

 中国南方电网  
CHINA SOUTHERN POWER GRID

电网企业管理岗位培训教材（试用）

G A O Y A Z H I L I U  
S H U D I A N J I C H U

# 高压直流 输电基础

中国南方电网有限责任公司 组编  
广东电网公司 编



中国电力出版社  
www.cepp.com.cn



中国南方电网

CHINA SOUTHERN POWER GRID

电网企业管理岗位培训教材（试用）

GAOYA ZHILIU  
SHUDIAN JICHU

# 高压直流 输电基础

中国南方电网有限责任公司 组编  
广东电网公司 编



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

根据电网生产经营管理、改革和发展的需要,为培养和造就高素质的管理人才队伍,增强管理人员岗位履职能力,结合电网企业规章制度、岗位规范和中国南方电网有限责任公司各类 B 级(主管级、科级)、C 级(一般管理人员)管理人员培训课程体系,组织编写了一套《电网企业管理岗位培训教材(试用)》,教材分生产运行类、基建规划类、经营管理类、行政党群和人力资源类四大类 44 个专业,主要包括 B、C 级公共必修课、专业基础课和岗位主修课教材 50 余册。

本书为《电网企业管理岗位培训教材(试用)》(高压直流输电基础)分册,属于生产运行类生产技术管理、安全监督管理、调度管理、农电管理等专业 B、C 级专业基础课程,共 6 章,主要内容有:第一章高压直流输电概述;第二章高压直流输电系统与设备;第三章高压直流输电技术;第四章高压直流输电工程;第五章交直流电力系统;第六章高压直流输电新技术及新发展。为便于自学、培训和考核,在各章末均附有复习思考题。

本书可作为电网企业(供电企业)生产运行类生产技术管理、安全监督管理、调度管理等专业 B 级(主管级、科级)、C 级(一般管理人员)管理岗位人员的专业基础课培训教材和自学必备用书,也可作为电网企业(供电企业)相关类别管理人员和高等院校相关专业的工商管理教学参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

高压直流输电基础/中国南方电网有限责任公司组编:广东电网公司编. —北京:中国电力出版社,2010  
电网企业管理岗位培训教材:试用  
ISBN 978-7-5083-7640-0

I. 高… II. ①中…②广… III. 高电压-直流-输电技术-技术培训-教材 IV. TM726.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 113518 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2010 年 1 月第一版 2010 年 1 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 13.5 印张 281 千字

印数 0001—3000 册 定价 31.00 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



# 前 言

中国南方电网有限责任公司（以下简称“中国南方电网公司”）于2002年12月29日正式挂牌成立并开始运作。公司经营范围为广东、广西、云南、贵州和海南，负责投资、建设和经营管理南方区域电网，经营相关的输配电业务，参与投资、建设和经营相关的跨区域输变电和联网工程；从事电力购销业务，负责电力交易与调度；从事国内外投融资业务；自主开展外贸流通经营、国际合作、对外工程承包和对外劳务合作等业务。

中国南方电网公司成立以来，认真贯彻落实中央人才工作会议、全国组织工作会议和全国干部教育培训工作会议精神，坚持党管干部、党管人才的原则，大力实施人才强企战略，始终把教育培训作为一项基础性、战略性的工作来抓。在公司党组的正确领导下，公司的教育培训工作深入实践科学发展观，坚持以南网方略统揽全局，以提升员工素质、加强人才队伍建设为目标，以能力建设为核心，大力实施系统性、针对性、人性化、差别化的大规模分类分层培训，构建具有南网特色的教育培训体系，为公司智力资本运作与扩张提供了有力支撑，为推进公司科学发展提供了坚强的政治保证、人才保证和智力支持。

中国南方电网公司的教育培训体系由培训管理、师资、课程、基地和网络五大子系统构成。课程子系统作为其中的重要一环，是开展员工培训的坚实基础和知识源泉。中国南方电网公司的课程体系具有分类分层、重点突出、适当超前等特点。自2006年起，中国南方电网公司就着手组织内、外部专家，启动建设B级（主管级、科级）和C级（一般管理人员）管理人员岗位培训课程体系，共规划了生产运行、基建规划、经营管理、行政党群和人力资源等四大类共44个专业260余门B、C级管理人员公共必修课、专业基础课程和岗位主修课程，确定了管理人员履行岗位职责所必备的现代管理知识和专业管理能力，为提高B、C

