



普通高等教育“九五”国家级重点教材

电力系统分析(下册)

(第三版)

何仰赞 温增银



华中科技大学出版社
(华中理工大学出版社)

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS
E-mail: hustpp@wuhan.cngb.com

电力系统分析

(下册)

(第三版)

何仰赞 温增银

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电力系统分析(下册)/何仰赞、温增银.-3版
武汉:华中科技大学出版社, 2002年3月
ISBN 7-5609-2665-7

- I. 电…
II. ①何… ②温…
III. 电力系统-分析-高等学校-教材
IV. TM711

电力系统分析(下册)(第三版)

何仰赞 温增银

责任编辑:李 德

封面设计:潘 群

责任校对:陈元玉

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87545012

录 排:华中科技大学出版社照排室

印 刷:安陆市鼎鑫印务有限责任公司

开本:787×960 1/16

印张:18.5

字数:338 000

版次:2002年3月第3版

印次:2002年8月第20次印刷

印数:102 001—108 000

ISBN 7-5609-2665-7/TM·82

定价:23.50元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)



普通高等教育“九五”
国家级重点教材

第三版前言

本书初版以来已有 15 年了,1996 年出了修订版(第二版)。本书第一版获 1987 年水利电力部优秀教材一等奖,1988 年全国高等学校优秀教材奖,本版于 1996 年获得原国家教委九五国家级重点教材立项。这次修订在基本保持原书体系的同时,对教材内容作了较大的调整,主要有以下几个方面。

鉴于计算机的应用在电力系统分析计算中已经普及,本书对于电力系统的短路、潮流和稳定这三类常规计算,在讲清楚基本概念和基本原理的基础上,更侧重从应用计算机的角度进行计算方法的阐述。为此,书中关于电力网络的数学模型、短路故障和潮流的计算机算法等部分,在编排顺序和具体内容两个方面都作了必要的调整。

下册新增一章电力传输的基本概念,阐述交流电网功率传送的基本原理,从不同的角度说明交流电网的功率传输特性。原有的交流远距离输电的基本概念一章被撤消,但将其主要内容并入新的一章。

为了控制本书的篇幅,第二版中直流输电的基本概念一章,部分选学内容,以及电力网络设计的基本原则和方法(下册附录 I)在新版中不再保留。

采用本书作教材,需要按“电力系统稳态分析”和“电力系统暂态分析”分别设课时,可以分别取第一、二、四、九、十、十一、十二、十三、十四章作为稳态分析,第三、五、六、七、八、十五、十六、十七、十八、十九章作为暂态分析的教学内容,两门课程可以平行开出。

本版的修订工作由何仰赞(第二、四、五、六、八、九、十、十一、十二、十三、十四章)和温增银(第一、三、七、十五、十六、十七、十八、十九章)共同完成。何仰赞担任主编。

限于作者的水平 and 条件,书中的缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2001 年 8 月

前 言

本书以我院《电力系统》自编讲义为基础修订而成。在修订过程中,考虑了电力系统教材编审小组于1982年9月审订定稿的《电力系统稳态分析》和《电力系统暂态分析》两门课程的教学大纲要求。

全书共二十二章,分为上、下两册。上册内容主要是:电力系统的数学模型和参数计算,突然三相短路的暂态分析和实用计算,不对称短路和故障的分析计算等,在附录中编入了短路电流新计算曲线的数字表。下册内容主要是:电力系统稳态运行的电压和功率计算,电压调整和频率调整,经济运行,静态稳定和暂态稳定的基本概念和分析方法,提高稳定性的措施,交流远距离输电和直流输电的基本概念。

本书在着重阐明电力系统的基本概念、基本理论和计算方法的基础上,对电子计算机在电力系统分析计算中的应用也作了适当的介绍。书中反映前述两门课程教学大纲基本要求的部分所需授课学时(不含实验课和习题课)约为:上册46~48学时,下册54~56学时,带※号的内容供选用。采用本书作教材,可以按上、下册分别设课,依次开出。

