



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANLI XITONG FENXI

电力系统分析

(第二版)

陈立新 杨光宇 编著



中国电力出版社

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

Electric Power Technology



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANLI XITONG FENXI

电力系统分析

(第二版)

编著 陈立新 杨光宇
主审 王大鹏 张 红



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书重点讲解电力系统短路电流的计算及其计算机算法,潮流计算及其计算机算法,调压计算、调频计算和经济运行的计算,对电力系统的静态稳定性和暂态稳定性也做了一定的讲解。每章都有一定数量的例题,以便于教师授课和学生的学习。本书着重于基本概念和基本计算方法的阐述,编者根据培养应用型人才的需要,力求理论与实践相结合。鉴于计算机的普及应用,本书对潮流计算的计算机算法也做了详细的叙述。

本书可作为高职高专院校电力技术类专业教学用书,也可作为从事相关工作的工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统分析/陈立新,杨光宇编. —2版. —北京:中国电力出版社,2009

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高职高专教育

ISBN 978-7-5083-8469-6

I. 电… II. ①陈…②杨… III. 电力系统—分析—高等学校:技术学校—教材 IV. TM711

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第018215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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2005年12月第一版

2009年3月第二版 2009年3月北京第三次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 15印张 363千字

定价 24.00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

本教材着重于基本概念和基本计算方法的阐述,是编者根据培养应用型人才的需要,力求理论与实践相结合,同时博采其他教材之长而编写的。

本教材首先对电力系统的基本概念进行了论述,力求简单明了,同时对电力系统中性点的运行方式和电力系统的等效电路做了详尽的说明。潮流计算是电力系统分析中最基本的计算,它的任务是在给定的条件下,确定电力系统的运行状态。这是电力系统调压、规划、经济运行的基础。鉴于计算机的普及应用,本教材对潮流计算的计算机算法也做了详细的叙述。电力系统短路是系统最严重的事故之一,本教材分别对三相短路、不对称短路、非全相断线进行循序渐进的分析,由浅入深,使读者比较容易接受掌握。调频和调压也是本教材的重点,分别讨论了有功功率与系统频率、无功功率与节点电压的辩证关系。经济运行部分则以等微增率准则为主线,分别讨论了各发电厂的最佳有功出力和无功功率的最优布点等问题。本教材的最后讨论了电力系统的稳定性。

本教材的第3~11章由山东电力高等专科学校陈立新编写,第1、2章由哈尔滨电力职业技术学院的杨光宇编写。全书由陈立新统稿。

本教材由山东电力研究院的王大鹏高工主审,并提出许多宝贵意见,谨致谢意。

限于编者的经验和水平,书中的错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2008年12月

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
1.2 电力系统的额定电压	4
1.3 电力系统负荷	6
1.4 电力系统中性点的运行方式	10
1.5 电力线路的结构	13
第2章 电力系统的计算基础	19
2.1 架空线路的参数及其等效电路	19
2.2 变压器的参数及其等效电路	24
2.3 同步发电机和负荷的参数及其等效电路	30
2.4 标么制	32
2.5 电力系统的等效电路	34
第3章 电力系统短路的基本知识	40
3.1 短路的一般概念	40
3.2 网络的变换和化简	42
3.3 转移电抗和输入电抗	44
3.4 电流分布系数	45
第4章 电力系统的三相短路	47
4.1 无穷大电源的三相短路	47
4.2 三相短路电流的实用计算	52
4.3 短路电流周期分量的近似估算	56
4.4 应用计算曲线求任意时刻短路点的短路电流	58
第5章 电力系统的不对称短路	64
5.1 对称分量法	64
5.2 电力系统元件的序参数	69
5.3 各序网络的制订	74
5.4 简单不对称短路的分析计算	78
5.5 非故障处电流、电压的计算	84
5.6 不对称短路时计算曲线的应用	90
5.7 非全相断线的分析计算	92
第6章 电力系统的潮流计算	97
6.1 概述	97

6.2	电力网中的电压计算	97
6.3	电力网的功率损耗	100
6.4	开式网络的潮流计算	102
6.5	闭式网络的潮流分析	105
第7章	电力系统潮流的计算机算法	113
7.1	概述	113
7.2	潮流计算的数学模型	113
7.3	网络方程式	118
7.4	潮流计算的限制条件	125
7.5	迭代法的潮流计算	127
7.6	牛顿—拉夫逊法潮流计算	130
第8章	电力系统的无功功率和电压调整	141
8.1	概述	141
8.2	电力系统的无功功率平衡	143
8.3	电力系统的电压管理	147
8.4	发电机调压	150
8.5	改变变压器变比的电压调整方式	150
8.6	利用无功功率补偿调压	155
8.7	通过改善线路参数调压	159
第9章	电力系统的有功功率和频率调整	162
9.1	概述	162
9.2	电力系统的有功功率平衡	163
9.3	电力系统的频率特性	164
9.4	电力系统的频率调整	168
9.5	各发电厂之间有功负荷的合理分配	175
第10章	电力系统的经济运行	178
10.1	概述	178
10.2	电力网中电能损耗的近似计算	178
10.3	降低网损的技术措施	181
10.4	火电厂之间发电机有功出力的最优分配	186
10.5	电力系统中无功功率的最优分布	189
第11章	电力系统的稳定性	195
11.1	概述	195
11.2	各发电机转子之间的相对位置	195
11.3	发电机的转子运动方程	197
11.4	电力系统的功角特性	199
11.5	电力系统的静态稳定性	201
11.6	提高电力系统静态稳定性的措施	203

