

国家高技术研究发展计划（863计划）资助（2011AA05A102）

ANALYSIS AND DESIGN  
OF THE CONVERTERS IN  
VSC-HVDC SYSTEM

# 柔性直流输电换流器 的分析与设计

■ 宋强 饶宏 著

清华大学出版社



ANALYSIS AND DESIGN  
OF THE CONVERTERS IN  
VSC-HVDC SYSTEM

# 柔性直流输电换流器 的分析与设计

■ 宋强 饶宏 著

清华大学出版社

## 内容简介

本书以模块化多电平换流器为主要研究对象,系统地讨论了柔性直流输电换流器的分析和设计方法及其在实际工程中的应用方法。针对模块化多电平换流器,建立了基于电气量循环耦合关系的解析分析计算方法,包括关键电气量解析计算、交直流谐波特性计算与分析、损耗特性计算与分析等。本书还对换流器的电平数目优化设计、直流短路故障保护方法、换流器控制策略、多端系统控制策略和故障穿越控制策略等进行深入的探讨和论述。本书研究成果既具有较强的学术价值,又具有较强的工程实用价值。

本书将为从事柔性直流输电领域的科学研究、工程设计、工程建设、工程调试、现场运行、设备制造、电网规划等方面的专业技术人员和管理人员提供学术参考和工程应用参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

柔性直流输电换流器的分析与设计/宋强,饶宏著. —北京:清华大学出版社,2015  
ISBN 978-7-302-38959-0

I. ①柔… II. ①宋… ②饶… III. ①直流输电—换流器  
IV. ①TM46

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第005641号



责任编辑:朱敏悦  
封面设计:汉风唐韵  
责任校对:王凤芝  
责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印刷者:三河市君旺印务有限公司

装订者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:11.25 字 数:253千字

版 次:2015年3月第1版 印 次:2015年3月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:49.00元

产品编号:061273-01

# 前 言

经过十几年的发展,柔性直流输电技术目前在国内外均已经得到广泛接受,被认为是一种最有潜质的新型输电方式。柔性直流输电系统所适用的主要应用场合包括新能源发电的电网接入、孤立负荷或海岛送电、海上平台供电、城市配电网和非同步电网联网等。随着模块化多电平换流器(MMC)技术的出现和发展,柔性直流输电技术近些年得到了非常快速的发展。基于 MMC 的柔性直流输电技术无论是在研究和应用方面都得到了广泛的关注,已经成为近期电力行业的热点技术。电压源换流器是柔性直流输电系统的核心装置。随着对柔性直流输电系统的电压等级和容量等级要求的不断提高,电压源换流器的技术也不断在发展。相对于常规直流输电系统,柔性直流输电换流器的分析和设计方法的成熟性仍然有所不足,也缺乏系统性的理论基础。

本书以 MMC 为主要研究对象,研究和讨论了柔性直流输电换流器的分析方法和设计方法。本书是总结作者们近些年来在柔性直流输电换流器技术方面的研究和应用成果,尤其是结合了国家 863 课题“大型风电场柔性直流输电接入技术的研究和开发”的研究成果。目前柔性直流输电技术在高校、科研院所、电网公司和电力设备制造单位等都受到高度的关注,而柔性直流输电仍是一项较新的技术。本书为从事柔性直流输电领域的科学研究、工程设计、工程建设、工程调试、现场运行、设备制造、电网规划等方面的专业技术人员和管理人员提供学术参考。

本书是清华大学电机系和南方电网科学研究院的研究团队在近年来科学研究成果的基础上编写的。清华大学的刘文华教授、李建国工程师,曾作为或正作为博士生、硕士生的李笑倩、罗雨、赵雄光、厉璇、李琦、杨文博,南方电网科学研究院的黎小林、许树楷、朱喆、魏伟、陈名、陈俊等都为本书做出了不可磨灭的重要贡献。