级管理人员岗位履职能力奠定了基础。

根据中国南方电网公司 B、C 级管理人员课程体系，我们针对 B、C 级管理人员编制了一套《电网企业管理岗位培训教材（试用）》，共 50 余册，分：公共必修课、专业基础课和岗位主修课教材三大类别。其中，广东电网公司组织编写了生产运行类中的生产技术管理、安全监督管理、调度管理、通信管理、信息管理、农电管理六个专业和基建规划类中的规划专业共 15 册教材；云南电网公司组织编写了行政党群和人力资源类中的行政管理、党群管理、人力资源、纪检监察四个专业共 8 册教材；贵州电网公司组织编写了经营管理类中的电力营销、审计、物流、财务、法律五个专业共 22 册教材；超高压输电公司组织编写了基建规划类中基建专业共 2 册教材；广西电网公司、海南电网公司组织编写了 C 级公共必修课教材。

本套教材按照“在什么工种岗位、懂什么技能，在什么管理岗位、懂什么管理”的要求，从管理人员知识结构出发，以通用管理知识和专业管理技能为主体，面向生产，面向实际，着力提高管理人员的执行能力、组织管理能力和岗位履职能力，体现了教育培训为生产经营中心工作服务的原则，有利于提升 B、C 级管理者知识、技能和价值观三方面的素质，有利于弥补 B、C 级管理者“能力短板”，有利于学以致用、解决实际工作中遇到的问题。《电网企业管理岗位培训教材（试用）》的出版，是中国南方电网公司教育培训工作落实培训“三个转变”和教育培训五年规划的要求，是加强教育培训体系建设的重要成果，必将为提升中国南方电网公司教育培训工作的层次、水平和创建教育培训品牌发挥积极的作用。

本套教材在编写过程中得到中国南方电网公司系统内、外部各有关单位和专家的大力支持和帮助，在此一并表示感谢。欢迎大家在使用过程中对本套教材提出宝贵建议和意见，以使我们不断改进，日臻完善。

中国南方电网有限责任公司

二〇〇九年七月



## 编者的话

为了认真贯彻《2008—2012年中国南方电网有限责任公司教育培训规划》，根据中国南方电网公司B级（主管级、科级）、C级（一般管理人员）管理人员岗位培训课程体系中所规划的生产运行类、基建规划类、经营管理类、行政党群和人力资源类四大类共44个专业260余门B、C级公共必修课或专业基础课程、岗位主修课程，以及所确定了管理人员履行岗位职责所必备的专业管理知识和业务管理能力，中国南方电网公司人事部组织广东电网公司、云南电网公司、贵州电网公司、超高压输电公司、广西电网公司和海南电网公司等专家和管理技术人员，编制了一套50余册的B、C级公共必修课、专业基础课和岗位主修课教材，即《电网企业管理岗位培训教材（试用）》。

根据中国南方电网有限责任公司“强本、创新、领先”的发展思路，为夯实培训基础，按照南网公司B、C级管理人员教育培训课程体系开发工作的总体安排，广东电网公司承担了生产运行类专业的课程开发任务。为此，广东电网公司组织专门力量进行课程开发，在公司人事部、生产技术部、调度中心、通信公司等部门和单位的大力支持下，编写完成了生产运行类中的生产技术管理、安全监督管理、调度管理、通信管理、信息管理、农电管理六个专业和基建规划类中的规划专业的B、C级管理人员岗位培训教材共15册。

本书是在中国南方电网公司人事部组织部署和广东电网公司直接领导下完成了编写、审定、编辑等工作。此书为《电网企业管理岗位培训教材（试用）》高压直流输电基础分册，属于生产运行类生产技术管理、安全监督管理、调度管理等专业B级（主管级、科级）、C级（一般管理人员）管理岗位人员的专业基础课程，共6章，主要内容有：第一章高压直流输电概述；第二章高压直流输电系统与设备；第三章高压直流输电技术；第四章高压直流输电工程；第五章交直流电力系统；第六章高压直流输电新技术及新发展。为便于自学、培训和考核，在

各章末均附有复习思考题。

本书在编写过程中参考了电网企业生产运行专业方面比较成熟的书籍和资料，结合电网生产运行管理工作实际，坚持科学性、系统性、先进性、针对性和实用性的原则，努力做到突出职能、面对实践、指导工作和便于实施的基本要求，内容深入浅出，文字通俗易懂，便于阅读自学，对输电专业管理人员具有较强的针对性和适应性，适用于生产运行类生产技术管理、安全监督管理、调度管理、农电管理等专业 B、C 级管理人员的专业基础课培训，也可作为大专院校相关专业学习生产运行类生产技术管理、安全监督管理和调度管理等的参考资料。

