



# 柔性直流输电及其 试验测试技术

苟锐锋/著



科学出版社

# 柔性直流输电及其试验测试技术

苟锐锋 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书全面介绍柔性直流输电的基本原理、设计方法以及详细的试验测试技术和运行维护事项,并给出典型的工程实施案例。全书共11章,第1章和第2章介绍柔性直流输电的概况和基本原理,第3章至第7章详细介绍和讨论柔性直流输电系统各主要组成部分的工作原理与设计方法,第8章和第9章分别介绍柔性直流输电换流阀的厂内试验和现场试验,最后,第10章和第11章分别介绍柔性直流输电的运行维护事项和工程实施案例。

本书可作为从事电力电子装备研发和制造的技术人员,在电力系统行业从事科研、规划、设计、运行的工程师,以及高等院校电气工程专业本科生与研究生的参考用书。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

柔性直流输电及其试验测试技术/苟锐锋著. —北京:科学出版社,2017.7  
ISBN 978-7-03-051277-2

I. ①柔… II. ①苟… III. ①直流输电—输电技术②直流输电—测试技术  
IV. ①TM721.1

---

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第315637号

责任编辑:王喜军 / 责任校对:贾伟娟  
责任印制:张倩 / 封面设计:无极书装

**科学出版社**出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**中国科学院印刷厂**印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2017年7月第一版 开本:720×1000 1/16

2017年7月第一次印刷 印张:14

字数:280 000

定价:146.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

柔性直流输电技术是一种以全控型电力电子器件、电压源换流器和脉宽调制技术为基础的新型直流输电技术。1990年，加拿大 Boon-Teck Ooi 等首次提出了基于电压源换流器的高压直流输电技术，在中国称为柔性直流输电技术。1997年，世界上第一个柔性直流输电实验性工程——Heällsjön 工程（10kV/3MW）建成投入运行。2001年，德国学者 Rainer Marquardt 提出了基于模块化多电平换流器技术。2010年，世界首个基于模块化多电平换流器的柔性直流输电工程——Trans Bay Cable 工程（ $\pm 200\text{kV}/400\text{MW}$ ）建成投入运行。目前，中国已建成 $\pm 350\text{kV}/1000\text{MW}$ 的柔性直流输电工程，标志着中国在该领域的工程技术发展已位于世界前列。

较之常规直流输电系统，柔性直流输电系统具有无换相失败、有功功率和无功功率可独立调节控制、谐波水平低、占地面积小、有利于构建多端直流系统等优势，适用于可再生能源大规模并网、大型电网异步互联、向无源网络供电等领域。随着大功率全控型电力电子器件技术参数的不断提高，柔性直流输电技术在高电压、大容量输电工程方面的示范应用将会进一步加快。在世界范围内，柔性直流输电每年的市场规模达数百亿元，而且呈递增趋势，市场前景广阔。

作者在总结西安西电电力系统有限公司多年柔性直流输电技术研究成果和装备研发经验的基础上，结合国内外相关技术研究和工程应用完成了本书。本书共11章，主要内容包括柔性直流输电的特点与应用、基本原理、系统组成及主要设备、系统研究与设计、换流阀、控制保护系统、换流阀冷却系统、换流阀试验与现场调试、运行与维护、工程实施案例等。书中针对基于模块化多电平换流器的柔性直流输电系统研究与设计方法、柔性直流换流阀设计与试验验证、换流阀冷却系统原理与配置等方面内容进行了重点介绍。

在本书著作过程中，西安西电电力系统有限公司的杨晓平、任军辉、涂小刚、孙小平、田鸿昌等技术人员做了很多调研和资料整理工作。在此，向为本书的完成提供帮助和支持的各位专家及技术人员表示衷心感谢，同时对本书中所列参考文献的作者表示诚挚感谢。

由于作者水平有限，以及所做研究、开发和实践工作的局限性，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者批评指正。

