



高等院校电气工程及其自动化专业系列教材

Electrical Engineering

电力系统分析

刘学军 辛涛 主 编

周振雄 姚欣 副主编



附赠电子教案

[http:// www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



013025221

TM711-43

29

21 世纪高等院校电气工程及其自动化专业系列教材

电力系统分析

主 编 刘学军 辛 涛
副主编 周振雄 姚 欣
参 编 吕 欣 麻丹丹 辛 平



机械工业出版社



北航

C1632048

TM711-43

29

123280310

本书包括电力系统稳态分析和暂态分析两部分内容。全书共有 10 章, 主要内容包括电力系统的基本概念、电力系统元件的参数和等效电路、简单电力系统的潮流分析、电力系统潮流的计算机算法、电力系统有功功率平衡和频率调整、电力系统无功功率平衡和电压调整、同步发电机的数学模型、电力系统对称故障分析、电力系统不对称故障分析、电力系统的稳定性。

为了便于读者自学和应用, 在书后附录中给出了短路电流计算数据和短路电流运算曲线。

本书可以作为电力系统及其自动化专业和电气工程及其自动化专业的本科教材, 也可以供从事电力系统规划、设计运行和研究的工程技术人员参考。

本书配套授课电子课件, 需要的教师可登录 www.cmpedu.com 免费注册、审核通过后下载, 或联系编辑索取 (QQ: 1157122010, 电话: 010 - 88379753)。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统分析/刘学军, 辛涛主编. —北京: 机械工业出版社, 2013. 1

21 世纪高等院校电气工程及其自动化专业系列教材
ISBN 978-7-111-40853-6

I. ①电… II. ①刘…②辛… 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 (2012) 第 301085 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 郝建伟 张利萍

版式设计: 霍永明 责任校对: 陈延翔

责任印制: 张楠

北京中兴印刷有限公司印刷

2013 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 20.75 印张 · 528 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-40853-6

定价: 45.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

电力系统分析课程是电气工程及其自动化专业的主干课程,同时又是学习其他专业的重要专业基础课。因此学习好该课程对电气工程专业的学生至关重要。目前读者亟需理论性强、内容先进且又接近工程实际应用的教材。为满足目前教学需要,编者在总结多年的教学经验和科研成果的基础上编写了本书。

本书阐述了电力系统的基本理论知识,内容包括电力系统稳态分析和暂态分析。本书的特点是突出了电力系统的基本概念和基本运算的讲解,注意讲清楚研究问题的思路 and 解决问题的方法,启发学生创新思维和主动学习。用电磁学、磁路和电路的物理概念深入浅出地讲清楚电力系统的专业知识,减少繁琐的公式推导。为培养学生应用其基础理论解决电气工程实际问题的能力,增强创新思维能力,在每章后有丰富的思考题和习题,供读者自学和解答。

本书共分10章。主要内容包括电力系统的基本概念、电力系统元件的参数和等效电路、简单电力系统的潮流分析、电力系统潮流的计算机算法、电力系统有功功率平衡和频率调整、电力系统无功功率平衡和电压调整、同步发电机的数学模型、电力系统对称故障分析、电力系统不对称故障分析、电力系统的稳定性。

本书由刘学军担任主编,周振雄、姚欣、辛涛担任副主编,参加编写工作的还有吕欣、麻丹丹、辛平。全书由刘学军教授统稿。编写分工如下:

麻丹丹编写了第2章,辛平编写了第9章,姚欣编写了第4、5章及附录,周振雄编写了第6、7章,刘学军编写了第1、8章,辛涛编写了第10章,吕欣编写了第3章。

在本书的编写过程中,参考、引用了国内外许多专家、学者的著作文献,马凤军女士参与了本书的插图绘制和文字录入工作,刘畅和杜洋参加了部分章节的编写工作,在此一并表示衷心感谢。

本书可以作为电力系统及其自动化专业和电气工程及其自动化专业的本科教材,也可以供从事电力系统规划、设计运行和研究的工程技术人员参考。

由于编者水平和实践经验有限,书中难免存在疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 电力系统的基本概念 1

