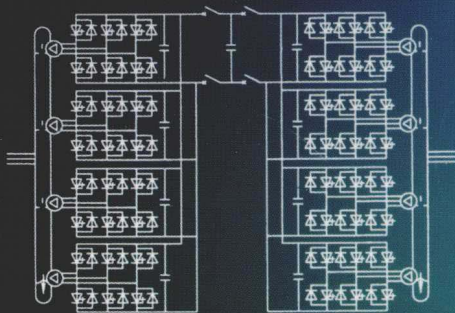


“十二五”国家重点图书出版规划项目

电力电子

新技术系列图书

New Technology Series in  
Power Electronics



第2版

◎韩民晓 文俊 徐永海 编著

# 高压直流输电 原理与运行

ZHILIUSHUDIAN  
NL I YU YUNXING



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”国家重点图书出版规划项目  
电力电子新技术系列图书

# 高压直流输电 原理与运行

第2版

韩民晓 文 ~~陈永海~~ 编著



机械工业出版社

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,文俊,徐永海编著.—2版.—北京:机械工业出版社,2012.11

(电力电子新技术系列图书)

ISBN 978-7-111-40651-8

I. ①高… II. ①韩…②文…③徐… III. ①高电压—直流—输电技术  
IV. ①TM726.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 288092 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:闫玥红 责任校对:佟瑞鑫

封面设计:马精明 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)

2013 年 1 月第 2 版第 1 次印刷

169mm×239mm·17.25 印张·1 插页·337 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-40651-8

