

普通高等教育电气工程系列规划教材

# 电力工程基础

© 付敏 白红哲 吕艳玲 编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育电气工程系列规划教材

# 电力工程基础

付敏 白红哲 吕艳玲 编

图书在版编目(CIP)数据

电力工程基础 / 付敏, 白红哲, 吕艳玲 编. — 北京: 机械工业出版社, 2016.11.  
ISBN 978-7-111-24284-0

I. ①电… B. ①付… ②白… ③吕… III. ①电工—高等学校—教材

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第232830号

机械工业出版社(北京东长安街22号 邮政编码100027)  
编辑编辑: 王静雅 责任编辑: 王静雅 封面设计: 李静 责任印制: 李静  
北京机械工业出版社有限公司印刷  
2016年11月第1次印刷



机械工业出版社

北京市丰台区右安门外大街22号 邮编: 100027  
电话: (010) 68259553  
网址: www.cmp1932.com  
北京市丰台区右安门外大街22号 邮编: 100027  
电话: (010) 68259553  
网址: www.cmp1932.com

本书共分七章，第一章介绍电力系统的基本概念和基本知识，第二章讲述电力系统的电气接线、发电厂变电所的电气主接线及电力系统一次设备，第三章讲述输电线路和变压器的参数及等效电路，第四章讲述电力系统的潮流计算、无功功率平衡与电压调整、有功功率平衡与频率调整，第五章讲述电力系统短路电流的计算与分析，第六章讲述电力系统的稳定性问题，第七章介绍电力系统的继电保护与自动装置。每章后附有小结、复习思考题和习题。

本书可作为电气工程及其自动化专业的教材，还可作为电力类专业人员的培训教材。

# 电力工程基础

机械工业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电力工程基础/付敏, 白红哲, 吕艳玲编. —北京: 机械工业出版社, 2016. 11

普通高等教育电气工程系列规划教材

ISBN 978-7-111-54984-0

I. ①电… II. ①付… ②白… ③吕… III. ①电力工程-高等学校-教材  
IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 235830 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 王雅新 责任编辑: 王雅新 张利萍 责任校对: 肖琳

封面设计: 张静 责任印制: 李昂

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 14.25 印张 · 351 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-54984-0

定价: 32.00 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

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-88379649

网络服务

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

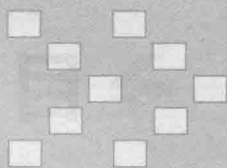
机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面防伪标均为盗版

# → 前 言 ←



本书是根据加强基础、拓宽专业知识面、减少理论教学学时以及增加实践学时的教学改革新要求而编写的。编者总结近 20 年的教学经验,结合当前电力系统日新月异的发展状况,针对电气类本科学学生确定了教材内容,书中涉及电力系统的基本概念、电网中各元件的参数及等效电路、电力系统的稳态分析与暂态分析、电力系统保护与控制等内容。为帮助学生在 学习过程中对知识的整体把握,书中在每章内加入了小结、复习思考题和习题。

本书共分七章。第一、五章由付敏编写,第二、六、七章由吕艳玲编写,第三、四章由白红哲编写。全书由付敏统稿、整理、审核。在本书编写过程中得到了哈尔滨理工大学电气与电子工程学院领导和教师的大力支持与帮助,在此表示衷心感谢。同时,向本书所引用的参考文献作者表示感谢。

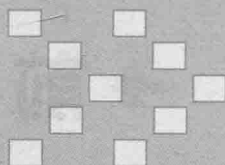
限于编写人员的水平,虽精心编写,广泛搜集素材,但书中仍难免存在缺点和不足,恳请广大读者批评指正,提出宝贵意见。

编 者

目录

第一章 绪论	1
第二章 电力系统的基本概念	10
第三章 电力系统的稳态分析	25
第四章 电力系统的暂态分析	45
第五章 电力系统保护	65
第六章 电力系统控制	85
第七章 电力系统稳定性	105

# 目 录



前言	1	复习思考题	136
第一章 电力系统概述	1	习题	136
第一节 电力系统的组成	1	第五章 电力系统短路电流的计算	138
第二节 电力系统的特点及要求	4	第一节 概述	138
第三节 电力系统的电压等级和选择	7	第二节 标幺制	140
第四节 电力系统负荷	9	第三节 无限大功率电源供电网络的三相短路电流计算	146
第五节 发电厂生产过程	12	第四节 有限容量系统供电网络三相短路电流的实用计算	151
本章小结	21	第五节 网络的变换与化简	155
复习思考题	21	第六节 利用运算曲线计算短路电流	158
第二章 电力系统接线及一次设备	23	第七节 对称分量法及序网络图	163
第一节 电力系统的接线方式	23	第八节 电力系统简单不对称短路的计算	173
第二节 电力系统的中性点接地方式	24	第九节 电力系统非全相的计算简介	179
第三节 发电厂和变电所的电气主接线	33	本章小结	181
第四节 电力系统一次设备	43	复习思考题	182
本章小结	51	习题	182
复习思考题	52	第六章 电力系统运行的稳定性	185
第三章 电网元件的参数计算及等效电路	53	第一节 概述	185
第一节 输电线路的结构	53	第二节 电力系统的功率特性	186
第二节 输电线路的参数计算及等效电路	61	第三节 简单电力系统的静态稳定性	190
第三节 变压器的参数计算及等效电路	68	第四节 电力系统的暂态稳定性	193
本章小结	76	本章小结	199
复习思考题	76	复习思考题	199
习题	77	第七章 电力系统保护与控制	201
第四章 电力系统稳态分析与计算	78	第一节 概述	201
第一节 电网元件的电压与功率损耗计算	78	第二节 电力系统继电保护的一般问题	202
第二节 开式电网的潮流计算	85	第三节 电力设备的继电保护	206
第三节 简单闭式电网的潮流计算	94	第四节 电力系统自动装置	213
第四节 电力系统无功功率平衡与电压调整	100	本章小结	217
第五节 电力系统有功功率平衡与频率调整	117	复习思考题	218
第六节 电力系统的经济运行	124	附录 短路电流周期分量计算曲线数字表	219
第七节 超高压远距离直流输电	129	参考文献	223
本章小结	135		

