



21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

电力系统分析



主 编 曹 娜
副主编 阎根弟 邵小强



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

电力系统分析

主 编 曹 娜

副主编 阎根弟 邵小强



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书共3篇、16章,主要内容如下。

第一篇“电力系统稳态分析”,共7章:第1章介绍电力系统的基本概念;第2章介绍电力系统各元件的等值电路及参数计算;第3章介绍简单电力网络的计算与分析;第4章介绍利用电力网络节点导纳矩阵和节点阻抗矩阵表示的电力网络数学模型;第5章介绍电力系统潮流计算的数学模型,分析常用的牛顿-拉夫逊法潮流计算和P-Q分解法潮流计算;第6章介绍电力系统的有功功率平衡和频率调整;第7章介绍无功功率平衡和电压调整。

第二篇“电力系统电磁暂态过程分析”(电力系统故障分析),共5章:第8章介绍派克变换以及在d、q、0坐标系下的同步发电机方程;第9章分析电力系统突然三相短路时同步发电机的暂态过程;第10章主要介绍电力系统三相短路电流的实用计算方法;第11章介绍对称分量法分析不对称故障的原理和电力系统各元件各序分量的参数;第12章为典型的不对称故障的分析和计算。

第三篇“电力系统机电暂态过程分析”(电力系统稳定性分析),共4章:第13章介绍电力系统稳定性的基本概念;第14章介绍同步发电机组的机电模型;第15章分析电力系统的静态稳定性;第16章分析电力系统的暂态稳定性。

本书是电气工程及其自动化专业的专业课程教材,也可作为从事电力工程的工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统分析/曹娜主编. —北京:北京大学出版社,2009.2
(21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)
ISBN 978-7-301-14460-2

I. 电… II. 曹… III. 电力系统—分析—高等学校—教材 IV. TM711

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第005921号

书 名: 电力系统分析

著作责任者: 曹 娜 主编

策 划 编 辑: 李 虎 李娉婷

责 任 编 辑: 李娉婷

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-14460-2/TP·0977

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 北京宏伟双华印刷有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 22印张 510千字

2009年2月第1版 2009年2月第1次印刷

定 价: 35.00元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

电力系统是由多种设备和大量元器件组成的复杂大系统，它的规划、设计、建设、运行和管理是一项庞大的系统工程。电力系统分析便是这项系统工程的理论基础，是电气工程及其自动化专业的必修课，是基础理论课走向专业课学习和工程应用研究的纽带，具有承上启下的作用。

本课程的先修课程为电路、电磁场以及电机学。通过本课程的学习，既让学生系统学习有关基础理论，为后续专业课程及相关专题的学习打下基础，又可以培养学生综合运用基础知识解决工程实际问题的能力。

根据高等教育的发展情况，本书着重阐明电力系统的基本概念和基本理论及分析问题的基本方法，突出电力系统的潮流计算、短路计算和电力系统稳定分析。

考虑到目前专业课学时数普遍减少的情况，本书略去了部分复杂公式的推导，对电力系统故障分析和机电暂态部分也作了适当的调整，编写力求深入浅出，理论联系实际，并且重点突出，层次分明，逻辑性强，易于讲授，便于自学。

本书可用两个学期来完成：第一学期讲授第一篇的内容，课内学时为 56 学时，上机实验为 8 学时；第二学期讲授第二篇和第三篇的内容，课内学时共为 106 学时，其中第二篇课内学时为 56 学时，上机实验为 8 学时；第三篇课内学时为 40 学时，上机实验为 2 学时。

本书由曹娜（编写第 1、2、8、9、13、14、15、16 章）、阎根弟（编写第 3、4、6、10、11 章）和邵小强（编写第 5、7、12 章）编写；曹娜任主编。

限于作者的水平和条件，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2008 年 10 月

目 录

第一篇 电力系统稳态分析

第1章 电力系统的基本概念 1

- 1.1 电力系统概述 2
 - 1.1.1 电力系统的组成 2
 - 1.1.2 电力系统运行特点 3
 - 1.1.3 电力系统运行的基本要求 3
- 1.2 电力系统的电压和频率 4
- 1.3 电力系统的接线方式 6
- 小结 8
- 习题 8

第2章 电力系统各元件的数学模型 10

- 2.1 变压器参数及数学模型 11
 - 2.1.1 变压器的等值电路 11
 - 2.1.2 双绕组变压器的参数计算 11
 - 2.1.3 三绕组变压器的参数计算 13
 - 2.1.4 自耦变压器的参数计算 14
 - 2.1.5 变压器的 Π 型等值电路 14
- 2.2 电力线路参数及数学模型 17
 - 2.2.1 电力线路的物理现象及电气参数 18
 - 2.2.2 电力线路的等值电路 23
- 2.3 综合负荷特性及模型 26
 - 2.3.1 综合负荷特性 26
 - 2.3.2 综合负荷模型 26
- 2.4 标幺制及电力系统的等值电路 28
 - 2.4.1 标幺制 28
 - 2.4.2 电力网中各元器件参数标幺值的计算及等值电路 30
- 小结 33

