

# 柔性直流 输电系统

徐政 等著



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

# 柔性直流输电系统

徐 政 屠卿瑞 管敏渊 薛英林  
唐 庚 张哲任 刘 昇 李宇骏 著  
潘伟勇 陈海荣 潘武略 张 静



1079373

机械工业出版社

本书系统讲述了柔性直流输电的理论和应用,内容包括柔性直流输电系统的基本拓扑结构、模块化多电平换流器(MMC)的工作原理、MMC的主回路参数选择、MMC的控制和保护策略、MMC的启动和环流抑制、MMC基本单元的串并联特性、多端柔性直流输电系统的运行特性、柔性直流输电换流站的绝缘配合设计、模块化多电平换流器阀的设计、适用于架空线路的柔性直流输电系统和混合型柔性直流输电系统、柔性直流输电应用于海上风电场接入电网、柔性直流输电系统的电磁暂态仿真方法和机电暂态仿真方法。

本书适合于从事柔性直流输电技术研究、开发、应用的技术人员和电力系统科研、规划、设计、运行的工程师,以及高等学校电力系统专业的教师和研究生阅读。

## 图书在版编目(CIP)数据

柔性直流输电系统/徐政等著. —北京:机械工业出版社,2012.11  
ISBN 978-7-111-40185-8

I. ①柔… II. ①徐… III. ①直流输电—电力系统 IV. ①TM721.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第251998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:牛新国 责任编辑:付承桂 任鑫

版式设计:闫玥红 责任校对:申春香

封面设计:路恩中 责任印制:乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2013年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·21.25印张·425千字

0 001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-40185-8

定价:59.80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 封面无防伪标均为盗版

# 前 言

柔性直流输电指的是基于电压源换流器 (Voltage Source Converter, VSC) 的高压直流输电 (HVDC), ABB 公司称其为 HVDC Light, 西门子公司称其为 HVDCPLUS, 国际上的通用术语是 VSC - HVDC。这种技术既适合于小容量 (可以到数个 MW) 输电, 也适合于大容量输电, 更适合于电网之间的异步互连, 是输配电技术领域的一项重大突破, 将会对未来电力系统的发展方式产生深远影响。

1990 年, 加拿大 McGill 大学的 Boon - Teck Ooi 等人首先提出用脉冲宽度调制 (PWM) 控制的电压源换流器 (VSC) 进行直流输电。1997 年 3 月, ABB 公司进行了首次 VSC - HVDC 的工业试验, 即瑞典中部的 Hellsjon 工程 (10kV、150A、3MW、10km)。1999 年, ABB 公司在 Gotland 岛投入了世界上第一个商业化的柔性直流输电工程 (80kV、350A、50MW、70km)。2001 年, 德国慕尼黑联邦国防军大学的 Rainer Marquardt 提出了模块化多电平电压源换流器 (MMC) 的概念。2010 年 11 月, 世界上第一个基于模块化多电平电压源换流器的柔性直流输电 (MMC - HVDC) 工程——Trans Bay Cable 工程 ( $\pm 200\text{kV}$ 、1000A、400MW、86km) 在美国旧金山市投入运行, 西门子公司是该工程的换流站设备供应商。

柔性直流输电技术相比于传统直流输电技术, 其优势主要表现在: ①没有无功补偿问题; ②没有换相失败问题; ③可以为无源系统供电; ④可同时独立调节有功功率和无功功率; ⑤谐波水平低; ⑥适合构成多端直流系统; ⑦占地面积小。柔性直流输电的主要应用领域包括: ①远距离大容量输电; ②异步联网; ③海上风电场接入电网; ④分布式电源接入电网; ⑤向海上或偏远地区供电; ⑥构筑城市直流配电网; ⑦提高电能质量, 向重要负荷供电。

由于柔性直流输电技术发展时间还不长, 特别是基于模块化多电平换流器的柔性直流输电 (MMC - HVDC) 技术发展时间更短, 第一个商业化工程仅仅投运两年多时间, 因此这方面的专门著作还很少。而世界范围内柔性直流输电工程增长很快, 我国在柔性直流输电工程方面进展也很快, 国家电网公司和南方电网公司已有数个 MMC - HVDC 工程正在建设中, 因此, 迫切需要一本系统性地介绍柔性直流输电理论和应用的专著, 本书正是在这样的背景下开始撰写的。本书总结了浙江大学交直流输配电研究团队在柔性直流输电领域的工作积

