



国家电网公司
电力科技著作出版项目

基于模块化多电平换流器的 柔性直流输电工程技术

JIYU MOKUAIHUA DUODIANPING HUANLIUQI DE
ROUXING ZHILIU SHUDIAN GONGCHENG JISHU

肖世杰 阙波 李继红 陆翌等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电网公司
支撑出版项目

基于模块化多电平换流器的 柔性直流输电工程技术

JIYU MOKUAIHUA DUODIANPING HUANLIUQI DE
ROUXING ZHILIU SHUDIAN GONGCHENG JISHU

肖世杰 阙波 李继红 陆翌 裘鹏
陈骞 许烽 童凯 宣佳卓 马骏超 编著
王珂 胡丁文 毕延河 杨治中



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

《基于模块化多电平换流器的柔性直流输电工程技术》一书基于舟山 $\pm 200\text{kV}$ 五端柔性直流输电科技示范工程及相关研究成果撰写,系统介绍了直流输电技术概述,模块化多电平换流器技术,柔性直流输电的稳态特性与运行方式,柔性直流输电的控制系统与启动方式,柔性直流输电系统的故障分析与保护,柔性直流输电系统的过电压与绝缘配合,柔性直流输电系统的主要设备,柔性直流输电工程的试验技术,混合直流输电技术,柔性直流输电与直流电网技术的发展等内容。

本书适用于开展柔性直流输电工程设计、建设、调试的技术人员及电力系统科研、规划、设计、运行的工程师阅读。

图书在版编目(CIP)数据

基于模块化多电平换流器的柔性直流输电工程技术 / 肖世杰等编著. — 北京: 中国电力出版社, 2018.6

ISBN 978-7-5198-0469-5

I. ①基 ... II. ①肖 ... III. ①模块化 — 多电平逆变器 — 直流输电 — 输电技术 — 研究 IV. ① TM464

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 290810 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 刘丽平 (010-63412342) 刘亚南

责任校对: 王小鹏

装帧设计: 王英磊 左铭

责任印制: 邹树群

印 刷: 三河市万龙印装有限公司

版 次: 2018 年 6 月第一版

印 次: 2018 年 6 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米 $\times$ 1092 毫米 16 开本

印 张: 17.25

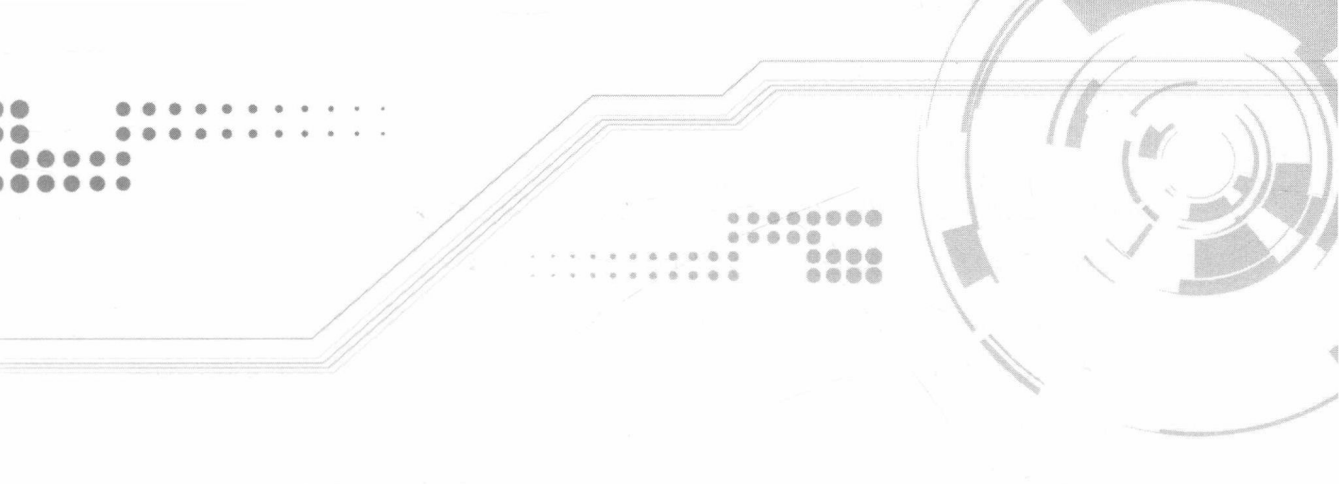
字 数: 400 千字

印 数: 0001—2000 册

定 价: 75.00 元

版权专有 侵权必究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换



前 言

基于全控型电力电子器件的柔性直流输电技术是当今世界上电力电子技术应用的制高点，在提高电力系统稳定性、增加系统动态无功功率储备、改善电能质量、解决非线性负荷及冲击性负荷对系统的影响、保障敏感设备供电等方面都具有较强的技术优势。基于 MMC 的多端柔性直流系统（MMC-MTDC）可以方便、快速地控制系统潮流，具有运行灵活性高、供电可靠性高等优势，可以便捷高效地连接分布在各地的可再生能源，实现多电源供电、多落点受电，是一种更为灵活、快捷的输电方式，在风电等新能源发电并网、向远距离负荷供电、构筑城市直流配电网等领域具有广阔的应用前景。

