

21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century



电力系统分析

DIANLIXITONG FENXI

苏小林 阎晓霞 主 编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

TM711/46

2007

21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century



电力系统分析

DIANLIXITONG FENXI

主 编 苏小林 阎晓霞
编 写 张海荣
主 审 周双喜



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。

本书共有 10 章内容。第一章至第六章为电力系统稳态分析部分, 主要包括电力系统的基本概念、电力系统的元件参数及等效电路、简单电力系统的潮流计算、复杂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和控制以及电力系统经济运行。第七章至第十章为电力系统暂态分析部分, 主要包括同步发电机的基本方程、电力系统三相短路的分析与计算、简单不对称故障的分析计算和电力系统稳定性分析。每章均配有习题。

本书可作为普通高等院校电气工程及其自动化等专业的本科教材, 也可作为高职高专、成人教育电力技术类专业的参考教材, 同时还可作为相关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/苏小林, 阎晓霞主编. —北京: 中国电力出版社, 2007

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5845 - 1

I. 电... II. ①苏... ②阎... III. 电力系统—分析—高等学校—教材 IV. TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 091737 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷
各地新华书店经售

*

2007 年 8 月第一版 2007 年 8 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.25 印张 469 千字
印数 0001—3000 册 定价 28.80 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

电力系统分析既是电气工程类专业的一门重要的专业课程,也是后续专业课程的基础,理论性和工程性强。本书包括电力系统稳态分析和暂态分析的内容,全面地阐述了电力系统的基本概念、基本理论及基本分析方法。

全书共 10 章。第一章主要介绍电力系统的组成、运行特点与基本要求、电气接线方式、电压等级、电力系统负荷及特性、中性点运行方式、直流输电系统等;第二章主要介绍电力系统中各元件正序参数及等效电路、电力系统的等效电路;第三章主要介绍简单电力系统的手算潮流计算方法;第四章主要介绍复杂电力系统计算机潮流计算的数学模型和算法;第五章主要介绍电力系统正常运行方式的有功功率和频率的调整和控制、无功功率和电压的调整和控制;第六章主要介绍网损计算、有功功率的经济分配和无功功率的经济分配;第七章主要介绍同步发电机的基本方程;第八章主要介绍电力系统三相短路的物理过程和分析计算方法;第九章主要介绍电力系统不对称故障的分析计算方法;第十章主要介绍电力系统的机电模型、电力系统小干扰稳定、暂态稳定的物理概念和分析方法、电压稳定的基本概念及提高电力系统稳定性的措施。

本书第一章至第六章为电力系统稳态分析部分,第七章至第十章为暂态分析部分,满足电力系统稳态分析和电力系统暂态分析两门课程的教学要求。

本书在编写过程中,力求物理概念和理论分析准确、简明、内容新颖、实用,并注意与相关知识的衔接。

本书的第七、第八、第十章由山西大学工程学院的苏小林编写,第一、第五、第六、第九章由山西大学工程学院的阎晓霞编写,第二、第三、第四章由山西大学工程学院的张海荣编写。

清华大学周双喜教授详细审阅了本书,并提出许多有建设性的宝贵意见,在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2007 年 7 月

目 录

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 电力系统运行的特点与基本要求	9
第三节 电力系统的电气接线方式和电压等级	12
第四节 电力系统中性点的运行方式	15
第五节 直流输电系统	19
第六节 电力系统分析课程的主要内容	22
习题	23
第二章 电力系统元件参数和等效电路	24
第一节 发电机的参数及其等效电路	24
第二节 电力线路的参数及其等效电路	27
第三节 变压器的参数及其等效电路	35
第四节 负荷特性和数学模型	46
第五节 电力系统的等效电路	47
习题	59
第三章 简单电力系统的潮流计算	61
第一节 电力网的功率损耗和电压降落	61
第二节 开式网络的潮流计算	67
第三节 闭式网络的潮流计算	75
习题	81
第四章 复杂电力系统的潮流计算机算法	84
第一节 电力系统潮流计算的数学模型	84
第二节 潮流计算的牛顿—拉夫逊法	92
第三节 潮流计算的 P-Q 分解法	103
习题	109
第五章 电力系统正常运行方式的调整与控制	111
第一节 电力系统有功功率和频率的调整与控制	111
第二节 电力系统无功功率和电压的调整与控制	124
习题	139
第六章 电力系统的经济运行	142
第一节 电力网络的电能损耗	142

第二节 电力系统有功功率的经济分配	149
第三节 电力系统无功功率的经济分配	154
习题	157
第七章 同步发电机的基本方程	160
第一节 abc 坐标系统下同步发电机的基本方程	160
第二节 派克变换及 dq0 坐标系统下的同步发电机方程	162
第三节 同步发电机基本方程的拉氏运算形式	167
第四节 同步发电机的对称稳态运行	170
习题	171
第八章 电力系统三相短路的分析与计算	172
第一节 短路的基本概念	172
第二节 无限大功率电源供电的三相短路电流分析	174
第三节 同步发电机突然三相短路的物理分析	179
第四节 同步发电机的暂态和次暂态参数	182
第五节 同步发电机的三相短路电流	188
第六节 电力系统三相短路的实用计算	196
习题	211
第九章 电力系统简单不对称故障的分析计算	214
第一节 对称分量法	214
第二节 对称分量法的应用	215
第三节 电力系统各元件的序阻抗及其等效电路	218
第四节 各序等效电路的建立	225
第五节 不对称短路情况下短路点的短路电流和电压计算	226
第六节 不对称短路情况下非故障处的电流和电压计算	237
第七节 非全相运行的分析计算	240
习题	243
第十章 电力系统稳定性分析	246
第一节 电力系统稳定性概述	246
第二节 电力系统元件的机电模型	247
第三节 电力系统小干扰稳定性	263
第四节 电力系统暂态稳定性	273
第五节 电力系统电压稳定性	283
第六节 提高电力系统稳定性的措施	286
习题	292
附录 短路电流运算曲线	295
参考文献	300