11.7 负荷的静态稳定性..... 205

11.8 电力系统的暂态稳定性..... 206

11.9 提高暂态稳定性的措施..... 211

附录 电力线路、变压器特性数据表..... 215

附图..... 227

参考书目..... 232

第1章 电力系统的基本概念

电能是现代社会不可缺少的主要能源。由于电能能在输送、分配、控制与转换等方面都具有相当的便捷性,使得电能的应用也越来越广泛,在工农业生产、交通运输、通信、电子、医疗卫生、科技、国防等部门以及城乡人们的学习生活中无处不使用着电能。

1.1 电力系统概述

1.1.1 电力系统简介

能量是守恒的,电能也是由其他形式的能源转变而来的。这些其他形式的能源往往是不需要加工而在自然界中能够直接获得的,我们称它们为自然能或一次能源,电能则是经过人们加工而取得的二次能源。将自然能转变为电能的过程称为发电,一般在发电厂中进行。主要用于发电的一次能源有:煤、石油、天然气、水力及原子能等,发电厂根据其所应用的一次能源的不同分别称为火力发电厂、水力发电厂及原子能发电厂(或核电厂)等。我国幅员辽阔,地大物博,上述资源储量丰富,为建设各类发电厂创造了条件,目前国内的发电厂仍然是以火力发电为主。除以上发电形式外,还有太阳能发电厂、风力发电厂、潮汐发电厂、地热发电厂等。现阶段国内也新建了一些新能源形式的小型发电厂,如风力发电厂、垃圾发电厂等。

发电的目的是为了用电。使用电能的单位称为电力用户,用电的类型很多,主要分为工业用电、农业用电和生活用电等。

许多国家的大型火电厂都建设在煤矿、石油等能源的产地,以节约燃料的运输费用;水电厂则建设在水资源丰富、江河水落差较大的河段。这些地方往往远离用电负荷中心(一般设有变电所),因此就需要架设电力线路将电能输送到几十、几百甚至数千公里远的负荷中心,再将电能由负荷中心分配给各个用户。将发电厂的电能输送到负荷中心的电力线路称为输电线路;而将负荷中心的电能分配到各个用户的电力线路称为配电线路。现阶段,我国输电线路电压在110kV及以上,配电线路电压主要为66、35、10、6、3、0.38kV。

在电能的输送与分配的过程中,交流电在导线中不可避免地要产生电压损耗、功率损耗和电能损耗,减少这些损耗最直接有效的办法就是提高电压,因此发电厂发电机出口设置了升压变电所来提高输电电压。由于用户用电电压较低,故还需在负荷中心设置降压变电所将较高的输电电压降下来,经过几次降压以后最终将电能送给用户。

由发电厂中的电气部分、各类变电所、输配电线路及各种类型的用电器组成的整体,称为电力系统。它包含发电、变电、输电、配电、用电五个单元,以及相应的通信、继电保护、自动装置等设备。

