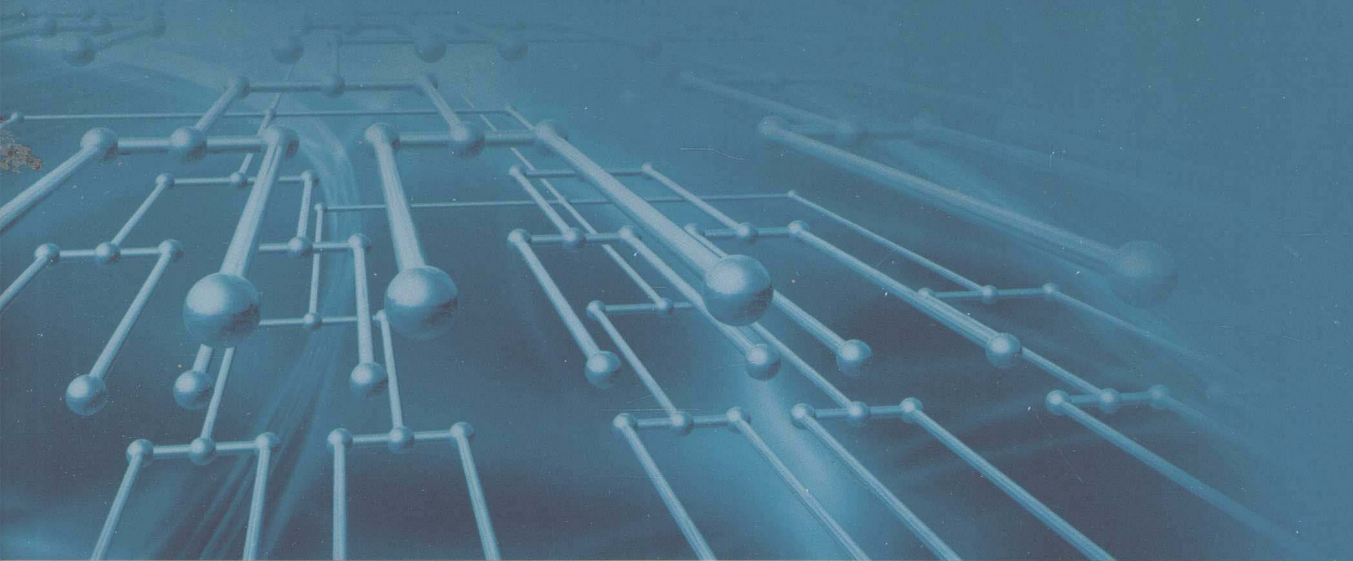




普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）



DIANLI XITONG FENXI

电力系统分析

主 编 连小洲 闵尊南

副主编 李海燕 周明华 焦 洁



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材（高职高专教育）

DIANLI XITONG FENXI

电力系统分析



 中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十二五”规划教材,是主要针对高职、大专层次的教学用书。全书分为11章,主要内容包括电力系统基本概念、各元件的参数及等值电路、短路的基本知识、对称短路、不对称故障,简单电力系统的潮流计算,电力系统电压调整、有功功率平衡和频率调整、经济运行,电力系统稳定性和电力系统计算的计算机算法介绍。各章通过“教学提示”、“知识体系”和“教学要求”引导学生抓住重点,并通过典型例题的求解和一定量的习题,帮助学生更好地领会和掌握本课程的基本要求。

本书可作为高职高专院校电力系统专业师生的参考用书,也可供电力系统专业培训及读者自学使用。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统分析/连小洲,闵尊南主编. —北京:中国电力出版社,2010.12

普通高等教育“十二五”规划教材. 高职高专教育
ISBN 978-7-5123-1282-1

I. ①电… II. ①连…②闵… III. ①电力系统-系统分析-高等学校:技术学校-教材 IV. ①TM711

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第001599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)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2011年3月第一版 2011年3月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 13.5印张 322千字

定价23.00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

本书是按照高职高专类院校教育办学的指导思想，以培养应用型、技能型人才为目标，遵循电力系统各相关专业的教学大纲编写的，是主要针对高职、大专层次的教学用书。

全书力求讲清基本概念，减少繁琐的数学推导，通过“知识体系”、“教学要求”，引导学生抓住重点，并通过典型例题的求解和一定量的习题，帮助学生更好地领会和掌握本课程的基本要求。另外，通过一些背景资料和电力系统实际应用软件的介绍，激发学生学习兴趣，拓宽学生专业知识面，提高学生的实际应用能力。

本书共分为 11 章，主要内容包括电力系统基本概念及元件和参数的计算、短路电流计算、潮流计算、电压调整、频率调整、经济运行、系统稳定和电力系统计算的计算机算法。

本书第 1、2、6 章由江西电力职业技术学院连小洲编写，第 3~5 章由闵尊南编写，第 10、11 章由李海燕编写，第 7、9 章由周明华编写，第 8 章由焦洁编写。本书由连小洲、闵尊南主编，并负责统稿；由李海燕、周明华、焦洁担任副主编；宋庆硕参加了编写。在此还要特别感谢江西电力公司超高压分公司白昶副总工程师给本书提出了许多宝贵建议。