第一章 电力系统的基本概念

电能由于可以大量生产,便于远距离输送、分配、集中管理和控制,又容易转换成其他形式的能量,已成为人类生活和社会生产中最重要能源。电能是电力系统实现电能的生产、输送、分配和使用的物质流。电力系统是国民经济发展的基础,其发展程度和水平已成为衡量一个国家现代化程度和人民生活水平的重要标志。

电力系统的根本任务是向用户提供充足、可靠、优质和价格合理的电能。为此,要认真做好电力系统规划、设计、安装、调试和运行与控制等方面的工作。而电力系统分析是开展这些工作的基础。

本章重点介绍电力系统的组成、特点和要求等基本内容。这些内容是电力系统分析的基础。通过本章的学习,读者应对电力系统有一个整体认识。

第一节 电力系统概述

一、电力系统的组成

广义的电力系统是指由若干发电厂、变电所、负荷中心通过输电线路连接起来的统一整体,用以完成电能的生产、输送、分配和使用。在这个庞大的系统中,有直接参与生产、输送、分配、消费电能的设备,如动力设备(水库、水轮机、锅炉、汽轮机、核反应堆等)、发电机、变压器、输电线路和各类用电设备;也有为保证电力系统安全、优质、经济运行,并对上述设备进行监测、控制、保护、调节、调度的设备,如计算机控制系统、继电保护装置、各类自动装置等。

传统的电力系统则是指上述广义电力系统中除去发电厂中动力部分后剩余的系统,它是由发电机、变压器、线路及用电设备等电气设备连接起来构成的整体,这个系统正是《电力系统分析》课程研究的对象。

在电力系统中,实现输送、分配电能的部分称为电力网,它是由发电厂和变电所中的变压器与输电线路连接起来构成的整体。

广义电力系统的基本构成以及电力网、电力系统和广义电力系统间的关系,如图1-1所示。图中所示的电力系统是三相交流系统。由于在正常运行时,电力系统处于三相对称运行状态,故电力系统的电气系统图一般采用单线图表示。

