



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十三五”规划教材

**Power System**  
Analysis

# 电力系统分析

第2版

◎ 朱一纶 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（应用型）“十三五”规划教材

# 电力系统分析

第2版

主 编 朱一纶

参 编 吴 彪 吴岱曦



机械工业出版社

本书针对应用型本科学生的特点编写,介绍了电力系统的稳态分析方法、电力系统的故障分析方法和电力系统的稳定性分析计算,强调基本概念、基本理论和基本技能,注重分析问题、解决问题方法的培养和训练,并介绍了计算机在电力系统分析中的应用。

本书共分为九章,分别为:电力系统概述、电力系统元件等效电路和参数、简单电力系统潮流分析、复杂电力系统潮流计算、电力系统功率平衡与控制、电力系统三相短路故障分析、电力系统不对称运行分析方法、电力系统不对称故障分析、电力系统稳定性分析。

本书的另一个特点是为每章配备了选择、填空、简答和计算四类习题,便于教师课堂检查和学生课后复习。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业学生用书,也可供从事电力系统运行、设计和研究的广大工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电力系统分析/朱一纶主编. —2版. —北京:机械工业出版社,2018.2  
普通高等教育电气工程与自动化(应用型) “十三五”规划教材  
ISBN 978-7-111-59279-2

I. ①电… II. ①朱… 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(2018)第036145号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王雅新 责任编辑:王雅新 王小东

责任校对:佟瑞鑫 封面设计:张静

责任印制:常天培

北京京丰印刷厂印刷

2018年4月第2版第1次印刷

184mm×260mm·15印张·363千字

标准书号:ISBN 978-7-111-59279-2

定价:36.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

# 前 言

电力系统分析是电气工程及其自动化专业的专业核心课程,通过电力系统分析课程的学习,学生了解电力系统的构成、电力系统的分析计算方法、电力系统常见的故障及其处理方法、电力系统的稳定性判断方法,为将来从事电力生产行业、电力设备制造行业、电能输送行业等打下必要的基础。本书针对应用型本科学生的特点编写,介绍了电力系统的稳态分析方法、电力系统的故障分析方法和电力系统的稳定性分析方法,强调基本概念、基本理论和基本技能,注重分析问题、解决问题方法的培养和训练,并介绍了计算机在电力系统分析中的应用。

本书共分为九章,分别为:电力系统概述、电力系统元件等效电路和参数、简单电力系统潮流分析、复杂电力系统潮流计算、电力系统功率平衡与控制、电力系统三相短路故障分析、电力系统不对称运行分析方法、电力系统不对称故障分析、电力系统稳定性分析。

本书编者结合自己在教学中的体会,在编写过程中力求深入浅出,条理清楚,层次分明,理论与实际应用相结合,结合概念和分析方法列举了大量的例题,并为每章配备了选择、填空、简答和计算四类习题,便于教师课堂检查和学生课后复习。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业学生用书,也可供从事电力系统运行、设计和研究的广大工程技术人员参考。

本书第1版出版后,被很多学校选为教材,也有很多老师与编者通信,指出了教材中的一些不足之处,在此基础上,编者进行了较全面的修订,对书中所有的习题和例题进行校核,南京金陵科技学院的吴彪、吴岱曦老师参加了部分编写工作。