本书承南昌工程学院章顺华老师主审，章老师对全书进行了认真、仔细的审阅，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中疏漏及不当之处在所难免，恳请广大师生、读者批评指正。

编 者

2011 年 1 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和频率	8
1.3 电力系统的接线方式	10
1.4 电力系统的负荷和负荷曲线	12
1.5 电力系统的中性点运行方式	14
小结	15
习题	15
第2章 电力系统各元件的参数及等值电路	17
2.1 架空线路的参数及等值电路	17
2.2 变压器的参数及等值电路	25
2.3 发电机和负荷的参数及等值电路	32
2.4 标幺制和电力系统等值电路的绘制	33
小结	40
习题	40
第3章 电力系统短路的基本知识	42
3.1 短路的一般概念	42
3.2 网络变换和化简	44
小结	51
习题	51
第4章 电力系统对称短路	53
4.1 无限大功率电源系统的三相短路	53
4.2 三相短路电流的实用计算	58
4.3 短路电流周期分量的近似计算	63
4.4 计算曲线的应用	65
小结	69
习题	70
第5章 电力系统不对称故障	72
5.1 对称分量法	72
5.2 电力系统旋转元件的序参数	76
5.3 电力系统静止元件的序参数	77
5.4 综合负荷的序阻抗	81
5.5 电力系统各序网络	81

5.6	简单不对称短路的分析计算	83
5.7	非全相断线的分析计算	90
	小结	92
	习题	93
第6章	简单电力系统的潮流计算	94
6.1	网络元件的电压降落和功率损耗	94
6.2	开式网的电压和功率分布计算	100
6.3	简单闭式网络的功率分布计算	104
6.4	闭式网潮流的调整控制	111
	小结	112
	习题	112
第7章	电力系统电压调整	115
7.1	电力系统的无功功率平衡	115
7.2	电力系统的电压管理	119
7.3	电压调整的基本原理	122
7.4	发电机调压	122
7.5	改变变压器变比调压	123
7.6	利用无功功率补偿调压	126
7.7	改变输电线路的参数调压	129
	小结	132
	习题	132
第8章	电力系统有功功率平衡和频率调整	134
8.1	概述	134
8.2	电力系统的频率特性	136
8.3	电力系统的频率调整	141
8.4	各类发电厂的合理组合	146
	小结	149
	习题	150
第9章	电力系统经济运行	152
9.1	电力系统有功功率的最优分配	152
9.2	电网中的电能损耗	156
9.3	降低电网电能损耗的措施	159
	小结	161
	习题	161
第10章	电力系统稳定性	163
10.1	概述	163
10.2	电力系统静态稳定性的基本概念	166
10.3	电力系统暂态稳定性的概念	168
10.4	提高电力系统稳定性的措施	172

小结.....	177
习题.....	178
第 11 章 电力系统计算的计算机算法介绍	180
11.1 电力网络的基本方程式.....	180
11.2 电力系统潮流计算机算法介绍.....	186
11.3 电力系统短路电流计算机算法介绍.....	190
小结.....	197
习题.....	197
附录 短路电流周期分量计算曲线数字线.....	200
参考文献.....	205

第1章 电力系统的基本概念

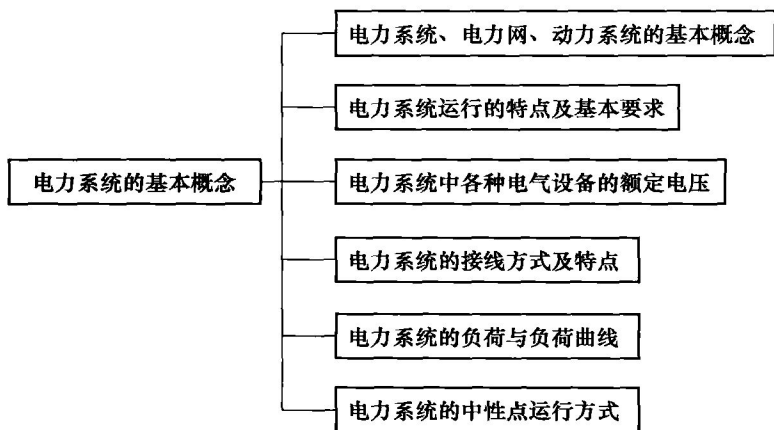


教学提示

对电力系统进行分析和计算之前，首先要掌握电力系统的组成和运行的特点，了解电力系统的基本图形符号和参数特性。



知识体系



教学要求

熟悉电力系统中的基本概念和系统接线图。

1.1 电力系统概述

1.1.1 电力系统的组成

发电厂把其他形式的能量转换成电能，电能经过变压器和不同电压等级的输电线路输送并被分配给用户，再通过各种用电设备转换成适合用户需要的其他能量。这些生产、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。电力系统加上电能生产的动力部分（如火电厂的锅炉、汽轮机，水电厂的水库、水轮机，核能电厂的反应堆、汽轮机）就组成了动力系统；而电力系统去掉发电机和电能用户后余下的输送和分配电能的部分称为电力网（简称电网），它包括升、降压变压器和各种电压等级的输电线路（见图1-1）。

