



“十一五”规划教材

# 电气工程基础

(第2版)

王锡凡 主编



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



“十一五”规划教材

# 电气工程基础

(第2版)

王锡凡 主编

王锡凡 李建华 王秀丽 张伏生  
索南加乐 盛寿麟 施围



西安交通大学出版社  
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



## 内 容 提 要

本书全面阐述电力工业的基本知识,包括:电力系统的构成,电力系统稳态运行及故障分析计算,电力设备及其接线方式和选择的原则,远距离输电,电力系统继电保护和过电压保护,电力系统自动化,电力市场等。本书力求使读者能基本掌握和运用这些理论和方法,在各章均附有数字例题、思考题和习题。书中还尽力反映电力工业的新技术和发展趋势,并对本书难以容纳的专门问题指出了有关参考文献,以利进一步深入学习。

本书可作为高等学校电气工程学院本科学生的教材,并可供电力工业、电力设备制造业有关科研、设计与运行、制造人员参考,或作为培训教材。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

电气工程基础/王锡凡主编. --2版. --西安:西安交通大学出版社,  
2009.10  
ISBN 978-7-5605-3166-3

I. 电… II. 王… III. 电气工程-高等学校-教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 174597 号

---

书 名 电气工程基础(第2版)  
主 编 王锡凡  
责任编辑 任振国

---

出版发行 西安交通大学出版社  
(西安市兴庆南路10号 邮政编码 710049)

网 址 <http://www.xjtupress.com>  
电 话 (029)82668357 82667874(发行部)  
(029)82668315 82669096(总编办)

传 真 (029)82668280  
印 刷 陕西宝石兰印务有限责任公司

---

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 25.5 字数 618千字  
版次印次 2009年10月第2版 2009年10月第1次印刷  
书 号 ISBN 978-7-5605-3166-3/TM·79  
定 价 36.00元

---

读者购书、书店添货,如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82664954

读者信箱:jdlgy@yahoo.cn

版权所有 侵权必究

## 第 2 版前言

《电气工程基础》一书出版已十多年了,这期间电力工业无论在技术上还是体制上都发生了巨大的变化。由于环境保护和能源短缺问题日益受到关注,替代能源和可再生能源发电成为电力工业发展的重要方向。从上世纪 90 年代开始的电力市场化改革使电力系统运行出现了深刻的变化。这一版《电气工程基础》在编写时我们尽可能考虑了近十年来电力工业发展的趋势和新理论、新技术,相信能使读者对现代电气工程有一个较全面的理解。

本书是一项集体教学研究成果,共有七位教授参与本书的编写工作:王锡凡教授执笔第 1 章和第 5 章、李建华教授执笔第 2 章和第 3 章、张伏生教授执笔第 4 章、王秀丽教授执笔第 6 章和第 10 章、索南加乐教授执笔第 7 章、盛寿麟教授执笔第 8 章、施围教授执笔第 9 章。在编写过程中得到西安交通大学电气学院的领导和同仁的大力支持,对提高本书的水平有很大帮助。在此也希望读者能及时指出书中的谬误和提出改进意见,以期本书不断得到完善。

编者

2009 年 2 月 24 日

# 目 录

## 第 2 版前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	(1)
1.1 电力工业的特点及构成 .....	(1)
1.2 我国的电力工业 .....	(5)
1.3 电力系统的负荷 .....	(6)
1.3.1 电力负荷的组成 .....	(6)
1.3.2 电力负荷的特性 .....	(7)
1.3.3 电力负荷曲线 .....	(8)
1.4 各类发电厂的生产过程 .....	(10)
1.4.1 火电厂 .....	(10)
1.4.2 水电厂 .....	(12)
1.4.3 核电厂 .....	(14)
1.4.4 抽水蓄能电厂 .....	(15)
1.4.5 风力发电厂 .....	(16)
1.5 电力线路的结构 .....	(17)
1.5.1 导线和避雷线 .....	(17)
1.5.2 杆塔 .....	(18)
1.5.3 绝缘子和金具 .....	(19)
1.5.4 电缆 .....	(20)
小结 .....	(21)
思考题及习题 .....	(21)
<b>第 2 章 电力系统正常运行时的分析和计算</b> .....	(22)
2.1 概述 .....	(22)
2.2 三相输电线路 .....	(22)
2.2.1 架空线路的电阻 .....	(23)
2.2.2 架空线路的电抗 .....	(23)
2.2.3 输电线路的电纳 .....	(26)
2.2.4 输电线路的电导 .....	(28)
2.2.5 输电线路的稳态方程和等值电路 .....	(28)
2.3 电力变压器 .....	(31)
2.3.1 双绕组变压器的等值电路 .....	(31)
2.3.2 三绕阻变压器的等值电路 .....	(33)