定价:39.90 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 封面防伪标均为盗版

# 目 录

## 电力电子新技术系列图书序言

### 第2版前言

### 第1版前言

## 第1章 绪论 ..... 1

### 1.1 高压直流输电的构成 ..... 1

#### 1.1.1 高压直流输电的概念 ..... 1

#### 1.1.2 高压直流输电的分类 ..... 1

#### 1.1.3 直流系统的构成 ..... 3

### 1.2 高压直流输电的特点及适用场合 ..... 7

### 1.3 高压直流输电的历史与国外的 现状 ..... 10

### 1.4 高压直流输电在我国的发展 ..... 13

### 1.5 直流输电技术新发展 ..... 14

#### 1.5.1 器件换相直流输电 ..... 14

#### 1.5.2 电容换相换流器 ..... 16

#### 1.5.3 特高压直流输电 ..... 17

## 第2章 高压直流输电系统的主要 设备 ..... 19

### 2.1 换流装置 ..... 20

#### 2.1.1 器件 ..... 21

#### 2.1.2 换流阀 ..... 25

#### 2.1.3 换流单元接线方式 ..... 29

### 2.2 换流变压器 ..... 32

#### 2.2.1 功能与特点 ..... 32

#### 2.2.2 换流变压器型式 ..... 33

#### 2.2.3 换流变压器接入阀厅的 方式 ..... 35

### 2.3 平波电抗器 ..... 36

#### 2.3.1 功能 ..... 36

#### 2.3.2 平波电抗器型式 ..... 36

### 2.4 无功补偿装置 ..... 38

#### 2.4.1 无功补偿装置类型 ..... 38

#### 2.4.2 无功补偿容量确定 ..... 40

### 2.5 滤波器 ..... 43

#### 2.5.1 滤波器类型 ..... 43

#### 2.5.2 交流滤波器 ..... 49

#### 2.5.3 直流滤波器 ..... 51

### 2.6 直流输电线路 ..... 52

#### 2.6.1 直流输电架空线路 ..... 54

#### 2.6.2 直流输电电缆线路 ..... 58

#### 2.6.3 直流接地极引线 ..... 60

### 2.7 接地极 ..... 63

#### 2.7.1 接地极地电流对环境的 影响 ..... 63

#### 2.7.2 接地极运行特性 ..... 66

#### 2.7.3 对极址的要求 ..... 67

#### 2.7.4 接地极材料 ..... 67

#### 2.7.5 接地极设计 ..... 68

## 第3章 换流器工作原理 ..... 70

### 3.1 6脉波整流器工作原理 ..... 71

#### 3.1.1 正常运行方式——工况 2-3 ..... 72

#### 3.1.2 非正常运行方式——工况 3 ..... 80

#### 3.1.3 故障运行方式——工况 3-4 ..... 82

#### 3.1.4 6脉波整流器外特性 曲线 ..... 82

### 3.2 12脉波整流器工作原理 ..... 84

#### 3.2.1 正常运行方式——工况 4-5 ..... 84

#### 3.2.2 桥间相互影响 ..... 89

#### 3.2.3 相关计算公式 ..... 90

### 3.3 6脉波逆变器工作原理 ..... 93

#### 3.3.1 正常运行方式——工况

2-3 .....	94	方法 .....	133
3.3.2 故障运行方式——工况		4.7.3 容性无功补偿设备容量	
3-4 .....	97	确定 .....	133
3.3.3 6 脉波逆变器外特性		4.7.4 感性无功补偿设备容量	
曲线 .....	97	确定 .....	134
3.4 12 脉波逆变器工作原理 .....	99	4.7.5 功率因数 .....	135
3.4.1 12 脉波逆变器实现逆变的		4.7.6 无功分组容量确定 .....	135
条件 .....	99	4.8 无功补偿设备 .....	136
3.4.2 12 脉波逆变器可能发生换相		4.9 无功功率控制 .....	138
失败 .....	99	4.9.1 分段调节无功补偿设备	
3.4.3 12 脉波逆变器整流电压		控制 .....	138
平均值计算公式 .....	99	4.9.2 连续调节无功补偿设备	
		控制 .....	139
		4.9.3 换流器参与无功电压控制 ..	146
<b>第4章 高压直流输电的谐波抑制</b>		<b>第5章 电网换相直流输电的控制</b>	
<b>与无功补偿 .....</b>	<b>101</b>	<b>与保护 .....</b>	<b>148</b>
4.1 高压直流输电谐波的基本		5.1 基本控制方式 .....	148
问题 .....	101	5.1.1 控制原理 .....	148
4.1.1 谐波的危害 .....	101	5.1.2 相位控制方式 .....	150
4.1.2 谐波的基本概念 .....	106	5.1.3 换流器控制方式 .....	151
4.2 特征谐波 .....	109	5.1.4 整流器、逆变器的协调 ..	154
4.2.1 换流器交流侧的特征谐波 ..	109	5.1.5 控制保护用互感器 .....	158
4.2.2 换流器直流侧的特征谐波 ..	113	5.2 保护方式 .....	158
4.3 非特征谐波 .....	115	5.2.1 故障的分类与保护动作 ..	158
4.3.1 换流器交流侧的非特征		5.2.2 换流站内的故障与保护	
谐波 .....	115	示例 .....	162
4.3.2 换流器直流侧的非特征		5.2.3 直流线路的故障与保护	
谐波 .....	116	示例 .....	165
4.4 谐波抑制及抑制设备 .....	117	5.2.4 交流侧的故障与保护示例 ..	167
4.4.1 增加脉波数抑制谐波 .....	117	<b>第6章 电网换相直流输电的运行</b>	
4.4.2 安装滤波器抑制谐波 .....	118	<b>特性与系统控制 .....</b>	<b>169</b>
4.4.3 谐波抑制设备 .....	118	6.1 电网换相直流输电的运行特性 ..	169
4.5 交流滤波器设计 .....	120	6.1.1 系统故障时的运行特性 ..	169
4.6 直流滤波器设计 .....	128	6.1.2 交流电压稳定性 .....	172
4.6.1 直流滤波器常规设计 .....	128	6.1.3 高次谐波稳定性 .....	174
4.6.2 直流有源滤波器 .....	130	6.1.4 轴系扭振现象 .....	176
4.7 高压直流输电的无功补偿和		6.2 直流输电在交流系统控制中的	
功率因数 .....	131	应用 .....	178
4.7.1 电网换相换流器无功特性 ..	131		
4.7.2 无功功率消耗计算工程			

