



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

电力系统分析理论

第三版

刘天琪 邱晓燕 编著



科学出版社

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

电力系统分析理论

(第三版)

刘天琪 邱晓燕 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书根据教育部颁布的引导性专业目录宽口径精神,针对强弱电结合形成的电气工程及其自动化专业而编写,在内容组织上满足该专业培养计划的要求,为学生学习相关专业知识和从事相关领域工作奠定坚实的理论基础。

全书内容包括:电力系统概述和电力系统元件模型及参数计算,电力系统稳态分析(潮流计算),电力系统的频率调整和电压调整,电力系统三相短路和不对称故障的分析计算,电力系统的稳定性分析等。为便于自学,每章末附有部分习题答案,书后附有电力系统分析实际应用实例(小型电网规划设计)提纲。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业本科生教材,也可供电力系统企事业单位和其他相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统分析理论/刘天琪,邱晓燕编著.—3版.—北京:科学出版社,2017.6

(“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材)

ISBN 978-7-03-053263-3

I. ①电… II. ①刘…②邱… 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(2017)第 128542 号

责任编辑:余 江 张丽花 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:霍 兵 / 封面设计:迷底书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市密东印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年2月第一版 开本:787×1092 1/16

2011年6月第二版 印张:17 3/4

2017年6月第三版 字数:452 000

2017年6月第22次印刷

定价:46.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第三版前言

一本大学专业课教材能够多次再版,是值得高兴的事。

从 2005 年初版到 2011 年再版,再到 2017 年第三版的提升修订,三级跳已然让本书成为一本教学体系比较完善、深受欢迎的电力类教科书。2014 年本书荣幸成为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。据统计,截止 2016 年底,全国已经有 80 余所高等院校选用本书作为专业核心课“电力系统分析”的教材,且第二版总销量达到三万多册。回顾第二版六年“荣光”,本教材不过多一些体系、逻辑层次和精要讲解,多一些思维方法和解题的思路而已。各位读者、学生及教师们对本书的厚爱 and 共同培育才是本书成功的重要保障。

现在时代站在了“十三五”的历史潮头,社会正悄然发生历史性的转换,云大物移、互联网+等新事物、新理念、新技术对传统电力系统及其纸质教材再次带来新的挑战。顺应历史潮流而坚守经典理论,让经典教材具有时代特征,这是第三版修订的主要思想和宗旨。

首先,我们坚持原有体系,对个别编排性文字错误再次进行了修订;对第 1 章内容和数据进行了必要更新,紧随时代;对其他章节部分内容进行了适当增删,让教材更紧凑;对第 9 章进行了拆分,让教与学更灵活。

其次,采用二维码方案对全书相关章节和习题进行编撰,让纸质教材显得精炼。让一些需要更加详细阐释的内容、相关资料性材料、部分可变性较强的内容等纳入二维码阅读。读者通过扫描二维码查阅相关内容,包括部分习题答案、文字阐释、音频讲解、PPT 展示等。今后对二维码中的内容可以进行无缝升级,而纸质教材保持不变。

本书仍由刘天琪教授负责策划和统稿,共分 10 章,其中第 1~5 章由刘天琪教授编写,第 6~10 章和课程设计由邱晓燕教授编写。

本书第三版的修编继续得到四川大学的热情支持。感谢李华强教授对教材提出的部分修订建议,感谢黄媛老师对习题及其答案的部分修订,感谢研究生南路、艾青、曾红、陈科彬对书稿文字的校正和部分增加例题的演算。同时特别感谢责任编辑余江为本书第三版付出的辛勤劳动。

限于编者水平,加之修编时间仓促,书中难免存有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2017 年 4 月于四川大学望江校区



第一版前言



第二版前言

目 录

第三版前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电力系统及其发展	1
1.2 发电	4
1.3 电力网	8
1.4 现代电力系统的运行特点及基本要求	11
1.5 电力系统的负荷和负荷曲线	14
1.6 电力系统的额定电压和额定频率	17
思考题与习题	20
第 2 章 电力系统元件模型及参数计算	21
2.1 系统等值模型的基本概念	21
2.2 输电线路的等值电路和参数计算	22
2.3 长距离输电线路的稳态方程和等值电路	27
2.4 变压器的等值电路和参数	32
2.5 发电机和负荷模型	38
2.6 电力系统的稳态等值电路	41
思考题与习题	48
第 3 章 简单电力网的潮流计算	50
3.1 潮流计算的一般概念	50
3.2 网络元件的电压降落和功率损耗	50
3.3 开式电力网的潮流计算	54
3.4 简单闭式电力网的潮流计算	59
3.5 多级电压环网的功率分布	65
3.6 电力网的电能损耗	69
思考题与习题	75
第 4 章 电力系统有功功率和频率调整	78
4.1 有功平衡与频率调整	78
4.2 电力系统的频率特性	81
4.3 电力系统的频率调整	87
4.4 电力系统有功功率的最优分配	95
思考题与习题	101
第 5 章 电力系统无功功率和电压调整	103
5.1 电压调整的一般概念	103
5.2 电力系统的无功功率平衡	105