2.4	多电压级电力系统	(36)
2.4.1	多电压级电力网的等值电路	(36)
2.4.2	标么值表示的多电压级电力网的等值电路	(37)
2.5	简单电力系统的运行分析	(37)
2.5.1	电力网的电压降和功率损耗	(38)
2.5.2	辐射形电力网的潮流计算	(40)
2.5.3	电力系统中的电能损耗计算	(43)
2.6	复杂电力系统潮流计算	(45)
2.6.1	节点电压方程与导纳矩阵和阻抗矩阵	(45)
2.6.2	具有非标准变比变压器的等值电路	(48)
2.6.3	电力系统的功率方程	(49)
2.6.4	牛顿-拉夫逊潮流计算方法	(50)
2.7	无功功率平衡及无功功率与电压的关系	(55)
2.7.1	无功功率平衡	(55)
2.7.2	无功功率与电压水平的关系	(57)
2.8	电力系统的电压调整	(59)
2.8.1	电压调整的原理图	(59)
2.8.2	利用发电机进行调压	(60)
2.8.3	改变变压器变比调压	(60)
2.8.4	并联无功补偿设备调压	(62)
2.8.5	线路串联电容补偿装置调压	(65)
2.9	电力系统的有功功率和频率调整	(66)
2.9.1	有功功率平衡和频率的关系	(67)
2.9.2	有功负荷的变动规律	(67)
2.9.3	电力系统有功功率电源备用	(67)
2.9.4	电力系统的频率调整	(68)
	小结	(70)
	思考题及习题	(71)
<b>第3章</b>	<b>电力系统的短路电流计算</b>	<b>(75)</b>
3.1	概述	(75)
3.2	无限大功率电源供电系统的三相短路电流	(76)
3.2.1	三相短路的暂态过程	(76)
3.2.2	短路冲击电流和最大有效值电流	(77)
3.3	同步发电机突然三相短路的物理过程及短路电流的分析	(79)
3.3.1	同步发电机在空载情况下突然三相短路的物理过程	(80)
3.3.2	无阻尼绕组同步发电机空载时的突然三相短路电流	(82)
3.3.3	无阻尼绕组同步发电机负载时的突然三相短路电流	(84)
3.3.4	有阻尼绕组同步发电机的突然三相短路电流	(86)
3.4	电力系统三相短路的实用计算	(88)