电力系统中各种电压的变电所及输配电线路组成的整体,称为电力网。它包含变电、输电、配电三个单元。电力网的任务是输送与分配电能,改变电压。

图 1-1 为电力网及电力系统的示意图, 图中电力系统加上动力设备, 如锅炉、原子反应堆、汽轮机、水轮机等统称为动力系统。

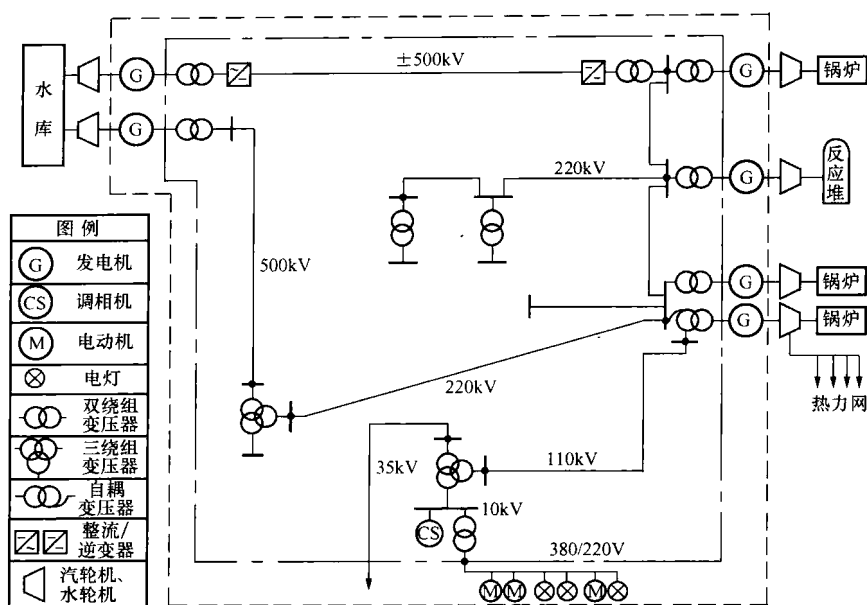


图 1-1 电力网及电力系统示意图

从研究与计算角度考虑, 电力网可分为地方电力网、区域电力网和远距离输电网。地方电力网电压较低, 为 110kV 以下, 输送功率小, 线路距离短, 主要供电给地方负荷。区域电力网则电压较高, 为 110kV 以上, 输送功率大, 线路距离长, 主要供电给大型区域性变电所。远距离输电网电压在 330kV 及以上, 输电线路长度超过 300km。但电压为 110kV 的电力网属于地方网还是区域网, 要视其在电力系统中的作用而定。

按电压的高低, 电力网又可分为低压电力网 (1kV 以下)、中压电力网 (1~10kV)、高压电力网 (35~220kV)、超高压电力网 (330~750kV)、特高压电力网 (1000kV 及以上)。

按接线方式, 电力网还可分为一端电源供电网 (又称为开式网)、两端电源供电网、多端电源供电网 (又称复杂网, 与两端电源供电网合称为闭式网)。一端电源供电网是指用户只能从一个方向取得电能的电力网。它的特点是接线简单、经济、运行方便、供电可靠性较低。两端电源供电网是指用户可以从两个方向取得电能的电力网。它的特点是接线较简单, 运行、检修灵活, 供电可靠性较高。多端电源供电网是指电网中有从三个或三个以上方向取得电能的电力网。它的特点是供电可靠性高, 运行、检修灵活, 但接线复杂、投资大、继电保护与运行操作复杂。

1.1.2 电力系统发展概况

1831 年, 法拉第发现的电磁感应定律为电力系统的形成奠定了理论基础。到 1882 年, 第一座发电厂在英国伦敦建成, 输送的是 100V 和 400V 的低压直流电; 同年, 法国人德普列茨将直流输电电压提高到 1500~2000V, 输送功率为 2kW, 将 57km 外水电厂的电力输送到慕尼黑, 这被认为是世界上最早的电力系统。这种直流输电系统受到了输送功率和输送距离的限制, 已不能适应社会生产发展的需求。

到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与三相异步电动机的基础上实现了三相交流输电,世界上第一个三相交流发电站在德国劳风竣工,以 $3 \times 10^4 \text{ V}$ 高压向法兰克福输电。此后,交流输电就普遍地代替了直流输电。随着科学技术的进步和对电力需求的增长,要求输送功率更大,距离更远,供电更为可靠。于是,各国逐步地将一个个孤立运行的小电力系统用线路连接起来,形成越来越大的联合电力系统,输电电压也是越升越高。目前,世界上线路最高输电电压已达到 $1\,150 \text{ kV}$,系统容量已超过 100 GW 。随着输电距离及容量的不断增大,同步发电机并联运行的稳定性问题也日益突出,交流输电由感抗所带来的固有困难和局限性,也越来越被人们所认识,于是高压直流输电技术又重新为人们所重视。从1954~1998年,世界上已投入运行的直流输电工程有57项,考虑到正在建设的直流工程,目前已运行和正在建设的直流工程共66项,其中架空线路单项工程的最大容量为 $6\,000 \text{ MW}$ (已运行的为 $3\,150 \text{ MW}$),最高电压为 $\pm 750 \text{ kV}$ (已运行的为 $\pm 600 \text{ kV}$),最长输电距离为 $2\,414 \text{ km}$ (已运行的为 $1\,700 \text{ km}$)。

