

“十一五”国家重点图书出版规划项目

特高压输电技术

2010/02/

直流输电分册

中国电力科学研究院 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

“十一五”国家重点图书出版规划项目

中国电力科学研究院专著出版基金资助

特高压输电技术

直流输电分册

中国电力科学研究院 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

《特高压输电技术》针对特高压输电技术的特点,以特高压交、直流示范工程为契机,总结特高压输电技术的科研、论证、试验研究、科技攻关、设计、设备制造、工程建设、调试和运行多方面的科研成果编写而成。本书分为《交流输电分册》和《直流输电分册》两个分册。

本书为《直流输电分册》,共十一章。主要内容包括:特高压直流输电的优势和应用前景,特高压直流换流器的结构和工作原理,大功率直流换流阀,特高压直流输电的额定值、运行方式、稳态运行特性和系统损耗,控制系统的配置、调节原理和保护系统,换流站的无功需求、无功补偿、谐波特征和抑制,特高压直流输电系统的稳态运行电压、避雷器配置、过电压及限制措施、防雷和绝缘配合,特高压直流输电系统空气间隙放电特性、海拔修正和污秽外绝缘特性,特高压换流站及主要电气设备,特高压直流系统的电磁环境,特高压直流输电线路杆塔、导线、金具和防舞动措施,设备验收试验、站系统调试和系统调试试验等。

本书可供从事特高压直流输电工程科研、设计、建设、运行和维护以及特高压设备制造等方面的专业技术人员学习和使用,也可作为对其他相关人员进行培训的教材,还可作为大专院校相关专业的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

特高压输电技术. 直流输电分册 / 中国电力科学研究院编著. —北京: 中国电力出版社, 2012.3

ISBN 978-7-5123-2728-3

I. ①特… II. ①中… III. ①特高压输电②直流输电 IV. ①TM723
②TM721.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 027687 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2012 年 5 月第一版 2012 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23.25 印张 554 千字

印数 0001—1500 册 定价 82.00 元



敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

《特高压输电技术》

编 委 会

主 任	于永清			
副 主 任	李光范	范建斌	高克利	
编写组成员	张翠霞	李同生	李庆峰	李金忠
	郭 剑	殷 禹	鞠 勇	廖蔚明
	葛 栋	杜澍春	谷 琛	程涣超
	陈立栋	是艳杰	陈秀娟	高海峰
	崔博源	赵志刚	刘 锐	张书琦
	赵录兴	甄为红	蒋卫平	班连庚
	申 洪	张祖平	项祖涛	谢国平
	李新年	魏晓光	杨靖波	朱宽军
	鲁先龙	刘胜春	张子富	万建成
	樊宝珍			
审核人员	宿志一	李启盛	李同生	曾南超
	陆家榆	王承玉	王景朝	李 博



前 言

特高压输电具有输电容量大、距离远、效率高、损耗低等优势，发展特高压输电技术，建设以特高压电网为骨干网架的智能电网，有利于促进大水电、大煤电、大核电和大型可再生能源基地的集约化开发，实现更大范围的资源优化配置，缓解环境压力，节约宝贵土地资源，具有显著的经济效益和社会效益，符合我国国情和国家能源发展战略。发展特高压输电已被纳入《中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》和《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006～2020年）》，是国家能源发展战略的重要组成部分。

2005年，国家电网公司坚持自主创新，以科学严谨的态度，启动了特高压交、直流输电工程关键技术研究 and 可行性研究，组织国内科研、设计、制造、建设等单位 and 高等院校，对特高压输电关键技术开展了全面的研究，研究内容包括系统稳定、电磁环境、过电压与绝缘配合、外绝缘特性、设备制造、试验技术和运行等方面，并与国际相关部门开展技术交流和咨询，取得了丰硕的成果，这些成果在特高压工程的设计、建设、运行和设备制造中得到了实施、应用和验证。

2005年2月16日，国家发展和改革委员会下发了《关于开展百万伏级交流、 $\pm 800\text{kV}$ 级直流输电技术前期研究工作的通知》（发改办能源〔2005〕282号）。经过一年多的研究论证，2006年8月9日，晋东南—南阳—荆门 1000kV 特高压交流试验示范工程（简称特高压交流示范工程）正式获得批准。其后，向家坝—上海和云南—广东 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流示范工程正式获得批准，标志着我国特高压输电工程全面进入实施阶段。

2009年1月6日，晋东南—南阳—荆门 1000kV 特高压交流试验示范工程建成并正式投入商业运行；2010年6月，向家坝—上海 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电示范工程和云南—广东 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程建成并正式投入商业运行。今后，我国会加快特高压输电工程和特高压电网的建设，建设项目包括淮南—皖南—浙北—沪西、锡盟—南京和陕北—长沙等多条 1000kV 交流特高压同塔双回输电工程，以及锦屏—苏南、乌东德—白鹤滩、溪洛渡—浙西、准东—成都和哈密—郑州等多条 $\pm 800\text{kV}$ 及以上特高压直流输电工程。

