

21世纪高等学校规划教材

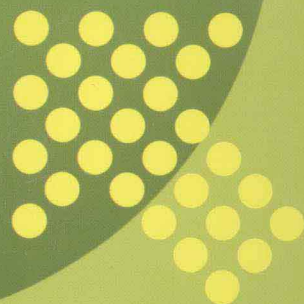


DIANLI XITONG FENXI

电力系统分析

查丛梅 主 编

朱永胜 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

21世纪高等学校规划教材

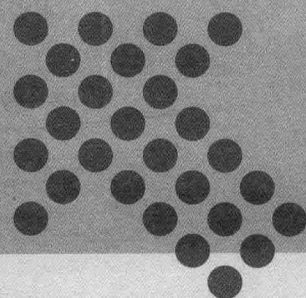


DIANLI XITONG FENXI

电力系统分析

主 编 查丛梅
副主编 朱永胜
编 写 董 燕
主 审 许 珉

李小敏 刘 豪



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是 21 世纪高等学校规划教材, 主要讲授电力系统稳态分析和暂态分析的基本原理与方法。全书共 15 章, 主要内容包括电力系统的基本概念、电力网各元件的参数和等值电路、简单电力系统的分析与计算、复杂电力系统的潮流计算、电力系统的无功功率平衡和电压调整、电力系统的有功功率平衡和频率调整、电力系统的经济运行、同步发电机的基本方程、电力系统三相短路的暂态过程、电力系统三相短路的实用计算、电力系统各元件的序阻抗和等值电路、电力系统简单不对称故障的分析和计算、电力系统稳定性的基本概念和发电机的机电特性、电力系统静态稳定性分析及其提高措施、电力系统暂态稳定性分析及其提高措施, 附录给出了短路电流周期分量计算曲线数字表, 供读者使用。

本书可供高等学校电气类专业师生教学使用, 也可供一般读者自学使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统分析/查丛梅主编. —北京: 中国电力出版社, 2013. 8

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 4757 - 1

I. ①电… II. ①查… 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 (2013) 第 173853 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 8 月第一版 2013 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.75 印张 457 千字

定价 34.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪
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

电力系统分析是电气工程专业的一门重要的专业课程,同时也是学习其他专业课程的基础。为满足一般工科高等院校培养应用型高级专业技术人才相关专业的教学改革和配合《电力系统分析》精品课程建设的需求,编者根据多年来教学改革与科研的经验,结合实际教学情况,编写了本教材。

考虑到该课程被许多高校列为电力专业考研专业课之一,因此我们在编写中注重基本概念和基本计算的阐述,并注意每部分内容之间的衔接;同时为培养应用型高级专业技术人才,也注重理论联系实际。本书以简练实用、重点突出、易于理解为特点,每章后附有思考与练习题,并配套有辅导书《电力系统分析——知识要点及习题详解》,方便教学和自学。

全书共分 15 章,第 1、2 章为电力系统的基本知识和各元件的参数和等值电路;第 3、4 章讲述简单电力系统的分析与计算和复杂电力系统的潮流计算;第 5、6 章为电力系统的无功功率平衡与电压调整以及有功功率平衡与频率调整;第 7 章讲述电力系统的经济运行;第 8、9、10 章分别为同步发电机的基本方程、电力系统三相短路的暂态过程以及电力系统三相短路的实用计算;第 11 章和第 12 章以对称分量法为基础,介绍电力系统各元件的序阻抗和等值电路以及简单不对称故障的分析和计算;第 13 章为电力系统稳定性的基本概念和发电机的机电特性;第 14、15 章分别分析电力系统静态稳定性、暂态稳定性及其提高措施。

本书由中原工学院查丛梅担任主编,中原工学院朱永胜任副主编。其中第 9、10、13、14 章由查丛梅编写,第 4、15 章由朱永胜编写,第 7、11、12 章由中原工学院董燕编写,第 1、6、8 章由河南城建学院李小敏编写,第 2、3、5 章由河南城建学院刘豪编写。

本书由郑州大学许珉教授担任主审。许珉教授对本书进行了认真的审阅,给出了宝贵的意见和建议。本书部分材料与内容引自相关院校和科研单位编写的教材、专著或文章,编者在此一并致谢。

由于编者水平所限,书中难免有错误和不当之处,欢迎读者批评指正。

目 录

前言

1 电力系统的基本概念	1
1.1 概述	1
1.2 电力系统的组成	6
1.3 电力系统运行应满足的基本要求	8
1.4 电力系统的电压等级和规定	9
1.5 电力系统的接线方式	11
1.6 柔性交流输电系统	13
思考与练习题	15
2 电力网各元件的参数和等值电路	17
2.1 电力线路的参数和等值电路	17
2.2 变压器的等值电路和参数	26
2.3 标么制	33
思考与练习题	40
3 简单电力系统的分析与计算	42
3.1 网络元件的电压降落和功率损耗	42
3.2 开式网络的潮流分布	48
3.3 闭式网络的潮流分布	54
思考与练习题	63
4 复杂电力系统的潮流计算	65
4.1 电力网络的数学模型	65
4.2 功率方程和节点的分类	76
4.3 高斯-赛德尔法潮流计算	77
4.4 牛顿-拉夫逊法潮流计算	78
4.5 PQ分解法潮流计算	88
思考与练习题	93
5 电力系统的无功功率平衡和电压调整	95
5.1 电力系统电压调整的意义	95
5.2 电力系统的无功功率平衡	96
5.3 电压调整的基本概念	101
5.4 几种调压措施比较	103
5.5 电力系统电压的综合控制	109
思考与练习题	110