参加本书编写的有:何仰赞(第二、四、五、七、八、九、十、十二、二十一、二十二章及附录)、温增银(第十六、十七、十八、十九、二十章)、汪馥瑛(第三、十三、十四、十五章)、周勤慧(第一、六、十一章)。何仰赞、温增银担任主编。何仰赞对全书进行了审订。

原讲义(即本书初稿)于1983年印出后,承蒙华南工学院、成都科技大学、郑州工学院、江西工学院、武汉水利电力学院、合肥工业大学、合肥联合大学、北京农业机械化学学院等院校试用,许多老师对教材初稿提出了宝贵的意见和建议,对此我们表示衷心的感谢。

编 者

1984年4月

修订版说明

按照高等学校电力工程专业教学委员会 1987 年制订的第三轮教材出版规划的安排,进行了本书的修订工作。

这次修订基本保持了原书的内容体系,对教材内容所作的调整与增删,主要是为了方便教学。在各章之后补充了简要的小结和习题,考虑到课程设计是本课程的必要教学环节,增添了有关电力网课程设计的基本知识作为附录收入下册。

书中所用文字符号采用中华人民共和国国家标准 GB7159—87,量和单位采用 GB3100~3102—93。

修订工作由原作者何仰赞、温增银、汪馥瑛、周勤慧共同完成,分工大体上如初版。温增银选编了习题(含答案)和课程设计参考材料。何仰赞、温增银担任主编。何仰赞负责全书审订。

1995 年 10 月

目 录

第九章 电力系统的负荷	(1)
9-1 负荷的组成	(1)
9-2 负荷曲线	(1)
9-3 负荷特性与负荷模型	(4)
小 结	(6)
习 题	(7)
第十章 电力传输的基本概念	(8)
10-1 网络元件的电压降落和功率损耗	(8)
10-2 输电线路的功率特性	(12)
10-3 沿长线的功率传送	(15)
10-4 单端供电系统的功率特性	(24)
小 结	(27)
习 题	(27)
第十一章 电力系统的潮流计算	(29)
11-1 开式网络的电压和功率分布计算	(29)
11-2 简单闭式网络的功率分布计算	(37)
11-3 复杂电力系统潮流计算的数学模型	(52)
11-4 牛顿-拉夫逊法潮流计算	(54)
11-5 P - Q 分解法潮流计算	(67)
小 结	(72)
习 题	(73)
第十二章 电力系统的无功功率平衡和电压调整	(77)
12-1 电力系统的无功功率平衡	(77)
12-2 电压调整的基本概念	(89)
12-3 电压调整的措施	(93)
12-4 调压措施的应用	(103)
小 结	(106)
习 题	(107)
第十三章 电力系统的有功功率平衡和频率调整	(110)
13-1 频率调整的必要性	(110)

13-2	电力系统的频率特性	(111)
13-3	电力系统的频率调整	(116)
13-4	有功功率平衡和系统负荷在各类发电厂间的合理分配	(123)
	小 结	(126)
	习 题	(126)
第十四章	电力系统的经济运行	(128)
14-1	电力网中的能量损耗	(128)
14-2	火电厂间有功功率负荷的经济分配	(136)
14-3	水、火电厂间有功功率负荷的经济分配	(141)
14-4	无功功率负荷的经济分配	(146)
	小 结	(149)
	习 题	(150)
第十五章	电力系统运行稳定性的基本概念	(152)
15-1	概述	(152)
15-2	功角的概念	(153)
15-3	静态稳定的初步概念	(155)
15-4	暂态稳定的初步概念	(156)
15-5	负荷稳定的概念	(158)
15-6	电压稳定性的概念	(160)
15-7	发电机转子运动方程	(162)
	小 结	(165)
	习 题	(166)
第十六章	电力系统的电磁功率特性	(168)
16-1	简单电力系统的功率特性	(168)
16-2	网络接线及参数对功率特性的影响	(170)
16-3	自动励磁调节器对功率特性的影响	(177)
16-4	复杂电力系统的功率特性	(185)
	小 结	(187)
	习 题	(188)
第十七章	电力系统暂态稳定性	(190)
17-1	暂态稳定分析计算的基本假设	(190)
17-2	简单电力系统暂态稳定的分析计算	(193)
17-3	发电机转子运动方程的数值解法	(197)
17-4	复杂电力系统暂态稳定的分析计算	(204)
17-5	暂态稳定实际计算中系统各元件的数学模型	(208)