苟锐锋

2016年11月

# 目 录

## 前言

1 绪论 .....	1
1.1 柔性直流输电的概念与特点 .....	1
1.2 柔性直流输电的主要优点与应用 .....	2
1.3 柔性直流输电技术的工程应用 .....	4
1.3.1 国外柔性直流输电工程 .....	4
1.3.2 国内柔性直流输电工程 .....	7
1.4 柔性直流输电技术的发展方向 .....	8
1.4.1 高电压大容量柔性直流输电技术 .....	8
1.4.2 柔性直流和传统高压直流输电混合化技术 .....	9
1.4.3 直流输电网络化 .....	9
2 柔性直流输电换流器的基本原理 .....	11
2.1 电压源换流器基本拓扑结构 .....	11
2.1.1 两电平电压源换流器的拓扑结构 .....	11
2.1.2 三电平电压源换流器的拓扑结构 .....	12
2.1.3 模块化多电平换流器的拓扑结构 .....	14
2.2 电压源换流器的调制方式 .....	21
2.2.1 两电平电压源换流器的调制方式 .....	21
2.2.2 多电平电压源换流器的调制方式 .....	30
2.3 柔性直流输电的控制策略 .....	34
2.3.1 柔性直流输电系统控制原理 .....	34
2.3.2 直接电流控制策略 .....	36
2.3.3 间接电流控制策略 .....	39
3 柔性直流输电系统组成及主要设备 .....	41
3.1 换流阀 .....	41
3.2 联结变压器 .....	41
3.2.1 联结变压器类型 .....	42
3.2.2 短路阻抗 .....	42
3.2.3 有载调压 .....	42
3.2.4 直流偏磁 .....	43
3.2.5 谐波和噪声 .....	43

3.3	启动电阻	43
3.3.1	等效充电机理	43
3.3.2	启动电阻安装位置	45
3.3.3	启动电阻性能要求	45
3.4	桥臂电抗器	46
3.4.1	桥臂电抗器功能	46
3.4.2	桥臂电抗器类型	46
3.5	交流场设备	46
3.5.1	交流开关设备	46
3.5.2	交流测量装置	47
3.5.3	交流避雷器	47
3.6	直流场设备	47
3.6.1	直流断路器	47
3.6.2	直流测量装置	50
3.6.3	直流避雷器	51
3.6.4	其他设备	51
4	柔性直流输电系统研究与设计	52
4.1	主接线及主设备参数	52
4.1.1	柔性直流输电系统主接线及其布局	52
4.1.2	电气参数设计	56
4.1.3	柔性直流输电系统建模	62
4.2	柔性直流输电系统的故障与保护	67
4.2.1	换流站内部故障	67
4.2.2	换流站交流侧系统故障	70
4.2.3	直流侧故障	71
4.2.4	保护配置原则与特点	72
4.2.5	保护配置	74
4.3	柔性直流换流站暂态电流分析	78
4.3.1	直流侧故障	78
4.3.2	交流系统阀侧故障	81
4.3.3	交流系统网侧故障	81
4.4	柔性直流换流站的绝缘配合	82
4.4.1	换流站避雷器布置及其参数选择	82
4.4.2	故障工况	85
4.4.3	换流站设备保护水平和绝缘水平的确定	85

4.5	仿真计算	86
4.5.1	主回路参数及控制器仿真验证	88
4.5.2	暂态电流仿真计算	91
4.5.3	过电压与绝缘配合	92
5	柔性直流输电换流阀	96
5.1	换流阀的电气结构	96
5.2	换流阀的核心电气元部件选型设计方法	97
5.2.1	功率器件 IGBT	98
5.2.2	反并联二极管	98
5.2.3	旁路晶闸管	98
5.2.4	旁路开关	98
5.2.5	直流侧电容器	99
5.2.6	高位取能电源	99
5.2.7	直流侧电压传感器	99
5.2.8	放电电阻	99
5.3	换流阀机械结构设计	100
5.3.1	绝缘设计	100
5.3.2	换流阀机械应力设计及抗震设计	101
5.3.3	防水设计	103
5.3.4	防火设计	104
5.3.5	电磁屏蔽设计	104
5.4	换流阀仿真研究	105
5.4.1	机械应力及抗震仿真优化方法	105
5.4.2	柔性直流输电换流阀电场分析	113
5.4.3	热应力仿真	116
6	柔性直流输电控制保护系统	119
6.1	柔性直流输电控制保护系统分层配置与主要功能	119
6.1.1	控制保护系统分层原则	119
6.1.2	控制保护系统的主要功能	119
6.1.3	控制保护系统层次配置方案	120
6.2	系统级控制保护	122
6.2.1	系统级控制保护功能	122
6.2.2	系统级控制保护结构	124
6.3	换流器级控制保护	129
6.3.1	换流器级控制保护功能	129
6.3.2	换流器级控制保护结构	131