习题 34

第3章 简单电力网络的计算与分析 35

- 3.1 电力线路和变压器的电压降落、功率损耗计算和分析 36
 - 3.1.1 电力线路的电压降落和功率损耗 36
 - 3.1.2 变压器的电压降落和功率损耗 41
 - 3.1.3 运算负荷和运算功率 44
- 3.2 开式网络的电压和功率的分布计算 45
 - 3.2.1 线路上有几个负荷时电压和功率的分布计算 45
 - 3.2.2 两级电压的开式网络计算 48
- 3.3 闭式网络的电压和功率的分布计算 50
 - 3.3.1 两端供电网络的功率分布计算 50
 - 3.3.2 闭式网络的电压降落计算 54
 - 3.3.3 多个电压等级的闭式网络功率分布计算 55
 - 3.3.4 闭式网络中潮流控制 57
- 3.4 电力网络的简化方法 59
- 小结 63
- 习题 63

第4章 电力网络的数学模型 66

- 4.1 基本概念 67
 - 4.1.1 节点电压方程及回路电流方程 67
 - 4.1.2 变压器及多级电压电力网络的等值电路 69
- 4.2 节点导纳矩阵 72



4.2.1 节点导纳矩阵的物理意义及特点	72	6.1.2 有功功率负荷曲线的预计	114
4.2.2 节点导纳矩阵的计算	74	6.1.3 有功功率电源和备用容量	115
4.3 节点阻抗矩阵	76	6.2 电力系统中有功功率的最优分配	116
4.3.1 节点阻抗矩阵的物理意义及特点	77	6.2.1 各类发电厂的运行特点和合理组合	116
4.3.2 利用节点导纳矩阵求节点阻抗矩阵	78	6.2.2 最优分配负荷时的目标函数和约束条件	119
4.3.3 用支路追加法求阻抗矩阵	79	6.3 电力系统的频率特性	125
4.4 网络变换与节点编号优化	86	6.3.1 电力系统负荷的有功功率-频率静态特性	125
4.4.1 用高斯消去法求解网络方程	86	6.3.2 发电机组的有功功率-频率静态特性	126
4.4.2 利用高斯消去法简化网络	88	6.4 电力系统的频率调整	128
4.4.3 节点编号优化	89	6.4.1 频率调整的必要性	128
小结	90	6.4.2 频率的一次调整	129
习题	90	6.4.3 频率的二次调整	132
第5章 电力系统的潮流计算	92	6.4.4 互联系统的频率调整	133
5.1 潮流计算的数学模型	93	6.4.5 主调频厂的选择	135
5.1.1 潮流计算的定解条件	93	小结	136
5.1.2 潮流计算的约束条件	94	习题	137
5.2 牛顿-拉夫逊法潮流计算	95	第7章 电力系统无功功率和电压调整	139
5.2.1 牛顿-拉夫逊法的基本原理	95	7.1 电力系统的无功功率平衡	140
5.2.2 节点电压用直角坐标表示时的牛顿-拉夫逊法潮流计算	97	7.1.1 无功功率负荷和无功功率损耗	140
5.2.3 节点电压用极坐标表示时的牛顿-拉夫逊法潮流计算	104	7.1.2 无功功率电源	141
5.3 $P-Q$ 分解法潮流计算	106	7.1.3 无功功率平衡	145
小结	111	7.1.4 无功功率平衡和电压水平的关系	145
习题	111	7.2 电压调整的基本概念	148
第6章 电力系统的有功功率和频率调整	113	7.2.1 允许电压偏移	148
6.1 电力系统的有功功率的平衡	114	7.2.2 中枢点电压管理	149
6.1.1 有功功率负荷的变动和调整控制	114	7.3 电力系统的电压调整	151
		7.3.1 电压调整的基本原理	151
		7.3.2 发电机调压	152
		7.3.3 改变变压器变比调压	153

7.3.4 利用无功功率补偿调压	154
7.3.5 线路串联补偿电容器 调压	157
7.4 各种调压措施的比较和应用	158
小结	159
习题	159

第二篇 电力系统电磁暂态过程分析

第8章 同步发电机的数学模型 161

8.1 基本前提	162
8.2 同步发电机的原始方程	162
8.3 d、q、0 坐标系统的同步发电机 方程	165
8.4 标幺制表示的派克方程	170
8.5 同步发电机的对称稳态运行	171
小结	175
习题	175

