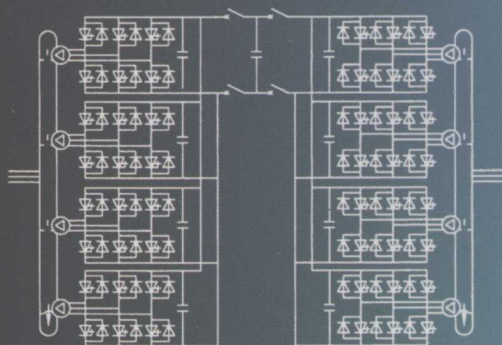


电力电子
新技术系列图书

New Technology Series in
Power Electronics



◎韩民晓 文俊 徐永海 编著

高压直流输电 原理与运行

GAOYAZHILIUSHUDIAN
YUANLI YU YUNXING



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

最新成果, 设计优秀, 重要工程应用, 对于中、小型直流输电工程, 具有重要的参考价值。全书共分六章, 第一章为绪论, 第二章至第六章分别为直流输电的换流站、直流输电线路、直流输电系统的保护、直流输电系统的运行、直流输电系统的故障分析及直流输电系统的新技术。本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业及相关专业的教材, 也可供从事直流输电工程设计的工程技术人员参考。

高压直流输电 原理与运行

图书在版编目(CIP)数据

高压直流输电原理与运行 / 李永刚, 李永刚主编. — 北京: 机械工业出版社, 2008.
ISBN 978-7-111-25098-3
I. ①高... II. ①李... ②李... III. ①高压直流输电—原理—教材 IV. ①TM7-44
中国图书馆分类号: TM7-44
机械工业出版社



机械工业出版社
地址: 北京市西城区百万庄大街24号
邮政编码: 100037
电话: (010) 88379673
电邮: jcb@vip.sina.com
网址: www.cmpbook.com

高压直流输电是电力电子技术应用最为重要、最为传统，也是发展最为活跃的领域之一。本书在论述了直流输电基本概念、构成、发展及主要设备的基础上，讨论了直流输电的基本工作原理、谐波与无功问题、直流输电的控制与保护、直流输电与交流系统的相互作用及对交流系统的控制作用，论述了包括器件换相直流输电技术和特高压直流输电技术等直流输电技术的新进展。本书的目的在于强调电力电子技术应用领域中高压直流输电的重要作用，可作为站在电力电子技术角度探讨其在电力系统中的应用或站在电力系统角度探讨电力电子技术的作用等相关领域的学习、研究及工程应用的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

高压直流输电原理与运行/韩民晓等编著. —北京: 机械工业出版社, 2008. 9

(电力电子新技术系列图书)

ISBN 978-7-111-25098-2

I. 高... II. 韩... III. 高电压—直流—输电技术—研究
IV. TM726. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 140428 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: 孙流芳

责任编辑: 罗 莉

版式设计: 霍永明

责任校对: 樊钟英

封面设计: 马精明

责任印制: 李 妍

北京富生印刷厂印刷

2009 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 15.25 印张 · 296 千字

0001—4000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-25098-2

定价: 30.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379178

封面无防伪标均为盗版

电力电子新技术系列图书

编辑委员会

主任: 王兆安

副主任: 白继彬 牛新国 徐德鸿 杨耕

委员: (按姓名拼音字母排序)

白继彬 陈伯时 陈道炼 陈坚 陈守良

陈治明 高艳霞 郭世明 黄耀先 康勇

李崇坚 李永东 刘进军 吕征宇 牛新国

钱照明 阮新波 孙流芳 童宗鉴 王鸿麟

王旭东 王兆安 邬伟扬 肖湘宁 徐德鸿

徐殿国 杨耕 杨旭 余岳辉 张波

张承慧 张为佐 张卫平 张兴 赵善麒

赵争鸣 钟彦儒 周波 周维维 查晓明

秘书组: 陈守良 刘进军 孙流芳 罗莉

电力电子新技术系列图书

序 言

电力电子技术诞生近半个世纪以来，使电气工程、电子技术、自动化技术等领域发生了深刻的变化，同时也给人们的生活带来了巨大的影响。

目前，电力电子技术仍以迅猛的速度发展着，新的电力电子器件层出不穷，新的技术不断涌现，其应用范围也不断扩展。不论在全世界还是在我国，电力电子技术都已造就了一个很大的产业群，如果再考虑到与电力电子技术相关的上游产业和下游产业，这个产业群就更加庞大了。与之相应，在电力电子技术领域工作的工程技术和科研人员的数量也相当庞大，且与日俱增。因此，组织出版有关电力电子新技术及其应用的系列书籍，以供广大从事电力电子技术的工程师和高等学校教师和研究生在工程实践中使用和参考，成为眼下的迫切需要。