本书的编写者亲历了我国特高压示范工程的科研、论证、试验研究、科技攻关、设计、设备制造、带电考核、工程建设、调试和运行多个阶段，及时了解和掌握特高压输电的关键技术发展、创新和应用成果，并吸纳到本书之中。

为了使电力系统员工和广大关心特高压直流输电技术的各界人士了解和掌握特高压输电关键技术，并为后续特高压输电工程的建设提供技术参考，我们根据特高压示范工程设计、

建设、调试和运行经验及 2005 年以来特高压输电科研和试验成果,编写了《特高压输电技术》,本书为《直流输电分册》。

本书共分十一章,第一章由李同生编写,第二章、第三章、第五章由蒋卫平编写,第四章由谢国平和李新年编写,第六章由张翠霞、葛栋和蒋卫平编写,第七章由廖蔚明和高海峰编写,第八章由张翠霞、魏晓光、李金忠、刘锐、程涣超、陈立栋和是艳杰编写,第九章由鞠勇编写,第十章由张子富、刘胜春、万建成、樊宝珍、鲁先龙、朱宽军和杨靖波编写,第十一章由殷禹和张书琦编写。全书由曾南超、李同生、宿志一、陆家榆、王景朝和李博审稿,由张翠霞统稿。

本书是基于特高压示范工程的科研成果、设计和建设经验的基础编写的,随着特高压输电技术的深化研究和特高压输电技术的不断发展,对特高压输电技术会有新的认识,本书届时再行修订。书中有不足之处,敬请批评指正。

编 者

2012 年 2 月



目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 高压直流输电发展概况	1
第二节 特高压直流输电的优势	9
第三节 特高压直流输电的应用前景	12
第二章 特高压直流换流器技术	16
第一节 换流器的结构	16
第二节 直流换流器工作原理	22
第三节 大功率直流换流阀	40
第三章 特高压直流输电稳态特性	44
第一节 直流输电额定值	44
第二节 直流输电最小输送功率	45
第三节 直流输电过负荷	47
第四节 直流输电降压运行	49
第五节 直流输电功率反送	52
第六节 直流输电稳态运行特性	56
第七节 直流输电运行方式	64
第八节 直流输电系统损耗	76
第四章 特高压直流输电系统的控制保护	87
第一节 控制系统配置要求	87
第二节 换流器触发相位控制	90
第三节 直流系统基本控制调节原理	90
第四节 特高压换流器的控制	91
第五节 特高压直流系统的控制	95
第六节 特高压直流换流单元在线投退策略	97
第七节 特高压直流输电系统的故障形态	103

第八节	特高压直流输电工程的保护系统	108
第五章	特高压直流系统无功补偿和谐波抑制	116
第一节	概述	116
第二节	换流站的无功需求	116
第三节	换流站的无功补偿	118
第四节	换流站的谐波特征	123
第五节	换流站交流侧的谐波抑制	127
第六节	换流站直流侧的谐波抑制	133
第六章	特高压直流系统过电压与绝缘配合	140
*第一节	稳态电压	140
第二节	避雷器的配置和参数	148
第三节	内过电压及保护	154
第四节	雷电过电压及保护	164
第五节	绝缘配合	169
第七章	特高压直流外绝缘特性	180
第一节	输电线路空气间隙直流放电特性	180
第二节	输电线路空气间隙冲击放电特性	183
第三节	换流站空气间隙操作冲击放电特性	189
第四节	海拔校正	193
第五节	直流绝缘子污秽外绝缘特性	195
第八章	特高压换流站及主要电气设备	210
第一节	特高压直流换流站	210
第二节	特高压直流换流阀	216
第三节	换流变压器	222
第四节	特高压直流平波电抗器	227
第五节	特高压直流避雷器	231
第六节	特高压直流套管	236
第七节	特高压直流滤波器	240
第八节	特高压直流测量装置	241
第九章	特高压直流系统电磁环境	245
第一节	电磁环境问题	245
第二节	线路的电磁环境	246
第三节	换流站的电磁环境	258
第四节	接地极的电磁环境	271
第十章	特高压直流输电线路	281
第一节	线路杆塔基础	281
第二节	线路杆塔	292

第三节	线路导线、地线、OPGW	300
第四节	线路导线振动	310
第五节	线路金具	324
第十一章	特高压直流现场试验	334
第一节	设备交接试验	334
第二节	站系统调试试验	343
第三节	系统调试试验	347
参考文献	360



第一章 概 述

第一节 高压直流输电发展概况

自 1954 年瑞典果特兰岛高压直流输电工程投入工业化运行以来,国外已有 60 余项高压直流输电工程投入运行,在远距离大容量输电、海底电缆和地下电缆输电以及电力系统联网工程中得到了较大的发展。