第9章 电力系统三相短路的暂态过程 176

9.1 短路的基本概念	177
9.1.1 短路的原因	177
9.1.2 短路的类型	177
9.1.3 短路故障的危害	177
9.1.4 短路计算的内容和 目的	178
9.2 无限大功率电源供电的三相短路 电流分析	178
9.2.1 暂态过程分析	178
9.2.2 短路冲击电流	180
9.2.3 短路电流的有效值	181
9.2.4 短路功率	181
9.3 无阻尼绕组同步发电机突然三相 短路的分析	183
9.3.1 突然短路暂态过程的 特点	183
9.3.2 无阻尼绕组同步发电机突然 三相短路的物理分析	183
9.4 无阻尼绕组同步发电机三相短路 电流的计算	186

9.4.1 空载情况下突然三相短路 分析	186
9.4.2 负载情况下突然三相短路 分析	191
9.5 有阻尼绕组同步发电机三相短路 电流的计算	194
小结	200
习题	200

第10章 电力系统三相短路电流的实用计算 203

10.1 短路电流计算的基本原理和 方法	204
10.1.1 利用节点阻抗矩阵的计算 方法	204
10.1.2 利用节点导纳矩阵的计算 方法	205
10.1.3 转移阻抗和分布系数的 计算	206
10.2 短路电流交流分量初始值 计算	207
10.2.1 计算条件和假设	207
10.2.2 简单系统的 I'' 和 i_m 计算	209
10.2.3 复杂系统的计算	213
10.3 短路电流计算曲线及其应用	214
10.3.1 计算曲线的概念	215
10.3.2 计算曲线的制定	215
10.3.3 计算曲线的应用	216
小结	219
习题	219

第11章 对称分量法及电力系统元件的各序阻抗 221

11.1 对称分量法在不对称短路计算中的 应用	222
11.1.1 对称分量法	222
11.1.2 利用对称分量法计算短路点的 电压和电流	223
11.2 同步发电机的序电抗	226
11.2.1 同步发电机的负序 电抗	226



11.2.2 同步发电机的零序电抗	226
11.3 变压器的零序电抗及其等值电路	227
11.3.1 双绕组变压器	227
11.3.2 三绕组变压器	230
11.3.3 自耦变压器	231
11.4 输电线路的零序阻抗及等值电路	233
11.4.1 “导线-大地”回路的自阻抗和互阻抗	233
11.4.2 三相输电线路的零序阻抗	235
11.4.3 平行架设的双回路输电线路的零序阻抗及等值电路	236
11.4.4 架空地线对输电线路的零序阻抗及等值电路的影响	237
11.5 综合负荷的序阻抗	239
11.6 电力系统的序网络	240
11.6.1 正序网络	240
11.6.2 负序网络	240
11.6.3 零序网络	240
小结	243
习题	244

第12章 电力系统不对称故障的分析

和计算

12.1 简单不对称短路的分析	246
12.1.1 单相接地故障	246
12.1.2 两相短路接地	247
12.1.3 两相短路	250
12.1.4 正序等效定则的应用	251
12.1.5 非故障处电流和电压的计算	253
12.2 电压和电流对称分量经变压器后的相位变换	253
12.3 非全相断线的分析计算	256
12.3.1 单相断线	256
12.3.2 两相断开	258