6.2.1	系统频率控制	178	7.4.2	VSC-HVDC 系统工程实例	218
6.2.2	交流电压、无功控制	181	7.5	器件换相直流输电的发展	224
6.2.3	系统稳定控制	185	7.5.1	模块化多电平换流器技术	224
6.3	多端直流输电的控制保护方式	188	7.5.2	换流器的发展趋势与开发现状	227
6.3.1	控制保护方式	188	<b>第 8 章 高压直流输电的新技术及新发展</b>	<b>229</b>	
6.3.2	系统故障时的运行特性	191	8.1	基于电容换相技术的换流器	229
6.3.3	起停控制	193	8.1.1	电容换相换流器	229
6.3.4	潮流反转	193	8.1.2	可控串联电容换流器	232
<b>第 7 章 器件换相直流输电技术</b>	<b>194</b>		8.1.3	基于电容换相技术的换流器特点	233
7.1	全控型功率器件发展概况	194	8.1.4	电容换相技术的工程应用	236
7.1.1	全控型功率器件的发展与应用概况	194	8.2	特高压直流输电	245
7.1.2	器件换相直流输电采用的典型全控型功率器件	195	8.2.1	特高压直流输电发展概况	245
7.2	器件换相直流输电换流装置工作原理	198	8.2.2	特高压直流输电的特点及我国特高压直流输电发展的必要性	246
7.2.1	换流器	198	8.2.3	特高压直流输电接线方式	249
7.2.2	电压源换流器的工作原理和基本特点	199	8.2.4	特高压直流输电运行方式	251
7.2.3	接入系统时的有功、无功功率特性	202	8.2.5	特高压直流输电控制保护系统	256
7.2.4	换流器各部分电压、电流波形	204	8.2.6	特高压直流输电工程简介	259
7.3	器件换相直流输电的控制与保护方式	205	8.3	光触发晶闸管	260
7.3.1	只采用器件换相的直流输电	205	<b>参考文献</b>	<b>262</b>	
7.3.2	器件、电网换相换流器混合型直流输电	213			
7.3.3	混合型器件换相直流输电示例	217			
7.4	器件换相直流输电的应用示例	218			
7.4.1	电压源器件换相直流输电系统的应用范围	218			

# 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（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用电网（源）实现换相的。近些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 VSC 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，如门极关断（GTO）晶闸管、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）、集成门极换向晶闸管（Intergrated Gate Commutated Thyristors, IGCT）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。有关全控型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（两端直流输电） 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方向输送，又可进一步分为单方向直流送电方式和双方向直流送电方式。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。

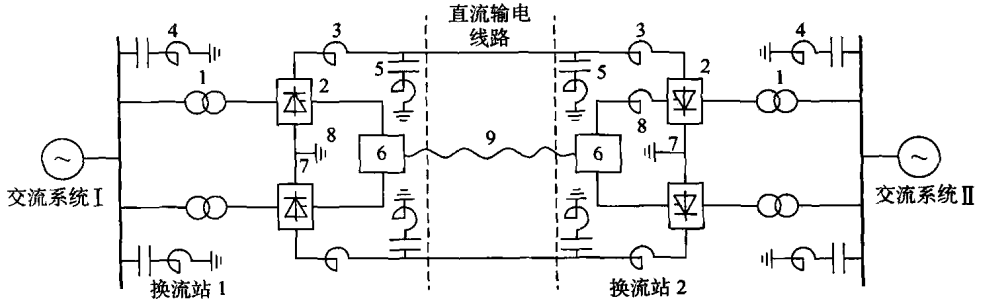


图 1-1 两端直流输电系统构成原理图

- 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) 背靠背 (BTB) 直流输电方式 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。

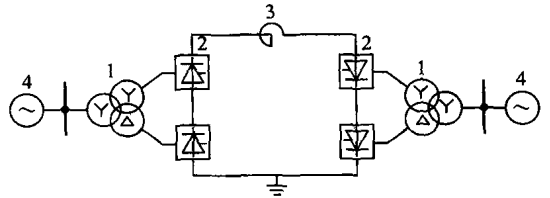


图 1-2 背靠背换流站原理接线图

- 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 脉波方式的 BTB 主回路。

(3) 交、直流并联输电方式 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。

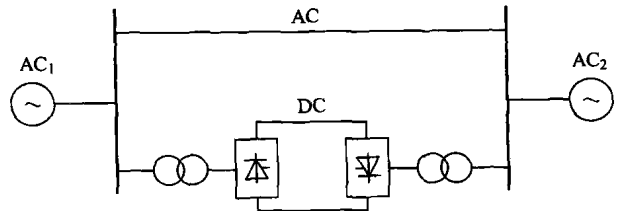


图 1-3 交、直流并联输电方式

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、直流叠加输电方式 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、直流叠加输电方式,