6	电力系统的有功功率平衡和频率调整	112
6.1	电力系统的有功功率平衡	112
6.2	电力系统的频率静态特性曲线	114
6.3	电力系统的频率调整	117
	思考与练习题	122
7	电力系统的经济运行	124
7.1	电力系统的负荷及负荷曲线	124
7.2	电力系统有功功率负荷的经济分配	127
7.3	电力系统无功功率负荷的经济分配	133
7.4	电力网络的电能损耗	136
7.5	降低电力网电能损耗的措施	141
	思考与练习题	143
8	同步发电机的基本方程	145
8.1	同步发电机的原始方程	145
8.2	d 、 q 、 0 坐标系统的同步发电机方程	149
8.3	同步发电机的稳态运行	156
	思考与练习题	159
9	电力系统三相短路的暂态过程	160
9.1	短路的一般概念	160
9.2	无限大功率电源供电系统的三相短路分析	162
9.3	不计阻尼绕组同步发电机突然三相短路的暂态过程	167
9.4	计及阻尼绕组同步发电机的电磁暂态过程	172
9.5	强行励磁对同步发电机三相短路的影响	176
	思考与练习题	176
10	电力系统三相短路的实用计算	178
10.1	有关短路计算的基本假设	178
10.2	交流分量电流初始值的计算	178
10.3	网络简化与转移电抗及电流分布系数	181
10.4	转移阻抗和电流分布系数的概念	184
10.5	转移阻抗与电流分布系数的计算	185
10.6	计算曲线法	187
	思考与练习题	193
11	电力系统各元件的序阻抗和等值电路	195
11.1	对称分量法	195
11.2	对称分量法在不对称故障分析中的应用	197
11.3	同步发电机的负序和零序电抗	200
11.4	综合负荷的序阻抗	201
11.5	变压器的零序电抗	202
11.6	架空输电线的零序阻抗	206

11.7	电缆线路的零序阻抗·····	211
11.8	电力系统序网络的制订·····	212
	思考与练习题·····	217
12	电力系统简单不对称故障的分析和计算·····	219
12.1	单相接地短路·····	219
12.2	两相短路·····	221
12.3	两相短路接地·····	223
12.4	正序等效定则·····	225
12.5	非故障处的电流和电压的计算·····	227
12.6	非全相运行的分析计算·····	230
	思考与练习题·····	234
13	电力系统稳定性的基本概念和发电机的机电特性·····	236
13.1	电力系统稳定性的基本概念·····	236
13.2	发电机转子运动方程·····	239
13.3	简单电力系统的功率特性·····	241
13.4	自动励磁调节器对功角特性的影响·····	244
13.5	复杂电力系统的功率特性·····	249
	思考与练习题·····	252
14	电力系统静态稳定性分析及其提高措施·····	253
14.1	简单电力系统的静态稳定性·····	253
14.2	小扰动法原理及其在分析系统稳定性中的应用·····	256
14.3	自动励磁调节器对静态稳定的影响·····	259
14.4	提高电力系统静态稳定性的措施·····	260
	思考与练习题·····	262
15	电力系统暂态稳定性分析及其提高措施·····	263
15.1	暂态稳定性分析计算的基本假设·····	263
15.2	简单电力系统暂态稳定的分析计算·····	264
15.3	发电机转子运动方程的数值解法·····	271
15.4	复杂电力系统暂态稳定的分析计算·····	278
15.5	提高电力系统暂态稳定性的措施·····	281
	思考与练习题·····	286
	附录 短路电流周期分量计算曲线数字表·····	287
	参考文献·····	292

1 电力系统的基本概念

Basic Concept of Power System

能量是社会生产力的基础。随着社会生产力的不断发展,人类使用的能源不仅在数量上越来越大,而且在品种结构上也越来越多样化。其中煤炭、石油、天然气、水能、核能、风能、地热能和潮汐能等自然界直接提供的能源,称为一次能源;人们日常生产和生活中广泛使用的电能称为二次能源。电能是由一次能源转换而来的,通常把一次能源转换成二次能源的产业称为电力工业。

本章将介绍电力工业的发展概况以及电力系统的相关基本知识。包括电力系统的组成,电力系统的运行应满足的基本要求,电力系统的电压等级和规定,电力系统的接线方式和柔性输电系统基本知识。

1.1 概 述

Summary

1.1.1 我国的资源情况和电力工业的发展状况

Development of China Power Industry

中国的电力资源比较丰富,其中水力资源的蕴藏量达 676GW,居世界首位,其中可利用的资源约为 378GW,主要集中在西南和西北,包括长江、金沙江、澜沧江、怒江和红河的中上游以及黄河的上游;煤的预计储量约为 4500Mt,其中 90%集中在陕西、山西及内蒙古;可利用的风力资源分布在东南沿海、新疆、甘肃及东北,总量约为 160GW。这些为中国电力工业的发展提供了基本保障。