本书为 B、C 级共用专业基础课程教材，在教材正文、目录中标注有“\*”的章节为 B 级在 C 级基础上再添加的必修内容；未标注有“\*”的章节为 C 级必修内容。

本书由张一工主编，文俊、刘晋副主编，第一至三章由张一工、刘晋编写，第四至六章由文俊编写。

本书由彭海跃、蔡颖组织编审，马辉主审，周华敏、肖遥、顾振洁、邢建、吴佩琦、黄文载、李连叶、杨永祥、袁静帆参加审核。在编审过程中得到中国南方电网公司生产技术部、云南电网公司、贵州电网公司、广西电网公司、海南电网公司、超高压输电公司等单位的大力支持及帮助，在此表示衷心感谢！

由于编者水平有限，书中难免有错误与疏漏之处，恳请广大读者批评指正，并提出宝贵意见。

编 者

二〇〇九年七月



# 目 录

前言

编者的话

<b>第一章 高压直流输电概述</b> .....	1
第一节 高压直流输电的优点.....	1
第二节 高压直流输电的缺点.....	3
第三节 高压直流输电的发展历史与应用.....	4
复习思考题.....	9
<b>第二章 高压直流输电系统与设备</b> .....	10
第一节 高压直流输电的接线方式.....	10
第二节 高压直流输电的主要设备.....	16
复习思考题.....	40
<b>第三章 高压直流输电技术</b> .....	41
第一节 直流输电换流技术.....	41
第二节 换流站无功补偿与交直流侧滤波.....	54
第三节 直流输电控制与稳态特性.....	77
* 第四节 直流输电系统故障分析与保护.....	114
* 第五节 直流输电系统过电压保护与换流站绝缘配合.....	126
* 第六节 直流输电线路、外绝缘、接地极.....	134
* 第七节 直流输电对环境的影响.....	149
第八节 换流站典型电气操作.....	155
复习思考题.....	161
<b>第四章 高压直流输电工程</b> .....	163
第一节 两端直流输电工程.....	163
第二节 背靠背直流输电工程.....	165

* 第三节 多端直流输电工程·····	168
第四节 多馈入直流输电工程·····	173
第五节 我国的直流输电工程·····	175
复习思考题·····	176
<b>第五章 交直流电力系统·····</b>	<b>177</b>
第一节 直流输电作为两个同步交流系统间的联络线·····	178
第二节 交直流并联输电系统·····	180
* 第三节 直流偏磁·····	180
复习思考题·····	182
<b>第六章 高压直流输电新技术及新发展·····</b>	<b>183</b>
* 第一节 光触发晶闸管·····	183
* 第二节 强迫换相换流器·····	187
第三节 轻型直流输电·····	192
第四节 特高压直流输电·····	198
复习思考题·····	202
<b>参考文献·····</b>	<b>203</b>
<b>附表 《电网企业管理岗位培训教材（试用）》使用对照表·····</b>	<b>204</b>

## 第一章

## 高压直流输电概述

高压直流输电(HVDC)在远距离大容量输电、电力系统非同步联网和海底电缆送电等方面具有独特的优势,作为交流输电的有力补充而在世界范围内得到了广泛的应用,在我国21世纪“西电东送、南北互供、全国联网”的能源和电力工业建设基本战略的实施中更是具有广阔的应用发展前景。

高压直流输电工程的主要特点与其两端需要换流和输电部分为直流电这两个基本点有关。直流输电技术的发展与换流技术的发展,特别是大功率电力电子技术的发展有着密切关系。目前,绝大部分直流输电工程采用普通晶闸管换流阀(无自关断能力、频率低)进行换流。随着可关断的新型电力电子器件(如IGBT、IGCT等)在直流输电工程中的逐步采用,将使直流输电的某些缺点得到克服或改善。

### 第一节 高压直流输电的优点

高压直流输电的优点如下:

(1) 高压直流输电架空线路只需正负两根导线,杆塔结构简单,线路造价低,损耗小。与交流输电相比,输送同样的功率,高压直流架空线路可节省约 $1/3$ 的导线, $1/3\sim 1/2$ 的钢材,线路造价约为交流输电的 $2/3$ ,并且在此条件下其线路损耗约为交流的 $2/3$ 。高压直流输电所占的线路走廊也较窄。在直流电压作用下,线路电容不起作用,不存在电容电流,线路沿线的电压分布均匀,不存在交流输电由于电容电流而引起的沿线电压分布不均匀问题,因此不需要装设并联电抗器。