1.1 电力系统概述 1

1.1.1 电力系统的组成及接线 1

1.1.2 电力系统的负荷和负荷曲线 2

1.1.3 电力系统运行的特点和要求 5

1.1.4 电力系统的电压等级和额定电压 7

1.2 电力系统发展概况 9

小结 11

思考题与习题 11

第2章 电力系统元件的参数和等效

电路 13

2.1 电力线路的参数和等效电路 13

2.1.1 电力线路的结构 13

2.1.2 电力线路的参数 15

2.1.3 电力线路的等效电路 24

2.2 变压器的参数和等效电路 29

2.2.1 双绕组变压器的参数和等效电路 30

2.2.2 三绕组变压器的参数和等效电路 32

2.2.3 自耦变压器的参数和等效电路 35

2.3 发电机和负荷的参数及等效电路 35

2.3.1 发电机的电抗和电动势 35

2.3.2 负荷的功率、阻抗和导纳 36

2.4 电力系统的等效电路 38

2.4.1 多电压等级电力网有名制等效电路 38

2.4.2 三相标幺制 42

2.4.3 多电压等级电力网的标幺值等效电路 45

小结 52

思考题与习题 52

第3章 简单电力系统潮流分析 54

3.1 电力网络的电压降落和功率损耗 54

3.1.1 电力网络的电压降落、电压损耗和电压偏移 54

3.1.2 功率分布和功率损耗 55

3.2 输电线路的运行特性 61

3.2.1 线路空载运行特性 61

3.2.2 输电线路的传输功率极限 62

3.2.3 输送功率与电压之间的关系 62

3.3 开式电网的潮流分析 63

3.3.1 同一电压级开式电网 63

3.3.2 多电压等级开式电网 68

3.4 简单闭式电网的潮流分布计算 70

3.4.1 两端供电网络的潮流计算 70

3.4.2 简单环形网络的潮流分布 73

3.4.3 网络变换法 83

3.4.4 电力网络潮流的调整和控制 85

小结 87

思考题与习题 88

第4章 电力系统潮流的计算机

算法 90

4.1 电力网络的数学模型 90

4.1.1 节点电压方程与节点导纳矩阵及阻抗矩阵 90

4.1.2 功率方程和节点分类 96

4.2 高斯-赛德尔法潮流计算 98

4.2.1 高斯-赛德尔迭代格式 98

4.2.2 对网络PV节点的考虑 98

4.2.3 功率及功率损耗的计算 99

4.3 牛顿-拉夫逊法潮流计算 102

4.3.1 牛顿-拉夫逊法简介 102

4.3.2 牛顿-拉夫逊法潮流计算过程 103

4.3.3 牛顿-拉夫逊法潮流计算的相关问题 108

4.4 P-Q分解法 109

4.4.1 P-Q分解法的修正方程式 110

4.4.2 P-Q分解法的特点 111

小结 111

思考题与习题 112

第5章 电力系统有功功率平衡和频率

调整 115

5.1 电力系统有功功率平衡和频率

变化	115
5.1.1 频率变化对用户和发电厂及系统本身的影响	115
5.1.2 电力系统有功功率平衡和备用容量	115
5.1.3 各类发电厂的合理组合	117
5.2 电力系统频率调整	119
5.2.1 电力系统负荷的频率特性	119
5.2.2 发电机组的频率特性	120
5.2.3 电力系统的频率调整	123
5.2.4 电力系统有功功率最优分布	131
小结	134
思考题与习题	134
第6章 电力系统无功功率平衡和电压调整	136
6.1 电力系统中无功功率平衡和电压变化	136
6.1.1 电压调整的必要性	136
6.1.2 无功功率负荷和无功功率损耗	137
6.1.3 无功电源	138
6.1.4 无功功率平衡	140
6.2 电力系统的电压管理和调整	142
6.2.1 中枢点电压管理	142
6.2.2 电压调整的基本原理	144
6.2.3 电压调整的基本方法和分析计算	144
6.2.4 复杂电力系统电压和无功功率的控制	159
小结	160
思考题与习题	160
第7章 同步发电机的数学模型	162
7.1 同步发电机的电压方程和磁链方程	162
7.1.1 同步发电机理想化的假设前提条件	162
7.1.2 电压方程和磁链方程	163
7.2 派克变换	168
7.2.1 派克变换表示的同步发电机方程	170
7.2.2 标幺制表示的派克变换	172
7.3 同步发电机的稳态运行	175
7.3.1 同步发电机空载运行	176

7.3.2 同步发电机有载运行	176
小结	178
思考题与习题	178
第8章 电力系统对称故障分析	180
8.1 短路的基本概念	180
8.1.1 短路故障的种类、产生原因及后果	180
8.1.2 短路故障计算的目和的内容	182
8.1.3 限制短路故障的措施	182
8.2 无限大容量电源供电的三相短路的分析与计算	182
8.2.1 无限大容量电源	182
8.2.2 三相短路暂态过程的分析	183
8.2.3 短路的冲击电流、短路电流的最大有效值和短路功率	185
8.3 同步发电机的三相短路	189
8.3.1 同步发电机突然三相短路物理分析	189
8.3.2 无阻尼绕组同步发电机三相短路暂态过程	191
8.3.3 有阻尼绕组同步发电机三相短路电流的分析	197
8.3.4 强行励磁对短路暂态过程的影响	205
8.4 电力系统三相短路实用计算	207
8.4.1 起始次暂态短路电流(I'')的计算	208
8.4.2 应用运算曲线计算三相短路电流的周期分量有效值	213
8.4.3 三相短路的计算机算法	221
小结	223
思考题与习题	223
第9章 电力系统不对称故障分析	227
9.1 对称分量法及其应用	227
9.1.1 对称分量法	227
9.1.2 序阻抗的概念	229
9.1.3 对称分量法的应用	230
9.2 电力系统各元件的序阻抗和等效电路	231
9.2.1 同步发电机的序电抗和等效电路	231
9.2.2 异步电动机和综合负荷的负序阻抗及等效电路	233

9.2.3	变压器的零序阻抗及其等效电路	233
9.2.4	电力线路的零序阻抗及其等效电路	237
9.2.5	电力系统的序网图	240
9.3	电力系统简单不对称故障分析	243
9.3.1	不对称短路故障点的电流和电压计算	243
9.3.2	不对称短路非故障点的电流和电压计算	249
9.3.3	非全相运行的分析和计算	252
9.3.4	应用运算曲线计算任意时刻的不 对称短路电流	256
	小结	261
	思考题与习题	261
第10章	电力系统的稳定性	264
10.1	稳定性的基本概念	264
10.2	同步发电机组的机电特性	265
10.2.1	同步发电机组的转子运动 方程	265
10.2.2	同步发电机的功角特性	267
10.2.3	自动励磁调节器对功角特性的 影响	271
10.3	电力系统的静态稳定	276
10.3.1	电力系统静态稳定性的 分析	276