我国电力工业发展速度很快,尤其是改革开放以后,随着国民经济快速发展对电能的巨大需求,电力工业更是进入了迅猛发展时期。1981~1999 年的 19 年间,新增装机总容量超过 2.23 亿 kW。近几年,我国装机容量以每年 1500 万 kW 的势头增长,约占全世界新增装机容量的 25%,成为世界上最大的电力市场。截至 2011 年底,我国已成为仅次于美国的电力大国,发电装机容量达到 10.56 亿 kW,其中水电 2.3 亿 kW (含抽水蓄能 1836 万 kW),占全部装机容量的 21.83%;火电 7.7 亿 kW (含煤电 70667 万 kW、常规气电 3265 万 kW),占全部装机容量的 72.5%;风电 4700 万 kW;核电 1191 万 kW;并网太阳能发电规模发展较快,达到 214 万 kW。这些发展成果极大地提高了中国在国际能源领域的地位,世界上几乎所有的大型电力设备制造公司都竞相进入中国,促进了我国电力行业与国际的交流和合作,提高了我国电力工业整体技术水平。这样的发展势头,基本满足了我国经济发展对电力的需要。

1.1.2 我国电力网络的发展状况

Development of China Power Network

我国在电力系统的发展规模方面,大体可分为几个阶段:20世纪50年代为城市电网发展阶段;60年代逐渐形成以省为单位的电力系统(省网);1970~1990年为区域电力系统发展阶段;90年代以后为区域电网之间的互联阶段,并将逐步形成全国统一的电网。截至1998年,全国有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。目前华东、华北、东北和华中四大电网的容量均已超过4000万kW,东北与华北、华北与华中、华中与华东、华中与南方以及西北与华中电网已经互联,全国联网的格局基本形成。截至2011年底,电网建设成果显著,青藏直流联网工程投入试运行,结束了西藏电网长期孤网运行的历史,标志着我国内地电网全面互联;世界首个 $\pm 660\text{kV}$ 电压等级的直流输电工程——宁东直流输电工程双极建成投运;特高压 1000kV 交流试验示范工程扩容改造顺利完成,输送容量达到500万kW;中俄直流背靠背联网工程建成投产,促进了中俄两国之间的电力交流与优势互补;世界电压等级最高的智能变电站—— 750kV 陕西洛川变电站顺利建成投运。

自从20世纪90年代开始,我国在电力体制方面进行了重大改革,实行了电力企业的市场化重组。厂网分开、竞价上网,逐步放开发电侧电力市场,并将逐步向开放输电网管制、售电市场发展,出现了多元化投资办电的新格局。“厂网分开”后,目前我国的电力系统格局主要由五大发电集团(中国华能集团公司、中国大唐集团公司、中国华电集团公司、中国国电集团公司和中国电力投资集团公司)和两大电网公司(国家电网公司、中国南方电网有限责任公司)组成。彻底打破了原来在计划经济体制下电力工业的垄断模式。

就我国目前绝大多数电网来说,高压电网指的是 110kV 和 220kV 电网;超高压电网指的是 330kV 、 500kV 和 750kV 电网。特高压电网指的是以 1000kV 输电网为骨干网架,超高压输电网和高压输电网以及特高压直流输电、高压直流输电和配电网构成的分层、分区、结构清晰的现代化大电网。

1.1.3 发电厂的主要类型

Main Types of Power Plants

目前,我国主要的发电厂类型有火力发电厂、水力发电厂和核电厂。

(1) 火力发电厂简称火电厂,是利用煤、石油、天然气作为燃料生产电能的工厂。其基本生产过程如图1-1所示,燃料在锅炉中燃烧加热水,使其转变成蒸汽,将燃料的化学能转变成热能,蒸汽压力推动汽轮机旋转,热能转换成机械能,然后汽轮机带动发电机旋转,将机械能转变成电能,目前,我国火电厂最大的火电机组容量为100万kW,最大的火电厂容量为300万kW。

(2) 水力发电厂简称水电厂,是利用水流和落差来进行发电的。其基本生产过程如图1-2所示,通过压力水管把水引入水轮机的螺旋形蜗壳,推动水轮机转子旋转,把机械能转化为电能。目前,最大的水电机组容量为70万kW(三峡工程),最大的水电厂容量为1820万kW(三峡水电厂, $26 \times 70\text{万kW}$)。最大的抽水蓄能电厂容量为240万kW(广东抽水蓄能电厂, $8 \times 130\text{万kW}$),这也是世界上最大的抽水蓄能电厂。

