



国家电网公司
电力科技著作出版项目

ROUXINGZHILIUSHUDIAN
JIANMOHEFANGZHENJISHU

柔性直流输电 建模和仿真技术

赵成勇◎著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

柔性直流输电 建模和仿真技术

赵成勇◎著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书重点阐述了柔性直流输电的控制策略、系统建模和仿真技术。本书共 8 章, 主要内容包括柔性直流输电的基本原理, 两电平、三电平柔性直流输电的建模与仿真, MMC 型柔性直流输电建模与仿真, 多端柔性直流输电仿真, 柔性直流输电的 RTDS 建模和仿真, 具备直流故障穿越能力的 MMC-HVDC 系统, MMC-HVDC 高速建模与仿真等。附录中还介绍了一些典型的柔性直流输电工程, 以及 VSCTrans 程序和三电平 NPC 型 VSC-HVDC 程序。

本书适合于从事柔性直流输电系统研究的工程师以及高等学校电力系统专业教师和研究生阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

柔性直流输电建模和仿真技术 / 赵成勇著. —北京: 中国电力出版社, 2014.4

ISBN 978-7-5123-5378-7

I. ①柔… II. ①赵… III. ①直流输电—系统建模②直流输电—系统仿真 IV. ①TM721.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 309963 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 4 月第一版 2014 年 4 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 14.25 印张 255 千字

印数 0001—3000 册 定价 56.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪
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

近些年，以全控型器件为基础的电压源换流器高压直流输电（Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC）得到快速发展，国内将该技术命名为柔性直流输电（High Voltage Direct Current Flexible, HVDC Flexible），以区别于采用晶闸管的传统直流输电（Line Commutated Converter based HVDC, LCC-HVDC）技术。国际上柔性直流输电工程应用容量已达到 $2 \times 1000\text{MW}$ ，电压等级已达到单极 500kV ，其应用容量和电压等级正在快速增长。

相比于传统直流输电，柔性直流输电主要有以下优点：① 不依赖交流电网换相，没有换相失败问题；② 可以同时且相互独立地控制有功功率、无功功率，没有无功补偿问题；③ 能够起到静止同步补偿器的作用，动态补偿交流母线的无功功率，稳定交流系统电压；④ 可以工作在无源逆变方式，实现对无源网络系统的供电；⑤ 容易构成多端网络等。

柔性直流已大量应用于离岸风电场联网工程，在欧洲北海，正在建设的离岸风电柔性直流输电并网工程有 6 项，容量从 576MW 至 900MW 不等。欧洲 2014 年还将投运 $2 \times 1000\text{MW}$ 法国—西班牙联网工程，另外将建成挪威—丹麦之间跨越海峡的单极 500kV 、 700MW 的 Skagerrak HVDC Interconnections Pole 4 工程，该工程将开创传统直流输电和柔性直流输电并联混合馈入交流电网之先河。

世界上多个国家已提出了柔性直流输电的庞大规划。到 2020 年，德国在北海上的直流输电工程将超过 20 个，单个工程容量均在 900MW 以上。到 2025 年，英国国家电网在东海岸和北海区域将规划数十个大型海上风电场以及近 50 个柔性直流输电工程，构成柔性直流输电网络。美国正在建设三端柔性直流工程，实现美国东、西部和德州电网的紧密连接，容量达 5000MW ；在美国东海岸将建设 6 端海上风电场联网工程，容量为 6000MW ；在未来 20 年内将计划建设 60 多条柔性直流输电线路，形成与现有交流电网并存的网架结构。

中国在舟山柔性直流工程和南澳柔性直流工程之后，还将规划建设厦门海岛送电工程、大连柔性直流供电工程及中国南方电网有限责任公司省区之间联网工程等。

除了大型离岸风电场并网输电工程、大电网互联工程和中心城市供电工程，柔性直流输电技术也成功地应用于若干无源孤岛供电工程和中低压配电网络。柔性直流输电在新能源并网、输电网络（包含直流网络）、配电网络等领域具有大范