在交流电力系统中，发电机、变压器、输配电设备都是三相的，这些设备之间的连接状况，可以用电力系统接线图来表示。为简单起见，电力系统接线图一般都画成单线的，常用

图 1-2 所示的网络来表示简单电力系统。识图时，可以从发电厂开始，沿着电能传输的方向，依次识读升压变压器、输电线路、降压变压器和负荷。

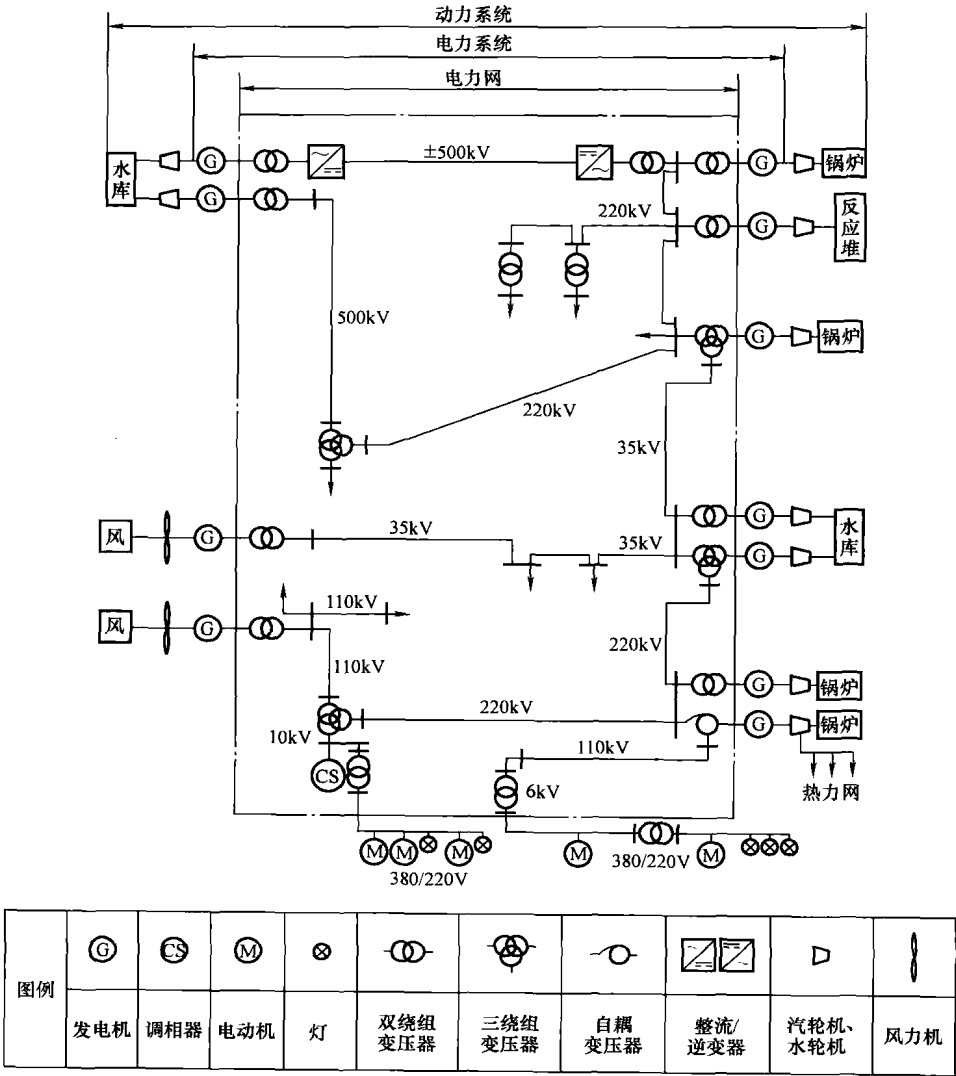


图 1-1 动力系统、电力系统和电力网示意

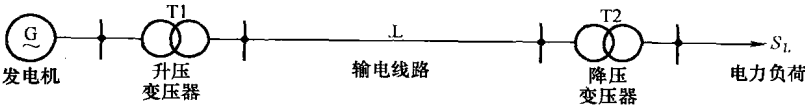


图 1-2 简单电力系统

1.1.2 电力系统运行的特点

电力工业的特点是发电、输电、变电、用电同时完成，生产、输送、分配和消费的各环节组成为一个整体。与其他的工业系统相比较，电力系统的运行具有如下的明显特点。

1.1.2.1 电力生产的连续性

发电、输电、配电、供电是同时完成的，电能不能大量高效地储存，必须用多少，发多少。电能输送过程迅速，其传输速度与光速相同，每秒达到 30 万 km，即使相距几万公里，发、供、用也都是在同一瞬间实现。

