



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高电压工程基础

施围 邱毓昌 张乔根 编著

第2版

免费
电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高电压工程基础

第2版

施 围 邱毓昌 张乔根 编著



机械工业出版社

本书介绍与高电压有关的电介质——气体、液体、固体的放电过程、发展机理及绝缘特性，分析影响这些特性的因素；交流、直流高电压和冲击高电压的产生方法、原理、基本装置以及它们的测量手段，相关绝缘的试验技术；电力系统过电压产生的物理过程及其防护措施和电力系统绝缘配合的基本概念；同时反映近年来高电压领域的新技术，第2版中除对原来内容进行完善和修改外，还增加了“直流系统过电压”和“电力系统电磁环境”两章，以适应电力工业发展的需要。本书作者具有多年的教学经验，精选内容，删繁就简，既体现加强基础，又使其具有适用性，并兼顾不同水平读者的要求。

本书除可作为电力系统自动化及电气类研究生和本科生专业课教材外，也可供大专、成人自学和电力、电工部门职工培训，以及电力管理工作者和有关技术人员参考。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本教材的教师索取，电子邮箱：yu57sh@163.com。

图书在版编目（CIP）数据

高电压工程基础/施围，邱毓昌，张乔根编著. —2版. —北京：机械工业出版社，2014.7

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-111-46362-7

I. ①高… II. ①施…②邱…③张… III. ①高电压—高等学校—教材 IV. ①TM8

中国版本图书馆CIP数据核字（2014）第066474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：于苏华 责任编辑：于苏华

版式设计：霍永明 责任校对：陈立辉

封面设计：张静 责任印制：乔宇

北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）

2014年7月第2版第1次印刷

184mm×260mm·18.25印张·440千字

标准书号：ISBN 978-7-111-46362-7

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

网络服务

社服务中心：(010)88361066 教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售一部：(010)68326294 机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销售二部：(010)88379649 机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

第2版前言

近10年来,我国电力事业发展突飞猛进,建成了分布在西北地区的750kV强大电网,两条特高压交流1000kV输电线路、多条 ± 800 kV直流系统相继投入运行,高电压技术获得巨大的发展。为了适应技术发展的需要,国家、行业的相关规程也发生了许多变化。虽然规程涉及非常多的领域与行业,与它“同步”几乎是不可能的,本书力图涵盖这些变化。

本书第1版自2006年出版以来,已印刷了8次,由于新技术“层出不穷”,书中有些内容显得“陈旧”,因此迫切需要进行补充、完善和修订。为了适应我国直流输电技术的发展,在修订时本书第2版增加了“直流系统过电压”一章。同时,基于社会对电磁环境的关注与重视,特地增加了“电力系统的电磁环境”一章,介绍各种电磁环境产生的机理、技术指标、可能产生的危害,以及一般的限制措施。

本书按原来编著的分工修订:邱毓昌编写绪论和第2~5章,张乔根编写第6、7章,施围编写第8~13章以及第16、17章。另外,修订时,由李江涛、郭洁编写了第14章,谢彦召、刘青编写了第15章,施围、张乔根、郭洁分别参加了绪论、第2章、第17章的部分修改工作。

由于编者水平的限制,第2版中仍不免有不妥和错误之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2014年5月

第 1 版前言

“高电压技术”课程是由过去高电压技术专业的三门课：“高电压绝缘”、“高电压试验技术”、“电力系统过电压与绝缘配合”演变过来的，作为电力系统及其自动化专业的一门必修课，在我国已有 50 年的历史了。本教材的前身《高电压工程》于 1994 年出版，是按照 50~54 学时编写的。根据当时该课程定位在工程应用的概论课的特点，做到既突出基本概念适当反映高电压技术的新成就，又要减轻学生学习负担，使本教材易于阅读，同时兼顾了不同水平读者的要求。

10 多年来，随着教学改革的深入，专业知识面不断拓宽，同时高电压技术也有了很大的发展，IEC 标准、国家标准也发生了一系列变化，重新编写本教材是非常必要的。本教材更名为《高电压工程基础》，与原教材相比，增加了两章内容：第 1 章绪论：高压输电的必要性、我国电力工业的发展、电力工业对高电压技术发展的促进作用、新材料和新技术在高电压技术中的应用、高电压技术在其他领域的应用；第 14 章电力系统过电压计算：概述、单相电磁暂态过程的元件模型、多相电磁暂态过程的数学模型、开关元件与非线性元件模型、初始值的确定。重新编写了第 6 章及第 7 章，并对原来各章节内容作了全面修改与补充，如电力系统过电压部分的快速暂态过电压、新的测量方法等。

西安交通大学邱毓昌老师编写绪论和第 1~5 章（此部分的清样校对工作由郭洁老师完成），张乔根老师编写第 6、7 章，施围老师编写第 8~15 章。在编写过程中，编者既总结了多年高电压工程课程的教学经验，力求使本教材在基础理论、物理概念与高电压现象发展的机理等方面，简明扼要、深入浅出；又面向国家在高电压领域的科研、生产的主战场，增加了近年来该领域的新技术内容，与新的国家标准、法规保持一致，注意内容的实用性；同时还参阅了大量国内外文献资料。

本书的主要读者对象为电力系统及其自动化专业的大学本科生，也可作为电气类各专业和电子束离子束技术专业学生的高电压课教材，以及电力和电工部门高电压工作者阅读参考。

限于水平，书中难免有不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

编者
2006 年 3 月

目 录

第 2 版前言

第 1 版前言

第 1 章 绪论 1

- 1.1 高压输电的必要性 1
- 1.2 我国电力工业的发展 3
- 1.3 电力工业对高电压技术发展的促进作用 6
- 1.4 新材料和新技术在高电压技术中的应用 7
- 1.5 高电压技术在其他领域的应用 9