(2) 直流电缆线路输送容量大、造价低、损耗小、不易老化、寿命长,且输送距离不受限制。电缆耐受直流电压的能力比耐受交流电压的能力高3倍以上,因此同样绝缘厚度和芯线截面的电缆,用于高压直流输电比用于交流输电的输电容量要大很多。直流电缆线路只需一根(单极)或两根(双极)电缆,而交流线路则需要U、V、W三相三根电缆。因此直流电缆线路的造价比交流要低许多。直流电缆线路的损耗主要是线路电阻损耗,而交流电缆除线路电阻损耗外,还有绝缘中的介质损耗和铅皮及铠装中的磁感应损耗。电缆线路的对地电容比架空线路要大得多,交流线路由此所产生的电容电流很大。电容电流势必降低电缆的有效负荷能力,当电容电流等于电缆所允许的负荷电流时,芯线的全部负荷能力均被电容电流所占用,此时电力已不可能用交流电缆来输送。因此交流电缆的输送距离将受电容电流的限制。直流电缆不存在电容电流,其输送距离将不受限制,有利于实现远距离电缆送电。

(3) 高压直流输电不存在交流输电的稳定问题,有利于远距离大容量送电。交流

输电的输送功率  $P$  可用式 (1-1) 表示

$$P = \frac{E_1 E_2}{X_{12}} \sin \delta \quad (1-1)$$

式中： $E_1$ 、 $E_2$  分别为送端和受端交流系统的等值电动势； $\delta$  为  $E_1$  和  $E_2$  两个电动势之间的相位差，称为功率角； $X_{12}$  为  $E_1$  和  $E_2$  之间的等值电抗，对于远距离输电  $X_{12}$  主要是输电线路的电抗。

当  $\delta = 90^\circ$  时， $P = P_{\max} = \frac{E_1 E_2}{X_{12}}$ 。其中  $P_{\max}$  为输电线路的静态稳定极限。输电线路的输送功率必须小于  $P_{\max}$ ，因为在运行中如果输送功率接近  $P_{\max}$ ，当系统有小扰动时，则可能使  $\delta > 90^\circ$ ，此时两端交流系统将会失去同步，可能导致两个系统解列。随着输送距离的增加， $X_{12}$  将增加，允许的输送功率将减小。为增加输送功率而必须采取的提高稳定的措施有：增设串联电容补偿，增加输电线路回路数以减少  $X_{12}$ ；采用快速切故障及重合闸；送端系统快速切机，强行励磁等。这些措施的采用将使输电系统的投资增加。高压直流输电的两端交流系统经过整流和逆变的隔离，无需同步运行，不存在同步运行的稳定问题，其输送容量和距离将不受同步运行稳定性的限制，这对于远距离大容量输电是很有利的。

(4) 采用高压直流输电实现交流系统之间的非同步联网，可以不增加被联网的短路容量，不必由于短路容量的增加而更换断路器或采取限流的措施；被联网可以是额定频率不同（如 50Hz 和 60Hz）的电网，也可以是额定频率相同但非同步运行的电网；被联网可保持自己的电能质量（如频率、电压）而独立运行，不受联网的影响；被联网之间交换的功率可快速方便地进行控制，有利于运行和管理。

(5) 高压直流输电输送的有功功率以及换流站吸收的无功功率可由控制系统进行快速控制，利用这种快速可控性来改善交流系统的运行性能。根据交流系统在运行中的要求，可快速增加或减少直流输送的有功功率以及换流站吸收的无功功率，对交流系统的有功平衡及无功平衡起快速调节作用，从而提高交流系统频率和电压的稳定性，提高电能质量和电网运行的可靠性。对于交直流并联运行的输电系统，还可以利用直流的快速控制来阻尼交流系统的低频振荡，提高交流线路的输送能力。

(6) 在直流电的作用下，只有电阻起作用，电感和电容均不起作用，高压直流输电采用大地为回路，直流电流则向电阻率很低的大地深层流去，可很好地利用大地这个良导体。利用大地回路可省去一根导线，同时大地的电阻率低、损耗小、运行费用也低。在双极直流输电系统中，通常采用大地回路作为备用导线，使双极系统相当于两个可独立运行的单极系统。当一极故障时，可自动转为单极系统运行，提高了输电系统的运行可靠性。