本书撰写的过程中参阅了不少国内外的书籍和论文等相关文献,主要的已经列入本书的参考文献,在此向这些文献的作者致谢。

本书的出版得到了国家 863 高技术基金项目“大型风电场柔性直流输电接入技术的研究和开发”(2011AA05A102)的资助。

本书主要是作者们在此领域近期研究成果基础上撰写的,尚需经过进一步的实践考验和完善,书中难免存在缺点和错误,也敬请读者给予批评指正。

作者

2014 年 10 月



## 主要缩略语表

CPSM	载波移相调制
HVDC	高压直流输电
IGBT	绝缘栅双极晶体管
FFT	快速傅立叶变换
FRT	故障穿越
LCC	电网换相换流器
LPF	低通滤波器
MMC	模块化多电平换流器
MTDC	多端直流输电
NLM	最近电平逼近调制
NPC	中点箝位
PCC	公共耦合点
PI	比例积分
PLL	锁相环
PWM	脉冲宽度调制
SM	子模块
STATCOM	静止无功发生器
VSC	电压源换流器
VSC HVDC	基于电压源换流器的高压直流输电 (柔性直流输电)

# 主要符号表

$C_d$	MMC 子模块电容值
$D_n$	单次谐波畸变度
$i_a, i_b, i_c$	电压源换流器的三相输出电流
$i_{ap}, i_{bp}, i_{cp}$	MMC 三相上桥臂电流
$i_{an}, i_{bn}, i_{cn}$	MMC 三相下桥臂电流
$i_{az}, i_{bz}, i_{cz}$	MMC 三相桥臂中的环流分量
$i_{cap}$	MMC 子模块电容电流
$I_a, I_b, I_c$	换流器三相输出电流有效值
$I_{az}$	二倍频环流幅值
$I_{ad}, I_{bd}, I_{cd}$	MMC 三相桥臂中的直流电流分量
$I_{brg}$	桥臂电流有效值
$L_c$	MMC 桥臂电抗电感值
$M$	调制比
$N$	MMC 桥臂子模块级联数目
$P_{ac}$	换流器交流侧有功功率
$P_{dc}$	换流器直流侧有功功率
$S_a, S_b, S_c$	换流器三相开关状态
$S_{ap\_i}, S_{bp\_i}, S_{cp\_i}$	MMC 三相上桥臂第 $i$ 个子模块的开关状态
$S_{an\_i}, S_{bn\_i}, S_{cn\_i}$	MMC 三相下桥臂第 $i$ 个子模块的开关状态
$\sum_{i=1}^N S_{ap\_i}, \sum_{i=1}^N S_{bp\_i}, \sum_{i=1}^N S_{cp\_i}$	MMC 三相上桥臂开关状态
$\sum_{i=1}^N S_{an\_i}, \sum_{i=1}^N S_{bn\_i}, \sum_{i=1}^N S_{cn\_i}$	MMC 三相下桥臂开关状态
$S_{ap\_av}, S_{an\_av}$	MMC 上下桥臂子模块平均开关状态
$THD$	总谐波畸变度
$HCF$	谐波电流畸变系数
$THFF$	电话谐波波形系数
$U_{cap}$	MMC 子模块电容直流电压
$U_d$	电压源换流器直流侧电压
$U_{dc}$	直流线路电压

$U_{sm}$	MMC 子模块端口电压
$u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}$	电网三相相电压
$u_{conv\_a}, u_{conv\_b}, u_{conv\_c}$	换流器端口三相输出相电压
$u_{cap}$	MMC 子模块电容电压
$\Delta u_{a\_dif}(t), \Delta u_{b\_dif}(t), \Delta u_{c\_dif}(t)$	桥臂电压差模波动分量
$\Delta u_{a\_com}(t), \Delta u_{b\_com}(t), \Delta u_{c\_com}(t)$	桥臂电压共模波动分量
$\Delta u_{ph}$	相桥臂波动电压
$\omega_1$	电网电压的基波角频率
$\varphi$	换流器输出电流功率因数角
$\theta$	二倍频环流相位角