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波电压、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。

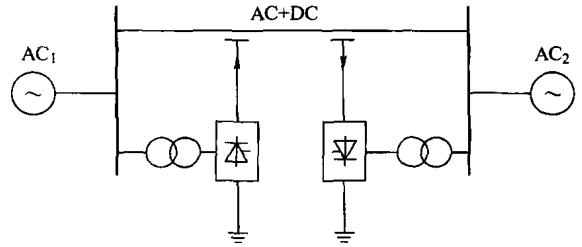


图 1-4 交、直流叠加输电方式

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波电压、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。

(5) 三极直流输电方式 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,尚无工程实例。

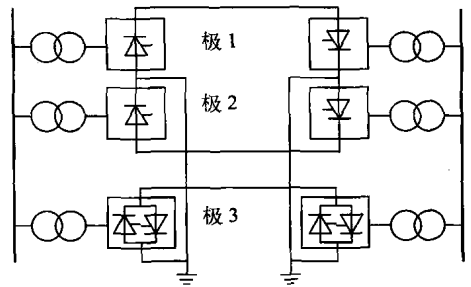


图 1-5 三极直流输电方式

### 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. 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

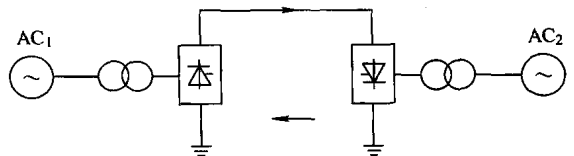


图 1-6 单极大地回流方式

接地极的材料、设置方式有较高的要求，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

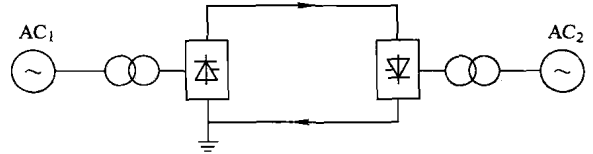


图 1-7 单极导体回流方式

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

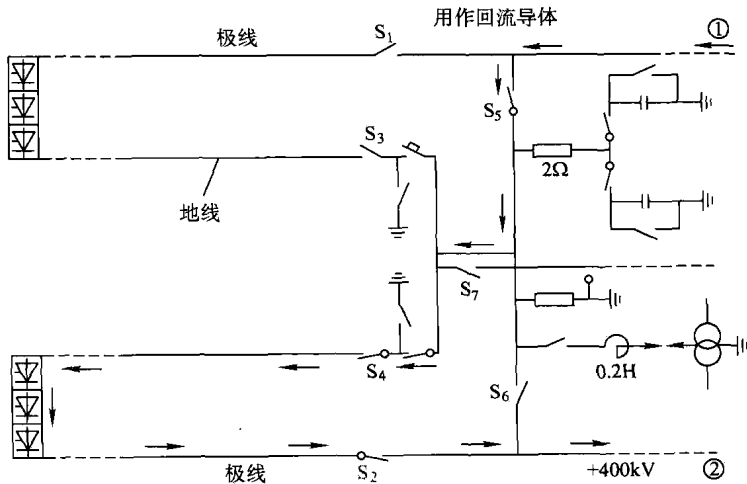


图 1-8 双极运行转为导线回线方式的单极运行示例

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值运行小时数与统计周期小时数

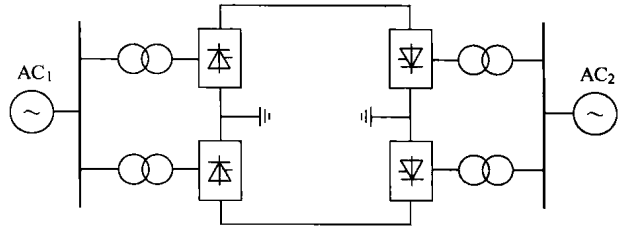


图 1-9 直流双极输电：中性点两端接地方式