(7) 高压直流输电可方便地进行分期建设和增容扩建，有利于发挥投资效益。双极高压直流输电工程可按极来分期建设，先建一个极，单极运行，后再建另一个极。也可以每极选择两组基本换流单元（串联接线或并联接线），第一期先建一组（为输送

容量的1/4)单极运行;第二期再建一组(为输送容量的1/2)双极运行;第三期再增加一组,可双极不对称运行(为输送容量的3/4),当两组换流单元为串联接线时,两极的电压不对称,为并联接线时,则两极的电流不对称;第四期则整个双极工程完全建成。

## 第二节 高压直流输电的缺点

高压直流输电的缺点如下:

(1) 高压直流输电换流站比交流变电站的设备多,结构复杂,造价高,损耗大,运行费用高,可靠性也较差。通常交流变电站的主要设备是变压器和断路器,而直流换流站除换流变压器和相应的断路器以外,还有换流器、平波电抗器、交流滤波器、直流滤波器、无功补偿设备以及各种类型的交流和直流避雷器等。因此换流站的造价比同样规模的交流变电站的造价要高出数倍。由于设备多,换流站的损耗和运行费用也相应增加,同时换流站的运行和维护较复杂,对运行人员的要求较高。

(2) 换流器对交流系统而言,除了是一个负荷(在整流站)或电源(在逆变站)以外,还是一个谐波电流源。它使得交流电流波形畸变,向交流系统发出一系列谐波电流,由此也造成交流电压波形的畸变。为了减少流入交流系统的谐波电流,保证换流站交流母线电压的畸变率在允许的范围内,必须装设交流滤波器。另一方面,换流器对直流侧而言,除了是一个电源(在整流站)或负荷(在逆变站)以外,还是一个谐波电压源。它使得直流电压波形畸变,向直流侧发出一系列的谐波电压,在直流线路上产生谐波电流。为了保证直流线路上的谐波电流在允许的范围内,在直流侧必须装设平波电抗器和直流滤波器。交、直流滤波器使换流站的造价、占地面积和运行费用均大幅度提高,同时也降低了换流站的运行可靠性。当采用新型高频可关断半导体器件和脉宽调制(PWM)技术进行换流时,换流器所产生的谐波将大幅度降低,滤波系统则可相应地简化。

(3) 晶闸管换流器在进行换流时需要消耗大量的无功功率,其值约占高压直流输送功率的40%~60%。每个换流站均需装设无功补偿设备。当交流滤波器所提供的无功功率不能满足无功补偿的要求时,还需另外装设无功补偿电容器。当换流站接于弱交流系统时,为提高系统动态电压的稳定性和改善换相条件,有时还需要装设同步调相机或静止无功补偿装置(SVC)。这同样需要增加换流站的投资和运行费用。当采用新型可关断半导体器件或电容换相换流器时,无功补偿问题将会得到解决。

(4) 高压直流输电利用大地(或海水)为回路会带来一些技术问题,如接地极附近地下(或海水中)的直流电流对金属构件、管道、电缆等埋设物的电化学腐蚀,地中直流电流通过中性点接地变压器使变压器饱和所引起的直流偏磁;对通信系统和航海磁性罗盘的干扰等。对于每项具体的高压直流输电工程,在工程设计时,对上述问题必须进行充分的研究,采取相应的技术措施。

(5) 直流断路器由于没有电流过零点可以利用, 灭弧问题难以解决, 给直流断路器制造带来困难。国外对直流断路器虽然进行了大量的研究和试制, 但到目前为止, 仍没有满意的产品提供给工程使用, 使多端高压直流输电工程发展缓慢。利用高压直流输电的快速控制能力, 在工程上已可以解决多端高压直流输电的故障处理等问题, 但其控制系统相当复杂, 仍需要在实际工程运行中进行考验和改进。当采用新型可关断半导体器件进行换流时, 直流断路器的功能将由换流器来承担。

### 第三节 高压直流输电的发展历史与应用

#### 一、高压直流输电的发展历史

高压直流输电由于具备了交流输电不能比拟的优点, 使其在电力系统中逐渐得到广泛应用。

电力技术的发展是从直流电开始的, 早期的直流输电不需要经过换流, 直流功率直接从直流电源送往直流负荷, 即发电、输电和用电均为直流电。如 1882 年在德国建成的 2kV、1.5kW、57km 向慕尼黑国际展览会的送电工程; 1889 年在法国用直流发电机串联而得到高电压, 从毛梯埃斯 (Moutiers) 到里昂 (Lyon) 的 125kV、20MW、230km 的直流输电工程等。随着三相交流发电机、感应电动机和变压器的迅速发展, 发电和用电领域很快被交流电所取代。同时变压器又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。但在输电领域, 直流还有交流所不能取代之处, 如远距离电缆送电、不同频率电网之间的联网等。