围的适应性，正改变着交流电网的传统结构。

换流器是柔性直流输电系统的核心部件，1990年加拿大麦吉尔大学的 Boon-Teck Ooi 教授等人首次提出柔性直流的概念时，采用了两电平电压源换流器结构，随着工程电压等级和传输容量的大幅提升，三电平电压源换流器也得到工程应用。然而，两电平、三电平电压源换流器普遍采用高频脉宽调制技术，换流器损耗较大。同时，由于单个绝缘栅双极晶体管（IGBT）器件的耐压能力有限，工程中通常需要大量 IGBT 组成串联阀体，这将带来静态、动态均压困难及电磁干扰等问题。这在一定程度上限制了采用两电平和三电平电压源换流器的柔性直流输电技术的广泛应用。

为解决上述两电平、三电平柔性直流输电技术存在的缺陷，2001年德国联邦国防军大学的 R. Marquardt 和 A. Lesnicar 提出了模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)拓扑。MMC 采用子模块串联的方式构造换流阀，避免了大量器件的压接式串联，降低了对器件一致性的要求。同时，特殊的调制方法决定了其可以在较低的开关频率（150~300Hz）下获得很高的等效开关频率，随着电平数的升高，输出波形接近正弦，可以省去交流滤波器。因此 MMC 迅速得到工程和学术界的很大关注，且目前世界范围内在建的柔性直流输电工程大都采用 MMC 或类似拓扑。

本书以基于两电平电压源换流器的柔性直流输电技术为切入点，介绍其基本运行原理，进而重点介绍 MMC 型柔性直流输电系统的建模和仿真技术。

在本书即将出版之际，特别感谢参与本书研究工作的我的已毕业和在读的研究生们，他们是郭春义博士，博士研究生许建中、张宝顺，硕士研究生王朝亮、刘兴华、赵昕、李科、刘军娜、杨晓东和仇雪娜等，书中部分内容借鉴了他们的学位论文。胡静博士，博士研究生李探、倪晓军、苑宾，硕士研究生杨柳、刘文静、李路遥、翟晓萌、刘济豪等参与了部分章节材料整理和编辑工作，在此表示感谢。特别感谢肖湘宁教授和汤广福教授对本书研究和出版工作的关心和支持！

本书的研究工作得到了国家 863 高技术项目（2013AA050105）和国家自然科学基金项目（50577018，51177042）的资助，在此表示感谢！

由于作者水平有限，时间仓促，书中难免存在疏漏之处，敬请广大读者批评指正为盼。

赵成勇

2013年12月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 传统高压直流输电概况	1
1.1.1 传统高压直流输电的发展简史	1
1.1.2 传统高压直流输电的主要优点	3
1.1.3 传统高压直流输电存在的主要问题	4
1.2 柔性直流输电概况	5
1.2.1 柔性直流输电的发展介绍	5
1.2.2 柔性直流输电的主要优点	8
1.2.3 柔性直流输电存在的主要问题	9
1.2.4 柔性直流输电的主要应用场合	10
1.2.5 柔性直流输电在我国的发展	11
1.2.6 柔性直流输电对弱化我国电网 AC/DC 耦合的意义	12
1.3 电压源换流器的主要拓扑结构	14
1.3.1 三相两电平电压源换流器拓扑结构	14
1.3.2 多电平电压源换流器拓扑结构	15
1.4 柔性直流输电建模仿真工具简介	23
1.4.1 电力系统仿真的类型	23
1.4.2 离线数字仿真工具 PSCAD/EMTDC	25
1.4.3 离线数字仿真工具 MATLAB/SIMULINK	27
1.4.4 实时数字仿真工具 RTDS	29
参考文献	31
第 2 章 柔性直流输电的基本原理	34
2.1 柔性直流输电的运行原理	34
2.1.1 两电平电压源换流器的运行原理	37
2.1.2 三电平电压源换流器的运行原理	38
2.1.3 模块化多电平换流器的运行原理	39