3.4.1	电抗标么值的近似计算	(89)
3.4.2	短路电流交流分量起始值的计算	(90)
3.5	电力系统不对称短路的分析和计算	(95)
3.5.1	对称分量法	(95)
3.5.2	电力系统各元件的序阻抗	(96)
3.5.3	电力系统的各序等值网络	(99)
3.5.4	电力系统不对称短路故障处电压、电流的分析及计算	(101)
3.5.5	不对称短路非故障处电压、电流的计算	(107)
3.6	计算机计算复杂系统短路电流原理及框图	(109)
3.6.1	三相短路电流的计算机算法	(109)
3.6.2	不对称短路电流的计算机算法	(110)
	小结	(112)
	思考题及习题	(113)
<b>第4章</b>	<b>电气设备和电气主系统</b>	<b>(117)</b>
4.1	概述	(117)
4.2	高压断路器	(117)
4.2.1	高压断路器中电弧的产生与熄灭	(117)
4.2.2	弧隙电压恢复过程	(119)
4.2.3	断路器开断短路电流时弧隙电压恢复过程分析	(120)
4.2.4	不同短路形式对断路器开断能力的影响	(122)
4.2.5	熄灭电弧及降低断口恢复电压上升速度的措施	(124)
4.2.6	高压断路器的基本类型及操作机构	(126)
4.3	隔离开关	(128)
4.4	高压熔断器	(129)
4.5	电流互感器	(130)
4.5.1	电磁式电流互感器的特点	(130)
4.5.2	电流互感器的误差	(130)
4.5.3	电流互感器的准确级和额定容量	(132)
4.5.4	电流互感器在使用中应注意的事项	(134)
4.5.5	电流互感器的接线	(135)
4.5.6	电流互感器在主接线中的配置	(136)
4.6	电压互感器	(136)
4.6.1	电磁式电压互感器	(136)
4.6.2	电容式电压互感器	(139)
4.6.3	电压互感器的接线	(140)
4.6.4	电压互感器接线应注意的事项	(141)
4.6.5	电压互感器在主接线中的配置	(141)
4.7	电气主接线	(142)
4.7.1	对电气主接线的基本要求	(142)

4.7.2	电气主接线的基本接线形式 .....	(142)
4.7.3	各类发电厂和变电站电气主接线的特点 .....	(149)
4.8	发电厂变电站限制短路电流的措施 .....	(150)
4.8.1	选择适当的主接线形式和运行方式 .....	(150)
4.8.2	加装限流电抗器 .....	(151)
4.8.3	采用低压分裂绕组变压器 .....	(154)
4.9	配电装置 .....	(155)
4.9.1	配电装置的分类和基本要求 .....	(155)
4.9.2	配电装置的安全净距 .....	(155)
4.9.3	屋内配电装置 .....	(156)
4.9.4	屋外配电装置 .....	(158)
4.9.5	成套配电装置 .....	(159)
小结	.....	(163)
思考题及习题	.....	(164)
<b>第5章</b>	<b>电网设计及电气设备选择 .....</b>	<b>(167)</b>
5.1	概述 .....	(167)
5.2	电网设计 .....	(167)
5.2.1	电网设计应考虑的因素 .....	(167)
5.2.2	电网接线的基本类型 .....	(168)
5.2.3	电网方案的技术经济比较 .....	(172)
5.3	导线和电缆的选择 .....	(173)
5.3.1	按经济电流密度选择导线截面 .....	(173)
5.3.2	按允许电压损耗选择导线截面 .....	(174)
5.3.3	按允许载流量、电晕和机械强度校验导线截面 .....	(177)
5.4	变压器的选择 .....	(178)
5.4.1	变压器的负荷能力 .....	(179)
5.4.2	变压器台数及容量的选择 .....	(180)
5.4.3	变压器类型的选择 .....	(181)
5.5	电气设备选择的基本原则 .....	(181)
5.5.1	按正常工作条件选择电气设备 .....	(182)
5.5.2	按短路情况校验 .....	(183)
5.6	电气设备的选择 .....	(186)
5.6.1	母线的选择 .....	(186)
5.6.2	断路器及隔离开关的选择 .....	(188)
5.6.3	高压熔断器的选择 .....	(190)
5.7	经济评价方法 .....	(190)
5.7.1	资金的时间价值 .....	(191)
5.7.2	经济评价方法 .....	(194)
小结	.....	(197)