由于编者水平有限,书中如有不妥之处,敬请读者批评指正。

编者的电子邮箱:zhuyilun2002@163.com

编 者

# 目 录

## 前言

## 第 1 章 电力系统概述 ..... 1

### 1.1 电力系统基本概念 ..... 1

#### 1.1.1 电力系统的组成 ..... 1

#### 1.1.2 电力系统的运行特点 ..... 2

#### 1.1.3 电力系统设计的基本要求 ..... 2

#### 1.1.4 本课程学习内容简介 ..... 3

### 1.2 电力系统的主要电源 ..... 3

#### 1.2.1 火力发电厂 ..... 3

#### 1.2.2 水力发电厂 ..... 4

#### 1.2.3 核电站 ..... 5

#### 1.2.4 风力发电 ..... 6

#### 1.2.5 太阳能发电 ..... 7

### 1.3 电力网 ..... 8

#### 1.3.1 额定电压与额定频率 ..... 8

#### 1.3.2 输电网与配电网 ..... 10

#### 1.3.3 电力系统中性点接地方式 ..... 10

### 1.4 电力系统的负荷 ..... 10

#### 1.4.1 负荷的分类 ..... 11

#### 1.4.2 负荷曲线 ..... 12

### 1.5 电力系统的发展概况 ..... 13

#### 1.5.1 电力系统的发展简史 ..... 13

#### 1.5.2 我国的电力系统 ..... 14

#### 1.5.3 电力系统的发展前景 ..... 15

### 小结 ..... 16

### 习题 ..... 17

## 第 2 章 电力系统元件等效电路和

### 参数 ..... 20

### 2.1 电力线路等效电路及其参数 ..... 20

#### 2.1.1 电力线路的分类和结构 ..... 20

#### 2.1.2 单位长度电力线路的等效电路及 参数 ..... 21

#### 2.1.3 电力线路的等效电路 ..... 24

### 2.2 变压器等效电路及其参数 ..... 26

#### 2.2.1 双绕组变压器等效电路和参数 ..... 26

#### 2.2.2 三绕组变压器等效电路和参数 ..... 29

#### 2.2.3 自耦变压器等效电路和参数 ..... 32

### 2.3 同步发电机等效电路及参数 ..... 32

#### 2.3.1 理想同步发电机的基本概念 ..... 32

#### 2.3.2 同步发电机稳态运行时的参数和 等效电路 ..... 33

### 2.4 电力系统负荷模型 ..... 34

#### 2.4.1 负荷用功率表示 ..... 34

#### 2.4.2 负荷用复阻抗表示 ..... 35

### 2.5 电力系统的等效电路 ..... 35

#### 2.5.1 有名制表示的等效电路 ..... 35

#### 2.5.2 标幺制 ..... 38

#### 2.5.3 标幺制表示的等效电路 ..... 39

#### 2.5.4 近似估算时标幺制表示的等效 电路 ..... 42

### 小结 ..... 43

### 习题 ..... 44

## 第 3 章 简单电力系统潮流分析 ..... 47

### 3.1 电力线路分析 ..... 47

#### 3.1.1 电力线路的电压降落 ..... 47

#### 3.1.2 电力线路的功率损耗 ..... 50

### 3.2 变压器分析 ..... 51

#### 3.2.1 变压器的电压降落与功率损耗 ..... 51

#### 3.2.2 运算功率和运算负荷 ..... 51

### 3.3 简单开式网络的潮流计算 ..... 52

#### 3.3.1 已知同端电压和功率时的潮流 计算 ..... 52

#### 3.3.2 已知首端电压和末端功率的潮流 计算 ..... 53

### 3.4 简单闭式网络的潮流计算 ..... 58

#### 3.4.1 两端供电网络的潮流计算 ..... 58

#### 3.4.2 简单环形网络的潮流计算 ..... 59

### 3.5 电力网的电能损耗估算 ..... 62

#### 3.5.1 电力线路中的电能损耗 估算 ..... 62

#### 3.5.2 变压器中的电能损耗 ..... 64

#### 3.5.3 电力网的网损率 ..... 66

### 小结 ..... 66

### 习题 ..... 66

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 第4章 复杂电力系统潮流计算 .....           | 69  |
| 4.1 电力网络的数学模型 .....            | 69  |
| 4.1.1 节点电压方程的建立 .....          | 69  |
| 4.1.2 节点导纳矩阵及其修正 .....         | 71  |
| 4.1.3 变压器电压比改变时导纳矩阵的修正 .....   | 73  |
| 4.2 功率方程和节点分类 .....            | 75  |
| 4.2.1 功率方程 .....               | 75  |
| 4.2.2 节点分类 .....               | 77  |
| 4.2.3 潮流计算的约束条件 .....          | 78  |
| 4.3 牛顿-拉夫逊法潮流计算 .....          | 78  |
| 4.3.1 牛顿-拉夫逊法的基本原理 .....       | 78  |
| 4.3.2 潮流计算的修正方程 .....          | 80  |
| 4.3.3 牛顿-拉夫逊潮流计算步骤 .....       | 82  |
| 4.4 P-Q 分解法潮流计算 .....          | 84  |
| 4.4.1 P-Q 分解法的简化过程 .....       | 84  |
| 4.4.2 P-Q 分解法潮流计算步骤 .....      | 86  |
| 4.5 Matlab 在电力系统潮流分析中的应用 ..... | 88  |
| 举例 .....                       | 88  |
| 小结 .....                       | 91  |
| 习题 .....                       | 91  |
| 第5章 电力系统功率平衡与控制 .....          | 94  |
| 5.1 电力系统中有功功率平衡与频率变化 .....     | 94  |
| 5.2 有功功率的电源与负荷 .....           | 95  |
| 5.2.1 有功功率负荷及其变化 .....         | 95  |
| 5.2.2 有功功率电源的备用 .....          | 95  |
| 5.2.3 各类发电厂的合理组合 .....         | 96  |
| 5.3 电力系统的有功功率平衡 .....          | 97  |
| 5.3.1 电力系统的有功功率-频率静态特性 .....   | 97  |
| 5.3.2 电力系统的频率调整 .....          | 99  |
| 5.4 电力系统中无功功率的平衡 .....         | 104 |
| 5.4.1 无功功率负荷和无功功率损耗 .....      | 105 |
| 5.4.2 无功功率电源 .....             | 105 |
| 5.4.3 无功功率与电压的关系 .....         | 108 |
| 5.5 电力系统的电压控制 .....            | 109 |
| 5.5.1 中枢点的电压管理 .....           | 109 |
| 5.5.2 电压调整的基本原理 .....          | 110 |
| 5.5.3 电压调整措施 .....             | 110 |
| 小结 .....                       | 120 |
| 习题 .....                       | 120 |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 第6章 电力系统三相短路故障分析 .....              | 124 |
| 6.1 电力系统故障概述 .....                  | 124 |
| 6.1.1 电力系统故障原因及分类 .....             | 124 |
| 6.1.2 短路计算的简化 .....                 | 125 |
| 6.2 无限大容量电源供电的电力系统三相短路 .....        | 125 |
| 6.2.1 无限大容量电源的概念 .....              | 125 |
| 6.2.2 无限大容量电源供电的三相短路电流分析 .....      | 126 |
| 6.2.3 短路冲击电流 .....                  | 129 |
| 6.2.4 短路电流的最大有效值和短路功率 .....         | 130 |
| 6.3 电力系统三相短路的实用计算 .....             | 133 |
| 6.3.1 确定系统各元件的次暂态参数 .....           | 133 |
| 6.3.2 起始次暂态电流 $I''$ 的计算 .....       | 136 |
| 6.3.3 非无限大电源供电的电力系统三相短路时的冲击电流 ..... | 137 |
| 6.3.4 电力系统三相短路分析举例 .....            | 138 |
| 6.4 应用运算曲线求任意时刻的短路电流 .....          | 142 |
| 6.4.1 运算曲线的制订 .....                 | 142 |
| 6.4.2 运算曲线的应用 .....                 | 143 |
| 6.4.3 电流分布系数和转移阻抗 .....             | 146 |
| 6.5 三相短路起始暂态电流的计算机算法 .....          | 146 |
| 小结 .....                            | 149 |
| 习题 .....                            | 150 |
| 第7章 电力系统不对称运行分析方法——对称分量法 .....      | 153 |
| 7.1 对称分量法及其应用 .....                 | 153 |
| 7.1.1 对称分量法 .....                   | 153 |
| 7.1.2 对称分量法在不对称短路计算中的应用 .....       | 155 |
| 7.2 同步发电机的各序参数 .....                | 157 |
| 7.3 变压器的各序参数和等效电路 .....             | 157 |
| 7.3.1 普通变压器的各序参数 .....              | 157 |
| 7.3.2 变压器等效电路与外电路的连接 .....          | 159 |
| 7.3.3 中性点有接地阻抗时变压器的零序等效电路 .....     | 160 |
| 7.4 电力线路的各序参数和等效电路 .....            | 161 |