10.3.2	用小干扰法分析电力系统静态 稳定性	278
10.3.3	调节励磁对电力系统静态稳定的 影响	281
10.4	电力系统的暂态稳定	285
10.4.1	暂态稳定分析计算的基本 假定	285
10.4.2	简单电力系统的暂态稳定性 分析	286
10.4.3	发电机转子运动方程的 解法	291
10.5	提高电力系统稳定性的措施	298
10.5.1	提高电力系统静态稳定性的 措施	298
10.5.2	提高电力系统暂态稳定性的 措施	299
10.5.3	防止系统失去稳定的措施	305
	小结	305
	思考题与习题	305
附录		308
附录 A	短路电流运算曲线	308
附录 B	有关的法定计量单位名称与 符号	312
附录 C	常用网络变换的基本公式	313
附录 D	部分习题参考答案	314
参考文献		324

第1章 电力系统的基本概念

本章讲述电力系统的组成、运行特点和要求，介绍电力系统负荷曲线和年最大负荷利用小时数等概念，分析电力系统的电压等级、额定电压及电能的质量评价；最后介绍国内外电力系统发展概况。

1.1 电力系统概述

1.1.1 电力系统的组成及接线

电能是现代社会的主要能源，在国民经济和人民生活起着极其重要的作用。电能可以方便地转化为其他形式的能，如将电能转换成机械能、热能、光能、声能、化学能等；电能使用方便，易于有效而精确控制；电能传输效率高，易于分配和输送；以电能代替其他能源，可以提高能源的利用效率，所以电能被称为“节约的能源”。

电能是二次能源，是由一次能源经加工转换而成的能源这里的一次能源是指煤炭、石油、天然气、风能、核能和水能等能源。

发电厂内的发电机把某种一次能源转换成电能，电能经过变压器和不同电压等级的电力线路输送并分配到用户，再通过各种用电设备转换成机械能、热能、光能和化学能等。这些生产、变换、输送、分配和消耗电能的设备连接在一起组成的统一整体称为电力系统。电力系统加上发电厂的动力部分称为动力系统。动力系统包括火力发电厂的锅炉、汽轮机、热力网及用热设备，水力发电厂的水库和水轮机，核电厂的核反应堆等。电力系统中除发电机和用电设备外的部分称为电力网，它包括各级升降压变电站和各级输电线路。可见电力网是电力系统的组成部分，而电力系统又是动力系统的组成部分。三者之间的关系如图 1-1 所示。

在电力系统中，发电机、变压器、架空线路、电缆和用电设备等直接参与生产、输送、分配和使用电能的电气设备称为主设备或一次设备。由它们组成的系统称为一次系统（或称为一次接线或电气主接线）。对主设备进行测量、监视、保护和控制的设备称为二次设备，由二次设备组成的系统称为二次系统或二次接线。

电力系统的接线图分为电气接线图和地理接线图两种。电力系统的地理接线图反映了各发电厂和变电所的相对地理位置以及电力线路的路径。图 1-2 所示为一幅简单电力系统地理接线图。电气接线图是用标准的电气元件符号将一次设备按设计要求连接的电路。它能够详细地描述电力系统各元件之间的电气联系，但不能反映各个发电厂和变电所的地理位置关系。

电力系统接线方式分为放射式、干线式、链式、环式和两端供电方式，如图 1-3 所示。其中前三种称为开式网络，后两种称为闭式网络。显然，闭式网络供电的可靠性较高。电力系统复杂接线方式可由上述各种接线方式组成。为提高电网传输能力和提高供电可靠性，电力线路通常采用双回路接线方式。