在20世纪80年代，电力电子学会曾和机械工业出版社合作，出版过一套电力电子技术丛书，那套丛书对推动电力电子技术的发展起过积极的作用。最近，电力电子学会经过认真考虑，认为有必要以“电力电子新技术系列图书”的名义出版一系列著作。为此，成立了专门的编辑委员会，负责确定书目、组稿和审稿工作，向机械工业出版社推荐，仍由机械工业出版社出版。

本系列图书有如下特色：

1. 本系列图书属专题论著性质，选题新颖，力求反映电力电子技术的新成就和新经验，以适应我国经济迅速发展的需要。

2. 理论联系实际，以应用技术为主。

3. 本系列图书组稿和评审过程严格，作者都是在电力电子技术第一线工作的专家，且有丰富的写作经验。内容力求深入浅出，条理清晰，语言通俗，文笔流畅，便于阅读学习。

本系列图书编委会中，既有一大批国内资深的电力电子专家，也有不少已崭露头角的青年学者，其组成人员在国内具有较强的代表性。

希望广大读者对本系列图书的编辑、出版和发行给予支持和帮助，并欢迎对其中的问题和错误给予批评指正。

电力电子新技术系列图书
编辑委员会

前 言

高压直流输电 (High Voltage Direction Current, HVDC) 是电力电子技术应用最为重要、最为传统,也是发展最为活跃的领域之一。在“电力电子新技术的系列图书”中,有一本论述高压直流输电及其发展的分册是不可或缺的。目前世界上已有近80项高压直流输电工程投入运行,我国也已有10项高压直流输电工程在国家电力网架中起到优化资源配置、保障国家能源安全和促进国民经济发展的重要作用。随着国家“西电东送、南北互供、全国联网”战略方针的实施,加快建设以百万伏级交流和 $\pm 660\text{kV}$ 、 $\pm 800\text{kV}$ 、 $\pm 1000\text{kV}$ 级直流系统特高压电网为核心的坚强的电力网架已成为趋势。中国将建设世界上输送容量最大、输送距离最远的高压直流输电工程。特高压直流输电的发展将带来拓扑、设计、控制与运行的新变化和新问题,是以往有关直流输电的著作中不曾涉及的内容。另外,随着电力电子技术与微机控制技术的发展,许多以可关断器件为核心的新型直流输电技术,如基于GTO (Gate Turn-off, 门极关断) 晶闸管的BTB (Back to Back, 背靠背) 非同步网互连技术、基于IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor, 绝缘栅双极型晶体管) 的VSC (Voltage Source Converter, 电压源换流器) 型直流输电等也得到快速发展。本书力图通过有限篇幅全面论述电力电子技术在高压直流输电领域中的应用,内容包括直流输电的系统构成、基本特性、运行控制及最新发展。

电力电子技术应用领域非常宽广,在其系列图书中有这样一本涉及高压直流输电的分册,对研究电力电子的技术人员,开阔视野,关注电力电子技术在最大功率电力传输中的应用起到一定的推进作用。

高压直流输电技术涉及器件、电路、设备、控制方法等各个层次,既有直流输电本身的特性分析与设计,又有与交流系统的相互作用及其分析。前已述及,直流输电技术是电力电子技术应用最为传统的领域之一,因此有关直流输电的最初的著作距今已有近30年的历史。1979年,由华北电力学院直流输电研究室翻译、水利电力出版社出版的前苏联A. B. 波谢的《直流输电结线及运行方式》成为最早系统介绍直流输电技术的译作。其后,由我国浙江大学发电教研组直流输电科研组编写、电力工业出版社1982年出版的《直流输电》成为我国第一本系统介绍高压直流输电的著作。该书基于当时直流输电技术发展的水平,系统介绍了高压直流输电的构成、特性、控制、保护,成为我国直流输电的经典著作。后来又有许多直流输电的著作从设备、运行、谐波等不同侧面探究高

压直流输电相关问题。2004年,由赵皖君主编、中国电力出版社出版的《高压直流输电工程技术》从工程应用的角度系统论述了直流输电的设计与运行控制方法。国外较经典的著作包括 Jos Arrilaga 的《High Voltage Direct Current Transmission》,町田武彦的《直流输电》、《直流输电工学,电力电子技术应用》(日文)都是在直流输电发展的早期问世的著作,并随着直流输电技术的发展进行了修订。由此可见,有关高压直流输电技术的专著或译著已经很多,编写这本书的意义何在?这要从这本书的特点说明:①突出直流输电技术的新发展,全面论述基于全控器件的直流输电技术的原理与工程应用;②突出特高压直流输电技术的发展与应用,提出特高压直流输电技术面临的问题及其解决方案;③把直流输电的基本原理与运行控制相结合,在介绍直流输电功率变换特性的同时,在有限的篇幅中,完整描述直流输电与交流系统相互作用的基本问题;④前已述及,作为“电力电子新技术系列图书”之一,强调电力电子技术在大量电能传输中的作用,强调直流输电技术及其发展相应的器件、电路及系统的特点成为本书的特色之一。