# 第一章

## 电力系统概述

### 第一节 电力系统的组成

#### 一、电力系统的组成

在电力工业发展的初期，由于对电能的需求量不大，发电厂都建设在用户附近，规模也小，而且孤立运行，各电厂间没有联系。随着工农业的发展和科学技术的进步，对电力的需求量和发电厂容量都在不断增大。为了节省燃料的运输费用，发电厂建设在蕴藏动力资源所在地，而这些地区往往远离电力用户。为了减少远距离电能输送过程中的功率损耗和电压损耗，需要提高输电电压，因此在发电厂和输电线路间必须建设升压变电所，实现电能的远距离输送。而当电能输送到负荷中心后，为满足用户对电压的要求，又必须经过降压变电所降压，及配电线路向用户供电。另外，随着用电量的增多，发电厂的数量也逐渐增多，同时电力用户对供电的可靠性也提出了更高的要求。于是，将彼此孤立运行的发电厂通过输电线路和变电所相互连接起来，形成现代的电力系统。图 1-1 所示为一个现代电力系统接线图。

在图 1-1 中，该电力系统由大容量的水力发电厂、火力发电厂和热电厂生产电能。其中，水力发电厂由于其容量大，输电距离远，因此将电压升高到 500kV 后经过双回输电线路送到变电所 1；火力发电厂 1 的电能升压至 220kV 后由线路送到变电所 3，并通过线路与 220kV 电网相连；火力发电厂 2 是建设在燃料产区的区域性火电厂，它所生产的电能通过 220kV 线路送往负荷中心；热电厂位于负荷附近，它除了发电外，还向周围的工厂及用户供热。由图可见，电力系统是由多个发电设备、输变电设备和用电设备等组成的系统，完成了电能的生产、输送、分配以及消费任务。具体说电力系统就是由发电机、变压器、输电线路和用电设备组成的系统。

交流电力系统都是三相输送电能的，但为了简单、清晰地表示设备之间的连接关系，同时系统正常运行时，三相系统是对称的，因此一般情况下常将其接线图画成单线的接线图。为了便于讨论分析，常用图 1-2 来描述一个简单的电力系统。

在电力系统中，通常将输送电能和分配电能的设备（输电线路和变电设备）组成的网络称为电网（简称电网）。由图 1-1 可清晰看到电网由输电线路以及由其所联系起来的各级变电所构成，在电力系统中，担负着对电能的输送和分配任务。通常按供电范围和电压等级可将电网分为三类：地方电网、区域电网和超高压远距离输电网。

