴影部分的面积。如果有功率 P 的单位是 kW,时间的单位是时,则电能 A 的单位为 kW·h。根据整个电力系统的日负荷曲线,电力系统的调度管理部门就可以据此制定日发电量计划。

日负荷曲线的特性指标:

(1) 日最大负荷 $P_{\max}$: 日负荷曲线中的最大值,又称峰荷;

日最小负荷 $P_{\min}$: 日负荷曲线中的最小值,又称为谷荷;

日平均负荷 P_{av} : 把一日内各小时的负荷加起来取平均值,其值等于图 1-3 曲线下的面积除以 24h,表达式为

$$P_{\text{av}} = \frac{W_d}{24} = \frac{1}{24} \int_0^{24} P dt \quad (1-2)$$

(2) 日负荷系数(负荷率) γ : 表示负荷的平复程度,其值越高,说明负荷在一天内的变化越小。其表达式为

$$\gamma = \frac{P_{\text{av}}}{P_{\max}} \quad (1-3)$$

(3) 日基本负荷系数 α

$$\alpha = \frac{P_{\min}}{P_{\text{av}}} \quad (1-4)$$

(4) 日最小负荷系数 β : 表明一天内负荷变化的幅度,其值越高,说明负荷在一天内大小的变化越小。其表达式为

$$\beta = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \quad (1-5)$$

γ 和 β 值的大小受电力系统中用电结构的影响,连续性生产的工业用电比重越大, γ 和 β 值也越高。若电力系统人为进行削峰填谷,则 γ 和 β 值也很高;反之,若系统中市政生活、商业及照明用电比重很大,则 γ 和 β 值就比较低。

对于不同性质的用户,负荷曲线是不同的,图 1-5 给出了不同行业的有功功率日负荷曲线。

一般来说,负荷曲线的变化规律由负荷的性质、厂矿企业生产的发展情况及作息制度、用电地区的地理位置、当地气候变化情况和群众生活习惯等因素决定。例如,照明的最大负荷出现在天黑以后,白天却比较小;而单班制生产的工厂则负荷主要在白天。不同班制工厂的日负荷曲线有很大的差别,单班制的日负荷曲线在一天中变化比较剧烈,而三班制的则比较平稳。另外,就是同一用户的负荷曲线每天也是不完全相同的。例如,一般工作日与节假日负荷差别很大。三班制企业最小负荷率可达到 0.85,单班制企业最小负荷率只有 0.13。各用户的最大负荷、最小负荷不是同时出现,所以系统最大负荷总是小于各用户最大负荷之和,而系统最小负荷总是大于各用户最小负荷之和。

2. 年最大负荷曲线

在电力系统的运行和设计中,不仅要知道一天之内负荷的变化规律,而且还要知道一年之中负荷的变化规律。最常用的是系统年最大负荷曲线,如图 1-6 所示。年最大负荷曲线是描述一年内从年初元月一日起至年终,电力系统每月(或每日)最大有功功率负荷变化的情况。它主要用来安排发电设备的检修计划,同时也可制订发电机组和发电厂的扩建或新建计划提供依据。从图 1-6 中可以看到,春秋季节最大负荷比较小些;夏季负荷随着空调等防暑措施的利用,负荷值会增加;至于年末负荷比年初大,是由于厂矿企业技术革新和电气

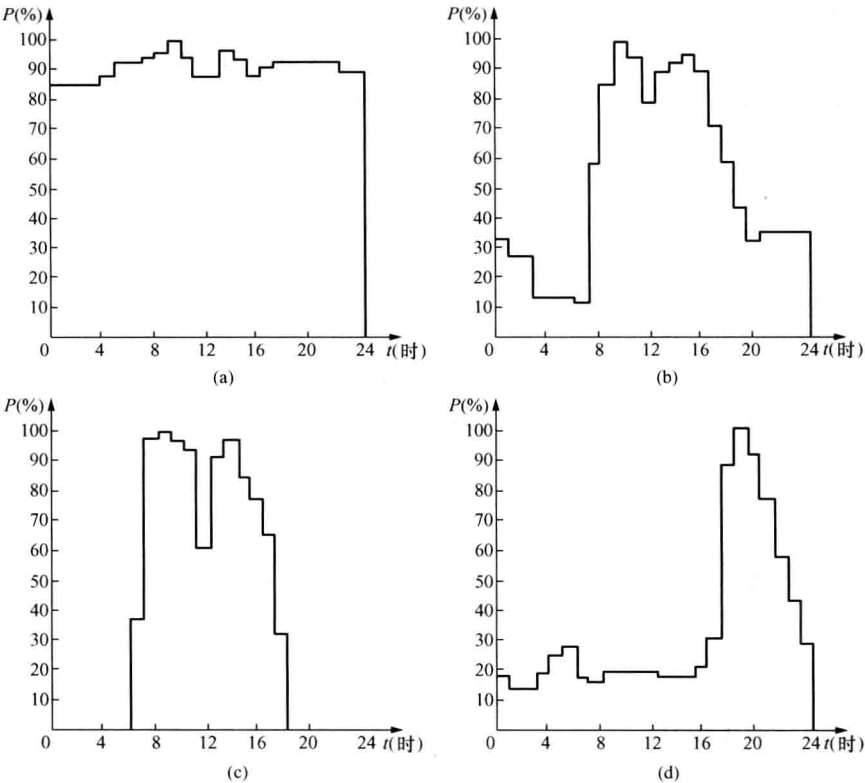


图 1 - 5 不同行业的有功功率日负荷曲线
(a) 钢铁工业负荷 (三班制负荷); (b) 食品加工负荷 (两班制);
(c) 一般加工负荷 (单班制); (d) 人们生活负荷

化程度不断提高以及新建、扩建厂矿投入生产而用电增加的结果。

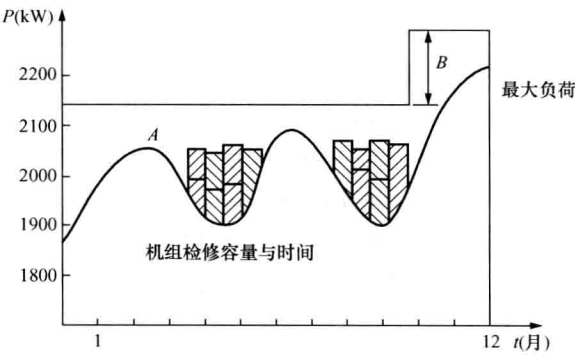


图 1 - 6 年最大负荷曲线

图 1 - 6 中带斜线小方块面积 A 的高度代表系统计划检修机组和其他附属设备的容量，横坐标表示该设备计划检修的时间。 B 代表系统新装的机组容量。显然这些退出运行进行检修的设备，应安排在年最大负荷曲线低谷的地方，并且不能超过系统装机容量。

3. 年持续负荷曲线

在电力系统的分析计算中，还常常用到年持续负荷曲线，如图 1 - 7 所示。它是根据全年的负荷变化，按照一年

(8760h) 中系统负荷的数值大小及其累计时间数的顺序排列而绘制成的。

利用年持续负荷曲线，可以计算出电网一年中电能消耗的大小。计算式表示为

$$W = \int_0^{8760} P dt = \sum_{t=1}^n P_t \Delta t_t \tag{1 - 6}$$