柔性直流输电技术发展时间并不长，特别是基于模块化多电平换流器（MMC）的多端柔性直流输电技术的发展时间更短。国网浙江省电力有限公司在国内建成了世界上第一条五端柔性直流输电工程的示范工程，并实现了世界首套混合型高压直流断路器和阻尼恢复系统的工程应用，解决了从两端过渡到多端的多项技术难题以及直流故障的快速隔离和系统的快速恢复难题。本书内容主要来源于国网浙江省电力有限公司直流输配电技术及应用创新团队深入参与的研究以及浙江舟山 $\pm 200\text{kV}$ 五端柔性直流输电科技示范工程项目，总结了在模块化多电平柔性直流输电工程化应用领域的工作成果，全面论述了模块化多电平换流器技术、柔性直流输电的稳态特性与运行方式、控制系统与启动方式、故障分析与保护、过电压与绝缘配合、主要设备以及试验技术等内容，是本创新团队共同努力的结晶。

目前已出版的相关图书主要围绕基础理论、技术和仿真模型搭建的研究，辅以外投运的工程介绍。本书围绕最新的柔性直流输电技术，并结合示范工程，更有助于读者学习理解。

本书由肖世杰担任主编，负责总体框架拟定、全书审核等全局性工作。肖世杰、陆翌编写第1章；李继红、裘鹏、王珂编写第2章；阙波、许烽、胡丁文编写第3章；陆翌、宣佳卓、陈骞编写第4章；童凯、马俊超编写第5章；陈骞、许烽、毕延河编写第6章；裘鹏、陈骞编写第7章；许烽、宣佳卓编写第8章；宣佳卓、杨治中编写第9章；童凯、陈骞编写第10章。

限于作者水平加之时间仓促，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编著者

2018年3月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 直流输电技术概况	1
1.2 柔性直流输电技术概况	4
1.3 电压源换流器的拓扑结构概况	6
1.4 柔性直流输电发展	13
第 2 章 模块化多电平换流器技术	17
2.1 模块化多电平换流器的结构类型及工作原理	17
2.2 模块化多电平换流器的调制方式	23
2.3 MMC 的电容电压平衡控制与环流抑制	30
2.4 电力电子器件技术与子模块设计	40
第 3 章 柔性直流输电的稳态特性与运行方式	49
3.1 柔性直流输电的稳态特性	49
3.2 多端柔性直流输电的稳态特性	56
3.3 柔性直流输电系统的损耗	65
第 4 章 柔性直流输电的控制系统与启动方式	73
4.1 换流站级基本控制策略	73
4.2 系统级协调控制方法	86
4.3 不控充电过程分析	98
4.4 MMC 启动控制方式	103
4.5 柔性直流输电控制系统功能	129
4.6 柔性直流输电控制保护系统	133
第 5 章 柔性直流输电系统的故障分析与保护	138
5.1 柔性直流输电系统的故障分析	138

5.2	柔性直流输电系统的保护配置	142
5.3	柔性直流输电系统的故障隔离和重启动技术	150
第 6 章	柔性直流输电系统的过电压与绝缘配合	162
6.1	换流站过电压来源及限制方法	162
6.2	避雷器的配置方案	164
6.3	过电压与绝缘配合	165
第 7 章	柔性直流输电系统的主要设备	177
7.1	IGBT 换流阀	177
7.2	连接变压器	180
7.3	桥臂电抗器	184
7.4	启动电阻器	187
7.5	接地电阻器	193
7.6	平波电抗器	194
7.7	开关设备	195
第 8 章	柔性直流输电工程的试验技术	197
8.1	子模块的试验	197
8.2	换流阀的试验	198
8.3	控制保护系统的试验方法	204
第 9 章	混合直流输电技术	208
9.1	混合两端直流输电系统	209
9.2	混合双极直流输电系统	216
9.3	受端是无源网络的并联混合双馈入系统	217
9.4	新型 LCC-FHMMC 混合直流输电系统	221
第 10 章	柔性直流输电与直流电网技术的发展	237
10.1	直流断路器	237
10.2	阻尼恢复系统	240
10.3	直流变压器	249
10.4	直流潮流控制器	251
10.5	直流配网	262

概 述

1.1 直流输电技术概况

1.1.1 常规直流输电技术

随着交流电网的不断发展,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。为了解决交流联网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,人们的目光开始转向直流输电。1954 年,世界上第一条电网换相高压直流输电工程投入商业运行。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。此后,高压直流输电(High Voltage Direct Current Transmission, HVDC)以其适于远距离大容量输电、有功功率快速可控等特点在世界范围内得到了快速发展。从使用的换流器件角度分类,常规高压直流输电的发展可以分为以下两个时期:

(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。1954 年,世界上第一项工业性直流输电工程——瑞典的果特兰岛工程(100kV、20MW)投入商业运行;最后一项采用汞弧阀换流器的直流工程为 1977 年投运的加拿大纳尔逊河 I 期工程($\pm 450\text{kV}$)。在此期间,全球投入运行的汞弧阀直流工程共有 12 项,其中输送容量最大、输送距离最长的直流工程为加拿大纳尔逊河 I 期工程。这一时期被称为汞弧阀换流时期。容量最大的汞弧阀是用于太平洋联络线的多阳极汞弧阀(133kV、180A)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) 晶闸管阀换流时期(1972 年至今)。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。由于晶闸管换流阀与汞弧阀相比具有明显的优势,从 1977 年开始新建的直流输电工程均采用晶闸管换流阀。与此同时,原本采用汞弧阀的直流工程也逐步用晶闸管阀替代汞弧阀,直流输电技术进入

了晶闸管换流时期。

到目前为止,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等方面发挥了重大的作用。我国自舟山直流输电工程投运以来,高压直流输电发展迅猛,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。目前,我国正在建设的高压直流输电工程中电压等级最高的为 $\pm 1100\text{kV}$,额定输电容量为 12000MW,输电距离达 3324km。国内已建成投运的常规直流输电工程有 20 项以上,预计到 2020 年,直流工程总计将达 38 项,特高压直流输电工程将达 15 项,即将建设的直流输电工程占世界直流输电新建工程的 1/2 以上。

同高压交流输电相比,常规直流输电技术有诸多优点,主要体现在以下方面:

(1) 直流输电不存在交流输电的功角稳定问题,有利于远距离大容量送电,送电可靠性高。

(2) 采用直流输电实现电力系统之间的非同步联网,可以不增加被联电网的短路容量,被联交流系统设备可以最大限度地延续使用,减少交流系统设备改造所需的投资,同时可以在故障时有效抑制故障的进一步发展,提高供电的可靠性;采用直流输电线路联网使得被联电网可以是不同频率的电网,也可以是频率相同但非同步运行的电网,极大地降低了电网互联的技术难度,也使得不同频率电网之间的互联互通成为可能,为打造全球能源互联网奠定了坚实的基础。

(3) 直流输电输送的有功功率和换流器消耗的无功功率均可由控制系统进行控制,而直流输电系统的控制系统惯性极小,因此控制极为迅速,可利用这种快速可控性来改善交流系统的运行性能。

(4) 直流输电架空线路只需正负两极导线、杆塔结构简单、线路造价低、损耗小,在远距离大容量输电领域具有明显优势。

(5) 直流电缆线路输送容量大、造价低、损耗小、不易老化、寿命长,且输送距离不受限制,在离岸岛屿电力输送领域具有交流系统无法比拟的优势,而我国离岸岛屿数量众多,应用直流输电技术可以显著提高离岸岛屿供电的可靠性,促进离岸岛屿经济的发展。

(6) 直流输电可方便地进行分期建设和增容扩建,有利于发挥投资效益。

由于常规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,这使得常规直流输电客观上存在以下局限:

(1) 常规直流输电的运行受两端交流电网强度影响,缺乏独立性;不能供电无源网络及弱交流系统。

(2) 由于触发滞后角和熄弧角的存在,常规直流输电运行时要吸收大量的无功功率,需要大量的无功补偿设备。

(3) 常规直流会向交流系统引入谐波电流,使得交流电流和电压产生畸变,为保证电能质量在可接受的范围内,需要装设交流滤波器,但是交流滤波器又会导致直流线路甩负荷等条件下交流系统的过电压问题。

(4) 当受端交流电网发生故障造成换流站交流出口侧的母线电压下降时,常规直流易发生换相失败,造成功率缺额,引发系统二次扰动。

1.1.2 柔性直流输电技术

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 HVDC, VSC-HVDC) 由于具有电流自关断能力、有功/无功功率独立解耦控制、可向无源网络供电、不会发生换相失败等优势而得到快速发展。ABB 公司率先进行了柔性直流输电试验。由于这种换流阀功能强、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”,西门子公司将其称为“HVDC Plus”。在国内,按照相关专家的建议,将该技术命名为柔性直流输电 (HVDC Flexible),以区别于采用晶闸管的常规直流输电技术。

柔性直流输电采用了脉宽调制技术 (Pulse Width Modulation, PWM),电压源换流器的幅值和电压可以得到准确快速的控制。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。

目前,已投运的部分柔性直流输电工程采用两电平和三电平拓扑,虽然其结构简单,但存在如下缺点:

(1) 为提高电压等级和输送容量,换流器桥臂由大量绝缘双极晶体管串并联而成,然而各个元件关断时间、伏安特性等不尽相同,由此引发的器件一致触发、动态均压、电流均衡、电磁兼容等问题难以解决。