我国1893年在上海建成了第一座容量为 150 kW 的发电厂。改革开放以来,我国电力系统已建成的跨省电力系统有七个,即华东、华北、华中、华南、东北、西北、西南。有四个(东北、华北、华东、华中)已超过 30 GW ,华东、华中已超过 40 GW ,西北已达到 20 GW ,其他几个独立省网,如四川、山东、福建等电网和装机容量也超过或接近 10 GW 。由于我国原煤、石油和水力资源分布的不均衡及运输上的困难,决定了我国的能源供应策略是“北电南送、西电东送”,因此跨省电力系统之间必须联网,东北和华北已经联网,华东、华中、西南将先期互联形成一个容量过 100 GW 的巨型电网,随着三峡水电厂的建成,西南大容量水电的开发,以及山西、陕西、内蒙西部“三西”煤炭基地大容量坑口电厂的建设,全国联网的格局将逐步形成。输电电压方面,现有电网主要以 500 kV 交流电和 $\pm 500 \text{ kV}$ 直流系统为主,最远电力输送距离为 500 km ,使电力输送能力和规模受到严重制约,西北交流 750 kV 输变电示范工程将于2005年内投产,今后几年国家电网将建成两条 $1\,000 \text{ kV}$ 特高压交流输变电工程:一是陕北—晋东南—南阳—荆门—武汉的中线工程,二是淮南—皖南—浙北—上海的东线工程。到2020年,我国特高压电网将基本建成,输送电量将达到2亿 kW 以上,占全国装机总容量的25%。1987年,我国建成葛沪 $\pm 500 \text{ kV}$ 超高压直流输电工程(西起湖北宜昌葛洲坝换流站,东到上海奉贤南桥),输送距离 $1\,080 \text{ km}$,分两期建设,先建单极 500 kV ,输送容量 600 MW ,1988年建成双极。目前,特高压直流输电工程建设也正在按计划稳步推进,金沙江一期 $\pm 800 \text{ kV}$ 直流送出工程前期工作进展顺利,根据水电厂建设进度,第一条直流特高压输电线路工程将在2008年开工建设,2011年建成投产。

1.1.3 电力系统的运行特点及对电力系统的基本要求

1. 电力系统的运行特点

(1) 电能生产、输送、分配与使用的同时性。电能传输速度较快,其生产、输送、分配与使用的过程是同时进行的。由于目前电能尚不能大量、廉价地储存,因此发电厂生产出的电能等于用户消耗的电能、发电厂厂用电能与输送分配过程中损耗的电能之和。也就是说,用户及网络消耗多少电能,电厂就只能生产多少电能。这就对电力系统安全、经济、连续运行提出了较高的要求。

(2) 电能生产与国民经济及人民生活的密切相关性。作为当今社会生产与生活的主要能

源,电能的使用无处不在。电能供应不足或中断将直接影响到国民经济生产的各个部门,给人民生活带来诸多不便。

(3) 电力系统过渡过程的短暂性。电力系统运行中发生变化的速度极快,各元件的投入、切除和电能输送过程几乎都在瞬间完成,即从一种运行状态转换到另一种运行状态的过渡过程非常短暂。这就要求电力系统的运行具有较高的自动化程度,并配有能够准确动作的继电保护、自动装置和实时监测控制设备,同时还需要大量的掌握现代电力生产技术的专业人才。

2. 对电力系统的基本要求

电力系统的根本任务是保证安全、可靠、优质、经济地供电,并最大限度地满足用户用电需要。由此,对电力系统有如下基本要求:

(1) 尽量满足用户的用电需要。电力工业作为国民经济发展与人民生活水平提高的先行官,应优先发展,并始终以最大限度地满足国民经济各部门及人民生活日益增长的需要为目的,不断提高供电的可靠性与电能质量。

(2) 保证安全可靠地供电。安全第一、预防为主,安全为了生产,生产必须安全。可靠地供电就是不间断地、连续地供电。安全可靠地供电是电力系统首先要满足的要求,供电一旦中断将使工农业生产停顿,社会生活混乱,甚至危及人身和设备的安全,造成十分严重的后果。

(3) 保证良好的电能质量。合格的电能质量就是交流电的频率、电压、波形等的变化在允许的变动范围之内,提高电能质量,就能促使用电设备发挥最佳的技术经济性能。电能质量不合格,不仅要严重影响用电设备的正常工作,而且对电力系统本身也有很大危害。因此,保证良好的电能质量是电力系统的重要任务。

(4) 提高系统运行的经济性。电力系统的运行生产在保证安全可靠优质的前提下,应力争降低生产成本。提高运行的经济性对发电部门而言,主要就是合理分配发电厂之间的负荷,降低燃料消耗率和厂用电率,尽可能地多发电、少耗电;对供电部门而言,主要就是加强电网管理、降低电力网的电能损耗。

1.2 电力系统的额定电压

1.2.1 额定电压的概念

为了使电力设备的生产实现标准化、系列化及各元件合理配套使用,电力系统中的发电机、变压器、电力线路及各种用电设备等,均按规定的额定电压进行设计并制造。额定电压就是能使电气设备长期正常工作,并且发挥最佳的技术经济性能的电压。

1.2.2 额定电压的规定

1. 电力系统电压等级的确定

电力系统的电压等级,即线路的额定电压,其确定过程主要考虑两方面的因素。一方面是从电力系统输送功率的经济性角度考虑,当输电距离和输送功率一定时,输电电压越高,则导线中的电流越小,电网中的功率损耗和电能损耗也越小,就可以选用较小截面的导线,因此减少了投资;但是电压越高,对绝缘的要求就越高,配电装置的构架尺寸将会增大,这又将增加绝缘方面的投资。因此,对应一定的输电距离和输送功率,必须经过技术与