2.2	柔性直流输电的调制方式	43
2.2.1	两电平电压源换流器的调制方式	43
2.2.2	三电平电压源换流器的调制方式	48
2.2.3	模块化多电平换流器的调制方式	49
2.3	电压源换流器的控制策略	50
2.3.1	基于 $d-q$ 轴的解耦控制策略	50
2.3.2	基于直角坐标系的解耦控制策略	55
	参考文献	59
第 3 章	两电平、三电平柔性直流输电的建模与仿真	61
3.1	两电平柔性直流输电的建模与仿真	61
3.1.1	主电路系统参数设计	61
3.1.2	两电平柔性直流输电的仿真	66
3.2	三电平柔性直流输电的建模与仿真	71
	参考文献	73
第 4 章	MMC 型柔性直流输电建模与仿真	75
4.1	MMC 基本参数选择	75
4.1.1	桥臂子模块数目的确定	75
4.1.2	子模块电容的参数设计	76
4.1.3	桥臂电抗器的参数设计	76
4.2	MMC 的调制策略	78
4.2.1	载波移相正弦脉宽调制	78
4.2.2	载波层叠正弦脉宽调制	84
4.2.3	空间矢量脉宽调制	85
4.2.4	特定次谐波消去法	86
4.2.5	最近电平逼近调制	87
4.3	MMC 的电容电压平衡控制与相间环流抑制	88
4.3.1	子模块电容电压波动机理	88
4.3.2	通用电容电压平衡控制策略	89
4.3.3	MMC 的相间环流产生机理	91
4.3.4	通用 MMC 相间环流抑制策略	92
4.3.5	采用 CPS-SPWM 的相间环流抑制和电容电压平衡控制策略	96
4.4	MMC 型柔性直流输电的仿真分析	98

4.4.1	MMC 型柔性直流输电的启动控制	98
4.4.2	采用 CPS-SPWM 调制的 MMC 型柔性直流输电仿真分析	102
4.4.3	基于 NLM 调制的 MMC 型柔性直流输电仿真	104
4.5	基于循环嵌套机理的模块化多电平换流器建模	107
4.5.1	NLMMC 拓扑结构	110
4.5.2	NLMMC 主要参数的设计与计算	111
4.5.3	NLMMC 控制策略	113
4.5.4	NLMMC 运行特性分析	115
4.5.5	仿真验证	117
	参考文献	120
第 5 章	多端柔性直流输电仿真	122
5.1	多端柔性直流输电的拓扑结构	122
5.1.1	拓扑结构类型	122
5.1.2	拓扑结构比较	124
5.2	多端柔性直流输电的控制策略	126
5.2.1	电压下降控制方式	127
5.2.2	主从控制方式	130
5.3	MMC 型多端柔性直流输电仿真	135
	参考文献	137
第 6 章	柔性直流输电的 RTDS 建模和仿真	138
6.1	柔性直流输电换流器的小步长模型	138
6.1.1	小步长封装元件	139
6.1.2	小步长开关元件	140
6.1.3	小步长线路元件	142
6.1.4	小步长接口变压器	143
6.2	两电平柔性直流输电的 RTDS 建模与仿真	145
6.2.1	两电平柔性直流输电的 RTDS 建模	145
6.2.2	仿真分析	145
6.3	MMC 型柔性直流输电的 RTDS 建模与仿真	148
6.3.1	MMC 型柔性直流输电的 RTDS 建模	148
6.3.2	采用 CHAINV3 模块的 MMC 型柔性直流输电建模	151
6.3.3	仿真分析	155

