



普通高等教育  
电气工程与自动化类  
“十一五”规划教材

ELECTRIC POWER ENGINEERING

# 电力工程

鞠平 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材

# 电 力 工 程

鞠 平 主编

马宏忠 卫志农 袁 越 参编  
张利民 丁晓群



机 械 工 业 出 版 社

本书是普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材,着重介绍电力工程的基本知识、基本原理和基本方法。全书内容分为4篇16章,其中:电力设备篇主要包括输电设备、电力负荷、同步发电机、高压绝缘与继电保护以及电气主接线;电力系统稳态分析篇主要包括电力系统的潮流、电力系统的频率、电力系统的电压;电力系统暂态分析篇主要包括电力系统对称故障、电力系统不对称故障以及电力系统的稳定;电力工程的设计与管理篇主要包括电力网络接线的设计、电气设备的选择以及电力管理与电力市场。本书在内容上注重反映新技术,注重精练易懂,注重启发互动。

本书在体系上采用模块式结构,以便不同专业的灵活选用,既可以作为电气工程及其自动化专业的“电力工程”、“电气工程”或“电力系统”课程的教材,也可以作为其他弱电专业有关电力工程类背景课程的教材。对于电气工程及其自动化专业,还可以根据学分数不同而选用不同的内容。

本书读者对象主要为电气工程类本科生、研究生,也可供高职高专及成人高校相关专业学生使用,还可供电力行业广大工程技术人员自学参考。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 下载或发邮件到 [yu57sh@163.com](mailto:yu57sh@163.com) 索取。

## 图书在版编目(CIP)数据

电力工程/鞠平主编;马宏忠等编. —北京:机械工业出版社, 2009.1

普通高等教育电气工程与自动化类“十一五”规划教材  
ISBN 978-7-111-25736-3

I. 电… II. ①鞠…②马… III. 电力工程-高等学校-教材 IV. TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第192915号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:于苏华 版式设计:霍永明 责任校对:程俊巧

封面设计:王洪流 责任印制:杨 曦

北京外文印刷厂印刷

2009年2月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·25.5印张·627千字

标准书号:ISBN 978-7-111-25736-3

定价:42.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379711

封面无防伪标均为盗版

# 全国高等学校电气工程与自动化系列教材 编 审 委 员 会

主任委员 汪樾生 浙江大学

副主任委员 (按姓氏笔画排序)

王兆安 西安交通大学

王孝武 合肥工业大学

田作华 上海交通大学

刘 丁 西安理工大学

陈伯时 上海大学

郑大钟 清华大学

赵光宙 浙江大学

赵 曜 四川大学

韩雪清 机械工业出版社

委 员 (按姓氏笔画排序)

戈宝军 哈尔滨理工大学

王钦若 广东工业大学

吴 刚 中国科技大学

张纯江 燕山大学

张晓华 哈尔滨工业大学

邹积岩 大连理工大学

陈庆伟 南京理工大学

夏长亮 天津大学

萧蕴诗 同济大学

韩 力 重庆大学

熊 蕊 华中科技大学

方 敏 合肥工业大学

白保东 沈阳工业大学

张化光 东北大学

张 波 华南理工大学

杨 耕 清华大学

陈 冲 福州大学

范 瑜 北京交通大学

章 兢 湖南大学

程 明 东南大学

雷银照 北京航空航天大学

# 序

随着科学技术的不断进步，电气工程与自动化技术正以令人瞩目的发展速度，改变着我国工业的整体面貌。同时，对社会的生产方式、人们的生活方式和思想观念也产生了重大的影响，并在现代化建设中发挥着越来越重要的作用。随着与信息科学、计算机科学和能源科学等相关学科的交叉融合，它正在向智能化、网络化和集成化的方向发展。

教育是培养人才和增强民族创新能力的基础，高等学校作为国家培养人才的主要基地，肩负着教书育人的神圣使命。在实际教学中，根据社会需求，构建具有时代特征、反映最新科技成果的知识体系是每个教育工作者义不容辞的光荣任务。

教书育人，教材先行。机械工业出版社几十年来出版了大量的电气工程与自动化类教材，有些教材十几年、几十年长盛不衰，有着很好的基础。为了适应我国目前高等学校电气工程与自动化类专业人才培养的需要，配合各高等学校的教学改革进程，满足不同类型、不同层次的学校在课程设置上的需求，由中国机械工业教育协会电气工程及自动化学科教学委员会、中国电工技术学会高校工业自动化教育专业委员会、机械工业出版社共同发起成立了“全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会”，组织出版新的电气工程与自动化类系列教材。这套教材基于“**加强基础，削枝强干，循序渐进，力求创新**”的原则，通过对传统课程内容的整合、交融和改革，以不同的模块组合来满足各类学校特色办学的需要。并力求做到：

**1. 适用性：**结合电气工程与自动化类专业的培养目标、专业定位，按技术基础课、专业基础课、专业课和教学实践等环节，进行选材组稿。对有的具有特色的教材采取一纲多本的方法。注重课程之间的交叉与衔接，在满足系统性的前提下，尽量减少内容上的重复。

**2. 示范性：**力求教材中展现的教学理念、知识体系、知识点和实施方案在本领域中具有广泛的辐射性和示范性，代表并引导教学发展的趋势和方向。

**3. 创新性：**在教材编写中强调与时俱进，对原有的知识体系进行实质性的改革和发展，鼓励教材涵盖新体系、新内容、新技术，注重教学理论创新和实践创新，以适应新形势下的教学规律。

**4. 权威性：**本系列教材的编委由长期工作在教学第一线的知名教授和学者组成。他们知识渊博，经验丰富。组稿过程严谨细致，对书目确定、主编征集、

资料申报和专家评审等都有明确的规范和要求，为确保教材的高质量提供了有力保障。

此套教材的顺利出版，先后得到全国数十所高校相关领导的大力支持和广大骨干教师的积极参与，在此谨表示衷心的感谢，并欢迎广大师生提出宝贵的意见和建议。

此套教材的出版如能在转变教学思想、推动教学改革、更新专业知识体系、创造适应学生个性和多样化发展的学习环境、培养学生的创新能力等方面收到成效，我们将会感到莫大的欣慰。