|                                |     |                            |     |
|--------------------------------|-----|----------------------------|-----|
| 7.5 异步电动机和综合负荷各序参数和等效电路 .....  | 161 | 第9章 电力系统稳定性分析 .....        | 199 |
| 7.6 电力系统故障运行的等效电路 .....        | 162 | 9.1 电力系统稳定性概述 .....        | 199 |
| 小结 .....                       | 168 | 9.2 电力系统的静态稳定 .....        | 200 |
| 习题 .....                       | 168 | 9.2.1 静态稳定的基本概念 .....      | 200 |
| 第8章 电力系统不对称故障分析 .....          | 172 | 9.2.2 静态稳定实用判据 .....       | 202 |
| 8.1 简单不对称短路的分析与计算 .....        | 172 | 9.2.3 励磁调节对静态稳定性的影响 .....  | 204 |
| 8.1.1 单相接地短路 .....             | 173 | 9.2.4 静态稳定的分析方法 .....      | 205 |
| 8.1.2 两相短路 .....               | 177 | 9.3 电力系统的暂态稳定 .....        | 205 |
| 8.1.3 两相接地短路 .....             | 179 | 9.3.1 暂态稳定的基本概念 .....      | 205 |
| 8.1.4 正序等效定则 .....             | 183 | 9.3.2 简单电力系统暂态稳定的分析 .....  | 207 |
| 8.2 简单不对称短路时非故障处的电压和电流计算 ..... | 186 | 9.3.3 等面积定则 .....          | 209 |
| 8.2.1 计算序电压和序电流的分布 .....       | 186 | 9.3.4 极限切除角 .....          | 210 |
| 8.2.2 序电压和序电流经变压器后的相位变换 .....  | 187 | 9.4 提高电力系统稳定性的措施 .....     | 212 |
| 8.2.3 非故障点电压和电流计算举例 .....      | 188 | 9.4.1 提高稳定性的一般原则 .....     | 212 |
| 8.3 电力系统非全相运行的分析 .....         | 190 | 9.4.2 改善电力系统元件的特性和参数 ..... | 213 |
| 8.3.1 单相断线故障 .....             | 191 | 9.4.3 改善电力系统运行条件和参数 .....  | 215 |
| 8.3.2 两相断线故障 .....             | 192 | 9.4.4 防止系统失去稳定的措施 .....    | 216 |
| 8.4 不对称短路时运算曲线的应用 .....        | 193 | 小结 .....                   | 217 |
| 8.5 不对称短路计算机辅助分析 .....         | 193 | 习题 .....                   | 218 |
| 小结 .....                       | 195 | 附录A Matlab 程序 .....        | 221 |
| 习题 .....                       | 195 | 附录B 短路电流运算曲线 .....         | 228 |
|                                |     | 参考文献 .....                 | 233 |

电能是现代社会中最主要、最方便的能源，因为电能具有传输方便、易于转换成其他能量等优点，被极其广泛地应用于各行各业，可以说没有电力工业就没有国民经济的现代化。电力系统就是指由生产、输送、分配、使用电能的设备以及测量、继电保护、控制装置乃至能量管理系统所组成的统一整体。

1.1 电力系统基本概念

1.1.1 电力系统的组成

电力系统（Power System）由三部分组成（如图 1-1 所示）：发电机（电源）、负荷（用电设备）以及电力网（连接发电机和负荷的设备，如变压器、电力线路等）。这三部分都带有相应的监测、保护设备。如果考虑结合发电厂的动力设备，如火力发电厂的锅炉、汽轮机等，水力发电厂的水库和水轮机等，核电站的反应堆等，则统称为动力系统，见表 1-1。本书重点讨论电力系统运行状况及其分析计算的基本原理和方法。

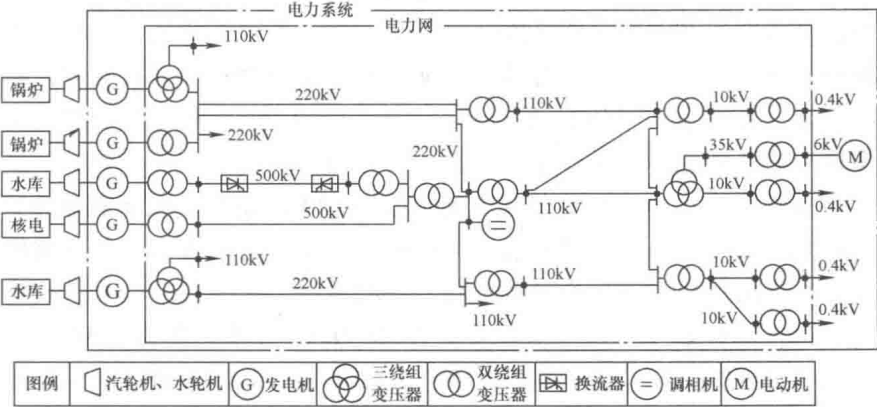


图 1-1 电力系统和电力网示意图

表 1-1 动力系统、电力系统、电力网关系

|      |      |                         |
|------|------|-------------------------|
| 动力系统 | 动力部分 | 动力设备——锅炉,汽轮机,水轮机等       |
|      | 电力系统 | 发电机——汽轮发电机,水力发电机等       |
|      |      | 电力网——传输线,变压设备,无功功率补偿设备等 |
|      |      | 综合负荷——电动机,照明,加热设备等      |

必须指出的是,目前电力系统中所用到的大部分设备是三相交流设备,它们的参数是三相对称的,所构成的电力系统主要为三相对称的正弦交流电系统,这也是本书讨论的范围。一般情况下(三相)电力线可以用单线图表示,线电压、线电流、三相复功率为其主要参数。

### 1.1.2 电力系统的运行特点

与工业生产的其他行业相比较,电力系统的运行有三个特点:

(1) 电能与国民经济各部门以及人民的生活关系密切 电能是最方便的能源,容易进行大量生产、远距离传输和控制,容易转换成其他能量,在工业及民用中应用非常广泛,如果电力系统不能正常运行,会对国民经济和人民生活造成不可估量的损失。

(2) 电能不能大量贮存 电能的生产、输送、分配和使用实际上是同时进行的,即电力系统中每一时刻所发的总电能等于用电设备消耗的电能和电力网中电能损耗之和,即达到平衡。如果不能达到平衡,电力系统会出现各点的电压波动和频率波动,严重时波动会超出允许范围。

(3) 电力系统中的暂态过程十分迅速 在电力系统中,因开关操作等引起的从一种状态到另一种状态的过渡过程只需要几微秒到几毫秒,当电力系统某处发生故障而处理不当时,只要几秒到几分钟就可能造成系统的一系列故障甚至整个电力系统的崩溃,因此电力系统中广泛采用各种控制、保护设备并要求这些设备能快速响应,这也就是电力系统暂态分析所要讨论的。

### 1.1.3 电力系统设计的基本要求

根据电力系统的这些运行特点,在设计电力系统时就有了以下4个基本要求:

(1) 提高电力系统供电的安全可靠性 电力系统供电的安全可靠性主要体现在三个方面:一是保证一定的备用容量,电力系统中的发电设备容量,除满足用电负荷容量外,要留有一定的负荷备用、事故备用和检修备用。二是电网的结构要合理,例如高压输电网一般都采用环形网络,使得即使其中某一线路因故退出运行时,各变电站仍可以继续供电。并要求所采用的设备安全可靠,在发生故障时能及时动作。三是加强对电力系统运行的监控,对电力系统在不同的运行方式下各节点的电网参数进行分析计算(电力系统稳态分析的任务)并及时采取各种措施保证电力系统稳定运行。

(2) 保证电能质量 电力系统中描述电能质量最基本的指标是频率和电压。

在同一个电力系统中,一般情况下认为各点的电压频率是一致的,各发电机的转子角速度等于电力系统的电压角频率,称为发电机同步并列运行。我国规定电力系统的额定频率为50Hz,电力系统正常运行条件下频率偏差限值为 $\pm 0.2\text{Hz}$ ,在电网容量比较小(装机容量小于300万kW)时,允许偏差可以放宽到 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。随着电力系统自动化水平的提高,频率的允许偏差范围也将逐步缩小。

在同一个电力系统中,各点的电压大小是不同的,我国一般规定各点的电压允许变化范围为该点额定电压的 $\pm 5\%$ 。

除了这两个基本指标外,电能质量指标还有:谐波(三相电压的不对称度),电压的波动与闪变(暂时过电压和瞬态过电压)等。这些均包含在2008年国家颁布的6项电能质量的新标准中。

(3) 提高电力系统运行的经济性 在电能生产过程中要尽量降低能耗,一般情况下水

力发电的运行成本最低,因此要充分利用水资源进行水力发电,而火力发电厂要尽量提高发电的效率。在电力网规划设计中要考虑降低电力网在电能传输过程中的损耗,电力网运行过程要通过自动化控制使电力系统运行在最经济的状态。

(4) 关注环境保护问题 目前,环境保护问题也越来越受到人们的关注,在当代提倡“绿色能源,低碳能源”的口号下,比较环保的能源如风能、太阳能发电、潮汐发电也成为人们研究的热点,并取得了一系列的进展。

#### 1.1.4 本课程学习内容简介

本课程介绍电力系统的基本概念和常用的分析方法,电力系统分析通常又可以分为稳态分析、暂态分析和稳定性分析三个部分。其中稳态分析是指:在电力系统运行的某一段时间内如果运行参数只在某一恒定值的平均值附近发生微小的变化,称这种状态为稳态。这时可以认为电力系统各点的运行参数为常数,通过分析求出这些参数就是稳态分析的工作。电力系统暂态是指从电力网从一种运行状态切换到另一种运行状态的过渡过程。这种运行状态的变化可以是由电力系统的实际需求变化引起的切换,也可以是由于电力系统某处发生了故障引起的。通过对电力系统可能发生的暂态过程分析,求出暂态过程中电路的参数变化,并选择相关的保护设备和措施,这就是暂态分析的工作。电力系统的稳定性分析则主要讨论电力系统在受到一定的扰动后能否继续运行以及保证电力系统稳定运行的条件。

### 1.2 电力系统的主要电源

电力系统的电源主要来自火力发电厂、水力发电厂(水电站)和核电站,另外还有风力发电、地热发电和太阳能发电、潮汐发电等。

#### 1.2.1 火力发电厂

火力发电厂是将煤、石油、天然气等燃料所产生的热能,转换成汽轮机的机械能,再通过发电机转换成电能。火力发电机组又分为专供发电的凝汽式汽轮机组(占75%)及发电并兼供热的抽气式和背压式汽轮机组,后者主要建在我国的北方地区,在冬季兼有供热的任务,这类兼供热的发电厂,常称为热电厂。在我国,火力发电厂目前是电力系统中的主力军,其发电量约占电力系统总发电量的75%。但按照我国《能源发展战略行动计划》要求,到2020年,非化石能源占一次能源消费比重达到15%,天然气比重达到10%以上,煤炭消费比重控制在62%以内。

凝汽式火力发电厂的生产过程如图1-2所示。煤通过磨煤机加工成煤粉,送入锅炉燃烧,使锅炉中的水加热形成高温高压的水蒸气去推动汽轮机,汽轮机带动发电机发电。高温高压蒸汽又通过凝结器回收,预处理后(包括适当补水)再送回锅炉,如此循环。燃烧的烟灰也要经过适当处理再排放。

火力发电的特点:

1) 火力发电需要消耗煤、石油等自然资源,这类资源一般需要通过铁路、船等运输,受到运输条件的限制,并增加了发电的成本。

2) 火力发电过程中需要排放烟灰,因此对周围的环境造成污染,近年来对烟灰的处理

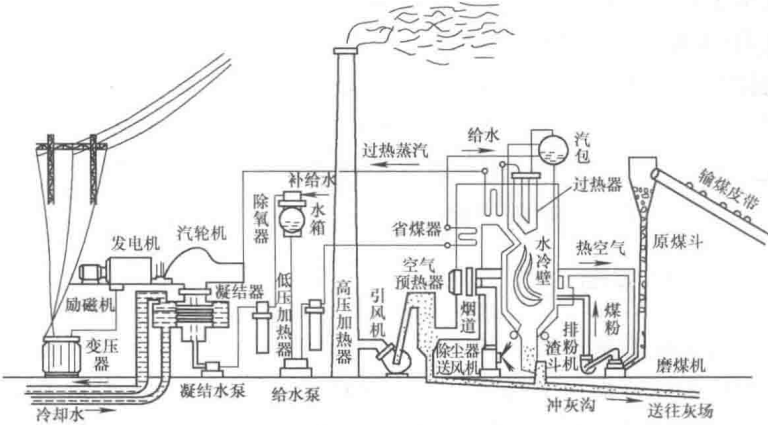


图 1-2 凝汽式火力发电厂的生产过程示意图

技术有了很大的进步，但还没能达到零排放。

3) 火力发电不受自然条件的限制，比较容易调度控制。

1.2.2 水力发电厂

水力发电厂又称水电站，是利用河流的水能发电。水力发电厂的装机容量主要由发电机组的效率  $\eta$ 、水的落差  $H$  和流量  $\theta$  决定： $P=9.8\eta H\theta$ 。根据其特点，水力发电站可以分为三类：径流式水电站、水库调节式水电站和抽水储能式发电厂。

径流式水电站主要建在水流量较大，水速比较急，但水的落差并不是很大的地区，例如我国的葛洲坝水电站。它主要是在急流的河道中建大坝，使水通过管道进入水轮机来发电，如图 1-3 所示。它的水库容量很小，发电功率主要是由河流的水流量决定。

水库调节式水电站（如图 1-4 所示）主要建在水的落差较大的地区，例如我国的三峡水电站。在长江中建大坝，利用上下游的落差进行发电，这种水电站的水库容量较大，例如三峡水电站大坝高程 185m，蓄水高程 175m，水库长 600 余公里，总装机容量 32 台单机容量为 70 万 kW 的水电机组，可按库容的大小进行日、月、年的调节，以便有计划地使用水能。

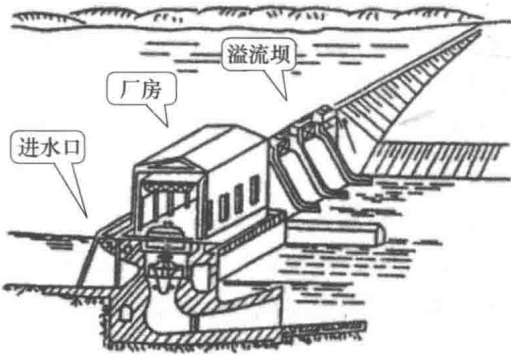


图 1-3 径流式水电站

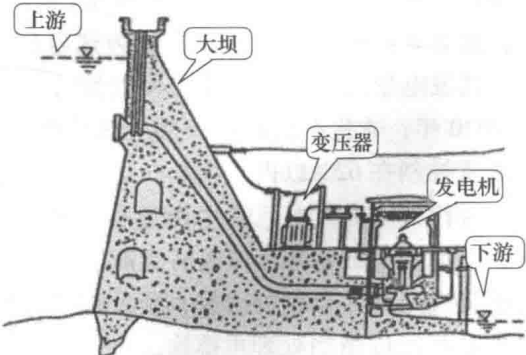


图 1-4 水库调节式水电站

抽水蓄能发电站（如图 1-5 所示）主要建在水资源不是很丰富的地区，它是一种特殊的水力发电厂。它有上、下两级水库，在深夜或负荷低谷期，电机工作在电动机状态，利用剩

余电力使水轮机工作在水泵的方式，将下游的水抽在水库内，在白天或负荷高峰时电机工作在发电机状态进行发电。这种水电站主要进行调峰，保证用电高、低峰时电网的平衡，对于改善电力系统的运行条件具有很重要的意义。

目前我国最大的水轮发电机单机容量为 80 万 kW。

水力发电的特点：

1) 水力发电不需要支付燃料费用，发电成本低，且水能是可再生资源。

2) 水力发电因受水库调节性能的影响在不同程度上受到自然条件限制，水库的调节性能可分为：日调节、季调节、年调节和多年调节。水库的调节周期越长，水电厂的运行受自然条件影响越小，有调节水库的水电厂可以按调度部门的要求安排发电，但无调节水库的径流式水电站只能按实际来水流量发电。

3) 水力发电机组的出力调整范围较宽，负荷增减速度相当快，机组投入和退出运行快，操作简便，无需额外的耗费。

4) 水电站的建设通常是很大的工程，受到自然条件的限制，一次性（建设）投资很大。水电站会淹没大量土地，有可能导致生态环境破坏，而且一个国家的水力资源也是有限的。

5) 水力枢纽往往需要考虑防洪、发电、航运、灌溉、养殖、供水和旅游等多方面的效益，因此水库的发电用水量通常要按水库的综合效益来考虑安排，不一定能同电力负荷的需要相一致。

6) 水力发电不会对周围环境造成污染，是比较环保的能源。

### 1.2.3 核电站

自 1951 年 12 月美国实验增殖堆 1 号（EBR-1）首次利用核能发电以来，世界核电至今已有 60 多年的发展历史。核电与火电、水电一起，并称为世界三大电力支柱，目前世界核能发电约占全世界总发电量的 17%，是当今世界上大规模可持续供电的主要能源之一。

核电站又称核能发电厂或原子能发电厂，其工作原理是利用核燃料在反应堆中产生的热能，将水变为蒸汽，推动汽轮机，带动发电机发电。

目前核电技术通常分为 4 代，第一代核电站为原型堆，其目的在于验证核电设计技术和商业开发前景；第二代核电站为技术成熟的商业堆，在运行的核电站绝大部分属于第二代核电站；第三代核电站为符合 URD（美国“先进轻水堆用户要求”文件）或 EUR（“欧洲用户对轻水堆核电站的要求”文件）要求的核电站，其安全性和经济性均较第二代有所提高，属于未来发展的主要方向之一；第四代核电站强化了防止核扩散等方面的要求，目前处在原型堆技术研发阶段。