思考题及习题 .....	(198)
<b>第 6 章 远距离大容量输电 .....</b>	<b>(199)</b>
6.1 概述 .....	(199)
6.2 远距离输电线路的功率传输特性 .....	(200)
6.2.1 远距离输电线路的基本方程 .....	(200)
6.2.2 线路的自然功率与电压分布 .....	(201)
6.2.3 线路传输功率极限 .....	(202)
6.3 电力系统静态稳定 .....	(204)
6.3.1 简单电力系统的静稳极限 .....	(204)
6.3.2 提高电力系统静态稳定性的措施 .....	(208)
6.4 电力系统暂态稳定 .....	(210)
6.4.1 简单系统的暂态稳定性 .....	(210)
6.4.2 等面积定则 .....	(213)
6.4.3 发电机转子运动方程的求解 .....	(214)
6.4.4 提高暂态稳定性的措施 .....	(219)
6.5 直流输电 .....	(221)
6.5.1 直流输电系统的工作原理 .....	(222)
6.5.2 直流输电系统的基本控制方式 .....	(228)
6.5.3 直流输电系统的谐波、滤波和补偿问题 .....	(229)
6.5.4 直流输电系统的接线方式 .....	(230)
6.6 灵活交流输电 .....	(231)
6.6.1 灵活交流输电的发展及现状 .....	(231)
6.6.2 几种主要的 FACTS 装置 .....	(232)
6.6.3 FACTS 装置在电力系统中的应用 .....	(238)
小结 .....	(239)
思考题及习题 .....	(239)
<b>第 7 章 继电保护 .....</b>	<b>(241)</b>
7.1 概述 .....	(241)
7.1.1 继电保护的任務 .....	(241)
7.1.2 对继电保护装置的基本要求 .....	(241)
7.1.3 继电保护的基本原理 .....	(243)
7.1.4 电力系统继电保护的工作配合 .....	(244)
7.1.5 继电保护技术发展概述 .....	(245)
7.2 电网电流保护 .....	(245)
7.2.1 过电流继电器的工作原理 .....	(245)
7.2.2 电流速断保护 .....	(246)
7.2.3 限时电流速断保护 .....	(249)
7.2.4 定时限过电流保护 .....	(251)

7.2.5	电流保护的接线方式 .....	(254)
7.2.6	电流保护的应用及评价 .....	(256)
7.3	电网的距离保护 .....	(256)
7.3.1	距离保护的基本原理 .....	(257)
7.3.2	阻抗测量及动作特性 .....	(258)
7.3.3	距离保护的整定计算 .....	(258)
7.3.4	距离保护的应用及评价 .....	(262)
7.4	输电线路纵联保护 .....	(262)
7.4.1	输电线路纵联保护两侧信息的交换 .....	(263)
7.4.2	高频纵联方向保护 .....	(265)
7.4.3	纵联电流差动保护 .....	(267)
7.5	电力变压器的继电保护 .....	(269)
7.5.1	变压器纵联差动保护 .....	(270)
7.5.2	励磁涌流及其识别方法 .....	(275)
7.5.3	变压器保护的配置 .....	(277)
	小结 .....	(278)
	思考题及习题 .....	(279)
<b>第 8 章</b>	<b>电力系统自动化 .....</b>	<b>(282)</b>
8.1	概述 .....	(282)
8.2	电网调度自动化 .....	(284)
8.2.1	电网调度自动化的发展历程 .....	(284)
8.2.2	电力系统的分层控制 .....	(285)
8.2.3	电网调度自动化系统的基本组成部分 .....	(286)
8.2.4	远动终端 .....	(286)
8.2.5	数据传输 .....	(291)
8.2.6	电网调度自动化系统主站 .....	(300)
8.3	变电站综合自动化 .....	(308)
8.3.1	变电站综合自动化系统的基本功能 .....	(308)
8.3.2	变电站综合自动化系统的结构形式 .....	(309)
8.3.3	变电站综合自动化系统的通信 .....	(312)
8.3.4	变电站综合自动化系统的特点 .....	(313)
8.4	配电网自动化 .....	(314)
8.4.1	配电管理系统的主要组成部分 .....	(314)
8.4.2	配电管理系统的结构和通信 .....	(315)
8.4.3	馈线自动化 .....	(318)
8.4.4	配电网图资地理信息系统 .....	(323)
8.4.5	需求侧管理 .....	(325)
8.4.6	远程自动抄表系统 .....	(326)
	小结 .....	(327)