我国高压直流输电工程起步较晚,但发展很快,自 1987 年舟山直流输电工程投入运行开始,至 2010 上半年,已有 13 个高压直流输电工程投入运行,总容量达到 23 720MW,已在我国西电东送和全国联网工程中发挥了重要作用。目前中国已成为世界直流输电容量最大、电压等级最高的国家。

一、国外直流输电发展概况

电力技术的发展是从直流电开始的,最早的直流输电是用直流发电机直接向直流负荷供电。1882 年,法国物理学家德普勒用装在米斯巴赫煤矿中的直流发电机,以 1.5~2.0kV 电压,沿着 57km 的电报线路,把电力送到在慕尼黑举办的国际展览会上,完成了有史以来的第一次直流输电试验工程。此后,为提高输电电压,采用了直流发电机串联的方法。1912 年,直流输电的电压、功率和距离分别达到 125kV、20MW 和 225km。由于直流电源采用直流发电机串联,电动机负荷也是串联方式,运行方式复杂,可靠性差,因此直流输电在当时没有得到进一步的发展。随着三相交流发电机、感应电动机和变压器的出现,由于变压器可方便地改变交流电压,从而使交流输电和交流电网得到迅速的发展,并很快占据了统治地位,直流输电很快被交流输电所取代。

交流输电的发展使直流输电的发展受到了很大影响,但由于直流输电具有交流输电所不能取代的优点,如直流输电的输送容量不受同步运行稳定性的限制,用电缆输电时不受电缆线路的长度限制等。因此,美国、瑞典、联邦德国等仍继续研究直流输电技术。

在交流电网已全面占领市场的情况下,要采用直流输电,必须采用交流/直流一直流/交流的输电方式,即将交流电源转换为直流,用直流进行输电,然后在受端再将直流转换为交流,以供交流负荷使用。因此,直流输电必须要解决交流与直流的转换问题。按照交、直流转换(换流)设备的发展过程,直流输电的发展可分为以下几个阶段。

1. 汞弧换流阀阶段

1935 年,美国采用汞弧阀建立了 15kV、100kW 的直流输电系统。1943 年,瑞典研制成功了栅控汞弧阀,建立了一条 90kV、6.5MW、58km 的直流输电线路。与此同时,德国试制了单阳极汞弧阀。这些为直流输电的兴起做了很好的技术准备。随着大功率汞弧阀的问世,直流输电工程得到了进一步的发展。从 1954 年瑞典投入世界上第一个工业性直流输电工程(果

特兰岛直流输电工程)起,到1977年最后一个采用汞弧阀的直流输电工程(加拿大纳尔逊河 I 期工程)建成止,世界上共有 12 个采用汞弧阀的直流输电工程投入运行。其中输送容量最大和输送距离最长的是美国太平洋联络线(1440MW、1362km),输电电压最高的为加拿大纳尔逊河 I 期工程($\pm 450\text{kV}$)。最大容量的汞弧阀为用于太平洋联络线的多阳极汞弧阀(133kV、1800A)以及用于苏联伏尔加格勒—顿巴斯直流输电工程的单阳极汞弧阀(130kV、900A)。由于汞弧阀制造技术复杂、价格昂贵、逆弧故障率高、可靠性较低、运行维护不便等因素,使直流输电的发展受到限制。

2. 晶闸管换流阀阶段

· 20 世纪 70 年代以后,电力电子技术和微电子技术迅速发展,高压大功率晶闸管研制成功并应用于直流输电工程。晶闸管换流阀和微机控制技术在直流输电工程中的应用,有效地改善了直流输电的运行性能和可靠性,促进了直流输电技术的发展。晶闸管换流阀不存在逆弧问题,而且制造、试验、运行维护和检修都比汞弧阀简单、方便。1970 年,瑞典首先采用晶闸管换流器叠加在原有汞弧阀换流器上,对果特兰岛直流输电工程进行扩建增容,增容部分的直流电压为 50kV,功率为 10MW。1972 年,世界上第一个全部采用晶闸管换流阀的伊尔河背靠背直流输电工程(80kV、320MW)在加拿大投入运行。由于晶闸管换流阀比汞弧阀有明显的优点,从此以后新建的直流输电工程均采用晶闸管换流阀。与此同时,原来采用汞弧阀的直流工程也逐步被晶闸管阀所替代。20 世纪 70 年代以后,微机控制和保护、光电传输技术、水冷技术、氧化锌避雷器等新技术,在直流输电工程中得到了广泛的应用,促使直流输电技术进一步的发展。