1.1.2.2 电力系统的暂态过程非常短促

电力系统从一种状态到另一种状态的过渡极为迅速，所以电力系统运行必须采用自动化程度高、能迅速而准确动作的继电保护及自动装置和监控设备。

1.1.2.3 电力系统与国民经济各部门及人们的日常生活有着极为密切的关系

电能是现代社会中最重要、最方便的能源。在保证相同的能源服务水平的前提下，使用电能这种优质能源最清洁、方便，易于控制，效率也较高。因此，电能被极其广泛地应用于工农业、交通运输业、商业贸易、通信以及人民的日常生活中。如果供电突然中断，会给很多行业带来严重的后果。

1.1.3 电力系统运行的基本要求

1.1.3.1 保证安全可靠的供电

电力系统的运行首先要保证安全可靠地发、供电，没有这个前提，其后面的“优质”、“经济”等要求将失去意义。因为电力系统供电的突然中断将使生产停顿，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，给国民经济带来严重的损失。全面提高电力系统的安全运行水平，就为保证不间断供电创造了最基本的条件。根据用户对供电可靠性的不同要求，目前我国将负荷分为以下三级：

第一级负荷。对这一级负荷中断供电的后果是极为严重的。例如：可能发生危及人身安全的事；使工业生产中的关键设备遭到难以修复的损坏，以致生产秩序长期不能恢复正常，造成国民经济的重大损失；使市政生活的重要部门发生混乱等。

第二级负荷。对这一级负荷中断供电将造成大量减产，使城市中大量居民的正常活动受到影响等。

第三级负荷。不属于第一、二级的，停电影响不大的其他负荷都属于第三级负荷，如工厂的附属车间，小城镇和农村的公共负荷等。对这一级负荷的短时供电中断不会造成重大的损失。

对于以上三个级别的负荷，可以根据具体情况分别采取适当的技术措施，来满足它们对供电可靠性的要求。

1.1.3.2 保证良好的电能质量

电压和频率以及谐波分量是衡量电能质量的三个重要指标，它们不仅直接影响电力用户产品的质量，而且直接关系电力系统本身的安全。

频率反映了电力系统有功功率供需平衡的基本状态。如果电力系统的有功功率供大于求，电网的运行频率将高于额定值；反之，则将低于额定值。电压是电力系统无功功率供需平衡的具体表现，无功功率不足时，电压就偏低。谐波成分的出现，将大大影响电动机的效率和正常运行，还可能使系统产生高次谐波共振而危害设备的安全运行。谐波成分还将影响电子设备的正常工作，造成对通信线路的干扰以及其他不良后果。

我国采用的额定频率为 50Hz，正常运行时允许的偏移为 $\pm 0.2 \sim \pm 0.5$ Hz。用户供电电压的允许偏移对于 35kV 及以上电压等级为额定值的 $\pm 5\%$ ，10kV 及以下为 $\pm 7\%$ 。为保证

电压质量,对电压正弦波形畸变率也有限制。波形畸变率是指各次谐波有效值平方和的方根值对基波有效值的百分比,对于6~10kV供电电压应不超过4%,0.38kV应不超过5%。电压和频率超出允许偏移时,不仅会造成废品和减产,还会影响用电设备的安全,严重时甚至会危及整个系统的安全运行。

要保证良好的电能质量,关键在于系统发出的有功功率和无功功率都应满足在额定频率和额定电压下的平衡要求。电源要配置得当,还要有适当的调整手段。对系统中的谐波污染源要进行有效的限制和治理。

1.1.3.3 提高系统运行的经济性

电能生产的规模很大,消耗的能源在国民经济能源总消耗中占的比重也很大,而且电能又是国民经济的大多数生产部门的主要动力源,因此,提高电能生产的经济性具有十分重要的意义。

电力系统运行的经济性主要是指尽量地降低发电厂的煤耗率(水耗率)、厂用电率和电力网的损耗率。这就是说,要求在电能的生产、输送和分配过程中减少损耗,提高效率。为此,应做好规划设计,合理利用能源,采用高效率低损耗设备,采取相应的措施来降低网损,实行经济调度等。

1.1.3.4 尽可能减小对生态环境的有害影响

煤炭燃烧时会产生大量的二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、粉尘和废渣等,因此燃煤电厂要采用大型单元机组,逐步淘汰小型低效机组,研究和采用清洁煤技术,限制污染物的排放量,使电能生产符合环境保护标准。另外,要积极发展可再生分布式能源发电,以减小对环境的危害。