6.4	换流阀级控制保护	134
6.4.1	换流阀级控制保护功能	134
6.4.2	换流阀级控制保护结构	136
6.4.3	换流阀级控制保护接口	139
7	柔性直流输电换流阀冷却系统	142
7.1	阀冷系统工作原理	142
7.1.1	内冷系统工作原理	142
7.1.2	外冷系统工作原理	143
7.2	阀冷系统主要参数的计算	144
7.2.1	阀冷系统冷却容量	144
7.2.2	水温	145
7.2.3	内冷系统最小流量	145
7.2.4	流速	145
7.2.5	压差	146
7.3	阀冷系统的主要设备	147
7.3.1	内冷系统主要设备	147
7.3.2	外冷系统主要设备	149
7.4	阀冷系统控制保护	152
7.4.1	交流电源设计	152
7.4.2	控制与保护系统	156
7.4.3	阀冷系统控制保护策略	158
7.5	阀冷系统出厂试验	159
8	柔性直流输电换流阀试验	161
8.1	研究性试验	161
8.1.1	子模块分立部件试验	161
8.1.2	子模块配线检查和弱电试验	163
8.1.3	故障保护试验	163
8.1.4	功率器件和驱动器的匹配试验	164
8.1.5	子模块运行试验	164
8.1.6	子模块耐压与局放试验	167
8.1.7	EMC 试验	168
8.1.8	振动试验	170
8.2	子模块例行试验	170
8.3	阀段例行试验	171
8.3.1	水压试验	171
8.3.2	耐压与局放试验	171



8.4	阀段运行试验	172
8.4.1	一般性要求	172
8.4.2	最小直流电压试验	172
8.4.3	最大电流连续运行试验	173
8.4.4	最大暂态运行能力试验	173
8.4.5	过电流关断试验	173
8.4.6	短路试验	174
8.4.7	故障旁路试验	174
8.4.8	EMC 试验	174
8.5	阀塔绝缘试验	174
8.5.1	一般性要求	174
8.5.2	阀支架绝缘与耐压试验	175
8.5.3	阀端间试验	177
9	柔性直流输电关键设备现场交接与系统试验	178
9.1	柔性直流输电关键设备现场交接试验	178
9.1.1	换流阀交接试验	178
9.1.2	启动电阻交接试验	179
9.1.3	桥臂电抗器交接试验	179
9.1.4	变压器交接试验	180
9.1.5	阀冷系统交接试验	182
9.2	柔性直流输电系统试验	182
9.2.1	换流站启动及 STATCOM 调试	183
9.2.2	双端系统联调试验	185
10	柔性直流输电关键设备运行与维护	187
10.1	换流阀运行与维护	187
10.1.1	阀塔运行维护项目	187
10.1.2	子模块的故障监测与维护	188
10.1.3	换流阀控制保护系统运行与维护	189
10.1.4	阀冷系统的维护	191
10.2	启动电阻运行与维护	192
10.2.1	启动电阻的定期检查	192
10.2.2	启动电阻的故障维护	193
10.3	桥臂电抗器运行与维护	193
11	柔性直流输电系统工程实施案例	194
11.1	±10kV/12.5MW 柔性直流输电背靠背系统	194

---

11.1.1	工程介绍	194
11.1.2	系统成套设计	194
11.2	±160kV/200MW 南澳多端柔性直流输电工程	199
11.2.1	工程介绍	199
11.2.2	系统成套设计	199
11.3	±350kV/1000MW 云南电网与南方电网主网鲁西背靠背 直流异步联网工程	204
11.3.1	工程介绍	204
11.3.2	系统成套设计	204
参考文献		210