全国高等学校电气工程与自动化系列教材编审委员会

汪植生 陈树明 郑大钟

# 前言

1952 年，我国大学进行院系调整时形成了一批以工科为主的大学。工科大学几乎都把电气工程专业作为本校的重要专业。在计划经济时代，专业分得很细，以适应经济建设的需要。原来的电气类专业共 5 个：电机电器及其控制、电力系统及其自动化、高电压与绝缘技术、工业自动化、电气技术。20 世纪 90 年代开始，为了适应市场需要，提高学生的适应性，开始进行专业合并。目前的电气工程及其自动化专业，正是在上述 5 个专业的基础上合并而成的，专业内容主要是电能的产生、传输和利用。

电力工程与许多学科专业是密切相关的，现代电力工程的发展也要求不断地拓展同学们的知识面。电力专业所需的知识结构如图 0-1 所示。电力工程的内容非常丰富，可以从两个角度进行概括：①电力技术，主要是从设备角度概括，包括电源、输电、配电等；②电力科学，主要是从系统角度概括，电力科学的结构(内容及相应的课程)如图 0-2 所示。电力工程课程涵盖了电力技术和电力科学的基本内容，作为电力专业的学生，自然要学好这门课。

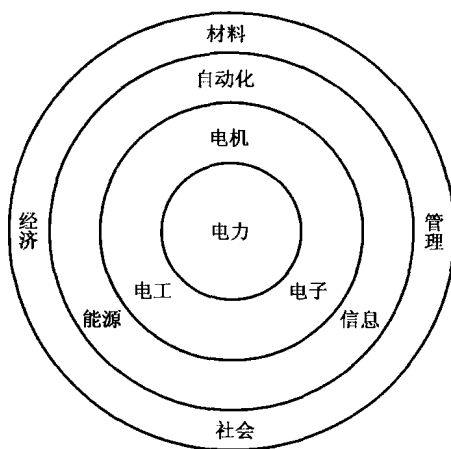


图 0-1 电力专业所需的知识结构

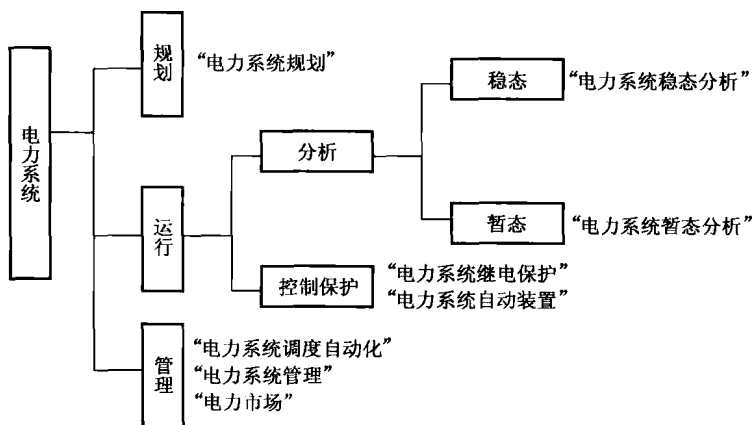


图 0-2 电力科学的结构

专业合并前，电力系统分析国内较多采用的教材是《电力系统稳态分析》和《电力系统暂态分析》，这些教材内容丰富、介绍详细、叙述严谨、循序渐进。在专业细分时期，电力系统分析有 8 学分，这些教材尤其合适。但是，专业合并后，尤其是各高校压缩专业课程的分后，电力工程或者电力系统方面的学分只有 5 学分左右。在这种背景下，最近几年出版了几本教材，如《电力系统分析》、《电能系统基础》等，大都简化了原有内容，各有千秋。西

方国家也有几本相关教材,比如《Electric Power Systems》(John Wiley & Sons Ltd.),覆盖内容相当宽,但不具体详细展开,只给出问题描述和基本方法。

本书内容分为4篇:电力设备、电力系统稳态分析、电力系统暂态分析、电力工程的设计与管理。这4个方面互相关联,从学习的角度,合适的次序应该是先了解元件,再了解系统,最后再设计。

本书的主要特色有:

1) 注重体系上的模块式结构,以便不同专业的灵活选用。既可以作为电气工程及其自动化专业的“电力工程”或者“电力系统”课程的教材,同时也可以作为其他弱电专业有关电力工程类背景课程的教材。即使是电气工程及其自动化专业,根据各个高校的学分数情况,也可以选用不同内容。既可以选择不同篇,同一篇中也可以选择章。例如,如果有6学分,则可以讲解全部内容;如果只有4学分,可以选择第1篇中第2~4章,第2篇中第8、9章,第3篇中第11~13章(不讲13.4、13.5节)。另外,本书比较注重与其他课程(包括研究生课程)的衔接。

2) 注重理论与实际的结合,尤其强调工程中定量分析与定性分析结合的重要性。

3) 注重内容的综合性,实际上本书内容可以包括以前的“电力系统分析”、“电气设备”等互相关联的几门课程的内容。

4) 注重新知识、新技术、新方法的纳入,比如直流输电技术、电能质量、电压稳定、电力市场等。

5) 对一些内容的讲解方法进行了创新,比如同步发电机三相短路电流的推导、电压稳定的直观讲解等。另外,也纠正了以往教材中一些不妥之处。

6) 注重基本点、要点和难点的讲解,注重教学的启发互动,为此设置了讨论课,思考练习题分为课堂、课后题目两种。

本书中加“※”的内容为选讲内容,主要供学生课外阅读。习题中加“\*”的为研究型题目。

本书由鞠平教授任主编,第1、3、4、11和13(部分内容)章由鞠平教授编写,第2、6、7、15(部分内容)章及附录由马宏忠教授编写,第8~10章由卫志农教授编写,第12、13(部分内容)和16章由袁越教授编写,第14、15(主要内容)章由张利民高级工程师编写,第5章由丁晓群教授编写。全书由鞠平教授、马宏忠教授统稿。全书承蒙浙江大学邱家驹教授审阅,并提出了宝贵的修改意见与建议。本书的立项和出版得到教育部高教司、机械工业出版社和河海大学的大力支持和资助,谨在此一并表示衷心感谢。