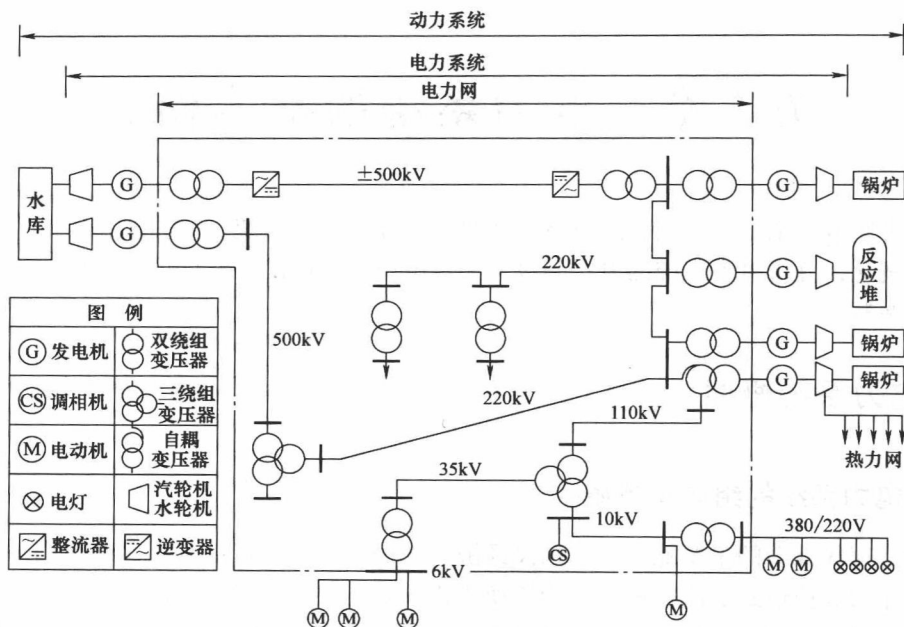


图 1-1 动力系统、电力系统和电力网的示意图

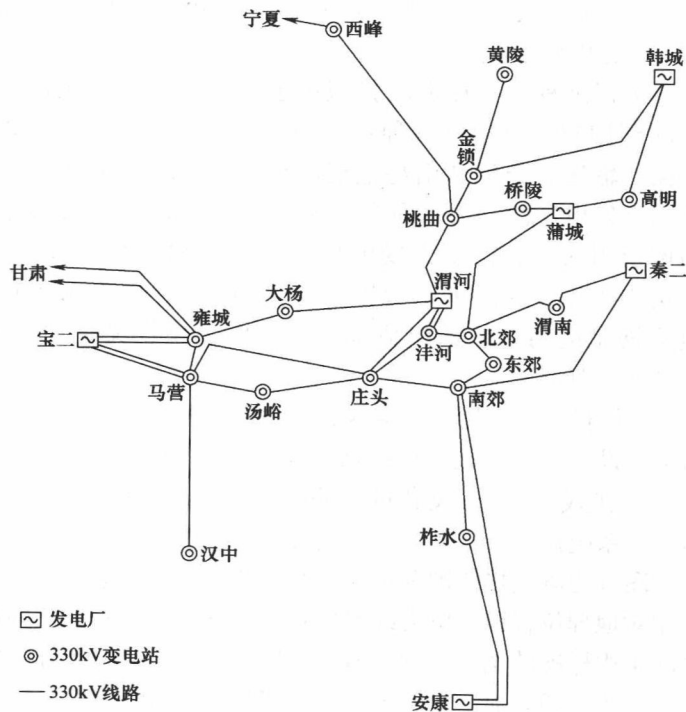


图 1-2 电力系统地理接线图

1.1.2 电力系统的负荷和负荷曲线

1. 电力系统的负荷

电力系统的负荷是指系统中所有用电设备消耗功率的总和，也称为电力系统的综合用电

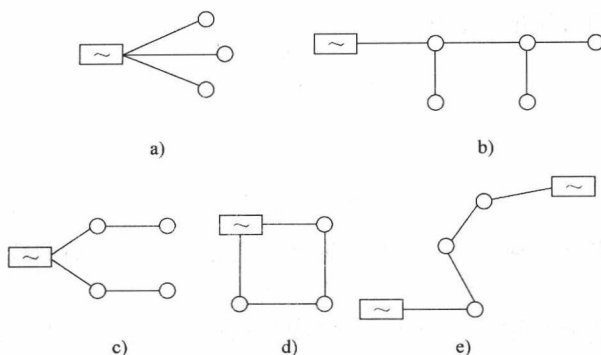


图 1-3 电力系统简单接线方式

a) 放射式 b) 干线式 c) 链式 d) 环式 e) 两端供电方式

负荷，可分为动力负荷和照明负荷。根据用户性质，它可分为工业负荷、农业负荷、交通运输负荷和人民生活用电负荷等。

电力系统的供电负荷是指电力系统的综合负荷加上电力网的功率损耗，即发电厂供出的负荷。电力系统的发电负荷是指电力系统的供电负荷加上发电厂用电，即发电机应发出的功率。各用电设备的有功功率 (P) 和无功功率 (Q) 随受电电压 (U) 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 1-4a 和图 1-4b 所示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。

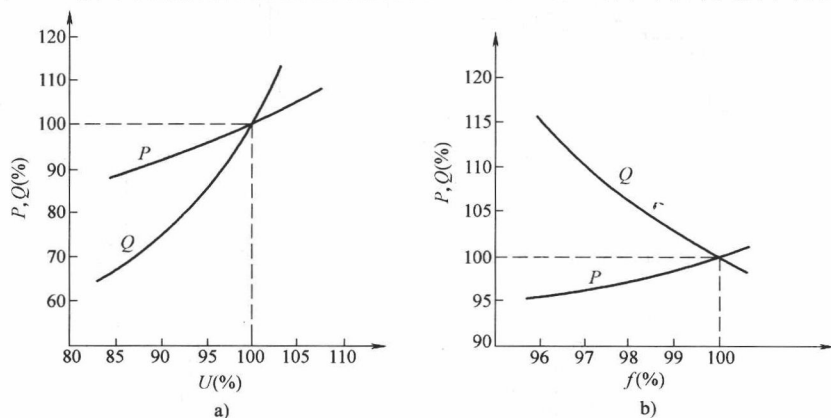


图 1-4 某电力系统综合用电负荷的特性曲线

a) 电压特性曲线 b) 频率特性曲线

2. 负荷曲线

负荷曲线是指某一段时间内负荷随时间变化的规律。负荷曲线按负荷种类可以分为有功功率负荷曲线和无功功率负荷曲线；按时间长短可以分为日负荷曲线和年负荷曲线；按计量地点可以分为个别用户、电力线路、变电所、发电厂以致整个电力系统的负荷曲线。