# 目 录

前言 .....	( I )
主要缩略语表 .....	( II )
主要符号表 .....	( III )
<b>第 1 章 绪论</b> .....	( 1 )
1.1 直流输电技术 .....	( 1 )
1.2 电压源输电换流器技术的发展 .....	( 3 )
1.2.1 两电平换流器 .....	( 3 )
1.2.2 三电平中点箝位换流器 .....	( 4 )
1.2.3 多电平换流器 .....	( 4 )
1.2.4 模块化多电平换流器 .....	( 6 )
1.3 柔性直流输电技术的工程应用 .....	( 7 )
1.4 本书的主要内容 .....	( 7 )
<b>第 2 章 基于循环耦合关系的模块化多电平换流器解析分析方法</b> .....	( 9 )
2.1 模块化多电平换流器主回路基本分析方法 .....	( 9 )
2.1.1 模块化多电平换流器的基本结构和工作方式 .....	( 9 )
2.1.2 MMC 的基本数学方程 .....	( 11 )
2.1.3 MMC 的开关状态 .....	( 13 )
2.1.4 MMC 的等效电路 .....	( 13 )
2.1.5 MMC 的电流通路分析 .....	( 15 )
2.1.6 MMC 的电平数目分析 .....	( 16 )
2.2 基于电气量循环耦合关系的解析分析方法 .....	( 16 )
2.2.1 子模块电气量的循环耦合关系 .....	( 16 )
2.2.2 平均开关状态的定义 .....	( 19 )
2.3 桥臂环流的初步分析计算 .....	( 19 )
2.4 基于循环耦合关系的主回路稳态运行特性的解析分析过程 .....	( 22 )
2.5 MMC 的等效电路 .....	( 26 )
2.6 数字仿真结果的对比分析验证 .....	( 30 )
2.7 物理试验验证 .....	( 33 )



<b>第 3 章 柔性直流输电换流器的交流侧谐波分析</b> .....	(35)
3.1 柔性输电换流器的交流谐波特性 .....	(35)
3.2 最近电平逼近 (NLM) 方法的特征谐波 .....	(37)
3.2.1 NLM 方法谐波的解析计算方法 .....	(37)
3.2.2 NLM 方法的特征谐波 .....	(38)
3.2.3 NLM 方法的特征谐波分析 .....	(40)
3.2.4 NLM 方法特征谐波特性的仿真实验 .....	(42)
3.3 载波移相 (CPSM) 方法的特征谐波 .....	(46)
3.3.1 两电平 PWM 的特征谐波分析 .....	(46)
3.3.2 多电平载波移相 PWM 的特征谐波分析 .....	(48)
3.3.3 载波移相 PWM 方法特征谐波分布特点 .....	(49)
3.3.4 载波移相方法特征谐波特性的仿真实验 .....	(50)
3.4 NLM 方法和 CPSM 方法交流侧谐波特性比较分析 .....	(53)
3.5 MMC 对公共耦合点的交流谐波性能影响分析 .....	(57)
<b>第 4 章 柔性直流输电换流器直流侧谐波电流计算模型</b> .....	(60)
4.1 两电平和三电平换流器的直流侧谐波计算模型 .....	(60)
4.1.1 两电平换流器直流侧谐波计算模型 .....	(60)
4.1.2 三电平 NPC 换流器的直流侧谐波计算模型 .....	(65)
4.2 MMC 直流线路特征谐波产生的机理 .....	(69)
4.3 MMC 直流线路谐波电压源的影响因素 .....	(71)
4.3.1 开关函数中高频分量的影响 .....	(71)
4.3.2 交流谐波电流的影响 .....	(71)
4.4 等效谐波电压源的仿真计算 .....	(72)
<b>第 5 章 柔性直流输电换流器损耗特性分析方法</b> .....	(75)
5.1 MMC 损耗计算方法 .....	(75)
5.2 MMC 损耗特性分析 .....	(80)
<b>第 6 章 MMC 桥臂子模块级联数目的优化设计方法</b> .....	(85)
6.1 MMC 子模块数量优化设计方法 .....	(85)
6.1.1 1MMC 桥臂子模块数目设计原则 .....	(85)
6.1.2 MMC 桥臂子模块数量优化设计方法 .....	(86)
6.1.3 仿真研究 .....	(89)
6.2 $\pm 160\text{kV}/200\text{MW}$ 三端柔性直流工程 MMC 方案比较 .....	(91)
<b>第 7 章 基于双向旁路晶闸管的直流线路瞬时性短路故障保护方法</b> .....	(96)
7.1 保护方法的基本原理 .....	(97)
7.1.1 双向旁路晶闸管结构 .....	(97)
7.1.2 直流短路故障清除原理 .....	(99)