5.3	电力系统中枢点的电压管理	112
5.4	电力系统的电压调整	114
5.5	频率调整与电压调整的关系	132
	思考题与习题	133
第 6 章	同步发电机的基本方程	135
6.1	理想同步发电机的结构	135
6.2	同步发电机的原始方程	135
6.3	同步发电机的基本方程	140
6.4	各种运行方式下同步发电机的电势方程	145
	思考题与习题	153
第 7 章	电力系统三相短路的分析计算	154
7.1	短路的一般概念	154
7.2	恒定电势源电路的三相短路	155
7.3	同步电机三相短路的暂态过程	159
7.4	同步发电机三相短路电流计算	162
7.5	电力系统三相短路的实用计算	166
	思考题与习题	184
第 8 章	电力系统不对称故障的分析计算	187
8.1	对称分量法在不对称短路计算中的应用	187
8.2	电力系统各元件的序参数和各序等值电路	192
8.3	简单不对称短路的分析计算	201
8.4	不对称短路时网络中电流和电压的计算	207
8.5	非全相断线的分析计算	211
	思考题与习题	215
第 9 章	电力系统稳定性基本概念和元件机电特性	218
9.1	稳定性的基本概念及分类	218
9.2	同步发电机的转子运动方程	219
9.3	电力系统的功率特性	221
9.4	自动励磁调节系统及励磁绕组的动态方程	228
	思考题与习题	230
第 10 章	电力系统静态稳定和暂态稳定分析	231
10.1	简单电力系统静态稳定性分析	231
10.2	小干扰法的基本原理及应用	234
10.3	自动励磁调节器对静态稳定的影响	240
10.4	电力系统的暂态稳定性	247
10.5	发电机转子运动方程的数值解法	251
10.6	提高电力系统稳定性的措施	256
	思考题与习题	262
	参考文献	264

附录 I 课程设计——电力网规划设计..... 265

 I.1 电力网规划概述 265

 I.2 设计任务书 265

 I.3 设计的主要内容及步骤 266

 I.4 最优方案的技术经济计算 269

 I.5 设计成果 271

附录 II 短路电流周期分量计算曲线数字表..... 273

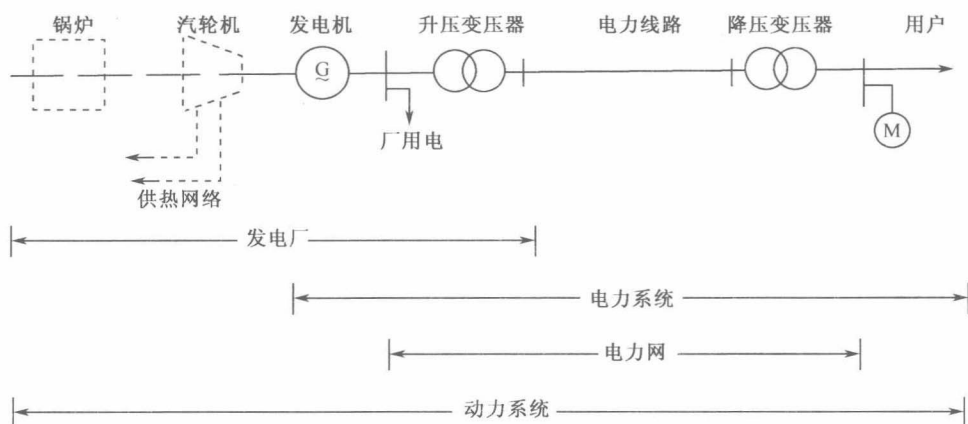
第 1 章 绪 论

1.1 电力系统及其发展

1.1.1 电力系统

电能是现代社会中最重要、最方便的能源。电能具有许多优点,它可以方便地转化为别种形式的能,例如机械能、热能、光能、化学能等;它的输送和分配易于实现;它的应用方式也很灵活。因此,电能被日益广泛地应用于工农业、交通运输业以及人民的日常生活中。以电作为动力,可以促进工农业生产的机械化和自动化,保证产品质量,大幅度提高劳动生产率。另外,提高电气化程度,以电能代替其他形式的能量,也是节约总能源消耗的一个重要途径。