12.4 简单不对称故障的计算通式	260
-------------------------	-----

12.4.1 各序网络的电压方程式	260
-------------------------	-----

12.4.2 不对称故障处各序电流方程	262
---------------------------	-----

小结	263
----------	-----

习题	264
----------	-----

第三篇 电力系统机电暂态过程分析

第13章 电力系统稳定性的基本

概念	267
----------	-----

13.1 概述	268
---------------	-----

13.2 功角及功角稳定	268
--------------------	-----

13.3 静态稳定的初步概念	270
----------------------	-----

13.4 暂态稳定的初步概念	271
----------------------	-----

13.5 负荷稳定的概念	273
--------------------	-----

小结	274
----------	-----

习题	275
----------	-----

第14章 同步发电机组的机电

模型	276
----------	-----

14.1 同步发电机组转子运动方程	277
-------------------------	-----

14.1.1 转子运动方程	277
---------------------	-----

14.1.2 用标幺值表示的转子运动方程	278
----------------------------	-----

14.1.3 惯性时间常数的意义	279
------------------------	-----

14.2 同步发电机的电磁功率特性	280
-------------------------	-----

14.2.1 简单电力系统中发电机的电磁功率特性	280
--------------------------------	-----

14.2.2 复杂电力系统中发电机电磁功率特性	284
-------------------------------	-----

14.2.3 电势变化过程及自动调节励磁系统对功率特性的影响	285
--------------------------------------	-----

14.3 原动机的机械转矩和机械功率	286
--------------------------	-----

小结	287
----------	-----

习题	287
----------	-----

第15章 电力系统静态稳定

15.1 静态稳定分析的基本方法	290
------------------------	-----

15.1.1	实用判据	290	16.2.3	发电机转子运动方程的 求解	317
15.1.2	应用小干扰法分析系统 静态稳定性的基本 原理	290	16.2.4	自动调节系统对暂态 稳定性的影响简介	321
15.1.3	简单电力系统的静态 稳定	292	16.3	复杂电力系统稳定的基本 概念	322
15.2	自动励磁调节系统对静态稳定的 影响	297	16.3.1	大扰动后各发电机转子 运动的特点	322
15.2.1	按电压偏差的比例调节 励磁	298	16.3.2	复杂电力系统暂态稳定 计算的原理	322
15.2.2	励磁调节器的改进	301	16.4	提高电力系统暂态稳定性的 措施	326
15.2.3	调节励磁对静态稳定影响 的综述	301	16.4.1	故障的快速切除和自动 重合闸装置的应用	326
15.3	多机电力系统静态稳定的简化 分析	302	16.4.2	提高发电机输出的电磁 功率	327
15.4	提高电力系统静态稳定性的 措施	303	16.4.3	减少原动机输出的机械 功率	329
小结		306	16.4.4	系统失去稳定后的 措施	330
习题		306	小结		332
第16章	电力系统的暂态稳定	308	习题		332
16.1	电力系统暂态稳定问题概述	309	附录	短路电流计算曲线	334
16.2	简单电力系统暂态稳定性	310	参考文献		338
16.2.1	物理过程	310			
16.2.2	等面积定则和极限 切除角	313			
16.2.3	发电机转子运动方程的 求解	317			
16.2.4	自动调节系统对暂态 稳定性的影响简介	321			
16.3	复杂电力系统稳定的基本 概念	322			
16.3.1	大扰动后各发电机转子 运动的特点	322			
16.3.2	复杂电力系统暂态稳定 计算的原理	322			
16.4	提高电力系统暂态稳定性的 措施	326			
16.4.1	故障的快速切除和自动 重合闸装置的应用	326			
16.4.2	提高发电机输出的电磁 功率	327			
16.4.3	减少原动机输出的机械 功率	329			
16.4.4	系统失去稳定后的 措施	330			
小结		332			
习题		332			

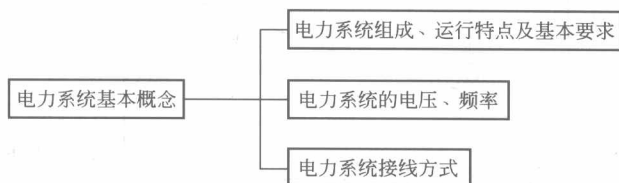
第一篇 电力系统稳态分析

第1章

电力系统的基本概念



本章知识架构



教学提示：电力系统是由大量发电机、输电线路、变配电设备及其控制设备组成的复杂系统。要对电力系统进行分析，首先必须掌握电力系统的基础知识，然后才能进行电力系统的基本计算和对电力系统的运行进行分析。

教学要求：通过本章的学习要求掌握电力系统的基本概念、电力系统运行的特点及对电力系统运行的要求，掌握电力系统中各种电气设备的额定电压确定的原则，了解电力系统的电气接线方式及其优缺点。

1.1 电力系统概述

1.1.1 电力系统的组成

发电机把机械能转化为电能，电能经变压器、变换器和电力线路输送并分配到用户，在用户那里经电动机、电炉和电灯等设备又将电能转化为机械能、热能和光能等。这些生产、变换、输送、分配、消费电能的发电机、变压器、变换器、电力线路及各种用电设备等联系在一起组成的统一整体就是电力系统，如图 1-1 所示。