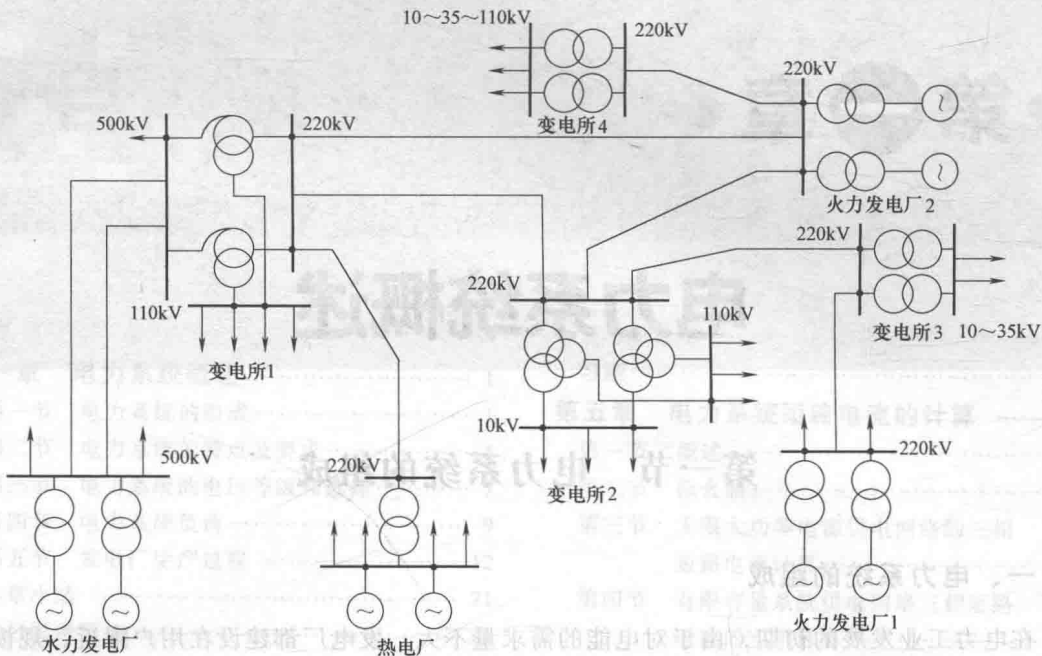


图 1-1 现代电力系统接线图

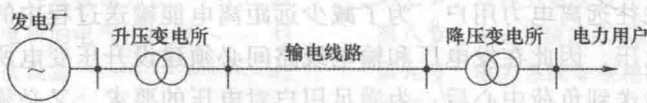


图 1-2 简单的电力系统

地方电网是指电压不超过 110kV、供电半径在 20 ~ 50km 以内的电网。一般城市、工矿区和农村配电网属于地方电网。

区域电网是指电压在 110 ~ 220kV、供电半径超过 50km 的电网。这类电网联系发电厂较多，目前，我国大部分省（自治区）的电网属于区域电网。

超高压远距离输电网是指电压在 330kV 以上，由远距离输电线路连接构成的电网。该类电网往往联系几个区域性电网形成跨省（自治区）的电网，如我国的东北、华北、华中等大区电力系统就属于这一类型。

变所在电网中起着变换和分配电能的作用，其除有升压和降压之分外，还可分为：区域变电所、地方变电所以及终端变电所等。

区域变电所（又称枢纽变电所），位于联系电力系统各部分的枢纽点，地位重要，电压等级为 330kV 及以上，进出线回路数多，一般汇集多个电源和大容量联络线。该变电所一旦停电，将引起整个系统解列，甚至造成部分系统瘫痪。枢纽变电所以对电力系统的稳定性和可靠性起重要作用。

地方变电所（又称二次变电所），是一个地区或一个中小城市的主要变电所，电压等级一般为 110 ~ 220kV，主要向地区或城市用户供电。该变电所停电将造成该地区或城市供电的紊乱。

终端变电所,是电力系统最末端的用户变电所,多数是工业企业变电所和城市居民小区、商业网点及农村的乡镇变电所,电压等级一般为 110kV,直接向一个局部地区用户供电,不承担转送功率任务。该变电所停电将造成用户供电的中断。

另外,考虑到火力发电厂的汽轮机、水力发电厂的水库以及核电站的反应堆等这些发电厂的动力设备,则有了动力系统这一概念。动力系统是指电力系统与发电厂的动力设备(火电厂的热力设备、热力网,水电厂的水力设备,核电站的反应堆等)构成的整体。

## 二、联合系统的优越性

将孤立运行的发电厂通过电网连接起来组成联合系统,这样并网运行在技术、经济上有如下几个明显的优越性。

(1) 减少备用容量的百分比 为了使在发电机发生故障及在机组检修时,系统不中断对电力用户的供电,即为了提高电力系统的供电可靠性,往往机组装机时都留有备用容量(备用容量是装机容量与最大负荷之差)。由于备用容量在联合系统中可以共同享有,因此系统容量越大,备用容量在总装机容量中所占的百分比也就越小。

(2) 可以采用大容量高效率的发电机组 大容量机组效率高,运行费用少,占地面积小。从供电可靠性及经济性考虑,孤立运行的电厂由于没有足够的备用容量,因此不能采用大容量机组,否则,一旦机组因检修或故障而退出运行,将造成电网的大面积停电,给国民经济带来巨大损失。对于联合电力系统,由于拥有足够的备用容量,可采用高效率的大容量机组。

(3) 可充分利用水电厂的水力资源 水电厂发电有很强的季节性,这是因为水力资源受季节的影响大。在夏、秋丰水期水量大,水电厂可多生产电能;在冬、春枯水期水量小,水电厂只能承担少量的发电任务。如果水、火电厂组成联合电力系统,丰水期时水电厂多发电,火电厂少发电,并安排火电厂机组检修;枯水期时火电厂多发电,水电厂少发电,并安排水电厂机组检修。这样既充分利用了水力资源,又减少了化石能源的消耗,提高了经济性,实现了低碳环保。另一方面,水电机组起动方便,宜于作为调频电厂,减少火电机组调频时的起动煤耗,从而也提高火电厂效率。

(4) 可减小系统总装机容量 不同地区由于生产、生活以及时间、季节等各种条件的差异,最大负荷出现时间各不相同,当组成联合系统后,系统总负荷的最大值小于系统内所有负荷最大值之和,从而减小了系统装机容量,提高了系统的经济性能。

(5) 可提高供电可靠性 电力系统中有大量的发电机、变压器、输电线等电力设备,这些设备在运行中不可避免会发生故障,单台机组故障对用户供电没有影响或者影响不大,而多台机组同时故障或系统瓦解的概率很小。组成联合系统后,提高了系统的供电可靠性。

由上可知,采用联合系统显著地提高了电力系统运行的可靠性和经济性。因而,世界各国电力系统的规模越来越大,有的发达国家已经形成了全国统一的电力系统,甚至相邻国家之间也建立了互联的电力系统。但需要指出的是,随着电力系统的日益增大、联系的不断紧密,也越容易发生因系统内一处故障处理不及时或处理错误,而引起其他地区随之发生故障的现象。近二、三十年来世界上发生的几次著名大停电事故,都是由于这种事故波及所导致的。可见,系统的规模并不是在所有场合下都是越大越好,而是应该依据实际条件以适当的方式建立联合系统。



### 三、电力系统的基本参数

描述一个具体电力系统采用下面的基本参数:

(1) 总装机容量 系统中实际安装的所有发电机组额定有功功率总和,单位为 kW (千瓦)、MW (兆瓦)、GW (吉瓦)。

(2) 年发电量 系统中所有发电机组全年实际发出的电能总和,单位为 kW·h (千瓦时)、MW·h (兆瓦时)、GW·h (吉瓦时)、TW·h (太瓦时)。

(3) 最大负荷 在规定时间内(一天、一月或一年)内,系统总有功功率负荷的最大值,单位为 kW (千瓦)、MW (兆瓦)、GW (吉瓦)。

(4) 年用电量 接在系统上所有用户全年所用电能的总和,单位为 kW·h (千瓦时)、MW·h (兆瓦时)、GW·h (吉瓦时)、TW·h (太瓦时)。

(5) 额定频率 我国规定的交流电力系统的额定频率为 50Hz,国外则有额定频率为 60Hz 和 25Hz 的电力系统。

(6) 最高电压等级 指系统中最高电压等级的电力线路的额定电压,单位为 kV (千伏)。

## 第二节 电力系统的特点及要求

### 一、电力系统的特点

电能在生产、输送、分配及使用过程中表现出与其他工业部门产品有明显的不同,即电力系统具有以下几个特点:

(1) 电能不能大量储存 电能的生产、输送、分配和使用是同时完成的。发电厂任意时刻所发出的电量取决于电力用户在同一时刻使用的电量和电力系统自身损耗的电量,即电力系统中功率时时保持平衡。因而电力系统中任何环节发生元件故障都将会影响电力系统的正常工作。

迄今为止尽管人们对电能存储进行了大量的研究,并在一些电能的储存方式上,如抽水蓄能、飞轮储能、压缩空气储能以及化学电池储能等有了某些突破性的进展,但仍没有完全解决经济、高效、大容量的电能储存问题。因此,电能不能大量储存是电能生产的最大特点。

(2) 过渡过程非常迅速 电能是以电磁波的形式传播的,其传播速度为光速(300km/ms),因此运行过程中任何变化引起系统在电磁和机电方面的过渡过程都十分短暂。发电机、变压器、输电线路以及电力设备的投入或退出运行、负荷的增减都在瞬间完成,电力系统发生异常和故障所引发的过渡过程更是非常短暂,往往用微秒( $\mu\text{s}$ )、毫秒(ms)甚至纳秒(ns)来计量。因此,不论是正常运行时所进行的调整和切换操作,还是故障时所做的切除及恢复操作,必须采用先进的信息控制技术和各种自动装置来迅速、准确地完成。

(3) 与国民经济各部门及人民生活关系极为密切 由于电能具有易于集中生产、便于远距离输送、易于转换成其他形式能量等优势,电能已经成为国民经济各部门以及人民生活

不可或缺的能源，如果电能供应不足或突然停电将给国民经济造成巨大损失，给人民生活带来不便。

(4) 具有明显的地区性特点 由于各个电力系统的能源结构、负荷结构不同，因而各个电力系统的组成也各不相同，甚至是完全不同。

## 二、电力系统运行的要求

由于电力系统具有上述特点，对其提出了以下基本要求。

### 1. 保证供电的可靠性

这是电力系统运行的首要任务，保证供电可靠性就是不间断地向用户供电。电力系统运行过程中，由于设备受自然灾害或人为误操作等原因的影响，不可避免地会发生各种各样的故障，轻者造成局部停电损失，重者导致设备损坏或大面积停电，造成经济上的严重损失和政治上的不良影响。因此，电力系统的各个部门应加强现代化管理，提高设备的运行和维护质量，尽可能避免系统发生故障，一旦发生故障也要尽量缩小故障影响的范围。应当指出，目前绝对防止故障的产生是不可能的，并且各种用户对供电可靠性的要求也不一样。因此，应根据电力用户的重要性不同，区别对待，以便在事故情况下把给国民经济造成的损失限制到最小。从实际出发，通常将电力用户分为三类：

第一类用户：停电会造成人身伤亡，设备损坏，产品报废，生产秩序长时间不易恢复，或在政治上给国家造成重大损失的用户。这类用户要求有很高的供电可靠性。对该类用户通常应设置两路或以上相互独立的电源供电，其中每一路电源的容量均应保证在此电源单独供电的情况下能满足用户的用电要求。确保当任一一路电源发生故障或检修时，都不会中断对用户的供电。

第二类用户：如果中断供电会造成大量减产，工人窝工，城市公共事业及人民生活受到影响的用户。对该类用户应设专用供电线路，条件许可时也可采用双回路供电，并在电力供应出现不足时优先保证其电力供应。

第三类用户：一般指不属于第一类、第二类的其他用户，短时停电不会给这类用户造成严重后果，如小城镇、小加工厂及农村用电等。

当系统发生事故，出现供电不足的情况时，应当首先切除三类用户的用电负荷，以保证一、二类用户的用电。需要指出的是，用户的重要程度不是一成不变的，如农业用户，在平时是第三类电力用户，允许短时间停电，但当发生洪涝或严重干旱时，必须按第一类用户对待，保证向其不间断供电。

### 2. 保证良好的电能质量

频率、电压和电压波形是电能质量的三个基本指标。当系统的频率、电压和波形不符合电气设备的额定值要求时，往往会影响设备的正常工作，危及设备和人身安全，影响用户的产品质量等。因此为保证电力系统安全经济可靠运行，国家提出系统所提供的电压、频率和电压波形必须在所允许的变化范围内。

(1) 电压 电力系统各点的实际运行电压允许在一定程度上偏离其额定电压，在这一允许偏离范围内，各种电力设备及电力系统本身仍能正常运行。我国目前所规定的用户供电电压允许的电压变化范围，见表 1-1。