之比)。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。

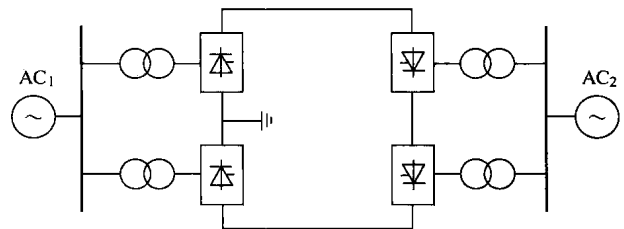


图 1-10 直流双极输电：中性点单端接地方式

(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磁

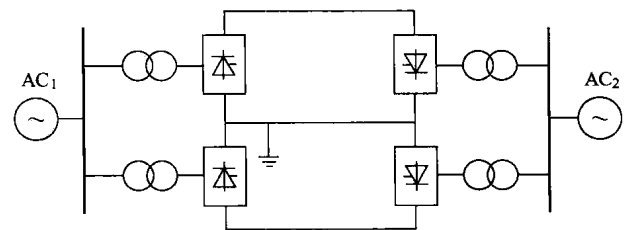


图 1-11 直流双极输电：中性线方式

干扰。加拿大的温哥华（Vancouver）工程（1968）、日本的北海道一本州连网工程、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。

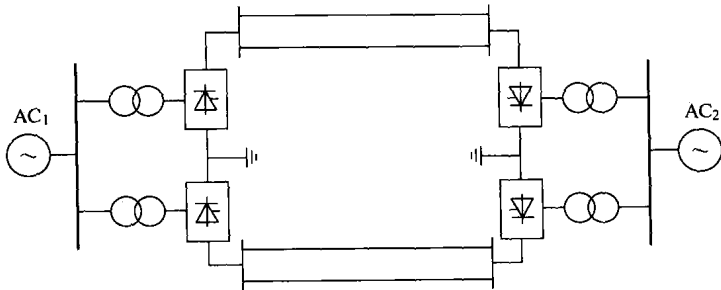


图 1-12 线路并联多回输电方式

(2) 换流器并联的多回线输电方式 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。

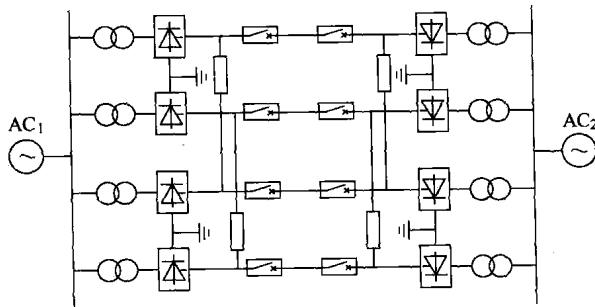


图 1-13 换流器并联的多回线输电方式

### 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。

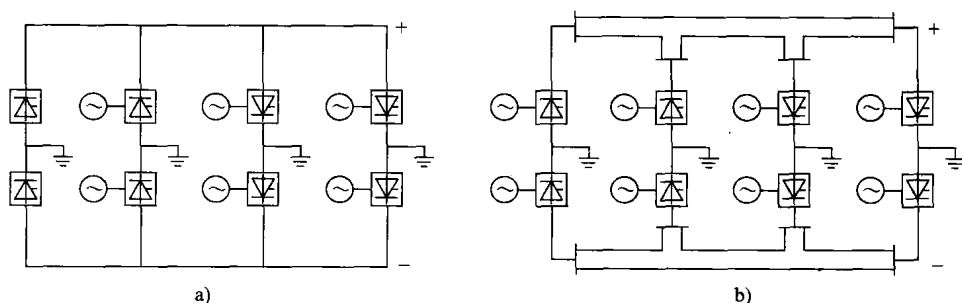


图 1-14 并联多端直流输电方式

a) 树枝式 b) 环网式

并联方式的功率调整通过电流大小的调整来进行。若要实现功率的反转，则必须通过断路器的投切来改变换流与直流线路的连接方式。

意大利撒丁岛 (Sardinia) 工程就是这种树枝式并联多端单极直流输电工程，该工程采用海水及大地作为回流，当两侧潮流反转时，位于中间的科西嘉 (Crosica) 换流器通过开关投切反转极性接入直流网络。魁北克—新英格兰工程目前也按三端结构运行。

(2) 串联多端直流输电方式：换流器通过串联方式连接，具有共同的电流。其接线方式如图 1-15 所示，这种方式各换流器与交流系统交换的功率通过对电压的调整进行。当一个换流站故障退出时，可通过旁路投入，保证其余换流站的运行。