7.1.3	自动恢复原理 .....	(100)
7.1.4	与交流侧保护的配合 .....	(100)
7.2	直流短路故障保护策略 .....	(101)
7.3	数字仿真验证 .....	(102)
<b>第 8 章</b>	<b>二极管箝位双子模块的 MMC 拓扑结构 .....</b>	<b>(106)</b>
8.1	二极管箝位式双子模块拓扑结构 .....	(106)
8.2	故障清除原理 .....	(107)
8.3	保护方法 .....	(109)
8.4	仿真验证 .....	(109)
<b>第 9 章</b>	<b>柔性直流输电换流器的控制策略 .....</b>	<b>(112)</b>
9.1	柔性直流输电控制系统基本结构 .....	(112)
9.2	MMC 换流器级控制策略 .....	(114)
9.2.1	MMC 的动态数学模型 .....	(114)
9.2.2	d/q 坐标系下的解耦控制器 .....	(116)
9.2.3	三相 abc 坐标系下的直接电流控制 .....	(118)
9.2.4	换流器级控制功能实现 .....	(120)
9.2.5	二倍频换流器控制 .....	(122)
9.3	MMC 的调制策略 .....	(122)
9.3.1	最近电平逼近调制及电容电压平衡控制 .....	(122)
9.3.2	载波移相调制及电容电压平衡控制方法 .....	(125)
<b>第 10 章</b>	<b>多端柔性直流输电系统组网分析与控制 .....</b>	<b>(130)</b>
10.1	多端柔性直流输电系统的基本方式 .....	(130)
10.2	换流站的控制模式与 U-I 特性 .....	(132)
10.3	VSC-MTDC 的直流网络分析 .....	(133)
10.4	电压下垂比例积分控制 .....	(135)
10.4.1	控制策略 .....	(135)
10.4.2	仿真分析 .....	(136)
10.5	电压下垂比例控制 .....	(140)
10.5.1	控制策略 .....	(140)
10.5.2	仿真分析 .....	(141)
10.6	电压裕度控制 .....	(144)
10.6.1	控制策略 .....	(144)
10.6.2	仿真分析 .....	(146)
10.7	三种控制方法的比较 .....	(148)
<b>第 11 章</b>	<b>风电场柔性直流输电接入电网的故障穿越控制 .....</b>	<b>(150)</b>
11.1	典型卸荷电路拓扑 .....	(150)
11.1.1	模块化卸荷电路的参数选择与控制方法 .....	(151)

11.1.2 集中电阻式斩波卸荷电路与模块化卸荷电路工作特性对比 ... (152)

11.2 故障穿越协调控制策略设计 ..... (154)

11.3 故障穿越控制方法仿真分析 ..... (157)

    11.3.1 仿真参数 ..... (157)

    11.3.2 单一故障穿越策略 ..... (158)

    11.3.3 故障穿越协调控制策略 ..... (162)

参考文献 ..... (166)

# 第 1 章 绪 论

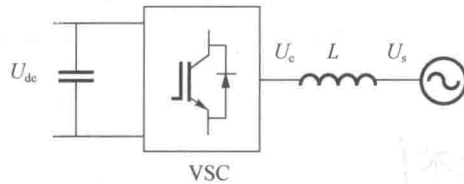
## 1.1 直流输电技术

输配电系统产生时就存在直流和交流的标准之争。由于当时直流输配电电压等级低,容量小、电压变换困难等原因使得交流方式取得了最终的胜利,成为当时输配电技术的主要方式。然而在交流方式统治输配电系统一百多年后,却在很多方面开始显示出局限性。进入 21 世纪后,现代输配电网开始发生了很多革命性的改变,对直流输电的需求越来越多,例如负荷中心越来越多的是依靠于远距离输送的电力,以及大型风电场等可再生能源发电迅速发展。相比于交流输电,采用直流输电时不必考虑相连的交流系统的频率与相位问题,互联系统之间的干扰与影响小;可以快速准确地控制传送功率从而有效提升系统的稳定性;直流电缆也不存在充电电流的问题,因此可以长距离送电。正因为这些优势,自 1954 年瑞典哥特兰投运世界上第一个直流输电工程以来,直流输电技术得到了快速发展。直流输电逐渐成为交流输电方式的一种有力补充而在世界范围内广泛应用<sup>[1]</sup>。