图 1-5 所示为电力系统的有功功率日负荷曲线，用来描述一天 24h 负荷的变化情况。曲线最大值称为日最大负荷，最小值称为日最小负荷。有功负荷曲线所包围

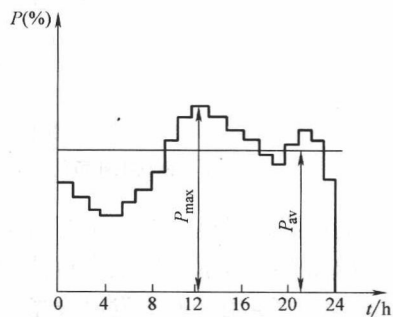


图 1-5 有功功率日负荷曲线

的面积称为电力系统的日用电量，即

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

平均负荷为

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

负荷率 β 定义为平均负荷 P_{av} 与最大负荷 P_{max} 之比，表示负荷曲线的平坦程度，即

$$\beta = P_{av} / P_{max} \quad (1-3)$$

不同行业的有功负荷曲线差别很大，三班制连续生产的重工业（如钢铁行业）负荷曲线如图 1-6a 所示，负荷曲线平坦，最小负荷达最大负荷的 85%；一班制生产的轻工业（如食品行业）负荷曲线，如图 1-6b 所示，负荷变化幅度较大，最小负荷仅为最大负荷的 13% ~ 14%；图 1-6c 为农业加工业负荷曲线，每天用电 12h，但在夏季出现排灌负荷时，负荷曲线较为平坦；图 1-6d 为市政生活日负荷曲线，其特点是出现照明电力高峰。尽管不少行业的负荷曲线有较大的变化幅度，但整个电力系统的负荷曲线还是比较平坦的，这是因为不同行业负荷曲线上的最大值不是在同一时刻出现的，而电力系统负荷曲线是各行业负荷曲线相加得到的。因此电力系统负荷曲线最大值恒小于各行业负荷曲线的最大值的总和。在实际计算时，各行业最大负荷相加后，应乘以一个小于 1 的同时系数才能得到电力系统的最大综合负荷。

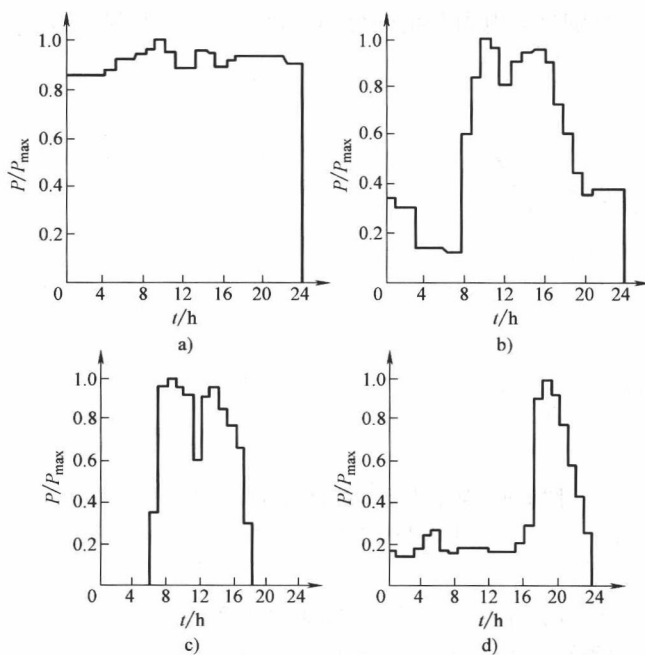


图 1-6 四种行业的有功功率日负荷曲线

a) 钢铁工业负荷 b) 食品工业负荷 c) 农业加工负荷 d) 市政生活负荷

负荷曲线对电力系统运行有重要意义，依据它可安排日发电计划和确定系统运行方式。

如图 1-7 所示，年最大负荷曲线是描述一年内每月或每日最大有功功率负荷变化情况的曲线。它主要用来安排发电设备检修，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 1-7 中阴影面积 A 表示各检修机组的容量和检修时间的乘积之和， B 表示系统新

增装机组容量。

年持续负荷曲线是由一年中系统负荷按其数值大小及其持续时间由大到小排列而成的，如图 1-8 所示（图中的 t 为年小时数，全年 8760 小时中，有 t_1 小时负荷值为 P_1 ，有 t_2 小时为 P_2 ，有 t_3 小时为 P_3 ）。在安排发电计划时，进行可靠性估算和电网规划与运行的能量损耗计算等方面常用该曲线。根据该曲线可以计算系统负荷的全年耗电量即

$$W_d = \int_0^{8760} P dt \tag{1-4}$$

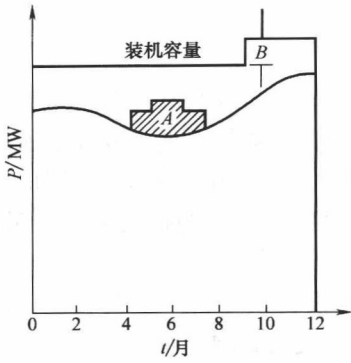


图 1-7 电力系统有功功率年最大负荷曲线

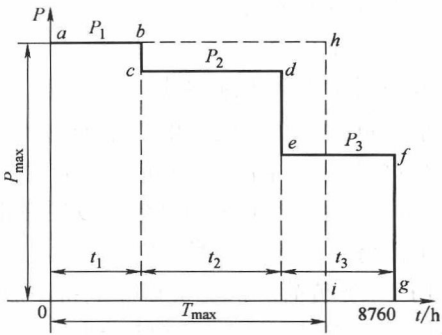


图 1-8 年持续负荷曲线

如果负荷等于最大值 $P_{\max}$ ，经过 $T_{\max}$ 后所消耗的电能恰好等于全年实际耗电量，则称 $T_{\max}$ 为年最大负荷利用小时数，即

$$T_{\max} = \frac{W_d}{P_{\max}} = \frac{1}{P_{\max}} \int_0^{8760} P dt \tag{1-5}$$

$T_{\max}$ 随负荷性质和特点而变化。各类负荷的 $T_{\max}$ 见表 1-1。

表 1-1 各类负荷的 $T_{\max}$

负荷类型	$T_{\max}/h$	负荷类型	$T_{\max}/h$
市政生活	2000 ~ 3000	三班制企业用电	6000 ~ 7000
一班制企业用电	1500 ~ 2200	农灌用电	1000 ~ 1500
二班制企业用电	3000 ~ 4500		

