

电力系统分析

韩祯祥 主 编
吴国炎 副主编

浙江大学出版社

(浙)新登字 10 号

电力系统分析

韩祯祥 主编 吴国炎 副主编

责任编辑 应伯根 孙海荣



浙江大学出版社出版

浙江大学出版社计算机中心电脑排版

浙江省煤田地质局制图印刷厂印刷

浙江省新华书店经销



850×1168 32开 18.75印张 插页4 490千字

1993年8月第1版 1993年8月第1次印刷

印数 0001—3000

ISBN 7-308-01038-4/TM·015 定价：平装 8.75 元
精装 14.00 元

前 言

本书是高等学校电力系统及其自动化专业的专业课教材,主要阐述电力系统基本知识、电力系统元件的特性和模型、电力系统稳态和暂态运行方式的计算分析方法。根据我们的教学实践,将电力系统有功功率和频率控制、无功功率和电压控制等有关运行控制内容安排在《电力系统自动控制》课程中讲述,而电力系统工程规划和运行中的有关问题拟在《电力系统工程》选修课中介绍。希望学生通过上述三门课程的学习,对电力系统有一个完整的了解,学到从理论到设计运行的全面知识。

本书还可供在电力系统工作的技术和科研人员参考。

本书第1章由邱家驹编写,第2章由赵礼生编写,第3章由黄民翔、赵礼生编写,第4章由吴国炎编写,第5章由徐瑞德编写;韩桢祥、吴国炎负责主编工作。

由于编者水平和教学经验有限,书中错误和不当之处在所难免,欢迎读者批评指正。

编 者

1992年6月

目 录

1 电力系统概述

- 1.1 电力系统及其发展..... 3
 - 1.1.1 电力系统 3
 - 1.1.2 电力系统的负荷和负荷曲线 3
 - 1.1.3 电力系统中的发电厂 9
 - 1.1.4 电力网的结构与结线..... 10
 - 1.1.5 电压等级和额定电压..... 12
 - 1.1.6 电力系统运行的特点和要求..... 15
 - 1.1.7 电力系统发展简史和我国的电力系统..... 17
- 1.2 电力系统基本元件概述 23
 - 1.2.1 发电机..... 23
 - 1.2.2 电力变压器..... 25
 - 1.2.3 电力线路..... 27
 - 1.2.4 无功功率补偿设备..... 47
 - 1.2.5 高压直流送电..... 48

2 电力系统元件数学模型

- 2.1 三相电力线路 55
 - 2.1.1 电力线路电阻..... 56
 - 2.1.2 电力线路电感..... 57
 - 2.1.3 电力线路并联电导..... 64

2.1.4	电力线路并联电容	65
2.1.5	电力线路的稳态方程和等值电路	72
2.2	变压器	81
2.2.1	双绕组变压器等值电路	85
2.2.2	三绕组变压器等值电路	89
2.2.3	自耦变压器及其等值电路	96
2.3	同步发电机和调相机	104
2.3.1	同步发电机	105
2.3.2	同步调相机	112
2.4	无功功率补偿设备	115
2.4.1	并联电容器	115
2.4.2	并联电抗器	117
2.4.3	静止补偿器	118
2.5	电力系统负荷	124
2.6	多级电压电力系统	127
2.6.1	多级电压电力网的等值电路	127
2.6.2	三相系统的标么制	132
2.6.3	多电压级电力网等值电路参变数的标么值	135
2.6.4	具有非标准变比变压器的多电压级电力网等值电路	139

3 电力系统稳态运行分析

3.1	简单电力系统正常运行分析	151
3.1.1	电力线路的电压损耗与功率损耗	151
3.1.2	变压器中的功率损耗与电压损耗	155
3.1.3	辐射形网络的分析计算	156
3.1.4	电力网的电能损耗	160
3.2	复杂电力系统潮流计算	164
3.2.1	节点电压方程与节点导纳矩阵和阻抗矩阵	165
3.2.2	功率方程和节点分类	171
3.3	高斯-塞德尔法潮流计算	174

3.4 牛顿-拉夫逊法潮流计算	178
3.4.1 牛顿-拉夫逊法简介	178
3.4.2 牛顿-拉夫逊法计算潮流	179
3.4.3 牛顿-拉夫逊法计算潮流的有关问题	187
3.5 P-Q 分解法	196
3.6 直流法潮流计算与开断处理	210
3.6.1 直流法潮流计算	210
3.6.2 直流法潮流计算的开断处理	212
3.7 电力系统有功功率分配与频率控制	216
3.7.1 电力系统有功功率平衡与频率变化	216
3.7.2 有功功率电源	217
3.7.3 有功功率负荷的变动	221
3.7.4 电力系统频率控制	224
3.8 电力系统无功功率和电压	227
3.8.1 概述	227
3.8.2 无功功率和电压的关系	229
3.8.3 无功功率平衡	230
3.9 电力系统电压控制	233
3.9.1 中枢纽点电压管理	233
3.9.2 应用发电机调节电压	237
3.9.3 改变变压器变比调压	237
3.9.4 应用无功功率补偿装置调节电压	245
3.9.5 线路串联电容补偿改善电压质量	249
3.9.6 复杂电力系统电压和无功功率的控制	255