# 1 绪 论

## 1.1 柔性直流输电的概念与特点

随着全控型电力电子器件工作频率的提高、性能的不断改善，以微处理器为代表的数字化技术在电力电子装置中的应用日益广泛，并进入了大功率和特大功率领域。起源于 20 世纪 90 年代的柔性直流输电技术是指以电压源换流器(voltage sourced converter, VSC)为核心设备、基于脉宽调制(pulse width modulation, PWM)技术的直流输电技术。国际大电网会议(Conference International des Grands Reseaux Electriques, CIGRE)和美国电气电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)，将其定义为 VSC-HVDC (voltage sourced converter based high voltage direct current)，即基于电压源换流器的高压直流输电<sup>[1-4]</sup>，ABB 公司称之为轻型高压直流输电(HVDC-Light)，西门子公司则称之为新型高压直流输电(HVDC-Plus)。2006 年 5 月，在北京召开的“轻型直流输电系统关键技术研究框架研讨会”上，与会专家经过讨论将基于 VSC 技术的直流输电命名为柔性直流输电(HVDC-Flexible)，以区别于传统直流输电<sup>[5]</sup>。

柔性直流输电系统结构与传统的高压直流输电系统结构基本相同，包括换流器、相电抗器、联结变压器、交流滤波器、直流输电线路等部分，如图 1-1 所示。柔性直流输电系统和传统的高压直流输电系统最主要的区别在于换流器所使用的电力电子器件类型和换流器的控制技术不同。传统的高压直流输电系统采用晶闸管为核心部件。晶闸管是半控型电力电子器件，虽然能够控制开通，但是没有自关断电流的能力。基于晶闸管的电流源型高压直流输电要求受端电网系统必须是一个有源系统，由受端系统提供换相电流，逆变器才能正常运行。柔性直流输电系统则采用全控型电力电子器件组成电压源换流器。全控型电力电子器件和与之反并联的续流二极管组成基本的开关单元。根据对电压和功率等级的不同要求，由这些基本开关单元串联组成两电平、三电平和多电平的拓扑结构。通过控制基本开关单元的通断，电压源换流器可以运行在整流状态或逆变状态，从而实现高压直流远距离传输，或背靠背联网。两个换流站的每一个换流器既可以以整流方式运行，也可以以逆变方式运行，因而可以实现功率双向流动。由于全控型器件既可控制导通时刻，又可控制关断时刻，可分别对所组成的电压源换流器交流侧电压的幅值和相位角进行调节，从而实现有功功率、无功功率的独立控制，以及换流器的四象限运行<sup>[6]</sup>。

与传统的基于晶闸管的 HVDC 输电系统相比，柔性直流输电运行方式更灵活、

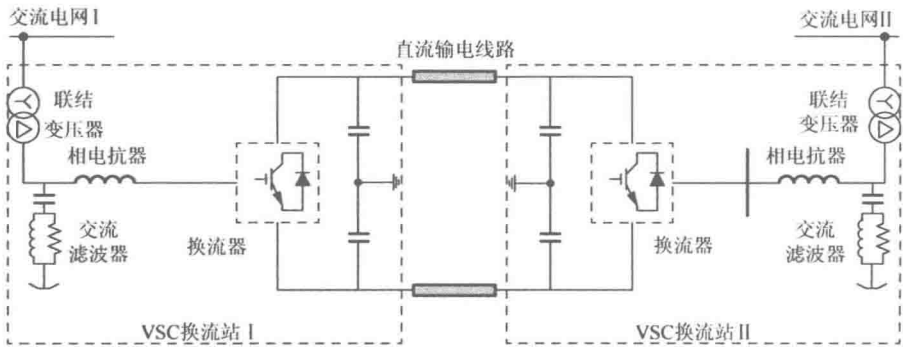


图 1-1 柔性直流输电系统结构

系统的可控性更好，可以向弱交流系统甚至无源系统送电。因此，非常适合向弱交流系统或孤岛供电、可再生能源等分布式发电并网、异步交流电网互联以及城市电网供电等领域。另外，与晶闸管相比，由于全控型器件的开关频率很高，而且在触发控制上采用脉宽调制控制技术，换流站输出的电压只包含高次谐波，谐波含量较小。这也使得换流站安装的滤波装置的容量和体积可以大大减小，甚至可以不配置滤波器，大大节省占地面积。因此，柔性直流输电系统可以采用紧凑化和模块化设计，易于移动、安装、调试和维护。