累,是本研究团队共同努力的结晶。本书的第1章由徐政、陈海荣撰写,第2章由徐政、潘伟勇、屠卿瑞、管敏渊、潘武略撰写,第3章由屠卿瑞撰写,第4章由管敏渊撰写,第5章由屠卿瑞撰写,第6章由管敏渊撰写,第7章由唐庚撰写,第8章和第9章由张哲任撰写,第10章由薛英林撰写,第11章由唐庚撰写,第12章由徐政、李宇骏、张静撰写,第13章由唐庚撰写,第14章由刘昇撰写,全书由徐政统稿。

与本书相关的研究工作得到了国家863高技术基金项目(2012AA050205, 2012AA051704)的资助,在此表示感谢。

限于作者水平和时间仓促,书中难免存在错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。作者联系方式:电话:0571-87952074,电子信箱:hvdc@zju.edu.cn。

徐 政

2012年8月

于浙江大学求是园

## 本书所用的首字母缩略词汇总

AAMC	Alternate - Arm Multilevel Converter	桥臂交替导通换流器
CCSC	Circulating Current Suppressing Controller	环流抑制控制器
CDSM	Clamp Double Sub - Module	箝位双子模块
CHB	Cascaded H Bridge	级联 H 桥
C - MMC	MMC using CDSMs	采用箝位双子模块的模块化多电平换流器
C - MMC - HVDC	MMC using CDSMs based High Voltage Direct Current	采用箝位双子模块的模块化多电平换流器高压直流系统
DFIG	Doubly Fed Induction Generator	双馈感应发电机
DS	Director Switch	导通开关
FBSM	Full Bridge Sub - Module	全桥子模块
F - MMC	MMC using FBSMs	采用全桥子模块的模块化多电平换流器
FRC	Fully Rated Converter	全功率换流器
FSIG	Fixed Speed Induction Generator	定速感应发电机
GSC	Grid Side Converter	网侧换流器
GTO	Gate Turn - Off thyristor	门极可关断晶闸管
HBSM	Half Bridge Sub - Module	半桥子模块
HCMC	Hybrid Cascaded Multilevel Converter	混合级联多电平换流器
H - MMC	MMC using HBSMs	采用半桥子模块的模块化多电平换流器
HVDC	High Voltage Direct Current	高压直流输电
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor	绝缘栅双极型晶体管
LCC	Line Commutated Converter	电网换相换流器
LCC - C - MMC	Line Commutated Converter with MMC using CDSMs	采用 LCC 和箝位双子模块 MCC 构成的混合式直流输电系统



(续)

LCC - HVDC	Line Commutated Converter based High Voltage Direct Current	采用 LCC 的高压直流输电
MCOV	Maximum value of Continuous Operating Voltage	最大持续运行电压
MMC	Modular Multilevel Converter	模块化多电平换流器
MMC - HVDC	Modular Multilevel Converter based HVDC	模块化多电平换流器型直流输电
MOA	Metal - Oxide Arrester	金属氧化物避雷器
MPPT	Maximum Power Point Tracking	最大功率点跟踪
NLC	Nearest Level Control	最近电平控制
NLM	Nearest Level modulation	最近电平调制
pu	per unit	标么值
PCC	Point of Common Coupling	公共连接点
PWM	Pulse Width Modulation	脉冲宽度调制
RSC	Rotor Side Converter	转子侧换流器
RSIWV	Required Switching Impulse Withstand Voltage	要求的操作冲击耐受电压
SCR	Short Circuit Ratio	短路比
SHEPWM	Selective Harmonic Elimination Pulse Width Modulation	特定谐波消除脉宽调制
SHESM	Selective Harmonic Elimination Stair Modulation	特定谐波消除阶梯波调制
SIPL	Switching Impulse Protective Level	操作冲击保护水平
SM	Sub - Module	子模块
SPWM	Sinusoid Pulse Width Modulation	正弦脉宽调制
SSIWV	Specified Switching Impulse Withstand Voltage	额定操作冲击耐受电压
STATCOM	Static Synchronous Compensator	静止同步补偿器

(续)