本书力求做到:

- (1) 全面性 系统介绍高压直流输电技术相关的器件、电路、设备、控制、保护及其与交流系统的相互作用。
- (2) 新颖性 给出高压直流输电技术的最新发展,包括器件、电路拓扑及控制方法的最新进展。
- (3) 工程性 结合直流输电运行过程中的问题,阐明这些问题的性质及其解决方法。

本书可作为:

- 1) 电气工程相关专业本科生学习电力电子技术应用课程的教材或参考书;
- 2) 电力电子相关专业研究生学习高压直流输电技术的教材或参考书;
- 3) 电力电子工程相关专业的工程技术人员技术参考书。

本书共分8章。其中第1章为绪论,介绍了高压直流输电的基本概念、构成与分类,高压直流输电的特点及适用场合,高压直流输电的历史与国外的现状,其中介绍了直流发展史上具有重要意义的工程实例;绪论中还介绍了直流输电在我国的发展及未来的发展规划,最后述及高压直流输电技术的新进展。第2章讨论高压直流输电的主要电气设备。在对系统构成及设备分类做出说明的基础上,通过原理分析、图片展示等方式使读者对高压直流输电的主要设备建立基本概念。第3章给出高压直流输电换流器的基本原理,本章通过从整流器的工作原理到逆变器的工作原理,从6脉动桥的特性到12脉动桥特性,从正常运行方式到故障运行状态,系统论述了换流器的基本特性、基本关系式及典型波形、曲线。第4章在介绍谐波危害、无功功率不平衡带来的影响基础上,论述

了高压直流输电谐波问题、无功补偿问题,给出了传统和正在发展中的谐波抑制方法和无功补偿方法,还结合 SVC (Static Var Compemator, 静止无功补偿器) 在弱交流受端系统的应用、换流器动态无功调节,给出了无功控制技术的新进展。第 5 章论述常规电网换相高压直流输电的控制与保护技术,给出了包括定电压控制、定电流控制、定功率控制、定熄弧角控制在内的基本控制方法,讨论了直流系统整流器、逆变器的协调控制、潮流反转、起动、停止等的控制方法及系统出现各种故障时的保护措施。第 6 章则系统论述直流输电的运行特性及其与交流系统的相互作用,讨论了直流输电对于交流系统的控制作用。第 7 章专门讨论基于器件换相的新型直流输电技术,在介绍全控器件的发展与特性的基础上,系统探讨了基于电压源 (VSC) 型的直流输电 (又称为轻型直流输电或柔性直流输电) 的基本原理、电路结构、控制方法和工程应用。第 8 章给出了电网换相直流输电 (本书中又称为常规直流输电) 技术的新进展。

本书由韩民晓负责第 1、5、6、7 章的编写和主编工作,文俊负责第 2、3、8 章的编写,徐永海负责第 4 章的编写,博士研究生丁辉参与本书部分章节的编写和材料的补充。华北电力大学柔性电力技术研究所多位老师在本书的编写过程中给予指正和帮助,硕士研究生卢迪平、邱丽霓帮助完成书稿输入和图表绘制,在此表示诚挚的感谢。

本书从立项到内容定位一直得到西安交通大学王兆安老师的关心、鼓励和指导,在此表示衷心的感谢。

高压直流输电技术既传统又新颖、既理论又实践,因此作为“电力电子新技术系列图书”中的一册,要全面反映这一技术确有难度。加上作者水平的限制,书中存在错误和不妥之处在所难免,敬请广大读者加以批评指正。作者的目的是提供该电力电子技术应用的一个重要领域的基本知识,以期为对该领域关注的技术人员、师生提供参考。