* 17-6 电力系统异步运行的概念	(220)
小 结	(223)
习 题	(224)
第十八章 电力系统静态稳定性	(226)
18-1 运动稳定性的基本概念和小扰动法原理	(226)
18-2 简单电力系统的静态稳定	(229)
18-3 自动励磁调节器对静态稳定的影响	(235)
18-4 电力系统静态稳定实际分析计算的概念	(248)
小 结	(254)
习 题	(255)
第十九章 提高电力系统稳定性的措施	(258)
19-1 提高稳定性的一般原则	(258)
19-2 改善电力系统基本元件的特性和参数	(259)
19-3 采用附加装置提高电力系统的稳定性	(265)
19-4 改善运行条件及其他措施	(271)
小 结	(275)
习 题	(275)
习题答案	(277)
参考书目	(284)

第九章 电力系统的负荷

本章简要介绍负荷的组成,负荷曲线和负荷特性及其数学描述等问题。

9-1 负荷的组成

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,亦称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负荷总加起来而得到的。

系统中主要的用电设备大致有异步电动机、同步电动机、电热装置、整流装置和照明设备等。根据用户的性质,用电负荷也可以分为工业负荷、农业负荷、交通运输业负荷和人民生活用电负荷等。在不同性质的用户中,上述各类用电设备消耗功率所占的比重是不同的。在工业负荷中,对于不同的行业,这些用电设备的比重也不相同。某电力系统曾对若干工业部门各类设备用电功率的比重做过统计,其结果见表 9-1。

表 9-1 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 加工工业	钢铁工业
异步电动机	79.1	99.8	56.0	13.0	82.5	20.0
同步电动机	3.2		44.0		1.3	10.0
电热装置	17.7	0.2			15.0	70.0
整流装置				87.0	1.2	
合计	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

综合用电负荷加上电力网的功率损耗就是各发电厂应该供给的功率,称为电力系统的供电负荷。供电负荷再加上发电厂厂用电消耗的功率就是各发电厂应该发出的功率,称为电力系统的发电负荷。

9-2 负荷曲线

实际的系统负荷是随时间变化的,其变化规律可用负荷曲线来描述。常用的负荷曲线有日负荷曲线和年负荷曲线。图 9-1 所示的电力系统日负荷曲线描述了一天 24 小时负荷的变化情况。负荷曲线中的最大值称为日最大负荷 P_{\max} (又称峰荷),最小值称为日最小负荷 P_{\min} (又称谷荷)。为了方便计算,实际上常把连续变化的曲线绘制成