1954~2000 年,世界上已投入运行的直流输电工程共 63 个,其中架空线路 17 个,电缆线路 8 个,架空线和电缆混合线路 12 个,背靠背直流输电工程 26 个。在采用架空线路的直流输电工程中,巴西伊泰普直流输电工程电压最高($\pm 600\text{kV}$)和输送容量最大(3150MW);南非英加—沙巴直流输电工程输送距离最长(1700km);在采用电缆输电的直流输电工程中,英法海峡直流输电工程输送容量最大(2000MW);瑞典—德国的波罗的海直流输电工程电压最高(450kV)和距离最长(250km);背靠背换流站容量最大的是俄罗斯—芬兰之间的维堡直流输电工程(1065MW)。在此时期,直流输电工程输送容量的年平均增长率,在 1960~1975 年为 460MW/年,1976~1980 年为 1500MW/年,1981~1998 年为 2096MW/年。

3. 新型半导体换流设备的应用

20 世纪 90 年代以后,新型氧化物半导体器件——绝缘栅双极晶体管(IGBT)首先在工业驱动装置上得到广泛的应用。1997 年 3 月,瑞典建成世界上第一个采用 IGBT 组成电压源换流器的 10kV、3MW、10km 直流输电工业性试验工程。这种被称为轻型直流输电的工程在小型输电工程中具有较好的竞争力。到 2000 年,在瑞典、澳大利亚、爱沙尼亚和芬兰等地已有 5 个轻型直流输电工程投入运行。由于 IGBT 单个组件的功率小、损耗大,不利于大型直流输电工程采用。

近期研制成功的集成门极换相晶闸管(IGCT)和大功率碳化硅组件,具有电压高、通流能力大、损耗低、体积小、可靠性高的特点,并且还具有自关断能力,在直流输电工程中有很好的应用前景。

二、中国直流输电发展概况

(一) 直流输电的技术准备

20 世纪 60 年代开始,国内制造和运行部门的研究单位开始对直流输电进行试验室研究,1974 年,在西安高压电器研究所建成一个 8.5kV、200A、1.7MW,采用 6 脉动换流器的背靠背换流试验站。1977 年,在上海利用杨树浦发电厂到九龙变电站之间报废的交流电缆,建成一个采用 6 脉动换流器的 31kV、150A、4.65MW、8.6km 的直流输电试验工程。以上工程为我国直流输电工程的发展打下了基础,做好了技术准备。

(二) 直流输电工程

1987 年,全部采用国内技术的舟山直流输电工程投入运行,从此直流输电开始在我国得到了应用和发展,到 2010 年 4 月,我国已有 13 个直流输电工程投入运行,这些工程主要参数见表 1-1。

表 1-1 我国已建成的直流输电工程

序号	工程名称	电压(kV)	功率(MW)	距离(km)		投运年份	备注
				架空线	电缆		
1	舟山	-100	50	42	12	1987	
2	葛洲坝—南桥(葛—南)	±500	1200	1045	—	1989, 极 1 1990, 极 2	
3	马窝—北郊(天—广)	±500	1800	960	—	2000, 极 1 2001, 极 2	
4	嵊泗	±50	60	6.5	59.7	2002	
5	龙泉—政平(三—常)	±500	3000	860	—	2002, 极 1 2003, 极 2	
6	荆州—惠州(三—广)	±500	3000	960	—	2004	
7	安顺—肇庆(贵—广 1)	±500	3000	880	—	2004	
8	灵宝	120	360	—	—	2005	背靠背
9	宜都—华新(三—沪)	±500	3000	1075	—	2006	
10	兴仁—深圳(贵—广 2)	±500	3000	1194	—	2007	
11	高岭	±125	1500			2008	背靠背
12	灵宝	120	750	—	—	2009	背靠背扩建
13	宝鸡—德阳(宝—德)	±500	3000	534		2009, 极 1 2010, 极 2	

1. 舟山直流输电工程

舟山直流输电工程是我国第一个全部依靠自己的力量建设的直流输电工程,它解决了浙江大陆向舟山本岛的输电问题,同时具有建设大型直流输电工程工业性试验的性质。

该工程 1987 年进行调试并投入试运行,1989 年正式投入商业运行,整流站在浙江省宁波附近的大碇镇,逆变站在舟山本岛的鳌头浦。

该工程 1998 年对设备进行了更新和改造,采用微机控制保护装置取代了原来的数控型,并增加潮流反送的功能,使舟山直流输电工程具有双向送电的能力。

2. 葛—南直流输电工程

葛—南直流输电工程设计和全部设备由国外承包商承担。该工程由原 BBC 公司总承包, 西门子公司提供南桥换流站的全部一次设备, 是我国第一个远距离直流输电和联网的工程。该工程为双极 $\pm 500\text{kV}$ 、 1200A 、 1200MW 、输送距离 1045km , 整流站在葛洲坝水电站附近的葛洲坝换流站, 逆变站在上海的南桥换流站。1989 年 9 月极 1 投入运行, 1990 年 8 月全部工程建成, 并投入商业运行。

3. 天—广直流输电工程

天—广直流输电工程西起天生桥水电站附近的马窝换流站, 东至广州的北郊换流站, 输电距离 960km , 采用双极 $\pm 500\text{kV}$ 、 1800A 、 1800MW 。该工程的主要特点为远距离大容量的交、直流并联输电, 可以利用直流输电的快速控制来提高交流的输送容量和系统运行的稳定性。与葛—南直流输电工程相比, 该工程采用了以下几点新技术。