作者

目 录

电力电子新技术系列图书序言	2.5.2 交流滤波器	43
前 言	2.5.3 直流滤波器	45
第1章 绪论	2.6 直流输电线路	46
1.1 高压直流输电的构成	2.6.1 直流输电架空线路	47
1.1.1 高压直流输电的概念	2.6.2 直流输电电缆线路	51
1.1.2 高压直流输电的分类	2.6.3 直流接地极引线	54
1.1.3 直流系统的构成	2.7 接地极	56
1.2 高压直流输电的特点及适用场合	2.7.1 接地极地电流对环境的影响	57
1.3 高压直流输电的历史与国外的现状	2.7.2 接地极运行特性	59
1.4 高压直流输电在我国的发展	2.7.3 对极址的要求	60
1.5 直流输电技术新发展	2.7.4 接地极材料	61
1.5.1 器件换相直流输电	2.7.5 接地极设计	62
1.5.2 强迫换相换流器	第3章 换流器工作原理	63
1.5.3 特高压直流输电	3.1 单桥整流器工作原理	64
第2章 高压直流输电系统的主要设备	3.1.1 正常运行方式——工况2-3	64
2.1 换流装置	3.1.2 非正常运行方式——工况3	73
2.1.1 器件	3.1.3 故障运行方式——工况3-4	74
2.1.2 换流阀	3.1.4 单桥整流器外特性	75
2.1.3 换流单元接线方式	3.2 双桥整流器工作原理	77
2.2 换流变压器	3.2.1 正常运行方式——工况4-5	77
2.2.1 功能与特点	3.2.2 桥间相互影响	82
2.2.2 换流变压器型式	3.2.3 相关计算公式	83
2.2.3 换流变压器接入阀厅的方式	3.3 单桥逆变器工作原理	85
2.3 平波电抗器	3.3.1 正常运行方式——工况2-3	86
2.3.1 功能	3.3.2 故障运行方式——工况3-4	89
2.3.2 平波电抗器型式	3.3.3 单桥逆变器外特性	90
2.4 无功补偿装置		
2.5 滤波器		
2.5.1 滤波器类型		

3.4 双桥逆变器工作原理	91	4.7.6 无功分组容量确定	127
3.4.1 双桥逆变器实现逆变的 条件	92	4.8 无功补偿设备	128
3.4.2 双桥逆变器可能发生换相 失败	92	4.9 无功控制	129
3.4.3 双桥逆变器整流电压 平均值	92	4.9.1 分段调节无功补偿设备 控制	130
第4章 高压直流输电的谐波抑制 与无功补偿	93	4.9.2 连续调节无功补偿设备 控制	131
4.1 高压直流输电谐波的基本问题	93	4.9.3 换流器参与无功电压控制	138
4.1.1 谐波的危害	93	第5章 电网换相直流输电的控制 与保护	139
4.1.2 谐波的基本概念	98	5.1 基本控制方式	139
4.2 特征谐波	101	5.1.1 控制原理	139
4.2.1 换流器交流侧的特征谐波	101	5.1.2 相位控制方式	141
4.2.2 换流器直流侧的特征谐波	105	5.1.3 换流器控制方式	142
4.3 非特征谐波	107	5.1.4 整流器、逆变器的协调	145
4.3.1 换流器交流侧的非特征 谐波	107	5.1.5 控制保护用互感器	148
4.3.2 换流器直流侧的非特征 谐波	108	5.2 保护方式	148
4.4 谐波抑制及抑制设备	109	5.2.1 故障的分类与保护动作	148
4.4.1 增加脉动数抑制谐波	109	5.2.2 换流站内的故障与保护 示例	152
4.4.2 安装滤波器抑制谐波	110	5.2.3 直流线路的故障与保护 示例	155
4.4.3 谐波抑制设备	110	5.2.4 交流侧的故障与保护示例	157
4.5 交流滤波器设计	112	第6章 电网换相直流输电的运行 特性与系统控制	159
4.6 直流滤波器设计	120	6.1 电网换相直流输电的运行特性	159
4.6.1 直流滤波器常规设计	120	6.1.1 系统故障时的运行特性	159
4.6.2 直流有源滤波器	122	6.1.2 交流电压稳定性	162
4.7 高压直流输电的无功补偿和 功率因数	123	6.1.3 高次谐波稳定性	164
4.7.1 电网换相换流器无功特性	123	6.1.4 轴系扭振现象	166
4.7.2 无功功率消耗计算工程 方法	124	6.2 直流输电在交流系统控制中的 应用	168
4.7.3 容性无功补偿设备容量 确定	125	6.2.1 系统频率控制	168
4.7.4 感性无功补偿设备容量 确定	126	6.2.2 交流电压、无功控制	171
4.7.5 功率因数	126	6.2.3 系统稳定控制	175
		6.3 多端直流输电的控制保护方式	177
		6.3.1 控制保护方式	177
		6.3.2 系统故障时的运行特性	180