未来在解决远距离大容量输电、新能源接入以及构建特大型交直流混合电网等问题上，柔性直流输电将展现出特有的优势。作为新一代直流输电技术，柔性直流输电也为电网输电方式的变革和构建未来智能电网提供了有效的解决方案<sup>[7]</sup>。

## 1.2 柔性直流输电的主要优点与应用

柔性直流输电技术以使用全控型开关器件和脉宽调制控制技术为主要技术特征，通过设计特定的开关器件的通断控制策略，控制系统可以在电压源换流器的运行范围内灵活地调节其输出的电压和电流，实现有功功率和无功功率的独立控制。与传统高压直流输电技术相比，柔性直流输电技术具有以下几方面的优点：

(1) 控制灵活。在传统高压直流输电系统中，换流器只有一个控制量——晶闸管的触发角，而晶闸管的关断是由其所在回路的交流电压决定。在交流电压的作用下，晶闸管的电流逐渐减少至零以下时，晶闸管才能关断。因此，换流器的可控性受到限制，不能灵活地实现有功功率和无功功率的独立控制。传统直流的潮流反转比较复杂，且需反转极性。而电压源换流器使用全控型开关器件，器件的开通和关断均可控制，这样换流器交流输出电压的幅值和相位都可以灵活调节，实现无功功率和有功功率的解耦控制，并且可以在不改变直流侧电压极性的情况下灵活改变功率流动的方向。这意味着在不改变控制系统配置和电路结构、不需

要闭锁换流器的情况下,就可以方便快速地实现潮流反转,有利于实现灵活可控的多端直流输电系统<sup>[8]</sup>。

(2) 谐波性能好。无论是采用正弦脉宽调制 (sinusoidal pulse width modulation, SPWM) 技术的两电平拓扑或三电平拓扑,还是采用最近电平逼近调制 (nearest level modulation, NLM) 的模块化多电平拓扑结构的柔性直流输电技术,其开关频率相对于传统直流较高,谐波含量小,需要的滤波装置容量小,甚至可以不需要滤波器。

(3) 能够向无源网络供电。传统高压直流输电换流器需要交流侧与足够容量的交流系统连接才能实现逆变的工作状态,即逆变方式只能是有源逆变,不能脱离交流系统单独工作。当交流系统发生故障时,容易发生换相失败。而柔性直流输电系统的电压源换流器电流能够自关断,不需要外加的换相电压,不存在换相失败的问题,能够工作在无源逆变状态,因此,其受端系统可以是弱网或无源负荷,并且能够在事故后快速恢复供电和黑启动。2003年,美国东北部“8·14”大停电时,美国长岛的柔性直流输电工程的表现很好地验证了柔性直流输电系统的黑启动能力<sup>[9]</sup>。

(4) 提高交流电网输电能力。柔性直流输电可以独立调节无功功率和有功功率,维持交流电网功率角的稳定;能够在维持交流电压稳定的前提下,调节有功潮流,也可以在维持有功功率稳定的前提下,调节无功功率;能够快速抵消电网的暂态过电压,消除交流系统的电压闪变和特定次谐波,从而提高现有交流线路的输电容量。

(5) 设计灵活,施工期短,环境污染小。柔性直流输电具有紧凑化、模块化设计的特点。换流阀控制和冷却系统通常在工厂内封装,运抵现场后能够快速组装,较之传统的直流输电系统,更便于移动、安装、调试和维护,从签订合同到交付使用的典型工期在 20 个月左右<sup>[10]</sup>。大部分设备可以安装在户内,对环境景观影响很小。使用户内设计还可以屏蔽高频射电,降低噪声,使室内设备不受恶劣天气的影响,降低发生污染事故的风险。

由于柔性直流输电具有上述优点,柔性直流输电系统被广泛应用在以下领域:

(1) 分布式新能源并网。分布式新能源主要是指通过风能和太阳能进行发电。这些电源受风、光等气候影响大,具有波动性和间歇性的特点。柔性直流输电可对有功和无功进行独立控制,可当成静态无功补偿器,能平抑电压波动,改善电能质量,并且在电网电压跌落时,能够有效支撑系统正常运行。因此,利用柔性直流输电与电网实现互联是充分利用分布式新能源的可行方案。