简而言之,对电力系统的基本要求为“安全可靠、优质、经济、环保”。

背景资料

一、我国电力系统概况

中国的电力工业从1882年第一座电厂建成到1949年新中国成立时,经历了67年,装机总容量只有185万kW。新中国成立后,到1980年全国装机总容量达到6500万kW。1981~1999年的19年间,新增装机容量超过2.23亿kW。“六五”期间电力年消费平均增长迅速,特别是近几年,我国装机容量以每年超过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2008年底,我国已成为仅次于美国的电力大国,电力装机容量达7.9578亿kW,发电量达34334亿kWh时,人均用电量达到2580kWh。这些发展成果极大地提高了中国在国际能源领域的地位。20年改革开放过程中,世界上几乎所有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求,扭转了长期严重缺电的局面,为我国经济高速度发展作出了贡献。同时,电力工业的发展也提高了人民生活用电的水平,城乡生活用电从1980年的79亿kWh(占总用电量的3.1%),提高到1998年的1387亿kWh(占总用电量的12.2%)。随着电力体制的改革,“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、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。

我国电力工业的飞速发展，还体现在电网、单机容量和电厂规模等方面的大幅度提高上。1974年建成了我国第一条330kV输电线路，由甘肃刘家峡水电厂到陕西关中地区。1981年建成了第一条500kV输电线路，由河南姚孟火电厂到武汉。电力系统输电电压等级，除西北电网为330/220/110kV外，其他电网采用的都是500/220/110kV。国内各省电网都已形成220kV网架，华北、东北、华东、华中、南方等电网都已建成500kV大容量输电线路和跨省联络线，并将逐步形成跨大区互联的骨干网络。正在建设中的西北750kV输变电工程，标志着我国电网输电电压等级由目前最高的500kV即将升级为750kV，实现历史性跨越。除超高压交流输电外，1988年建成了从葛洲坝水电厂到上海南桥变电站的±500kV直流输电线路，全长1080km，输送容量 120×10^4 kW，使华中和华东两大电网互联，形成了跨大区的联合电力系统。晋东南至荆门特高压交流试验示范工程起于山西长治，经河南南阳，南至湖北荆门，全长约653.8km。工程静态总投资约58.57亿元，系统额定电压1000kV，最高运行电压1100kV，自然输送功率500万kW。其中，荆门特高压变电站一期工程主变压器容量300万kVA，于2008年建成投产。

现在，我国最大的火电机组容量为90万kW（外高桥第二发电厂），最大的水电机组容量为70万kW（三峡工程），最大的核电机组容量为100万kW（岭澳核电厂）；最大的火力发电厂容量为300万kW（北仑港电厂， 5×60 万kW），最大的水力发电厂容量为1820万kW（三峡水电厂， 26×70 万kW），最大的核能发电厂容量为200万kW（岭澳核电厂， 2×100 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， 8×30 万kW），这也是目前世界上最大的抽水蓄能电厂。

举世瞩目的三峡工程，装机容量32台（含地下电厂6台机组），单机容量70万kW，年均发电量 847×10^8 kWh，比全世界70万kW机组的总和还多，将是世界上最大的发电厂。三峡工程经过半个多世纪的论证，10多年艰辛建设，按期实现了蓄水、通航、发电三大目标，攻克了一系列的世界级难题，刷新了一系列的世界纪录，制造了一系列人间奇迹，实现了几代中国人民执著追求的百年梦想，谱写了世界水电建设史上光辉的一页。

我国核电力工业起步较晚，自行设计、制造、安装、调试的30万kW浙江秦山核电厂于1991年12月首次并网发电，实现了核电厂零的突破。引进 2×90 万kW压水堆核电机组，1994年投入运营（大亚湾核电厂），其安装、调试和运行管理等方面都达到了世界先进水平。岭澳核电厂（ 2×100 万kW）是我国目前最大的核能发电厂，标志着我国的核电力工业迈入了一个新的发展阶段，标志着我国电力工业在技术上向现代化方向大步迈进。

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，全国联网格局基本形成。三峡送变电工程中已完成三峡—常州、三峡—广东等500kV高压直流输电工程。因此，实现全国联网战略正在顺利推进。

二、新能源发电

随着现在社会国民经济的高速发展和人民生活水平的提高，还有煤、石油、天然气等过度开采，面临资源枯竭的前景，整个电力市场的供需矛盾日趋突出，如何解决当前能源和电力短缺的问题，是保证能源和电力可持续发展的关键所在。解决问题的途径有两个：

一是从能源消费角度着手,即大力倡导节能,鼓励和提高全民的增效节能意识。节能的关键是尽快调整产业结构,将产业结构的重心转向低能耗、高附加值的第三产业,依靠科技大力提高工业和第三产业的能源利用效率。但需要说明的是,节能只能缓解我国的能源和电力紧缺,而且从高能耗产业向低能耗产业的过渡,需要有一个较长的转化期。

二是从能源供给角度着手,即大力增加新能源的供给。可持续发展的环保要求以及能源短缺的局面带来了全球能源多样化发展的格局,在继续发展常规能源的同时,新的可再生能源日益受到重视。