4 电力系统故障分析

4.1 基本概念	261
4.2 同步电机的数学模型	264
4.2.1 电压方程和磁链方程	266
4.2.2 坐标变换	271

4.2.3	用 d 、 q 、 0 坐标表示的同步电机方程式	276
4.2.4	标么制表示的派克方程式	281
1.2.5	同步发电机的稳态运行	286
4.3	同步电机三相短路电磁暂态过程	289
4.3.1	无阻尼绕组同步电机突然三相短路	290
4.3.2	有阻尼绕组同步电机三相短路	311
4.3.3	强行励磁对同步电机三相短路的影响	332
4.3.4	短路电流最大瞬时值和有效值	339
4.3.5	异步电动机的三相短路电流	341
4.4	电力系统三相短路实用计算	344
4.4.1	三相短路起始次暂态电流的计算	345
4.4.2	起始次暂态电流的计算机算法	357
4.4.3	应用运算曲线计算三相短路电流周期分量	363
4.5	电力系统不对称运行分析方法—对称分量法	371
4.5.1	对称分量法及其应用	372
4.5.2	同步电机负序和零序阻抗	377
4.5.3	异步电动机和综合负荷的负序及零序阻抗	378
4.5.4	三相变压器零序参数和等值电路	379
4.5.5	电力线路零序参数和等值电路	390
4.5.6	电力系统的零序等值网络	403
4.6	电力系统不对称短路分析	405
4.6.1	各种不对称短路的故障点电流和电压	406
4.6.2	不对称短路时网络中电流和电压的分布	416
4.6.3	简单不对称短路的计算机算法	422
4.6.4	应用运算曲线计算任意时刻的不对称短路电流	424
4.7	电力系统非全相运行	429
4.8	电力系统复杂故障分析概述	439

5 电力系统稳定性

5.1	电力系统稳定性概述	445
-----	-----------------	-----

5.1.1	简单的机械比拟	448
5.1.2	电力系统静态稳定的初步概念	449
5.1.3	电力系统暂态稳定的初步概念	452
5.2	同步发电机组的机电模型	456
5.2.1	同步发电机组的转子运动方程式	456
5.2.2	同步发电机的电磁转矩和电磁功率	460
5.2.3	原动机的机械转矩和机械功率	481
5.2.4	自动调节系统的数学模型	483
5.3	电力系统静态稳定	497
5.3.1	静态稳定分析的基本方法	498
5.3.2	简单电力系统的静态稳定	502
5.3.3	自动励磁调节对静态稳定的作用	511
5.3.4	多机电力系统静态稳定的简化分析	527
5.4	电力系统暂态稳定	529
5.4.1	基本假定	529
5.4.2	基本分析方法	530
5.4.3	简单电力系统的暂态稳定	534
5.4.4	考虑发电机 E'_q 变化时的暂态稳定计算	544
5.4.5	多机电力系统暂态稳定的简化分析	551
5.5	提高电力系统稳定的措施	554
5.5.1	发电机及其励磁调节系统	555
5.5.2	原动机的调节特性	556
5.5.3	开关设备和继电保护	557
5.5.4	输电线	560
5.5.5	改善系统的结构和采用中间补偿设备	564
5.5.6	变压器中性点经小阻抗接地	565
5.5.7	电气制动	565
5.5.8	切除部分发电机及部分负荷	568
5.5.9	系统暂态稳定破坏后的措施	569
5.6	电力系统的电压稳定性	571

附录 短路电流运算曲线	579
参考书目	588

《浙江大学科学技术系列》丛书

1

电力系统概述

1.1 电力系统及其发展

1.1.1 电力系统

发电机把机械能转化为电能,电能经变压器、变换器和电力线路输送并分配到用户,在那里经电动机、电炉和电灯等设备又将电能转化为机械能、热能和光能等。这些生产、变换、输送、分配、消费电能的发电机、变压器、变换器、电力线路及各种用电设备等联系在一起组成的统一整体就是电力系统,如图 1-1 所示。