图 1-6 所示为轻水堆核反应堆的示意图。轻水堆又可分成沸水堆和压水堆，沸水堆由单水路构成，核反应堆芯与水没有分开，有可能使汽轮机等设备受到放射性污染；压水堆则采用了双回路各自独立循环，不会造成设备的放射性污染。

一般来说，核电站有以下特点：

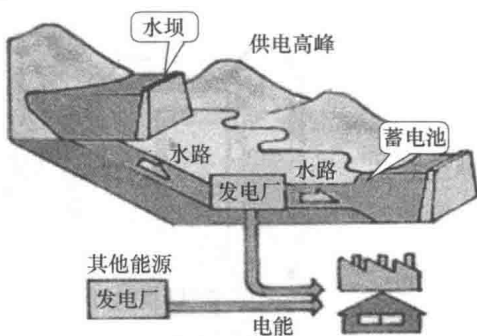


图 1-5 抽水蓄能发电站

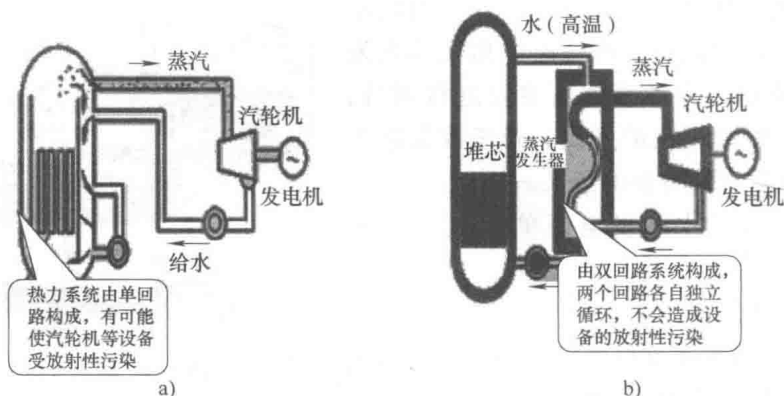


图 1-6 轻水堆核反应堆的示意图

1) 核电站的建造成本比较高,但运行成本相对较低。例如一个发电量为 50 万 kW 的火电厂,每年需要燃煤 150 万吨,而同样发电量的核电站,每年只需要消耗铀 20 吨,因此运输成本等都大大降低,发电量超过 50 万 kW 后,核电站的成本便远低于火电厂。

2) 与火电厂相比,没有环境污染。火电厂在燃烧煤或油后,有烟灰排出,虽然现在已加强对烟灰的处理,但对周围的环境还是有一定的污染,而核电站建在地下,不需排放烟灰。唯一要注意的是防止核辐射污染,2011 年日本福岛的核电站泄漏事故在全世界引起了震惊。只要妥善处理,可以做到对周围环境没有污染。

3) 反应堆和汽轮机组投入和退出运行的都很费时,且要增加能量消耗,成本大,因此一般情况下应承担基本负荷。

4) 反应堆的负荷基本没有限制,其最小技术负荷由汽轮机决定。

目前全世界共有 400 多座核电站,年发电量占全世界总发电量的 17%。世界各国核发电量占各自总发电量的比重相差较大,其中法国核电装机量占总装机容量的 78%,日本核电装机量占总装机容量的 36%,美国核电装机量占总装机容量的 20%,韩国核电装机量占总装机容量的 42%,而在中国大陆仅占 1.6%。

## 1.2.4 风力发电

风力发电有三种运行方式:一是独立运行方式,通常是一台小型风力发电机向一户或几户提供电力,它用蓄电池蓄能,以保证无风时的用电;二是风力发电与其他发电方式(如柴油机发电)相结合,向一个单位或一个村庄或一个海岛供电;三是风力发电并入常规电网运行,向大电网提供电力,常常是一处风电场安装几十台甚至几百台风力发电机,这是风力发电的主要发展方向。

然而,风电是一种波动性、间歇性电源,大规模并网运行会对局部电网的稳定运行造成影响。目前,世界风电发达国家都在积极开展大规模风电并网的研究。

风电场的一般的接线方式如图 1-7 所示。当前兆瓦级的风力发电机组的输出电压通常为 690V,经过设置无励磁调压装置的风电集

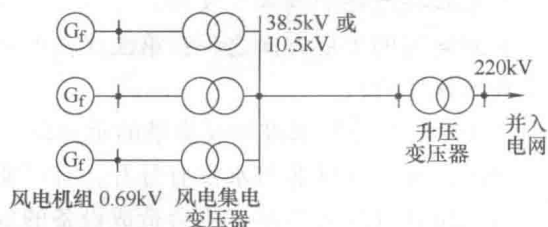


图 1-7 风力发电并入电网

电变压器将 0.69kV 升压为 10.5kV 或 38.5kV, 然后经输电线输送数公里后再通过单回路接线接至设置有有载调压分接开关的双圈升压变压器升压至 220kV 或 110kV 送入超高压电网。

### 1.2.5 太阳能发电

照射在地球上的太阳能非常巨大, 大约 40min 照射在地球上的太阳能, 便足以供全球人类一年能量的消费。可以说, 太阳能是真正取之不尽、用之不竭的能源。而且太阳能发电绝对干净, 不产生公害。所以太阳能发电被誉为是理想的能源。

利用太阳能发电有两大类型, 一类是太阳光发电 (亦称太阳能光发电), 另一类是太阳热发电 (亦称太阳能热发电)。

太阳能光发电是将太阳能直接转变成电能的一种发电方式。它包括光伏发电、光化学发电、光感应发电和光生物发电 4 种形式。在光化学发电中有电化学光伏电池、光电解电池和光催化电池。