(2) 交流电网的异步互联。柔性直流换流站具有有功、无功解耦控制的优良特性,在交流系统故障时可以快速发出无功功率,帮助交流系统恢复稳定,且不增加交流电网的短路电流、不受交流系统短路容量限制、不存在换相失败问题,非常适用于交流电网的异步互联。在国外,美国和墨西哥间的 Eagle-Pass 背靠背

工程、澳大利亚的 Murray Link 工程、纳米比亚的 Caprivi Link 工程、英国和爱尔兰间的 Britain-Ireland 工程等都是柔性直流技术在交流异步互联的典型应用<sup>[11-13]</sup>。

(3) 大城市电网扩容以及构建直流输配电网。由于大中城市的规模迅速扩大, 城市电网负荷持续增长, 对电能的质量要求也不断提高。以交流输电为主的城市电网受到诸多因素的限制: 城市空中输电走廊已没有发展余地; 用电负荷和供电容量的增加带来短路电流超限问题; 环境保护的客观要求等。柔性直流输电能够快速控制有功功率和无功功率, 稳定电压, 谐波含量少, 有效改善供电的电能质量; 通常采用埋地式直流电缆, 不需要占用输电走廊, 既能达到城市电网增容的目标, 又不影响城市市容; 柔性直流输电换流站占地少, 能在一定程度上节约土地资源; 可灵活控制交流侧的电流, 不增加交流系统短路容量。因此, 采用柔性直流输电向城市中心区域供电将成为大城市电网增容扩建的最佳途径<sup>[14]</sup>。

(4) 用于向偏远地区、海上平台、孤岛供电<sup>[15]</sup>。中国幅员辽阔, 很多偏远地区距离大电网较远, 系统本身负荷轻且波动性较大, 难以提供足够的无功支撑; 大部分孤岛及海上平台属于无源网络, 采用独立的供电系统, 燃料利用率偏低, 环境污染严重。针对弱网及无源网络, 如果采用交流输电, 电压跌落将非常严重, 并且采用传统直流输电容易发生换相失败。而柔性直流输电则不需外加换相电压, 受端系统可以是无源网络, 为偏远地区、海上平台、孤岛的供电问题提供了新的解决方案。同时, 柔性直流输电换流站占地面积小, 非常适合在面积不足的海岛或钻井平台上建设。

(5) 提高电能质量, 促进电力市场发展<sup>[10]</sup>。柔性直流输电系统可以独立快速地控制有功功率和无功功率, 能够保持交流系统电压基本不变, 这使得该系统的电压和电流更易于满足电能质量的标准。同时, 它还具有向两端的交流系统提供无功支撑的能力, 增加相连电网的运行稳定性。可以通过柔性直流输电的直接互联, 构建电力供应商之间交换电力的可行技术平台, 增加运行灵活性和可靠性。

## 1.3 柔性直流输电技术的工程应用

### 1.3.1 国外柔性直流输电工程

世界上最早应用柔性直流输电的地区在欧洲, 目前, 欧洲也是建成柔性直流输电项目最多的地区。欧洲多个国家临海, 为了开发和利用新能源, 建设和规划了大量的海上风电平台, 输送有功功率达到数百兆瓦, 距离本岛 60~70km, 这些风电平台通过柔性直流输电和海底直流电缆与本岛连接无疑是最适合的实现手段。早期世界上只有 ABB 公司的少数工程投入运行, 主要采用两电平或三电平换流器结构[采用绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)], 由于 IGBT 器件的串联存在动态均压问题, 同时低电平数目的电压源换流器谐波和损耗性能

都较差,这使得早期的柔性直流输电系统实现难度较高。2001年,德国学者 Rainer Marquardt 提出了模块化多电平换流器技术(modular multilevel converter, MMC),可通过标准子模块的串联方便地实现换流器的高压大容量化,输出电压具有多个电平,谐波性能优异<sup>[6,16,17]</sup>。近些年来,国内外建成的柔性直流输电工程多采用 MMC 结构。下面介绍已建成的具有代表性的国外柔性直流输电工程,详细情况如表 1-1 所示。