本书已在河海大学试用,根据使用情况对书稿内容进行了适当调整。限于笔者水平和实践经验,而且许多地方尚属于教学改革探索,所以书中难免有不足或有待改进之处,尚希读者不吝指正。联系方式:鞠平 pju@hhu.edu.cn, 马宏忠 hhumhz@163.com。

作 者

2008年12月于南京



# 目 录

## 前言

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第1章 绪论                   | 1  |
| 1.1 电力工程的发展              | 1  |
| 1.2 电力系统概述               | 2  |
| 1.2.1 电力系统的构成            | 2  |
| 1.2.2 电力系统的基本参量          | 5  |
| 1.2.3 发电厂的类型             | 6  |
| 1.2.4 变电所的类型             | 8  |
| 1.2.5 电力系统的特点和要求         | 8  |
| 1.3 电力系统计算的标幺制           | 8  |
| 1.3.1 标幺值的计算与选择          | 9  |
| 1.3.2 标幺值之间的换算           | 11 |
| 1.3.3 复杂网络中标幺值的计算        | 11 |
| 1.3.4 频率、角速度和时间的<br>基准值  | 15 |
| 思考题与习题                   | 16 |
| 参考文献                     | 16 |
| 第1篇 电力设备                 | 17 |
| 第2章 输电设备                 | 17 |
| 2.1 输电线路                 | 17 |
| 2.1.1 输电线路的结构特点          | 17 |
| 2.1.2 电缆线路及附件            | 25 |
| 2.1.3 架空线路模型             | 26 |
| 2.1.4 电力线路的等效电路          | 34 |
| *2.1.5 输电线路覆冰危害及<br>除冰防冰 | 36 |
| 2.2 变压器                  | 39 |
| 2.2.1 双绕组变压器的参数计算        | 39 |
| 2.2.2 三绕组变压器的参数计算        | 42 |
| 2.2.3 自耦变压器的参数计算         | 46 |
| 2.3 直流输电                 | 48 |
| 2.3.1 直流输电概述             | 48 |
| 2.3.2 直流输电系统的工作原理        | 54 |
| 2.3.3 直流输电系统的等效电路        | 59 |
| 思考题与习题                   | 60 |
| 参考文献                     | 61 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 第3章 电力负荷                 | 62  |
| 3.1 负荷曲线                 | 62  |
| 3.2 负荷分类                 | 64  |
| 3.3 负荷模型                 | 64  |
| 3.3.1 负荷模型概述             | 64  |
| 3.3.2 静态负荷模型             | 65  |
| 3.3.3 电动机负荷模型            | 67  |
| 3.3.4 综合负荷模型             | 68  |
| 思考题与习题                   | 69  |
| 参考文献                     | 69  |
| 第4章 同步发电机                | 70  |
| 4.1 同步发电机的基本方程与参数        | 70  |
| 4.1.1 abc 坐标系下的方程        | 70  |
| 4.1.2 派克-戈列夫变换           | 72  |
| 4.1.3 dq0 坐标系下的方程        | 75  |
| 4.2 同步发电机的稳态方程与参数        | 78  |
| 4.2.1 稳态条件               | 78  |
| 4.2.2 稳态电压方程             | 78  |
| 4.2.3 相量方程、相量图、等效<br>电路图 | 79  |
| 4.3 同步发电机的动态方程与参数        | 81  |
| 4.3.1 次暂态方程与参数           | 81  |
| 4.3.2 暂态方程与参数            | 83  |
| *4.4 励磁系统及调压器            | 87  |
| *4.5 原动机及调速器             | 89  |
| 思考题与习题                   | 91  |
| 参考文献                     | 91  |
| 第5章 高压绝缘与继电保护            | 92  |
| 5.1 高压绝缘与接地              | 92  |
| 5.1.1 高电压与绝缘的成因          | 92  |
| 5.1.2 过电压保护              | 92  |
| 5.1.3 接地                 | 94  |
| 5.2 继电保护                 | 95  |
| 5.2.1 继电保护概述             | 95  |
| 5.2.2 线路的继电保护            | 96  |
| 5.2.3 电力变压器保护            | 111 |
| *5.2.4 发电机保护             | 112 |