第 2 章 气体放电的基本物理过程 11

- 2.1 带电质点的产生与消失 11
 - 2.1.1 气体中电子与正离子的产生 11
 - 2.1.2 电极表面的电子逸出 13
 - 2.1.3 气体中负离子的形成 14
 - 2.1.4 带电质点的消失 15
- 2.2 放电的电子崩阶段 15
 - 2.2.1 非自持放电和自持放电的不同特点 15
 - 2.2.2 电子崩的形成 16
 - 2.2.3 影响碰撞电离系数的因素 17
- 2.3 自持放电条件 18
 - 2.3.1 pd 值较小时的情况 18
 - 2.3.2 pd 值较大时的情况 19
 - 2.3.3 电负性气体的情况 21
- 2.4 不均匀电场中气体放电的特点 21
 - 2.4.1 稍不均匀电场和极不均匀电场的不同特点 21
 - 2.4.2 极不均匀电场中的电晕放电 22
 - 2.4.3 不均匀电场中放电的极性效应 24
- 2.5 放电等离子体 26
 - 2.5.1 等离子体的分类与术语 26
 - 2.5.2 平衡等离子体 27
 - 2.5.3 非平衡等离子体 29
- 习题 30

第 3 章 气体间隙的击穿强度 31

- 3.1 稳态电压下的击穿 31
 - 3.1.1 均匀电场中的击穿 31
 - 3.1.2 稍不均匀电场中的击穿 32
 - 3.1.3 极不均匀电场中的击穿 33
- 3.2 雷电冲击电压下的击穿 34
 - 3.2.1 冲击电压的标准波形 34
 - 3.2.2 放电时延 35
 - 3.2.3 50% 击穿电压及冲击系数 35
 - 3.2.4 伏-秒特性 36
- 3.3 操作冲击电压下的击穿 38
 - 3.3.1 操作冲击电压下击穿的 U 形曲线 38
 - 3.3.2 操作冲击电压的推荐波形 38
 - 3.3.3 长空气间隙在操作冲击电压下的击穿强度 39
- 3.4 大气密度和湿度对击穿的影响 39
 - 3.4.1 大气校正因数 40
 - 3.4.2 海拔的影响 41
- 3.5 SF_6 气体间隙中的击穿 41
 - 3.5.1 均匀和稍不均匀电场中的击穿 41
 - 3.5.2 极不均匀电场中的击穿 43
 - 3.5.3 影响击穿场强的因素 44
 - 3.5.4 快前沿脉冲电压下的击穿 46
- 3.6 提高气体间隙击穿电压的措施 47
 - 3.6.1 改善电场分布的措施 47
 - 3.6.2 削弱电离过程的措施 48
- 习题 50

第 4 章 气体中沿固体绝缘表面的放电 51

- 4.1 界面电场分布的典型情况 51
- 4.2 均匀电场中的沿面放电 51
- 4.3 极不均匀电场中的沿面放电 53
 - 4.3.1 具有强垂直分量时

的沿面放电	53	6.3.1 西林电桥的基本原理	85
4.3.2 具有弱垂直分量时		6.3.2 外界电磁场对电桥的干扰	87
的沿面放电	54	6.3.3 影响 $\tan\delta$ 测量结果的因素	88
4.4 受潮表面的沿面放电	56	6.3.4 数字化测量方法	88
4.4.1 表面凝露对沿面放电的影响	57	6.4 局部放电的测试	89
4.4.2 表面淋雨对沿面放电的影响	57	6.4.1 局部放电的检测回路	89
4.5 脏污绝缘表面的沿面放电	58	6.4.2 局部放电的测量	
4.5.1 污闪的发展过程	59	阻抗和测量仪器	90
4.5.2 影响污闪电压的因素	59	6.4.3 用超声波探测器	
4.5.3 污秽等级的划分	60	测量局部放电	91
4.5.4 防止污闪的措施	61	6.5 电压分布的测量	91
习题	62	6.6 绝缘油的电气试验	
第5章 液体和固体介质的电气特性	63	和气相色谱分析	92
5.1 电介质的极化、电导与损耗	63	6.7 绝缘状态的在线监测	94
5.1.1 电介质的极化	63	6.7.1 $\tan\delta$ 的在线监测	94
5.1.2 电介质的电导	65	6.7.2 局部放电的在线监测	95
5.1.3 电介质的能量损耗	66	6.7.3 油中气体含量的在线监测	96
5.2 液体介质的击穿	67	习题	96
5.2.1 影响液体介质击穿的因素	68	第7章 电气设备绝缘的高电压试验	98
5.2.2 减小杂质影响的措施	69	7.1 交流高电压试验	98
5.3 固体介质的击穿	70	7.1.1 工频高电压的产生	98
5.3.1 电击穿	70	7.1.2 串联谐振交流高电压的产生	101
5.3.2 热击穿	71	7.1.3 交流高电压试验	102
5.3.3 电化学击穿	72	7.2 直流高电压试验	103
5.4 组合绝缘的特性	75	7.2.1 直流高电压的产生	103
5.4.1 油-屏障绝缘和油纸		7.2.2 直流高电压的试验	106
绝缘的特点	75	7.3 冲击电压试验	107
5.4.2 多介质系统中的电场	75	7.3.1 冲击电压发生器与参数计算	107
5.4.3 电场调整的方法	76	7.3.2 截断波的产生方法	110
5.5 绝缘的老化	77	7.3.3 操作冲击电压的获得	111
5.5.1 电介质的热老化	78	7.3.4 陡波前冲击电压的产生	111
5.5.2 介质的电老化	78	7.4 脉冲功率技术	112
5.5.3 机械力的影响	78	7.4.1 脉冲功率技术的内涵与特点	112
5.5.4 环境的影响	79	7.4.2 脉冲功率装置的基本构成	112
习题	79	7.4.3 脉冲功率技术的应用	114
第6章 电气设备绝缘的预防性试验	80	7.5 稳态高电压的测量	116
6.1 绝缘电阻的测试	80	7.5.1 气体放电间隙	117
6.1.1 多层介质的吸收现象	80	7.5.2 静电电压表	118
6.1.2 绝缘电阻和吸收比的测量	82	7.5.3 利用高压电容器的测量方法	119
6.2 泄漏电流的测量	83	7.5.4 高压分压器	120
6.3 介质损耗角正切值的测量	85	7.6 冲击电压的测量	121
		7.6.1 球间隙测量冲击电压的幅值	122