6.3.3	起停控制	182
6.3.4	潮流反转	183
第7章 器件换相直流输电技术 184		
7.1	全控型功率器件发展概况	184
7.1.1	全控型功率器件的发展与应用概况	184
7.1.2	器件换相直流输电采用的典型全控型功率器件	185
7.2	器件换相直流输电换流装置工作原理	188
7.2.1	换流器	188
7.2.2	电压源型换流器的工作原理和基本特点	189
7.2.3	接入系统时的有功、无功功率特性	192
7.2.4	换流器各部分电压、电流波形	194
7.2.5	发展趋势与开发现状	195
7.3	器件换相直流输电的控制与保护方式	196
7.3.1	只采用器件换相换流器的换相直流输电	196
7.3.2	器件、电网换相换流器混合型直流输电	204

7.3.3	混合型器件换相直流输电示例	208
7.4	器件换相直流输电的应用示例	209
7.4.1	电压源型器件换相直流输电系统的应用范围	209
7.4.2	VSC-HVDC 系统工程实例	210
第8章 常规高压直流输电的新技术及新发展 215		
8.1	强迫换相换流器	215
8.1.1	电容换相换流器	215
8.1.2	可控串联电容换流器	217
8.1.3	强迫换相换流器特点	218
8.2	特高压直流输电	221
8.2.1	概述	221
8.2.2	特高压直流输电的特点	224
8.2.3	国内外研究现状	225
8.2.4	特高压直流输电的运行方式	226
8.3	光触发晶闸管	227
参考文献 229		
电力电子新技术系列图书目录 231		
已出版相关工具书目录 232		

第1章 绪论

1.1 高压直流输电的构成

1.1.1 高压直流输电的概念

高压直流输电技术是电力电子技术在电力系统输电领域中应用最早同时也是较为成熟的技术。高压直流输电由将交流电变换为直流电的整流器、高压直流输电线路以及将直流电变换为交流电的逆变器三部分构成，因此从结构上看，高压直流输电是交流-直流-交流形式的电力电子换流电路。到目前为止，工程上绝大部分直流输电的换流器（又称为换流阀，包含整流器和逆变器）由半控型的晶闸管器件组成，称采用这种换流器的直流输电为常规高压直流输电。常规高压直流输电的换流器是采取电网（源）实现换相的。近10年才投入使用的一种新型高压直流输电，即能够基于器件实现换相的轻型高压直流输电，这种直流输电系统的换流器则采用全控型电力电子器件，如GTO晶闸管、IGBT、IGCT（Integrated Gate Commutated Thyristors，集成门极换向晶闸管）等。高压直流输电也是目前电力电子技术在电力系统应用中最为全面、最为复杂的系统，已成为一门关于电力电子技术应用的专门学科。

1.1.2 高压直流输电的分类

高压直流输电依据不同的换相方式、不同的端子数目或与交流系统的不同连接关系可以有不同的分类方法。前已述及，换流器由于所采用的电力电子器件控制特性的不同，可分为电网换相方式和器件换相方式。有关全控器件的特性及换相方式的类别将在第7章中论述，这里主要针对传统的电网换相方式的分类进行讨论。

(1) 长距离直流输电 这种方式的典型接线如图1-1所示，为高压直流输电的主要形式，主要用来实现从电源中心到负荷中心的电能的输送。从本土向离岛经过电缆的直流输电也属于这种方式。这种方式依据电能只沿一个方向输送或可双向输送，又可进一步分为单方向直流送电方式和双向直流送电方式。通常从水电或火电能源基地向负荷中心的送电、向存在弱交流电网的离岛的送电多为

单方向直流输电方式。当送端具有一定规模的交流系统或离岛具有可扩展的电源时，直流输电通常采用双方向直流输电方式。这种情况下，送端换流器与受端换流器采用相同的结构，使任一侧的换流器既可用作整流器，也可用作逆变器。

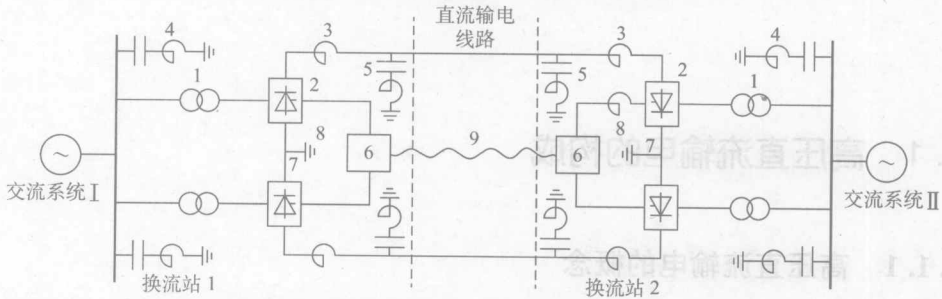


图 1-1 两端直流输电系统构成原理图

- 1—换流变压器 2—换流器 3—平波电抗器 4—交流滤波器 5—直流滤波器
6—控制保护系统 7—接地极引线 8—接地极 9—远动通信系统

(2) BTB 方式直流输电 这种方式的主回路如图 1-2 所示。它可以看作是两组换流器通过平波电抗器反并联而成，因此称为背靠背 (BTB) 方式。这种方式两侧换流器设置在同一场所，没有直流输电线路，具有快速潮流反转功能，可十分方便地用于所连交流系统的功率及频率控制。