(3) 核电厂也称核电站,是利用核能发电的电厂。核能分为核裂变能和核聚变能两种,

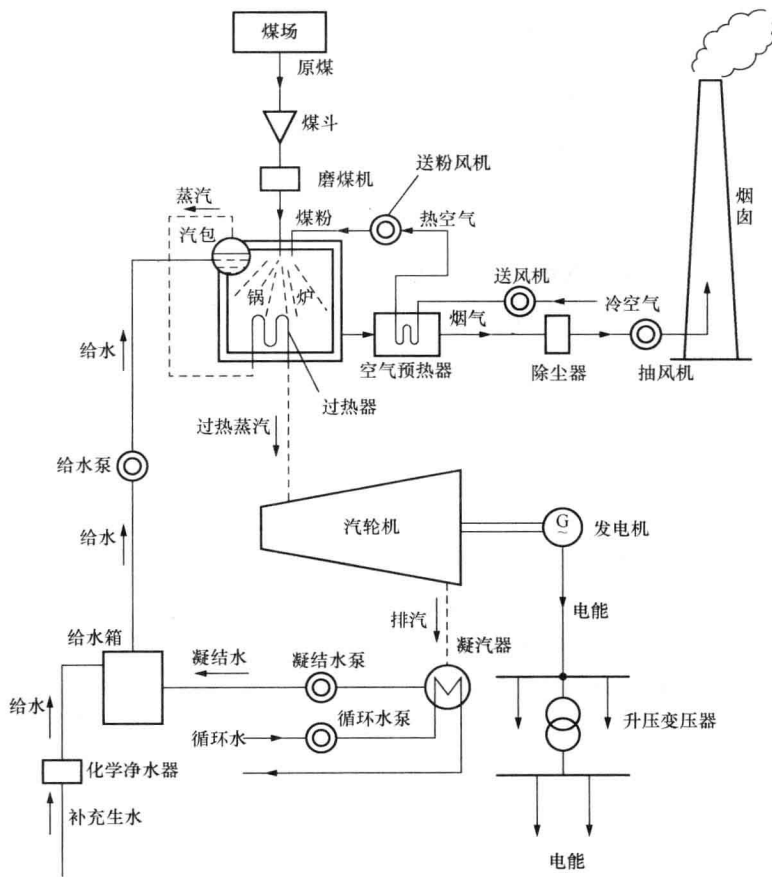


图 1-1 火电厂基本生产过程示意图

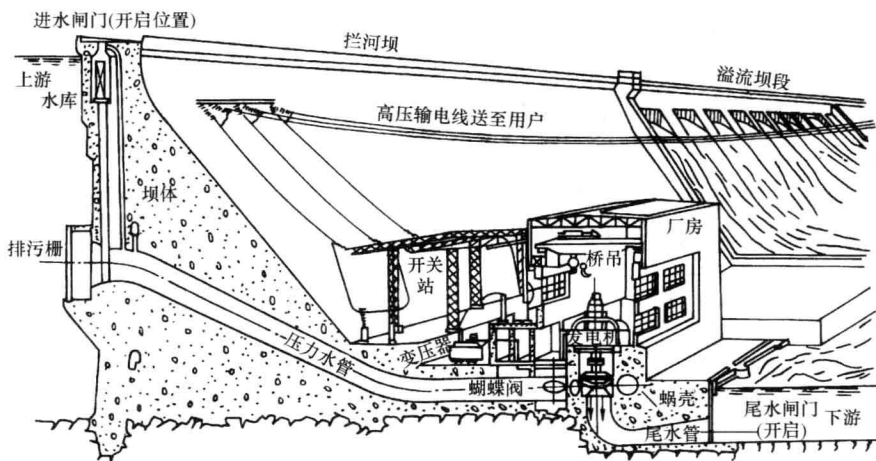


图 1-2 水电厂基本生产过程示意图

其中核裂变能是利用一些重金属元素的原子核发生裂变而释放出来的巨大能量，而核聚变能则是利用一些轻元素的原子核聚合成为较重的原子核而释放出来更为巨大的能量。核聚变能的受控难度大，因此核能发电目前只是核裂变能。

简单而言，核电站就是利用核裂变释放出的热能将水加热为蒸汽推动汽轮机发电机组发电的。目前，我国最大的核电机组容量为 106 万 kW（田湾核电厂）；最大的核能发电厂容量为 400 万 kW（岭澳核电厂，4×100 万 kW）。

1.1.4 新能源发电
New Energy Power Generation

随着现代工业的发展，全球能源危机和大气污染问题日益突出，传统的燃料能源正在一天天减少，对环境造成的危害日益突出，同时全球约有 20 亿人得不到正常的能源供应。这个时候，全世界都把目光投向了可再生能源，希望可再生能源能够改变人类的能源结构，维持长远的可持续发展，一些新能源发电如风电、太阳能发电、生物质能发电和潮汐能发电等，迅速发展起来。

（1）风力发电。截至 2011 年底，全球风电累计装机量达到 241GW，装机量同比增长 21%。中国风电新增装机量 17.6GW，占到世界新增装机量的 42%左右，为全球风电最大市场。欧洲在 2011 年新增装机量只占全球新增装机量的 24.5%。

风力发电有离网型和并网型两种类型。离网型的风电规模小，可通过蓄电池等储能装置或者其他能源发电技术相结合（如风力—太阳能互补运行系统、风力—柴油机组联合供电系统），解决偏远地区的供电问题。并网型风力发电厂是大规模开发风电的主要形式，又可分为恒频风力发电系统和变速恒频风力发电系统，并网型风电场可以得到大电网的补偿和支撑，更加充分开发可利用资源，是近几年国内外风力发电发展的主要方向。2011 年 12 月 25 日，由国家电网公司自主设计建造的国家风光储输示范工程建成投产，这是世界上规模最大，集风电、光伏发电、储能、智能输电于一体的新能源综合利用平台，工程一期建成风电 10 万 kW、光伏发电 4 万 kW、储能 2 万 kW，配套建设风光储联合控制中心及一座 220kV 智能变电站。该项目通过风光互补、储能调节、智能调度，实现了新能源发电的稳定、可控，可有效破解新能源并网的技术难题。