表 1-1 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

由于输电过程中存在电压损耗,电网中各节点的电压将随着运行方式的改变而发生变化,为了保证电压质量满足要求,需要采取一定的调压措施,有关这方面的内容将在第四章第四节无功功率平衡与电压调整中进行介绍。

(2) 频率 目前世界上大多数国家规定的额定频率为 50Hz (美国为 60Hz),而各国对频率变化的容许偏差规定不一,有的国家规定不超过  $\pm 0.5$ Hz,也有一些国家规定为不超过  $\pm (0.2 \sim 0.5)$  Hz。我国的技术标准规定电力系统的额定频率为 50Hz,大容量系统允许频率偏差为  $\pm 0.2$ Hz,中小容量系统允许频率偏差为  $\pm 0.5$ Hz。

由电机理论可知,在并联运行的电力系统中,系统内所有机组在任一瞬间的频率值是一致的。在稳定运行情况下,频率值取决于所有机组的转速,而机组的转速则主要决定于输入、输出功率的平衡情况。所以,要保证频率的偏差不得超过规定值,就要通过一定的调频措施,保持电源与负荷间的有功功率平衡。有关这方面的内容将在第四章第五节有功功率平衡与频率调整中进行介绍。

(3) 波形 规定电力系统给用户供电的电压波形为正弦波形。系统中尽管发电机发出符合标准的正弦波形,但由于系统中有许多电压与电流成非线性关系的电气元件(如电弧炉、电焊设备等),都是电力系统谐波电流和电压的来源,特别是电力电子装置大量使用后系统中产生了大量谐波,造成系统电压波形的畸变,从而使供电的电压达不到正弦波形。

电压波形质量用波形总畸变率来表示,正弦波的畸变率是指各次谐波有效值二次方和的方均根值占基波有效值的百分比。要求 380V/220V 线路电压波形总畸变率不大于 5%,其他情况下电压波形总畸变率不大于 4%。

为保证电能质量,必须采取措施对谐波进行抑制或补偿。

### 3. 保证充足的电力

最大限度地满足用户的电力需求,为国民经济的各部门提供充足的电力。为此,首先应按照电力先行的原则做好电力系统发展的规划设计,认真搞好电力建设,以确保电力工业的建设优先于其他的工业部门。其次,还要加强现有设备的维护,以充分发挥潜力,确保足够的备用容量,以防止事故的发生。

### 4. 保证电力系统运行的经济性

要使电能在生产、传输和分配过程中损耗小、效率高,以期最大限度地降低电能成本。电能成本的降低不仅会使各用电部门的成本降低,更重要的是节省了能量资源,因此会带来巨大的经济效益和长远的社会效益。为了实现电力系统的经济运行,除了进行合理的规划设计外,还须对整个系统实施最佳经济调度,实现火电厂、水电厂及核电厂负荷的合理分配,同时还要提高整个系统的管理技术水平。

概括地说对电力系统的基本要求就是:保证对用户不间断地供给可靠、优质、充足而又

价廉的电能。

### 第三节 电力系统的电压等级和选择

#### 一、电力系统的电压等级

电力系统中的电机、变压器和用电设备都是按一定的标准电压设计和制造，这些设备只有在标准电压下运行时，其技术性能和经济性能才是最好的，也才能保证安全可靠运行，这个标准电压就是通常所说的额定电压。另一方面，为使电力工业和电工制造业的生产标准化、系列化和统一化，世界上的许多国家和有关国际组织都制定了关于额定电压等级的标准。电压等级指的是电力系统及电力设备的额定电压级别系列。表 1-2 给出了我国国家标准所规定的额定电压。

表 1-2 国家标准 (GB) 所规定的额定电压

用电设备额定电压 /kV	交流发电机额定电压 /kV	变压器额定电压/kV	
		一次绕组	二次绕组
3	3.15	3 及 3.15	3.15 及 3.3
6	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6
10	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11.0
—	13.8, 15, 75, 20	13.8, 15, 75, 20	—
35	—	35	38.5
63	—	63	69
110	—	110	121
220	—	220	242
330	—	330	363
500	—	500	525 及 550
750	—	750	825

注：1. 变压器一次绕组栏内的 3.15、6.3、10.5、15、75kV 电压适用于与发电机端直接连接的升压变压器。

2. 变压器二次绕组栏内的 3.3、6.6、11kV 电压适用于短路阻抗值在 7.5% 以上的变压器。

3. 现在正在研究新增设的 1000kV 特高压电压等级，以加强西电东送、全国联网。

目前我国常用的电压等级有：220V、380V、3kV、6kV、10kV、35kV、110kV、220kV、330kV、500kV、750kV 和 1000kV。

从表 1-2 可见，电力系统内同一电压等级电气设备的额定电压不相同。

#### 二、电网及电力设备额定电压的确定

为了适应各种电气设备对额定电压的需求，电力系统对各设备的额定电压做出了相应的规定，以使电网的额定电压和电气设备的额定电压相一致。

##### 1. 电网额定电压

规定电网的额定电压和用电设备的额定电压相同。

##### 2. 电力线路额定电压

如图 1-3a 所示，线路 ab 有功率通过时，由于线路阻抗的存在使得线路首、末两端的电压不等，且首端电压  $U_a$  高于末端电压  $U_b$ ，沿线路 ab 的电压分布如图 1-3a 所示，接在线路

中的用电设备  $LD_1 \sim LD_5$  所承受的电压各不相同, 为使用电设备所承受的电压尽量与其额定电压相接近, 应取线路的平均电压  $U_{av} = (U_a + U_b)/2$  等于用电设备的额定电压, 即线路的额定电压也与用电设备的额定电压相同。