SVC	Space Vector Control	空间矢量控制
SVM	Space Vector Modulation	空间矢量调制
THD	Total Harmonic Distortion	总谐波畸变率
VSC	Voltage Source Converter	电压源换流器
VSC - HVDC	Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current	电压源换流器型直流输电



## 本书所用的机构缩略词汇总

CIGRE	Conseil International des Grands Reseaux Electriques	国际大电网会议，总部设在法国
EI	Edison Electric Institute	爱迪生电气协会，总部设在美国
EPRI	Electric Power Research Institute	美国电力研究院
IEC	International Electrotechnical Commission	国际电工委员会，总部设在瑞士
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	电气与电子工程师学会，总部设在美国
IET	Institution of Engineering and Technology	工程与技术协会，总部设在英国

# 目 录

## 前言

本书所用的首字母缩略词汇总

本书所用的机构缩略词汇总

<b>第 1 章 柔性直流输电系统的基本拓扑结构</b> .....	1
1.1 柔性直流输电的定义 .....	1
1.2 电压源换流器的基本特性 .....	1
1.2.1 三种常用电压源换流器的结构 .....	1
1.2.2 三种常用电压源换流器的特点 .....	4
1.2.3 电压源换流器的基本特性 .....	6
1.3 柔性直流输电系统的基本特点 .....	7
1.4 柔性直流输电系统的主接线方式 .....	10
1.4.1 由 VSC 或 MMC 基本单元构成的双极系统主接线——伪双极系统接线 .....	11
1.4.2 由 VSC 或 MMC 基本单元串并联构成的组合式换流器 .....	13
1.4.3 由组合式换流器构成的双极系统主接线 .....	14
1.5 基于箝位双子模块的 C - MMC - HVDC 双极系统主接线 .....	15
1.6 由 LCC 与 C - MMC 构成的混合式 HVDC 双极系统主接线 .....	17
1.7 由 LCC 加二极管阀加 MMC 构成的混合式 HVDC 双极系统主接线 .....	18
1.8 应用柔性直流输电技术解决我国未来电网发展中的重大问题 .....	19
参考文献 .....	24
<b>第 2 章 MMC 基本单元的工作原理</b> .....	27
2.1 MMC 基本单元的拓扑结构 .....	27
2.2 MMC 的工作原理 .....	28
2.2.1 子模块工作原理 .....	28
2.2.2 三相 MMC 工作原理 .....	30
2.3 MMC 的运行特性 .....	32
2.4 MMC 的调制方式 .....	33
2.4.1 调制问题的产生 .....	33
2.4.2 调制方式的比较和选择 .....	33
2.4.3 MMC 中的最近电平逼近调制 .....	36
2.4.4 NLM 谐波性能分析 .....	37
2.4.5 适用于 MMC 的改进载波相移调制方式 .....	39

2.5 MMC 的损耗分析 .....	42
2.5.1 IGBT 功率损耗的组成 .....	43
2.5.2 IGBT 通态损耗 .....	43
2.5.3 IGBT 开通损耗 .....	44
2.5.4 IGBT 关断损耗 .....	46
2.5.5 算例分析 .....	47
参考文献 .....	51
<b>第3章 MMC 基本单元的主电路参数选择 .....</b>	<b>53</b>
3.1 引言 .....	53
3.2 桥臂子模块数的确定原则 .....	53
3.3 MMC 单元的电平数与其子模块数和控制频率的关系 .....	54
3.3.1 电平数与控制频率的基本关系 .....	54
3.3.2 两个临界控制频率的计算 .....	55
3.4 MMC 电平数与谐波之间的关系 .....	57
3.4.1 谐波分析方法 .....	57
3.4.2 控制器控制频率 $f_s$ 对谐波特性的影响 .....	60
3.4.3 电压调制比 $k$ 对谐波特性的影响 .....	61
3.4.4 考虑系统谐波阻抗的影响 .....	62
3.4.5 仿真验证 .....	63
3.5 子模块直流电容值的确定 .....	65
3.6 桥臂电抗值的确定 .....	66
3.6.1 桥臂电抗器作为连接电抗的一个部分 .....	66
3.6.2 桥臂电抗器用于抑制 MMC 内部环流 .....	67
3.6.3 桥臂电抗器用于抑制故障下的浪涌电流 .....	69
参考文献 .....	71
<b>第4章 MMC 基本单元的控制和保护策略 .....</b>	<b>72</b>
4.1 柔性直流输电系统控制策略简介 .....	72
4.2 MMC 数学模型 .....	72
4.3 MMC 控制器设计 .....	75
4.3.1 内环电流控制器 .....	76
4.3.2 外环控制器 .....	77
4.4 子模块电容电压平衡控制 .....	78
4.5 仿真研究 .....	79
4.5.1 功率阶跃和不对称故障 .....	79
4.5.2 电容电压优化平衡 .....	83
4.6 保护策略 .....	83
4.6.1 保护区域的划分 .....	84
4.6.2 常见故障的分类 .....	87