|                                   |            |                                      |            |
|-----------------------------------|------------|--------------------------------------|------------|
| 5.3 电力系统的监测与控制 .....              | 114        | 7.2.3 单母线带旁路母线接线 .....               | 156        |
| 5.3.1 电力系统的监测与控制的<br>复杂性 .....    | 114        | 7.2.4 双母线接线 .....                    | 158        |
| 5.3.2 电力系统的监测与控制的内容 .....         | 114        | 7.2.5 双母线分段接线 .....                  | 159        |
| 5.3.3 电力系统运行状态 .....              | 114        | 7.2.6 双母线带旁路母线接线 .....               | 160        |
| 5.3.4 现代电网调度自动化系统<br>及其发展 .....   | 115        | 7.2.7 3/2 断路器双母线接线 .....             | 160        |
| 思考题与习题 .....                      | 116        | 7.2.8 单元接线 .....                     | 161        |
| 参考文献 .....                        | 117        | 7.2.9 桥形接线 .....                     | 161        |
| <b>第6章 其他电力设备</b> .....           | <b>118</b> | 7.2.10 角形接线 .....                    | 163        |
| *6.1 电弧与灭弧 .....                  | 118        | 7.3 电气主接线实例分析 .....                  | 163        |
| 6.1.1 电弧产生和熄灭的物理过程 .....          | 118        | 7.3.1 火力发电厂电气主接线 .....               | 163        |
| 6.1.2 灭弧的物理过程 .....               | 120        | 7.3.2 水力发电厂电气主接线 .....               | 166        |
| 6.1.3 熄灭交流电弧的基本方法 .....           | 121        | 7.3.3 变电所电气主接线 .....                 | 167        |
| 6.2 高压断路器 .....                   | 123        | 思考题与习题 .....                         | 168        |
| 6.2.1 电力系统对高压断路器的要求 .....         | 123        | 参考文献 .....                           | 168        |
| 6.2.2 高压断路器的型号、分类<br>和特点 .....    | 124        | <b>第2篇 电力系统稳态分析</b> .....            | <b>169</b> |
| 6.2.3 SF <sub>6</sub> 高压断路器 ..... | 126        | <b>第8章 电力系统的潮流</b> .....             | <b>169</b> |
| 6.3 隔离开关、高压负荷开关、<br>高压熔断器 .....   | 129        | 8.1 电力系统潮流概述 .....                   | 169        |
| 6.3.1 隔离开关 .....                  | 129        | 8.2 输电线路运行特性及简单电力系统<br>潮流计算 .....    | 170        |
| 6.3.2 高压负荷开关 .....                | 132        | 8.2.1 电力线路上的电压降落、功率<br>损耗和电能损耗 ..... | 170        |
| 6.3.3 高压熔断器 .....                 | 133        | 8.2.2 变压器上的电压降落、功率<br>损耗和电能损耗 .....  | 175        |
| 6.4 低压电器 .....                    | 136        | 8.2.3 简单辐射形网络的潮流计算 .....             | 176        |
| 6.4.1 低压熔断器 .....                 | 136        | 8.3 复杂电力系统的潮流计算 .....                | 180        |
| 6.4.2 低压刀开关 .....                 | 138        | 8.3.1 潮流计算方法概述 .....                 | 180        |
| 6.4.3 低压断路器 .....                 | 140        | 8.3.2 电力网络方程 .....                   | 180        |
| 6.4.4 接触器 .....                   | 140        | 8.3.3 节点功率方程与节点的分类 .....             | 187        |
| 6.5 互感器 .....                     | 141        | 8.3.4 牛顿-拉夫逊法 .....                  | 189        |
| 6.5.1 互感器概述 .....                 | 141        | 8.4 电力系统优化潮流简介 .....                 | 198        |
| 6.5.2 电流互感器 .....                 | 142        | 8.4.1 优化潮流的数学模型 .....                | 198        |
| 6.5.3 电压互感器 .....                 | 148        | 8.4.2 优化潮流的算法 .....                  | 199        |
| 思考题与习题 .....                      | 152        | 思考题与习题 .....                         | 199        |
| 参考文献 .....                        | 152        | 参考文献 .....                           | 202        |
| <b>第7章 电气主接线</b> .....            | <b>153</b> | <b>第9章 电力系统的频率</b> .....             | <b>204</b> |
| 7.1 电气主接线概述 .....                 | 153        | 9.1 电力系统频率概述 .....                   | 204        |
| 7.1.1 对电气主接线的基本要求 .....           | 153        | 9.1.1 电力系统频率的概念 .....                | 204        |
| 7.1.2 电气主接线的基本类型 .....            | 154        | 9.1.2 电力系统频率的测量 .....                | 205        |
| 7.1.3 电气主回路中开关的配置原则 .....         | 154        | 9.2 电力系统的频率特性 .....                  | 206        |
| 7.2 电气主接线的基本形式 .....              | 155        | 9.2.1 发电机组的频率特性 .....                | 206        |
| 7.2.1 单母线接线 .....                 | 155        | 9.2.2 电力负荷的频率特性 .....                | 209        |
| 7.2.2 单母线分段接线 .....               | 156        |                                      |            |

|                                     |     |                                    |     |
|-------------------------------------|-----|------------------------------------|-----|
| 9.2.3 电力系统的有功功率—<br>频率特性 .....      | 210 | 11.3.5 合成转换 .....                  | 254 |
| 9.3 电力系统的频率调整 .....                 | 210 | 思考题与习题 .....                       | 257 |
| 9.3.1 电力系统频率的一次调整 .....             | 210 | 参考文献 .....                         | 258 |
| 9.3.2 电力系统频率的二次调整 .....             | 213 | <b>第12章 电力系统的不对称故障</b> .....       | 259 |
| 9.3.3 互联系统的频率调整 .....               | 214 | 12.1 对称分量法 .....                   | 259 |
| 思考题与习题 .....                        | 218 | 12.1.1 对称分量法的基本原理 .....            | 259 |
| 参考文献 .....                          | 219 | 12.1.2 对称分量法在不对称故障分析<br>中的应用 ..... | 260 |
| <b>第10章 电力系统的电压</b> .....           | 220 | 12.2 电力系统各序网络的形成及<br>序网方程 .....    | 263 |
| 10.1 电力系统电压概述 .....                 | 220 | 12.2.1 序阻抗 .....                   | 263 |
| 10.1.1 无功功率负荷与电压的关系 .....           | 220 | 12.2.2 正序和负序网络 .....               | 267 |
| 10.1.2 电压偏移的危害 .....                | 223 | 12.2.3 零序网络 .....                  | 268 |
| 10.1.3 电压偏移的标准 .....                | 224 | 12.3 不对称故障的分析计算 .....              | 270 |
| 10.2 电力系统中无功功率的<br>平衡与补偿 .....      | 224 | 12.3.1 不对称故障时故障点的电流和<br>电压计算 ..... | 270 |
| 10.2.1 电力系统中无功功率负荷与<br>无功功率损耗 ..... | 224 | 12.3.2 非故障点的电流和电压计算 .....          | 279 |
| 10.2.2 电力系统中的无功电源 .....             | 225 | 12.3.3 非全相运行的分析和计算 .....           | 282 |
| 10.2.3 电力系统的无功功率平衡与<br>补偿 .....     | 228 | 12.4 电力系统不对称故障的计算机<br>算法简介 .....   | 285 |
| 10.3 电力系统中的电压管理与<br>调压方法 .....      | 229 | 思考题与习题 .....                       | 287 |
| 10.3.1 中枢点电压管理 .....                | 229 | 参考文献 .....                         | 289 |
| 10.3.2 电压调整的方法 .....                | 230 | <b>第13章 电力系统的稳定</b> .....          | 290 |
| * 10.4 电力系统中的谐波 .....               | 239 | 13.1 电力系统稳定概述 .....                | 290 |
| 10.4.1 谐波及其产生 .....                 | 239 | 13.1.1 电力系统稳定的定义与类型 .....          | 290 |
| 10.4.2 谐波的危害 .....                  | 240 | 13.1.2 电力系统稳定分析的模型 .....           | 291 |
| 10.4.3 谐波的抑制 .....                  | 240 | 13.2 简单电力系统的静态稳定 .....             | 295 |
| 思考题与习题 .....                        | 242 | 13.3 简单电力系统的暂态稳定 .....             | 300 |
| 参考文献 .....                          | 244 | 13.3.1 概述 .....                    | 300 |
| <b>第3篇 电力系统暂态分析</b> .....           | 245 | 13.3.2 定性分析 .....                  | 300 |
| <b>第11章 电力系统的对称故障</b> .....         | 246 | 13.3.3 稳定判据——等面积定则 .....           | 302 |
| 11.1 电力系统故障概述 .....                 | 246 | * 13.4 简单电力系统的电压稳定 .....           | 305 |
| 11.2 无穷大电源供电系统的三相短路 .....           | 247 | 13.4.1 概述 .....                    | 305 |
| 11.2.1 定性分析 .....                   | 248 | 13.4.2 定性分析 .....                  | 305 |
| 11.2.2 冲击电流和最大有效值电流 .....           | 249 | 13.4.3 稳定判据 .....                  | 308 |
| 11.3 同步发电机的突然三相短路 .....             | 252 | * 13.5 简单电力系统的动态稳定 .....           | 309 |
| 11.3.1 定性分析 .....                   | 252 | 13.6 多机电力系统的稳定分析方法 .....           | 309 |
| 11.3.2 各分量的初瞬值 .....                | 252 | 13.6.1 直接法 .....                   | 309 |
| 11.3.3 各分量的终值 .....                 | 253 | 13.6.2 小干扰法 .....                  | 309 |
| 11.3.4 各分量的时间常数 .....               | 253 | 13.6.3 数值计算法 .....                 | 311 |
|                                     |     | 13.7 提高电力系统稳定性的措施 .....            | 313 |
|                                     |     | 13.7.1 提高静态稳定性的措施 .....            | 313 |
|                                     |     | 13.7.2 提高暂态稳定性的措施 .....            | 314 |