二、发电厂

发电厂是将其他形式的能量转换成电能的工厂,它由动力部分(水库、水轮机、锅炉、汽轮机、核反应堆等)和电气部分(发电机、变压器等)构成一个统一的单元制系统。

发电厂根据动力部分输入能源的不同,分为火力发电、水力发电、核能发电、新能源和可再生能源发电等几大类发电厂,简述如下。

1. 火力发电厂

火力发电厂简称火电厂,是用煤、石油和天然气等一次能源作为燃料的发电厂。火电厂

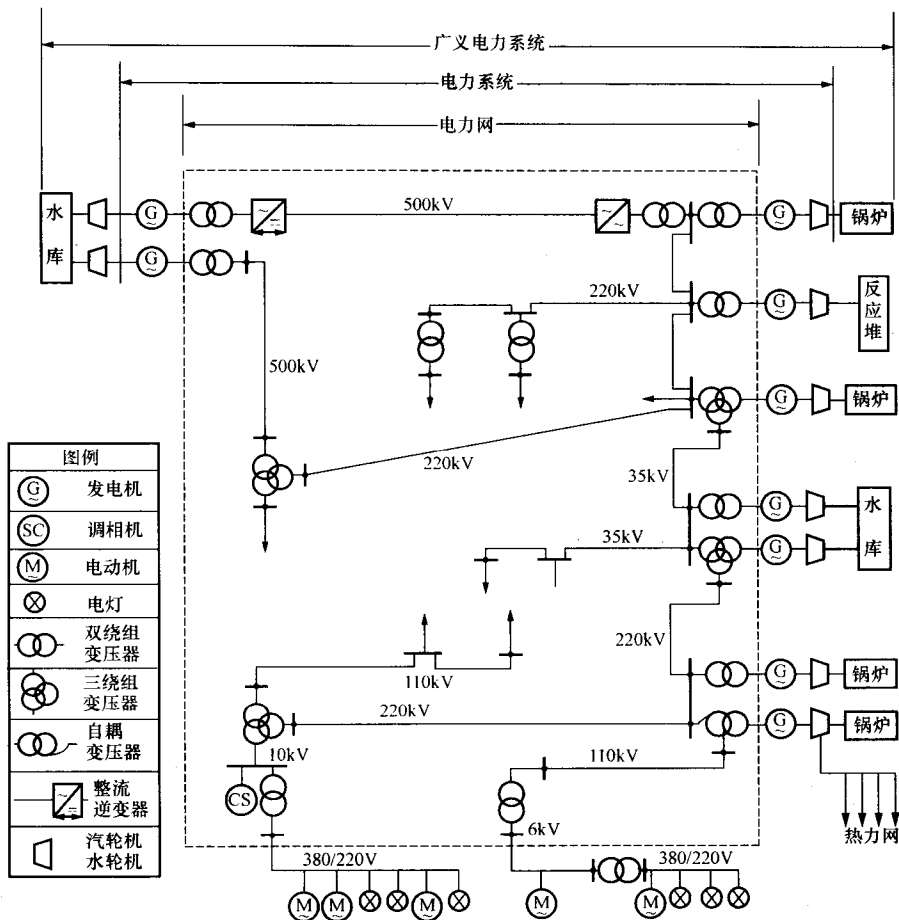


图 1-1 广义电力系统、电力系统、电力网示意图

又分为凝汽式电厂和热电厂两种。凝汽式电厂仅向用户提供电能，热电厂不仅向用户供电，同时还向用户供蒸汽或热水。

2. 水力发电厂

水力发电厂是把水的位能和动能转变成电能的发电厂。水能是一种宝贵的自然资源，是可再生能源而且是洁净的能源。水力发电最普遍的形式是建立形式多样的水电厂，充分利用江河水流的流量和落差推动水轮机旋转，带动发电机发电。

3. 核电厂

核能发电是在核反应堆中通过受控核裂变反应，使核燃料释放出热能将水加热为蒸汽，用蒸汽冲动汽轮机带动发电机发电。与火电厂相比较，核电厂只是用核反应堆取代了火电厂的锅炉。

4. 新能源和可再生能源发电

新能源和可再生能源有太阳能、风能、生物能、海洋能和地热能等。

(1) 太阳能发电可分为太阳能热发电和太阳能光发电两类：太阳能热发电是利用太阳能将水加热产生蒸汽驱动汽轮发电机组；太阳能光发电是利用太阳能电池组将太阳能直接转换为电能，通称光伏电站。

(2) 风力发电是由风力冲动风力机或风轮的回转叶片驱动发电机发电。

(3) 生物能是世界上最丰富的可再生能源,包括能源植物(陆生和水生)、沼气、生物质气化、生物质液化、生物质压块等能源,这些能源均可用于洁净发电。

(4) 海洋能包含潮汐能、波浪能、海洋温差、海流、潮流、盐度差能等,最早开发的是潮汐能发电。潮汐能发电是利用潮涨、潮落的潮差带动水轮发电机组发电。

(5) 地热发电是将地下水、热蒸汽等通过扩容等方式分离出高温高压可用的蒸汽,送入汽轮—发电机组发电。

发电厂的电气部分分为电气一次系统和电气二次系统。电气一次系统又分为电气一次主系统和厂用电系统,其中电气一次主系统主要是将发电机生产的电能通过主变压器升压后经高压配电装置(由母线、开关设备等构成)送入输电线路;厂用电系统是通过厂用配电装置向发电厂的厂用电负荷供电如图 1-2 所示。

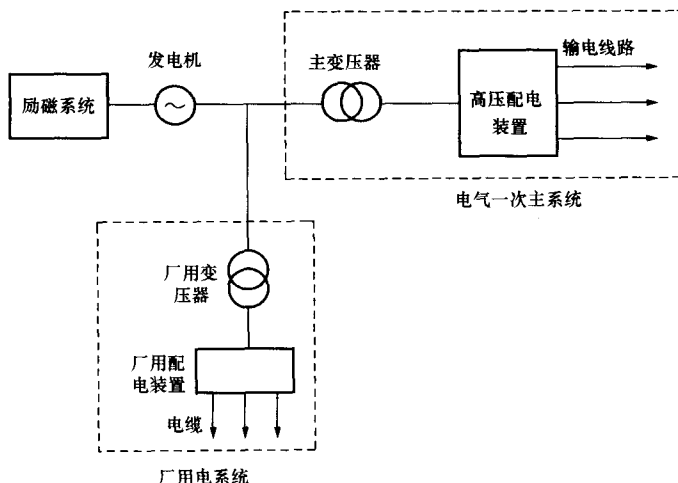


图 1-2 发电厂电气系统图

示。电气二次系统主要对一次系统进行测量、监控、保护、调节和调度等。

发电厂动力部分和电气部分分别在相关专业课程中介绍。

三、变电所

变电所是汇集、分配、变换电能的场所。根据变电所在电力系统中的地位和作用,可将变电所分为以下 6 种类型。

1. 枢纽变电所

枢纽变电所连接电力系统的高压和中压的几个部分,汇集多个大电源和大容量联络线,在系统中处于枢纽地位,电压等级高、变电容量大、出线回路数多,所址在系统中的地理位置适中。全所停电后,将使系统稳定破坏、电力网瓦解,造成大面积停电。现今我国此类变电所的最高电压为 750kV。

2. 中间变电所

中间变电所不仅作为长距离输电线路分段,起系统功率交换的作用,同时还降压供电给当地负荷。变电所一般汇集 2~3 个电源,电压为 220~330kV。

3. 地区变电所

地区变电所是一个地区或中等城市的主要变电所,高压侧以交换或接受功率为主,供电给地区的中压侧和附近的低压侧负荷。全所停电后将引起地区电力网瓦解,影响整个地区供电。供电电压等级一般为 220kV(东北地区常见的供电电压等级为 66kV),容量为 200~300MVA。