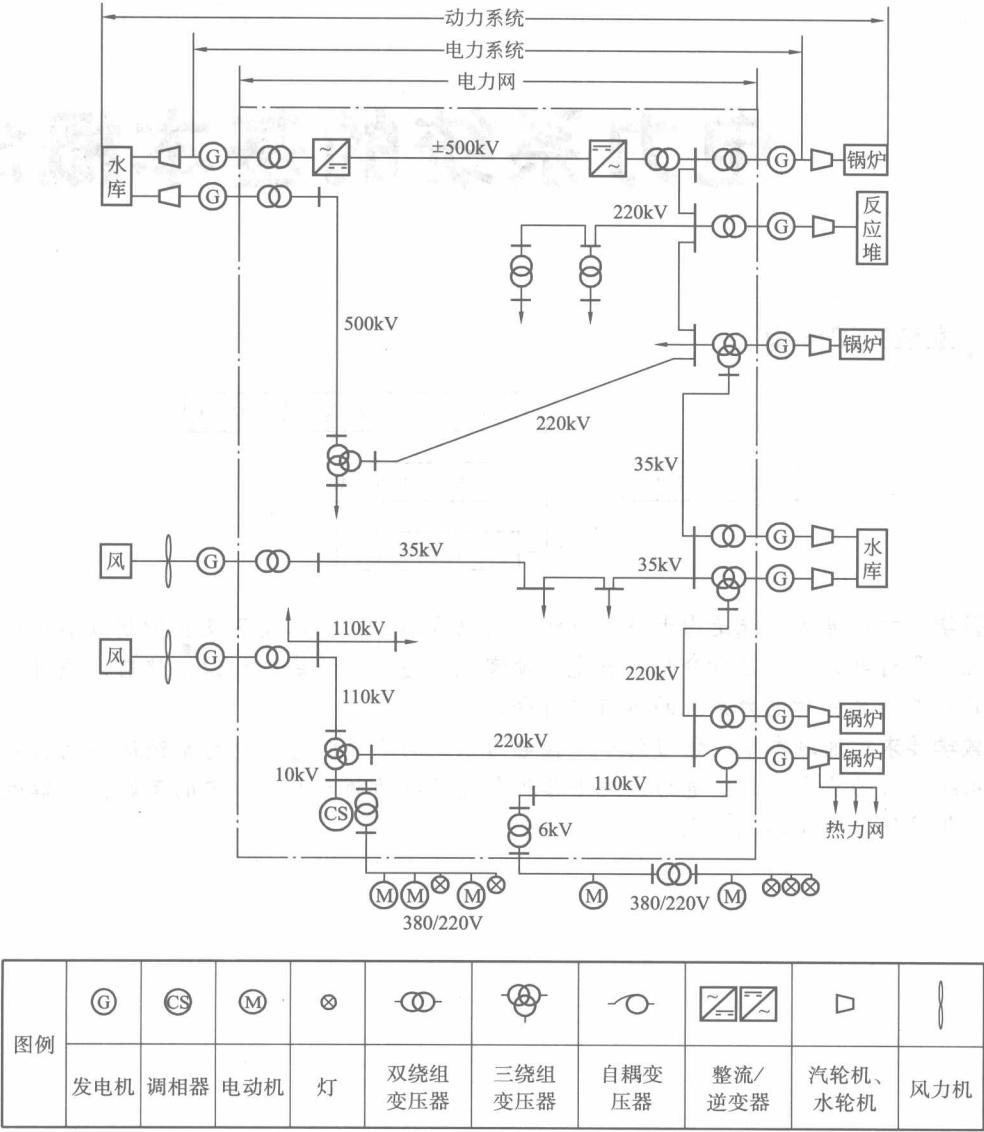


图 1-1 动力系统、电力系统和电力网示意



与“电力系统”一词相关的还有“电网”和“动力系统”。前者指电力系统内除发电机和用电设备外的部分；后者指电力系统和动力部分的总和。所谓动力部分，包括火力发电厂的锅炉、汽轮机、热力网和用热设备，水力发电厂的水库和水轮机，核电厂的反应堆等。因此电网是电力系统的一个组成部分，而电力系统又是动力系统的一个组成部分，三者的关系如图1-1所示。

1.1.2 电力系统运行特点

电力系统是由电能的生产、输送、分配和消费的各环节组成的一个整体。与其他工业系统相比较，电力系统的运行具有如下的明显特点：

(1) 电能不能大量存储。电能的生产、输送、分配和消费实际上是同时进行的，目前还不能大量储存，亦即发电厂在任何时刻发出的功率必须等于该时刻用电设备所需的功率及输送和分配环节中的功率损失之和。

(2) 电力系统的暂态过程非常短促。电力系统从一种运行状态到另一种运行状态的过渡极为迅速。

(3) 电力系统与国民经济的各部门及人们的日常生活有着极为密切的关系。供电的突然中断会带来严重的后果。

1.1.3 电力系统运行的基本要求

根据以上这些电力系统的特点，对其运行的基本要求是：

1. 保证安全可靠的供电

保证安全可靠地发、供电是对电力系统运行的首要要求。在运行过程中，供电的突然中断大多由事故引起，必须从各个方面采取措施以防止和减少事故的发生。例如，要严密监视设备的运行状态和认真维修设备以减少其事故，要不断提高运行人员的技术水平以防止人为事故。为了提高系统运行的安全性，还必须配备足够的有功功率电源和无功功率电源；完善电力系统的结构，提高电力系统抵抗干扰的能力，增强系统运行的稳定性；利用计算机对系统的运行进行安全监视和控制等。