表 1-1 国外柔性直流输电工程

序号	名称	电压/kV	容量/MW	输电线路/km	建成时间/年
1	赫尔斯扬实验性工程 (Heälsjön)	±10	3	10(架空线)	1997
2	哥特兰工程 (Gotland)	±80	50	70(电缆)	1999
3	泰伯格工程 (Tjareborg)	±9	7.2	4.4(电缆)	2000
4	迪莱克特联结工程 (Direct-link)	±80	3×60	60(电缆)	2000
5	伊格-帕斯工程 (Eagle-Pass)	±15.9	36	背靠背	2000
6	莫里联结工程 (Murray Link)	±150	200	180(电缆)	2002
7	克劳斯桑德工程 (Cross Sound Cable)	±150	330	42(电缆)	2002
8	泰瑞尔工程 (Troll A)	±60	2×44	70(电缆)	2005
9	波罗的海联网工程 (Estlink)	±150	350	105(电缆)	2007
10	瑞德工程 (NordE.ON1)	±150	400	100(电缆)	2009
11	瓦尔哈离岸工程 (Valhall Offshore)	150	78	292(电缆)	2010
12	传斯贝尔联络工程 (Trans Bay Cable)	±200	400	88(电缆)	2010
13	卡普里维联网工程 (Caprivi Link)	350	300	950(架空线)	2011
14	英格兰-爱尔兰工程 (Britain-Ireland)	±200	500	260(电缆)	2012
15	博尔文工程 (BorWin)	±300	800	200(电缆)	2013

### 1. 赫尔斯扬实验性工程

1997年3月,世界上第一个采用电压源换流器的实验性直流输电工程——赫尔斯扬直流输电工程开始试运行。该实验性工程将瑞典中部赫尔斯扬的电能输送到哥狄斯摩处的交流系统,连接了赫尔斯扬和哥狄斯摩两个换流站,输电距离为10km,电压等级为±10kV,传输功率为3MW,能够直接对哥狄斯摩处的独立负

荷供电，首次实现了柔性直流输电技术的工程化应用。现场试验表明，此系统运行稳定，各项性能都达到预期效果。柔性直流输电换流器技术的应用，为交流输电系统电能质量的提高和传统输电线路的改造提供了一种新的思路，开创了直流输电技术的一个新时代。

## 2. 哥特兰工程

1999年，世界上第一个商业运行的柔性直流输电工程——哥特兰工程投入运行，这也是世界上第一个陆上风电场并网的柔性直流输电工程，其采用两电平换流器，将瑞典哥特兰岛上的风电场接入电网。它的输电容量为50MW，电压等级为 $\pm 80\text{kV}$ ，将南斯(Näs)风电场的电能送到哥特兰岛西岸的维斯比(Visby)市。工程投入运行后取得了良好的运行效果，但功率器件开关频率高达1950Hz，系统损耗较高。

## 3. 伊格-帕斯背靠背直流输电工程

2000年，伊格-帕斯背靠背柔性直流输电工程投入运行，其位于美国德州和墨西哥边境附近，采用三电平VSC-HVDC技术，两侧交流电压132/132kV，直流电压 $\pm 15.9\text{kV}$ ，直流电流1100A，是一个背靠背联网工程。设备由ABB公司提供，主要用于电力交易、系统互联及电压控制。

## 4. 克劳斯桑德工程

2002年投入运行的克劳斯桑德工程采用三电平换流器，直流侧电压 $\pm 150\text{kV}$ ，传输功率330MW，直流线路采用42km海底电缆，连接美国新英格兰纽黑文地区电网和纽约长岛地区电网。2003年，美国北部发生了“8.14”大停电事故，几个小时后根据电力调度要求，美国首先将该工程投入运行，通过交流电压控制能够使相连的长岛和纽黑文地区电网的交流电压达到稳定，快速恢复供电。该工程所提供的黑启动能力很好地体现了柔性直流输电系统的技术优势。

## 5. 泰瑞尔柔性直流输电工程

2005年10月投入运行的挪威泰瑞尔柔性直流输电工程是世界上第一个从大陆向海上平台提供电能的柔性直流输电系统，由挪威的克尔斯奈斯换流站向泰瑞尔海上钻井平台供电。工程使用了两个并联的柔性直流输电系统，每个系统的额定功率为44MW，直流电压为 $\pm 60\text{kV}$ ，输电线路为70km的海底电缆。