太阳能热发电是先将太阳能转化为热能, 再将热能转化成电能, 它有两种转化方式。一种是将太阳热能直接转化成电能, 如半导体或金属材料的温差发电, 真空器件中的热电子和热电离子发电, 碱金属热电转换, 以及磁流体发电等; 另一种方式是将太阳热能通过热机 (如汽轮机) 带动发电机发电, 与常规热力发电类似, 只不过是其热能不是来自燃料, 而是来自太阳能。

太阳能光发电, 需通过太阳能电池进行光电变换来实现。图 1-8 为太阳能屋顶发电站。它同以往其他电源发电原理完全不同, 具有以下特点: ①无枯竭危险; ②绝对干净 (无公害); ③不受资源分布地域的限制; ④可在用电处就近发电; ⑤能源质量高; ⑥使用者从感情上容易接受; ⑦获取能源花费的时间短。不足之处是: ①照射的能量分布密度小, 即要占用巨大面积; ②获得的能源同四季、昼夜及阴晴等气象条件有关。但总的说来, 瑕不掩瑜, 作为新能源, 太阳能具有极大优点, 因此受到世界各国的重视。

目前太阳能电池主要有单晶硅、多晶硅、非晶态硅 (薄膜式太阳电池) 等。其中单晶硅太阳能电池变换效率最高, 已达 20% 以上, 但价格也最贵。非晶态硅太阳能电池变换效率最低, 且不够稳定, 但价格最便宜。当然, 特殊用途和实验室中用的太阳能电池效率要高得多, 如美国波音公司开发的由砷化镓半导体同锑化镓半导体重叠而成的太阳能电池, 光电变换效率可达 36%, 接近燃煤发电的效率。但由于其价格昂贵, 目前只能限于在卫星上使用。

要使太阳能发电真正达到实用水平, 一是要提高太阳能光电变换效率并降低其成本, 二是要实现太阳能发电大规模并入电网。

太阳能发电系统分为离网发电系统、并网发电系统及分布式发电系统。

1) 离网发电系统主要由太阳能电池组件、控制器、蓄电池组成, 如输出电源为交流 220V 或 110V, 还需要配置逆变器。

2) 并网发电系统就是太阳能组件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

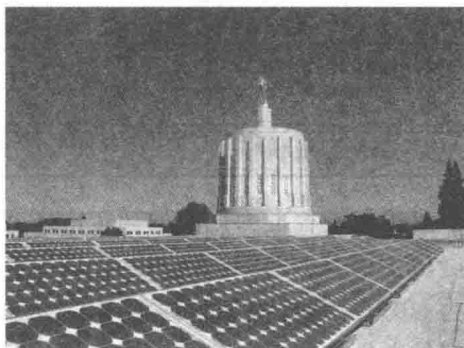


图 1-8 太阳能屋顶发电站

电之后直接接入公共电网。并网发电系统中的集中式大型并网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。

3) 分布式发电系统，又称分散式发电或分布式供能，是指在用户现场或靠近用电现场配置较小的光伏发电供电系统，以满足特定用户的需求，支持现存配电网的经济运行，或者同时满足这两个方面的要求。

1.3 电力网

电力网由变压器、电力线路、无功功率补偿设备和各种保护设备、监控设备构成，实际的电力网结构庞大、复杂，由很多子网发展、互联构成。

1.3.1 额定电压与额定频率

电力网的主要用途是传输电能，当传输的功率（单位时间传输的能量）一定时，输电的电压越高，则传输的电流越小，线路上的损耗就越小，且导线的截面积也可以相应减小，从而减少电力线路的投资。但电压越高，对绝缘的要求就越高，因此在变压器、断路器、电线杆塔等方面的投资就越大。综合考虑这些因素，每个电网都有规定的电压等级标准，称为额定电压（Rated Voltage），我国国家标准 GB/T 156—2007 规定的额定电压（线电压）如表 1-2 所示。

表 1-2 国标 GB/T 156—2007 规定的部分电力系统额定电压（线电压）

| 线路及用电设备<br>额定线电压 $U_N/\text{kV}$ | 交流发电机<br>额定线电压 $U_N/\text{kV}$ | 变压器额定线电压 $U_N/\text{kV}$ |            |
|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------|------------|
|                                  |                                | 一次绕组                     | 二次绕组       |
| 0.38                             |                                |                          | 0.4        |
| 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  |
| 15                               | 15.75                          | 15.75                    |            |
| 20                               |                                | 20                       | 22         |
| 35                               |                                | 35                       | 37 及 38.5  |
| 110                              |                                | 110                      | 121        |
| 220                              |                                | 220                      | 242        |
| 330(仅西北电力网有)                     |                                | 330                      | 345        |
| 500                              |                                | 500                      | 525        |
| 750(仅西北电力网有)                     |                                | 750                      | 788 及 825  |

我国规定：电力线路的额定电压和系统的额定电压相等，有时把它们称为电力网络的额定电压。如表中的第一列所示，用  $U_N$  表示，下标 N 表示为额定值，交流电力系统的额定频率为 50Hz，用  $f_N$  表示。通常用电设备都是按照指定的电压和频率来进行设计制造的，这个指定的电压和频率，称为电气设备的额定电压和额定频率。当电气设备在此电压和频率下运行时，将具有最好的技术性能和经济效果。但实际电力系统在运行过程中，各点的电压并不

一定等于额定电压，电力系统的频率也不一定等于额定频率，只要在允许的范围内变化，就认为电力系统是正常运行的。根据我国对电能质量的要求，电力系统各节点的电压必须控制在  $(1 \pm 5\%)U_N$  的范围内，电力系统允许的频率范围为  $(50 \pm 0.2)\text{Hz}$ 。

发电机、变压器和负荷还有一个重要的指标是额定容量（或称额定功率） $S_N$ ，对三相（对称）设备有

$$S_N = \sqrt{3} U_N I_N$$

其中  $I_N$  为额定（线）电流， $U_N$  为额定（线）电压。在选择设备时一定要根据要求确定其额定电压和额定功率，否则不能保证设备长期稳定的工作。

从表中第三列可以看到，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比系统的额定电压高 5% 或 7.5%，一般后接相应的升压变压器。