整体提高电力系统的安全运行水平，为保证对用户的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，可能发生危害人身安全的事故；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生产大量减产，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，可以根据不同的具体情况分别采取适当的技术措施来满足用户对供电可靠性的要求。

2. 要有合乎要求的电能质量

电压和频率是电气设备设计和制造的基本技术参数，也是衡量电能质量的两个基本指

标。我国采用的额定频率为 50Hz，正常运行时允许的偏移为 $\pm 0.2 \sim \pm 0.5\text{Hz}$ 。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 ± 0.5 ，10kV 及以下电压等级为额定值的 $\pm 7\%$ 。为保证电压质量，对电压波形畸变也有限制。波形畸变是指各次谐波有效值平方和的平方根值对基波有效值的百分比，对于 6 ~ 10kV 供电电压不超过 4%，0.38kV 电压不超过 5%。电压和频率超出允许偏差时，不仅会造成生产废品和减产，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。

频率主要决定于系统中的有功功率平衡，系统发出的有功功率不足，频率就偏低。电压则主要取决于系统中的无功功率平衡，无功功率不足时，电压就偏低。因此，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功率平衡要求。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。

3. 要有良好的经济性

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。因此，提高电能生产的经济性具有十分重要的意义。

为了提高电力系统运行的经济性，必须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耗费，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；采取措施降低网损；实行经济调度等。

4. 尽可能减小对生态环境的有害影响

目前我国火力电厂装机占总装机容量的 70% 以上，在今后相当长一段时间内火力电厂发电用一次能源仍以煤炭为主，煤炭燃烧会产生大量的二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物、粉尘和废渣等，这些排放物都会对生态环境造成有害影响。因此，限制污染物的排放量，使电能生产符合环境保护标准，也是对电力系统运行的一项基本要求。

另外，大力发展可再生能源发电，减少污染物的排放量，也能减小对环境的影响。

1.2 电力系统的电压和频率

输送功率一定时，输电电压愈高，电流愈小；导线载流部分的截面积愈小，投资愈小；但电压愈高，对绝缘的要求也愈高，杆塔、变压器、断路器等投资也愈大。综合这些因素，对应一定的输送功率和输送距离有一最合理的线路电压，但从设备制造角度考虑，为保证生产的系列性，应规定标准的电压等级，即额定电压。相邻电压等级之比值不宜过小，一般应在 2 左右。我国规定的额定电压(均指线电压)如表 1-1 所示。

表 1-1 3kV 以上的额定电压

单位: 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



(续)

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
	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	—

在表 1-1 中,用电设备、发电机、变压器的额定电压之所以不一致以及它们与线路额定电压之间的关系,说明如下。

线路输送功率时,沿线的电压分布往往始端高于末端。例如,图 1-2 中沿线 ab 两点间的电压分布可以如直线 $U_a - U_b$ 所示。从而,图中用电设备 1~6 的端电压将各不相同。所谓线路的额定电压 U_N 实际就是线路的平均电压 $(U_a + U_b)/2$,而各用电设备的额定电压则取与线路额定电压相等,使所有用电设备能在接近它们的额定电压下运行。

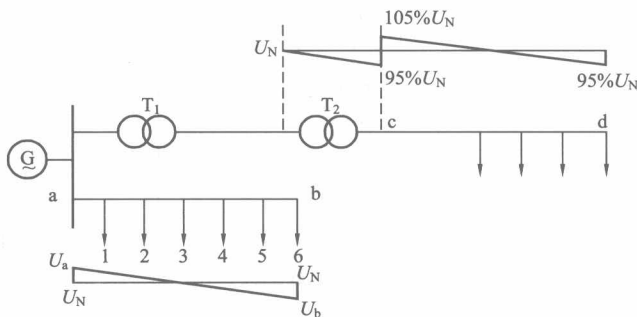


图 1-2 设备额定电压与网络额定电压之间关系

由于用电设备的允许电压偏移为额定电压的 $\pm 5\%$,而沿线路的电压降落一般为 10% ,这就要求线路始端电压为额定值的 105% ,以使其末端电压不低于额定值的 95% 。发电机往往接在线路始端,因此,发电机的额定电压为线路额定电压的 105% 。