|                                    |     |                                       |     |
|------------------------------------|-----|---------------------------------------|-----|
| 13.7.3 提高电压稳定性的措施 .....            | 315 | 15.6.2 电压互感器的选择 .....                 | 357 |
| 13.7.4 抑制低频振荡的措施 .....             | 316 | 15.6.3 电流和电压互感器的<br>配置原则 .....        | 358 |
| 思考题与习题 .....                       | 317 | 15.7 SF <sub>6</sub> 封闭式组合电器的选择 ..... | 360 |
| 参考文献 .....                         | 318 | 15.7.1 一般规定 .....                     | 360 |
| <b>第4篇 电力工程的设计与管理</b> .....        | 320 | 15.7.2 性能要求 .....                     | 361 |
| <b>第14章 电力网络接线的设计</b> .....        | 320 | 15.8 硬母线的选择 .....                     | 361 |
| 14.1 输电网接线 .....                   | 320 | 15.8.1 硬母线的材料、类型与<br>布置方式 .....       | 362 |
| 14.1.1 输电网接线的基本要求 .....            | 320 | 15.8.2 硬母线的截面积选择及热稳定、<br>电晕校验 .....   | 362 |
| 14.1.2 输电网的规划设计方法 .....            | 321 | 15.8.3 硬母线的动稳定校验 .....                | 363 |
| 14.1.3 输电网的接线方式 .....              | 321 | 思考题与习题 .....                          | 366 |
| 14.1.4 输电网接线实例 .....               | 323 | 参考文献 .....                            | 366 |
| 14.2 配电网接线 .....                   | 325 | <b>第16章 电力管理与电力市场</b> .....           | 367 |
| 14.2.1 配电网的结构 .....                | 325 | 16.1 电力工程管理概述 .....                   | 367 |
| 14.2.2 配电网的基本要求 .....              | 325 | 16.1.1 我国电力工业体制改革历程 .....             | 367 |
| 14.2.3 配电网的接线方式 .....              | 326 | 16.1.2 我国电力市场化改革 .....                | 368 |
| 思考题与习题 .....                       | 331 | 16.2 电力市场基础 .....                     | 369 |
| 参考文献 .....                         | 331 | 16.2.1 电力市场的基本概念 .....                | 369 |
| <b>第15章 电气设备的选择</b> .....          | 333 | 16.2.2 电力市场的建设 .....                  | 370 |
| 15.1 电气设备选择的一般条件 .....             | 333 | 16.2.3 我国电力市场的发展 .....                | 372 |
| 15.1.1 按正常工作条件选择电气<br>设备 .....     | 333 | 16.3 电力市场的电价问题 .....                  | 373 |
| 15.1.2 按短路条件校验热稳定和<br>动稳定 .....    | 335 | 16.3.1 制定电价的基本原则 .....                | 373 |
| 15.2 输电线路的选择 .....                 | 337 | 16.3.2 制定电价的理论方法 .....                | 374 |
| 15.2.1 架空线路的选择 .....               | 337 | 16.3.3 电价的计算方法 .....                  | 375 |
| 15.2.2 电力电缆的选择 .....               | 344 | * 16.4 电源侧管理 .....                    | 378 |
| 15.3 发电厂及变电所主变压器的选择 .....          | 345 | 16.4.1 能源的分类 .....                    | 378 |
| 15.3.1 主变压器的容量和台数 .....            | 345 | 16.4.2 常规能源发电 .....                   | 378 |
| 15.3.2 主变压器的负载率 .....              | 347 | 16.4.3 新型能源发电 .....                   | 379 |
| 15.3.3 主变压器的型式 .....               | 347 | 16.4.4 不同能源电厂的发展建议 .....              | 382 |
| 15.4 支柱绝缘子及穿墙套管的选择 .....           | 349 | * 16.5 需求侧管理 .....                    | 382 |
| 15.4.1 支柱绝缘子的选择 .....              | 349 | 16.5.1 需求侧管理的概念 .....                 | 382 |
| 15.4.2 穿墙套管的选择 .....               | 350 | 16.5.2 需求侧管理的内容和手段 .....              | 383 |
| 15.5 高压断路器、隔离开关和高压熔<br>断器的选择 ..... | 351 | 16.5.3 实施需求侧管理的模式 .....               | 383 |
| 15.5.1 高压断路器的选择 .....              | 351 | 16.5.4 需求侧管理的实施流程 .....               | 384 |
| 15.5.2 隔离开关的选择 .....               | 352 | 16.5.5 需求侧管理节能技术 .....                | 384 |
| 15.5.3 高压熔断器的选择 .....              | 353 | 思考题与习题 .....                          | 385 |
| 15.6 电流和电压互感器的选择 .....             | 354 | 参考文献 .....                            | 385 |
| 15.6.1 电流互感器的选择 .....              | 354 | <b>附录 电力工程常用术语</b> .....              | 386 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 电力工程的发展