6.4	RTDS 在 MMC-HVDC 仿真方面的最新进展	156
6.4.1	基于 FPGA 板卡的硬件平台	156
6.4.2	基于 FPGA 板卡的仿真模块	158
6.4.3	基于 FPGA 板卡的 MMC 型柔性直流输电系统建模与仿真分析	160
	参考文献	163
第 7 章	具备直流故障穿越能力的 MMC-HVDC 系统	164
7.1	全桥 MMC 型柔性直流输电系统	164
7.1.1	全桥 MMC 拓扑结构	165
7.1.2	全桥 MMC 运行原理	166
7.1.3	全桥 MMC 触发控制系统	169
7.1.4	全桥 MMC 启动方法	171
7.1.5	全桥 MMC 直流故障穿越控制策略	173
7.2	新型双箝位 MMC-HVDC 系统	182
7.2.1	NDCMMC 的结构及特点	182
7.2.2	NDCMMC 双极直流故障机制	185
7.2.3	新型双箝位子模块结构扩展	187
7.2.4	仿真分析	190
	参考文献	193
第 8 章	MMC-HVDC 高速建模与仿真	194
8.1	MMC 的三种常见子模块拓扑结构	194
8.2	超大规模 MMC 电磁暂态仿真提速模型	195
8.2.1	模型提出	195
8.2.2	模型验证	196
8.3	401 电平 MMC-HVDC 仿真研究	198
	参考文献	199
附录 A	典型柔性直流输电工程介绍	201
附录 B	VSCTrans 程序介绍	205
附录 C	三电平 NPC 型 VSC-HVDC 程序介绍	215
	内容索引	218

第 1 章 概 述

1.1 传统高压直流输电概况

1.1.1 传统高压直流输电的发展简史

电力技术的发展最早是从直流电开始的。早期的直流输电无需进行换流，而是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。早期的直流输电工程主要有：1882年在德国建成的额定电压 2kV、额定输送功率 1.5kW、输送距离 57km 的慕尼黑国际展览会送电工程；1889年在法国建成的毛梯艾斯（Moutiers）—里昂（Lyon）的额定电压 125kV、额定输送功率 20MW、输送距离 230km 的直流输电工程^[1]。

随着三相交流发电机、感应电动机和变压器的迅速发展，直流发电和用电领域很快被交流电所取代。同时，变压器又可以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。

随着交流电网的发展，电力系统的规模快速增大，使得电力系统的稳定问题日益突出。由于交流电网存在的稳定性问题以及交流线路远距离输电时存在的容量限制问题，使人们的目光再次转向直流输电。1954年，世界上第一条电网换相高压直流输电（Line Commutated Converter based High Voltage Direct Current, LCC-HVDC）工程投入商业运行，随着电力电子技术的发展，直流输电逐步在工程实际中得到了应用^[1]。此后，高压直流输电以其适于远距离输电、有功功率快速可控等特点在世界范围内得到了快速发展。与后来发展起来的柔性直流输电相比，LCC-HVDC 一般又被称做传统高压直流输电。传统高压直流输电作为一项日趋成熟的技术，在远距离大功率输电、电力系统非同步联网、海底电缆送电等方面得到了广泛应用。从使用的换流器件角度分类，传统高压直流输电的发展可以分为以下两个时期^[1~4]：

（1）汞弧阀换流时期（1954~1977年）。1928年，具有栅极控制能力的汞弧阀研制成功，逐渐应用于直流输电领域。世界上第一项工业性直流输电工程为瑞典的果特兰岛工程（100kV，20MW，1954年投运），而最后一项采用汞弧阀换流

器的直流工程为加拿大纳尔逊河 I 期工程 ($\pm 450\text{kV}$, 1977 年投运)。在此期间, 全球投入运行的汞弧阀直流工程共有 12 项, 其中最大输送容量和最长输送距离的直流工程为美国太平洋联络线工程 (1440MW, 1362km), 最高输电电压的直流工程为加拿大纳尔逊河 I 期工程 ($\pm 450\text{kV}$)。这一时期被称做汞弧阀换流时期。最大容量的汞弧阀是用于太平洋联络线的多阳极汞弧阀 (133kV、1880A) 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, 这一时期的直流输电发展受到很大限制。

(2) 晶闸管换流时期 (1972 至今)。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得到应用, 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, 而且其制造、试验、运行维护和检修都比汞弧阀简单和方便。1970 年, 瑞典首先在果特兰直流工程上扩建了直流电压为 50kV、功率为 10MW、采用晶闸管换流阀的试验工程。1972 年, 加拿大魁北克和新布伦兹维克非同步连接的伊尔河背靠背直流输电工程首次全部采用晶闸管换流阀。由于晶闸管换流阀比汞弧阀具有明显的优势, 从 1977 年开始新建的直流输电工程均采用晶闸管换流阀^[5]。与此同时, 原本采用汞弧阀的直流工程也逐步被晶闸管阀所替代, 直流输电技术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、氧化锌避雷器等新技术在直流输电工程也得到了广泛应用, 促进了直流输电技术的进一步发展。