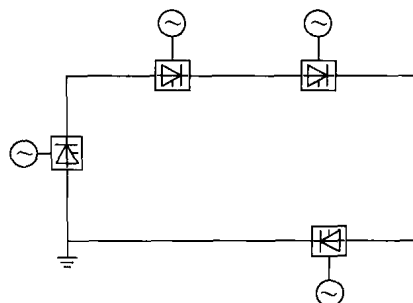


图 1-15 串联多端直流输电方式

## 1.2 高压直流输电的特点及适用场合

直流输电由于自身的结构和性能，具有一系列的特点：

### 1. 经济性

高压直流输电的合理性和适用性在远距离、大容量输电中已得到明显的表现。随着电力电子技术的进步，这一优势更为显著。直流输电线路的造价和运行费用比交流输电低，而换流站的造价和运行费用均比交流变电所的高。因此对同样输电容量，输送距离越远，直流比交流的经济性能越好。交流输电随着输送距离的增加，输送的容量将受其稳定极限的限制，为提高输送能力，往往需要采取各种技术措施，从而又增大了交流输电的造价。通常规定，当直流输电线路和换流站的造价与交流输电线路和直流换流站的造价相等时的输电距离

为等价距离，如图 1-16 所示。也就是说，当以远距离输送电能为目的时，对于一定的输送功率，当输电距离大于等价距离时，采用直流输电更为经济。架空线路目前的等价距离约 600 ~ 700km，电缆线路的等价距离则已降到 20 ~ 40km。

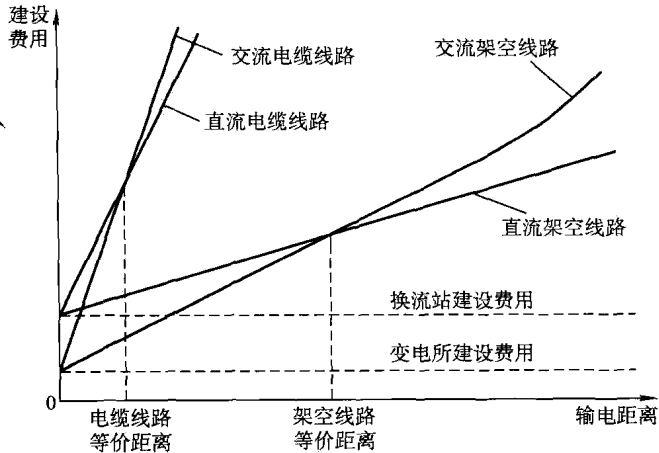


图 1-16 直流输电建设费用与输电距离的关系

另一方面，直流输电系统的构成使得直流输电工程可按照电压水平或极数分阶段投资建设。这也体现了直流输电经济性方面的特点。

## 2. 互连性

交流输电能力受到同步发电机间功角稳定问题的限制，且随着输电距离的增大，同步机间的联系电抗增大，稳定问题更为突出，交流输电能力受到更大限制。相比之下，直流输电不存在功角稳定问题，可在设备容量及受端交流系统容量允许的范围内，大容量输送电力。

交流系统连网的扩展，会造成短路容量的增大，许多场合不得不更换断路器，有时选择合适的断路器变得十分困难。而采用直流对交流系统进行互连时，不会造成短路容量的增加，也有利于防止交流系统故障的扩大。因此对于已存在的庞大交流系统，通过分割成相对独立的子系统，采用直流互连，可有效减少短路容量，提高系统运行的可靠性。

直流输电所连两侧电网无须同步运行，因此直流输电可实现电网的非同步互连。进而直流输电可实现不同频率交流电网的互连，起到频率变换器的作用。

## 3. 控制性

直流输电具有潮流快速可控的特点，可用于所连交流系统的稳定与频率控制。直流输电的换流器为基于电力电子器件构成的电能控制电路，因此其对电力潮流的控制迅速而精确。且对双端直流输电而言，可迅速实现潮流的反转。潮流反转有正常运行中所需要的慢速潮流反转和交流系统发生故障需要紧急功