(2) 开关调制算法普遍采用 PWM 技术,器件的开关频率较高(一般在 1000~2000 Hz),稳态运行损耗较高(约 1.5%~3%)。

(3) 换流器交流输出电压电平数低、谐波畸变率高,不满足并网要求,通常需要配置一定容量的交流滤波器。

针对两电平和三电平在实际运行过程中暴露的缺陷,2001 年德国慕尼黑联邦国防军大学学者 Rainer Marquardt 提出了模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 拓扑。MMC 拓扑以半桥子模块为基本功率单元,采用模块级联的方式构成三相六桥臂,这种巧妙的结构设计可消除传统两电平换流器所固有的器件串联均压、一致触发等问题,制造、运行难度大大降低。MMC 拓扑在电压源换流器拓扑发展过程中具有里程碑意义。

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 Thristor, 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 相比容量相当但驱动损耗大大减小。IEGT 是 IGBT 的改进型产品,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。由于 IEGT 和 IGCT 等新型电力电子器件具有上述优点,因此未来将在柔性直流输电建设中表现出很大的应用潜力。

1.2 柔性直流输电技术概况

1.2.1 柔性直流输电技术优缺点

1.2.1.1 柔性直流输电技术优点

柔性直流输电是从常规直流输电的基础上发展起来的,因此,常规直流输电技术所具有的优点,柔性直流输电系统大都有,例如:柔性直流输电不存在交流输电的稳定性问题;柔性直流输电可以实现非同步系统的互联等。除此之外,柔性直流输电系统还有以下特殊优点:

(1) 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。柔性直流输电系统可以在其运行范围内对有功和无功功率进行完全独立的控制。两端换流站可以完全吸收和发出额定的无功功率,通过接收直接无功功率指令或根据交流电网的电压水平调节其发出或吸收的无功功率,并在这个范围内连续调节有功功率输出。

(2) 可以向弱交流系统或无源负荷供电。电压源换流器可控制电流的关断,不需要外加换相电压,无换相失败问题,克服了常规直流输电必须是有源网络的缺陷,拓宽了直流输电的应用范围。

(3) 潮流反转方便快捷。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。

(4) 事故后快速恢复供电和黑启动。事故后,柔性直流可以向电网提供必要的电压和频率支持,帮助系统恢复供电。2003年“8·14”美加大停电时,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。

(5) 交直流侧谐波小。由于柔性直流采用 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,换流器电平数较多时换流器的输出电压直接就可以满足用户对谐波的要求,不必另外安装交流滤波器,因此也不存在换流器甩负荷等情况下引起的交流系统过电压问题。

(6) 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。

(7) 输电容量相同的情况下柔性直流换流站的占地面积小于传统高压直流换流站。由于柔性直流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。另外,模块化设计使柔性直流输电的设计、生产、安装和调试周期大为缩短,换流站的主要设备能够先在工厂中组装完毕,并预先完成各种测试。调试好的模块可方便地利用卡车直接运至安装现场,从而大大减少了现场安装调试时间。

1.2.1.2 柔性直流输电技术缺点

柔性直流输电技术虽然有上述众多优势,但是也存在以下缺点:

(1) 运行损耗大。受目前 IGBT 耐压水平的限制,已投运的两电平、三电平电压源换流器一般含有成百个串联的 IGBT, PWM 调制技术使得器件开关频率高达 $1.05 \sim 1.95 \text{ kHz}$,

从而产生较大的阀损耗。随着新型拓扑结构和新型调制技术的发展,模块化多电平型柔性直流输电技术的广泛应用,柔性直流输电的运行损耗也随之显著降低,其单端换流器损耗可以降低到运行功率的1%左右。随着新型拓扑结构和脉宽调制技术的发展,电压源换流器损耗可以降到传统直流换流器损耗的1.0~1.5倍。

(2) 不能控制直流侧故障时的故障电流。对于两电平和三电平电压源换流器拓扑而言,直流母线间都接有大容量电容器组。一旦直流侧发生单极接地或两极短路故障,电容器组将放电产生巨大的冲击电流,如果该电流在较短时间内不能得到抑制,换流站设备可能会损坏。对于模块化多电平换流器,虽然直流母线侧没有接入大容量电容器组,但直流侧故障时换流器依然无法有效控制交直流两侧的能量交换,只能通过断开交流侧断路器使换流器退出运行。现在已有拓扑结构可以解决直流侧故障时产生较大冲击电流的问题,比如全桥子模块,但是使用该模块在同等容量的换流站中需要更多的元器件,增加了工程成本,且换流站的占地面积也会大幅增加。

1.2.2 柔性直流输电技术应用领域

电压源型直流输电技术克服了传统 HVDC 的固有缺陷,拓展了直流输电的应用范围,为直流输电技术的发展开辟了一个新的方向。从现有投运的工程及其技术特点来看,VSC-HVDC 的应用领域主要有以下几方面:

(1) 交流电网的同步或者异步互联。随着技术的发展和成熟,VSC-HVDC 换流站的容量和电压等级不断提升,造价和损耗却逐步降低,这为 VSC-HVDC 在远距离、大容量输电场合中的应用提供了条件。可以预见,VSC-HVDC 系统的传输容量会进一步提升。与基于电网换相的传统直流输电相比,VSC-HVDC 具有更强的可控性和灵活性,VSC 换流器中电流能够自关断,不会发生换相失败,在提高系统稳定性、增加传输容量等方面将有更广泛的应用。2010 年投运的非洲纳米比亚 Caprivi Link 工程首次在 VSC-HVDC 商业工程中采用长距离架空线路,线路长度达到 970km。与电缆线路相比,在远距离输电应用中架空线路仍然具有经济性方面的优势,特别是当把已有的三相交流线路转化为直流线路功用时能显著降低整个系统的造价。纳米比亚电网的系统强度很弱,VSC-HVDC 有助于提高其系统稳定性。作为电网冲击吸收器(grid shock absorber),VSC-HVDC 还将在未来大型电网的分区控制、隔离故障传播、提高电网可靠性等应用中发挥重要作用。

(2) 风力发电等清洁能源并网。随着能源问题的日益突出,发展和利用风能等清洁能源是国际大趋势,风力发电量在世界各国总发电量中所占比例不断增大。由于风力发电的特点,风电场特别是大型风电场并网对电力系统的影响已经成了一个不可避免的问题。由于海上平均风速更大,能够提供更多的电能,在海上建立风电场具有巨大的吸引力,已有很多国家把注意力投向建立海上风电场。虽然通过三相交流系统把小型近海风电场接入电网是一种经济有效的联网方式,但是 VSC-HVDC 能为远离海岸建立的大型海上风电场提供更有效的联网手段。VSC-HVDC 能够有效解决风电场功率波动引起的电压稳定和电能质量等问题。ABB 公司于 1999 年在瑞典 Gotland 岛建立了世界上第一个商业化运行的 VSC-HVDC 工程,该工程采用地下电缆输送电能,对环境的影响很小,能实现有功功率、无功功率、风电场电压支撑和电能质量等方面的控制。ABB 公司于 2000 年在丹麦建立了 Tjaereborg 工程,它是一个用来研究风电场采用 VSC-HVDC 技术并网发电的示范工程。此

工程的投运能有效解决风力发电引起的无功功率和电压问题,为风电场并网积累了一定的经验。ABB 公司建设的 NordE.ON 1 工程采用 VSC-HVDC 系统与交流系统联网,把位于北海(North Sea)的海上风电场接入德国电网。此工程与 Gotland 工程、Tjaereborg 工程相比在电压等级和容量方面都有很大的提升,其直流电压等级为 $\pm 150\text{kV}$,容量达到了 400MW。随着技术的成熟和成本的降低,VSC-HVDC 在风电场并网等应用场合将有更大的发展空间。

(3) 电力交易。VSC-HVDC 没有最小功率和电流的限制,可以灵活地安排运行方式、制定传输的经济功率,利用其可以快速、独立控制有功和无功功率等特性,人们可以方便地构建地区电力供应商间电力市场交易的技术平台,增加系统运行的灵活性和可靠性。ABB 公司于 2000 年在澳大利亚建设的 Direct Link 工程,通过 3 个并列 VSC-HVDC 系统将 New South Wales 电网和 Queensland 电网异步互联,并根据两边电网电价的高低来控制功率的传输,从中获取利润。ABB 公司于 2002 年在澳大利亚建设的 Murray Link 工程将 South Austrilia 电网和 Victoria 电网异步互联在一起,能根据市场电价的不同方便地调整功率的流动方向。ABB 公司于 2002 年在美国建设的 330MW Cross Sound Cable 工程将康涅狄格州(Connecticut)电网和长岛(Long Island)电网通过海底电缆连接在一起,能够改善系统的供电可靠性,同时这个直流工程也被用来进行电力交易,促进当地电力企业间的竞争。在 2003 年 8 月 14 日的美加大停电事故中,Cross Sound Cable 工程对长岛电网的快速恢复发挥了重要作用,是 VSC-HVDC 优异性能的一个体现。

(4) 向弱交流系统或者无源系统供电。由于 VSC 换流器可运行在无源逆变状态,没有换相失败问题,VSC-VHDC 很适用于向弱交流系统或者无源系统供电等场合。ABB 公司于 2005 年在挪威建设的 Troll A 工程通过两个额定功率为 40MW 的 VSC-HVDC 系统向海上天然气钻井平台上的高压电动机提供电能。之所以采用 VSC-HVDC 技术,首先考虑到长距离海底电缆输电和环境保护要求外,其次考虑到电动机变频($0\sim 63\text{Hz}$)、调压($0\sim 56\text{kV}$)等运行要求,同时受钻井平台的限制,换流器的体积和质量都受到限制。为了降低成本、提高生产效率、减少温室气体的排放,北海的 Vallhall 工程也通过 VSC-HVDC 向海上钻井平台提供 60Hz 的电源,其中岸上交流电网的频率为 50Hz。