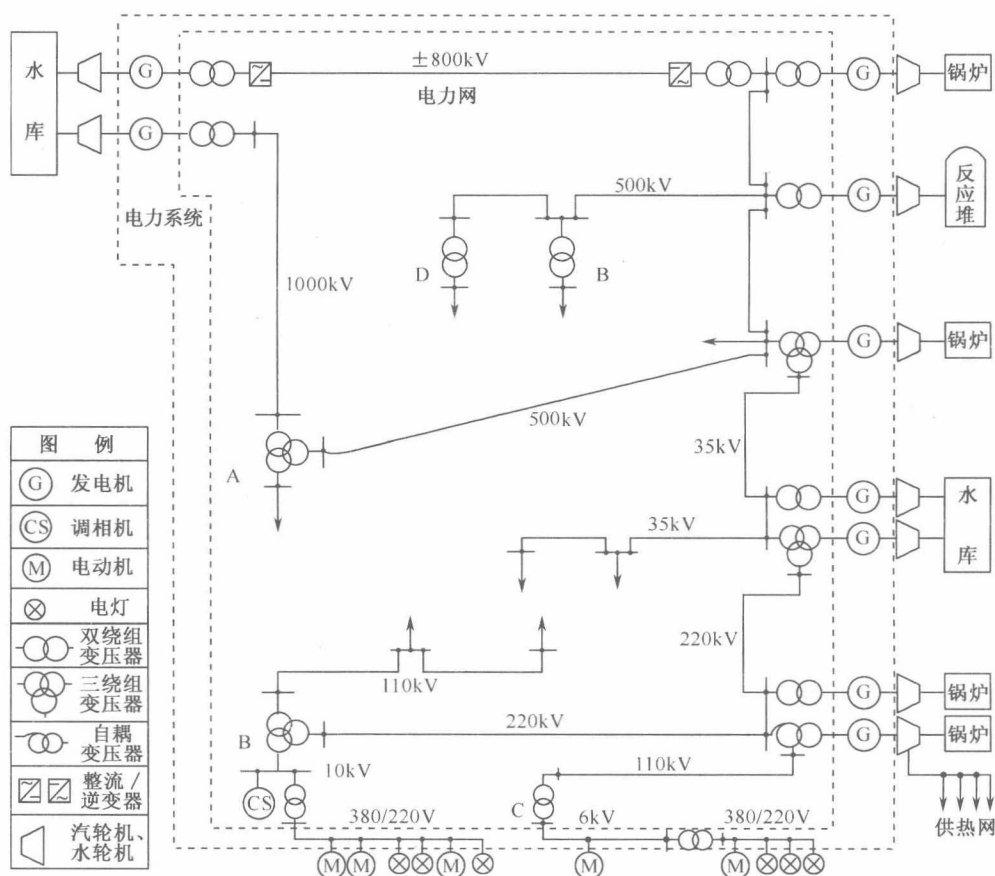
发电厂把别种形式的能量转换成电能,电能经过变压器和不同电压的输电线路输送并被分配给用户,再通过各种用电设备转换成适合用户需要的别种能量。这些生产、输送、分配和消费电能的各种电气设备连接在一起而组成的整体称为电力系统。如果把火电厂的汽轮机、锅炉、供热管道和热用户,水电厂的水轮机和水库等动力部分也包括进来,就称为动力系统。采用热动能的动力系统和电力系统的简单示意图如图 1-1 所示。电力系统中输送和分配电能的部分称为电力网,它包括升压变压器、降压变压器、相关变电设备,以及各种电压等级的输电线路。电力系统和电力网的元件构成如图 1-2 所示。



1.1.2 电力工业的发展

1. 世界电力工业的发展

从 1831 年法拉第发现了电磁感应定律,到 1875 年巴黎北火车站发电厂的建立,电真正进入了实用的阶段。世界上第一台火力发电机组是 1875 年建于巴黎北火车站的直流发电机,用于照



明供电。1879 年,美国旧金山实验电厂开始发电,这是世界上最早出售电力的电厂。1882 年,美国纽约珍珠街电厂建成发电,装有 6 台直流发电机,总容量为 670kW,以 110V 直流为电灯照明供电。经过 100 多年的发展,到 2013 年全世界发电总装机容量已达 5.73TW,年发电量约 22500TW·h。

第一座发电厂在英国伦敦建成时,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。

进入 19 世纪 90 年代,随着电力变压器的实际应用,昔日直流技术的地位受到交流的挑战,并被其代替。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。1891 年 8 月 25 日世界上第一条三相交流高压输电线在德国投入运行。在该线始端劳奋水电厂安装了一台 $230\text{kV} \cdot \text{A}$ 、 90V 的三相交流发电机和一台 $200\text{kV} \cdot \text{A}$ 、 $95/15200\text{V}$ 的变压器;线路末端法兰克福建造了两座 $13800/112\text{V}$ 降压变压器,其中一座供慕尼黑国际电工展览会用电,另一座为 74.57kW 的三相异步电动机供电,输电效率为 80% 。最早形成的交流电力系统出现在伦敦。发电厂厂址在远离市区的伊尔福德,厂内安装了一台容量为 1000kW 、电压为 2500V 的交

流发电机,通过升压变压器把电压升高到 10kV,经 12km 的输电线送到伦敦市区四个变电所,降为 2400V,再经配电变压器降为 100V 向用户供电。交流输电系统很快胜出的原因主要有三点:交流系统的电压水平可以很容易地转换,因而为不同电压的发电、输电和用电提供了灵活性;交流发电机比直流发电机更简单;交流电动机比直流电动机更简单、价廉。

1891 年瑞士人布洛制造出第一台 30kV 高压油浸变压器之后,高压输电网得到迅速发展。世界用电负荷的快速增长也极大带动了发电机制造技术向大型、特大型机组发展。而由于供电范围扩大,以大型和特大型发电机组为基础建设的大容量和特大容量电厂越来越向远离负荷中心的一次能源地区发展。大容量远距离输电的需求,使电网的电压等级迅速向超、特高压发展。从 20 世纪 50 年代开始,330kV 及以上超高压输电线路得到了快速发展。1952 年在瑞典建成世界上第一条 380kV 超高压输电线路;1965 年加拿大建成世界第一条 735kV 输电线路。随后,美国又于 1969 年建成 765kV 输电线路;1985 年,苏联哈萨克的埃基巴斯图兹火电厂至乌拉尔的 1150kV 特高压输电线投入运行,线路长 1300km,更是开创了输电电压的新纪录。