7.6.2 冲击电压分压器	122	9.4 避雷器	169
7.6.3 纳秒脉冲测量技术	127	9.4.1 保护间隙	170
7.7 光电与数字化测量技术	130	9.4.2 管式避雷器	170
7.7.1 光电测量技术	130	9.4.3 阀式避雷器	170
7.7.2 数字化测量技术	132	9.5 防雷接地	176
习题	133	习题	179
第 8 章 集中参数的过渡过程及线路和 绕组中的波过程	134	第 10 章 输电线路的防雷保护	180
8.1 线性集中参数电路的过渡过程	134	10.1 输电线路防雷的原则和措施	180
8.1.1 直流电压作用在 LC 串联回路上 的过渡过程	134	10.2 线路感应雷过电压	181
8.1.2 交流电压作用在 RLC 串联回路上 的过渡过程	135	10.2.1 无避雷线时的感应 雷过电压	182
8.2 波在单根均匀无损导线上的传播	137	10.2.2 有避雷线时的感应 雷过电压	183
8.2.1 单根输电线路的等效电路	137	10.3 输电线路的直击雷过电压	183
8.2.2 波阻抗与波速	137	10.3.1 无避雷线时的直击雷过电压	183
8.2.3 波动方程及其解	139	10.3.2 有避雷线时的直击雷过电压	185
8.2.4 前行波和反行波	140	10.4 输电线路雷击跳闸率的计算	188
8.3 行波的折射与反射	141	习题	191
8.3.1 折射系数和反射系数	141	第 11 章 发电厂和变电所的 防雷保护	192
8.3.2 彼德逊法则	143	11.1 发电厂和变电所的直击雷保护	192
8.3.3 等效波法则	144	11.1.1 装设避雷针(线)的原则	192
8.4 行波通过串联电感与旁过并联电容	145	11.1.2 避雷针(线)的设计计算	192
8.4.1 直角波通过串联电感	145	11.1.3 几个具体问题	193
8.4.2 直角波旁过并联电容	146	11.2 发电厂和变电所的行波保护	194
8.5 行波的多次折、反射	148	11.2.1 避雷器的保护作用	194
8.6 行波在无损平行多 导线系统中的传播	151	11.2.2 变电所的进线保护	197
8.7 冲击电晕对线路上波过程的影响	154	11.3 变电所防雷的几个具体问题	200
8.8 变压器绕组中的波过程	155	11.3.1 三绕组变压器和自耦变压器 的防雷保护	200
8.8.1 单绕组中的波过程	155	11.3.2 变压器的中性点保护	201
8.8.2 三相绕组中的振荡过程	159	11.3.3 配电变压器的防雷保护	202
8.8.3 绕组间波的传递	160	11.4 气体绝缘变电所的防雷保护	202
8.8.4 变压器的内部保护	160	11.4.1 GIS 变电所雷电过电压 保护的特点	203
8.9 旋转电机绕组中的波过程	161	11.4.2 GIS 变电所常用的 雷电保护接线	203
习题	162	11.5 旋转电机的防雷	203
第 9 章 雷电及防雷装置	163	11.5.1 旋转电机防雷保护的特点	204
9.1 雷电放电的发展过程	163	11.5.2 直配电机的防雷保护	204
9.2 雷电参数	164		
9.3 避雷针和避雷线	167		