由于通常允许用电设备实际工作电压偏离额定电压  $\pm 5\%$ , 而电力线路从始端到末端的电压损耗一般为  $10\%$ , 因此, 通常使线路首端电压比额定电压高  $5\%$ , 而线路末端电压比额定电压低  $5\%$ 。这样, 接在线路任一点处的用电设备所承受的电压均不超过额定电压的  $\pm 5\%$ 。

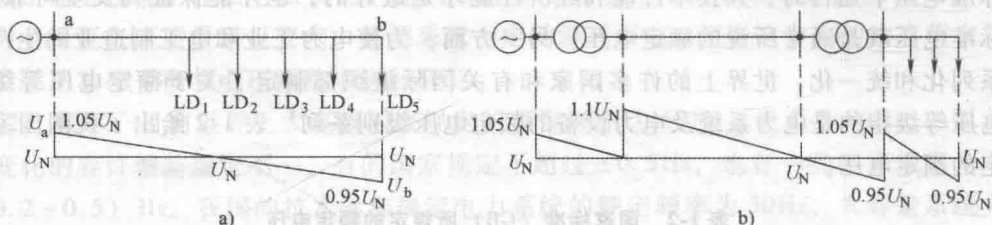


图 1-3 电网中电压的分布

### 3. 发电机额定电压

发电机总是接在线路的首端, 因此发电机的额定电压比所接线路的额定电压高  $5\%$ 。

### 4. 变压器额定电压

电力变压器在输变电过程中具有供电设备和用电设备的双重作用。变压器一次绕组连接电源或发电机, 接收电能, 相当于用电设备; 变压器二次绕组连接负荷, 向负荷提供电能, 相当于发电机, 或供电设备。因此, 变压器一次绕组额定电压应等于用电设备的额定电压。但需要注意的是, 对于直接与发电机连接的变压器一次绕组额定电压应等于发电机的额定电压, 使之相互配合。变压器二次绕组的额定电压是指变压器空载运行时的电压。当变压器在额定负载下运行时, 其内部阻抗会造成大约  $5\%$  的电压损耗。为使变压器在额定负载下工作时, 二次绕组的电压比同级电网的额定电压高  $5\%$ , 规定变压器二次绕组的额定电压比电力系统额定电压高  $10\%$ 。若变压器阻抗较小, 内部电压损耗也较小, 则规定这类变压器二次绕组额定电压仅比用电设备额定电压高  $5\%$ 。

由上述规定, 当线路上接有升压变压器和降压变压器, 并在额定负荷下运行时, 沿线路的电压分布情况如图 1-3b 所示。

为了适应电力系统运行调节的需要, 通常在变压器的高压绕组上设计制造有分接抽头。分接抽头用百分数表示, 即表示分接头电压与主抽头电压的差值占主抽头电压的百分数。对于同一电压等级的变压器, 当用作升压变压器和降压变压器时, 即使分接头百分值相同, 分接头的电压也不同。如图 1-4 所示为连接于  $220\text{kV}$  和  $10\text{kV}$  电压等级下具有分接头  $(1 \pm 2 \times 2.5\%) U_N$  的升压、降压变压器分接头额定电压。

## 三、电力系统电压等级的选择

在规划设计时, 输配电网额定电压的选择又被称为电压等级的选择。三相交流输电线路传输的有功功率  $P = \sqrt{3} UI \cos\varphi$ , 输送功率一定时, 线路的电压越高, 线路中的电流就越小。由于减小了电流, 一方面使得线路上的功率损耗、电能损耗以及电压损耗相应减小, 另

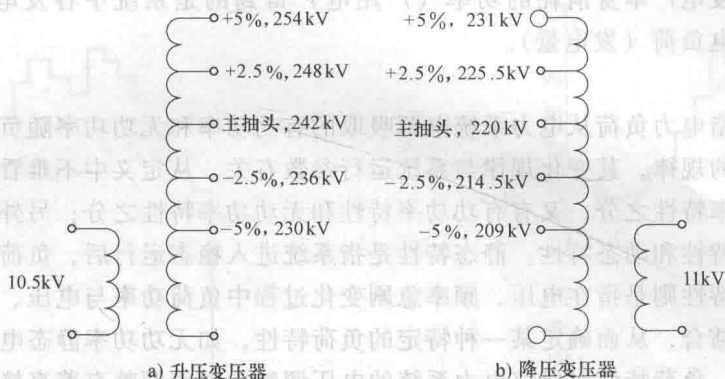


图 1-4 变压器分接头额定电压

一方面可以减小输电导线的横截面积，从而节约了有色金属用量，降低了导线的成本。但是，电压越高，要求线路的绝缘水平越高，输电线路的走廊加宽，杆塔的几何尺寸也将随着导线之间的距离和导线对地之间距离的增加而加大。这样增加了线路的投资和杆塔的材料消耗。同时，线路两端变电站内的变压器以及断路器等设备的投资也将随电压的升高而增加。所以，电压等级的选择是关系到电力系统建设费用高低、运行是否方便、设备制造是否经济合理的一个综合性问题，因而是较为复杂的问题。根据以往的设计和运行经验，我国电网的额定电压、输电距离和传输功率之间的大致关系见表 1-3，该表可供选择电网额定电压时参考。