与“电力系统”一词相关的还有“电力网”和“动力系统”。前者指电力系统中除发电机和用电设备外的部分;后者指电力系统和“动力部分”的总和。所谓“动力部分”,包括火力发电厂的锅炉、汽轮机、热力网和用热设备,水力发电厂的水库和水轮机,核电厂的反应堆等。所以电力网是电力系统的一个组成部分,而电力系统又是动力系统的一个组成部分,三者的关系也示于图 1-1 中。

1.1.2 电力系统的负荷和负荷曲线

1. 电力系统的负荷

电力系统的负荷就是系统中千万个用电设备消费功率的总和,也称电力系统综合用电负荷。它包括异步电动机、同步电动机、电热炉、整流设备、照明设备等若干类。不同的行业中,这些用电设备的比重也不同,表 1-1 所示是几种工业部门中各种用电设备比重的典型统计数字,有一定的代表性。

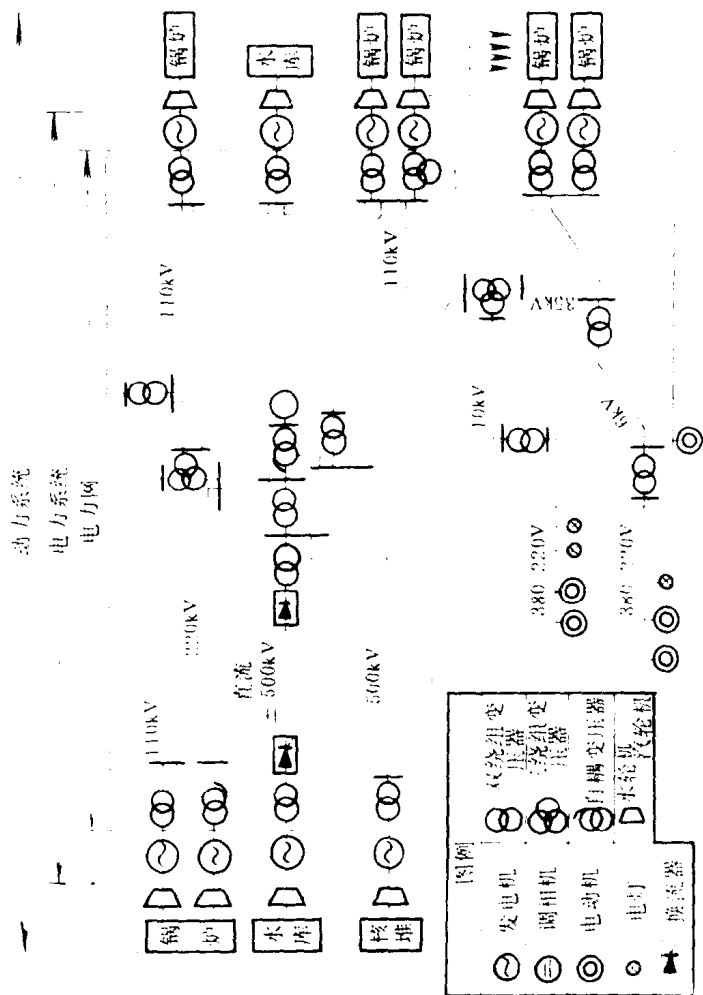


图 1-1 动力系统、电力系统和电力网示意图

表 1-1 几种工业部门用电设备比重的统计 (%)

类 型	综合性 中小工业	棉纺工业	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
电热电炉	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

注：1. 比重按功率计。

2. 照明设备的比重很小未统计在内。

综合用电负荷加上电力网中损耗的功率就是系统中各发电厂应供应的功率，因而称电力系统的供电负荷。供电负荷再加上发电厂本身的消耗功率——厂用电，就是系统中所有发电机应发的总功率，称电力系统的发电负荷。

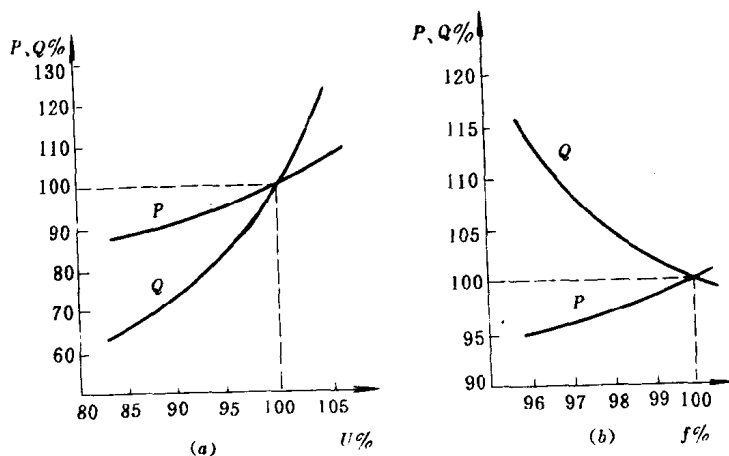


图 1-2 某电力系统综合用电负荷的特性曲线

(a) 电压特性曲线；(b) 频率特性曲线

各用电设备的有功功率和无功功率随受电电压和系统频率的变化而变化,其变化规律不尽相同,综合用电负荷随电压和频率的变化规律是各用电负荷变化规律的合成。图 1-2(a) 和(b) 分别是某电力系统综合用电负荷的电压特性曲线和频率特性曲线(标么值)。