（2）太阳能发电。太阳能发电分为光热发电和光伏发电。通常说的太阳能发电指的是太阳能光伏发电，简称光电。光伏发电是利用半导体界面的光生伏特效应而将光能直接转变为电能的一种技术。这种技术的关键元件是太阳能电池。太阳能电池经过串联后进行封装保护可形成大面积的太阳电池组件，再配合功率控制器等部件就形成了光伏发电装置。光伏发电系统可分为离网型光伏发电系统和并网型光伏发电系统两种类型。

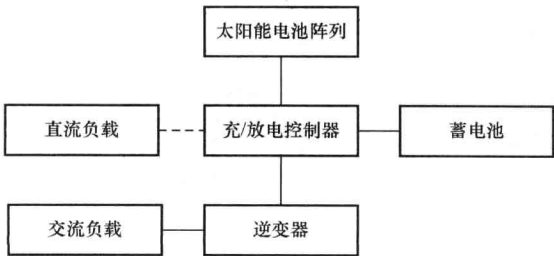


图 1-3 离网型光伏发电系统

离网型光伏发电系统也称独立光伏发电系统。如图 1-3 所示，离网型光伏发电系统主要由太阳能电池阵列、充/放电控制器和蓄电池组成。若要为交流负载供电，还需要配置交流逆变器。独立光伏电站包括边远地区的村庄供电系统、太阳能户用电源系统以及通信信号电源、阴极保护、太阳能路灯等各种带有蓄电池的可以

独立运行的光伏发电系统。

并网型光伏发电就是太阳能电池阵列产生的直流电经过并网逆变器转换成符合市电网要求的交流电之后直接接入公共电网,如图 1-4 所示。并网型光伏发电系统可分为带蓄电池的和不带蓄电池的两类。带有蓄电池的并网发电系统具有可调度性,可以根据需要并入或退出电网,还具有备用电源的功能,当电网因故停电时可紧急供电。带有蓄电池的光伏并网发电

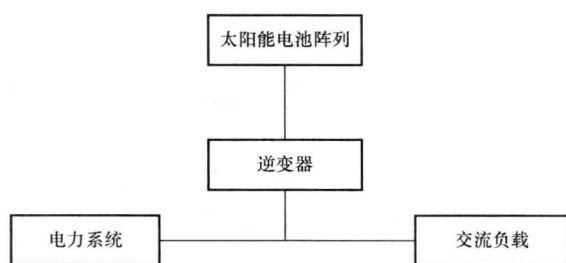


图 1-4 并网型光伏发电系统

系统常常安装在居民建筑。不带蓄电池的并网发电系统不具备可调度性和备用电源的功能,一般安装在较大型的系统中。并网光伏发电多为集中式大型并网光伏电站,一般都是国家级电站,主要特点是将所发电能直接输送到电网,由电网统一调配向用户供电。但这种电站投资大、建设周期长、占地面积大,目前还没有太大发展。而分散式小型并网光伏发电,特别是光伏建筑一体化光伏发电,由于投资小、建设快、占地面积小、政策支持力度大等优点,是目前并网光伏发电的主流。

理论上讲,光伏发电技术可以用于任何需要电源的场合,上至航天器,下至家用电源,大到兆瓦级电站,小到玩具,光伏电源无处不在。光伏发电产品主要用于三大方面:一是为无电场合提供电源;二是用于太阳能日用电子产品,如各类太阳能充电器、太阳能路灯和太阳能草地灯具等;三是并网发电,这在发达国家已经大面积推广实施。2008 年北京奥运会部分用电是由太阳能发电和风力发电提供的。

(3) 生物质能发电。生物质发电是利用生物质所具有的生物质能进行发电,是可再生能源发电的一种,包括农林废弃物直接燃烧发电、农林废弃物气化发电、垃圾焚烧发电、垃圾填埋气发电、沼气发电。

中国是一个农业大国,生物质资源十分丰富,各种农作物每年产生秸秆 6 亿多 t,其中可以作为能源使用的约 4 亿 t,全国林木总生物量约 190 亿 t,可获得量为 9 亿 t,可作为能源利用的总量约为 3 亿 t。如加以有效利用,开发潜力将十分巨大。为推动生物质发电技术的发展,2003 年以来,国家先后核准批复了河北晋州、山东单县和江苏如东 3 个秸秆发电示范项目,颁布了《可再生能源法》,并实施了生物质发电优惠上网电价等有关配套政策,从而使生物质发电,特别是秸秆发电迅速发展。最近几年来,国家电网公司、五大发电集团等大型国有、民营以及外资企业纷纷投资参与中国生物质发电产业的建设运营。截至 2007 年底,国家和各省发改委已核准项目 87 个,总装机规模 220 万 kW。全国已建成投产的生物质直燃发电项目超过 15 个,在建项目 30 多个。可以看出,中国生物质发电产业的发展正在渐入佳境。