(5) 构筑城市直流输配电网。由于大中城市的空中输电走廊已没有发展余地,原有架空配电网络已不能满足电力增容的要求,合理的方法是采用电缆输电。直流电缆不仅比交流电缆节省空间,且能输送更多的有功功率,因此采用 VSC-HVDC 技术向城市中心区域供电可能成为未来城市增容的最佳途径。

(6) 提高配电网电能质量。电压源型直流输电系统可以独立快速地控制有功功率和无功功率,且能够保持交流系统的电压基本不变,它使系统的电压和电流较容易地满足电能质量的相关标准。因此,VSC-HVDC 技术将是未来改善配电网电能质量的有效措施。

1.3 电压源换流器的拓扑结构概况

1.3.1 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 1-1 所示。每相桥臂通过上

下开关的导通和关断控制,使交流侧交替输出正电压或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办法。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 du/dt 都比较大。

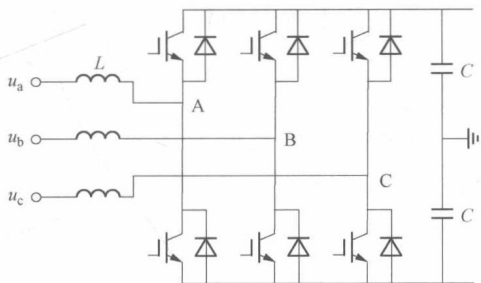


图 1-1 两电平换流器拓扑结构

1.3.2 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。目前三电平 NPC 换流器的研究和应用都很成熟。三电平 NPC 换流器拓扑结构如图 1-2 所示。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。

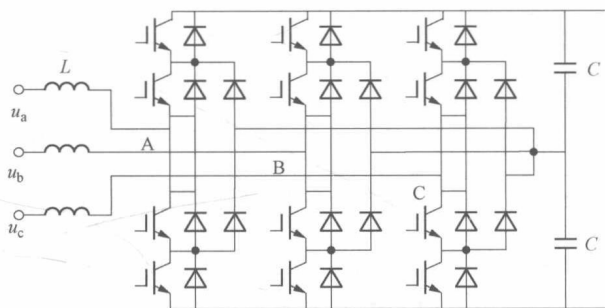


图 1-2 三电平 NPC 换流器拓扑结构

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,因此应用三电平 NPC 换流器在效率方面的提高不会很大。另外,由于 NPC 换流器额外需要较多的箝位二极管,其总造价将高于两电平换流器。

1.3.3 多电平换流器

多电平换流器的基本思路是把多个功率器件按一定的拓扑结构连接成可以提供多种电平输出的电路,然后通过适当的控制逻辑将几个电平台阶合成阶梯波以逼近正弦输出电压。随电平级数的增加,合成的输出阶梯波级数增加,输出越来越逼近正弦波,谐波含量大大减小。

目前常用的多电平换流器主要有以下几种拓扑结构:

(1) 二极管箝位多电平换流器。1980 年,日本长冈科技大学的 A.Nabae 等人在 IEEE 工业应用学会 (IAS) 年会上首次提出二极管箝位型逆变器。二极管箝位多电平换流器

的优点：便于双向功率流动的控制；功率因数控制方便。缺点：电容均压比较复杂和困难；随着电平数增加，控制越来越复杂。在国内外，这种结构形式的产品已进入实用化的阶段。

如图 1-3 所示为 N 电平二极管箝位型换流器电路拓扑，直流端共有 $N-1$ 个分压电容，逆变桥每相上、下桥臂各有 $N-1$ 个功率管，分别为 $+VT_{N-1}$ 、 $\dots$ 、 $+VT_1$ 、 $-VT_1$ 、 $\dots$ 、 $-VT_{N-1}$ 。

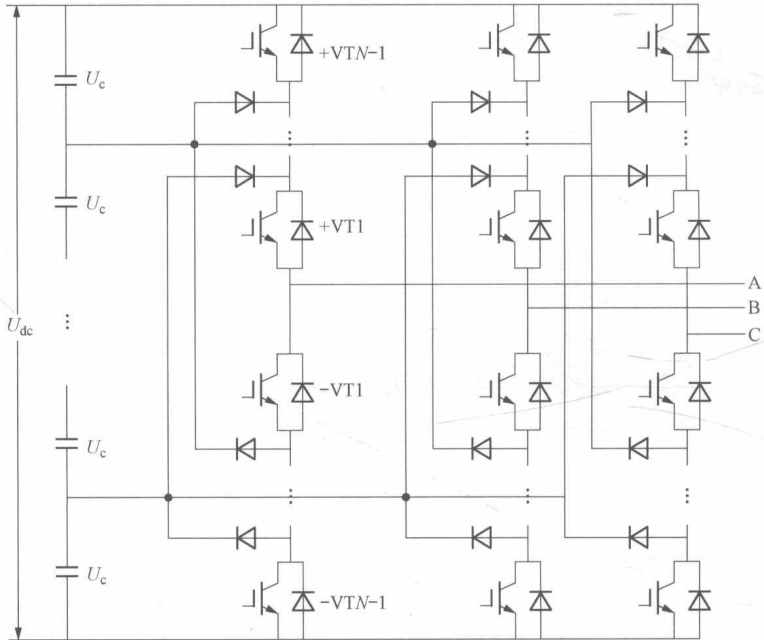


图 1-3 二极管箝位多电平换流器拓扑结构

(2) 飞跨电容箝位多电平换流器。飞跨电容型 (Flying Capacitor) 箝位多电平换流器是在 1992 年的电力电子专家年会 (PESC) 上由 T.A. Meynard 和 H. Foch 首次提出的。该电路结构的优点：对某一输出电压具有不同的组合；可控无功和有功功率流，可应用范围广。缺点：需要较多的电容钳位，开关损耗大；控制算法过于复杂，存在电容电压分布不均问题。