2. 负荷曲线

负荷曲线指某一时间段内负荷随时间而变化的规律。按负荷种类可分有功功率负荷和无功功率负荷曲线;按时间长短可分日负荷和年负荷曲线;按计量地点可分个别用户、电力线路、变电所、发电厂以至整个系统的负荷曲线。将上述三种分类相结合,就确定了某一种特定的负荷曲线,例如图 1-3 所示的电力系统有功功率日负荷曲线。

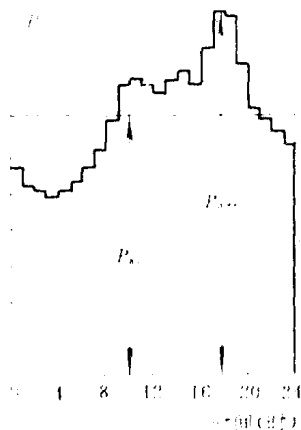


图 1-3 有功功率日负荷曲线

有功功率日负荷曲线所包的面积即为电力系统日用电量 A

$$A = \int_0^{24} P dt \tag{1-1}$$

其平均负荷

$$P_{av} = A/24 = \frac{1}{24} \int_0^{24} P dt \tag{1-2}$$

负荷率定义为平均负荷 P_{av} 与最大负荷 P_{max} 之比,表示负荷曲线平坦的程度,即

$$\text{负荷率} = P_{av}/P_{max} \times 100\% \tag{1-3}$$

不同行业的有功功率日负荷曲线差别很大,三班制连续生产的重工业负荷,如图 1-4(a) 所示的钢铁工业负荷,负荷曲线较平坦,最小负荷达最大负荷的 85%;一班制生产的轻工业负荷,如图

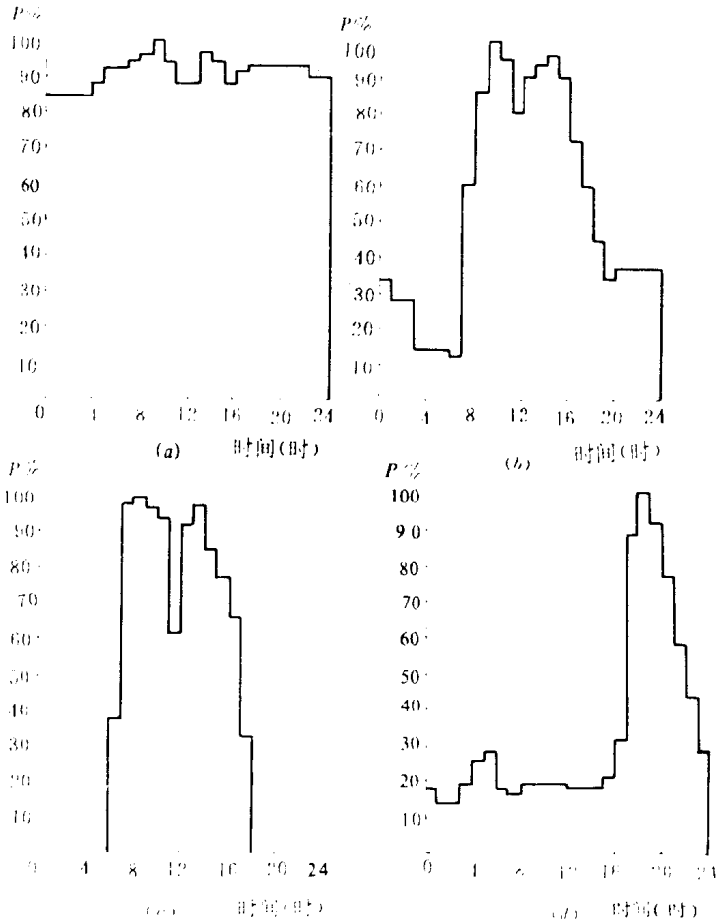


图 1-4 几种行业的有功功率日负荷曲线(冬季)

(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

1-4(b) 所示的食品工业负荷, 负荷变化的幅度较大, 最小负荷仅达最大负荷的 13 ~ 14%; 农业负荷中, 如图 1-4(c) 所示的农村加工