变压器一次侧接电源,相当于用电设备;二次侧向负荷供电,又相当于发电机。因此变压器一次侧额定电压应等于用电设备的额定电压(直接和发电机相联的变压器一次侧额定电压应等于发电机额定电压),二次侧额定电压规定为空载变压器一次侧加额定电压时的二次侧电压。由于带负荷时变压器内部有一定的电压降落,所以二次侧额定电压应高于线路的额定电压。升压变压器二次侧额定电压比线路额定电压高 10% ;降压变压器二次侧额定电压则有比线路额定电压高 10% 和 5% 两种,我国以前多采用前一种,现在新建的工程均采用后一种。

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上设计制造有分接抽头。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为主抽头电压的百分之几。对同一电压级的变压器，升压变压器和降压变压器，即使分接头百分值相同，分接头的额定电压也不同。图 1-3 所示为用线电压表示的 220kV 电压级具有抽头 $(1 \pm 2 \times 2.5\%) U_N$ 的变压器的抽头额定电压。对于 +5% 抽头，升压变压器为 $242 \times (1 + 5\%) \text{ kV} = 254.1 \text{ kV}$ ，降压变压器则为 $220 \times (1 + 5\%) \text{ kV} = 231 \text{ kV}$ 。

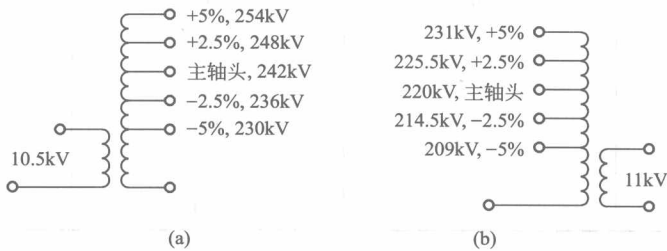


图 1-3 用线电压表示的抽头额定电压
(a) 升压变压器；(b) 降压变压器

各级电压线路输送能力(送电容量和送电距离)的大致范围如表 1-2 所示。

表 1-2 各级电压线路输送能力

额定电压/kV	送电容量/MW	送电距离/km
3	0.1 ~ 1	1 ~ 3
6	0.1 ~ 0.2	4 ~ 15
10	0.2 ~ 2	6 ~ 20
35	2 ~ 15	20 ~ 50
60	3.5 ~ 30	30 ~ 100
110	10 ~ 50	50 ~ 150
220	100 ~ 300	100 ~ 300
330	200 ~ 1000	200 ~ 600
500	1000 ~ 1500	300 ~ 1000
750	2000 ~ 2500	> 500

我国规定，电力系统的额定频率为 50Hz，也就是工业用电的标准频率，简称工频。

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非常重要的作用。电力系统的接线包括发电厂的主接线、变电所的主接线和电力网的接线。这里只对电力网的接线方式作简略的介绍。

电力网的接线方式通常按供电可靠性分为无备用网络和有备用网络两类。无备用接线的网络中，每一个负荷只能靠一条线路取得电能，单回路放射式、干线式和树状网络即属于这一类，如图 1-4 所示。这类接线的优点是简单、设备费用较少、运行方便；缺点是



供电的可靠性比较低,任一段线路发生故障或检修时,都要中断部分用户的供电。在干线式和树状网络中,当线路较长时,线路末端的电压往往偏低。

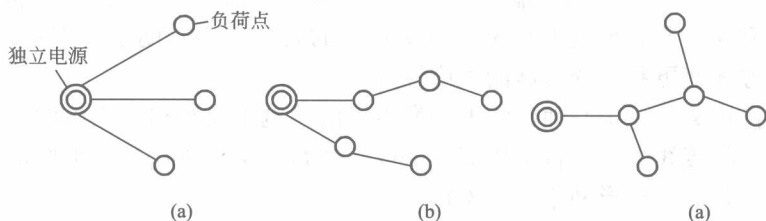


图 1-4 无备用网络

(a) 放射式网络; (b) 干线式网络; (c) 树状网络

每一个负荷都只能沿唯一的路径取得电能的网络,称为开式网络。

有备用的接线方式包括双回路放射式、干线式、链式、环形和两端供电式网络,如图 1-5 所示。这类接线同样具有简单和运行方便的优点,而且供电可靠性和电压质量都有明显的提高,其缺点是设备费用增加很多。