(1) 为提高直流侧的滤波效果, 直流侧装设了直流有源滤波器。

(2) 为减少直流侧外绝缘的闪络故障, 换流变压器阀侧套管和阀厅的直流穿墙套管均采用新型合成绝缘套管。

(3) 采用光电型直流电流测量装置。

(4) 直流侧的金属回路转换断路器采用 SF_6 断路器。

为了促进换流设备的国产化, 少量的换流阀在国内制造厂进行组装和试验。天—广直流输电工程于 2000 年 12 月极 1 投入运行, 2001 年全部建成。

4. 嵊泗直流输电工程

嵊泗直流输电工程是我国自行设计和建造的双极海底电缆直流工程, 主要解决从上海向嵊泗岛及宝钢马迹山码头的送电问题, 同时也考虑到当嵊泗岛上的风力发电发展到一定规模时, 也具有向上海反送的功能。该工程的主要特点是受端为弱交流系统, 并含有相当大量的宝钢马迹山码头的动态冲击负荷, 从而使工程的控制保护系统以及受端的无功补偿方式在技术上都需进行特殊的考虑。工程为双极, $\pm 50\text{kV}$ 、 600A 、 60MW , 可双向送电。直流输电线路从上海的芦潮港换流站到嵊泗换流站, 共 66.2km , 其中 59.7km 为海底电缆, 6.5km (分两段) 为架空线路。该工程于 2002 年全部建成, 除控制保护装置由许继电气股份有限公司供货外, 其余全部设备均由西安电力机械股份有限公司承包。

5. 三—常直流输电工程

三—常直流输电工程是三峡水电站向华东电网送电的第一个输电工程。该工程为双极 $\pm 500\text{kV}$ 、 3000A 、 3000MW 。直流架空线路从三峡水电站附近的龙泉换流站到江苏常州的政平换流站, 全长 860km 。换流站设备由 ABB 公司承包, 政平换流站的换流变压器和平波电抗器由西门子公司提供。在引进设备的同时, 也进行了技术引进和技术转让, 其中部分主要设备(如换流阀、换流变压器、平波电抗器、晶闸管组件等)在国内制造厂组装。该工程于 2002 年 12 月极 1 投入运行, 2003 年 5 月全部建成。

6. 三—广直流输电工程

三—广直流输电工程是三峡水电站向广东送电和实现华中与华南电网联网的输电工程。该工程为双极 $\pm 500\text{kV}$ 、 3000A 、 3000MW 。直流架空线路从湖北的荆州换流站到广东的惠州换流站, 全长 960km 。该工程于 2004 年 2 月极 1 投入运行, 6 月双极全部建成, 换流站设备

由 ABB 公司供货。

7. 贵—广 1 直流输电工程

贵—广 1 直流输电工程是云、贵电力东送工程，直流架空线路由贵州的安顺换流站到广东的肇庆换流站，全长 880km。该工程为双极±500kV、3000A、3000MW，2004 年 6 月建成，换流站设备由西门子公司供货，采用光直接触发晶闸管（LT）换流阀。

8. 灵宝背靠背直流输电工程

灵宝背靠背直流输电工程实现华中与西北两大电网联网，其主要参数为直流 120kV、360MW、3000A，换流站设备全部采用国产设备，该工程已于 2005 年建成。

9. 三—沪直流输电工程

三—沪直流输电工程是三峡水电站向华东电网的第二个送电工程。该工程全长 1075km，额定参数与三—常直流输电工程相同，2006 投入运行，主设备国产化率达到 70%。

10. 贵—广 2 直流输电工程

贵—广 2 直流输电工程是贵—广第 2 回直流输电工程，全长 1194km，输电电压和容量等与贵—广直流输电工程 1 回相同，2007 投运。

11. 高岭背靠背直流输电工程

高岭背靠背直流输电工程是实现华北与东北两个 500kV 电网之间的联网工程。该工程换流站一期工程为双极±125kV、3000A，两组 750MW 换流器，总容量 1500MW，于 2008 年底建成投运，已成为世界上容量最大的背靠背换流站，最终容量为 3000MW，设备全部由国内提供。

12. 灵宝背靠背直流扩建工程

灵宝背靠背扩建工程是在灵宝背靠背换流站基础上的直流扩建工程，新增换流容量 750MW，是世界上第一个采用晶闸管额定电流为 4500A 的直流工程，已于 2009 年 12 月正式投入运行。该工程标志着国产的世界上首个 6 英寸 4500A 晶闸管一次性通过了额定电流的考核，实现了额定功率输送。

13. 宝—德直流输电工程

宝—德直流输电工程为西北—华中（四川）直流联网工程。该工程规模为双极±500kV、3000A、3000MW。直流架空线路从四川德阳换流站到陕西宝鸡换流站，全长 574km，于 2010 年 4 月正式投入运行。