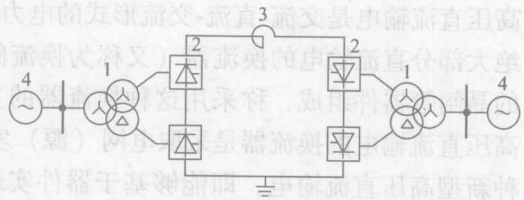


图 1-2 背靠背换流站原理接线图

- 1—换流变压器 2—换流器
3—平波电抗器 4—两端交流系统

BTB 方式依据容量的需求和接地方式的不同，可进一步分为单极方式、双极方式及多组单极或双极并联方式。图 1-2 所示为一单极 12 脉动方式的 BTB 主回路。

(3) 交、直流并列输电方式 图 1-3 所示为该方式的接线图，两端交流系统之间既有交流的联系，又有直流的联系。这种方式可充分利用高压直流控制的特长，对交流系统的稳定运行，特别是对两侧交流系统距离较远时的稳定控制发挥重要作用。

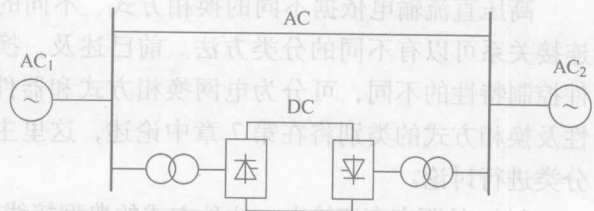


图 1-3 交、直流并列送电方式

与直流输电相并列的交流输电则具有中间落点的便利性，可为中间地区负荷供电。

(4) 交、直流叠加输电 在交流线路中叠加直流分量，使原交流输电通道同时输送交流和直流电能，提高了线路的传输能力。图 1-4 所示的交、直流叠加送电方式，一方面可以发挥直流输电不受系统功角稳定限制，提高输送能力的作用；另一方面可以发挥交流输电便于在输电中途形成中间落点的优势。这种方式依据交流送电的回数，可形成单极大地回线方式或双极方式。为了避免直流分量流入主变压器，必须在主变压器和直流接入点之间增加隔直串联电容器。另外，对于交、直流叠加后形成的脉动电压、电流的保护、控制等对策也成为这一方式的重要课题。目前这种方式还处在研究阶段，尚无工程实例。

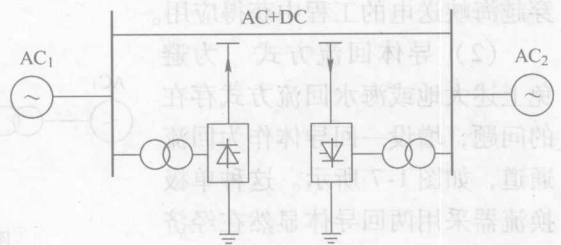


图 1-4 交、直流叠加送电

(5) 三极直流输电 利用已有交流输电通道，采用换流器组合拓扑，实现三极直流输电，如图 1-5 所示。目前这种方式还处在研究的初期阶段，西门子 (SIEMENS) 公司开展过一些试验研究，尚无工程实例。

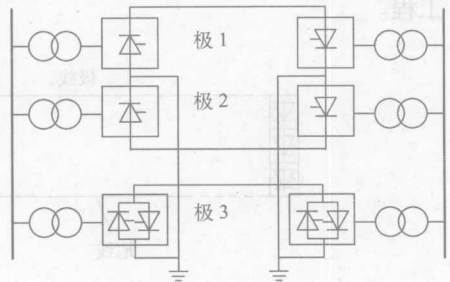


图 1-5 三极直流输电

1.1.3 直流系统的构成

高压直流输电具体的构成，可依据换流站的数目是 2 个、3 个或更多，分为双端直流与多端直流。目前的直流输电工程多为双端直流，只有为数不多的三端直流输电工程投入运行。加拿大和美国合作的魁北克—新英格兰 (Quebec-New England) 工程开始设计为五端系统，后因控制协调很难进行而改为三端运行。随着器件换相方式的实用化，多端系统的构成将更为灵活方便，可获得性能更好的直流输电系统，有关这方面的讨论将在第 7 章中给出，这里主要针对电网换相方式给出直流输电系统的构成。