虽然交流输电系统一统天下历经了半个多世纪,而且在发电和变电方面,交流至今仍保持着明显优势。但随着现代工业和社会的发展,直流输电又日益显示出一些优于交流的特性。比如:交流系统必须考虑同步稳定性问题,直流没有此问题;大容量超远距离输电大大增加建设投资费用,而直流系统可能会节约许多投资。一般认为,当输电距离足够长时(对架空线路,一般认为交流与直流输电距离的交叉点大约是 500km,对地下或海底电缆是 40km),直流输电的经济性将优于交流输电;现代控制技术的发展,直流输电可以通过快速(毫秒级)控制换流器实现对传输功率的快速灵活控制;直流输电线路可以连接两个不同步或频率不同的交流系统等。因此,20 世纪 30 年代直流系统又东山再起,重新受到青睐,并在 50 年代中期进入工业应用阶段,不过这时已不再是直流发电机,而是采用交流发电,通过整流和逆变技术进行直流输电。1954 年,瑞典在本土与果特兰岛之间建成了世界上第一条工业直流输电线(94km 海底电缆),采用汞弧阀作为变流装置。可控硅整流元件的出现促进了高压直流输电的进一步发展。进入 21 世纪,直流输电更是进入一个新的发展时期。2010 年我国云南楚雄州禄丰县至广州增城市的云广 ± 800 kV 和向家坝至上海的向上 ± 800 kV 特高压直流输电投入运行,这是世界上最早建设及投运的大容量、超长距离的特高压直流输电系统。云广直流全长 1438km,额定输送容量 5000MW;向上直流全长 1907km,额定输送容量 6400MW。

2. 中国电力工业的发展

我国的电力工业起步很早,几乎与世界同步。1879 年 5 月上海公共租界点亮了第一盏电灯,开始写下中国使用电力照明的历史,1882 年中国第一家公用电力公司在上海创办——上海电气公司。不过后来几十年一直发展缓慢。至 1949 年,全国的总装机容量仅有 1850MW,年发电量仅 43 亿 kW·h,分别位居世界第 21 位和 25 位。

新中国成立后,我国电力工业得到迅速发展。到 1978 年,全国发电装机容量已达 57120MW,比 1949 年增长 30 倍;年发电量 2566 亿 kW·h,增长近 59 倍。装机容量和发电量分别跃居世界第 8 位和第 7 位。

改革开放后,1987 年,电力装机容量达 10 亿 MW,1995 年突破 20 亿 MW。到 1996 年,全国装机容量达 25 亿 MW,年发电量达 11320 亿 kW·h,跃居世界第二位,成为世界电力生产和消费大国。2000 年总装机容量再次跨上 30 亿 MW 台阶,到 2005 年全国装机容量已达到 50 亿 MW,发电量为 24747 亿 kW·h。2006 年全国装机容量超过 60 亿 MW,发电量达到了 28344 亿 kW·h。目前,中国已经成为世界第一大电力生产国。截至 2013 年底,中国发电装机容量达到

12.58 亿 kW, 全年发电量 5.37 万亿 kW·h。

2003 年 7 月 10 日, 举世瞩目的长江三峡水电站首台机组正式并网发电, 2009 年全部机组投运, 成为世界上最大的水电站。

此外, 核能、风能、太阳能、地热能等新能源发电也相继发展。20 世纪 90 年代初相继投产的秦山核电站和大亚湾核电站填补了我国核电空白, 2003 年核电装机容量 6190MW, 核电年发电量已达 470 亿 kW·h, 而且还在继续发展, “十一五”国家核能建设将按照“加快核电发展”的方针快速发展。

2001 年全国新能源和可再生能源发电装机就已经达到了 360MW。风电发展相对更快, 截至 2006 年 9 月, 全国除台湾省外累计风电机组达 1864 台, 装机容量 1266MW。



中国总装机容量及年发电量

在制造业方面我国已经取得了突破性进展, 600MW、900MW 超临界机组已经投产发电。2006 年 11 月 28 日, 我国首台国产百万千瓦超超临界燃煤机组——浙江华能玉环电厂 1 号机组正式投入商业运行。标志着我国已经掌握当今世界最先进的火力发电技术, 也标志着我国发电设备制造能力和技术水平迈上一个新台阶。通过引进国际先进技术, 国内合作生产的 300MW 大型循环流化床锅炉发电设备、9F 级联合循环燃气轮机、600MW 级压水堆核电站和 700MW 三峡水轮机组等发电设备在性价比上也具有了国际竞争力。

在输变电方面, 1949 年, 35kV 及以上电压等级输电线路仅有 6475km。到 1978 年, 全国 330kV、220kV 电网已初具规模。1982 年 1 月河南平顶山-湖北双河-武昌 500kV 输变电工程投产, 标志着我国开始步入超高电压时代。今天, 500kV 输电网络已经成为全国各大电网的主干电网。1988 年, 自行设计建成第一条±100kV 直流高压输电工程竣工投运, 该线路从浙江镇海到舟山岛, 全长 53.1km(其中海底电缆 11km)。1989 年, 建成±500kV 葛洲坝水电站到上海南桥的远距离超高压直流输电线路, 全长 1080km, 实现华中与华东两大区域系统的直流联网。2003 年 9 月, 东北、华北、华中和川渝电网实现互联, 南北跨距超过 4600km。到 2003 年底, 全国 220kV 及以上输电线路已经达到 80.7 万 km, 变电容量达到 59.8 亿 MV·A。2005 年 9 月 26 日, 西北 750kV 输电线路正式投入运行。2010 年云广和向上±800kV 特高压直流输电投入运行。2010 年三峡全部投运, 实现了以三峡为中心的全国联网。截止 2013 年, 全国 220kV 及以上输电线路总长达 542864km。2020 年前后, 将建成覆盖华北、华中、华东的交流特高压同步电网, 同时建设西南大型水电基地±800kV 高压直流送出工程, 共同构成连接各大电源基地和主要负荷中心的特高压交直流混合电网。