### 20 世纪是电气时代!

电力工程的基石是电磁感应定律。电磁感应定律是法拉第(Faraday)在 1831 年 10 月发现的,即当磁铁和导线有相对运动时,回路中会产生电流。

电机的出现。不久,法拉第就依据电磁感应定律发明了最早的发电机原型——圆盘发电机,如图 1-1 所示。此后,达文波特、西门子、惠斯通、格拉姆等发明制造出了发电机和电动机。

电厂的出现。1875 年,巴黎北火车站建造了世界上第一座火电厂,是直流的。1879 年,美国旧金山电厂是最早售电的电厂。1882 年,美国纽约珍珠街电厂,是第一座较正规的电厂。1881 年,英国戈德尔明电厂是第一座水电厂。

电力系统的出现。爱迪生在 1882 年创办的美国纽约珍珠街电厂,由发电机-输电线-电灯组成,应该说是电力系统的萌芽。俄国电工科学家多利沃在 1888 年创用三相交流技术,在 1889 年发明三相笼型感应电机,成为三相交流制的鼻祖。1891 年,密勒主持建立了最早的三相交流输电系统,如图 1-2 所示。

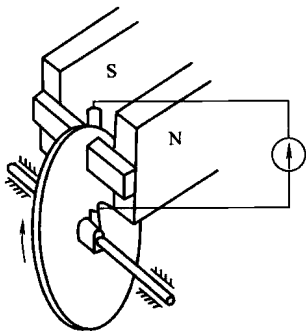


图 1-1 法拉第的圆盘发电机

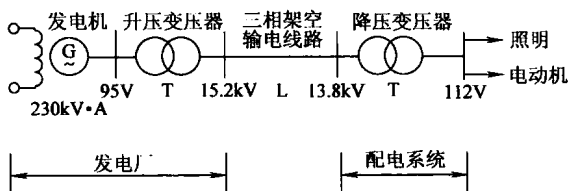


图 1-2 密勒制三相交流输电系统

交流与直流。在电力系统发展史上,一个有趣的问题是交流与直流之争。在 19 世纪电力发展初期,人们采用的是直流;到了 20 世纪初至 50 年代,开始采用交流;到了 1954 年,瑞典本土和歌德兰岛之间建成第一条 100kV 高压直流输电线路,此后交直流并存。直流输电系统的基本结构如图 1-3 所示。

我国电力工业。我国于 1882 年在上海第一次装机发电,时至今日,我国电力工业取得了巨大的成就,成为世界上最大的电力

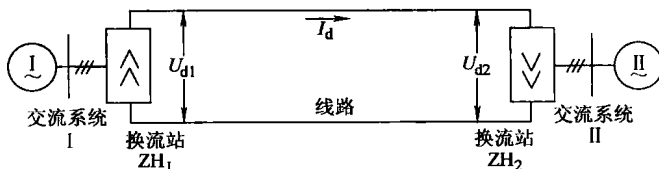


图 1-3 直流输电系统的基本结构

系统之一。在未来,我国电力工业有几项战略性的任务:

1) 西电东送。这是由于一次能源资源在西(西南)部,比如水能占 67.5%、煤炭占 82%;而二次能源消费却在东部沿海地区京沪穗一线。至 2020 年前后形成北、中、南 3 条西电东送通道。

2) 全国联网。我国在 2003 年之前已建成 6 个大区电网、5 个独立省网。在 2003 年 9 月,东北、华北与华中、华东已实现南北方向的互联,计划在 2015~2020 年期间,通过西电东送工程进行东西方向的互联,最终形成全国性联网。我国大区电网互联基本框架如图 1-4 所示。

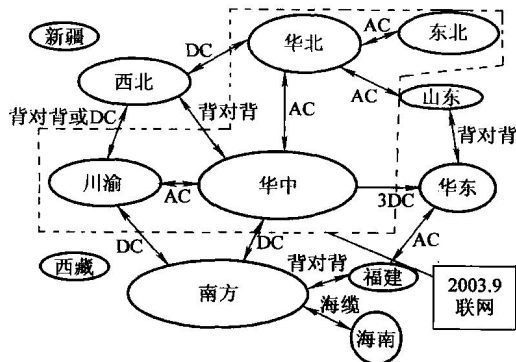


图 1-4 我国大区电网互联基本框架

3) 电力市场。电力市场体制改革的宗旨是打破垄断、引入竞争、提高效率、降低成本、改善质量,电力市场的模式不同、阶段不同,对电力系统运行分析与控制带来一系列新课题。

4) 特高压输电。国家电网公司正在建设特高压(1000kV)交流输电线路,南方电网公司正在建设特高压( $\pm 800$ kV)直流输电线路。

## 1.2 电力系统概述

### 1.2.1 电力系统的构成

**电力系统是如何组成的?**电力系统是由发电厂、变压器、输电线路、配电线路、用户等电力设备联成一体的系统,基本组成如图 1-5 所示。电力系统从功能上通常分为发电、输配电、用电三部分,如图 1-6 所示。在电力系统中,根据电能的流向,将送出电能这一侧称之为送端,反之,接受电能这一侧称之为受端。