经济上的比较确定出一个最合理的线路电压。另一方面，从设备制造的角度考虑，为了使电力设备生产实现标准化和系列化，不可能任意确定太多的额定电压。

综合上述两方面的因素，根据我国的实际情况并参考国外的标准，确定了我国标准的电压等级。相应地，电力系统设备元件的额定电压如表 1-1 所示。

表 1-1 电力系统设备元件额定电压 (kV)

电力线路和用电设备额定电压	电力线路平均额定电压	交流发电机额定电压	变 压 器 额 定 电 压	
			一次绕组	二次绕组
3	3.15	3.15	3 及 3.15	3 及 3.15
6	6.3	6.3	6 及 6.3	6.3 及 6.6
10	10.5	10.5	10 及 10.5	10.5 及 11
		13.8	13.8	
		15.75	15.75	
		18	18	
		20	20	
35	37		35	38.5
60	63		60	66
110	115		110	121
220	230		220	242
330	345		330	363
500	525		500	550

注 表中所列均为线电压值。

2. 线路和用电设备的额定电压

线路的额定电压规定为 220、380V 以及 3、6、10、35、60、110、220、330、500、750kV。

因用电设备需连接在线路上使用，故用电设备的额定电压规定与线路额定电压相同。线路在运行时线路阻抗中要产生电压损耗，使沿线路各点的电压大小不同，一般线路首端电压高于末端电压。因为线路全长的电压损耗一般不超过其额定电压的 10%，而用电设备的端电压允许偏移为 $\pm 5\%$ ，线路首端的电压应比其额定电压高 5%，即为其额定电压的 1.05 倍，这样其末端电压才不会低于其额定电压的 0.95 倍，使得接于线路各处的用电设备的端电压都能在允许的偏移范围内。

3. 发电机的额定电压

发电机接在线路的首端，故其额定电压规定比线路额定电压高 5%，即

$$U_{Gn} = 1.05U_n$$

式中 U_{Gn} ——发电机的额定电压；

U_n ——线路的额定电压。

根据上式及其他技术经济条件所确定的发电机额定电压为 3.15、6.3、10.5、13.8、15.75、18、20kV 等。

4. 变压器的额定电压

变压器的结构较特殊，所以变压器至少有两个电压等级。双绕组变压器有高、低压侧两个额定电压，三绕组变压器及自耦变压器则有高、中、低压侧三个额定电压。

按照电能的流动方向，变压器流入电能的一侧为一次侧，流出电能的一侧为二次侧。变压器的额定电压，有一次侧绕组和二次侧绕组的额定电压之分。一次侧是接受电能的，相当

于用电设备,因此变压器一次侧额定电压等于所连线路的额定电压;如果变压器直接和发电机相连,则一次侧额定电压等于发电机的额定电压。二次侧是输出电能的,相当于线路的首端,而线路首端电压应比线路额定电压高 5%,由于变压器二次侧的额定电压是指变压器空载时的电压值,当变压器带额定负载时,电流将在变压器绕组中产生电压损耗,大阻抗 ($U_k > 7.5\%$) 变压器的电压损耗约为其额定电压的 5%,为使变压器在额定负载时的二次侧电压仍比线路额定电压高出 5%,故将大中容量的变压器二次侧额定电压再提高 5%,即比所连线路额定电压高 10%;只有高压侧低于 35kV 的小阻抗 ($U_k \leq 7.5\%$) 变压器,或者二次侧供电线路较短的变压器以及三绕组变压器连接同步调相机的一侧,其二次侧额定电压才比所连线路额定电压高 5%。

1.2.3 电力线路的平均额定电压

电力线路的平均额定电压等于电力线路首末两端所连接的电气设备额定电压的平均值,即

$$U_{av} = \frac{U_n + 1.1U_n}{2} = 1.05U_n$$

式中 U_n ——线路的额定电压。

根据上式计算,目前我国电力线路的平均额定电压为: 0.38、3.15、6.3、10.5、37、63、115、230、345、525kV。

【例 1-1】 如图 1-2 所示电力系统,线路的额定电压已知,试求图中变压器的额定变比。

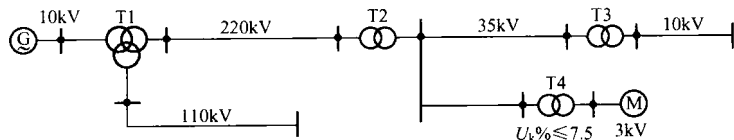


图 1-2 例 1-1 图

解 (1) 升压变压器 T1 的一次侧与发电机直接相连,故其一次侧额定电压应等于发电机的额定电压,比所连线路额定电压 10kV 高 5%,为 10.5kV;该变压器的二次侧分别与 110kV 和 220kV 线路相连,其额定电压均应分别高于相应线路额定电压 10%,分别为 121kV 和 242kV。故 T1 的额定变比为 242/121/10.5kV。