① 1. 直流单极输电

(1) 大地或海水回流方式 这种方式的极线可采用架空线或电缆，回流方式则利用大地或海水，可大量降低输电线路的造价，如图 1-6 所示。然而，这种方式对接地极的材料、设置方式有较高

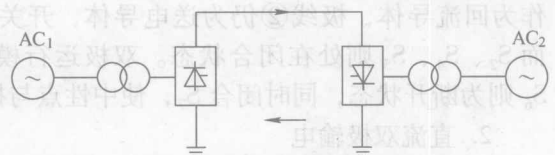


图 1-6 单极大地回线方式

的要求,且大地或海水回流会对地下铺设物、通信线路及磁性罗盘等造成影响和危害。到目前为止,工程上还没有大地回流的实例。海水回流方式则在一些穿越海峡送电的工程中获得应用。

(2) 导体回流方式 为避免上述大地或海水回流方式存在的问题,增设一回导体作为回流通道,如图 1-7 所示。这种单极换流器采用两回导体显然在经济上是不合理的,但直流输电工程

可分阶段投资和建设,单极双导体作为双极建设中的一个阶段运行还是有工程实例的。日本的北海道一本州连网工程就是这样建设的。我国西南水域电力外送的特高压直流工程也计划采用这种方式。

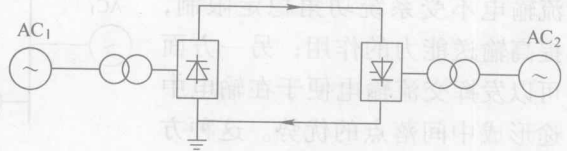


图 1-7 单极金属回线方式

图 1-8 所示为美国 20 世纪 70 年代建设的太平洋联络线 (Pacific Intertie) 工程。

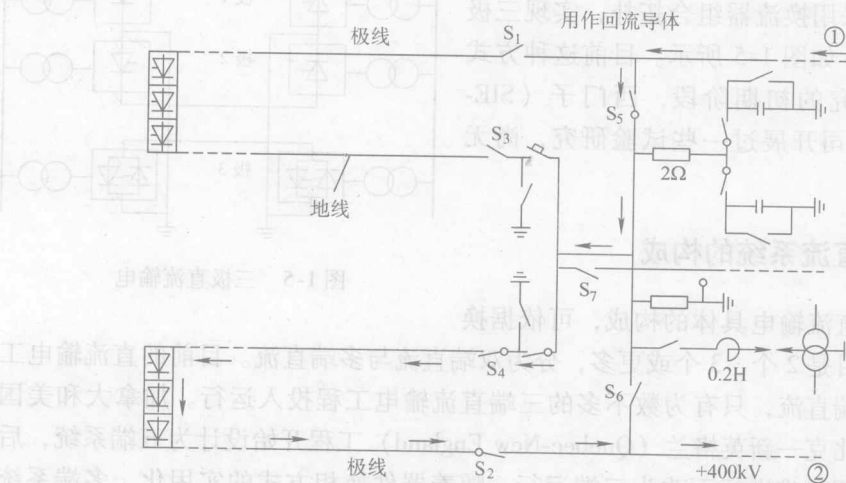


图 1-8 双极运行转为导线回线方式的单极运行示例

该工程曾在发生地震等异常情况下,由双极运行转为导线回流方式的单极运行。单极导线回流方式时的电流流动方式如图 1-8 中的箭头所示。这时极线①作为回流导体,极线②仍为送电导体,开关 S_1 、 S_3 、 S_6 、 S_7 处在断开的位置,而 S_2 、 S_4 、 S_5 则处在闭合状态。双极运行模式时, $S_1 \sim S_4$ 处于闭合状态, S_5 、 S_6 则为断开状态,同时闭合 S_7 ,使中性点与接地极线连接。

2. 直流双极输电

(1) 中性点两端接地方式 图 1-9 所示为整流与逆变侧中性点均通过接地极接入大地或海水中的情况。这种方式类似于两个以大地或海水作为回流的单

极方式。对称运行情况下，两回流电流大小一致、方向相反，实际电流很小。而当一极故障退出运行时，另一极仍可以大地或海水为回流方式，输送 50% 的电力。因此，这种方式大大提高了直流输电的可靠性和可用率（直流输电的可用率是指折算到最大连续容量下的等效运行小时数与统计周期小时数之比）。