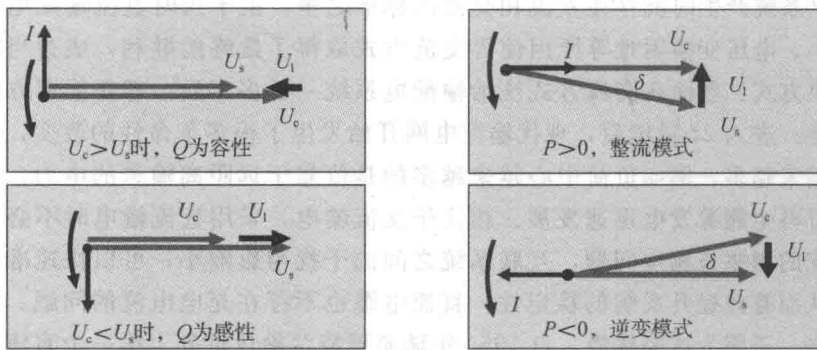
常规直流输电是采用晶闸管技术实现整流器和逆变器。晶闸管是半控器件,只能控制开通,不能控制关断,晶闸管换流器在运行原理上必须借助电网电压进行换相,也被称为电网换相换流器 (Line Commutated Converter, LCC)。常规直流输电技术具有直流输电技术的普遍性优点,例如在使用远距离电缆送电时造价低、损耗小,并且不存在稳定性的问题,还可以实现非同步联网和故障隔离<sup>[1]</sup>。但是常规直流输电采用晶闸管这样一类半控器件,只能控制阀的开通而不能控制其关断,关断时必须借助交流母线电压,使得阀电流减小到换流阀的维持电流以下。这些特点导致常规直流输电不适用于向弱交流系统和无源负荷供电的应用场合。由于其必须借助受端电网电压换相,也存在着换相失败的风险,从而引起短时的功率输送中断。常规直流输电还存在着换相时输出谐波大,换流站的投资和占地面积庞大的缺点。所以常规直流输电更适用于远距离大容量输电以及异步联网等场合,对于新能源发电接入、孤立负荷供电和城市供电等方面难以应用。

随着电力电子技术的发展,尤其是以绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 为代表的全控型可关断器件的快速发展,IGBT 器件的电压和容量等级得到不断提升,这使得采用 IGBT 构成电压源换流器 (Voltage Source Converter, VSC) 来进行直流输电成为可能<sup>[2]</sup>。通过脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation,

PWM) 技术, 电压源换流器的幅值和电压可以得到准确快速的控制。如图 1.1 所示, 电压源换流器可以等效为幅值和相位都可以控制的可控电压源, 从而实现四象限运行, 灵活地控制有功功率和无功功率。如图 1.2 所示, 两个电压源换流器的直流侧通过直流线路连接(或背靠背直接连接)在一起, 就构成柔性直流输电系统, 实现在两个交流系统之间的功率传输。



(a) VSC接入电网示意图



(b) 四象限运行原理示意图

图 1.1 电压源换流器 (VSC) 的运行原理

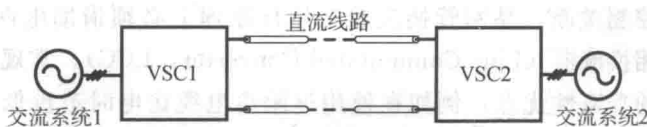


图 1.2 基于电压源换流器 (VSC) 直流输电系统

1997年, 首个使用电压源换流器技术的直流输电工程——赫尔斯杨实验性工程投入运行, 其系统参数为  $3\text{MW}/\pm 10\text{kV}$ <sup>[3]</sup>。对于这种新型直流输电技术, ABB公司称之为“轻型直流输电”(HVDC Light), 西门子公司则称之为“新型直流输电”(HVDC Plus)。国际大电网会议(CIGRE)和美国电气电子工程师协会(IEEE)将其命名为“Voltage Source Converter (VSC) HVDC”, 即“电压源换流器的高压直流输电”, 国内将其命名为“柔性直流输电”(HVDC-Flexible)<sup>[2]</sup>。

相对于常规直流输电, 柔性直流输电技术具有以下优点。

- (1) VSC换流器采用全控器件, 可控制电流的关断, 不需要外加换相电压, 克服了常规直流输电受端必须是有源网络的缺陷, 可用于向弱交流系统或无源负荷供电;
- (2) 没有换相失败问题, 避免了由于换相失败而导致传输功率短时中断的问题;