根据国家“十一五”规划纲要提出的发展目标,未来将建设生物质发电 550 万 kW 装机容量,已公布的《可再生能源中长期发展规划》也确定了到 2020 年生物质发电装机 3000 万 kW 的发展目标。此外,国家将安排资金支持可再生能源的技术研发、设备制造及检测认证等产业服务体系建设。总的说来,生物质能发电行业有着广阔的发展前景。

(4) 潮汐能发电。潮汐能发电是利用海湾、河口等有利地形,建筑水堤,形成水库,以

便于大量蓄积海水，并在坝中或坝旁建造水力发电厂房，通过水轮发电机组进行发电。

潮汐发电的工作原理与常规水力发电的原理类似，它是利用潮水的涨、落产生的水位差所具有的势能来发电。差别在于海水与河水不同，蓄积的海水落差不大，但流量较大，并且呈间歇性，从而潮汐发电的水轮机的结构要适合低水头、大流量的特点。具体地说，就是在有条件的海湾或感潮河口建筑堤坝、闸门和厂房，将海湾（或河口）与外海隔开围成水库，并在闸坝内或发电站厂房内安装水轮发电机组。海洋潮位周期性的涨落过程曲线类似于正弦波。对水闸适当地进行启闭调节，使水库内水位的变化滞后于海面的变化，水库水位与外海潮位就会形成一定的高度差（即工作水头），从而驱动水轮发电机组发电。从能量的角度来看，就是将海水的势能和动能，通过水轮发电机组转化为电能的过程。

利用潮汐能发电必须具备两个条件：首先潮汐的幅度必须大，至少要有几米；第二海岸地形必须能储蓄大量海水。由于潮水的流动与河水的流动不同，它是不断变换方向的，因此就使得潮汐能发电出现了不同的形式，主要有：单库单向型，只能在落潮时发电；单库双向型，在涨、落潮时都能发电；双库双向型，可以连续发电，但经济性较差，未见实际应用。

1.2 电力系统的组成

Composition of Power System

现代社会中，电能是从电力系统得到的。在电力系统中的各类发电厂（火电厂、水电厂、核电厂）中的发电设备将其他形式的能量（化学能、动能、核能）转换成电能，电能经升压变压器和高压输电线路传输至负荷中心，再由降压变压器和配电线路分配至用户，然后通过各种用电设备（电动机、电灯、电炉等）将电能转换成其他形式的能量进行消费，如图 1-5 所示。

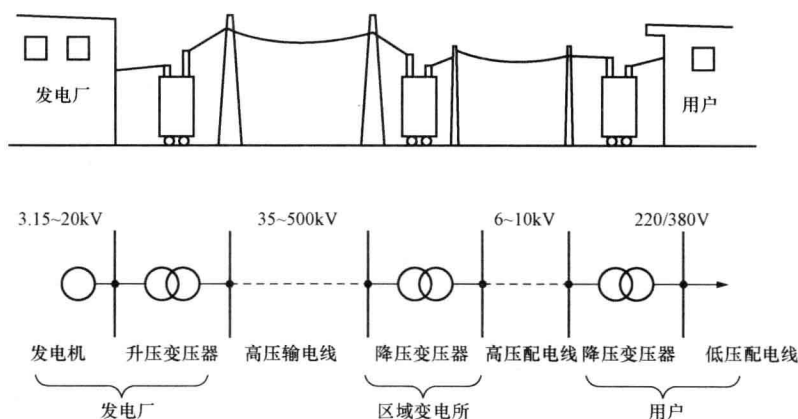


图 1-5 发电厂到用户示意图

交流电力系统都是三相的，但一般为简便、清晰地表示设备之间的连接状况，常将其接线图画成单线图（单相均表示三相），如图 1-6 所示，为动力系统、电力系统和电力网的示意图。