4. 企业(用户)变电所

企业(用户)变电所是工矿企业的专用变电所,降压供电给一个企业或一个用户单位。大型企业的变电所供电电压为 220kV,一般企业的变电所供电电压为 35~110kV。

5. 终端（分支）变电所

终端（分支）变电所是位于电力网的终端或线路分支接入的降压变电所，接线较简单，一般由 1~2 回电源线路供电，所址位置接近负荷，供电电压为 110kV 及以下。

6. 开关站

开关站一般是为了满足系统稳定性要求而在线路中间设置，其作用是将长距离的输电线路分段，以降低工频过电压幅值，减少线路故障范围，提高系统的运行稳定度。开关站一般设在 220kV 以上的长线路的中段 1/3 或 2/3 处。

变电所电气系统也分为一次系统（主系统和所用电系统）和二次系统。其中一次系统包

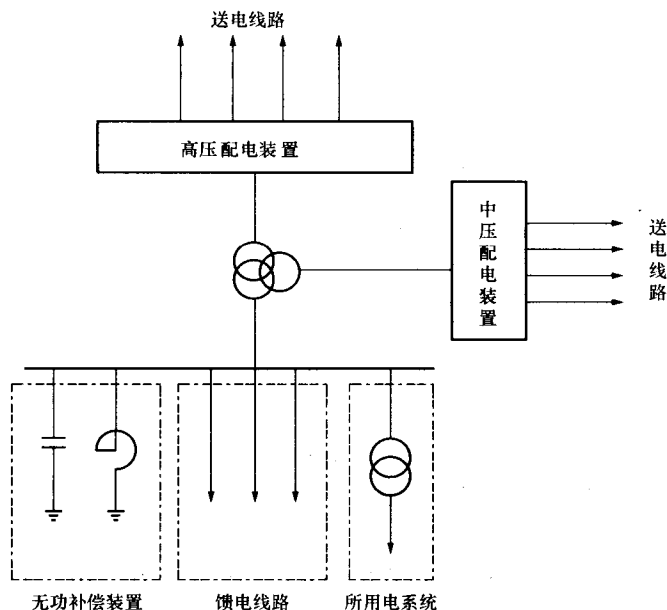


图 1-3 变电所电气系统图

括主变压器、各级配电装置、无功补偿装置、所用电系统等，如图 1-3 所示。变电所通过高、低两个或高、中、低 3 个电压等级的配电装置将不同电压等级的输电线路连接在一起，交换功率，变换电压。无功补偿装置则给电力系统提供无功电源，改善电能质量。所用电系统供给变电所内的各种负荷用电，如变压器散热器风扇、全所照明、计算机控制用电等。

变电所的电气系统将在相关专业课程中详细介绍。

四、电力线路

电力线路是传输电能的电气设备，从功能上分为输电线路和配电线路。输电线路是指发电厂

向负荷中心输送大量电力的主要干线以及不同地区电网间互送电力的高压联络线路；配电线路是指变电所与电力终端用户间的较低电压等级的联络线路。电力线路从结构上分为架空线路和电缆线路。

（一）架空线路

架空电力线路是电力线路中最常见的一种形式，其载流导体为多股绞线，导线由绝缘子通过高于地面的杆塔悬架于空中。架空电力线路根据输送电能的多少和距离的远近，采用不同的电压等级，输送的容量越大、输送的距离越远，电力线路的电压等级就越高。目前，我国规定 220kV 及以上线路为高压输电线路，35~110kV 线路为高压配电线路，3~10kV 为中压配电线路，220、380V 为低压配电线路。

架空电力线路按杆塔上的回路数目可分为单回路线路、双回路线路、多回路线路。

架空线路一般由导线、避雷线、绝缘子、金具、杆塔及基础、接地装置等构成，如图 1-4 所示。

1. 导线

导线是架空电力线路的主要组成部件，其作用主要是传输电能。因此，导线应具有良好的

的导电性能、较小的电阻率，且抗氧化、抗腐蚀能力强。而且导线架空悬在杆塔上，长期处于旷野、山区或湖海边缘运行，应能承受自身的张力及风、雪、冰等外加荷载，所以要有足够的机械强度。

2. 避雷线

避雷线是保护电力线路不遭受雷击的设施之一，架设在电力线路杆塔顶部，利用杆塔的塔身混凝土电杆内的钢筋或接地引下线等与接地装置连接，将雷电流引入大地。一般架空避雷线的主要材料是镀锌钢绞线。

3. 杆塔和横担

杆塔是支持导线、避雷线使导线与地面或其他设施保持一定安全距离的杆型或塔型构筑物，是架空电力线路的主要设施之一。它承受导线、避雷线、其他部件和本身的重力以及冰雪、侧面风的压力等。转角、终端承力杆塔还要承受导、地线的角度张力和不平衡张力，因此，杆塔必须有足够的机械强度。