对于一个 N 电平飞跨电容式换流器，直流侧需要 $N-1$ 个电容；每相桥臂需要 $2(N-1)$ 个功率开关、 $(N-1)(N-2)/2$ 个钳位电容器。飞跨电容五电平换流器电路拓扑如图 1-4 所示。

(3) 级联型多电平换流器。具有独立直流电源的级联型换流器 (Cascaded Topology with Separated DC Source) 是由 P. Hammond 等在 1975 年提出的。该电路的优点：无箝位二极管和分压电容；各分立模块间相对独立，易实现模块化封装和维护；利用直流源分压，降低了对直流电容容量的要求。缺点：需要大量独立直流电源。

级联式换流器采用隔离的直流电源作为输入，通过把多个各自独立的 H 桥逆变电路基本单元串联在一起，根据输出正弦波形中需要包含的电平数可以决定需要串联的级数，从而提高输出电压等级、减小谐波。该电路拓扑无需大量的箝位二极管和悬浮电容。 N 电平的级联式逆变器，其各相串联级数 m 和输出波形包含电平数 N 之间满足“ $N=2m+1$ ”的关系。图 1-5 所示为具有独立直流电源的级联九电平换流器。

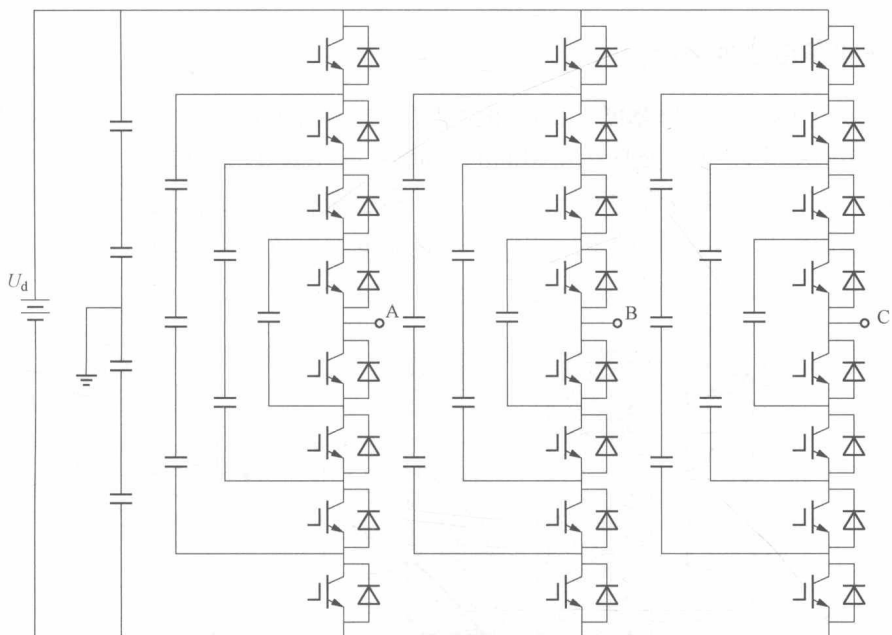


图 1-4 飞跨电容箝位五电平换流器拓扑结构

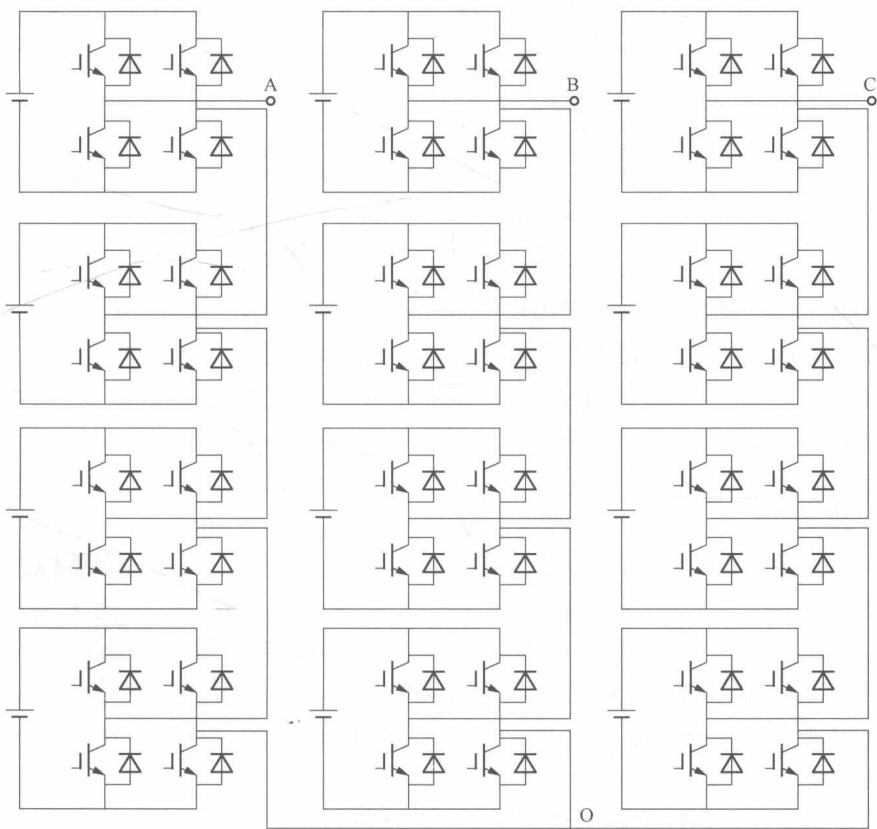


图 1-5 级联型九电平换流器

1.3.4 模块化多电平换流器