在设计电网时，用户的负荷曲线往往未知，但如果知道用户的性质，则可以通过有关技术手册选择适当的 $T_{\max}$ 值，即可以估算出用户全年耗电量为 $W_d = P_{\max} T_{\max}$ 。

1.1.3 电力系统运行的特点和要求

1. 电力系统运行的特点

1) 电能不能大量存储。电能的生产、输送、分配和使用是同时进行的。发电厂在任何时刻生产的电能必须等于该时刻用电设备消耗的电能与变换、输送和分配过程中损耗的电能总和，即发电容量和用电容量随时保持平衡。

2) 暂态过程十分短暂。电能以电磁波的形式传播，传播速度为 $3 \times 10^5 \text{ km/s}$ 。电力系统正常运行时，负荷不断变化，发电量跟踪作相应变化，以适应负荷的需要。电力系统运行情况发生变化所引起的电磁和机电暂态过程十分短暂。电力系统从一种运行状态过渡到另一种

运行状态极为迅速，必须采用多种自动装置和保护装置来迅速而准确地完成各项调整和操作任务。

3) 电能与国民经济各部门和人民日常生活关系密切。由于电能是洁净的能源，具有使用灵活、易于转换、控制方便、易于远距离输送等优点，因此国民经济各部门广泛使用电能作为生产的动力，在日常生活中人们也广泛使用各种家用电器来满足日常用电。

2. 对电力系统运行的要求

从电力系统的上述特点出发，根据电力工业在国民经济中的地位和作用，决定对电力系统运行有以下的要求：

(1) 保证安全可靠地供电

电力系统供电中断将使生产停顿，人民生活混乱，甚至危及人身和设备安全，给国民经济带来严重损失。因此，电力系统的运行首先要保证供电的可靠性。但是要保证所有用户的供电绝对可靠是困难的。考虑到不同用户因中断供电造成的损失相差甚远，所以应按照用户对供电可靠性的要求区别对待，以便在事故情况下对国民经济造成的损失限制在最小范围，通常可以将负荷分为三类。

1) 一类负荷。这类负荷停电将造成人身危险，重要设备损坏，产生大量废品，生产秩序长期不能恢复，给国民经济带来巨大损失或造成重大的政治影响。

2) 二类负荷。该类负荷停电将造成大量减产，主设备损坏，人民生活受到较大影响。

3) 三类负荷。不属于一类、二类的其他负荷称为三类负荷。

(2) 保证良好的电能质量

电力系统不但要为用户提供充足的电力，而且还要保证电能质量。衡量电能质量的三个指标是电压、频率和波形。

当系统的电压、频率、波形不符合电气设备额定值要求时，会影响设备正常工作、损耗增加、使设备绝缘加速老化甚至损坏，危及设备和人身安全，影响用户的产品质量。因此，要求系统提供的电能电压、频率、波形必须符合其额定值的规定。

频率主要取决于系统中有功功率的平衡，如频率偏低表示发电出力不足。电压则取决于系统中无功功率的平衡，无功功率不足将引起电压偏低。我国额定频率 $f_N = 50\text{Hz}$ ，其允许偏差见表 1-2。用户供电电压允许变化范围见表 1-3。

表 1-2 系统频率允许偏差

运行情况		允许频率偏移/Hz	允许标准时钟误差/s
正常运行	中、小系统	± 0.5	40
	大系统	± 0.2	30
事故运行	30min 以内	± 1	
	15min 以内	± 1.5	
	不允许低于	-4	

表 1-3 用户供电电压允许变化范围

线路额定电压	电压允许变化范围
35kV 及以上	$\pm 5\%$
10kV 及以下	$\pm 7\%$
低压照明	-10% ~ 5%
农业用户	-10% ~ 5%

正弦波形畸变是由三相不平衡负载、晶闸管或非线性元件等形成的谐波所致，反过来它又影响用户设备的正常运行，并对通信系统产生干扰。波形质量指标以畸变率不超过给定的允许值限定。所谓畸变率是指各次谐波有效值二次方和的方根值与基波有效值的百分比。电网中的任何一点的电压正弦波形畸变时不得超过表 1-4 所规定的极限值。

表 1-4 电网电压正弦波形畸变极限值（相电压）

用户供电电压/kV	总电压正弦波形畸变率极限值（%）	各奇、偶次谐波电压正弦波形畸变率极限值（%）	
		奇次	偶次
0.38	5.0	4.0	2.0
6 或 10	4.0	3.2	1.5
35 或 66	3.0	2.4	1.2
110	2.0	1.6	0.8

(3) 提高电力系统运行的经济性

电能的生产规模很大，电能生产消耗的能源在国民经济总消耗中占的比重很大，而且电能在生产、输送、分配时损耗的绝对值也相当可观，因此，提高电能生产和电力系统运行的经济性具有十分重要的意义。电力系统经济性的指标有煤耗、网损率和厂用电率。煤耗是指火力发电厂生产 1kW·h 电能所消耗的标准煤量；网损率是指电力网中损耗电量占电力网供电量的百分比；厂用电率是指发电厂自用电量占发电量的百分比。

除此以外，环境保护问题为人们所日益关注。在火力发电厂中产生的各种污染物质，包括氧化硫、氧化氮、飞灰等排放量的限制也将成为限制电力系统运行的要求。

1.1.4 电力系统的电压等级和额定电压

当传输功率一定时，所采用的输电电压越高，电流越小，导线等载流导体部分的截面积就越小，投资也越小；但电压越高，对绝缘要求越高，从而使杆塔、变压器和断路器所需要的投资越大。综合考虑这些因素，对应一定的输送功率和输送距离必定有一个最合适的线路电压。但从设备制造角度考虑，为保证生产的系列化、规格化，不宜有过多的额定电压等级。为此，世界各国都规定了一定数量的标准电压等级。我国规定的电压等级见表 1-5。