1954~2012 年, 世界上投入运行的直流输电工程已超过 100 项, 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) 等方面发挥了重大的作用。近年来, 我国在高压直流输电方面发展迅猛, 在世界范围内率先进行了 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程的建设, 首个特高压直流输电工程云南—广东 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电工程已于 2010 年投运。在已运行的直流输电工程中, 锦屏—苏南 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电工程是输送容量最大 (7200MW)、输送距离最长 (2059km) 的直流工程; 计划建设的直流工程中, 淮东—成都直流输电工程是直流电压最高 ($\pm 1100\text{kV}$)、输送容量最大 (10 000MW) 的工程^[6, 7]。

传统高压直流输电在技术和经济上具有独特优势, 因此它在远距离大容量输电和电网互联方面对我国电力工业的发展起到十分重要的作用^[6]。自舟山直流输电工程投运以来, 我国已建成投运的传统高压直流输电工程有 20 项以上。预计到 2020 年, 我国电网建设将依据交流和直流输电相辅相成、共同发展的原则, 建成“强交强直”的特高压混合电网和坚强的送、受端电网, 其中直流工程总计将达 38 项, 特高压直流输电工程将达 15 项^[7], 即将建设的直流输电工程占世界直流

输电新建工程的一半以上。

随着我国传统高压直流输电工程数量及容量的增加，受端交流系统强度会相对减弱^[8-11]。在南方电网和华东电网，均形成包含有±800kV 直流输电系统的直流多落点电网，而且各个直流逆变站间的电气距离都很小，交流与直流、直流与直流之间有很强的耦合。当多条直流输电线路落点于同一交流电力系统时，便形成了多馈入直流输电系统（Multi-Infeed Direct Current System, MIDC）^[10, 11]。此时，某一直流子系统的交流侧电压或无功功率的波动会影响邻近交流母线电压，可能会导致多个换流器的同时或级联换相失败，给整个多馈入直流输电系统带来巨大冲击，致使功率恢复产生很大困难。

针对以上缺陷，近年来人们对传统高压直流输电技术做了许多有益的改进和尝试，如电容换相换流器（Capacitor Commutated Converter, CCC）、可控串联电容换流器（Controlled Series Capacitor Converter, CSCC）等，但无法从根本上改变晶闸管器件依赖交流电网才能换相的缺陷。全控型电力电子器件的研制成功使得具备自换相能力的电压源型换流器（Voltage Source Converter, VSC）的工程应用成为可能。基于电压源换流器的直流输电从根本上克服了传统高压直流输电存在换向失败的缺陷，发展前景良好。

1.1.2 传统高压直流输电的主要优点

同高压交流输电相比，传统高压直流输电有诸多优点^[1-5]，主要体现在以下四个方面：

（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充分体现。由于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站高。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变电站的造价相等时的输电距离为等价距离^[1]。因此，对于一定的输电容量，当输电距离大于等价距离时，采用直流输电比较经济。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，不需要装设并联电抗器^[1]。

（2）运行稳定性。交流线路的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，同步机间联系电抗增大，稳定问题更为突出。相比之下，直流输电不存在功角稳定问题，可在受端交流系统允许的范围内，达到换流器和线路的物理极限^[3]。

（3）非同步联网。采用直流对交流系统进行互联不会造成短路容量的增加，也有利于防止交流系统的故障进一步扩大。与此相反，当两个交流系统电网通过交流联网时，会造成短路容量增大，造成断路器的选择困难。因此，对于已经存

在的庞大交流系统，通过采用高压直流互联，分割成相对独立的子系统，可有效减少短路容量，提高系统运行的可靠性。华北电网与东北电网通过高压直流输电进行背靠背联网就是这一思想的工程体现。