模块化多电平换流器（MMC）无需箝位器件，如图 1-6 所示，它由 6 个桥臂构成，其中每个桥臂由若干个相互连接且结构相同的子模块（submodule, SM）与一个桥臂电抗器 L 串联构成，上、下两个桥臂构成一个相单元。通过控制所有子模块的开关状态，换流器在交流侧可输出波形质量很好的电压波形，在直流侧保持直流电压动态稳定。

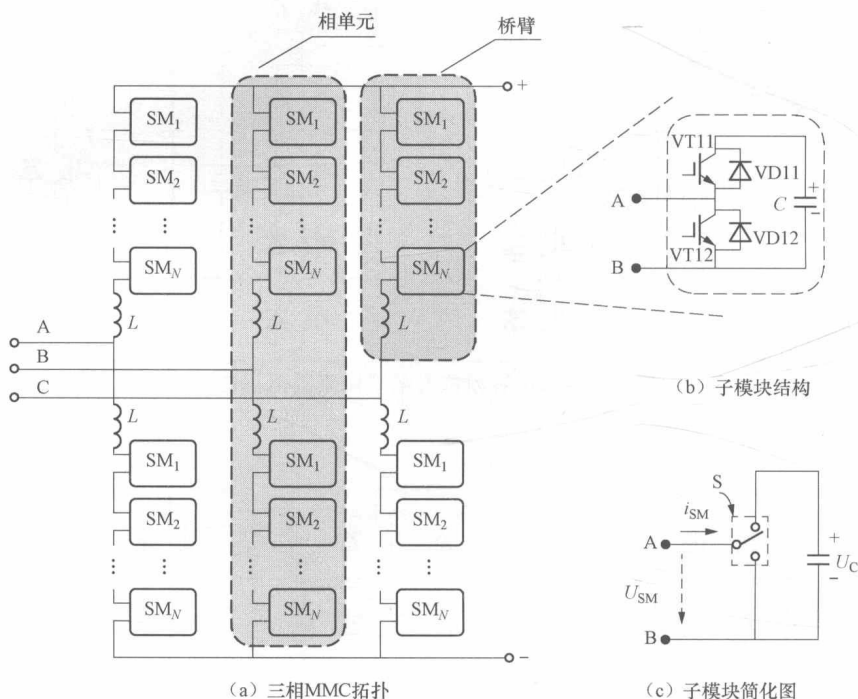


图 1-6 模块化多电平换流器

MMC 可以以较低的开关频率得到波形品质较高的输出电压波形，降低了换流器开关损耗及滤波器容量，提高了换流器的效率和经济性。通过调整子模块的串联个数便于实现所需的电压及功率等级，拓扑灵活性增强。然而模块化结构也给 MMC 带来了一些缺点：为协调控制所有子模块以及维持子模块电容电压的动态稳定，MMC 的控制量众多，控制过程复杂。

1.3.5 级联两电平换流器

级联两电平电压源换流器拓扑在结构上与模块化多电平换流器具有相似之处，即其桥臂主要由多个具有相同结构的两电平换流器子模块串联构成。其主要区别为在级联两电平电压源换流器拓扑中，ABB 公司将其目前独有的 IGBT 压接技术应用到了子模块中，通过 IGBT 模块的串联大幅度提升了子模块可选择的电压等级，其拓扑结构如图 1-7 所示。子模块可选择的电压等级的提高，使换流器可以使用较少量的子模块即可达到较高的直流电压水平。

受目前全控型开关器件耐压水平的限制，为实现较高的直流电压，模块化多电平换流器拓扑所需使用的子模块众多，其数量已大大超出网谐波含量标准对换流器输出电平数