1995~2013 年中国 220kV
及以上输电线路

1.2 发电

发电厂是电能生产的核心, 担负着把不同种类的一次能源转换成电能的任务。煤炭、石油、天然气、水力、太阳能、风能等自然界的动能资源, 是能量的直接提供者, 称为一次能源。电能是由一次能源转换而成的, 称为二次能源。依据一次能源的不同, 可分为燃烧煤、石油、天然气发电的火力发电厂; 利用水能发电的水力发电厂; 利用核能发电的核动力发电厂和利用其他能源发电的诸如地热发电厂、潮汐发电厂和风力发电厂等。截止 2014 年底, 世界发电装机构成中, 火力发电装机容量占比最大, 煤电约占 31.5%, 油和气电约占 32.2%, 水电约占 19.2%, 核动力发电约占 6.2%, 非水可再生约占 10.9%。

目前,在现代电力工业中,几乎都是采用同步交流发电机,推动转子旋转的原动机主要有汽轮机、水轮机、风机。太阳能发电方式主要分为光热发电和光伏发电。光热发电是反光镜集热产生蒸汽,再利用汽轮机发电;而光伏发电则是用光电池直接把太阳能转化为电能,发电原理与传统交流发电机有所不同。燃料电池也是一种新的发电形式,它是将化学能转化为电能。



2004 年和 2014 年世界
分地区发电装机容量结构

发电机组由原动机、同步发电机和励磁系统组成。原动机将一次能源(化石燃料、核能和水能等)转换为机械能,再由同步发电机将它转换为电能。发电机为三相交流同步发电机。现代发电技术包括超临界和超超临界的发电技术;高效脱硫装置,循环流化床(CFBC)和整体煤气化联合循环(IGCC)等清洁煤燃烧技术;大型水电技术装备和低水头贯流机组、抽水蓄能机组制造技术;核电技术等。

电力系统中的发电厂主要有火力发电厂、水力发电厂、核能发电厂、风力发电厂和太阳能电厂等多种类型。各类电厂由于设备容量、机组规格和使用的能源不同,因而有着不同的技术经济特性。在电力系统中必须结合它们的特点以及国家的能源政策合理地确定它们的运行方式,以便提高全系统的经济性和整体社会效益。

1.2.1 火力发电厂

火力发电厂主要由锅炉、汽轮机和发电机组成。锅炉所用的燃料为煤(油或天然气),锅炉产生蒸汽,送到汽轮机,靠蒸汽膨胀做功,将储存在过热蒸汽中的热能转变为汽轮机转子的机械能,带动同轴的发电机转子旋转发出电能。已做过功的蒸汽,经冷却后又重新回到锅炉,进行循环使用。

火力发电厂的主要特点是:

(1) 火力发电厂的锅炉和汽轮机都有一个技术最小负荷,锅炉的技术最小负荷取决于锅炉燃烧的稳定性,其值为额定负荷的 25%~70%,容量较大的锅炉对应较大的技术最小负荷,汽轮机的技术最小负荷为额定负荷的 10%~15%。

(2) 火力发电厂的锅炉和汽轮机的退出运行和再度投入不仅要多耗费能量,而且要花费时间,并且易于损坏设备。大型发电机组由冷备用(指锅炉熄火状态)到开机并带满负荷需几小时到十几小时。

(3) 火力发电厂的锅炉和汽轮机承担急剧变动的负荷时,与投入和退出相似,既要额外耗费能量,又要花费时间。因而应尽力承担较均匀不变的负荷。

(4) 火力发电厂的锅炉和汽轮机有超临界压力(锅炉蒸汽压力 22.11MPa,温度为 550℃)、亚临界压力(锅炉蒸汽压力 16.7MPa,温度为 540℃)、超高压(锅炉蒸汽压力 13.8MPa,温度为 540℃)、高温高压(锅炉蒸汽压力 9.9MPa,温度为 540℃)、中温中压(锅炉蒸汽压力 3.9MPa,温度为 450℃)和低温低压之分。其中,高温高压及以上设备效率高,尤其是压力大和温度高的大机组的煤耗(发一度电所消耗的标准煤)较少,但可以灵活调节的范围窄。中温中压设备效率一般,但可以灵活调节的范围较宽。低温低压设备效率最低,技术经济指标最差,而且污染也大,一般不用它们调节,当前逐步开始淘汰该类机组。

(5) 热电厂(与上述火电厂不同之处是,它把已做过功的蒸汽,从中间段抽出来供给热用户,或经热交换器将水加热后,把热水供给用户)与一般的火力发电厂的区别在于其技术最小出力是由其热负荷决定的,这个技术最小出力又称为强迫功率。正因为热电厂是抽气供热,所以其效率

较高。

(6) 火力发电厂建设周期短,投资少,发电利用小时数高,但厂用电率高,运行费用高。

(7) 火电厂对空气和环境的污染较大。

1.2.2 水力发电厂

水力发电厂一般由水坝(或高水位的引水渠道)、水轮机和发电机组成。它是用水的势能推动水轮机旋转带动发电机发电,即把水的势能转变为电能。

水力发电厂的主要特点是:

(1) 水力枢纽往往具有多项功能,如灌溉、航运、供水、养殖、防洪和旅游等,因而水电厂在运行中应按水库的综合效益来考虑安排,为满足上述功能必须放水时,应尽力安排发电,这部分功率也是强迫功率。

(2) 水轮发电机的出力调整范围较宽,负荷增减速度相当快,退出运行和再度投入的耗时都很少,水电机组从静止状态到带满负荷运行只需 4~5min,操作简便安全,额外消耗能量少,运行方便灵活。