工程打通了四川与西北的电力大通道，枯水期从煤炭资源丰富的西北电网向四川电网送火电，改善四川目前存在的“丰期弃水、枯期缺电”现状，实现“水火互补，丰枯互济”，实现西北电网与华中（四川）电网更大范围内的资源优化配置，节约能源资源。同时，在灾害情况下华中（四川）电网与西北电网实现互援互济，大大提高华中（四川）电网和西北电网的抗灾害能力和可靠供电水平。该工程全部采用国产设备建设，将进一步提高我国输变电设备自主创新和制造能力，推动直流设备制造技术的自主研发和国产化能力。

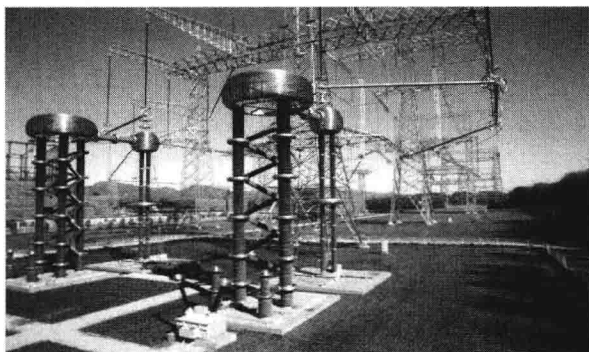
从表 1-1 可以看出，至 2010 年 4 月，我国已投运的高压直流输电工程有 13 个，总容量达 23 720MW。此外，2010 年 4 月后投入运行的工程有±800kV 云南—广东（云—广）特高压直流输电工程（5000MW、1400km）、±800kV 向家坝—上海（向—上）特高压直流输电工程（6400MW、2000km）、±500kV 呼伦贝尔—辽宁（呼—辽）直流输电工程（3000MW、987km）和±660kV 宁东—山东（宁—山）直流输电工程（4000MW、1335km）等，这些工程投运后，

我国高压和特高压直流输电容量将超过 42 000MW，直流输电线路长度达到 13 350km。这标志着我国已成为世界上直流输电容量最大，直流输电电压最高、电压等级最全和发展速度最快的国家。

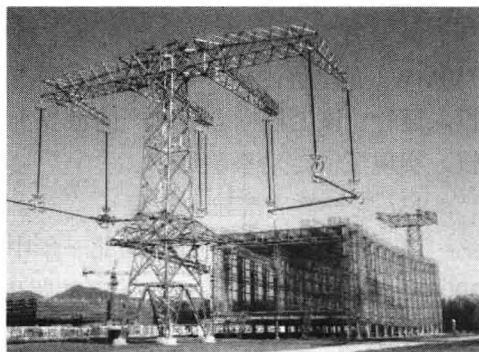
(三) 直流输电技术研究和直流设备国产化

1. 直流输电技术研究

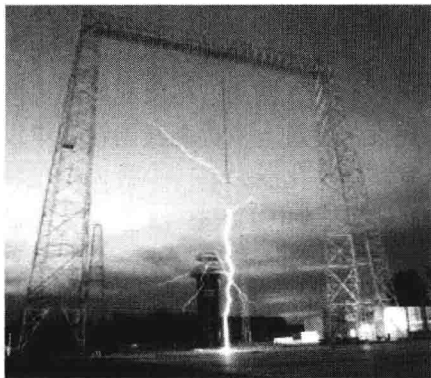
±800kV 级直流输电工程是世界上目前电压等级最高的直流输电工程，国外虽曾进行过一些研究，但无实际工程运行经验。为解决±800kV 直流输电工程的关键技术问题，国家电网公司于 2005 年初启动了特高压直流输电工程关键技术研究 and 可行性研究，组织电力系统各科研、咨询、设计单位和高等院校，开展了对直流输电系统电磁环境、过电压和绝缘配合、外绝缘特性、特高压直流换流器接线方式等问题的研究，并已取得了一批丰硕的成果，为输电线路、换流站设计和主要设备设计和制造提供了技术依据。为使工程建立在更可靠的科学试验的基础上，解决特高压直流输电的关键技术问题，中国电力科学研究院完成了国家电网公司北京特高压直流试验基地和西藏高海拔直流试验基地的建设，开展了±1000kV 及以下特/超高压直流输电的电磁环境、直流设备空气间隙放电特性、绝缘子污秽、外绝缘、直流避雷器等设备关键技术的试验研究，所取得的研究成果达到了世界领先水平。基地的建设和投入使用，标志着中国在特高压直流输电试验能力和试验技术研究方面达到了国际领先地位。图 1-1 为北京特高压直流试验基地主要试验装置，图 1-2 为西藏高海拔试验基地户外试验场。