11.5.3 非直配电机的防雷保护	206	14.1.1 暂时过电压	233
习题	206	14.1.2 操作过电压	233
第12章 暂时过电压	207	14.1.3 雷击过电压	234
12.1 工频电压升高	207	14.2 来自换流站直流侧的过电压	234
12.1.1 超高压系统中工频 电压升高的重要性	208	14.2.1 暂时过电压	234
12.1.2 工频电压升高的原因	208	14.2.2 操作过电压	234
12.1.3 工频电压升高的限制措施	211	14.2.3 雷电过电压	237
12.2 谐振过电压	213	14.3 陡波过电压	238
12.2.1 谐振的类型	213	14.4 换流站的过电压防护	238
12.2.2 铁磁谐振过电压	214	14.4.1 换流站直流线路的防护	238
习题	216	14.4.2 换流站直流侧的防护	238
第13章 操作过电压	217	14.4.3 换流站交流侧设备的防护	240
13.1 中性点不接地系统电弧 接地引起的过电压	217	14.4.4 交流电网的防护	240
13.1.1 过电压发展的物理过程	217	习题	240
13.1.2 限制过电压的措施	219	第15章 电力系统的电磁环境	241
13.2 合闸空载线路引起的过电压	221	15.1 交流输电线路的电磁环境	241
13.2.1 产生过电压的物理过程	221	15.2 变电站的电磁环境	245
13.2.2 影响过电压的因素	222	15.3 直流输电线路的电磁环境	247
13.2.3 限制过电压的措施	222	15.4 换流站的电磁环境	250
13.3 切除空载线路引起的过电压	223	15.5 电力系统外部的电磁骚扰源	252
13.3.1 产生过电压的物理过程	223	15.6 电力系统电磁环境的一般性防护 方法	253
13.3.2 影响过电压的因素	224	习题	253
13.3.3 限制过电压的措施	225	第16章 电力系统过电压计算	254
13.4 切除空载变压器产生的过电压	225	16.1 概述	254
13.4.1 产生过电压的物理过程	225	16.2 单相电磁暂态过程的元件模型	256
13.4.2 影响过电压的因素	226	16.2.1 集中参数电路模型	256
13.4.3 限制过电压的措施	226	16.2.2 分布参数电力模型——单相无损 线的 Bergeron 等效计算电路	258
13.5 GIS 中快速暂态过电压 (VFTO)	227	16.2.3 线路损耗近似的处理方法	262
13.5.1 VFTO 产生的机理	227	16.2.4 电源支路的模拟	262
13.5.2 VFTO 的特性	227	16.2.5 单相暂态等效计算 网络的形成及求解	263
13.5.3 VFTO 的影响因素	228	16.3 多相电磁暂态过程的数学模型	266
13.5.4 VFTO 的危害	229	16.4 开关元件与非线性元件模型	267
13.5.5 VFTO 的防护	230	16.5 初始值的确定	268
13.5.6 GIS 的 VFTO 计算实例	230	习题	268
习题	232	第17章 电力系统的绝缘配合	269
第14章 直流系统过电压	233	17.1 绝缘配合的基本概念与方法	269
14.1 来自换流站交流侧的过电压	233		

17.1.1 绝缘配合的原则	269	17.3.2 输电线路空气间隙的确定	278
17.1.2 绝缘配合的方法	270	习题	279
17.2 输变电设备绝缘水平的确定	271	参考文献	280
17.3 输电线路绝缘水平的确定	276		
17.3.1 绝缘子片数的确定	276		

第 1 章 绪 论

高电压技术是在 20 世纪初为实现高压输电而形成的一个电力工程分支学科，具有显著的工程应用特点。美国工程师皮克 (F. W. Peek) 在研究解决 110kV 输电线路电晕问题后于 1915 年出版了一本名为《高电压工程中的电介质现象》的专著，首次提出“高电压工程”(High Voltage Engineering) 这一术语，大概就是因为当时的高电压技术完全是为了解决高压输电工程中的绝缘问题。尽管其技术内涵已有了很大的发展，这一名称在西方发达国家一直沿用至今。例如该领域的大型系列国际会议的名称是国际高电压工程学术会议 (International Symposium on High Voltage Engineering)。该会议首次于 1972 年在德国慕尼黑召开时规模并不大，如今该会每两年召开一次，议题的广泛和参加会议的人数之多已远非第一、二届会议可比。尽管现今高电压技术的发展早已超出对高压输电的研究，但考虑到这一学科起源于高压输电工程的发展，目前仍与高压输电有着最密切的联系 (例如我国绝大部分高电压工作者仍在电力和电工制造部门工作)。本章先对高电压输电作一概述。

1.1 高压输电的必要性

能源基地通常远离用电负荷中心，为此就需要远距离大容量输电。输电线路的传输容量主要受以下三个因素的制约。

(1) 线损与发热 不同截面的电缆和架空线都有其最大允许的载流量，电流过大会使线路能量损耗太大，导致导线温度过高而引发事故 (电缆温度过高会引起绝缘的热击穿；架空线温度过高会使杆塔之间线路弧垂过大，甚至会引起线路接头的熔化)。例如 2003 年 8 月 14 日美国东部六个州和加拿大的两个省同时发生大面积、长时间的停电，就是由于一条线路过载而使弧垂增大触及树枝而引发的。所以要增大输电容量必须提高输电电压。

(2) 线路电压降 为保证用户侧的电压在合理的运行范围之内，对线路电压降必须有所限制。因此从这一点出发，也只有提高输电电压才能增大输电容量。

(3) 电力系统稳定 直流输电系统中不存在系统稳定问题；但对交流输电系统而言，电力系统稳定是保证系统安全运行的极为重要的问题。图 1-1 给出一条连接电源和负载的输电线路的简化等效电路和相量图。等效电路中忽略线路的电阻 R 而只画出感抗 X ，是因为对高压输电线路，通常 $R \ll X$ ；图中也未画出输电线路的等效对地电容，因为这并不影响电源电压 (U_1) 与负载电压 (U_2) 间的相量关系。

由图 1-1b 可见

$$IX \cos \phi = U_1 \sin \delta$$

等式两边乘以 U_2 后可写出

$$X \underbrace{U_2 I \cos \phi}_P = U_1 U_2 \sin \delta$$

即

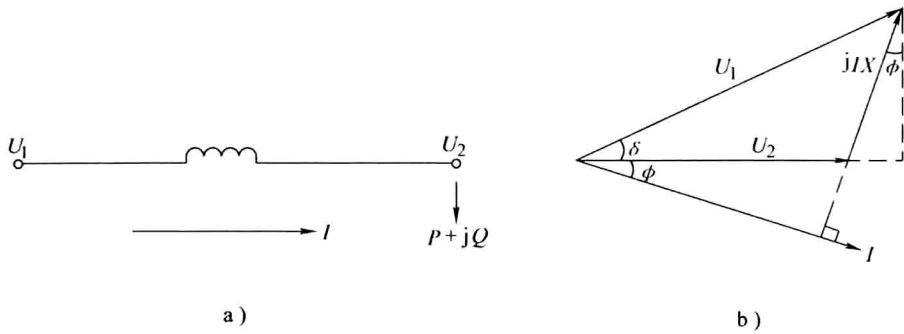


图 1-1 输电线简化等效电路和电压、电流相量图
a) 输电线简化等效电路 b) 电压、电流的相量图
 P 、 Q —用户侧的有功和无功功率 ϕ —功率因数角 δ —功角