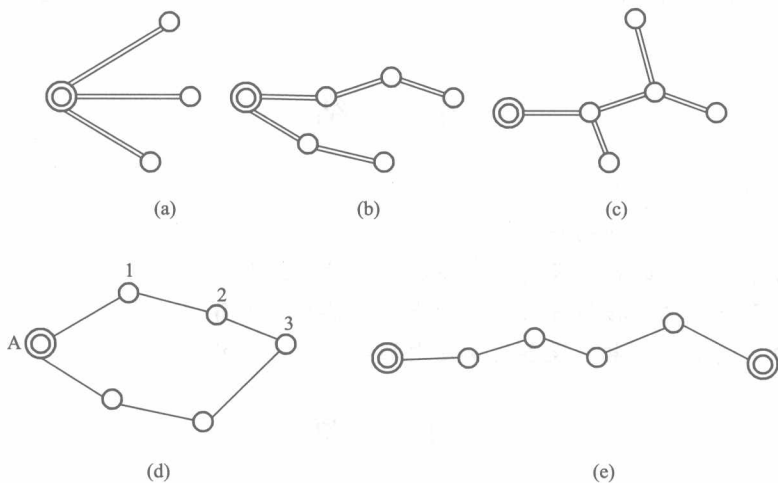


图 1-5 几种常见的有备用网络

(a) 双回路放射式网络; (b) 干线式网络; (c) 链式网络; (d) 环形网络; (e) 两端供电式网络

由一个或几个电源点和一个或几个负荷点通过线路连接而成的环形网络是一类最常见的有备用网络。一般说,环形网络的供电可靠性是令人满意的,也比较经济。其缺点是运行调度比较复杂。在单电源环网中,如图 1-5(d)所示,当线路 A1 发生故障而开环时,正常线段可能过负荷,负荷节点 1 的电压也明显降低。另一种是两端供电式网络,如图 1-5(e)所示,其供电可靠性相当于有两个电源的环形网络。环形网络和两端供电网络中,每一个负荷点至少通过两条线路从不同的方向取得电能,具有这种接线特点的网络又统称为闭式网络。

对于上述有备用网络,根据实际需要也可以在部分或全部线段采用双回路。

电力系统中各部分电力网担负着不同的职能,因此对其接线方式的要求也不一样。电力网按其职能可以分为输电网络和配电网。



输电网络的主要任务是,将大容量发电厂的电能可靠而经济地输送到负荷集中地区。输电网络通常由电力系统中电压等级最高的一级或两级电力线路组成。系统中的区域发电厂(经升压站)和枢纽变电所通过输电网络相互连接。对输电网络接线方式的要求主要是,应有足够的可靠性、要满足电力系统运行稳定性的要求、要有助于实现系统的经济调度、要具有对运行方式变更和系统发展的适应性等。

对用于连接远离负荷中心地区的大型发电厂的输电干线和向缺乏电源的负荷集中地区供电的输电干线的接线方式,常采用双回路或多回路。位于负荷中心地区的大型发电厂和枢纽变电所一般是通过环形网络互相连接。

配电网络的任务是分配电能。配电线路的额定电压一般为 $0.4 \sim 35\text{kV}$,有些负荷密度较大的大城市也采用 110kV ,以至 220kV 。配电网络的电源点是发电厂(或变电所)相应电压级的母线,负荷点则是低一级的变电所或者直接为用电设备。

配电网络采用哪一类接线方式,主要取决于负荷的性质。无备用接线方式只适用于向第三级负荷供电。对于第一级和第二级负荷占较大比重的用户,应由有备用网络供电。

实际电力系统的配电网络比较复杂,往往是由各种不同接线方式的网络组成的。在选择接线方式时,必须考虑的主要因素是,满足用户对供电可靠性和电压质量的要求,运行要灵活方便,要有好的经济指标等等。一般都要对多种可能的接线方案进行技术经济比较后才能确定。

小 结

本章中阐明了以下问题:

- (1) 电力系统、电力网的基本概念。
- (2) 电力系统运行的特点及对电力系统运行的三点要求。
- (3) 电力系统的电气接线方式及优缺点,有备用、无备用接线方式。
- (4) 电力系统中各种电气设备的额定电压等级及确定的原则。

习 题

1-1 什么是电力系统、电力网及动力系统?电力系统为什么要采用高压输电?

1-2 为什么要规定额定电压?电力线、发电机、变压器和用电设备的额定电压是如何确定的?

1-3 图1-6中已标明各级电网的电压等级。试标出图中发电机和电动机的额定电压及变压器的额定变比。

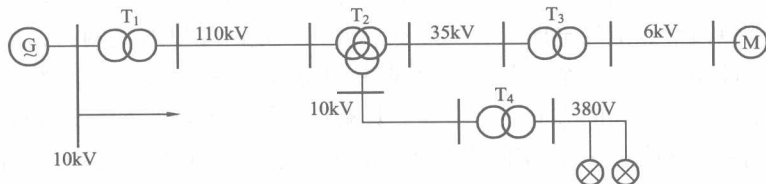


图1-6 习题1-3图