- (3) 有功和无功功率可以独立控制，系统潮流调节更加灵活快速；
- (4) 可以作为静止无功发生器 (Static Synchronous Compensator, STATCOM) 为系统提供无功功率，起到稳压和调节无功的作用；
- (5) 采用 PWM 技术，换流器产生的谐波大大减少，大大降低了对滤波器的要求。随着多电平换流器技术的应用，甚至在很多情况下换流器输出电压直接就满足了谐波要求，不必安装滤波器；
- (6) 潮流反转时直流电流的方向反转，直流电压的极性不变，这个特点使之不仅能方便地控制潮流，亦能构成可靠的并联多端直流输电系统。

由于 VSC-HVDC 的上述优势，使得其在如下几个领域具有广泛应用前景。

- (1) 可再生能源并网：主要应用于以风能、太阳能为代表的清洁能源的并网。风能、太阳能是典型的间歇性电源，采用柔性直流输电技术能有效缓解这些新能源并网时产生的功率波动和造成的电能质量问题；
- (2) 孤岛供电：孤岛系统的负荷小，波动大，采用柔性直流输电系统不仅降低成本，保护环境，而且不存在系统稳定性问题；
- (3) 向偏远地区供电：如一些偏远的油田、山区、钻井平台等，架设交流线路不经济或者难度大，采用柔性直流输电技术将这些地方的负荷与电网相连，不需要加设同步补偿设备，成本低且污染小；
- (4) 城市供电：对于一些大城市来说，由于负荷大和用地紧张等因素，原来的架空线路已经难以进行增容改造，而采用直流电缆供电相比于交流电缆在传送更多功率的时候占地空间更小，采柔性直流输电系统向城市中心供电能快速控制有功和无功，改善电能质量。

## 1.2 电压源换流器技术的发展

### 1.2.1 两电平换流器

两电平换流器是最为简单的电压源换流器拓扑结构，如图 1.3 所示。每相桥臂通

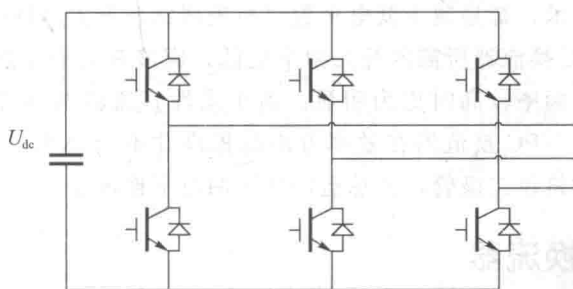


图 1.3 两电平电压源换流器基本拓扑结构

过上下开关的导通和关断控制，使交流侧交替输出  $U_{dc}$  或 0 的状态。ABB 公司早期投运



的轻型直流输电工程绝大部分采用的是两电平换流器结构。目前的功率开关器件的电压等级最大只有几千伏，显然两电平换流器无法直接实现柔性直流输电系统的高压输出要求，开关器件的直接串联是最为直接的解决方法。但是开关器件的直接串联存在串联器件间的动态均压问题，这是一个难点问题。另外两电平换流器输出电压的谐波和  $dv/dt$  都比较大。

### 1.2.2 三电平中点箝位换流器

三电平中点箝位 (Neutral Point Clamped, NPC) 换流器是多电平换流器拓扑结构研究和应用的开始<sup>[4]</sup>。目前三电平 NPC 换流器的研究和应用都很成熟。如图 1.4 为三电平 NPC 换流器的基本结构示意图。相对于常规的两电平换流器，使用同样的开关器件时三电平 NPC 换流器可以使交流输出的电压等级提高一倍。在谐波特性方面，采用同样的开关频率时交流输出侧的谐波频率也会提高一倍。这也是多电平换流器的优势所在。

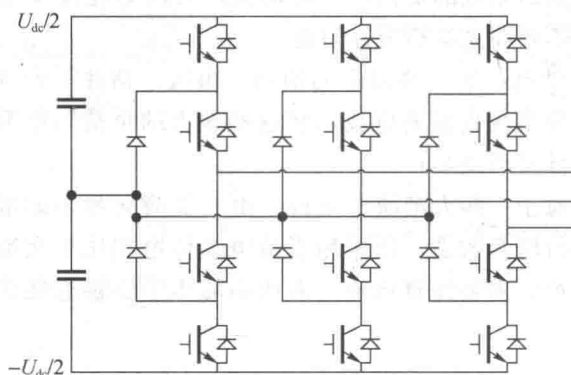


图 1.4 三电平 NPC 换流器

采样同样电压等级开关器件时，三电平 NPC 换流器可相对于两电平换流器将输出电压等级提高一倍，但是距离柔性直流输电系统的高电压输出要求仍有很远距离。因此在柔性直流输电系统中应用时仍需要开关器件的直接串联，所面临的问题与两电平换流器时相同。与后期出现的多电平换流器技术相比，三电平 NPC 换流器与两电平换流器是属于类似的技术，都是属于低电平数目换流器结合开关器件串联的方案。