阶梯形,如图 9-1(b)所示。

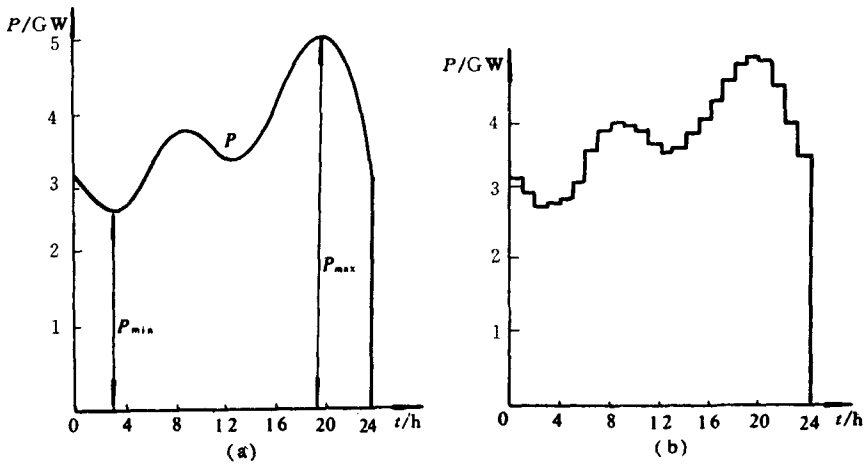


图 9-1 日负荷曲线

根据日负荷曲线可以计算一日的总耗电量,即

$$W_d = \int_0^{24} P dt$$

故日平均负荷为

$$P_{av} = \frac{W_d}{24} = \frac{1}{24} \int_0^{24} P dt \quad (9-1)$$

为了说明负荷曲线的起伏特性,常引用这样两个系数:负荷率 k_m 和最小负荷系数 α 。

$$k_m = \frac{P_{av}}{P_{max}} \quad (9-2)$$

$$\alpha = \frac{P_{min}}{P_{max}} \quad (9-3)$$

这两个系数不仅用于日负荷曲线,也可用于其他时间段的负荷曲线。

对于不同性质的用户,负荷曲线是不同的。一般说来,负荷曲线的变化规律取决于负荷的性质,厂矿企业生产发展情况及作息制度,用电地区的地理位置,当地气候条件和人民生活习惯等。三班制连续生产的重工业,例如钢铁工业的日负荷曲线如图 9-2(a)所示,曲线比较平坦,最小负荷系数达到 0.85。一班制生产的轻工业,如食品工业的日负荷曲线示于图 9-2(b),负荷变化幅度大,最小负荷系数只有 0.13。非排灌季节的农业日负荷曲线示于图 9-2(c),农村加工用电每天仅 12 小时。市政生活负荷曲线中存在明显的照明用电高峰,见图 9-2(d)。在电力系统中各用户的日最大负荷不会都在同一时刻出现,最小负荷也不会都在同一时刻出现。因此,系统的最大负荷总是小于各用户最大负荷之和,而系统的最小负荷总是大于各用户最小负荷之和。

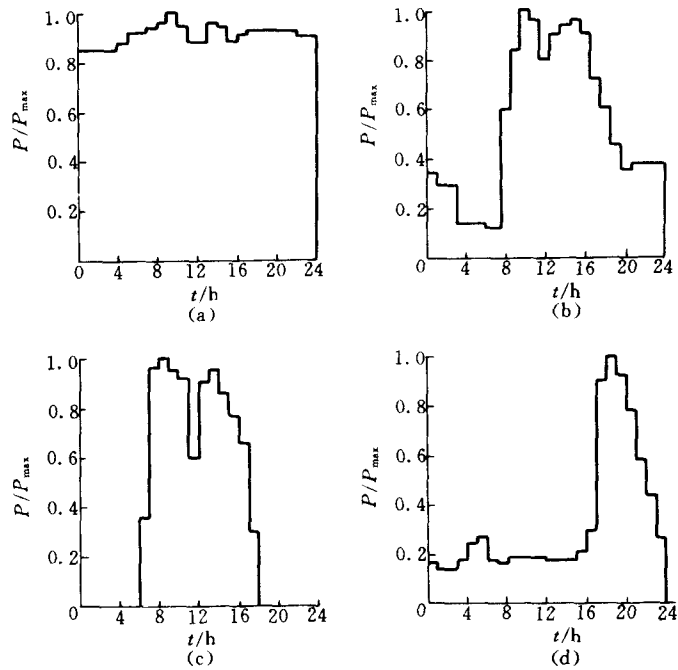


图 9-2 不同行业的有功功率日负荷曲线

(a)钢铁工业负荷；(b)食品工业负荷；(c)农村加工负荷；(d)市政生活负荷

日负荷曲线对电力系统的运行非常重要,它是安排日发电计划和确定系统运行方式的重要依据。

年最大负荷曲线描述一年内每月(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,同时也为制订发电机组或发电厂的扩建或新建计划提供依据。图 9-3 为年最大负荷曲线,其中划斜线的面积 A 代表各检修机组的容量和检修时间的乘积之和, B 是系统新装的机组容量。