横担是用以安装绝缘子从而支撑和悬挂导线并使导线间保持一定距离的水平状构件。因此，除满足机械强度要求外还需有一定的长度。

4. 绝缘子

绝缘子是用瓷和钢化玻璃作为绝缘介质制成的一种隔电部件，新型的合成绝缘子是由硅橡胶和环氧玻璃纤维作为绝缘介质的。绝缘子的作用是悬挂或支持导线使之与杆塔绝缘，它不但要承受工作电压和大气过电压的作用，同时还承受导线的垂直荷重、水平荷重和导线张力，在运行中承受机电联合作用，因此，需有良好的电气性能和足够的机械强度。

5. 线路金具

将用于线路的绝缘子、导线、避雷线等部件连接起来固定在杆塔上的金属零件统称为金具。线路金具种类较多，规格各异，一般都是由铸钢或可锻铸铁制成。线路金具长期在自然环境中运行，除需要承受导线、避雷线和绝缘子等自身的荷载外，还承受覆冰和风的荷载，因此，应有足够的机械强度，对于连接导电体的部分金具还应有良好的电气性能。

6. 杆塔基础

线路杆塔地面以下部分的设施统称为杆塔基础，包括地下装置及杆塔自身埋入土壤中起固定作用的部分。基础的作用是稳定杆塔，支撑杆塔全部荷载，防止杆塔因承受导线、风、冰、断线张力等的垂直荷重、水平荷重及其他外力的作用引起的上拨、下压或倾覆，保证杆塔在运行中不发生下沉、倾斜或变形。

7. 拉线

拉线的作用是平衡杆塔承受的导线、避雷线水平方向作用力、风力和断线张力，从而固定杆塔。拉线由拉线金具和拉线本身组成，拉线一般采用镀锌钢绞线。

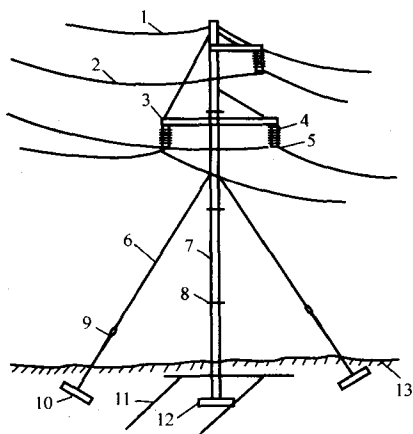


图 1-4 架空线路结构示意图

- 1—避雷线；2—导线；3—横担；4—悬垂绝缘子串；5—悬垂线夹（金具）；6—拉线；7—钢筋混凝土电杆；8—杆段接头；9—拉线金具；10—拉线基础；11—接地装置；12—基础；13—地面

8. 接地装置

将雷电流泄漏到大地的设施叫接地装置。接地装置是接地体和接地线的总称。接地体是指埋入地下并直接与大地接触的金属导体。接地线是指将杆塔与接地体连接用的金属导体,也称接地引下线,一般用镀锌钢绞线做成。接地装置所用的材料既要满足热稳定的要求,又要能耐受一定年限大自然的腐蚀,为此要求接地装置有足够低的接地电阻和较强的防腐能力。

(二) 电缆线路

将用特种绝缘材料和特殊工艺制造而成的电力电缆,埋设于地下或敷设在电缆沟中构成的电力线路,称为电缆线路。电缆线路一般由导线、绝缘层和保护层构成,有单芯、双芯和三芯电缆。因其造价大大高于架空电力线路,因此,只有在城市市区内、飞机场或电台附近等架设架空线路有困难时才敷设电缆。

五、电力负荷

电能经输、变、配后送到用户处。用户中的用电设备将接收到的电能转换成所需要的能量形式消耗。电力系统中所有的用电设备如异步电动机、同步电动机、整流设备、电热设备、照明设备、电解设备等所消耗功率的总和,称为电力系统综合用电负荷,简称负荷。综合用电负荷加上电力网的功率损耗称为电力系统的供电负荷。供电负荷再加上各发电厂的厂用电,称为电力系统的发电负荷。

(一) 负荷的分类

负荷因其用途或供电条件等的不同,有各种分类方法。我国主要是按产业和用途分类。按产业分类,可分为工、矿业负荷、农业负荷、交通运输负荷、市政负荷、商业负荷、居民负荷等。按用途分类,可分为照明负荷、电力负荷。电力负荷根据能量转换的不同,又可分为动力负荷、电热负荷、电解负荷及整流负荷等。对于不同行业各类用电设备消耗的功率所占比重是不同的。

在规划、设计和运行中,按照负荷对供电可靠性的要求不同,分为一类负荷、二类负荷、三类负荷,说明如下。

(1) 一类负荷:是指中断供电将造成人身伤亡或将在政治、经济上造成重大损失的负荷,如造成重大设备损坏、有害物质溢出污染环境、生产秩序需要长时间才能恢复、重要交通枢纽无法工作,经常用于国际活动的场所秩序混乱等的负荷。