(3) 水电厂按其有无调节水库以及调节水库的大小或调节周期的长短分为无调节、日调节、季调节、年调节和多年调节。有调节水库水电厂的运行方式比较灵活。具体运行主要取决于水库调度所给定的水电厂耗水量。洪水季节,给定的耗水量较大,为避免无益的溢洪弃水,往往满负荷运行。枯水季节,给定的耗水量较小,为尽可能有效利用这部分水量,节约火电厂的燃料消耗,水电厂往往承担急剧变动的负荷(即调频或调峰)。

(4) 水电厂建厂周期长、一次投资大(主要是水库建设),但运行时不消耗燃料,运行维护人员少,厂用电率低,即发电成本低、效率高。

(5) 水电厂的发电量受来水量(自然因素)影响大,故有季节性,即在丰水期可发电量多,在枯水期可发电量少。尤其是无调节水库水电厂任何时刻发出的功率都取决于河流的天然流量,受气候条件影响很大。

1.2.3 核(原子能)电厂

核电厂是利用反应堆中核燃料裂变链式反应所产生的热能,再按火电厂的方式发电,它的原子核反应堆相当于火电厂的锅炉。反应堆中除核燃料外,并以重水或高压水等作为慢化剂和冷却剂,所以,反应堆可分为重水堆、压水堆等。

核反应堆内,铀-235 在中子撞击下,原子核裂变,产生巨大的能量,且主要是以热能的形式被高压水带至蒸汽发生器,产生蒸汽,送至汽轮机。

核电厂的特点是:

(1) 电厂的一次建设投资大、运行费用小。一座 1000MW 的核电厂一年仅需 130t 的天然铀或 28t 的 3%的浓缩铀,避免了大量的运输费用。

(2) 核电厂反应堆的负荷基本上没有限制,因此,其技术最小负荷主要取决于汽轮机,也为额定负荷的 10%~15%。

(3) 核电厂的反应堆与汽轮机退出和再度投入或承担急剧变化的负荷时,也要额外耗费能量,花费时间,且易于损坏设备,因而最好带不变的负荷。

1.2.4 风力发电场

风力发电主要是由风机和发电机组成的。它利用天然风吹转叶片(形如风轮),带动发电机的转子旋转而发电。风力发电机的风轮机多采用水平轴、三叶片结构。功率调节是风轮机的关键技术之一,目前主要有两类功率调节方式:一类是定桨距失速控制;另一类是变桨距控制。

风力发电机系统按照发电机运行的方式来分,主要有恒速恒频风力发电机系统和变速恒频风力发电机系统两大类。恒速恒频风力发电机系统一般使用同步式或笼式异步机作为发电机系统,通过定桨距失速控制的风轮机使发电机的转速保持在恒定的数值继而保证发电机端输出的电压幅值和频率的恒定,其运行范围比较窄。变速恒频风力发电机系统通过变桨距控制风轮机使整个系统在很大的速度范围内按照最佳的效率运行,这是当前风力发电发展的一个趋势。

风力发电的特点是:

- (1) 风力发电是可再生能源、清洁能源、绿色能源,应大力提倡,但目前成本较高(2008 年大型风力发电厂的成本约为 0.5 元/(kW·h))。随着设备技术的进步,设备及发电成本逐渐降低。
- (2) 受气候影响大,无风时不能发电,它是间断电源,因而需要电网提供充足的备用容量或与其他能源互补配合。例如,与太阳能光伏发电互补;与水电以及抽水蓄能电站配合;与燃气轮机、燃料电池互补;分散安装减少影响等。
- (3) 发有功时从电网吸收无功,因而需装无功补偿装置。

1.2.5 太阳能光伏发电

太阳能光伏发电是由多晶硅太阳能电池组、控制系统、蓄电池及其逆变器等组成。它利用半导体材料(如多晶硅)的光伏效益直接将太阳能转换为电能。

采用太阳能光伏发电具有不消耗燃料、不受地域限制、规模灵活、清洁无污染、安全可靠、维护简单等优点。其缺点是成本较高(2008 年约为 2 元/kW·h)、受气候影响大,目前容量还不够大。但作为清洁能源,具有广阔前景。随着技术的发展,其成本也会逐步降低。到 2016 年我国光伏电站平均标杆上网电价为 0.89 元。



风电和光伏发电标杆上网电价

除了以上几种发电形式外,还有潮汐发电、地热发电、燃料电池等。

由于目前使用的一次能源煤、石油和核燃料等都有限,并日渐枯竭,对环境也有污染。迫使人们寻找清洁、安全、可靠的新型可持续发展能源。

除常规能源和大型水力发电外的风能、太阳能、小水电、潮汐能、生物质能、地热能和氢燃料等能源资源称为可再生能源。为了减少污染,可再生能源的发展是必然趋势。虽然,目前可再生能源发电量只占总发电量的很少部分,但根据世界各国的规划,可再生能源的比重将不断加大。

在某个电力系统中,可能包含上述多种电源的几种。这些电源在电力系统中如何组合,使得在保证负荷需要的基础上,充分利用各种电源的特点,合理组合,尽力减少一次能源消耗以及对环境的污染。

在具体安排时,一般应遵循以下规则:

- (1) 充分合理地利用水力资源,尽力避免弃水,强迫放水时,必须同时尽力发电。
- (2) 尽力降低火力发电的单位煤耗,减少有害气体的排放。
- (3) 大力发展和利用再生清洁能源。

1.3 电 力 网

1.3.1 电力网

电力网由输电和变电设备组成,又称为输电系统。输电设备主要有输电线、杆塔、绝缘子串等。变电设备主要有变压器、电抗器、电容器、断路器、开关、避雷器、互感器、母线等一次设备以及保证输变电安全可靠运行的继电保护、自动装置、控制设备等。通常,电网按照电压等级和承担功能的不同分为三个子系统,即输电网络、次级输电网络和配电网络,如图 1-3 所示。