表 1-5 我国规定的电压等级

电网线路及用电设备的额定电压/kV	交流发电机的额定电压/kV	变压器的额定电压/kV	
		一次侧	二次侧
0.38/0.22	0.40	0.38/0.22	0.40/0.23
0.66/0.38	0.69	0.66/0.38	0.69/0.40
3	3.15	3.0 及 3.15	3.15 及 3.3
6	6.3	6.0 及 6.3	6.3 及 6.6
10	10.5	10.0 及 10.5	10.5 及 11.0
	13.8、15.75、18、20、22、24、26	13.8、15.75、18、20、22、24、26	
35		35	37 及 38.5

(续)

电网线路及用电设备的额定电压/kV	交流发电机的额定电压/kV	变压器的额定电压/kV	
		一次侧	二次侧
110		110	115 及 121
220		220	231 及 242
330		330	345 及 363
500		500	525 及 550
750		750	788 及 825

实际上各种电气设备都是按照自己的额定电压设计和制造的,当设备在其额定电压下运行时,它的性能最好,效率最高,并能保证预期寿命。但由于变压器和线路流过电流时要产生电压降,使同一电压等级的系统中各处的电压并不相同。为了使设备的额定电压尽量接近于实际运行电压,应对于工作在电压较高处的设备采用稍高一些的额定电压(如发电设备),而经常运行于电压较低处的设备采用较低一些的额定电压(如用电设备)。这就是为什么同一电压等级设备的额定电压并不相同。

线路输送电力时,沿线电压分布始端电压高于末端电压。如图 1-9 沿线 ab 的电压降可用直线 $U_a - U_b$ 表示。图中用电设备 1~5 端电压各不相同。线路额定电压即为线路的平均电压 $(U_a + U_b)/2$,而各用电设备的额定电压则取与线路额定电压相等。使所有用电设备都能在接近它们的额定电压下运行。用电设备允许电压偏移 $\pm 5\%$,这就要求线路电压降落不超过 10%。因此线路始端电压应为 $105\% U_N$,以使其末端电压不低于 $95\% U_N$ 。发电机接在线路始端,因此发电机额定电压应为 $105\% U_N$,即 $U_{GN} = 105\% U_N$ 。

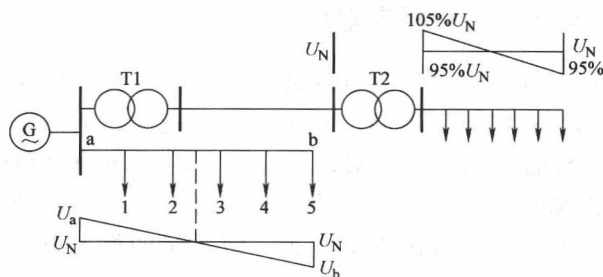


图 1-9 电力网络中的电压分布

变压器一次侧接电源,相当于用电设备,二次侧接负荷,相当于发电设备。因此,变压器一次电压应等于用电设备的额定电压,即 $U_{T(1)} = U_N$;变压器二次额定电压规定为变压器的空载电压,由于变压器内部有一定的电压降落,所以二次额定电压应高于线路额定电压。升压变压器二次额定电压应高于线路额定电压 10%;降压变压器二次额定电压应高于线路额定电压 10% 或 5%。对于有分接头的变压器,变压器额定电压是指主接头上的空载电压。

为了适应电力系统运行调节的需要,通常在变压器高压绕组上设计制造分接头。分接头用百分数表示,即表示分接头电压与主接头电压的差值为主接头电压的百分之几。对同一电压级的变压器,升压变压器和降压变压器即使分接头百分值相同,分接头的额定电压也不相同。图 1-10 所示是用线电压表示的 SF31500/220 $\pm 2 \times 2.5\%$ 型变压器的接头额定电压。对

于 $\pm 5\%$ 接头, 升压变压器为 $242\text{kV} \times 1.05 = 254\text{kV}$, 降压变压器则为 $220\text{kV} \times 1.05 = 231\text{kV}$ 。

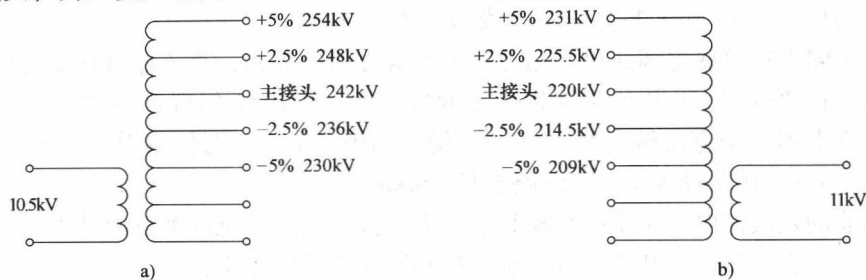


图 1-10 用线电压表示的接头额定电压

a) 升压变压器 b) 降压变压器

表 1-5 中, 3kV 仅限于工业企业内使用, 正在被 6kV 代替。10kV 为常用城乡配电电压。当负荷中高压电动机所占比例大时, 可用 6kV 作为配电电压。13.8 ~ 26kV 为发电机的额定电压。35kV 可以用于城市和农村配电网, 也可以用于大工业企业内部电网。习惯称 110kV 和 220kV 为高压, 330kV、500kV、750kV 称为超高压, 1000kV 以上则称为特高压。