(2) 降压变压器 T2 的一次侧与 220kV 线路相连,二次侧与 35kV 线路相连,故 T2 的额定变比为 220/38.5kV。

(3) 降压变压器 T3 的额定变比为 35/11kV。

(4) 降压变压器 T4 的一次侧与 35kV 线路相连,二次侧直接与 3kV 电动机相连,因 T4 的短路电压百分数 $U_k\% \leq 7.5$,为小阻抗变压器,其二次侧额定电压应比所连线路额定电压 3kV 高 5%,为 3.15kV,故 T4 的额定变比为 35/3.15kV。

1.3 电力系统负荷

1.3.1 负荷的概念

用户的用电设备消耗的功率称为负荷,电力系统的综合用电负荷是指所有电力用户的用

电设备所消耗的功率的总和。它包含工业、农业、交通运输、市政生活等各方面消耗的功率。

电力系统的供电负荷是指电力系统的综合用电负荷与电力网的功率损耗之和，即发电厂供出的负荷。

电力系统的发电负荷是指供电负荷与发电厂厂用电之和，即发电厂发电机的出力。

1.3.2 负荷的分类

按物理性能，可分为有功负荷与无功负荷。

按电力生产与销售的过程，可分为发电负荷、供电负荷和用电负荷。

按用户的性质，负荷可分为工业负荷、农业负荷、交通运输业负荷和人民生活用电负荷等。

根据负荷对供电可靠性的要求，可将用电负荷分为三级（或称三类）：

一级负荷：为重要负荷。对此类负荷中断供电，将造成人身事故、设备损坏、产品报废，给国民经济造成重大经济损失，使市政生活出现混乱及带来较大的政治影响。对一级负荷，必须由两个或两个以上的独立电源供电，因为一级负荷不允许停电，所以要求电源间能手动和自动切换。

二级负荷：为较重要负荷。对此类负荷中断供电，将造成生产部门大量减产、窝工、影响人民的生活水平。对二级负荷，可由两个独立电源或一回专用线路供电。若采用两个独立电源供电，因为二级负荷允许短时停电，所以两个电源间可采用手动切换。

三级负荷：为一般负荷，即一级、二级负荷之外的一般用户负荷。对此类负荷中断供电，不会产生前两种负荷停电后的重大影响，故对三级负荷的供电不做特殊要求，一般采用一个电源供电即可。

负荷分类的方法还有很多，如按用电特性分类、按所属行业分类等等，这里不再一一叙述。

1.3.3 负荷曲线

负荷曲线是在一个时间段内用来表示负荷随时间变化规律的曲线。通常用直角坐标系的横坐标表示时间，以小时为单位，纵坐标表示有功功率、无功功率、视在功率或电流。负荷曲线按描述的负荷种类不同，可分为有功负荷曲线、无功负荷曲线和电流曲线等；按描述的时间段不同，可分为日负荷曲线和年负荷曲线等；按描述的对象不同，可分为个别用户、电力线路、发电厂、变电所和整个电力系统的负荷曲线等。上述三种特征结合，就形成了某一种特定的负荷曲线，如有功功率日负荷曲线、无功功率日负荷曲线、日电流曲线、年最大负荷曲线等。下面介绍几种常用的负荷曲线。

1. 日负荷曲线

图 1-3 中为某用户或地区的有功及无功日负荷曲线，它可由运行记录日志或记录式仪表的有关数据绘制而成。日负荷曲线表明电力负

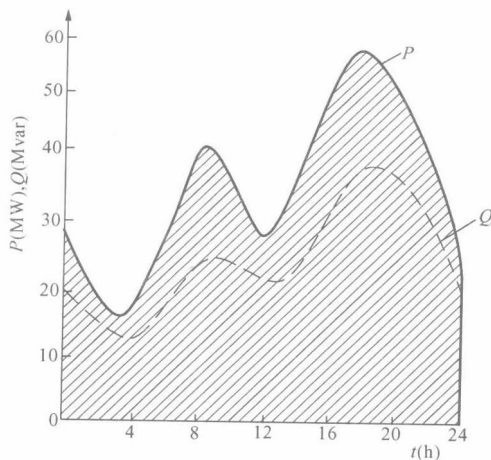


图 1-3 有功及无功日负荷曲线

荷在一天 24h 内的变化规律。由于用户取用有功功率的同时也取用无功功率, 故图中分别画出了有功日负荷曲线与无功日负荷曲线。两曲线形状基本相似, 由于变压器、电动机取用的励磁无功只与电网电压有关而与负荷无关, 所以当有功负荷降低时, 无功负荷并不成比例地减少, 因此最小负荷时, 无功负荷减少的程度比有功负荷要小些。由于照明负荷取用的无功功率甚少, 有功负荷因照明出现峰值时, 无功负荷增加的程度比有功负荷要低些, 因此无功负荷曲线比有功负荷曲线平坦。