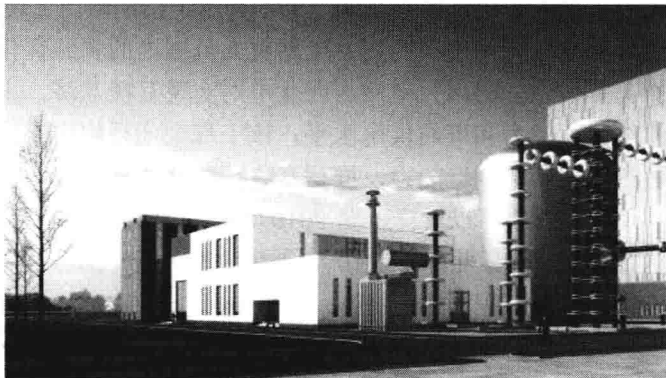
(a)



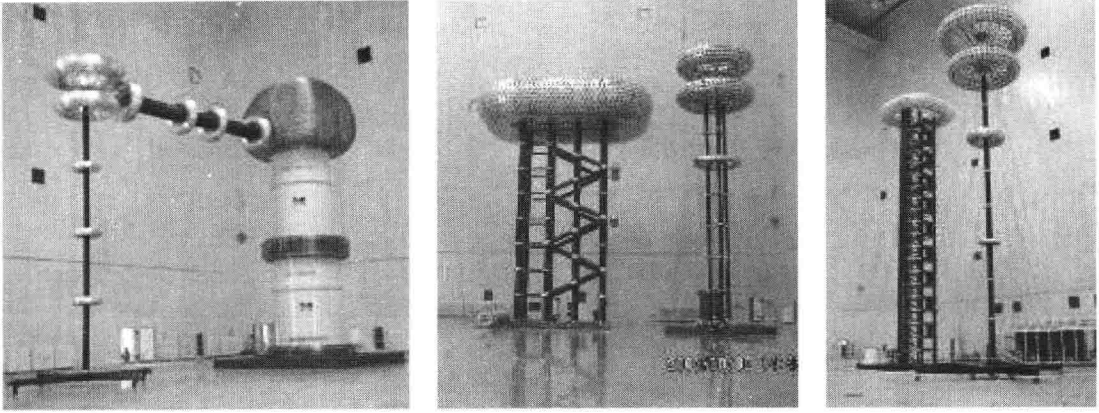
(b)



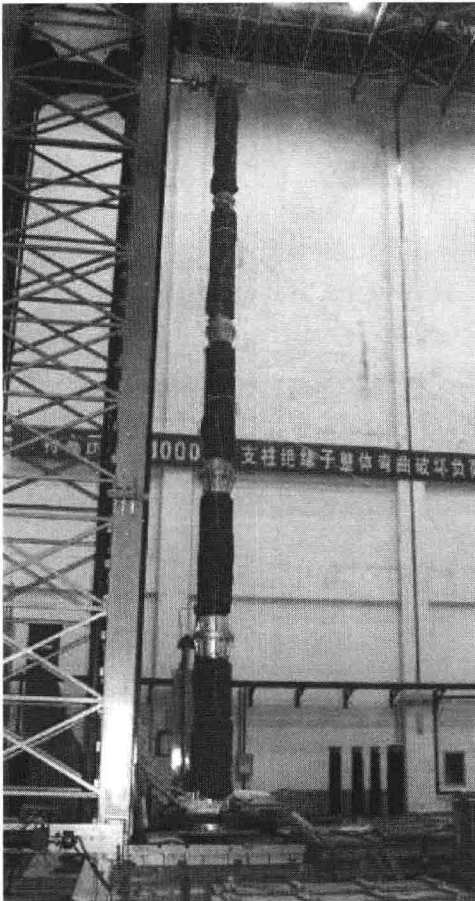
(c)



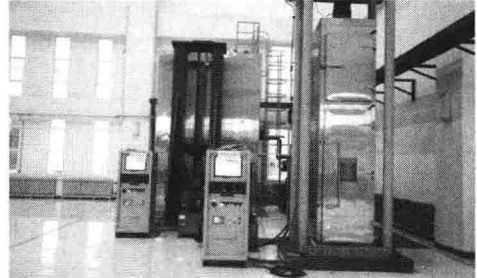
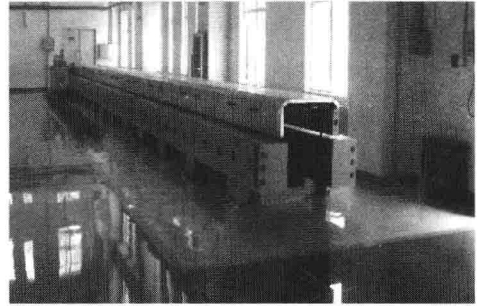
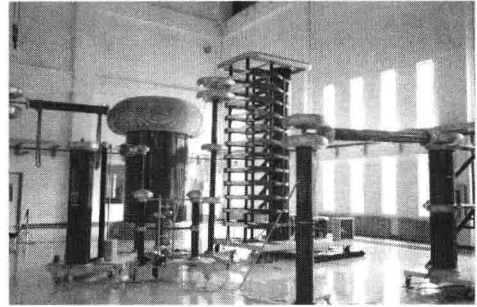
(d)