率支援时的快速潮流反转。潮流反转的速度主要取决于两端交流系统对直流功率变化速度的要求，以及直流输电系统主回路的限制。正常运行中潮流反过程的时间往往在几秒甚至几十秒以上。紧急功率支援时所需的快速潮流反转的时间主要受直流回路参数的限制，特别是对于电缆线路，太快的电压极性反转会损害其绝缘性能，其反转时间通常为 200 ~ 500ms。这种速度的潮流控制对于所连交流系统的稳定控制，交流系统正常运行过程中应对负荷随机波动的频率控制及故障状态下的频率变动控制都能发挥重要作用。

#### 4. 缺点

直流输电也存在一系列缺点。直流输电换流站的设备多、结构复杂、造价高、损耗大、运行费用高、可靠性也较差。换流器在工作过程中会产生大量谐波，处理不当而流入交流系统的谐波就会对交流电网的运行造成一系列问题。因此必须通过设置大量、成组的滤波器消除这些谐波。其次传统的电网换相直流输电在传送有功功率的同时，会吸收大量无功功率，可达有功功率的 50% ~ 60%。需要大量的无功功率补偿设备及其相应的控制策略。另外，直流输电的接地极问题、直流断路器问题，都还存在一些没有很好解决的技术难点。

当受端交流系统的短路容量与直流输送容量之比小于 2 时，称为弱受端系统，这时为了控制受端电压的稳定性，保证直流输送的可靠运行，通常要增设调相机、静止无功功率补偿器 (SVC) 或静止无功发生器 (SVG)，且应实现 HVDC 与这些补偿设备的协调控制。

由于上述直流输电自身的一系列特点，使得直流输电有其适用的领域，接下来论述这些适于高压直流输电 (HVDC) 应用的领域。

(1) 海底电缆输电 从世界范围来看，直流输电工程的约 1/3 为海底电缆送电。前已述及，电缆方式的直流输电等价距离已下降至 20 ~ 40km，因此直流电缆方式已广泛用于下述两种情况：

1) 负荷供电及电力外输：海底电缆直流输电中的 40% 用于负荷供电及电力外输。世界最早投运的 1954 年的哥特兰 (Gotland) 岛—瑞典本土工程即是解决从本土向离岛的输电问题，后来又有 3 个类似的工程。1997 年以后，又有工程采用海底电缆电流输电将离岛上建设的地热、水力、燃油火力、风力等产生的电力送往本土。

2) 交流系统的互联：海底电缆直流输电中 60% 用于交流系统的互联。这种互联方式除具有经济上的优势外，对交流系统的运行与控制也带来很多好处，日本的北海岛—本州联络线、纪伊水道工程就是这类工程的示例。纪伊水道工程在本州与四国交流电网的稳定控制中发挥着重要作用。

(2) 长距离架空线输电 有研究工作表明，对于输送 10GW、300km 的电力，直流架空线路输送已开始占有优势，依据这一分析报告，适用直流架空线

路的输电容量将占到全球总输电容量的 26% 以上，可分为下述两种应用情况。

1) 电源输电：采用直流架空线方式将位于电源中心的大量电力输送到一定距离之外的负荷中心已具有明显的优势。即便不从经济距离出发考虑问题，将电能通过直流或交、直流并列的方式送出也能带来一系列稳定控制上的优越性。加拿大的纳尔逊河 (Nelson River) 工程、魁北克—新英格兰，我国的葛南工程、三广、贵广工程就是这类应用的典型示例。

2) 交流系统连网：直流架空线输电方式中约有 20% 用于交流系统的连网，用以提高交流系统的稳定运行与频率控制。太平洋联络线工程是为数不多的这类典型应用之一，随着对交流电网短路电流限制要求的增加、潮流控制电力要求的提高，今后这类应用还会增多。

(3) BTB 方式 BTB 方式工程约占全世界直流工程的 40%，主要用于在不增加交流电网短路容量的情况下，实现功率的融通和紧急功率支援。BTB 方式的应用可分为下述两类情况：

1) 交流系统的互连：利用 BTB 方式将相同频率的交流电网互连，实现两交流电网的非周期互连运行。这种方式约占 BTB 工程的 80% 以上。北美的伊尔河 (Eel River) 工程、我国的灵宝工程等属于此类应用。

2) 不同频率交流系统的互联：这种应用采用 BTB 直流输电使不同频率的交流电网实现互联。这类方式工程约占 BTB 工程的不到 20%，主要用于各大洲间电网互联及日本国内、阿拉伯国家间不同频率电网间的互联。