有功日负荷曲线是制定各发电厂日发电负荷计划及确定系统运行方式的依据。通过有功日负荷曲线可以表明负荷的性质 (如单班制、两班制还是三班制), 反映负荷在一天之内的变化情况, 而且还可通过它计算一天之内用户消耗的电能。

无功日负荷曲线的用途较小, 但应注意无功与有功最大负荷不一定同时出现。

为简化计算和便于绘制, 常把连续变化的负荷看成在测量的那一小段时间内不变, 而把曲线画成阶梯形, 如图 1-4 所示。

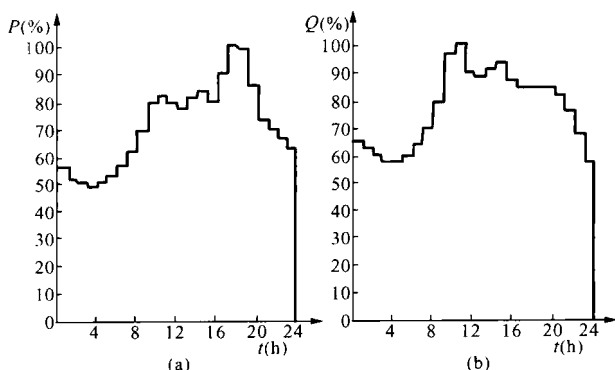


图 1-4 阶梯形有功及无功日负荷曲线

(a) 有功功率负荷; (b) 无功功率负荷

2. 系统有功年最大负荷曲线

在电力系统的运行和设计中, 不仅要知道一天之内负荷的变化规律, 而且还要知道一年之中负荷的变化

规律。年最大负荷曲线描述了一年内系统逐月 (或逐日) 综合最大有功负荷的变化规律, 如图 1-5 所示。由图可知, 夏季的最大负荷较小一些, 这是由于夏季日长夜短, 气候炎热, 照明负荷及其他热负荷普遍减小的缘故。但是如果季节性负荷如农业排灌、防暑降温措施等负荷比重较大时, 则也可能使夏季负荷值反而增大。至于年末负荷较年初为大, 主要是由于厂矿企业技术革新和电气化程度不断提高, 以及新建、扩建项目投入生产的结果。

有功年最大负荷曲线反映了在一年之中出现最大有功负荷的规律, 通过它可以用来安排发电设备的检修计划, 确定发电厂运行机组的容量, 也为有计划地扩建发电机组或新建发电厂提供依据。图中阴影 A 的纵坐标表示年最大有功负荷在夏季低谷期时空余出来的容量, 此空余容量即为系统计划检修机组的容量, 横坐标表示该设备计划检修的时间。图中 B 为系统新装的机组容量。

3. 有功年持续负荷曲线

有功年持续负荷曲线是由一年中系统有功负荷按其数值大小及其持续时间由大到小排列而成, 如图 1-6 所示。年持续负荷曲线可由夏季与冬季代表日负荷曲线绘制而成。如图 1-7 (a)、(b) 所示, 若夏季按 213 日、冬季按 152 日计算, 则将代表日负荷曲线中每一个负荷值的持续时间乘以相应的全年持续天数即为该负荷值在全年的持续时间, 再将负荷值由大到小绘制便得到 1-7 (c) 所示用户有功年持续负荷阶梯形曲线。