4.6.3 MMC - HVDC 保护策略 .....	90
参考文献 .....	90
<b>第5章 MMC - HVDC 系统的环流抑制和启动控制 .....</b>	<b>92</b>
5.1 MMC 数学模型 .....	92
5.2 MMC 内部环流形成机理 .....	94
5.3 MMC 内部环流抑制方法 .....	97
5.4 环流抑制控制仿真算例 .....	100
5.5 启动控制策略 .....	102
5.5.1 子模块电容预充电阶段 .....	103
5.5.2 定直流电压和定功率控制阶段 .....	103
5.5.3 接通直流线路阶段 .....	104
5.5.4 功率提升阶段 .....	104
5.6 启动控制仿真算例 .....	105
参考文献 .....	110
<b>第6章 极由 MMC 基本单元串并联构成时的运行特性 .....</b>	<b>111</b>
6.1 MMC 基本单元 .....	111
6.2 基本单元串联构成一极 .....	111
6.2.1 运行特性 .....	111
6.2.2 串联均压特性 .....	115
6.3 基本单元并联构成一极 .....	116
6.3.1 运行特性 .....	116
6.3.2 并联均流特性 .....	120
6.4 启动特性 .....	121
6.4.1 启动过程分析 .....	121
6.4.2 启动过程仿真 .....	124
参考文献 .....	127
<b>第7章 多端柔性直流输电的运行特性 .....</b>	<b>128</b>
7.1 概述 .....	128
7.2 多端柔性直流输电的系统级控制器设计 .....	129
7.2.1 主从控制器 .....	129
7.2.2 直流电压偏差控制器 .....	130
7.2.3 直流电压斜率控制器 .....	132
7.3 仿真验证 .....	135
7.3.1 多点直流电压控制策略仿真验证 .....	135
7.3.2 直流电压斜率控制器仿真验证 .....	139
参考文献 .....	141
<b>第8章 柔性直流换流站的绝缘配合设计 .....</b>	<b>142</b>
8.1 引言 .....	142

8.2	金属氧化物避雷器的特性 .....	142
8.3	MMC 换流站避雷器的布置 .....	145
8.4	金属氧化物避雷器的参数选择 .....	147
8.5	换流站保护水平与绝缘水平的确定 .....	149
8.6	算例分析 .....	149
8.6.1	系统参数 .....	149
8.6.2	避雷器参数的选择 .....	151
8.6.3	需要考虑的各种故障 .....	153
8.6.4	避雷器参数选择 .....	156
8.6.5	避雷器的保护水平、配合电流、能量以及设备绝缘水平的确定 .....	158
8.7	相关结论 .....	163
	参考文献 .....	163
<b>第 9 章 模块化多电平换流器阀的设计 .....</b>		<b>164</b>
9.1	引言 .....	164
9.2	换流阀的宽频等效模型 .....	164
9.2.1	杂散电容参数的物理意义 .....	165
9.2.2	换流阀高频模型的简化原理 .....	165
9.2.3	考虑杂散电容的换流阀简化宽频模型 .....	167
9.3	换流阀的杂散参数提取方法概述 .....	169
9.3.1	求解对地电容矩阵 $C_g$ 的两种基本理论 .....	169
9.3.2	求解对地电容矩阵 $C_g$ 两种方法的评价 .....	171
9.3.3	根据对地电容矩阵 $C_g$ 计算集总电容矩阵 $C$ .....	171
	参考文献 .....	172
<b>第 10 章 适用于架空线路的柔性直流输电系统 .....</b>		<b>173</b>
10.1	概述 .....	173
10.1.1	现有 VSC 拓扑的基本分类 .....	173
10.1.2	直流侧故障对 VSC - HVDC 发展的影响 .....	175
10.2	HCMC 的拓扑特点和运行机理 <sup>[21]</sup> .....	177
10.2.1	建模与分析 .....	179
10.2.2	导通开关调制策略 .....	181
10.2.3	整形电路的调制策略 .....	186
10.2.4	直流电流闭锁机理 .....	189
10.2.5	仿真算例 .....	190
10.3	AAMC 的拓扑特点和运行机理 .....	193
10.3.1	拓扑特点 .....	193
10.3.2	数学模型 .....	195
10.3.3	能量分析与导通开关调制策略 .....	196
10.3.4	整形电路的调制策略 .....	202