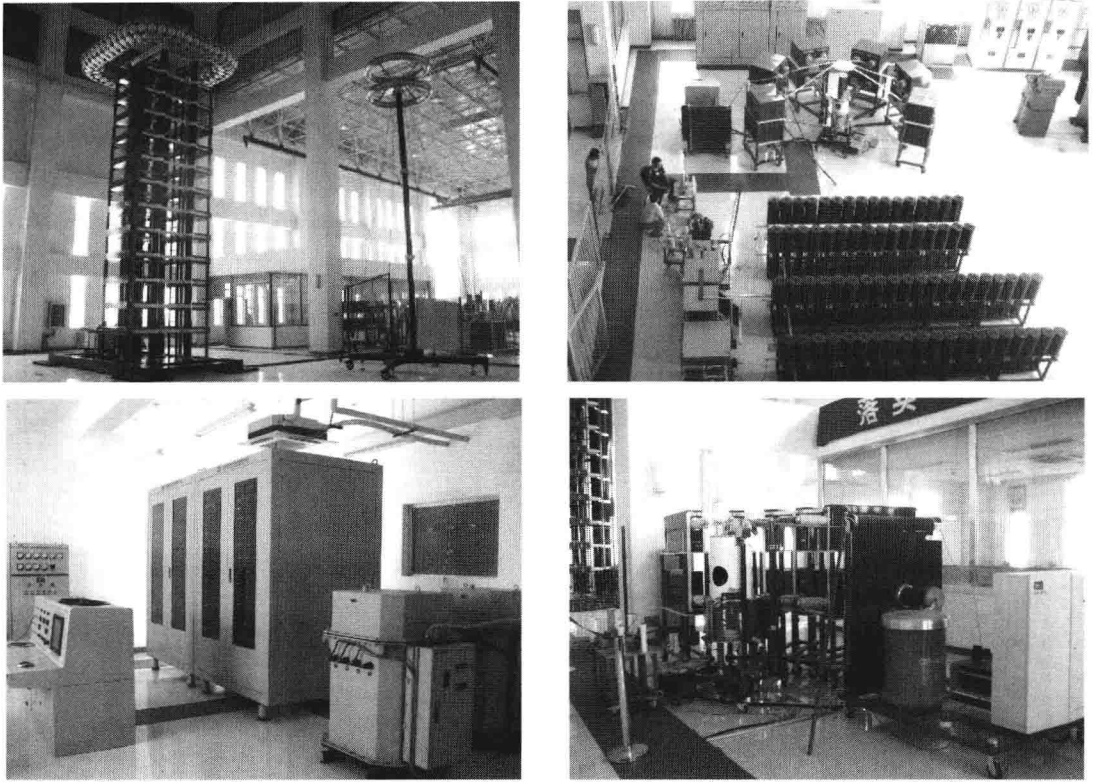


(e)



(f)





(g)

图 1-1 北京特高压直流试验基地主要试验装置

(a) 特高压双回直流试验线段; (b) 两厢式电晕笼; (c) 户外试验场; (d) 污秽及环境实验室;
(e) 直流工频冲击试验大厅; (f) 绝缘子实验室; (g) 避雷器实验室

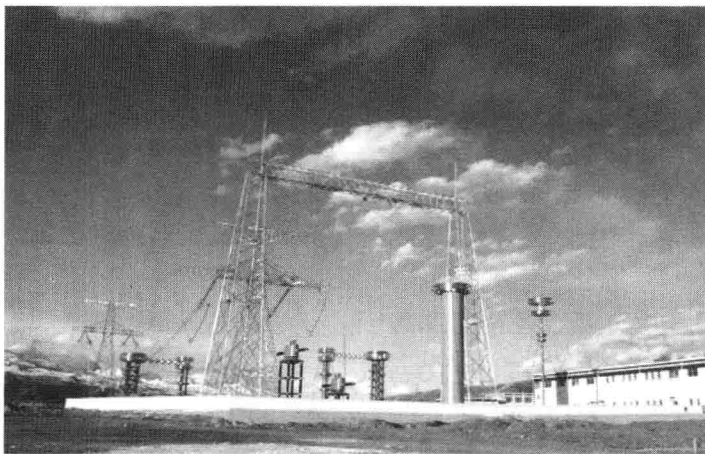


图 1-2 西藏高海拔试验基地户外试验场

2. 直流设备国产化

20 世纪 80 年代, 以国产设备建成了舟山直流输电工程, 但当时的设备技术水平和生产能力与国外还有较大差距, 尚不能满足我国发展超高压直流输电工程的需要。为适应我国超