思考题及习题 .....	(327)
<b>第 9 章 电力系统过电压防护及绝缘配合 .....</b>	<b>(329)</b>
9.1 概述 .....	(329)
9.2 气体放电的物理过程 .....	(329)
9.2.1 气体放电的机理 .....	(330)
9.2.2 自持放电 .....	(332)
9.2.3 不均匀电场中气体放电 .....	(333)
9.2.4 空气间隙的击穿特性 .....	(336)
9.3 雷电过电压的产生与防护 .....	(337)
9.3.1 雷电特性 .....	(337)
9.3.2 线路感应雷过电压和直击雷过电压 .....	(341)
9.3.3 雷电过电压的防护 .....	(342)
9.4 工频过电压的产生与防护 .....	(345)
9.4.1 工频过电压产生的机理 .....	(345)
9.4.2 工频过电压的防护措施 .....	(349)
9.5 操作过电压的产生与防护 .....	(349)
9.5.1 操作过电压产生的机理 .....	(349)
9.5.2 操作过电压的抑制措施 .....	(351)
9.6 过电压的数值计算 .....	(352)
9.6.1 集中参数元件的电磁暂态过程等值计算电路 .....	(353)
9.6.2 分布参数元件的电磁暂态过程等值计算电路 .....	(356)
9.6.3 电磁暂态过程求解算法 .....	(359)
9.7 绝缘配合 .....	(361)
9.7.1 配合原则 .....	(361)
9.7.2 绝缘配合的方法 .....	(362)
9.7.3 电气设备与输电线路试验电压的确定 .....	(363)
小结 .....	(365)
思考题及习题 .....	(366)
<b>第 10 章 电力市场 .....</b>	<b>(367)</b>
10.1 概述 .....	(367)
10.1.1 电力市场化进程 .....	(367)
10.1.2 电力市场结构的组成 .....	(368)
10.2 微观经济学基础 .....	(370)
10.2.1 需求、供给和市场价格 .....	(370)
10.2.2 市场类型与价格确定 .....	(372)
10.2.3 成本与市场效率 .....	(375)
10.3 发电市场的竞价 .....	(376)
10.3.1 实时电价的基本概念 .....	(376)

10.3.2	分时竞价模式 .....	(377)
10.3.3	分段竞价模式 .....	(380)
10.4	输电费用 .....	(381)
10.4.1	输电费用的构成 .....	(382)
10.4.2	输电费用的简单分摊方法 .....	(382)
10.4.3	输电费用分摊的潮流追踪方法 .....	(385)
10.5	辅助服务 .....	(386)
10.5.1	备用市场 .....	(386)
10.5.2	无功市场 .....	(388)
10.5.3	输电阻塞管理 .....	(391)
	小结 .....	(394)
	思考题及习题 .....	(394)
	参考文献 .....	(395)

# 第 1 章 绪 论

电力工业是国民经济的一个重要组成部分,其使命包括发电、输电及向用户配电(售电)的全部过程。完成这些任务的实体是电力系统。电力系统相应地由发电厂、输电系统、配电系统及电力用户组成。本章主要阐述电力工业的特点及电力系统的构成。

## 1.1 电力工业的特点及构成

电力工业是一个重要的基础工业。由于电能易于控制且便于转变成其它形式的能量(光能、热能、机械能、化学能等),因此,它在国民经济各部门及日常生活中都得到了广泛的应用。很难想象现代生产和现代文明能离开电能的应用。电力工业与各产业部门及人民生活有着密切的关系,它的发展对整个国民经济都有直接的影响。