虽然直观上 NPC 换流器所需的开关频率更低，应该具有更小的损耗，但是这种效率优势一般是在开关频率较高时更为明显。由于柔性直流输电系统通常采用较低的开关频率，因此三电平 NPC 换流器在效率方面的提高并不会很大。另外，由于 NPC 换流器额外需要较多的箝位二极管，其总造价高于两电平换流器。

### 1.2.3 多电平换流器

自从三电平 NPC 换流器出现后，多电平换流器技术成为一个关注的热点，研究和应用的目标主要是在拓扑结构设计上继续提高电平数目，以实现高电压等级的应用，并得到更低的损耗和更好的谐波性能。目前多电平换流器技术已经得到了极大的发展，

并在拓扑结构上出现了多个分支。目前基本的多电平拓扑结构可以分为以下三类：二极管箝位结构<sup>[5]</sup>；悬浮电容结构<sup>[6]</sup>；单相桥级联（链式）结构<sup>[7]</sup>。

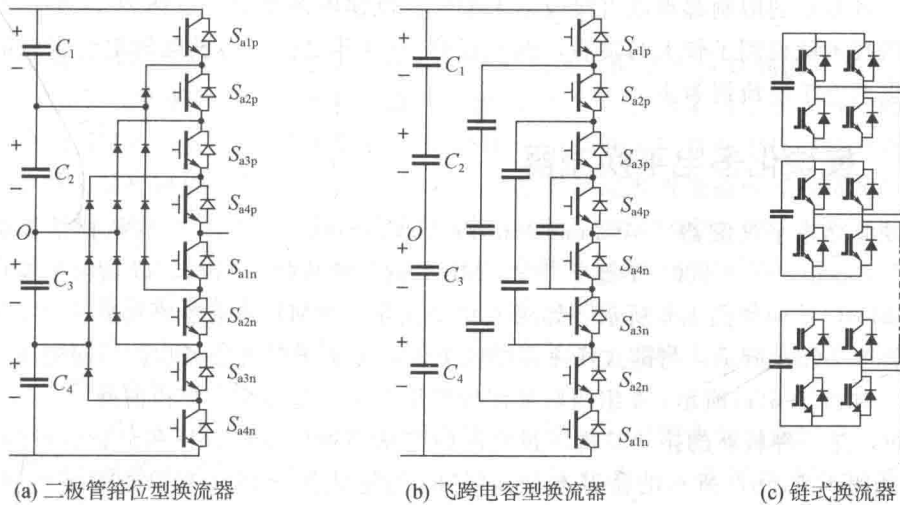


图 1.5 三种多电平换流器的基本拓扑结构

### (1) 二极管箝位型多电平换流器

自三电平 NPC 换流器被提出后，此结构被继续推广到更多电平数目。如图 1.5 (a) 所示，这种拓扑结构需要大量的箝位二极管，对于一个  $n$  电平的二极管箝位换流器来说，箝位二极管的总数为  $3 \times (n-1) \times (n-2)$  个。显然当电平数目  $n$  提高时，二极管的数目将以平方倍数增长，可能达到无法实现的程度。另外，各电容的电压平衡也非常难以控制。所以目前实用的电路少有超过 5 电平的。

### (2) 飞跨电容箝位型多电平换流器

飞跨电容箝位型换流器于 20 世纪 90 年代初被提出。这种拓扑结构省去了大量的二极管，但是又引入了大量的箝位电容。对于一个  $n$  电平的电容箝位换流器来说，箝位电容的总数为  $3 \times (n-1) \times (n-2) / 2$  个。当电平数目  $n$  提高时，箝位电容的数目将以平方倍数增长，也可能达到无法实现的程度。对于高压系统而言，箝位电容体积大、成本高、封装难，因此这种方案也显有做到很大电平数目的。