$$P = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta \quad (1-1)$$

由于 U_1 与 U_2 均近似等于线路的标称电压 U_N ，式 (1-1) 可写作

$$P = \frac{U_N^2}{X} \sin \delta \quad (1-2)$$

或

$$P_{\max} = \frac{U_N^2}{X} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 中, P_{\max} 是在静态稳定极限情况下 (即 $\delta = 90^\circ$) 输送功率的极限值。为保证电力系统安全运行, 正常运行方式下的输送功率一般不大于 $0.85P_{\max}$ 。

式 (1-3) 表明, 要增大输送功率或增加传输距离 (X 正比于传输距离), 都必须提高输电电压。对于远距离输电线路而言, 上述三种制约因素中, 最重要的约束条件是保证电力系统的稳定。

通过上述分析可以看出, 输电技术的百年发展史, 实际上是依靠不断提高电压等级来增大输电容量和输送距离。图 1-2 给出近百年来全球交流输电电压等级发展的情况。

需要说明的是, 图 1-2 中的 750kV 泛指 735kV、750kV 和 765kV 三种标称电压。

735kV 线路是加拿大在 1965 年建成投运的,

最高运行电压为 765kV, 目前尚无其他国家使用这一电压等级的线路。750kV 线路是前苏联于 1967 年建成投运的, 其最高运行电压为 787kV (即标称电压的 1.05 倍), 该国后来还用这一电压等级与匈牙利、波兰、保加利亚、罗马尼亚等国联网。美国于 1969 年建成 765kV 线路, 其最高运行电压为 800kV, 这一电压等级后来也被其他国家采用。巴西、南非、委内瑞拉和韩国都已有 765kV 的输电线路。我国西北地区建成的 750kV 线路的最高运行电压为 800kV, 所以其绝缘水平实际上与国外 765kV 线路是相同的。我国首条官亭—兰州东

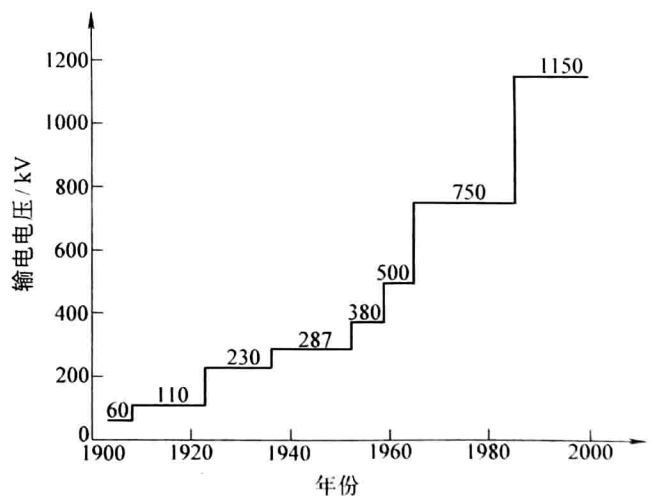


图 1-2 交流输电电压等级的发展

140.7km的750kV线路于2005年9月26日投入运行,接着西北地区相继出现了多条750kV线路,已形成了一个强大的750kV系统。

特高压系统的建设正在我国展开:1000kV晋东南—南阳—荆门1000kV特高压交流试验示范工程于2009年1月6日顺利投入运行;1000kV淮南—上海特高压交流工程于2013年9月26日投入运行; ± 800 kV云(云南楚雄)—广(广东穗东)特高压直流输电工程,线路长度为1373km,2009年12月单极运行,2010年6月双极运行;容量为5000MW, ± 800 kV宜(四川省宜宾市)—上(上海南汇)特高压直流输电工程,线路长度为1890km,容量为6400MW,2010年7月8日投入运行;紧接着其他多条 ± 800 kV特高压直流系统也先后投入了生产。目前,在特高压系统的建设中,我国处于国际领先地位。

1.2 我国电力工业的发展

近半个世纪以来,我国电力工业发展很快,在最近的30余年内尤为如此。这一点可以从图1-3所示的我国发电装机容量增长的情况看出。至2011年底,我国发电装机容量为1056GW,是1949年的570多倍,位居世界第一位。

我国是世界人口第一大国,尽管电力工业发展如此迅速,缺电情况依然存在。目前我国的人均装机容量仅为0.81kW,不到经济合作与开发组织(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD)成员国平均值的1/2;与美国的差距更大,只有该国人均装机容量的1/5左右。要使得我国的人均发电装机容量达到世界平均水平,仍需要较长的时间,可见我国电力工业的发展任重而道远。