在发电和用电的绝大部分均为交流电的情况下, 要采用直流输电, 必须解决换流问题。因此, 直流输电的发展与换流技术的发展 (特别是高电压大功率换流设备的发展) 有密切的关系。直流输电的发展可分为以下几个时期。

##### 1. 汞弧阀换流时期

1901 年发明的汞弧整流管只能用于整流, 而不能进行逆变。1928 年具有栅极控制能力的汞弧阀研制成功, 它不但可用于整流, 同时也解决了逆变问题。因此, 可以说大功率汞弧阀的问世使现代意义的直流输电成为现实。从 1954 年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) 在瑞典投入运行, 到 1977 年最后一个采用汞弧阀换流的直流输电工程 (加拿大纳尔逊河 I 期工程) 建成, 世界上共有 12 项采用汞弧阀换流的直流输电工程投入运行。其中最大输送容量和最长输送距离的直流输电工程为美国太平洋联络线工程 (1440MW、1362km), 最高输电电压的直流输电工程为加拿大纳尔逊河 I 期工程 ( $\pm 450\text{kV}$ )。这一时期可称为汞弧阀换流时期。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) 以及用于前苏联伏尔加格勒—顿巴斯直流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. 晶闸管换流时期

20世纪70年代以后,电力电子技术和微电子技术迅速发展,高压大功率晶闸管问世,晶闸管换流阀和微机控制技术在直流输电工程中普遍应用,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年瑞典首先在果特兰岛直流工程上扩建了50kV、10MW、采用晶闸管换流阀的试验工程。1972年世界上第一个采用晶闸管换流阀的伊尔河背靠背直流工程在加拿大投入运行。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输电工程也逐步被晶闸管阀所替代。20世纪70年代以后汞弧阀被淘汰,开始了晶闸管换流时期。在此期间,微机控制和保护、光电传输技术、水冷技术等新技术在直流输电工程中也得到了广泛的应用,促使直流输电技术进一步发展。

1954~2000年,世界上已投入运行的直流输电工程共有63项,其中架空线路工程17项,电缆线路工程8项,架空线和电缆混合线路工程12项,背靠背工程26项。在已运行的直流输电工程中,架空线路电压最高( $\pm 600\text{kV}$ )和输送容量最大(6300MW)的是巴西伊泰普直流工程,输送距离最长(1700km)的是南非英加一沙巴直流工程;电缆线路输送容量最大(2000MW)的是英法海峡直流工程,最高电压(450kV)和最长距离(250km)的是瑞典—德国的波罗底海直流工程;背靠背换流站最大容量(1065MW)的是俄罗斯—芬兰之间的维堡直流工程。在此时期,直流输电在远距离大容量输电、电网互联和电缆送电(特别是海底电缆)等方面均发挥了重大的作用。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)首先在电机驱动装置上得到广泛应用。1997年3月世界上第一个采用IGBT组成电压源换流器的直流输电工业性试验工程在瑞典中部投入运行,其输送功率和电压为3MW、10kV,输送距离为10km,这种被称为轻型直流输电(HVDC Light)的工程在小型输电工程中具有较强的竞争力。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单个元件的功率小、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)和大功率碳化硅元件,在直流输电工程中有很好的应用前景。这类元件的额定电压高、通流能力大、损耗低、体积小、可靠性高,更重要的是具有自关断能力。因此,这些新型的半导体换流器件将会逐步取代普通晶闸管,有力地推动直流输电技术的发展。