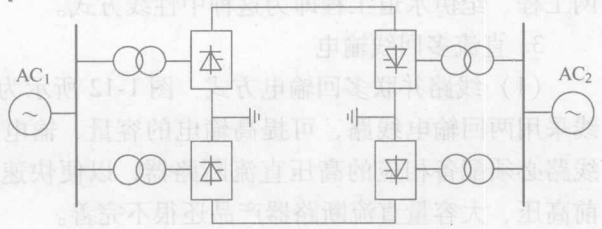


图 1-9 直流双极送电：中性点两端接地方式

目前建设和运行中的直流工程多为这种双极两端中性点接地方式，而且我国大多数直流输电工程也采用这类接线方式。这种方式在正常运行时，由于变压器参数、触发控制的角度等不完全对称，会在中性线中有一定的电流流通，这一电流对附近中性点接地的变压器、地下铺设设备、通信等的影响，值得关注。

(2) 中性点单端接地方式 这种方式只将整流或逆变的某一端的中性点接地，如图 1-10 所示。它可有效地避免方式 (1) 中述及的由于不平衡造成的接地极电流。大大减少单极故障时的接地极电流的电磁干扰作用。当然，这种方式在单极故障退出运行时，整个直流系统就必须停运，降低了直流的可靠性及可用率。这种方式已见于英法海峡联网的 Cross Channel 工程。该工程在发生单极故障时，系统就无法运行。后来通过建设电缆中性线实现了单极的运行。

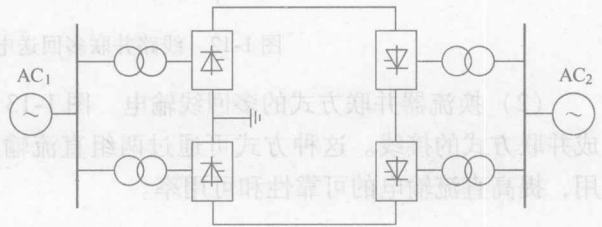


图 1-10 直流双极送电：中性点单端接地方式

当然，这种方式在单极故障退出运行时，整个直流系统就必须停运，降低了直流的可靠性及可用率。这种方式已见于英法海峡联网的 Cross Channel 工程。该工程在发生单极故障时，系统就无法运行。后来通过建设电缆中性线实现了单极的运行。

(3) 中性线方式 图 1-11 所示为中性线方式的接线示例。也可以在两端换流站的中性点通过中性线相接的同时也接地。这样在单极故障时，大地或海水中流过部分电流（如 50%），从而降低中性线的设计容量。而在双极正常运行方式时，较小的不平衡电流通过中性线流通，减少中性点电流的电



图 1-11 直流双极送电：中性线方式

极正常运行方式时，较小的不平衡电流通过中性线流通，减少中性点电流的电

磁干扰。加拿大的温哥华 (Vancouver) 工程 (1968)、日本的北海道—本州联网工程、纪伊水道工程即为这种中性线方式。

3. 直流多回线输电

(1) 线路并联多回输电方式 图 1-12 所示为该方式的接线图, 图中每个极线采用两回输电线路, 可提高输电的容量、输电的可靠性及可用率。这种方式线路必须配备相应的高压直流断路器, 以便快速、可靠地对线路进行投切。目前高压、大容量直流断路器产品还很不完善。



图 1-12 线路并联多回送电方式

(2) 换流器并联方式的多回线输电 图 1-13 所示为换流器和输电线路均构成并联方式的接线。这种方式可通过两组直流输电间的连接通路, 实现相互备用, 提高直流输电的可靠性和可用率。

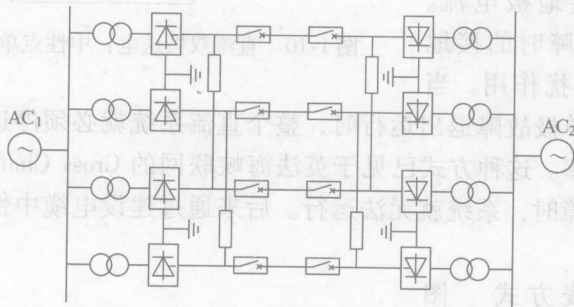


图 1-13 换流器并联方式的多回线送电

4. 多端直流输电

直流输电工程中, 当所连接的位于不同地域的换流器多于三个时, 称之为多端直流输电。多端直流依据换流器的连接方式可分为并联方式和串联方式。

(1) 并联多端直流输电方式: 换流器通过并联方式连接, 具有共同的直流电压。并联方式的多端直流又有树枝式 (或放射式) 和环网式两种, 如图 1-14 a、b 所示。目前已有工程只限于放射式。