变压器接受功率一侧的绕组为一次绕组，输出功率一侧为二次绕组。一次绕组的作用相当于受力设备，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，其额定电压则与发电机的额定电压相等。二次绕组的作用相当于供电设备，其额定电压规定比系统的额定电压高 10%。如果变压器的短路电压小于 7% 或直接（包括通过短距离线路）与用户连接时，则规定比系统的额定电压高 5%。变压器的一次绕组与二次绕组的额定电压之比称为变压器的额定电压比（或称主分接头电压比）。

传输电能的电力线路上各点的电压显然不同，例如图 1-9 中连接变压器  $T_2$  与变压器  $T_3$  的电力线路额定电压是 35kV。但实际与  $T_2$  的连接端电压为 38.5kV，与  $T_3$  连接端的电压为 35kV。因此，引入线路的平均额定电压  $U_{avN}$  为电力线路两个端点电压的平均值

$$U_{avN} = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

**例 1-1** 电力系统的部分接线如图 1-9 所示，各电压级的额定电压及功率输送方向在图中已标明。试求（1）发电机及各变压器高低压绕组的额定电压；（2）各变压器的额定电压比。

**解：**（1）根据表 1-2，可以求出各点额定电压：

（单位：kV）

| 发电机  | 变压器 T <sub>1</sub> |     | 变压器 T <sub>2</sub> |     |      | 变压器 T <sub>3</sub> |     | 变压器 T <sub>4</sub> |     |
|------|--------------------|-----|--------------------|-----|------|--------------------|-----|--------------------|-----|
|      | 一次侧                | 二次侧 | 一次侧                | 二次侧 |      | 一次侧                | 二次侧 | 一次侧                | 二次侧 |
| 10.5 | 10.5               | 242 | 220                | 121 | 38.5 | 35                 | 11  | 220                | 121 |

（2）各变压器的额定电压比为：

|     | 变压器 $T_1$ | 变压器 $T_2$    | 变压器 $T_3$ | 变压器 $T_4$ |
|-----|-----------|--------------|-----------|-----------|
| $k$ | 242/10.5  | 220/121/38.5 | 35/11     | 220/121   |

电力系统中考虑到运行调节的需要，通常在双绕组变压器的高压绕组或三绕组变压器的高压绕组和中压绕组上设计制造分接头，可以按需要调节变压器的电压比，分接头通常用正负百分比表示，即表示分接头电压与主抽头电压的差值为主抽头的百分之几。

**例 1-2** 在图 1-9 中，若变压器  $T_1$  运行于 +5% 抽头时， $T_4$  运行于 -2.5% 抽头时，求它

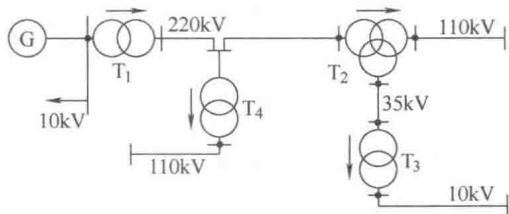


图 1-9 例 1-1 电力系统接线图



们的实际电压比。

解：变压器  $T_1$   $k = \frac{242 \times 1.05}{10.5} = \frac{254.1}{10.5}$

变压器  $T_4$   $k = \frac{220 \times 0.975}{121} = \frac{214.5}{121}$

1.3.2 输电网与配电网

电力网中的变电所分为枢纽变电所、中间变电所、地区变电所、终端变配电所。变电所中除了安装变压器外，还要安装种保护装置、无功补偿设备、操作开关、监测设备等。电力网按电压等级和供电范围分为高压输电网、区域电力网和地区电力网。35kV 及以下且输电距离几十公里以内的称为地区电力网，又称配电网，其主要任务是向终端用户配送满足质量要求的电能。电压为 110~220kV，通常是给区域性变电所负荷供电的，称为区域电力网。330kV 及以上的远距离输电线路组成的电力网称为高压输电网。区域电力网和高压输电网统称为输电网。它的主要任务是将大量的电能从发电厂远距离传输到负荷中心。

输电网的电压等级要与输送功率和距离相适应，表 1-3 给出架空线路不同电压等级下输送功率和输送距离的大致范围。

表 1-3 架空线路不同电压等级下的输送功率和输送距离

| 线路额定电压/kV | 输送功率 /MW  | 输送距离 /km | 线路电压 /kV | 输送功率 /MW      | 输送距离 /km |
|-----------|-----------|----------|----------|---------------|----------|
| 3         | 0.1~1.0   | 1~3      | 220      | 100.0~500.0   | 100~300  |
| 6         | 0.1~1.2   | 4~15     | 330      | 200.0~800.0   | 200~600  |
| 10        | 0.2       | 6~20     | 500      | 1000.0~1500.0 | 150~850  |
| 35        | 2.0~10.0  | 20~50    | 750      | 2000.0~2500.0 | 500 以上   |
| 110       | 10.0~50.0 | 50~150   |          |               |          |

1.3.3 电力系统中性点接地方式

电力系统中性点接地方式是指电力系统中的变压器和发电机的中性点与大地之间的连接方式。

中性点接地方式可分为两大类：一类是中性点直接接地或经小阻抗接地，采用这种中性点接地方式的电力系统称为有效接地系统或大接地电流系统。另一类是中性点不接地或经消弧线圈接地或经高阻抗接地，采用这种中性点接地方式的电力系统被称为非有效接地系统。

现代电力系统中采用较多的中性点接地方式是：直接接地，不接地或经消弧线圈接地。在 110kV 以上的高压电力系统中，均采用中性点直接接地。现代有些大城市的 110kV 的配电系统改用中性点经低值电阻 ( $R<10\Omega$ ) 或中值电阻 ( $R=11\sim100\Omega$ ) 接地，它们也属于有效接地系统。一般在 110kV 以下的中、低压电力系统中，出于可靠性等方面考虑，采用不接地或中性点经消弧线圈接地。

1.4 电力系统的负荷

电力系统的总负荷就是指电力系统中所有用电设备消耗功率的总和，应该等于电力系统