电力工业的另一特点在于其产品——电能——难以大量储存,因此其生产、传输和消费是一个连续的过程,即在电力系统中生产的电能时时刻刻都应与消耗的电能相平衡。

此外,由于电能是以电磁波的速度传播,因此电力系统中任何设备的投入或切除都会立刻影响其它设备的运行状态。

最后,电力系统是投资密集、技术密集的产业,同时也是消耗一次能源最大的产业。

如前所述,电力系统是电力工业的物理实体,由发电厂、输电系统、配电系统及负荷四部分组成,图 1-1 表示了一个简单电力系统的基本结构。

发电厂把一次能源转化为电能。这里的一次能源包括矿物燃料(煤、石油、天然气等),核燃料(铀、钍等)以及可再生能源,如水能、风能、太阳能、海洋能等。目前发电厂的规模已相当可观,我国已有多个发电厂的装机容量超过 200 万 kW,三峡水电站的装机容量达到 1820 万 kW。关于各种类型的发电厂的介绍详见 1.3 节。

发电厂的位置一般远离用电负荷中心,距离可达几百 km、甚至上千 km。这就需要建设高压输电线路以完成远距离大容量的输电任务。目前世界上已投入运行的输电线路电压在 110kV 到 750kV 之间,1000kV 以上的输电系统尚处于试验研究阶段。

配电系统将电能分配给用户。一般分为高压配电系统和低压配电系统两级,有些大城市已采用 110kV 和 220kV 配电系统。低压配电网的电压是 380/220V 的三相四线制。

我国采用的电压等级和相应的输电范围如表 1-1 所示。当输送距离超过 500km 时可以考虑采用  $\pm 500$ kV 或  $\pm 800$ kV 直流输电系统。

各电压等级中的电器设备的额定电压如表 1-2 所示。由表 1-2 可以看出,对同一电压等级而言,不同的电气设备额定电压不一定相同。作为电力负荷的用电设备的额定电压和电网的额定电压相同,如表中第一列所示。发电机作为电源一般将额定电压提高 5%,以补偿输电过程的电压损耗,如表中第二列所示。变压器的一次绕组作为受电(用电)设备,应和电网的额定电压一致;但是当其直接与发电机相连时,则应与发电机的额定电压一致,如表中第三列

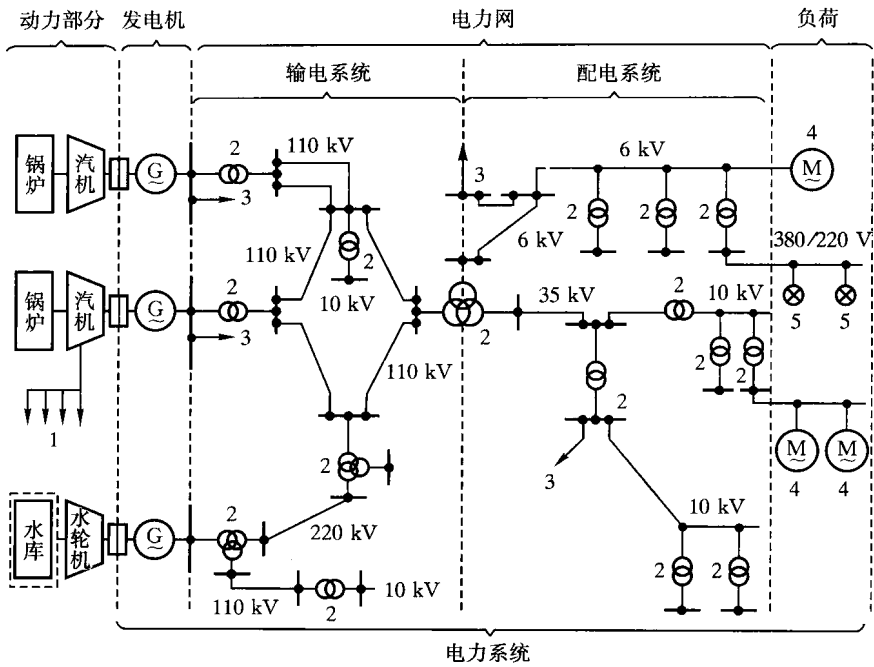


图 1-1 电力系统的构成

1—热力网;2—变压器;3—负荷;4—电动机;5—电灯

表 1-1 我国的电压等级及输电范围

电压等级/kV	输送容量/MW	输送距离/km
3	0.1~1	1~3
6	0.1~1.2	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	100~500	100~300
330	200~800	200~600
500	1000~1500	150~850
750	2000~2500	500 以上