(4) 短路容量对策 世界范围内，随着电力负荷的增加，电源及电网建设不断扩充，交流电网的规模越来越大。在这种情况下，短路故障发生的故障电流越来越大，直流输电作为限制短路电流的对策获得极大的关注。

1) 负荷供电：都市负荷集中地区的供电，有时必须采用地下电缆送电。这种情况下，要求设备占空间小，短路电流过大时，断路器的选择就有困难，这时采用直流输电就表现出一定的优势。采用后面论述的器件换相的 VSC 直流输电就更显示出直流输电的这一优点。

2) 系统分割：将已有的大规模交流系统分割为若干相对较小的独立运行的小系统，系统之间采用 BTB 等直流方法互连，可有效减少故障短路电流。这方面的工程实例还没有，但日本学者对日本的关西、中国、九州、四国的串行系统进行的研究表明，若通过在关西与中国、中国与九州、九州与四国、四国与关西间采用直流方式连接，将可大大抑制短路电流，并可实现小系统向大系统的输电。

### 1.3 高压直流输电的历史与国外的现状

1928 年，具有栅极控制能力的汞弧阀研制成功，使高压直流输电成为现实。



高压直流输电技术首先被应用于海底电缆输电。早期的直流输电工程有瑞典的哥特兰岛工程（1954年投运）和意大利的撒丁岛工程（1967年投运）。然后被应用于长距离输电。相应的直流输电工程有美国太平洋联络线工程（1970年投运）和纳尔逊河工程（1973年投运）。1972年，将加拿大魁北克和新布伦兹维克（New Brunswick）非同步连接起来的伊尔河（Eel River）背靠背直流输电工程首次全部采用晶闸管阀，从此后新建的直流输电工程全部采用晶闸管换流阀，直流输电因此得到了很大的发展。到2011年年底为止，全世界已投运直流输电工程有140多个，其中汞弧阀直流输电工程11个，全部为高压直流输电技术发展的前25年的早期建设成果。其余均为晶闸管直流输电工程。在所有直流输电工程中，背靠背直流输电工程约占28个，占全部直流输电工程的1/3，其余的2/3为长距离输电直流工程。以下，结合直流输电发展史上具有代表性的工程示例，说明典型工程示例的特点及其采用直流方式的长处。

#### 1. 哥特兰岛Ⅲ—瑞典连线工程（1954年）

这是第一条商业经营的HVDC工程，该工程初期设计为20MW、100kV单极电缆连接方式，为哥特兰岛输电。工程论证表明这种供电方式比在岛上建立新的热电厂更为经济，而这种距离（96km）又不能采用交流电缆传输电力。

#### 2. 伏尔加格勒—顿巴斯（Volgograd-Donbass）工程（1962~1965年）

这是世界上首例投入运行的架空线直流输电工程。输电距离为470km，输送功率为720MW，电压为 $\pm 400$ kV，电流为900A，采用双极汞弧阀换流器。该直流工程建设的一个重要作用是加强已经存在的交流弱联系系统。

#### 3. 佐久间互连（Sakuma interconnection）工程（1965年，1993年）

世界上首个用于不同频率电网间互连的零距离直流工程。该工程可实现所连日本50Hz与60Hz交流电网间双向的功率交换。设计容量为300MW，电压为 $\pm 125$ kV。该工程能够很好地实现两交流系统功率的相互支援和稳定控制，1993年6月该工程又实现了采用晶闸管换流器的改造。

#### 4. 撒丁岛—意大利工程（1967年，1987年）

这条连接撒丁岛与意大利本土的直流工程采用单极200kV大地与海水作为回流方式。输电容量为200MW，能够实现对撒丁岛电网的频率支持。极线的方式依据穿越区域的不同交替地变化，位于撒丁岛的架空线—海缆—科西嘉岛的架空线—海缆—意大利本土的架空线，总电缆距离为121km，这使得交流方式不可取。

在1987年系统扩展至300MW，在Corsica岛上新建了分支换流站，形成了3端直流输电，也成为世界首例多端直流输电的示例。

#### 5. 太平洋联络线工程（1970年）

太平洋联络线工程最大的特点是同时与两条500kV（60Hz）交流线路并联运行。该工程采用直流方式的原因有两个：一是输电距离远（1372km）采用