（1）电力系统：把生产、输送、分配和消费电能的各种电气设备连接在一起而组成的整体称为电力系统，它包括从发电、变电、输电、配电直到用电这样一个全过程。构成电力系

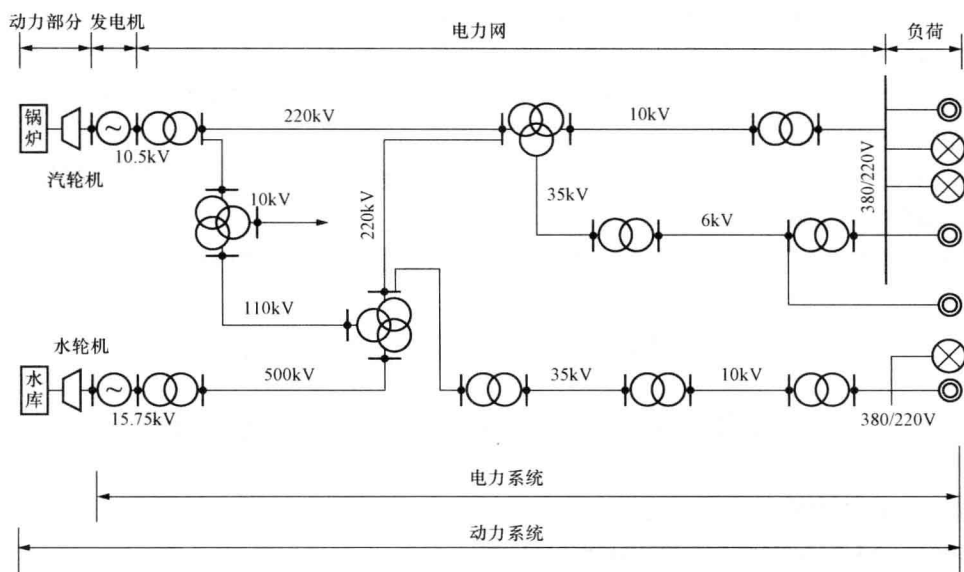


图 1-6 动力系统、电力系统和电力网的示意图

统的基本要素有四个，即发电厂、输电网络、配电网和用户。

1) 发电厂，就是把其他形式的能转变为电能的工厂。如今的电力系统中主要包括以煤、石油和天然气等作为燃料的火力发电厂，以水能驱动的水电厂，以核能驱动的核电厂。除此之外，就是利用可再生资源驱动的发电厂，如风能、太阳能、地热和潮汐能等驱动的发电厂。

2) 输电网，就是将无法直接使用的电能通过变压器升高电压的形式向负荷中心传输。不同类型的发电厂通过升高电压并入不同层次的网络，如 110、220、330、500、750、1000kV 的输电网。输电网视需要输送功率的大小以及输送距离的远近不同，有不同的电压等级。因此输电网中变压器不仅有升压的作用，也有联络的作用。

在发电厂远离负荷中心而且需要集中传输大量功率的情况下，选用高压直流输电更为合适。随着电力技术的发展，直流输电作为一种补充输电方式得到了实际应用。在交流电力系统内或者两个交流电力系统之间嵌入直流输电系统，就构成了现代交、直流联合输电系统，如图 1-7 所示。

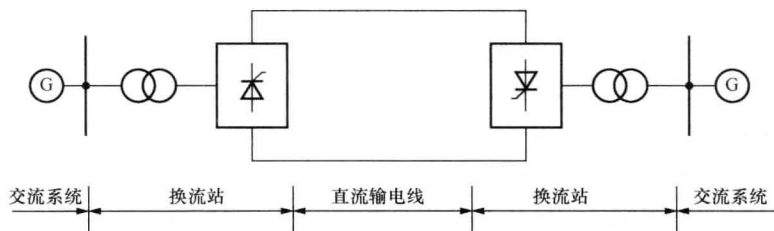


图 1-7 交、直流联合输电系统示意图

3) 配电网，就是将来自输电网络的电能经变压器降压后经过不同的电压等级达到与不同层次负荷连接的目的，如 110、220、35、10、6kV 和 380/220V。配电网中的变压器不仅有降压作用，还有联络的作用。

4) 用户, 就是直接接受电能并加以利用的单位或个人。

(2) 动力系统: 电力系统加上发电厂的动力部分, 就称为动力系统。火电厂的动力部分包括汽轮机、锅炉、供热管道和热用户; 水电厂的动力部分包括水库和水轮机, 核电厂的动力部分包括反应堆和汽轮机。

(3) 电力网: 电力系统中输送和分配电能的部分称为电力网, 它包括升、降压变压器和各种电压的输电线路。

可见, 电力系统是动力系统的一部分, 电力网又是电力系统的一部分。

1.3 电力系统运行应满足的基本要求

Basic Requirements of Power System Operation

1.3.1 电力系统的运行特点

Operation Characteristics of Power System

与其他工业系统相比, 电能的生产、传输、分配和消费具有以下特点:

(1) 重要性。电能与国民经济各部门及人民日常生活关系密切, 电能供应的中断或减少将影响国民经济的各个部门, 造成巨大经济损失。

(2) 同时性。电能不能大量储存, 即电能的生产、输送、分配及消费几乎是同时进行的, 在任一时刻, 发电机发出的电能等于负荷消费的电能(在发电机容量允许范围内)。

(3) 快速性。电力系统从一种运行方式变到另一种运行方式的暂态过程非常快。

1.3.2 对电力系统运行的基本要求

Basic Requirements of Power System Operation

(1) 保证供电的可靠性。对用户供电的中断将会使生产停止, 人民的生活秩序、生活质量受到影响, 甚至会危及人身、设备的安全, 造成严重后果。但是在某些特殊情况下, 当电力系统无法满足全部负荷的需要时, 应有选择性地保证重要用户的供电。根据允许停电程度的不同, 将负荷分为三级:

1) 一级负荷: 若停电将造成人身伤亡和设备事故、产生废品, 使生产秩序长期不能恢复或产生严重政治影响, 使人民生活发生混乱等。对一级负荷, 要保证不间断供电。

2) 二级负荷: 停电将造成大量减产, 使人民生活受到影响。

3) 三级负荷: 不属于一、二级的负荷, 如工厂的附属车间、小城镇等。

对二、三级负荷, 在电能不足时, 应优先保证二级负荷的供电。

从电力系统角度来看, 目前保证可靠供电的措施主要有提高系统运行的稳定性及可靠性指标、采用微机监视和控制、应用微机保护等。

(2) 保证良好的电能质量。电压和频率是衡量电能质量的两个主要指标。我国规定, 用户供电电压的允许偏移量是额定值的 $+5\% \sim -7\%$; 额定频率是 50Hz , 允许的偏移量为 $\pm 0.2\% \sim \pm 0.5\%$ 。