中国的直流输电工程是在1958年考虑长江三峡水利资源的开发以及三峡电站的电力外送问题时提出的,从那时起,国内的科研单位和高等院校开始进行直流输电的

研究工作。1963年在中国电力科学研究院建成1000V、5A的直流输电物理模拟装置。该套装置主要包括两组由闸流管组成的6脉动换流器、换流变压器物理模型、平波电抗器物理模型、输电线路物理模型以及电磁型和电子型的控制保护装置等。利用该套装置开始了对直流输电换流技术及控制保护系统的研究。20世纪70年代以后,对该套装置进行了技术更新和改造,用晶闸管替换了原来的闸流管并采用了数字式的控制保护系统。1980年随着葛—南大型直流输电工程的技术引进,从瑞士BBC公司引进了一套先进的大型直流输电模拟装置,它主要包括:8组由晶闸管组成的12脉动换流器及其配套的8组换流变压器、交流滤波器、直流滤波器及平波电抗器模型;60组可以模拟3000km直流(或交流)线路的线路模型;5组数字式发电机模型;2组交流电源模型;1组静止无功补偿模型以及相应的交、直流开关模型及避雷器模型等。控制保护采用与葛—南直流输电工程相同的由可编程高速处理器(PHSC)组成的微机控制系统。每组12脉动换流器的额定参数是200V、250mA、50W。该套模拟装置在葛—南直流输电工程的系统研究、调试和运行的研究工作中发挥了重要的作用,同时还为天—广直流输电工程、三峡向华东及广东送电、西北向华北送电等直流工程,进行了大量的研究工作。20世纪90年代,在该套装置上又增加了全数字化的直流输电仿真系统(RTDS),并且与暂态网络分析装置(TNA)相连,从而具备了进行更大规模试验研究工作的能力。在此基础上,在中国电力科学研究院成立了电力系统仿真中心。与此同时,在浙江大学、华北电力大学以及西安高压电器研究所也先后建立了不同类型的直流输电模拟装置并进行了各项研究工作。为了开展直流高电压技术的研究,在中国电力科学研究院和西安高压电器研究所还建立了能够满足±500kV直流输电工程的研究工作所需要的直流高压发生器,并开展了直流高电压技术的研究。

## 二、直流输电的应用

直流输电的应用范围取决于直流输电技术的发展水平和电力工业发展的需要。目前实际应用的输电方式有交流输电和直流输电两种。交流输电在大多数情况下投资省,运行灵活方便,技术比较成熟,在电力系统中得到广泛的应用。在目前的技术发展水平下,直流输电还只是交流输电的补充。随着直流输电技术的发展,其应用范围将会扩大。直流输电的应用场合可分为以下两大类型:

(1) 采用交流输电在技术上有困难或不可能,而只能采用直流输电的场合,如不同频率(如50Hz和60Hz)电网之间的联网或向不同频率的电网送电;因稳定问题采用交流输电难以实现;远距离电缆送电,采用交流电缆因电容电流太大而无法实现等。

(2) 在技术上采用两种输电方式均能实现,但采用直流输电比交流输电的技术经济性能好。对于这种情况则需要对工程的输电方案进行比较和论证,最后根据比较的结果选择技术经济性能优越的方案。

目前直流输电主要应用在以下几个方面:

(1) 远距离大容量输电。直流输电线路的造价和运行费用均比交流输电低，而换流站的造价和运行费用均比交流变电站高。因此，对同样的输送容量，输送距离越远，直流输电比交流输电的经济性越好。随着输送距离的增加，交流输电的容量将受其稳定极限的限制，为提高输送能力，往往需要采用各种技术措施，从而进一步增加交流输电的投资。

当直流输电线路和换流站的造价与交流输电线路和变电站的造价相等时，输电距离通常定义为“等价距离”（见图1-1），也就是说，对于一定的输送功率，当输电距离大于等价距离时，采用直流输电比较经济。等价距离与交流输电线路的造价、交流变电站和直流换流站的造价、交流输电和直流输电系统的损耗和运行费用、损耗的电能价格等一系列经济指标有关。对于不同的国家，由于上述经济指标不同，其等价距离也不相同。目前，国外架空线路的等价距离约为600~800km，而电缆线路约为20~40km。

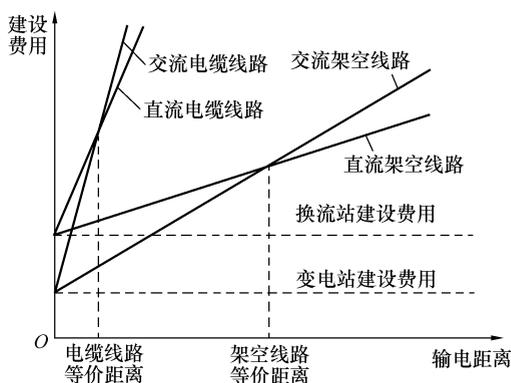


图 1-1 交直流输电建设费用与输电距离的关系图

目前，国外架空线路的等价距离约为600~800km，而电缆线路约为20~40km。

(2) 电力系统联网。电力系统发展的趋势势必走向联网，因为这有利于资源的优化配置和应用，可以得到很好的联网效益。用传统的交流输电方式联网将形成同步运行的大电网，可以取得联网效益，但也带来一些大电网存在的问题（如稳定问题，故障后可能引起的大面积停电问题，短路容量增大问题等）。采用直流输电联网，既可取得联网效益，又能避免大电网带来的问题，同时还能改善被联交流电网的运行性能。用直联联网主要有以下优点：