## 6. 波罗的海联网直流输电工程

2006年建成于爱沙尼亚和芬兰的波罗的海直流输电工程，两侧交流电压330/400kV，直流电压 $\pm 150\text{kV}$ ，传输功率350MW，设备由ABB公司提供，主要实现芬兰和爱沙尼亚的电网异步互联，采用了陆上电缆加海底电缆的传输方式。

## 7. 瓦尔哈离岸直流输电工程

挪威瓦尔哈离岸直流输电工程建成于2009年，工程采用ABB公司的设备。直流电压 $\pm 150\text{kV}$ ，传输功率78MW，输电距离292km。主要目的是为海上钻井平台供电，其提高了油气田的生产效率，减少了温室气体排放。换流器采用两电



平级联结构 (cascaded two-level converter, CTL), 开关器件采用 ABB 公司的串联压接式 IGBT, 上、下桥臂间串入了谐振滤波装置<sup>[14,18]</sup>。

### 8. 传斯贝尔联络工程

2010 年投入运行的传斯贝尔柔性直流工程连接了匹兹堡市的匹兹堡换流站和圣弗朗西斯科的波特雷罗换流站, 主要功能是实现更大容量的功率传输, 进行调峰调频, 电力可以直接输送到旧金山的中心, 以满足旧金山日益增长的城市供电需求, 增强城市供电系统的安全性。输电线路采用高压直流电缆, 穿过旧金山湾区的海底, 全长 88km。此工程中首次使用了新型的模块化多电平换流器, 其额定有功功率为 400MW, 直流电压为  $\pm 200$  kV。MMC 拓扑结构避免了大量功率开关器件直接串联时因器件的不一致导致的均压等问题。MMC 输出的交流电压电平数较多, 通过合理的调制策略可以使输出波形更加趋近于正弦波, 谐波含量更小, 输出波形更理想, 同时, MMC 的使用也显著降低了器件的开关频率, 进而降低了换流器损耗。因此, MMC 被提出之后引起了相关领域研究者和技术人员的广泛关注, MMC-HVDC 系统在近年来也得到了迅速发展。从 2010 年传斯贝尔联络工程投入运行后, MMC-HVDC 已成为广泛认可的工程建设趋势, 绝大部分的新建工程采用了 MMC (或者 CTL) 作为其拓扑结构。

### 9. 卡普里维联网工程

2010 年投入运行的卡普里维联网工程是世界上第一个使用架空线路传输的商业化柔性直流输电系统。此工程直流侧电压 350kV, 额定有功功率 300MW。这条传输线路使用了现有的鲁斯-奥斯 400kV 交流架空线路并升级改造, 连接了卡普里维地区的赞比亚西河换流站和西南部 970km 之外的鲁斯换流站。这样不仅连接了东北部的卡普里维和纳米比亚的中部电网, 还将纳米比亚、赞比亚、津巴布韦、刚果、莫桑比克和南非的输电系统互联成一个电网, 更有效地利用地区间的发电资源, 包括可再生能源<sup>[12]</sup>。

## 1.3.2 国内柔性直流输电工程

中国在柔性直流输电领域的理论研究和工程应用起步比较晚。2006 年开始, 国内相关研究单位及时把握住了技术发展的趋势, 在基础理论研究、关键技术攻关、核心设备研制、试验能力建设、工程系统集成等方面取得了一系列的创新成果。目前, 国内已具备了柔性直流输电自主研发和装备制造能力。

### 1. 上海南汇柔性直流输电示范工程

2011 年 7 月, 中国自主研发和建设的亚洲首个柔性直流输电示范工程——上海南汇柔性直流输电示范工程正式投入运行。该工程额定输送有功功率 18MW, 额定直流电压  $\pm 30$  kV, 两端换流站均采用 49 电平的模块化多电平拓扑结构。南汇柔性直流输电工程将上海已建的规模最大的风电场——上海南汇风电场的电能送出, 风电场换流站经 150m 电缆线路连接风电场变电站 35kV 交流母线, 两个换