### (3) 链式换流器

链式换流器结构不再需要大量的箝位二极管或者箝位电容，具有模块化特点，因此便于设计、生产和封装。当桥臂中某个链节（H 桥）出现故障时，可以将其旁路，不影响其余单元的正常运行，实现了冗余控制，提高了装置可靠性。目前链式换流器在 STATCOM 领域中已经得到非常成功的应用，在 2001 年左右 ALSTOM 公司的  $\pm 75\text{MVar}$  链式 STATCOM 投运；2006 年  $\pm 50\text{MVar}$  链式 STATCOM 在上海西郊站成功投运；2011 年南方电网公司  $\pm 200\text{MVar}$  链式 STATCOM 工程成功投运。近些年在国内链式 STATCOM 装置已经成功地实现了产业化应用。

但是链式换流器是由多个链节单元组成的，每个链节单元的直流侧是悬浮和独立的，换流器没有一个公共的直流侧，因此在柔性直流输电等需要换流器背靠背连接的

场合无法应用。

从以上分析可以看出，虽然本节所列的各种拓扑都是主流的多电平换流器结构，但是由于各方面的限制都难以直接应用于柔性直流输电系统中。虽然 2000 年左右多电平换流器技术就得到了较大的发展，但一直到 2010 年之前，所投运的柔性直流输电工程仍是以两电平换流器为主。

### 1.2.4 模块化多电平换流器

模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 的拓扑结构由德国学者 R. Marquardt 于 2001 年提出<sup>[8][9]</sup>。MMC 的子模块拓扑结构，以及由子模块构成的三相 MMC 结构如图 1.6 所示。如图 1.6(a)所示，MMC 的基本单元是一个半桥子模块；如图 1.6(b)所示，与链式换流器结构类似，多组子模块被级联在一起构成一个换流桥臂；如图 1.6(c)所示，6 组级联换流桥臂组合在一起构成三相换流器。

MMC 是一种较新的拓扑结构，目前的研究从多种角度来看待和分析这种换流器。如果单从图 1.6 (b) 所示的桥臂来看，MMC 与链式换流器具有类似的结构和特性。从另外一个角度来看，每个桥臂可以被看作一个可控的 VSC，而三相 MMC 则可以理解为由 6 个这样的可控 VSC 构成。所以在文献 [10] 中，也将 MMC 归为可控电压源构成换流阀类的换流器 (VSC Valves of the “Controllable Voltage Source” Type)。

MMC 易于实现较大的电平数目，并且可以提供公共的直流侧，可以较为容易实现背靠背的连接，使其十分适合于柔性直流输电的应用。2010 年，首个基于 MMC 的柔性直流输电工程——跨湾工程 (Trans Bay Cable) 投入商业运行<sup>[11]</sup>，实现了 MMC-HVDC 工程的从无到有，后续的大部分柔性直流输电工程均采用了 MMC 结构或在其基础上变化的拓扑结构。

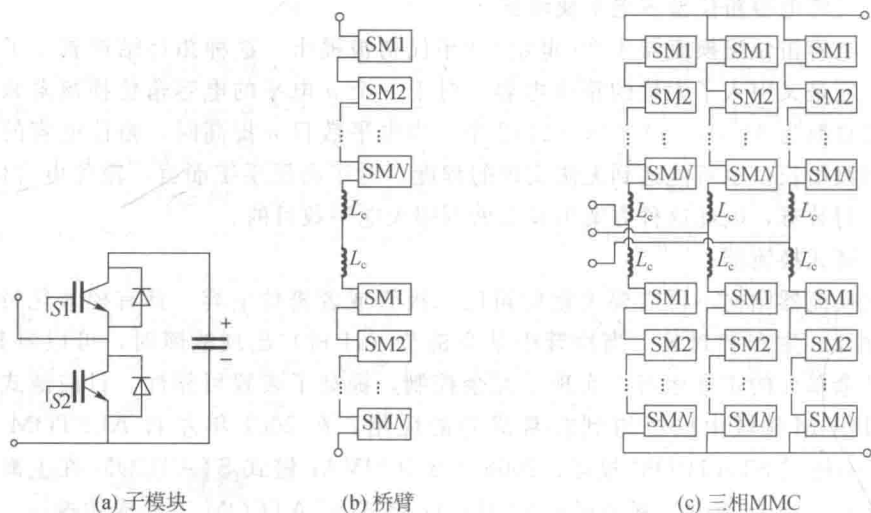


图 1.6 MMC 结构图