有功年持续负荷曲线反映了每一个负荷值在全年中的持续时间, 通过它可以计算出用

户全年消耗的电能以及全年所损耗的电能，从而为安排发电计划和进行可靠性估算提供依据。

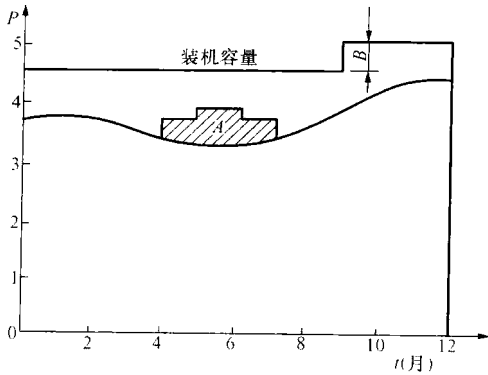


图 1-5 系统有功年最大负荷曲线

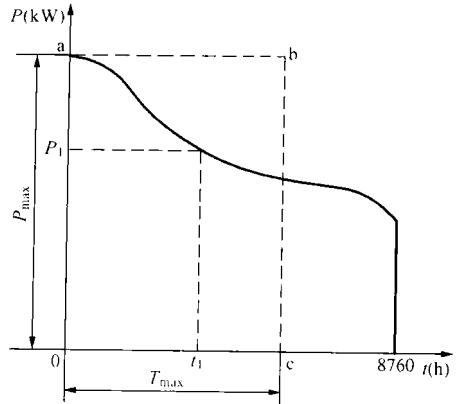


图 1-6 有功年持续负荷曲线

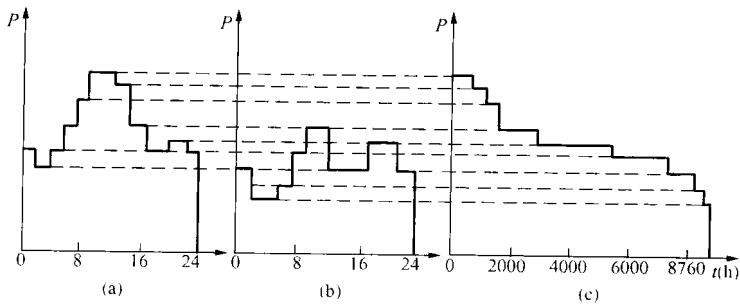


图 1-7 有功年持续负荷曲线的绘制

(a) 夏季代表日负荷曲线；(b) 冬季代表日负荷曲线；(c) 年持续负荷阶梯形曲线

图 1-6 为年持续负荷曲线下面所围成的面积即为用户全年消耗的电能大小，表示为

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

1.3.4 最大负荷利用时间

将用户全年所取用的电能 Λ 与一年内的最大负荷相比，所得的时间称为用户年最大负荷利用时间，记作 $T_{\max}$ ，表示为

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

$T_{\max}$ 的几何意义（见图 1-6）：负荷全年消耗的电能曲线从 0 到 8760h 所围成的面积，若把这一面积用一相等的矩形面积（abc0）来表示，矩形的高代表年最大负荷 $P_{\max}$ ，则矩形的底即为最大负荷利用时间 $T_{\max}$ 。

$T_{\max}$ 的物理意义：若用户始终以最大负荷 $P_{\max}$ 运行，则经过 $T_{\max}$ 小时后，消耗的电能恰好等于按实际负荷曲线运行全年所消耗的电能。

表 1-2 各类用户的年最大
负荷利用小时数 $T_{\max}$

负 荷 类 型	$T_{\max}$ (h)
户内照明及生活用电	2 000~3 000
一班制企业用电	1 500~2 200
两班制企业用电	3 000~4 500
三班制企业用电	6 000~7 000
农灌用电	1 000~1 500

因最大负荷利用时间的单位一般用 h（小时）来表示，故 $T_{\max}$ 也称为最大负荷利用小时数。 $T_{\max}$ 在一定程度上反映了实际负荷在一年内变化的情况。如果负荷曲线比较平坦，即负荷随时间变化较小，则 $T_{\max}$ 的值较大；反之，若负荷变化剧烈，则 $T_{\max}$ 的值较小。

对于系统各种不同类型的负荷，其 $T_{\max}$ 也不一样，因此 $T_{\max}$ 可反映负荷的类型，还可通过它来计算用户全年所损耗的电能。各类用户的年最大负荷利用小时数 $T_{\max}$ 如表 1-2 所示。

1.4 电力系统中性点的运行方式

1.4.1 电力系统中性点及其运行方式

1. 中性点及其运行方式

电力系统中性点是指发电机或变压器三相绕组星形接线的公共连接点。因该点在系统正常对称运行情况下电位接近于零，故称为中性点。所谓中性点的运行方式指的就是中性点的接地方式，即与大地的连接关系。中性点的接地方式是一个涉及供电可靠性、短路电流大小、人身和设备安全、过电压的大小、绝缘水平、继电保护与自动装置的配置、通信干扰、电压等级、系统接线及系统稳定性等多方面的一项综合性的技术经济问题，必须经过合理地比较论证后方可确定中性点的接地方式。

我国电力系统常用的中性点接地方式有四种：中性点不接地、中性点经消弧线圈接地、中性点直接接地、中性点经电阻或电抗接地。其中中性点经阻抗接地按接地电流大小又分为经高阻抗接地和经低阻抗接地。四种接地方式可归纳为中性点非有效接地和有效接地两大类。中性点非有效接地（或称小接地电流方式）包括：不接地、经消弧线圈接地和经高阻抗接地。中性点有效接地（或称大接地电流方式）包括：直接接地和经低阻抗接地。我国目前采用的中性点接地方式主要为不接地、经消弧线圈接地、直接接地，近年来在城网供电中，经小电阻接地方式也采用较多。

2. 中性点不同接地方式的比较

(1) 大接地电流方式。其优点是：

1) 快速切除故障，安全性好。因为系统单相接地时可形成电源的短路回路，即单相短路，继电保护装置可立即动作切除故障。

2) 经济性好。因为中性点直接接地系统在任何情况下，中性点电压都被大地所固定而不会升高，也不会出现不接地系统单相接地时故障的电弧过电压问题，所以系统的绝缘水平便可按相电压设计，可提高其经济性。

其缺点是：系统供电可靠性差。因为单相接地乃四种短路故障中发生几率最高的故障，而系统在发生单相接地故障时也会在继电保护作用下使故障线路的断路器跳闸，所以降低了供电可靠性。

(2) 小接地电流方式。其优点是：

1) 供电可靠性高。因为系统单相接地时没有形成电源的短路回路，而是经过三相线路