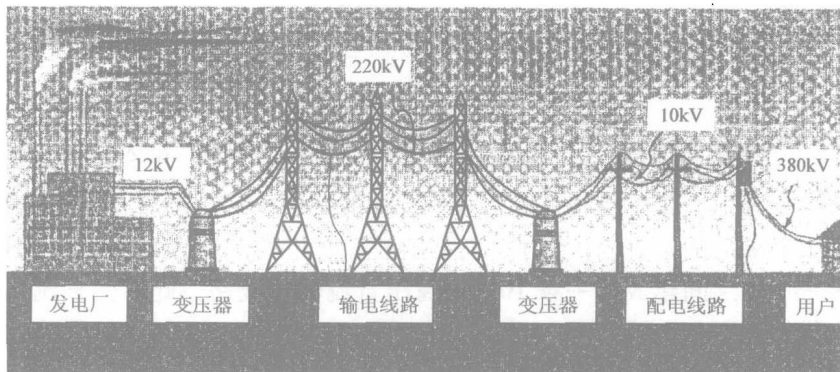


图 1-5 电力系统基本组成

**什么是电气接线图?**电气接线图从电气上描述了电力系统各个部分和设备的连接关系,严格来说应该采用三相电路,如图 1-7 所示,但在三相对称的情况下,一般都简化为单相电路,图 1-7 的单相电路如图 1-8 所示,图 1-9 则描述了典型电力系统的单相电路。