(4) 控制灵活。直流输电的一个重要特点是潮流快速可控，有利于改善交流系统的运行特性。直流输电换流器是基于电力电子器件的电能变换电路，因此其对电力潮流的控制迅速而精确。迅速的潮流控制对于所联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控制都能发挥重要作用。

1.1.3 传统高压直流输电存在的主要问题

由于传统高压直流输电采用无自关断能力的普通晶闸管作为换流元件，只能对元件的开通进行控制，而元件的关断是靠交流系统提供的换相电压实现的。因此传统高压直流输电系统依赖完整的交流系统运行，需要一定强度的交流系统来实现换相，这使得传统高压直流输电客观上存在一些局限^[1~4]：

(1) 传统高压直流输电的运行受两端交流电网强度影响，缺乏独立性。为保证换流器的可靠换相，受端交流系统必须具有足够的电气强度，即短路比要满足一定要求。因此传统高压直流输电难以应用于无源系统或受端电网较弱的系统中。当交流电网发生短路等故障而出现交流母线电压下降时，传统高压直流输电的换流重叠角将增大，容易导致换相失败。为避免换相失败发生，通常采用简单的闭锁措施使换流器退出运行，导致相联的交流系统突然失去一个很大的有功电源，可能导致事故扩大。

(2) 由于触发滞后角 α 和熄弧角（关断角） γ 的存在，传统高压直流输电要吸收大量的无功功率。正常稳态运行时，整流器和逆变器分别吸收占所输送直流功率 30%~50%和 40%~60%的无功功率，暂态运行时换流器吸收的无功功率更多^[2]。这就需要大量的无功补偿及滤波设备，而大量的无功补偿设备使直流输电系统存在不足。首先，这些无功补偿及滤波设备增加了换流站的投资和运行维护费用；其次，大量的无功补偿和滤波设备在特定的情况下可能引起过电压问题。例如，传统高压直流输电系统在逆变侧甩负荷、紧急停运、换流器丢失触发脉冲、交直流线路故障等情况下，换流器消耗的无功功率迅速减小，过剩的无功功率将会注入所连接的交流系统，引起换流站交流母线电压升高甚至过电压问题，造成绝缘配合困难，增加了整个系统的造价。

(3) 换流器对交流侧来说，除了作为一个基波负荷（在整流站）或基波电源（在逆变站）以外，它还是一个谐波电流源，向交流系统发出一系列的高次谐波电流，使得交流电流波形发生畸变，进而使得交流电压波形产生畸变。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总谐波畸变率在允许的范围内，必须装设交流滤波器。另外，换流器对直流侧来说，除了作为一个电源（在整流站）或负荷（在逆变站）以外，它还是一个谐波电压源，向直流侧发出一系列的谐波电压，使得直流电压波形产生畸变，并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。

(4) 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也较复杂，对运行人员的要求也较高。因此，传统高压直流输电适用于远距离、大容量输电场合，在低压小容量输电场合经济性较差^[3]。

(5) 直流输电利用大地（或海水）为回路而带来的一些技术问题。如：接地极附近地下（或海水中）的直流电流对金属构件、管道、电缆等埋设物的电腐蚀问题；地中直流电通过中性点接地变压器导致变压器偏磁和磁饱和问题；对通信系统和航海磁性罗盘的干扰等。对于每项具体的直流输电工程，在工程设计时，对上述问题必须进行充分的研究，并采取相应的技术措施。

(6) 由于直流电流没有过零点，灭弧问题难以解决，直流断路器的研制进程缓慢。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投入工程使用，并影响了多端直流输电工程的发展。近年来，利用直流输电的快速控制特性，在工程上已可以解决多端直流输电的故障处理等问题，但其控制系统复杂，仍需要在实际工程运行中进行检验和改进。

1.2 柔性直流输电概况

1.2.1 柔性直流输电的发展介绍

20 世纪 90 年代以后，以全控型器件为基础的电压源换流器高压直流输电（Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC）由于具有电流自关断能力、可向无源网络供电等优势而受到人们的重视并得到快速发展^[12, 13]。ABB 公司率先进行了柔性直流输电输电试验。由于这种换流器功能强、