表 1-3 电网的额定电压、输电距离与传输功率的关系

额定电压 /kV	传输功率 /kW	输电距离 /km	额定电压 /kV	传输功率 /kW	输电距离 /km
6	100 ~ 1200	4 ~ 15	220	100000 ~ 500000	100 ~ 300
10	200 ~ 2000	6 ~ 20	330	200000 ~ 1000000	200 ~ 600
35	2000 ~ 10000	20 ~ 50	500	600000 ~ 1500000	400 ~ 1000
110	10000 ~ 50000	50 ~ 150			

## 第四节 电力系统负荷

### 一、负荷的基本概念与负荷特性

#### 1. 负荷的基本概念

电力系统中接有数量众多、千差万别的用电设备，这些用电设备包括异步电动机、同步电动机、各类电炉、整流设备、电力电子设备、信息技术设备、家用电器设备以及照明设备等。通常，把用户的这些用电设备所消耗的功率（或电能）称为“负荷”。其中，电功率分为有功功率和无功功率，负荷也分为有功负荷和无功负荷。电力系统的综合用电负荷就是系统中所有用电设备消耗功率的总和；另外，综合用电负荷加上网络中线路和变压器所损耗的功率得到的就是系统中各发电厂应供应的功率，称其为电力系统的供电负荷（供电量）。供

电负荷再加上各发电厂本身消耗的功率（厂用电）得到的是系统中各发电机应发的功率，即电力系统的发电负荷（发电量）。

## 2. 负荷特性

负荷特性是指电力负荷从电力系统电源吸取的有功功率和无功功率随负荷端电压及系统频率变化而改变的规律，其变化规律与系统运行参数有关。从定义中不难看出，负荷特性既有电压特性和频率特性之分，又有有功功率特性和无功功率特性之分；另外，负荷特性还可进一步分为静态特性和动态特性。静态特性是指系统进入稳态运行后，负荷功率与电压或频率的关系；动态特性则是指在电压、频率急剧变化过程中负荷功率与电压、频率的关系。将上述三种特征相结合，从而确定某一种特定的负荷特性，如无功功率静态电压特性、有功功率静态频率特性。负荷特性对研究电力系统的电压调整、频率调整有着直接的联系。

## 二、负荷曲线

用户用电设备的起动或停止对电力系统而言完全是随机的，因此负荷也是随机的，但从长时间来看却显示出某种程度的规律性。例如某些负荷随季节（冬、夏季）、企业工作制（一班或倒班作业）的不同而出现一定程度的变化。负荷变化的规律性可用负荷曲线来描述。所谓负荷曲线就是指在某一时间内用电设备有功、无功负荷随时间变化的图形。负荷曲线有多种形式：按负荷种类分，可分为有功负荷曲线和无功负荷曲线，常用的是有功负荷曲线（如无特殊说明，一般所提到的负荷曲线均指的是有功负荷曲线）；按时间段的长短分，可分为日负荷曲线、年负荷曲线等；按计量地点可以分为用户、电力线路、变电所、发电厂和电力系统的负荷曲线。下面介绍几种常用的负荷曲线。

### 1. 日负荷曲线

日负荷曲线是用来反映一天内（0~24h）负荷随时间的变化情况，是制定各发电厂发电负荷计划及系统调度运行的依据。典型的日负荷曲线如图 1-5 所示，负荷曲线中的最大值称为日最大负荷  $P_{\max}$ （峰荷），最小值称为日最小负荷  $P_{\min}$ （谷荷），而把最小负荷以下的部分称为基本负荷，显然，基本负荷不随时间变化。

根据负荷曲线可以求出系统中用户的日用电量为

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

为了反映负荷曲线的起伏情况，引入一个负荷率  $K_p$  的概念，其定义为

$$K_p = \frac{P_{av}}{P_{\max}} \quad (1-2)$$

式中， $P_{av}$  为日平均负荷， $P_{av} = W/24$ 。

负荷率  $K_p$  值小，表明负荷曲线起伏变化大，发电机的利用率较差。

无功负荷也在一天中不断变化，图 1-6 给出了日无功负荷曲线。对比同一负荷的有功功率和无功功率日负荷曲线（图 1-5 和图 1-6），可见，这两类负荷曲线不完全相似，因为一日之内功率因数是变化的，在低负荷时功率因数相对较低，而在高峰负荷时功率因数较高。另外，无功功率与有功功率的最大负荷不一定同时出现。

对于不同性质的用户，其负荷曲线也各不相同。负荷曲线的变化规律取决于负荷的性质、厂矿企业的生产制度以及用电地区的地理位置、当地气候条件和人民生活习惯等。

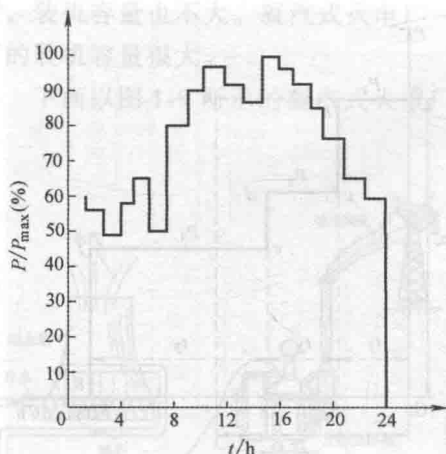


图 1-5 日负荷曲线

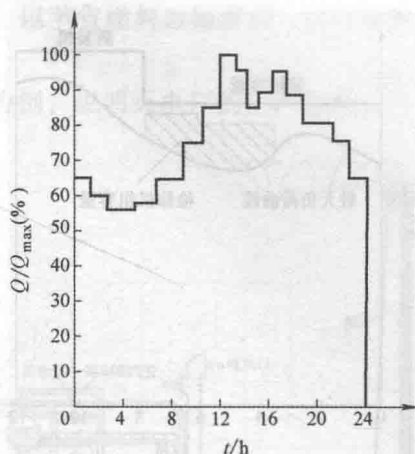


图 1-6 日无功负荷曲线

由于电力系统中各用户的日最大负荷不会在同一时刻出现, 最小负荷也不会出现在同一时刻。因此, 系统的最大负荷小于各用户最大负荷之和 (将各用户最大负荷相加, 再乘以小于 1.0 的同时率, 即为系统的最大负荷), 而系统的最小负荷总大于各用户最小负荷之和。于是, 尽管系统中不同用户的负荷曲线变化较大, 但系统的负荷曲线却相对平坦。