当前发达国家都在大力推进可再生能源的发展。欧盟计划到2015年将由新能源提供的电力占总发电量的比例提高到22%,德国则计划将可再生能源(主要是风力发电)的发电量提高到占总发电量的12.5%。清洁、高效成为能源生产和消费的主流,世界各国都在加快能源发展多样化的步伐。

风电一直是世界上增长最快的能源,装机容量每年增长超过30%。到2003年初,全球风力发电装机容量达到3200万kW,即总量已经相当于32座核电站,足以供应1600万欧洲普通家庭的电力需求。世界范围内风电正在以33%在部分国家甚至以60%以上的速度飞速发展。

我国也拥有可供大规模开发利用的风能资源。据初步估计,陆地上可开发的风能资源即超过2.53亿kW,加上近海1.5m深的浅海地带的风能资源,全国可开发风能资源估计在10亿kW以上。与之相对照,我国水能资源可开发量仅为4.02亿kW。所以国外专家评论,中国单靠风力发电就能轻而易举地将现有电力生产翻一番。

风力发电有离网型和并网型两种类型。离网型的风力发电规模较小,通过蓄电池等储能装置或者和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等),可以解决偏远地区的供电问题。并网型风力发电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。并网型的风电场可以得到大电网的补偿和支撑,更加充分地开发可利用的风能资源,是近几年国内外风力发电发展的主要方向。

另一种人们日益关注的新能源发电形式为太阳能发电。太阳一年投射到地面上的能量高达 1.05×10^{18} kWh,相当于 1.3×10^6 亿t标准煤,我国每年接受的太阳辐射能相当于 2.4×10^4 亿t标准煤。太阳能的转换利用方式有光—热转换、光—电转换以及光—化学转换三种主要方式。其中太阳能的光—电转换分为直接转换和间接转换。直接转换就是将太阳辐射能直接转换为电能,有两种转换形式:①通过太阳能电池直接将太阳辐射能转换为电能,即光伏发电;②利用太阳能热能直接发电,目前有利利用半导体材料的温差发电、真空器件中的热电子和热离子发电以及磁流体发电等。利用太阳能热能直接发电目前还处于实验室研究阶段。间接发电主要是指太阳能热动力发电。它的工作原理是先将太阳能转换为热能,然后利用热能驱动热机循环发电。热动力发电技术已经达到实际应用水平,美国、以色列等国家已建立了一定规模的太阳能热动力电站。

三、智能电网

目前电力系统已经发展成为集中发电、远距离输电的大型互联网络系统,而电力系统结构的高度互联和设备的日益老化问题不容忽视,任何一个发生在局部小范围内的故障都有可能迅速蔓延并影响到整个电网。近年来大停电事故频繁发生,如2003年的美加大停电和2006年的欧洲大停电等,充分暴露了当今电力系统的脆弱性。现在电子设备的广泛应用,

使得电力用户对电能质量、可靠性和经济性有着越来越高的要求。在如此严峻的形势下，如何保证一个可靠、安全、环保、高效和灵活的电力系统，成为21世纪最受人瞩目的困难和挑战。为了解决这一难题，几年前，美国电力科学研究院（EPRI）、美国能源部（DOE）以及欧盟委员会（EC）等纷纷提出各自对未来智能电网的设想和框架。其中提出的概念包括Intelli Grid, Modern Grid, Grid Wise, Smart Grid等。这些不同的概念对未来电网的特点给出了相似的设想，即自愈、安全、兼容、交互、协调、高效、优质、集成等。

但是，目前智能电网还处于初期研究阶段，国际上尚无统一而明确的定义。由于发展环境和驱动因素不同，不同国家的电网企业和组织都在以自己的方式对智能电网进行理解、研究和实践，各国智能电网发展的思路、路径和重点也各不相同。从广义上来说，智能电网包括可以优先使用清洁能源的智能调度系统、可以动态定价的智能计量系统以及通过调整发电、用电设备功率优化负荷平衡的智能技术系统。图1-3展示了未来智能电网的基本结构，电能不仅从集中式发电厂流向输电网、配电网直至用户，同时电网中还遍布各种形式的新能源和清洁能源；如光伏发电、风力发电、燃料电池、电动汽车等。此外，高速、双向的通信系统实现了控制中心与电网设备之间的信息交互，高级的分析工具和决策体系保证了智能电网的安全、稳定和优化运行。