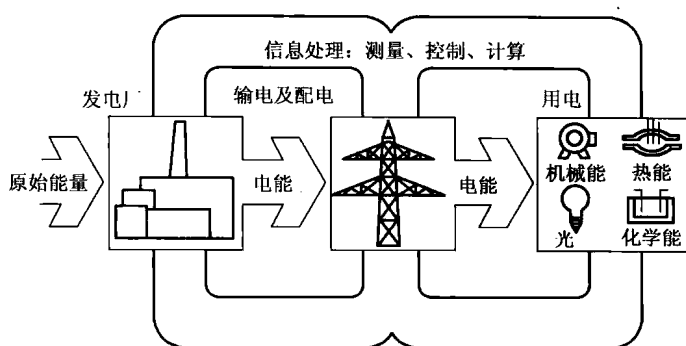


图 1-6 电力系统示意

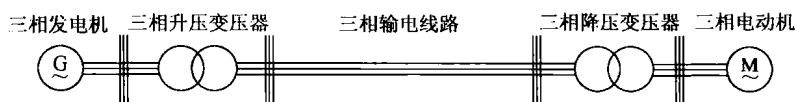


图 1-7 三相电路

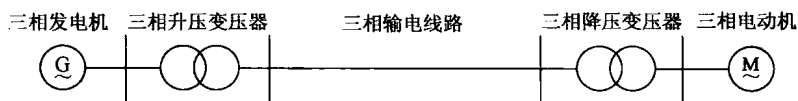


图 1-8 电气接线图

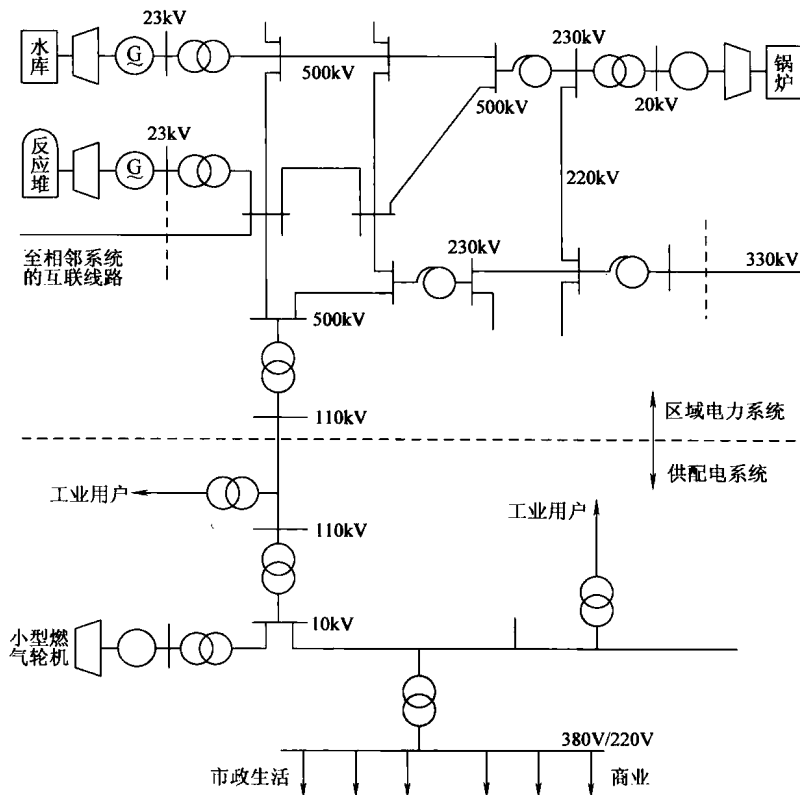


图 1-9 电力系统和电力网络

**什么是地理接线图？**地理接线图从地理上描述了电力系统各个部分和设备的连接关系，严格来说应该采用图 1-10 所示的地理接线图，但一般都进行简化，如图 1-11 所示。

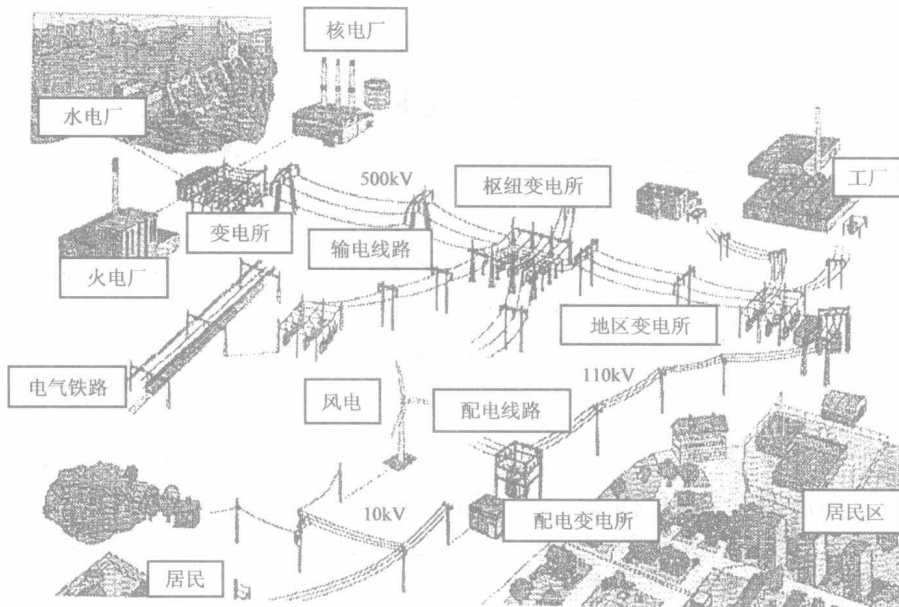


图 1-10 地理接线图

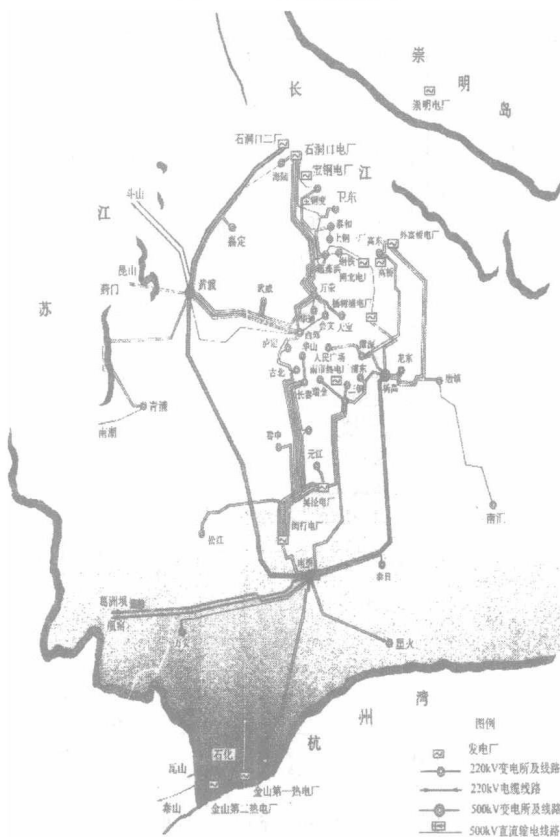


图 1-11 上海电网地理接线图



电力设备如何分类呢？电力设备分为一次设备（发电、输电、变电、配电、用电等）和二次设备（测量、监视、控制、继电保护、自动化、通信等），本课程主要介绍一次设备，后续课程介绍二次设备。

1.2.2 电力系统的基本参量

电力系统有哪些基本参量？电力系统的基本参量及其涵义、单位如表 1-1 所示。

表 1-1 电力系统的基本参量及其涵义、单位

| 名 称   | 涵 义              | 单位(国际/俗称) |
|-------|------------------|-----------|
| 总装机容量 | 发电机额定容量之和        | MW/万 kW   |
| 最大负荷  | 负荷有功之和的最大值       | MW/万 kW   |
| 年发电量  | 所发电能总和           | MW · h/亿度 |
| 年用电量  | 所用电能总和           | MW · h/亿度 |
| 额定频率  | 规定的频率(50Hz/60Hz) | Hz/赫兹     |
| 额定电压  | 规定的电压            | kV/万伏     |

电力系统有哪些电压等级？电压等级是国家规定的标准额定电压，是指线电压。我国电力系统的电压等级如表 1-2 所示，按照电压等级的范围，分为低压、高压、超高压、特高压，如表 1-3 所示。

表 1-2 电力系统电压等级 (单位:kV)

|        |      |      |     |      |    |     |     |     |     |     |
|--------|------|------|-----|------|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 电网额定电压 | 0.38 | 3    | 6   | 10   | 35 | 110 | 220 | 330 | 500 | 750 |
| 平均额定电压 |      | 3.15 | 6.3 | 10.5 | 37 | 115 | 230 | 345 | 525 | 788 |

表 1-3 各电压等级及范围

|             |              |                    |                    |
|-------------|--------------|--------------------|--------------------|
| <3kV        | 3 ~ 280kV    | 280 ~ 800kV        | ≥800kV             |
| 低压          | 高压           | 超高压                | 特高压                |
| Low-Voltage | High-Voltage | Extra-High-Voltage | Ultra-High-Voltage |

电压是如何分布的？电压沿输电线路是会下降的，电力网络中的电压分布如图 1-12 所示。一般来说按照如下规则处理：

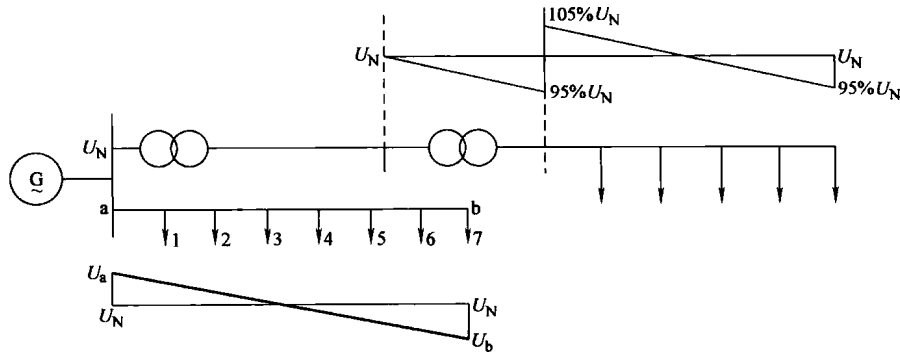


图 1-12 电力网络中的电压分布