在电力系统的运行分析中,还经常用到年持续负荷曲线,它按一年中系统负荷的数值大小及其持续小时数顺序排列而绘制成。例如,在全年 8760 小时中,有 t_1 小时负荷值为 P_1 (即最大值 P_{\max}), t_2 小时负荷值为 P_2 , t_3 小时负荷值为 P_3 ,于是可绘出如图 9-4 所示的年持续负荷曲线。在安排发电计划和进行可靠性估算时,常用到这种曲线。

根据年持续负荷曲线可以确定系统负荷的全年耗电量为

$$W = \int_0^{8760} P dt$$

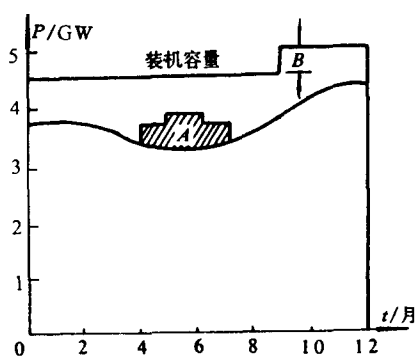


图 9-3 年最大负荷曲线

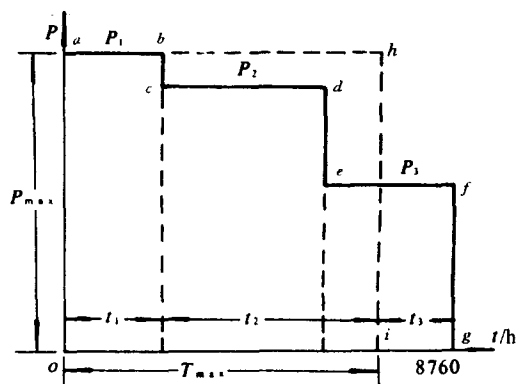


图 9-4 年持续负荷曲线

如果负荷始终等于最大值 P_{max} ，经过 T_{max} 小时后所消耗的电能恰好等于全年的实际耗电量，则称 T_{max} 为最大负荷利用小时数，即

$$T_{max} = \frac{W}{P_{max}} = \frac{1}{P_{max}} \int_0^{8760} P dt \quad (9-4)$$

对于图 9-4 所示的年持续负荷曲线，若使矩形面积 $oahio$ 同面积 $oabcdefgo$ 相等，则线段 oi 即等于 T_{max} 。

根据电力系统的运行经验，各类负荷的 T_{max} 的数值大体有一个范围(见表 9-2)。

表 9-2 各类用户的年最大负荷利用小时数

负荷类型	T_{max}/h
户内照明及生活用电	2000~3000
一班制企业用电	1500~2200
二班制企业用电	3000~4500
三班制企业用电	6000~7000
农灌用电	1000~1500

在设计电网时，用户的负荷曲线往往是未知的。但如果知道用户的性质，就可以选择适当的 T_{max} 值，从而近似地估算出用户的全年耗电量，即 $W = P_{max} T_{max}$ 。

9-3 负荷特性与负荷模型

在电力系统分析计算中，常将电力网覆盖的广大地区内难以胜数的电力用户合并为数量不多的负荷，分接在不同地区不同电压等级的母线上。每一个负荷都代表一定数量的各类用电设备及相关的变配电设备的组合，这样的组合亦称为综合负荷。各个综合负荷功率大小不等，成分各异。一个综合负荷可能代表一个企业，也可能代表