体积小,可减少换流站设备、简化换流站结构,ABB公司将这一技术称为“HVDC Light”,SIEMENS(西门子)公司称之为“HVDC PLUS”。为简化、形象地描述此技术,国内有关专家建议在国内将该技术统一命名为柔性直流输电(High Voltage Direct Current Flexible, HVDC Flexible),以区别于采用晶闸管的传统直流输电技术^[12, 13]。目前已投运的柔性直流输电工程以采用两电平和三电平拓扑为主。针对两电平、三电平拓扑在实际运行过程中暴露的缺陷,德国慕尼黑国防军大学的 R.Marquart 和 A.Lesnicar 于 2002 年提出的模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)拓扑,由于其优越的整体性能而被认为在电压源换流器拓扑发展过程中具有里程碑意义^[14]。为便于后续内容的叙述,本书中将 MMC-HVDC 称做 MMC 型柔性直流输电。有关 MMC 型柔性直流输电的拓扑结构、仿真建模和控制策略研究,是本书的核心内容。

目前,适用于高电压、大容量输变电的全控型电力电子器件主要有绝缘栅双极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)、集成门极换相晶闸管(Integrated Gate Commutated Thyristor, IGCT)和注入增强栅晶体管(Injection Enhanced Gate Transistor, IEGT)。IGBT 是一种具备自关断能力的金属氧化物半导体元件。IGBT 商品化模块的最大额定电流已达到 3.6kA,最高阻断电压为 6.5kV。IGBT 的优点是开关频率较高、开关损耗小、驱动电路简单、驱动损耗小,目前在工程中应用最为广泛,其主要缺点是容量较小。IGCT 是门极可关断晶闸管(Gate Turn-off Thyristor, GTO)的改进产品,与 GTO 相比较,容量相当但驱动损耗大大减小^[15]。IEGT 是 IGBT 的改进型产品^[16],其最大技术特征是采用加宽 PNP 管间距的近表面层注入载流子浓度增强技术,具有低饱和压降、宽安全工作区、低栅极驱动功率和较高的工作频率等优点。IEGT 和 IGCT 等新型电力电子器件由于具备上述优点,因此将在未来柔性直流输电建设中表现出很大的应用潜力。

柔性直流输电采用了脉宽调制技术(Pulse Width Modulation, PWM)。由于 PWM 技术能够快速独立地控制有功功率和无功功率,电压源换流器可以看做是一个无转动惯量的电动机或发电机,且其有功功率和无功功率可运行在四个象限。因为换流器的交流输出电流具有可控性,故电压源换流器不会增加系统短路容量,避免交流系统因规模过大、短路容量过高而无法选择断路器的难题。

1997 年,世界上第一个采用 IGBT 模块的柔性直流输电工业性试验工程在瑞典中部投运,此后采用电压源换流器结构的高压直流输电工程逐渐增多^[12]。随着大容量全控型电子器件的研制成功,柔性直流输电的输电容量得到大幅度提升,其最大输电容量由最初的 3MW 发展到了 2×1000MW(INELFE 法国—西班牙联网工程),直流电压由 10kV 提升到 500kV(Skagerrak HVDC Interconnections Pole 4),详细情况见表 1-1。