10.3.5 仿真算例 .....	202
10.4 F-MMC 的拓扑特点和运行机理 .....	204
10.5 C-MMC 的拓扑特点和运行机理 .....	205
10.5.1 结构特点和数学模型 .....	205
10.5.2 启动控制策略 .....	209
10.5.3 接地方式与直流故障控制策略 .....	220
10.6 小结 .....	229
参考文献 .....	229
<b>第 11 章 适用于架空线路的混合型柔性直流输电系统 .....</b>	<b>232</b>
11.1 引言 .....	232
11.2 混合直流输电系统拓扑结构与模型 .....	233
11.2.1 拓扑结构 .....	233
11.2.2 数学模型 .....	233
11.3 混合直流输电系统控制策略 .....	234
11.4 混合直流输电系统启动策略研究 .....	235
11.4.1 受端交流系统为 MMC 中的电容器充电 .....	235
11.4.2 直流系统为 MMC 中的电容器充电 .....	237
11.5 混合直流输电系统直流故障清除研究 .....	239
11.6 仿真验证 .....	240
11.6.1 概述 .....	240
11.6.2 启动策略和稳态仿真 .....	241
11.6.3 逆变侧交流故障仿真 .....	243
11.6.4 直流故障及重启动仿真 .....	244
参考文献 .....	246
<b>第 12 章 柔性直流输电应用于海上风电场接入电网 .....</b>	<b>248</b>
12.1 引言 .....	248
12.2 海上风电场群采用柔性直流输电接入电网的一般性结构 .....	250
12.3 风力发电机组概述 .....	251
12.3.1 双馈风力发电机组结构 .....	251
12.3.2 风力机的空气动力学模型 .....	252
12.3.3 桨距角控制 .....	252
12.3.4 机械传动系统模型 .....	253
12.3.5 异步电机模型 .....	254
12.4 双馈风力发电机组控制系统设计 .....	255
12.4.1 RSC 控制器的设计 .....	255
12.4.2 GSC 控制器的设计 .....	258
12.5 柔性直流输电系统及其控制 .....	259
12.5.1 与风电场连接的换流器的控制策略 .....	260



12.5.2	与电网连接的换流器的控制策略	261
12.6	不同类型故障下风力发电机组与 VSC - HVDC 系统的控制策略	262
12.6.1	受端交流电网故障时的控制策略	262
12.6.2	风电场电网故障	263
12.7	仿真算例	264
12.7.1	风速阶跃变化时系统响应特性	264
12.7.2	受端电网故障特性	267
12.7.3	风电场出口故障特性	267
	参考文献	272
<b>第 13 章 柔性直流输电系统的电磁暂态快速仿真方法</b>		273
13.1	引言	273
13.2	MMC 电磁暂态快速仿真方法	274
13.2.1	嵌套快速同时求解算法	274
13.2.2	桥臂的戴维南等效电路计算	276
13.2.3	MMC 电磁暂态快速仿真方法流程图	280
13.3	MMC 电磁暂态快速仿真方法算例	281
13.3.1	MMC 电磁暂态快速仿真方法可行性验证	281
13.3.2	MMC 电磁暂态快速仿真方法应用于实际柔性直流输电系统	285
	参考文献	287
	本章附录	288
1.	箝位双子模块戴维南等效电压的推导	288
2.	箝位双子模块的电容电流 $i_{c1}$ 、 $i_{c2}$ 与输入电流 $i_{sm}$ 以及电容戴维南等效 $u_{ceq1}$ 和 $u_{ceq2}$ 之间的关系推导	289
<b>第 14 章 柔性直流输电系统的机电暂态仿真方法</b>		291
14.1	概述	291
14.2	两端柔性直流输电系统机电暂态仿真方法	291
14.2.1	电压源换流器的基频数学模型	292
14.2.2	VSC - HVDC 直流侧的机电暂态数学模型	293
14.2.3	内环电流控制器模型	294
14.2.4	调制环节数学模型	295
14.2.5	外环控制器模型	295
14.2.6	柔性直流输电系统的代数微分方程组	296
14.2.7	仿真算例	297
14.3	多端柔性直流输电系统机电暂态建模研究	301
14.3.1	含 VSC - MTDC 系统的潮流计算方法	301
14.3.2	VSC - MTDC 的详细数学模型	302
14.3.3	VSC - MTDC 的简化模型	304
14.3.4	仿真算例	308