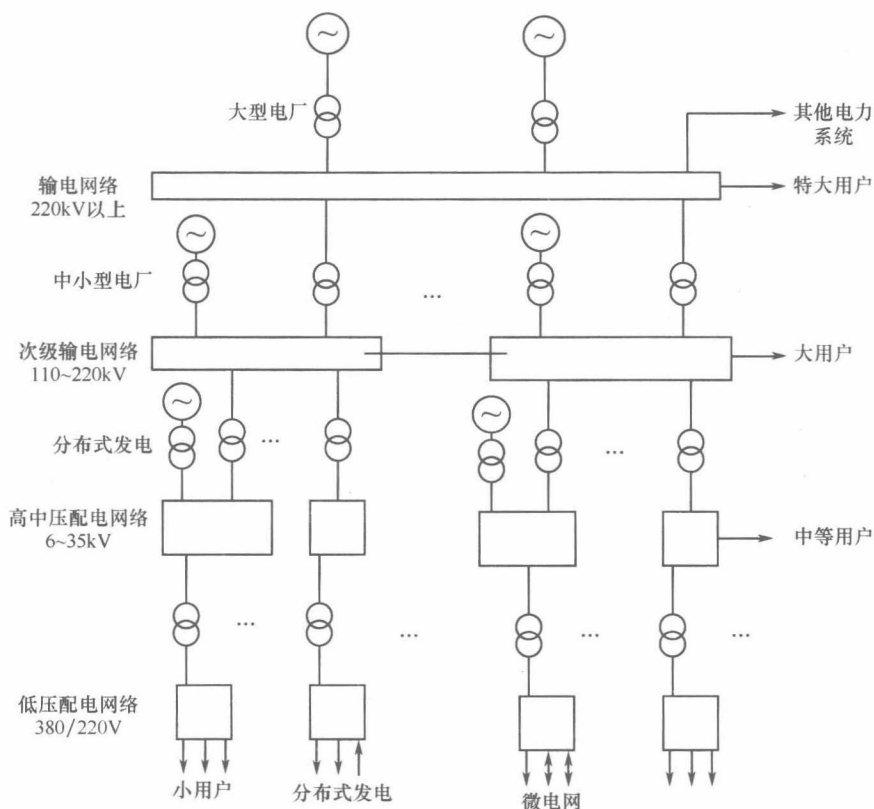


图 1-3 电力网结构示意图

(1) 输电网络。输电网络连接系统中主要发电厂和主要负荷中心。输电网络通常是将发电厂或发电基地(包括若干电厂)发出的电力输送到消费电能的地区,又称负荷中心;或者实现电网互联,将一个电网的电力输送到另一个电网。输电网络形成整个系统的骨干网络并运行于系统的最高电压水平。发电机的电压通常在 $10\sim 35\text{kV}$ 的范围内,经过升压达到输电电压水平后,由特高压、超高压或高压交流或直流输电线路将电能传输到输电变电站,在此经过降压达到次输电水平(一般为 110kV)。发电和输电网络经常被称作主电力系统(Bulk Power System)。现代电网中,输电网的特征主要是特高压、超高压、交直流输变电、大区域互联电网、大容量输变电设备、超特高压继电保护、自动装置、大电网安全稳定控制、现代电网调度自动化、光纤化、信息化等。

(2) 次级输电网络。次级输电网络将电力从输电变电站输往配电变电站。通常大的工业用

户直接由次级输电系统供电。在某些系统中,次级输电和输电回路之间没有清晰的界限。例如,一些超大的工业用户也有直接通过 220kV 系统供电,然后再由内部进行电力分配。当系统扩展,或更高一级电压水平的输电变得必要时,原有输电线路承担的任务等级常被降低,起次级输电的功能。现代电网中,次级输电网的特征主要是高压、局部区域内电网互联、大电网安全稳定控制辅助执行控制、无油化、城市电缆化、变电站自动化及其无人值班、地区电网调度自动化、光纤化、信息化等。

(3) 配电网络。配电网络是将电力送往用户的最后一级电网,也是最复杂的一级电网。一次配电电压通常为 4~35kV。较小的工业用户通过这一电压等级的主馈线供电。二次配电馈线以 220/380V 电压向民用和商业用户供电。现代电网中,配电网的特征主要是中低压、网络复杂化、城市电缆化、绝缘化、无油化、小型化、配电自动化、光纤化、信息化等。

1.3.2 电压变换

1. 变电所

变电所是电力网的重要组成部分,它的任务是汇集电源、升降电压、分配电能。它的类型除了按升压、降压分类外,还可以按设备布置的地点分为户外变电所和户内变电所、箱式变电所和地下变电所等。若按变电所的容量和重要性又可分为枢纽变电所、中间变电所和终端变电所。枢纽变电所一般容量较大,处于联系电力系统各部分的中枢位置,地位重要,如图 1-2 中 A 为枢纽变电所。中间变电所则处于发电厂和负荷中心之间,从这里可以转送或抽引一部分负荷,如图 1-2 的变电所 B。终端变电所一般是降压变电所,它只负责供应一个局部地区或一个用户的负荷而不承担功率的转送,如图 1-2 的变电所 C 和 D。