(2) 二类负荷:是指中断供电将在政治、经济上造成较大损失的负荷,如造成主要设备损坏、产品大量报废或大量减产以及人员集中的公共场所秩序混乱等的负荷。

(3) 三类负荷:是指不属于一、二类负荷的其他负荷。

其中一类负荷对供电可靠性的要求最严格。负荷分类标准一般由各国行业标准规定。

(二) 负荷曲线

负荷一般是随时间变化的,描述负荷随时间变化的规律常用负荷曲线来表示。实际负荷曲线应是一条光滑的连续曲线,但由于在实际工程中,常采用定点(如整点,或每隔半小时或1小时)测量,或为分析问题的方便起见,负荷曲线一般采用折线法或阶梯法绘制。负荷曲线按负荷种类可分为有功功率负荷曲线和无功功率负荷曲线;按负荷对象可分为用电设备、车间、企事业单位、行业、县网、地区网、省网、区域网、电力系统等负荷曲线;按时间可分为日、周、月、季、年等负荷曲线。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

表示一天 24h 内负荷随时间变化的曲线,称为日负荷曲线,一般多采用有功功率日负荷曲线,如图 1-5 所示。图中,曲线的最高处称为日最大有功负荷 $P_{\max}$,简称最大负荷;最低处称为日最小有功负荷 $P_{\min}$,简称最小负荷。 $P_{\max}$ 和 $P_{\min}$ 表示了日有功负荷的上下限,最大负荷与最小负荷之差称为峰谷差。根据负荷曲线可计算用户在一天内所消耗的电能,即日用电量为

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

式 (1-1) 所得结果为有功负荷曲线下所包围的面积,单位为 kWh 或 MWh。日平均负荷定义为

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

为了反应负荷曲线的起伏变化情况,引入负荷率 γ 和最小负荷率 β 的概念,定义为

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

$$\beta = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \quad (1-4)$$

式 (1-3) 中的负荷率为日平均负荷与日最大负荷之比, γ 值小表明负荷曲线起伏大,发电机的利用率低。

在日负荷曲线中,将最小负荷以下的部分称为基荷,平均负荷以上的部分称为峰荷,中间部分称为腰荷,各部分如图 1-5 所示。

负荷曲线的形状与负荷类型、负荷组成、负荷特性、工作制度、生活规律、气候条件以及地域等因素有关。不同行业的负荷曲线相差很大,即使同一用户不同天的负荷曲线也可能有较大差别。如图 1-6 所示为 4 种不同行业的有功功率日负荷曲线。三班制连续生产的重工业负荷,如图 1-6 (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 1-6 (b) 所示的食品工业负荷,负荷变化的幅度较大,最小负荷仅为最大负荷的 13%。农业加工负荷如图 1-6 (c) 所示,农业加工负荷每天用电仅 12h。市政生活负荷如图 1-6 (d) 所示,其特点是有明显的照明用电高峰。

电力系统中的不同用户不会同时出现最大的负荷需求,所以电力系统的最大负荷小于各用户最大负荷之和。在确定电力系统的综合用电负荷时,可通过采用小于 1 的“同时系数”乘以所有用户最大负荷之和的方法得到。

日负荷曲线对电力系统的运行有很重要的意义,它是制定日发电计划、调度计划和供电计划,确定系统运行方式等的重要依据。

2. 年最大负荷曲线

年最大负荷曲线反应了一年 12 个月中最大负荷的变化规律,如图 1-7 所示。这种负荷

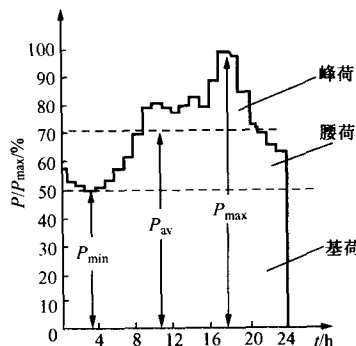


图 1-5 日有功负荷曲线

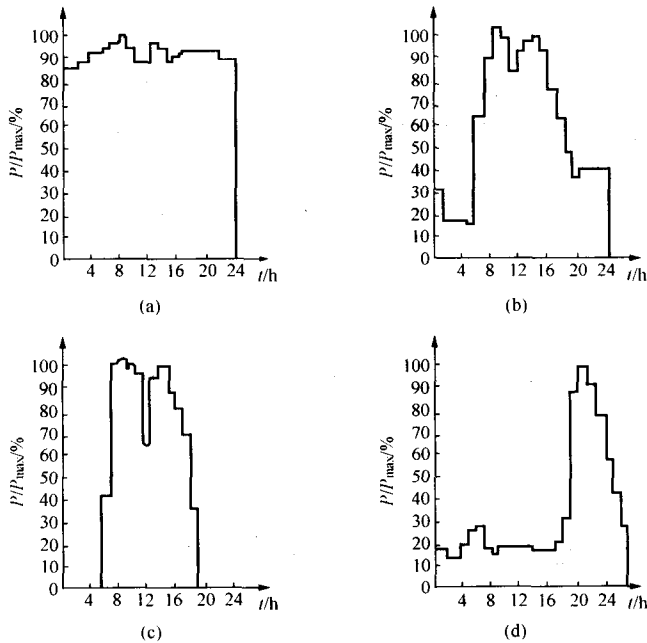


图 1-6 不同行业的有功功率日负荷曲线

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

曲线主要用来指导电力系统生产运行调度、安排机组和设备检修、新建或扩建机组或发电厂等。从图 1-7 中可看出，为了保证供电的可靠性，系统中装设的机组总容量应当大于系统的最大负荷，并保持足够的备用容量，即图中多出的部分。检修机组应安排在负荷最小的时段，而且随着负荷的增大，还应不断装设新的发电设备。