不同电压等级下电力线路输送功率和距离的大致范围见表 1-6。

表 1-6 不同电压等级下电力线路输送功率和距离的大致范围

线路电压/kV	输送功率/MW	输送距离/km	线路电压/kV	输送功率/MW	输送距离/km
3	0.1	1 ~ 3	220	100.0 ~ 500.0	100 ~ 300
6	0.1 ~ 0.12	4 ~ 15	330	200.0 ~ 800.0	200 ~ 600
10	0.2	6 ~ 20	500	1000.0 ~ 1500.0	150 ~ 850
35	2.0 ~ 10	20 ~ 50	750	2000.0 ~ 2500.0	500 以上
110	10.0 ~ 50.0	50 ~ 150			

1.2 电力系统发展概况

1. 电力系统发展简史

从 1831 年法拉第发现了电磁感应定律, 到 1875 年巴黎北火车站发电厂的建立, 电才真正进入实际应用阶段。1875 年第一台火力发电机组在巴黎北火车站建立, 它是一套直流发电机组, 用于照明供电。1882 年美国纽约珍珠街电厂建成发电, 装有 6 台直流发电机组, 总容量为 670kW, 以 110V 直流电供电灯照明用。这是世界上第一个完整的电力系统, 是一个由发电机、电缆和负载组成的直流电力系统。

1882 年第一座发电厂在英国伦敦建立, 原始电力线路输送 100V 和 400V 的低压直流电。同年法国人德普利茨提高了直流输送电压, 使之达到 1500 ~ 2000V, 输送功率为 2kW, 输送距离为 57km。

1885 年出现了变压器, 实现了单相交流输电, 1891 年在制造出三相变压器和三相电动机的基础上, 实现了三相交流输电。第一条三相交流输电线路于 1891 年在德国运行, 电压 12kV, 线路长度 180km。从而使三相交流制的优点很快显示出来, 使输送功率、输送电压逐渐增大, 输送距离日益增长。直流输电被淘汰。

为了减少线路的功率损耗, 必须提高输电电压。从 20 世纪 50 年代开始, 330kV 及以上

超高压输电线路迅速发展。1969 年, 美国第一条 765kV 线路投入运行。哈萨克的埃巴斯图兹火电厂至乌兰尔的 1150kV 特高压输电线路长达 1300km。

由于交流输电在海底电缆送电和运行稳定性等方面的问题, 直流输电在 20 世纪 30 年代重新被启用, 在 20 世纪 50 年代中期进入工业应用阶段。1954 年瑞典在本土与果特兰岛之间建成了世界上第一条直流输电线(海底电缆)。1986 年, 巴西伊泰普水电站至圣保罗的 1200kV(± 600 kV) 线路投入运行, 线路全长 850km。

电力工业的发展使电力系统的规模日益扩大, 孤立的小系统逐渐发展壮大, 合并成统一的联合大系统。在一些国家甚至出现了全国性和国际性的电力系统。

现代控制技术和计算机技术的迅猛发展使现代化电力调度自动化系统功能更加强大、可靠, 可以保障电力系统的安全稳定和经济运行。

2. 我国电力系统发展概况

我国电力工业起步较早, 1882 年我国第一个火力发电厂开始发电, 它是由英国人在上海投资兴办的, 机组容量为 12kW。到 1949 年全国发电装机容量为 1850MW, 年发电量约 $4.3 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。到 2003 年全国发电装机容量 38450 万 kW, 全国发电量 19080.1 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 自 1996 年起稳居世界第二位。

我国电力工业发展方针是积极发展火电, 火电立足于煤炭资源发电; 大力开发水电; 有重点、有步骤地发展核电; 根据当地具体条件, 因地制宜、开发风力、潮汐、地热等可再生能源发电。由于系统容量不断扩大, 应采用超高压远距离输电和直流输电, 逐步形成跨地区的联合电力系统并最终形成全国电力系统。

在输电线路建设方面, 1982 年 1 月我国第一条 500kV 线路(河南平顶山到武昌)投入运行以来, 500kV 线路已成为各大电力系统的骨架。自行设计和建造的第一条 ± 100 kV 直流高压输电线路已于 1988 年投入运行, 该线路从浙江镇海到舟山群岛, 全长 53.1km(海底电缆 11km)。自葛洲坝水电站到上海南桥的 ± 500 kV 高压直流输电线路已于 1989 年建成, 全长 1080km, 将华中和华东两大系统连接起来。到 2001 年年底输电线路总长已达 781854km, 其中 500kV 线路长 31486km, 330kV 线路长 9177km, 220kV 线路长 135935km, 110kV 线路长 220051km。总变电容量达 1117710MVA。

目前我国已基本进入大电网、大电厂、大机组、高压输电、高度自动控制的新时代。截止 1998 年, 全国已有 5 个区域电网和 12 个省网。5 个区域电网分别是东北、华北、华东、华中和西北电网。省网包括山东、福建、广东、广西、四川、重庆、云南、贵州、海南、新疆、西藏和台湾。在 2003 年已完成东北电力系统、华北电力系统、华中电力系统和川渝电力系统之间的连接。1998 年区域电力系统的装机容量和发电量见表 1-7。

表 1-7 1998 年区域电力系统的装机容量和发电量

电力系统名称	装机容量			年发电量		
	总量/MW	水电 (%)	核电 (%)	总量/亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$	水电 (%)	核电 (%)
华北电力系统	37186.6	5.9		178.931	1.4	
华东电力系统	46121.0	9.6	0.65	211.451	5.4	0.55
华中电力系统	40749.3	39.9		160.373	28.7	
西北电力系统	17275.1	40.1		69.602	28.3	
东北电力系统	34312.1	16.0		141.151	5.6	