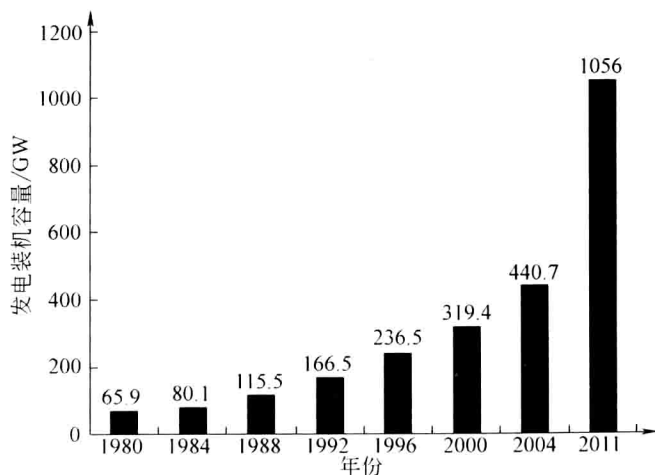


图1-3 我国发电装机容量增长的情况

与发电设备容量迅速增长的情况相比,我国高电压输电技术的发展明显滞后。我国首条220kV输电线路于1943

年在东北投入运行,1974年在西北地区建成第一条330kV输电线路,1981年在华中地区首次建成500kV线路,西北地区建设的750kV线路从第一条线路投运,现已形成包括新疆在内的一个强大的西北750kV电网。将促使我国的超高压输电技术得到进一步发展。需要说明的是,330kV、500kV与750kV都属于超高压(Extra High Voltage, EHV),只有1000kV及以上的交流电压才是特高压(Ultra High Voltage, UHV)。

表1-1是我国出版的《电机工程手册》给出的不同电压等级交流输电线路的一般输送容量及输电距离。由表可见,各级电压的输送容量与输电距离的范围均有一定的重叠,要通过具体的设计计算,经过综合技术经济比较来选取输电电压等级。

我国高压输电技术的滞后可从以下事实中清楚地看出:

我国装机容量为18.2GW的三峡水电站是全球最大的电站,但其输电电压仅为交流

500kV 和直流 ± 500 kV, 而 20 余年前建成的巴西伊泰普水电站 (装机容量为 12.6GW) 的输电电压是交流 765kV 和直流 ± 600 kV。三峡水电站的输电电压过低致使电站出线回数过多, 对其布置带来很多困难。另一个事实是 20 世纪 80 年代中期前苏联已建成 1150kV 输电线路并已取得多年的运行经验。前苏联解体后输电容量大幅度减少, 降压为 500kV 运行。日本在 20 世纪 90 年代也建成三条较短的 1000kV 输电线路, 主要目的是为了压缩线路走廊以节省土地资源。但因为与之配套的大型核电机组的推迟投产, 降压为 500kV 运行, 计划于 2015 年前后升压至 1000kV 运行。美国早在 20 世纪 70 年代就已建有两条特高压输电线路, 美国电力公司的试验线段的电压是 1500kV (作为已有的 765kV 线路的上一级输电电压), 邦尼维尔电力公司的试验线段的电压是 1200kV (作为其已有的 500kV 线路的上一级输电电压), 已作了很多研究工作, 只是后来因其国情发生变化, 暂无必要发展较远距离的大容量输电工程而中止了这一研究工作。

表 1-1 我国交流输电线路的一般输送容量及输电距离

标称电压/kV	110	220	330	500	750	1000
最高运行电压/kV	126	252	363	550	800	1100
输送容量/MW	10 ~ 50	100 ~ 500	200 ~ 1000	500 ~ 1500	1000 ~ 2000	1500 及以上
输电距离/km	150 ~ 50	300 ~ 100	600 ~ 200	1000 ~ 250	1500 ~ 500	5000

是否有必要远距离大容量输电, 与发电的能源结构和能源分布有关。表 1-2 给出 2004 年我国发电能源结构的情况, 表中其他一栏包括风力发电、太阳能发电、地热发电和生物质发电等。

表 1-2 2004 年我国各类发电厂的装机容量

电厂类型	火电	水电	核电	其他	总计
装机容量/GW	324.9	108.26	6.84	0.7	440.7
占总装机量的百分比 (%)	73.72	24.57	1.55	0.16	100

由表 1-2 可见, 我国现今仍以燃煤火力发电为主, 其次是水力发电; 核电与风力发电所占的百分比较小, 但近年来风力发电与太阳能发电有了飞速的发展。我国的发电能源结构与有些国家差别很大, 例如法国的核电比例高达 80%, 丹麦的风力发电比例约为 20%。我国发电能源结构特点反映出水力资源与煤炭资源丰富, 而油、气资源不多的情况, 所以今后我国的发展仍以燃煤火电与水电为主。据有关部门预测, 到 2020 年, 我国核电装机容量将上升到 3.87%, 风力发电将上升到 2.15%, 此时火电与水电的装机容量仍高于 93%。

我国煤炭资源主要集中在华北和西北地区, 水能资源则主要集中在西南地区, 例如即将建设的金沙江上的溪洛渡水电站和向家坝水电站的装机容量分别是 12.6GW 和 6GW (这两个相距不远的水电站的总装机容量将超过三峡水电站)。可见, 进一步发展大容量远距离输电是我国电力系统发展的关键。由于历史的原因, 我国电力系统在 220kV 以上有两种不同输电电压等级的系列, 在西北地区是 330kV 和 750kV, 而在全国其他地区则采用 500kV 和 1000kV 的特高压输电系统。

我国电力工业发展中另一个重要和关键的问题是要采取有效措施, 减少火力发电厂 CO_2 的排放量。2005 年 2 月 16 日, 旨在限制全球温室气体排放总量以遏制全球气候变暖的

《京都议定书》正式生效。我国是世界第二大 CO₂ 排放国，目前温室气体排放量占到发展中国家排放总量的 50%，是全球排放总量的 15%，所以减少 CO₂ 排放量的任务巨大。我国目前煤炭的 45% 用于发电，而美国则为 87% 以上。由于治理电力工业集中的污染源远较低效直接燃煤的分散源易于实现和更加经济，所以要解决我国燃煤污染并控制 CO₂ 排放量的基本出发点应使未来煤炭消费的 70% ~ 80% 用于发电，同时采用洁净煤发电技术以提高燃煤发电的效率并降低污染排放。