3. 年持续负荷曲线

年持续负荷曲线是按一年中系统负荷的数值大小及其持续小时数顺序排列绘制而成的。例如全年中，有 t_1 小时负荷值为 $P_1 (=P_{\max})$ ，有 t_2 小时负荷值为 P_2 ，有 t_3 小时负荷值为 P_3 ，可绘制出对应的年持续负荷曲线，如图 1-8 所示。

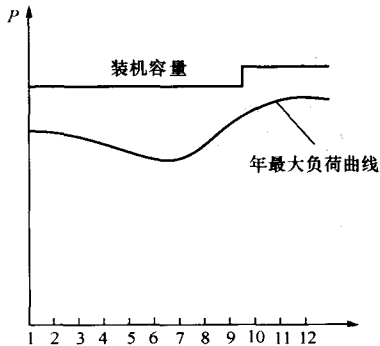


图 1-7 年最大负荷曲线

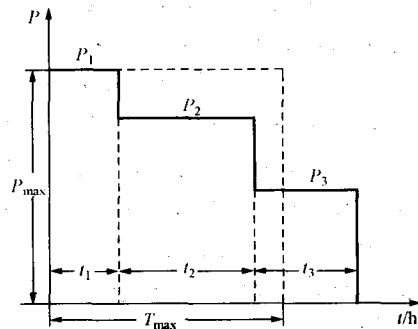


图 1-8 年持续负荷曲线

根据年持续负荷曲线可求出系统负荷的全年电能消耗量为

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

(1 - 5)

例如，如图 1 - 8 所示的年持续负荷曲线的系统负荷，全年电能消耗量为

$$W = \sum_{i=1}^n P_i t_i = \sum_{i=1}^3 P_i t_i$$

如果系统负荷按最大有功 $P_{\max}$ 运行，则在 $T_{\max}$ 时间内所消耗的电能，等于负荷全年的实际电能消耗量，即

$$P_{\max} T_{\max} = W = \int_0^{8760} P dt$$

式中： $T_{\max}$ 称为最大负荷利用小时数，单位为 h，可确定如下

$$T_{\max} = \frac{W}{P_{\max}} = \frac{\int_0^{8760} P dt}{P_{\max}}$$

(1 - 6)

根据电力系统运行经验统计，各类用户的最大负荷利用小时数有一个大致范围，如表 1 - 1 所示。

表 1 - 1 各类用户年最大负荷利用小时数

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

第二节 电力系统运行的特点与基本要求

一、电力系统运行的特点

电力系统运行的特点主要有以下几点。

1. 电能不能大量储存

目前电能还不能大量储存，电能的生产、输送、分配和消耗实际上是同时进行的，即发电厂任何时刻发出的电能（功率）必须等于该时刻用电设备消耗的和电网损失的电能（功率）之和。电力系统始终处于有功功率和无功功率的动态平衡之中，始终保持系统频率和各级电压在规定的范围之内。任何环节发生故障，都会影响系统的正常运行，这反映了电力系统运行的整体性和统一性。

2. 过渡过程非常短暂

电能是以电磁波的形式传播的，传播速度为 $3 \times 10^5 \text{ km/s}$ 。电力系统运行状态发生变化所引起的电磁和机电方面的过渡过程是十分短暂的。运行中的正常操作，如发电机、变压器、线路、用电设备的投入或退出，都是在瞬间完成的；电力系统中故障的发生、发展和造成影响所需的时间都十分短促。这些都反映了电力系统运行及其变化的快速性。

3. 影响因素众多

电力系统是由许许多多特性不同的电气设备组成的一个统一整体，各电气设备的可靠

性、运行特性和作用机理都会对电力系统的运行产生影响。在过渡过程中,这些设备之间的相互作用和连锁反应机理很复杂,尤其是现代电力系统,大量基于新器件、新技术的电气设备的接入,会给电力系统的运行带来影响。另外,还有大量的不确定性因素的影响,如负荷的随机变化、气候条件变化、设备失效等。电力系统是一个难以驾驭的系统。这些都反映了电力系统运行的复杂性。

4. 电能与国民经济各部门及人民生活关系密切

电能具有大量生产、远距输送、易于转换、使用灵活、控制方便等优点,国民经济各部门和人民生活广泛使用电能。随着社会现代化的发展,电气化程度愈来愈高,国民经济各部门和人民生活对电能的需求量会愈来愈多,依赖性会愈来愈强。因而电能供电的中断或不足,将影响国民经济的各个部门,给人民生活带来不便。没有电就没有现代物质生产和现代文明。这反映了电力系统运行的重要性。

二、电力系统运行的基本要求

根据电力系统运行的以上特点,对电力系统运行的基本要求如下。

1. 保证供电的可靠性

供电的中断将使生产停顿,生活混乱,甚至危及人身和设备的安全,给国民经济造成极大损失。停电给国民经济造成的损失远远超过电力系统本身的损失。因此,电力系统运行的首要任务是满足用户对供电可靠性的要求。