所示。变压器的二次绕组作为电源,其额定电压应提高 5% 或 10%,视其送电距离而定,如表中第四列所示。

负荷是用户或用电设备的总称,因此包括照明设备、牵引设备(如各种电动机)、电热装置



等等。在电力系统的术语中,负荷也经常用来表示用户的用电功率。

以上电力系统的结构显示了电能生产、输送、分配与应用各环节及其相互关系,称为一次系统。此外,为了保证电力系统正常运行还必须设有相应的测量、监视、控制以及保护系统,这些统称为二次系统。只有当一次系统和二次系统合理规划设计,可靠运行维护时,才能保证电力系统在技术上达到高指标,经济上达到高效益。

表 1-2 电气设备的额定电压

用电设备的额定 线电压/kV	交流发电机额定 线电压/kV	变压器额定线电压/kV	
		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
—	15.75	15.75	—
35		35	38.5
(60)		(60)	(66)
110		110	121
(154)		(154)	(169)
220		220	242
330		330	363
500		500	525
750		750	825

如何衡量电力系统的技术水平和经济效益呢?这涉及到对电力系统规划设计和运行维护的基本要求,概括起来有以下几点。

### 1. 对用户连续供电

这一要求也称为可靠性要求。中断供电将造成生产停顿、生活混乱,甚至可能危及人身和设备安全,给国民经济造成很大损失。因此,电力部门的首要任务就是满足用户对连续供电的要求。

为此,电力系统应不断建设,使系统有足够的发、输、配电设备,以满足不断增长的用电需要。在这个意义上,电力工业作为一个基础工业应该优先发展。

即使有足够的发、输、配电容量,由于规划设计的失误、种种设备缺陷、运行过失以及天灾等,也可能导致对用户供电的中断。因此,必须精心规划设计,认真维修设备,正确操作运行,才能减少事故,提高供电的可靠性。

我国目前还没有制定出具体的可靠性指标。北美(美国和加拿大)规定供电可靠性指标为:对用户而言,10年间的停电不应多于一。显然,我国目前还达不到这样的水平。有研究人员曾对我国提出每年停电不多于两天的指标。随着我国电力工业逐步发展和走向市场化,

可靠性指标也应尽早制定。

## 2. 保证电能质量

电能质量指标包括频率、电压及波形。用电设备应在额定电压下运行以保证合理的技术经济指标,电压过高、过低都会影响用电设备的正常工作。一般规定电压偏移不应超过额定电压的 $\pm 5\%$ 。偏移过大可能造成设备损坏,甚至引起人身事故。

交流电能的频率偏离 50Hz 也会影响设备的技术经济性能。例如,频率降低会引起电动机转速下降,频率升高则转速也升高。这些对转速敏感的水泵、风机的正常工作有很大影响。对转速有严格要求的部门,如纺织工业,频率波动将直接影响其产品质量。电力系统对频率的偏移规定在 $\pm 0.2\text{Hz}$ 以内。

电能质量的另一指标是交流电的波形。标准交流电的波形应是正弦波。但是由于电力系统中有谐波源(如各种整流设备)的存在,使电压或电流中都含有一些谐波分量。这些谐波分量不仅使系统的效率下降,也会对计算机、自动化设备等产生较大干扰。因此,把谐波分量降低到容许的范围内是保证电能质量的一项重要任务。我国对公用电网谐波电压的限值如表 1-3 所示<sup>[1]</sup>。

表 1-3 公用电网谐波电压限值

电网电压/kV	电压总谐波畸变率	各次谐波电压含有率	
		奇次	偶次
0.38	5.0	4.0	2.0
6	4.0	3.2	1.6
10			
35	3.0	2.4	1.2
66			
110	2.0	1.6	0.8