处于研究和发展阶段的洁净煤发电技术主要有：配备烟气脱硫和脱硝的超临界和超超临界发电技术，循环硫化床锅炉，增压硫化床联合循环，整体煤气化联合循环等。采用超临界和超超临界机组是在传统燃煤发电技术的基础上提高蒸汽压力和温度以获得较高的发电效率，因而与亚临界参数的机组相比，可以降低单位发电量的污染物排放量。目前这种机组的最大容量可做到 1000MW 等级，供电效率可达 45%（亚临界机组的供电效率不到 40%）。与其他洁净煤发电技术相比，超临界和超超临界发电在技术上最为成熟和易行，但由于这种技术仍是传统的煤燃烧过程，无法在燃烧过程中处理各种污染物，而只是靠对尾部烟气处理来控制污染物排放，因此从技术上看是不够彻底的。上述

洁净煤发电技术中最理想的是整体煤气化联合循环（Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC）。联合循环是指燃气-蒸汽联合循环发电，以克服蒸汽轮机循环和燃气轮机循环各自的局限性，因而其热效率高于二者单独使用的情况。图 1-4 给出联合循环发电的热力系统示意图，图中 1—2—3—4 是燃气轮机内压缩、燃烧和膨胀做功的过程；4—5 是燃气轮机排气在余热锅炉中对给水进行加热的过程；6—7—8—9—10 是给水吸热转化为过热蒸汽后在汽轮机中膨胀做功的过程；10—11 是汽轮机排汽在凝汽器中凝结放热的过程。

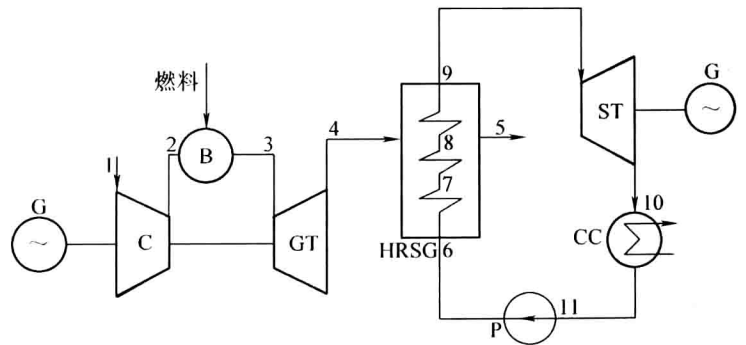


图 1-4 联合循环发电的热力系统示意图

C—压气机 B—燃烧室 GT—燃气轮机 HRSG—余热锅炉
ST—汽轮机 CC—凝汽器 P—给水泵 G—发电机

图 1-4 给出的是以天然气或油为燃料的燃气-蒸汽联合循环，对于以煤为燃料的 IGCC 则还要增添气化炉和煤气净化设备，即将煤在气化炉中气化成为中热值或低热值的粗煤气，再经过净化设备除去其中的灰粉、硫化物、氮化物等有害物质后才送到燃气轮机中去。

随着新的清洁能源在发电技术中应用与发展（如风力发电、燃料电池和太阳能光伏发电等），以及发电设备制造技术的进步（如微型燃气涡轮发电机等），近年来分布式发电技术得到了迅速的发展。与传统的高压远距离输电系统的大型电站相比，分布式发电的主要优点是：投资少（不需要高压输电系统、基础设施的投资大大减少）、建设快、运行费用低（线路损耗远比传统的电力系统低）、供电可靠（电力系统中高压输电设备及线路的事故常是影响供电可靠性的一个重要因素）。分布式发电设备对采用高压远距离输电的大型电厂具有很好的互补性，但分布式发电设备的容量仅为兆瓦级，不可能取代传统的高电压大容量远距离输电。

1.3 电力工业对高电压技术发展的促进作用

百年来高电压技术有了很大的发展，今后仍会继续不断地有更大发展。促使高电压技术发展的因素很多，本节讨论电力工业的发展对高电压技术的促进作用。

1. 新的更高电压等级的应用

系统采用新的更高电压等级对高电压技术的发展有直接的促进作用，因为电压等级提高后常常会出现一些新问题，需要采取新的技术来解决。以高电压技术发展初期解决线路电晕为例，对于配电网使用的中压等级（Medium Voltage, MV）而言，电晕并不是什么需要专门研究解决的问题，但对于高压输电线路来说，这是一个需要解决的关键技术问题。随着输电电压的进一步提高，人们对输电线路电晕的危害有一个认识的发展过程，即从初期仅关注能量损耗，其后才认识到电晕的电磁干扰问题，再发展到要解决电晕的可听噪声问题，这三者中后者往往是进行线路绝缘设计时最重要的制约因素。以日本东京电力公司建成的1000kV线路为例，必须采用8根截面为 810mm^2 的钢芯铝绞线构成分裂间距为40cm的正八边形的8分裂导线，才能将线路电晕的噪声水平降至500kV线路的水平，即50dB。再以电力系统过电压防护为例，也可看出不同电压等级有不同的主要问题：对配电线路而言，雷电过电压常是决定线路绝缘水平的主要因素；但对超高压和特高压输电线路而言，则操作过电压和工频过电压是更为重要的因素。