---

14.4 柔性直流输电技术解决多直流馈入问题的实例分析 .....	314
14.4.1 研究思路 .....	315
14.4.2 研究条件和计算原则 .....	315
14.4.3 计算工具 .....	315
14.4.4 传统直流异步网方案下东莞-惠州严重故障特性分析 .....	316
14.4.5 柔性直流异步网方案下东莞-惠州严重故障特性分析 .....	317
参考文献 .....	319
<b>附录 已投运的 MMC-HVDC 工程介绍 .....</b>	<b>321</b>
附录 A 美国 Trans Bay Cable 工程介绍 .....	321
附录 B 上海南汇风电场柔性直流输电工程介绍 .....	322
参考文献 .....	324

# 第 1 章 柔性直流输电系统的基本拓扑结构

## 1.1 柔性直流输电的定义

高压直流 (HVDC) 输电<sup>⊖</sup>技术始于 20 世纪 20 年代, 到 1954 年, 世界上第一个直流输电工程 (瑞典本土至哥特兰岛 (Gotland) 的 20MW、100kV 海底直流电缆输电) 投入商业化运行, 标志着基于汞弧阀换流技术的第一代直流输电技术的诞生。20 世纪 70 年代初, 晶闸管阀开始应用于直流输电系统, 并很快取代汞弧阀, 标志着第二代直流输电技术的诞生。20 世纪 90 年代末, 基于可关断器件和脉冲宽度调制 (PWM) 技术的电压源换流器 (VSC) 开始应用于直流输电, 标志着第三代直流输电技术的诞生。

1990 年, 基于 VSC 的直流输电概念首先由加拿大 McGill 大学的 Boon - Teck-Ooi 等人提出<sup>[1-3]</sup>。在此基础上, ABB 公司将 VSC 和聚合物电缆相结合提出了轻型高压直流输电 (HVDC Light) 的概念, 并于 1997 年 3 月在瑞典中部的 Hellsjon 和 Grangesberg 之间进行了首次工业性试验<sup>[4]</sup>。该试验系统的功率为 3MW, 直流电压等级为  $\pm 10\text{kV}$ , 输电距离为 10km, 分别连接到既有的 10kV 交流电网上。

随着 1997 年第一个基于 VSC 技术的直流输电工程的出现, 这种以可关断器件和 PWM 技术为基础的第三代直流输电技术, 国际权威学术组织——国际大电网会议 (CIGRE) 和美国电气与电子工程师学会 (IEEE), 将其正式命名为 “VSC - HVDC”, 即 “电压源换流器型高压直流输电”。而 ABB 公司则称之为轻型高压直流输电 (HVDC Light), 并作为商标注册。西门子公司则称之为 HVDC Plus。2006 年 5 月, 由中国电力科学研究院组织国内权威专家在北京召开 “轻型直流输电系统关键技术研究框架研讨会”, 会上, 与会专家一致建议国内将基于 VSC 技术的直流输电 (第三代直流输电技术) 统一命名为 “柔性直流输电”<sup>[5]</sup>。

## 1.2 电压源换流器的基本特性

### 1.2.1 三种常用电压源换流器的结构

已有柔性直流输电工程采用的 VSC 主要有三种, 即两电平换流器、二极管箝位

⊖ 国外文献中, 常用 HVDC 表示高压直流输电。