表 1-1 近几年投运和即将投运的柔性直流输电工程

已(拟)完工 时间(年)	工程名称	额定功率 (MW/Mvar)	直流电压 (kV)	建设目的
2015	NordBalt (ABB)	700	±300	非同步电网互联
2015	DolWin2 (ABB)	900	±320	风电场并网
2014	Sylwin1 (SIEMENS)	864	±320	风电场并网
2014	Skagerrak HVDC Interconnections Pole 4 (ABB)	700	500	电网互联
2014	浙江舟山多端柔性直流输电 重大科技示范工程 (国家电网公司)	1000	±200	电网互联
2013	南澳柔性多端直流输电工程 (中国南方电网有限责任公司)	200	±160	风电场并网
2013	INELFE (SIEMENS)	2×1000	±320	电网互联, 黑启动
2013	DolWin1 (ABB)	800	±320	风电场并网
2013	HelWin1 (SIEMENS)	576	259	风电场并网
2013	BorWin2 (SIEMENS)	800	300	风电场并网
2012	BorWin1 (ABB)	400	±150	风电场并网
2012	East West Interconnector (ABB)	500	±200	电网互联, 黑启动
2011	上海南汇风电场柔性直流输电 工程(国家电网公司)	18	±30	风电场并网
2011	文昌油田两电平柔性直流输电 (荣信电力电子)	3.6	±10	海上平台供电
2010	The Trans Bay Cable (SIEMENS)	400	±200	电网互联
2010	ValHall (ABB)	78	150	钻井平台供电
2009	Caprivi Link Interconnector (ABB)	300	±350	弱系统互联
2009	NorD E.ON 1 (ABB)	400	±150	离岸风电场联网
2006	Estlink (ABB)	350	±150	弱电网互联
2005	Troll A (ABB)	2×41	±60	钻井平台供电
2002	Murray Link (ABB)	220/+140~-150	±150	电网互联
2002	Cross Sound Cable (ABB)	330/±75	±150	电网互联
2000	Eagle Pass BTB (ABB)	36/±36	±15.9	电网互联
2000	Tjaereborg (ABB)	7.2/-3~+4	±9	风电场并网
1999	Directlink (ABB)	3×60/±75	±80	电网互联
1999	Gotland (ABB)	50/±30	±80	风电场并网
1997	Heallsjon (ABB)	3/3	±10	工业试验

1.2.2 柔性直流输电的主要优点

柔性直流输电技术是当今世界电力电子技术应用领域的制高点。与传统高压直流输电相比，柔性直流输电具有以下主要优势^[12, 13, 23, 24]：

(1) 正常运行时柔性直流输电可以独立地控制有功功率和无功功率，而且控制方式更加灵活。柔性直流输电灵活的潮流控制能力使其在无功率方面可以充当系统中的静止同步补偿器（Static synchronous Compensator, STATCOM）。当交流系统出现故障时，在换流器输送容量范围内，柔性直流输电系统既可向故障系统提供有功功率紧急支援，又可提供无功功率紧急支援，从而提高系统功角和电压稳定性。

(2) 柔性直流输电可以更加方便地进行潮流反转。柔性直流输电只需要改变直流电流的方向即可实现潮流反转，不需要改变直流电压的极性。这一特性使得柔性直流输电的控制系统配置和电路拓扑结构均可保持不变，有利于构成既能方便地控制潮流又有较高可靠性的并联多端直流系统。

(3) 柔性直流输电可以作为故障后的电网恢复启动电源，进行电网快速恢复。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很好地验证了柔性直流输电系统的电网恢复能力。

(4) 由于换流器交流侧输出电流具有可控性，因此柔性直流输电不会增加交流系统的短路容量。这意味着增加新的柔性直流输电线路后，原有交流系统的保护装置无需重新整定，并且能有效解决大规模交流系统因短路容量过大而无法选择断路器的难题。

(5) 柔性直流输电系统中交直流侧输出的谐波均大为减少。两电平和三电平电压源换流器通常采用正弦脉宽调制（Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM）等调制策略来控制开关器件的开断过程，其输出谐波大多集中在开关频率附近，只需在交流母线上安装一组高通滤波器即可满足谐波要求。在新型模块化多电平换流器中，输出电平数通常达几十到几百，使得交流输出电压的谐波含量非常低，通常无需加装滤波器。

(6) 柔性直流输电换流站之间无需通信，可相互独立地进行控制。换流器可根据交流系统的需要实现自动调节，两侧电压源换流器换流站不需要通信联络，从而减少通信的投资及其维护费用，易于构成多端直流系统。

(7) 在同等容量下柔性直流输电换流站的占地面积显著小于传统高压直流输电换流站。由于高频或等效高频工作模式下换流器的转换过程十分有效，对辅助设备如滤波器、开关、变压器等的需求降低，使得柔性直流输电换流站占地面积大幅减少。在美国旧金山建设的跨湾工程（Trans Bay Cable project, TBC），其占