除电压等级的影响外，不同输电方式的应用，也是对高电压技术发展的促进因素。下面以紧凑型输电、灵活交流输电、直流和轻型直流输电为例，作一简要讨论。

2. 紧凑型输电技术

紧凑型输电线路的特点是取消常规线路杆塔的相间接地构架而将三相线路置于同一塔窗中，使导线相间距离显著减小。因此，与常规线路相比，紧凑型输电线路的电感减小，电容增大，即线路的波阻抗减小，从而增大了输电线路的自然功率，也就是说可以有效地提高线路的输送能力。紧凑型输电的另一个显著优点是线路走廊减小，因而占地减少。我国第一条紧凑型输电线路是北京昌平到房山的500kV线路，全长83km，于1999年11月投入运行。该线路与常规水平排列的500kV线路相比，线路走廊从24.6m减小到6.7m，自然功率提高了34%。由于相间距离减小，紧凑型线路的地面电场强度下降，超过 4kV/m 的地面宽度从常规线路的48m减小到16m。显然对紧凑型输电线路的绝缘设计要作细致的研究。以上述线路为例，对导线结构的不同方案进行比较后选用6根截面为 240mm^2 的6分裂导线，而相同的常规500kV线路采用的是4根截面为 400mm^2 的4分裂导线。

3. 灵活交流输电技术

灵活交流输电系统（Flexible AC Transmission System, FACTS）是指装有电力电子型或其他静止型控制器以加强系统可控性和增大传输能力的交流输电系统。FACTS的概念是20世纪80年代末提出来的，但实际上有的FACTS装置，如静止无功补偿器（Static Var Compensator, SVC），早已在电力系统中得到应用，例如我国1981年投入运行的第一条500kV输电线路末端的武汉凤凰山变电站中已装有SVC。SVC中既装有用来提高功率因数的并联电容器以保证重载时用户端的电压不致太低，又装有并联电抗器以降低线路轻载或空载时长线末端出现的工频过电压。图1-5给出带固定并联电容器组和以晶闸管控制的电抗器的静止无

功补偿器原理图。可见 SVC 的电抗可从电容性到电感性按需要调节（通过母线电压的高低来调节），从而使 SVC 安装点的电压保持在一定的范围内。与高电压技术关系较密切的其他 FACTS 装置还有用于串联补偿线路的晶闸管控制的串联电容器（Thyristor Controlled Series Capacitor, TCSC）等。显然装有这些 FACTS 装置的电力系统的过电压与常规的系统是不同的。

4. 高压直流与轻型高压直流输电

高压直流（HVDC）在远距离输电工程中有很大的优势，因为它不像交流输电有系统稳定的问题。图 1-6 表明，当输电距离超过某一等价距离时，高压直流输电比高压交流输电更为经济。

高压直流除了在远距离输电方面的优势外，还有其他的特殊用途，如用作两个交流电力系统的互联和实现海底电缆输电等。

高压直流输电在近 30 余年来的发展，与大功率电力电子器件的迅速发展是分不开的，首先是 20 世纪 70 年代初实现了用大功率晶闸管阀取代过去的汞弧阀，其后在阀的冷却、安装和控制方面又有不断的改进，使当前高压直流输电与早期相比已有显著的不同。近年来换流阀的研制又有新进展，即在输电电压不太高的情况下采用大功率的绝缘栅双极型晶体管（IGBT）的电压控制型换流阀进行直流输电，这比采用晶闸管的相控换流器在技术上和经济上均有很大改进。采用这种新的换流技术的换流站不需要换流变压器，因此造价低，可以用于距离较短、输送容量不大的情况，故被称为轻型直流输电（HVDC Light）。例如瑞典于 1997 年投运的第一条 $\pm 10\text{kV}$ 的试验性轻型直流输电线路，长仅 10km，输送容量仅 3MW。其后该国于 1999 年投运了一条 70km 长的 $\pm 80\text{kV}$ 线路，输送容量为 50MW。目前澳大利亚、丹麦和美国等国都有 HVDC Light 的线路在运行。我国舟山五端 $\pm 200\text{kV}$ Light 的线路正在建设中，它有诸多优势，包括模块化设计，安装简单方便，结构紧凑占地面积小，省去了交流滤波器，从根本上消除了换相失败等。

直流输电系统中的绝缘技术和过电压防护技术不同于交流输电系统，所以高压直流输电的发展对高电压技术的进步是有促进作用的。

1.4 新材料和新技术在高电压技术中的应用

新材料和其他领域的新技术在高电压技术中的应用，也是高电压技术发展的重要促进因素。此外对环境保护的进一步要求也促使高电压技术不断向前发展。

1. 新材料的应用

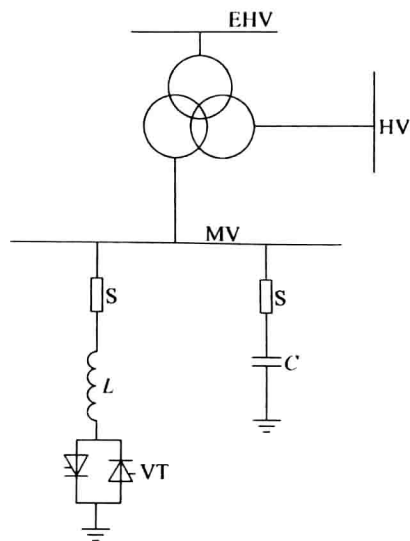


图 1-5 静止无功补偿器原理图

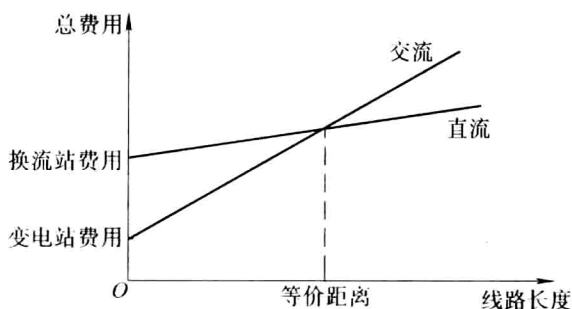


图 1-6 交直流输电系统的费用与输电距离的关系