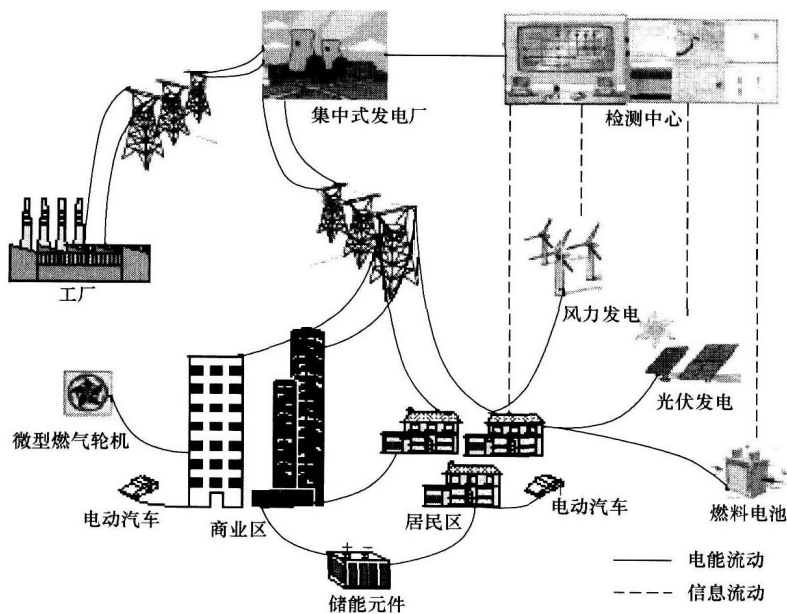


图 1-3 未来智能电网的基本结构

通过分析比较欧美国家对智能电网的定义，可以总结出智能电网所具有五个关键特征：

(1) 自愈：实时掌握电网运行状态，预测电网运行趋势，及时发现、快速诊断故障隐患和预防故障发生；故障发生时，在没有或少量人工干预下，能够快速隔离故障、自我恢复，避免大面积停电的发生。

(2) 兼容：电网能够同时适应集中式发电和分布式发电模式，实现与负荷侧的交互，支

持各种清洁、绿色、可再生能源的接入，满足电网与自然环境的协调发展。

(3) 优化：优化资产规划、建设、运行维护等各个环节，提高资产的利用效率，降低运行、维护和投资成本。

(4) 互动：实现与用户的智能互动，有效展开电力交易，实现资源的优化配置，提供最佳的电能质量和供电可靠性。

(5) 集成：实现监测、控制、保护、维护、调度和电力市场管理等数字化信息系统的全面集成，形成全面的辅助决策体系。

智能电网与当前的电力系统相比，它的优势主要体现在：①在初期就能检测电网问题并实施校正措施；②接受更加大量的数据信息并作出响应；③系统快速恢复的能力；④迅速适应电网变化并进行拓扑重构；⑤为运行人员提供高级的可视化辅助系统。

近年来，中国学者在借鉴欧美智能电网研究的基础上，对中国发展智能电网的特点、技术组成以及实现顺序等进行了研究。在 2009 年 5 月 21~22 日召开的“2009 特高压输电技术国际会议”上，国家电网公司公布了对智能电网内涵的定义，即统一坚强智能电网是以坚强网架为基础，以通信信息平台为支撑，以智能控制为手段，包含发电、输电、变电、配电、用电和调度六大环节，覆盖所有电压等级，实现“电力流、信息流、业务流”的高度一体化融合，是坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动的现代电网。

统一坚强智能电网在技术上包含四个基本特征，即信息化、数字化、自动化、互动化。其中：信息化是指实时和非实时信息的高度集成、共享和利用；数字化是指电网对象、结构及状态的定量描述和各类信息的精确高效采集与传输；自动化是指电网控制策略的自动优选、运行状态的自动监控和故障状态的自动恢复等；互动化是指电源、电网和用户资源的友好互动和协调运行。

1.2 电力系统的额定电压和频率

1.2.1 额定电压（频率）的概念和电网的电压等级

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

输电线路输送的功率一定时，输电电压越高，线路电流越小，线损就越小，导线等载流部分的截面积越小，投资也越小；但电压越高，对绝缘要求越高，杆塔、变压器、断路器等投资也越大。综合考虑这些因素，对应一定的输送功率和输送距离就有一最合理的线电压。但从设备制造角度考虑，为保证产品的系列性，应规定标准的电压等级。相邻电压等级之比不宜过小，一般在 2 左右。我国规定的电网标准电压等级即指线路的额定电压，主要有 3、6、10、35、60、110、154、220、330、500、750、1000kV。

1.2.2 各种主要电气设备的额定电压

我国制定的三相交流 3kV 及以上主要电气设备与系统额定电压的数值见表 1-1。下面用电设备、发电机、变压器的额定电压不一致的原因以及它们与线路额定电压之间的关系进行说明。

表 1-1

3kV 以上的主要电气设备与系统的额定电压

kV

受电设备与系统 额定线电压	供电设备额定线电压	变压器额定线电压	
		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	—
	20*	20	—
35	—	35	38.5
110	—	110	121
220	—	220	242
330	—	330	363
500	—	500	550

注 带“*”号数字为发电机专用。

从表 1-1 可以看出, 同一电压等级下, 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, 各电气设备的额定电压之间有一个相互配合的问题。

输电线路的额定电压和系统的额定电压相等，一般也称为网络的额定电压，如 3、6、10、35、110、220、500kV 等。

发电机的额定电压与系统的额定电压为同一等级时，发电机的额定电压规定要比系统的额定电压高 5%，如 3.15、6.3、10.5kV 等。

变压器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，输出功率一侧的绕组为二次绕组。

变压器一次绕组的作用相当于受电设备，对于普通降压变压器，其额定电压与系统的额定电压相等。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%。