一个地区。

综合负荷的功率一般是要随系统的运行参数(主要是电压和频率)的变化而变化的,反映这种变化规律的曲线或数学表达式称为负荷特性。负荷特性包括动态特性和静态特性。动态特性反映电压和频率急剧变化时负荷功率随时间的变化。静态特性则代表稳态下负荷功率与电压和频率的关系。当频率维持额定值不变时,负荷功率与电压的关系称为负荷的电压静态特性。当负荷端电压维持额定值不变时,负荷功率与频率的关系称为负荷的频率静态特性。各类用户的负荷特性依其用电设备的组成情况而不同,一般是通过实测确定。图 9-5 表示由 6kV 电压供电的中小工业负荷的静态特性。

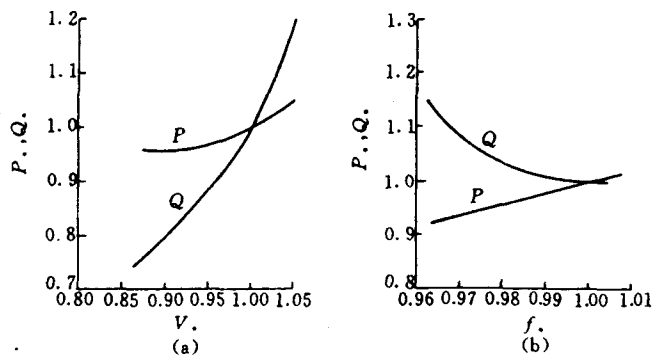


图 9-5 6kV 综合中小工业负荷的电压静态特性(a)和频率静态特性(b)

负荷组成:异步电动机 79.1%;同步电动机 3.2%;电热电炉 17.7%

负荷模型是指在电力系统分析计算中对负荷特性所作的物理模拟或数学描述。显然,负荷模型也可分为动态模型和静态模型。将负荷的静态特性用数学公式表述出来,就是负荷的静态数学模型。负荷的电压静态特性常用二次多项式表示

$$P = P_N [a_p (V/V_N)^2 + b_p (V/V_N) + c_p] \quad (9-5)$$

$$Q = Q_N [a_q (V/V_N)^2 + b_q (V/V_N) + c_q] \quad (9-6)$$

式中, V_N 为额定电压, P_N 和 Q_N 为额定电压时的有功和无功功率,各个系数可根据实际的电压静态特性用最小二乘法拟合求得,这些系数应满足

$$\left. \begin{aligned} a_p + b_p + c_p &= 1 \\ a_q + b_q + c_q &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (9-7)$$

公式(9-5)和(9-6)表明,负荷的有功和无功功率都由三个部分组成,第一部分与电压平方成正比,代表恒定阻抗消耗的功率;第二部分与电压成正比,代表与恒电流负荷相对应的功率;第三部分为恒功率分量。

负荷的频率静态特性也可以用类似的多项式表示。当电压和频率都在额定值附近小幅度变化时,还可以对静态特性作线性化处理,将负荷功率表示为

$$P = P_N(1 + k_{pv}\Delta V) \quad (9-8)$$

$$Q = Q_N(1 + k_{qv}\Delta V) \quad (9-9)$$

和 $P = P_N(1 + k_{pf}\Delta f) \quad (9-10)$

$$Q = Q_N(1 + k_{qf}\Delta f) \quad (9-11)$$

式中 $\Delta V = (V - V_N)/V_N, \Delta f = (f - f_N)/f_N$

需要同时考虑电压和频率的变化时,也可以采用

$$P = P_N(1 + k_{pv}\Delta V)(1 + k_{pf}\Delta f) \quad (9-12)$$

$$Q = Q_N(1 + k_{qv}\Delta V)(1 + k_{qf}\Delta f) \quad (9-13)$$

负荷的静态特性还有别种表示形式,如幂函数形式,此处不再列举。

反映负荷动态特性的数学模型一般都由微分方程和代数方程组成,并且根据所研究问题的不同要求采用不同的数学表达式。

建立综合负荷的动态模型,无论是物理模型还是数学模型,都包含制订模型结构和确定模型参数这两个问题。综合负荷所代表的用电设备数量很大,分布很广,种类繁多,其工作状态又带有随机性和时变性(甚至是跃变性),联接各类用电设备的配电网的结构也可能发生变化,由于上述种种情况,怎样才能建立一个既准确又实用的负荷模型,至今仍未很好解决。