1) 直流联网为非同步联网，这与采用交流的同步联网有本质的不同。非同步联网的被联电网可用各自的频率非同步独立运行，可保持各个电网自己的电能质量（如频率、电压）而不受联网的影响。而采用交流的同步联网，被联电网联网后必须在同一频率下同步运行。

2) 被联电网间交换的功率，可以通过直流输电的控制系统进行快速、方便地控制，而不受被联电网运行条件的影响，便于经营和管理。而采用交流联网，联络线上的功率受两端电网运行情况的影响而很难进行控制。

3) 联网后不增加被联电网的短路容量，不必考虑因短路容量增加造成遮断容量不够而需要更换断路器，以及电缆需要采用限流措施等问题。

4) 可以方便地利用直流输电的快速控制来改善交流电网的运行性能，减少故障时两电网间的相互影响，提高电网运行的稳定性，降低大电网大面积停电的概率，提高大电网运行的可靠性。

目前直流联网工程主要有以下两种类型:

①远距离大容量直流输电同时又具有联网性质。当电力系统的大型电站需要向其他电网远离电站的负荷中心送电时,可以利用直流输电在远距离输电和联网方面的优点,选择这种类型的输电方式。中国三峡电站向华东和广东送电,均属于这种类型,它既解决了三峡向华东和广东的送电问题,又实现了华中与华东和华中与华南电网的联网问题,在全国联网中起到了重要的作用。

②背靠背直流联网。其特点是整流和逆变放在同一个换流站内,无直流输电线路,可选择较低的直流电压和较小的平波电抗值,可省去直流滤波器,从而降低换流站的造价。另外,它还可以比远距离直流输电更为方便地调节换流站的无功功率,有利于改善被联电网的电压稳定性。对于电力系统之间的弱联系,采用背靠背联网更为有利。

(3) 直流电缆送电。直流电缆没有电容电流,输送容量不受距离的限制,而交流电缆由于电容电流很大,其输送距离将受到限制。即使在技术上采用交流电缆也能实现输电的情况下,由于直流电缆的造价低、损耗小、输送容量大等优点,输电方案论证的结果也往往是直流方案优于交流方案。因此,远距离大容量跨海峡的海底电缆送电大部分均采用直流电缆。大城市附近建设大型电站受环境污染条件的限制,往往是不允许的。而大城市的用电密度高,人口稠密,架空线路的走廊难以选择。采用高压直流地下电缆将远处的电力送往大城市的负荷中心是一种有竞争力的选择方案。

(4) 现有交流输电线路的增容改造。高压架空线路走廊的选择越来越困难。直流输电的输电密度比交流输电高,改建现有交流输电线路为直流输电线路是利用已有的线路走廊,提高输电能力值得考虑的办法。假定利用原交流线路的导线,将 U、V、W 三相改为直流输电的正、负两极(总导线截面不变),在直流输电和交流输电电流密度相同的条件下,直流线路电流可比原交流线路电流增加 1.5 倍。因为直流极线的导线截面比原交流每相的导线截面增大 1.5 倍。交流线路的改造主要是导线的重新排列,绝缘子串的加长或更换,铁塔塔头的改造(塔身和基础均不变)。可以粗略地认为,当选择交、直流输电线路的电流密度相等时,架空线路可提高输送容量 1.5~2.5 倍,而电缆线路则可提高 3~5 倍。如果考虑到直流输电线路的电流密度可以比交流输电更高时,则改建后的直流输电工程的输送容量还可以更大一些。此外,将交流输电改为直流输电后,还可以利用直流的快速控制能力来改善交流系统的运行性能,提高系统的运行可靠性。在进行工程改造时,输电线路的两端必须新建整流站和逆变站,这将需要相应的投资。对于具体的工程,均需由全面的技术经济论证来确定。

(5) 轻型直流输电(HVDC Light)。轻型直流输电是 20 世纪 90 年代开始发展的一种新型直流输电工程,它采用可关断电力电子器件组成的电压源换流器进行换流。由于这种换流器的功能强、体积小,可减少换流站的设备、简化换流站的结构,从而称之为轻型直流输电系统或电压源型直流输电系统。它主要应用于向孤立的远方小负