造成对用户停止供电的原因很多,可能是电力系统中的元件发生故障,如发电机、变压器、线路等发生故障,也可能是系统运行的全面瓦解,如电力系统稳定性破坏引起系统崩溃。前者属于局部故障,停电范围和造成的损失比较小;后者是全局性事故,停电范围大,恢复供电往往需要很长时间,造成的损失也很大。

保证供电的可靠性,就是要能连续不断地向用户提供质量合格的电能。为此,首先要求系统元件具有足够的可靠性。因为元件发生事故不仅直接造成供电中断,而且可能发展成全局性的事故。其次,要采取措施提高电力系统运行的稳定性,提高抗扰动能力,保证不发生或不易发生造成大面积停电的系统瓦解事故,如采用现代化的监测、控制和保护装置、提高电力系统的自动化技术水平等。再者,要不断提高运行人员的技术水平和责任心,防止误操作的发生,当系统发生异常或事故时,能迅速、正确地处理。

2. 保证良好的电能质量

电能作为一种特殊商品,也有其质量要求。衡量电力系统电能质量的主要指标有电压、频率和波形。电气设备是按额定电压和额定频率设计制造的,只有运行电压和频率在额定值的允许偏差范围内,并且波形符合要求,才能在技术经济上取得最佳的效果。否则,会对电力用户以及电力系统的安全、稳定和经济性带来不良的影响。因此,电力系统在运行中要将这些指标的参数限制在允许的范围之内,才能保证电能质量。

各国结合本国电力系统实际情况制定相应的电能质量标准。我国至2000年底已颁布电能质量系列标准5个,即GB 12325—1990《供电电压允许偏差》、GB 12326—2000《电压波动和闪变》、GB/T 14549—1993《公用电网谐波》、GB/T 15543—1995《三相电压允许不平衡度》、GB/T 15945—1995《电力系统频率允许偏差》。

(1) 频率。我国电力系统的标称频率为50Hz。频率偏差是指系统频率的实际值和标称值之差。根据电能质量标准要求,电力系统的正常频率偏差允许值为 $\pm 0.2\text{Hz}$ 。

(2) 电压。衡量电能质量的电压指标又分为电压偏差、电压波动、电压闪变和三相电压不平衡度。

电压偏差是指电压实际值与额定电压之差，常用百分值表示，按标准规定：35kV 及以上供电电压正、负偏差的绝对值之和不超过额定电压的 10%，如 $\pm 5\%$ ；10kV 及以下三相供电电压的允许偏差为额定电压的 $\pm 7\%$ ；220V 单相供电电压的允许偏差为额定电压的 $+7\%$ 、 -10% 。

电压波动和闪变是由波动负荷引起的电压的快速变动及人们对灯闪的明显感觉。电压波动的限值和电压变动的频度有关，电压波动的限值如表 1-2 所示。电压闪变的限值如表 1-3 所示。

表 1-2 电压波动限值

电压变动频度/ h^{-1}	$U_N \leq 1\text{kV}$	$1\text{kV} < U_N \leq 35\text{kV}$	$35\text{kV} < U_N \leq 220\text{kV}$
$r \leq 1000$	1.5%~4%	1.5%~4%	1.0%~3%
对于随机不规则的变动	2%	2%	1.5%

表 1-3 电压闪变限值

	$U_N \leq 1\text{kV}$	$1\text{kV} < U_N \leq 35\text{kV}$	$35\text{kV} < U_N \leq 220\text{kV}$
P_{st}	1.0	0.9 (1.0)	0.8
P_{lt}	0.8	0.7 (0.8)	0.6

注 1. 括号中的值仅适用于所有用户为同电压级的场合。

2. P_{st} 为短时间闪变； P_{lt} 为长时间闪变。

电力系统正常运行时要求其三相电压和电流是平衡的，但由于三相负荷的不相等以及电力系统三相元件的参数不相等等原因，使得电力系统三相电压经常出现不平衡状态。当三相电压的不平衡超过一定程度时也会造成许多危害。为衡量三相不平衡的程度，引入不平衡度 ϵ 。不平衡度为电压负序分量与正序分量的均方根值的百分比（有关正、负序分量的概念将在第九章介绍）。我国对三相电压允许不平衡度的规定为：正常允许 2%，短时不超过 4%；每个用户一般不得超过 1.3%。

(3) 波形。通常要求电力系统供电电压（或电流）的波形为正弦波。但是，随着现代工业的高速发展，电力系统的非线性负荷日益增多，如各种换流设备、变频装置、电弧炉、电气化铁道等非线性负荷遍及全系统；电视机、空调、节能等家用电器的使用越来越广泛。这些非线性负荷产生的谐波电流注入到电力网，使电网的电压波形产生畸变，包含了大量高次谐波，严重地污染了电网的环境，威胁着电网中各种电气设备的安全经济运行。

为了衡量波形的畸变程度，一般采用总谐波畸变率 THD 表示。总谐波畸变率定义为周期性交流量中的谐波含量的均方根值与其基波分量的均方根值之比，一般用百分数表示，具体可用电压总谐波畸变率或电流总谐波畸变率表示。我国各级电网谐波电压的限值如表 1-4 所示。

表 1-4 各级电网谐波电压限值

电压/kV	THD/%	奇次/%	偶次/%
0.38	5	4.0	2.0