电力系统分析计算中,发电机、变压器和电力线路常用等值电路代表,并由此组成电力系统的等值网络,负荷是电力系统的重要组成部分,用等值电路代表综合负荷是很自然的,也是合理的。最常采用的综合负荷等值电路有:含源等值阻抗(或导纳)支路,恒定阻抗(或导纳)支路,异步电动机等值电路(即阻抗值随转差而变的阻抗支路)以及这些电路的不同组合。

本课程中,对负荷模型一般都作简化处理。在潮流计算中,负荷常用恒定功率表示,必要时,也可以采用线性化的静态特性。在短路计算中,负荷或表示为含源阻抗支路,或表示为恒定阻抗支路(见上册第六章)。稳定计算中,综合负荷可表示为恒定阻抗,或不同比例的恒定阻抗和异步电动机的组合,对于后一种处理方法,还应补充一个反映异步电动机机械运动状态的转子运动方程(见第十七章)。

小 结

系统中所有电力用户的用电设备消耗的电功率的总和,就是电力系统的负荷。

日负荷曲线是电力系统安排日发电计划和确定运行方式的重要依据。由于企业生产情况及作息制度不一样,不同行业用户的日负荷曲线形状可能有很大的差异。

年最大负荷曲线主要用来安排发电设备的检修计划,也为制订发电机组或发电厂的扩建或新建计划提供依据。

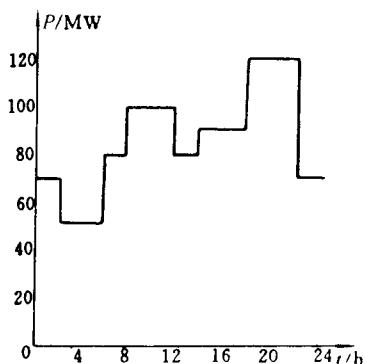
要掌握负荷率,最小负荷系数和年最大负荷利用小时数等几个概念。

负荷特性反映负荷功率随电压和频率变化而变化的规律。在电力系统分析计算中用来模拟负荷特性的数学公式或等值电路称为负荷的模型。本课程中,潮流计算时负荷常用恒定功率表示,在短路和稳定计算中,负荷常用等值电路表示。

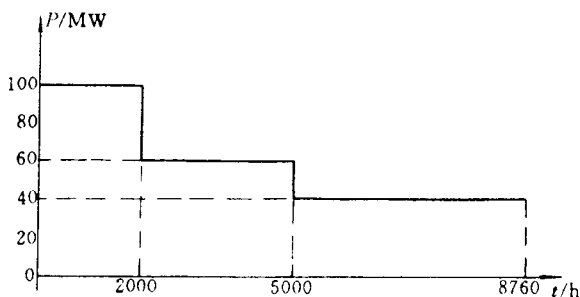
习 题

9-1 某系统典型日负荷曲线如题图 9-1 所示,试计算:日平均负荷;负荷率 k_m , 最小负荷系数 α 以及峰谷差 ΔP_m 。

9-2 若题图 9-1 作为系统全年平均日负荷曲线,试作出系统年持续负荷曲线,并求出年平均负荷及最大负荷利用小时数 T_{max} 。



题图 9-1



题图 9-3

9-3 某工厂用电的年持续负荷曲线如题图 9-3 所示。试求:工厂全年平均负荷, 全年耗电量及最大负荷利用小时数 T_{max} 。

9-4 在给定运行情况下,某工厂 10kV 母线运行电压为 10.3kV,负荷为 $(10 + j5) \text{MV} \cdot \text{A}$ 。以此运行状态为基准值的负荷电压静态特性如图 9-5(a) 所示,若运行电压下降到 10kV,求此时负荷所吸收的功率。