2. 电压变换

电流流过导线时将产生电压损耗和功率损耗。电压损耗与流过导线的电流成正比,功率损耗与电流的平方成正比。传输功率是电流与电压的乘积,在输送功率相同的情况下,提高电压,可减小电流。因此,远距离输电需提高电压,从而节约电网建设投资(可选较细的导线),同时提高运行的经济性(降低电压损耗和电能损耗)。当电能输送到负荷中心时,再将电压降低,以供各种用户使用。

在交流电力系统中,电压的升降由变电所的电力变压器实现。电力变压器完成升高或降低电压的同时,起到连接不同电压等级电网的作用。变压器是由两个(或两个以上)绕在同一个铁心上彼此绝缘的绕组组成,绕组间只有磁耦合,而没有电的直接联系。当一次绕组接通电源时,一次绕组中有电流流过,并在铁心中产生交变磁通,其频率与外施电源电压的频率相同。这个交变磁通同时交链一次、二次绕组,由电磁感应定律可知,在一次、二次绕组中将产生感应电动势,二次绕组的电动势即可向负荷供电,实现能量传递。一次绕组和二次绕组电动势的频率都等于磁通的交变频率,即一次绕组外施电压的频率。两侧感应电势的大小之比等于一次、二次绕组匝数之比。因此,只要改变一次或二次绕组的匝数,便可改变输出电压。即电力变压器把一种电压的交流电能变换成频率相同的另一种电压的交流电能。

变压器按相数可分为单相式和三相式,实际生产大多是三相式,但特大型变压器从运输等方面考虑,有制成单相式,安装好后再接成三相变压器组的。按每相绕组数可分为双绕组变压器和三绕组变压器,分别用于联络两个电压等级电网和联络三个电压等级电网。按线圈耦合方式可分为普通变压器和自耦变压器。电力系统中的自耦变压器一般设置有第三绕组或补偿绕组,它是一个低压绕组。高、中压绕组间存在自耦联系,低压绕组与高、中压绕组之间只有磁耦合。自

耦变压器损耗小、重量轻、成本低,但其漏抗较小,使短路电流增大。此外,由于高、中绕组在电路上相通,过电压保护要求自耦变压器的中性点必须直接接地。按功能变压器可分为升压变压器、降压变压器、配电变压器等。

1.3.3 交流输电线路

输电线路按结构可分架空线路和电缆线路两大类。由于架空线路的建造费用比电缆线路要低得多,而且便于架设和维修。因此在电力网中绝大多数的线路都采用架空线路。近年来,随着组合电器新技术的发展,以及城市现代化建设要求,大城市的配电网也将相继改为地下电缆网。输电线路按传输电能形式可分为交流输电线路和直流输电线路。



架空线路各组成部分简介

1. 架空输电线路

架空线路由导线、避雷线(架空地线)、杆塔、绝缘子和金具等组成,如图 1-4 所示。架空线路相邻杆塔之间的水平距离,称为线路的档距。在档距中导线的最低点和悬挂点之间的垂直距离,称为导线的弧垂。两个相邻杆塔之间档距的大小,决定于导线的允许弧垂和对地距离,例如:对于 6~10kV 配电线路,档距一般在 100m 以下;110~220kV 输电线路,采用钢筋混凝土杆时档距一般为 150~400m,用铁塔时为 250~500m。导线弧垂的大小,决定于导线的允许拉力和档距,并随气象(如温度、覆冰等)条件的改变而变化。

2. 电缆线路

电力电缆主要由导体、绝缘层和保护层三部分组成。电力电缆的导体通常采用多股铜绞线或铝绞线。根据电缆中导体数目的不同可分为单芯、三芯和四芯电缆。电缆除按芯数和导体截面形状分类外,还可分为统包型、屏蔽型和分相铅包型。统包型的三相芯线绝缘层外有一共同的铅包皮。这种电缆内部电场分布不均匀,不能充分利用绝缘强度,它只用于 10kV 以下的电缆。屏蔽型的每相芯线绝缘层外都包有金属带。分相铅包型的各相分别铅包。110kV 及以上的线路,多采用冲油式或充气式电缆。

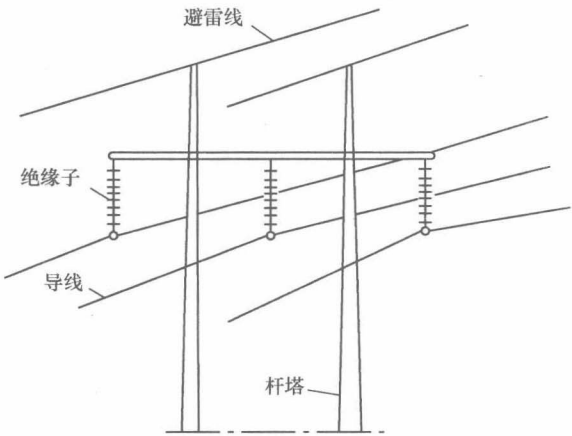


图 1-4 架空输电线路



电力电缆结构简介

1.3.4 直流输电

直流输电是将发电厂发出的交流电经过升压后,由换流设备(整流器)转换成直流,通过直流输电线路送到受电端,再经过换流设备(逆变器)转换成交流电,供给受电端的交流系统,如图 1-5 所示。需要改变输电方向时,只需让两端换流器互换工作状态即可。换流设备是直流输电系统的关键部分。早期的换流器大多采用汞弧阀,自 20 世纪 70 年代以来新建的直流输电工程已普遍应用可控硅换流元件。

与交流输电比较,直流输电的主要优点有:

(1) 造价低。对于架空线路,当线路建设费用相同时,直流输电的功率约为交流输电功率的