(3) 保证系统运行的经济性。电能的用途广、耗量大, 因此生产电能耗费的一次能源占国民经济能源总耗费的比重大。电力系统在保证安全、优质供电的前提下, 将单一电力系统联合组成联合电力系统, 合理安排各类发电厂所承担的负荷, 组织电力系统经济运行, 力求

降低能源消耗，以求得最大的经济效益。

1.4 电力系统的电压等级和规定

Voltage Level and Provision of Power System

1.4.1 电力系统的额定电压

Rated Voltage of Power System

生产厂家在制造和设计电气设备时都是按一定的电压标准来执行的，而电气设备也只有运行在这一标准电压附近，才能具有最好的技术性能和经济效益，这种电压就称为额定电压。

实际电力系统中，各部分的电压等级不同。这是由于电气设备运行时存在一个能使其技术性能和经济效益达到最佳状态的电压。另外，为了保证生产的系列性和电力工业的有序发展，我国国家标准规定了电气设备标准电压（又称额定电压）等级，见表 1-1。

表 1-1 电力系统的额定电压等级 单位：kV

用电设备额定线电压	交流发电机额定线电压	变压器线电压	
		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
	13.8 *	13.8	
	15.75 *	15.75	
	18 *	18	
35		35	38.5
110		110	121
220		220	242
330		330	363
500		500	550
750		750	825

注 带 * 号的数字为发电机专用。

输电电压一般分为高压、超高压和特高压。高压通常指 35~220kV 的电压；超高压通常指 330kV 及以上、1000kV 以下的电压；特高压指 1000kV 及以上的电压。

从表 1-1 可以看出：

(1) 同一电压级别下，各个电气设备的额定电压并不完全相等，为了使各种互相连接的电气设备都能运行在较有利的电压下，它们之间的配合原则是：以用电设备的额定电压为参考。由于线路直接与用电设备相连，因此电力线路的额定电压和用电设备的额定电压相等，把它们统称为网络的额定电压。我国国家标准规定的网络额定电压为 10、110、220kV 等。

(2) 发电机的额定电压比网络的额定电压高 5%。这是由于用电设备一般允许其实际工作电压偏离额定电压 5%，电力线路从首端到末端电压损耗一般为网络额定电压的 10%，故通常让线路首端电压比网络额定电压高 5%，即线路首端的电压为其额定值的 105%，以使线路末端电压比网络额定电压最多低 5%，即不低于额定值的 95%。

发电机总是接在电力网的首端，因此发电机的额定电压为线路额定电压的 105%，如 3.15、6.3、10.5kV 等。

(3) 变压器具有发电机和用电设备的双重性，因此其额定电压的规定略为复杂。根据变压器在电力系统中传输功率的方向，规定变压器接受功率一侧的绕组为一次绕组，从电网接受电能，相当于用电设备；输出功率一侧的绕组为二次绕组，相当于发电机。因此规定：

1) 变压器一次绕组的额定电压与网络的额定电压相等，但直接与发电机连接时，如升压变压器或发电厂厂用降压变压器，一次绕组的额定电压则与发电机的额定电压相等，即要比系统的额定电压高 5%。

2) 变压器二次绕组的额定电压定义为空载时的电压。变压器满载时内部阻抗上约有 5% 的电压损耗，为使变压器在额定负荷下工作时二次侧的电压比网络额定电压高 5%，变压器二次绕组的额定电压应比网络额定电压高 10%，如 3.3、6.6、11、38.5、121、242kV 等。只有内阻抗小于 7.5% 的小型变压器和二次侧直接（包括通过短距离线路）与用电设备相连的变压器，才比网络额定电压高 5%，如 3.15、6.3、10.5kV 等。

【例 1-1】 某电力系统接线如图 1-8 所示，图中标明了各级电力线路的额定电压（单位：kV）。试求发电机和变压器绕组的额定电压。

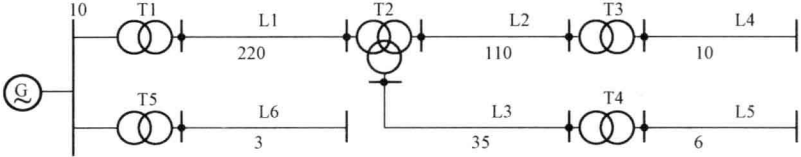


图 1-8 [例 1-1] 图

解 发电机 G 的额定电压为 10.5kV。

变压器 T1：低压侧额定电压为 10.5kV，高压侧额定电压为 242kV；

变压器 T2：高压侧额定电压为 220kV，中压侧额定电压为 121kV，低压侧额定电压为 38.5kV；

变压器 T3：高压侧额定电压为 110kV，低压侧额定电压为 11kV；

变压器 T4：高压侧额定电压为 35kV，低压侧额定电压为 6.6kV；

变压器 T5：高压侧额定电压为 10.5kV，低压侧额定电压为 3.15kV。

1.4.2 电力网电压等级的选择

Voltage Levels of Power Network

三相交流输电线路传输的有功功率为

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$$

当输送的功率和距离一定时，线路的电压越高，线路中的电流就越小，所用导线的截面可以减小，用于导线的投资也较小，同时线路中的功率损耗、电能损耗也都相应减少。但另一方面，电压等级越高，线路的绝缘就要加强，杆塔几何尺寸要增大，线路、变压器和断路