## 2. 年最大负荷曲线

在电力系统运行和设计中, 不仅要知道一日的负荷变化规律, 而且也要知道一年内负荷的变化规律。图 1-7 给出的是常用的年最大负荷曲线, 该曲线反映的是一年 12 个月内, 每个月最大负荷变化的规律。在图中, 夏季照明负荷普遍减小, 负荷曲线在该季节出现了低谷, 年终时由于各工矿企业为超额完成年度计划而增加生产, 以及新建、扩建厂矿投入生产等原因使得该时段的负荷较其他时段大。由此可见, 利用年最大负荷曲线来安排发电设备的检修计划, 同时为制订发电机组或发电厂的扩建或新建计划提供依据。

## 3. 年持续负荷曲线

年持续负荷曲线是将一年中系统负荷按其大小及其累计时间顺序排列而成的曲线, 如图 1-8 所示。可见, 在全年 8760h 中,  $t_1$  时间内的负荷为  $P_1$ ,  $t_2$  时间内的负荷为  $P_2$ ,  $t_3$  时间内的负荷为  $P_3$ , 其中  $P_1 = P_{\max}$ 。这种负荷曲线常用于安排发电计划、电网能量损耗计算、可靠性估算等方面。

根据年持续负荷曲线, 可以确定系统全年的耗电量为

$$W = \int_0^{8760} P dt \quad (1-3)$$

也可确定电力系统最大负荷利用小时数  $T_{\max}$ 。通过全年实际消耗的电量, 求出最大负荷利用小时数, 即

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

在图 1-8 所示的年持续负荷曲线中, 若使矩形面积  $Oa h_i$  等于面积  $Oabcdefg$ , 则  $O_i$  代表的时间即为  $T_{\max}$ 。



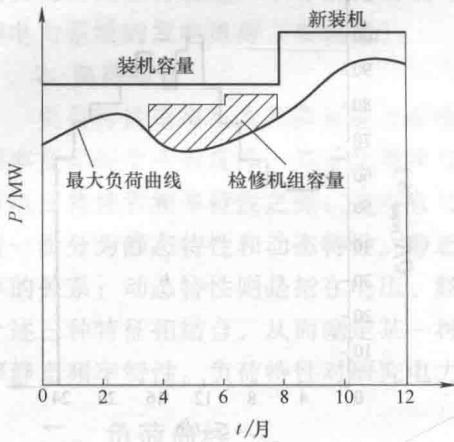


图 1-7 年最大负荷曲线

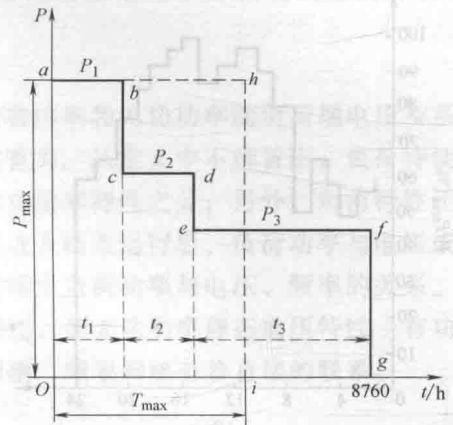


图 1-8 年持续负荷曲线

不难发现，如果负荷在一年中变化不大，负荷曲线平坦，那么最大负荷利用小时数  $T_{\max}$  就大；如果一年中负荷变化大，负荷曲线变化也大，那么该负荷的  $T_{\max}$  就相对较小。根据运行经验，不同性质的用户、不同的生产班次其最大负荷利用小时数  $T_{\max}$  都有一个大致 的范围，见表 1-4。

表 1-4 各类用户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
农业用电	1000 ~ 1500

在未知用户实际负荷曲线的情况下，依据该用户的用电性质，从表 1-4 中选择相应的值，结合已知的该用户最大负荷，即可近似估算出其全年用电量。

## 第五节 发电厂生产过程

发电厂是电能的生产者，它将化石能源（煤、石油、天然气）、自然能源（水能、风能、太阳能等）以及核能源等这些一次能源转换为易于传输、便于使用的电能。下面对各类型发电厂的电能生产过程做简略介绍。

### 一、火力发电厂

将煤、石油、天然气等作为燃料的发电厂称为火力发电厂，简称火电厂。该类电厂通过燃烧燃料将燃料内储存的化学能转换为热能，再借助于汽轮机等热力机械将热能变换为机械能，最后再由发电机将机械能变为电能。火电厂在系统中所占比重最大。

火电厂可分为凝汽式火电厂和热电厂。凝汽式火电厂是单一生产电能的电厂，而热电厂既生产电能，又向用户提供热能。由于供热距离不能很远，一般热电厂建在临近热负荷的地