表中电压总谐波畸变率的定义为

$$\text{电压总谐波畸变率} = \frac{U_{\text{H}}}{U_1} \times 100\% \quad (1-1)$$

其中: $U_1$  为基波电压的方均根值; $U_{\text{H}}$  为谐波电压含量,即

$$U_{\text{H}} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (U_n)^2} \quad (1-2)$$

式中: $U_n$  为第  $n$  次谐波电压的方均根值。

## 3. 经济性

节约能源是当今世界上普遍关注的问题。电能生产规模很大,消耗大量一次能源。因此,降低生产每千瓦时电能所消耗的能源和降低各环节的损耗都有重要意义。为此,应尽量采用高效节能的发电设备,合理地发展电力网以降低电能输配过程中的损耗。此外,合理分配各发电厂之间的电力负荷,充分发挥经济性能高的发电厂的作用,并注意水电与火电之间的调配也都是保证电力系统经济运行的重要措施。

#### 4. 防止环境污染

随着工业发展,人类生存环境正在遭受破坏。环境保护已成为当前全球性战略课题。燃煤的火电厂约占我国总发电装机容量的70%,如不采取措施,燃烧排到大气中的硫和氮的氧化物都会成为严重的污染源。为此,除应在火电厂采用除尘器、脱硫塔之外,在规划建设火电厂时还应注意厂址的选择、烟囱的高度以及燃料的含硫量等。此外,我国正在大力发展可再生能源发电,如水电、风电、太阳能发电等,力争不断减少火电机组容量的比重。

为了提高电力工业的社会效益,从上世纪80年代开始在世界范围内进行了电力工业的重组和电力市场化的进程。改革的主要目标是打破电力工业传统的垄断运营模式,厂网分开,开放电网,实现竞争,进而降低电能成本,提高服务质量,促进电力工业健康发展。电力工业改革终将会对电力系统的规划、运行以及分析方法带来深刻的影响(详见第10章)。

## 1.2 我国的电力工业

我国电力工业的历史可以追溯到1882年,那年在上海建立了第一个发电厂。到1949年全国的发电设备总容量仅达到185万kW,年发电量约43亿kWh。新中国建立后,特别是改革开放以来,我国电力工业才得到迅速的发展。

到2007年底,全国发电设备容量已达7.13亿kW,当年增加装机容量同比增长14.36%。发电量达3.26万亿kWh,跃居世界第二位。我国2007年装机容量的构成情况可参看图1-2。由图可以看出,当前我国的火电比重占77.81%,给环境保护和一次能源问题带来很大的挑战。因此,我国对于核电及可再生能源发电的发展给予极大的关注,由图1-3可以看出,2007年这两类发电装机容量增长明显加快。

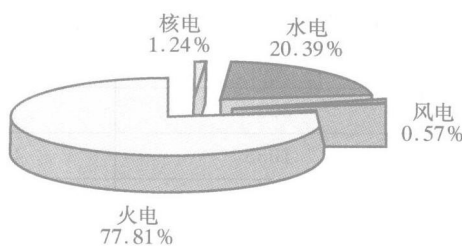


图 1-2 2007 年我国发电设备容量的构成情况

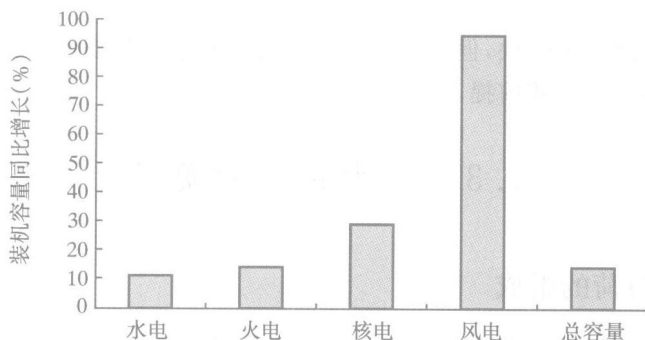


图 1-3 2007 年我国发电设备容量同比增长的百分比