变压器二次绕组的作用相当于供电设备，考虑其内部电压损耗，规定其额定电压要比系统的额定电压高 10%，如 3.3、6.6、11、38.5、121、242kV 等。如果变压器的短路电压小于 7%或直接与用户连接（包括通过短距离线路），则规定要比系统的额定电压高 5%，如 3.15、6.3、10.5kV 等。

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(及中压绕组)上设计制造有分接头,并装有分接开关,以改变有效匝数,使变比得以改变,进行分级调压。分接头用百分数表示,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值。对同一电压等级的变压器,作为升压变压器或是降压变压器,即使分接抽头百分值相同,但分接抽头的电压却不同。图 1-4 所示为用线电压表示的 220kV 电压级具有分接抽头 ($1 \pm 2 \times 2.5\%$) U_N 变压器的各分

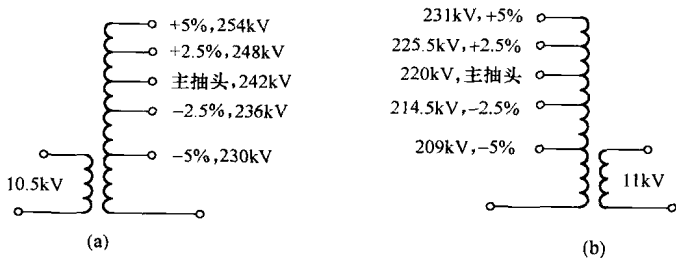


图 1-4 用线电压表示的分接抽头额定电压

(a) 升压变压器; (b) 降压变压器

接抽头电压。可见对于+5%分接抽头, 升压变压器为 $242 \times 1.05 \text{ kV} = 254 \text{ kV}$, 降压变压器则为 $220 \times 1.05 \text{ kV} = 231 \text{ kV}$ 。

根据分接开关是否可以带负荷操作, 电力变压器又可分为有载调压变压器和停电时才可切换的无载调压变压器两种。

1.2.3 额定频率

我国电力系统的额定频率为 50Hz, 这是我国电力生产的标准频率, 简称工频。

【例 1-1】某电力系统接线图如图 1-5 所示, 图中标明了各级输电线路的额定电压(单位 kV)。试求变压器高、中、低压绕组的额定电压。

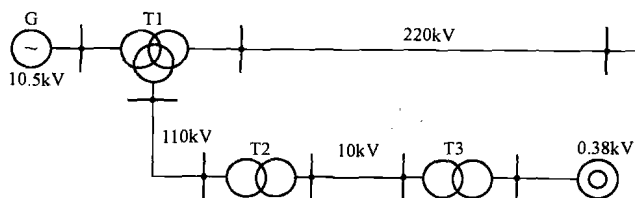


图 1-5 某电力系统接线图

解 变压器 T1 低压侧额定电压为 10.5kV, 中压侧额定电压为 121kV, 高压侧额定电压为 242kV; 变压器 T2 高压侧额定电压为 110kV, 低压侧额定电压为 11kV; 变压器 T3 高压侧额定电压为 10kV, 低压侧额定电压为 0.4kV。

1.3 电力系统的接线方式

电力系统的接线方式对于保证安全、优质和经济地向用户供电具有重要的作用。它包括发电厂的主接线、变电所的主接线和电网的接线, 本节只对电网的接线方式进行介绍。

电网的接线方式, 按供电可靠性不同可分为无备用接线和有备用接线两种, 或者分为开式网和闭式网。

无备用接线的电网中, 每一个负荷只能靠一条线路取得电能, 包括放射式、干线式和链式, 如图 1-6 所示。这种接线方式具有接线简单、投资少、运行维护方便等优点, 缺点是供电可靠性低。与其他两种无备用接线方式相比较, 放射式接线耗材较多, 但可靠性较高; 而干线式、链式接线则存在线路较长时末端电压偏低等缺点。

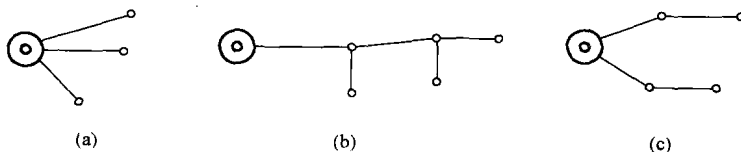


图 1-6 无备用接线方式
(a) 放射式; (b) 干线式; (c) 链式

有备用接线的网络中, 每一个负荷可以从两条及两条以上的线路取得电能, 包括放射式、干线式、链式、两端供电网和环形网, 如图 1-7 所示。

前三种接线方式是在无备用网络的每一段线路上都增加一条线路, 即采用双回线路。这种接线具有接线简单、运行方便、供电可靠性高等优点, 但缺点是设备投资大。两端供电网与环形网的供电可靠性高、投资少, 但运行调度复杂。对于环形网, 当某条线路发