

柔性直流输电系统稳态 潮流建模与仿真

韦延方 郑征 王晓卫 著



科学出版社

柔性直流输电系统稳态潮流 建模与仿真

韦延方 郑 征 王晓卫 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书重点阐述了柔性直流输电系统稳态潮流建模及其数值仿真相关技术,针对模块化多电平换流器,提出了基于排序建模法的电容电压平衡稳定控制策略;基于同电位点可以短接的等效电路原理,建立了柔性直流输电稳态方程,提出了一种适用于柔性直流输电系统的统一迭代潮流求解算法,该算法适合推广到含多端和多馈入的交直流混合系统;基于保留非线性方法,提出了一种自动生成交直流系统方程雅可比矩阵的改进算法,以提高潮流程序的开发和计算效率;通过对含负荷参数的潮流方程的确定,建立了含柔性直流输电的交直流混合系统静态电压稳定分析模型;对修改后的 IEEE 节点算例系统进行相关的潮流与电压稳定仿真分析,以验证本书模型和算法的有效性。

本书可作为电气工程专业高年级本科生、研究生的教材,也可供相关科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

柔性直流输电系统稳态潮流建模与仿真 / 韦延方, 郑征, 王晓卫著. —北京: 科学出版社, 2015.11

ISBN 978-7-03-045765-3

I. ①柔… II. ①韦… ②郑… ③王… 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(2015)第 225181 号

责任编辑: 陈 静 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 迷底书装

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>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 11 月第 一 版 开本: 720×1 000 1/16

2015 年 12 月第二次印刷 印张: 9

字数: 230 000

定价: 48.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

目前，高压直流（High Voltage Direct Current, HVDC）输电技术在世界范围内正处于高速发展时期。我国南方电网和华东电网已经形成交直流混联的大规模电力系统。伴随着能源紧缺、环境问题和可再生能源的持续开发，HVDC 输电应用将更为广泛，将进一步促使我国发展形成世界上结构最为复杂的交直流混合电网。

基于电压源换流器（Voltage Source Converter, VSC）和脉宽调制技术的电压源换流器型高压直流（Voltage Source Converter based HVDC, VSC-HVDC）输电技术是当今世界电力电子技术应用领域的制高点，能有效提高电能质量并确保电网安全稳定运行，是智能电网发展中具有代表性的关键技术之一。截至目前，用于 HVDC 的 VSC 基本为 2 电平或 3 电平的换流器，此结构本身存在的一些缺陷限制了其在工程中的进一步应用。为此，一种新型的模块化多电平换流器（Modular Multilevel Converter, MMC）得到了越来越多的关注和研究。与 VSC-HVDC 相比，基于 MMC 的 HVDC（MMC-HVDC）系统在减少开关损耗、容量升级、电磁兼容、故障管理等方面具有明显的优势。

本书总结了柔性直流输电在国内外的研究进展和工程应用现状、稳态潮流建模与仿真等，研究结果为柔性直流输电的稳态建模、算法优化和数值仿真提供了一定的理论基础。本书共 7 章。第 1 章主要阐述了 MMC-HVDC 目前的研究进展与应用概况，并分析了 MMC-HVDC 的不足之处和今后亟待研究的关键问题；第 2 章分析了含模块化多电平换流器的交直流系统运行机理、控制方式和等效模型等内容；第 3 章提出了基于排序建模法的电容电压平衡稳定控制策略，以实现 MMC 电容电压的平衡控制；第 4 章基于同电位点可以短接的等效电路原理，建立了柔性直流输电稳态方程，提出了一种适用于柔性直流输电系统的统一迭代潮流求解算法；第 5 章基于极坐标系下的保留非线性方法，提出了一种自动生成交直流输电系统方程雅可比矩阵的改进算法；第 6 章基于统一迭代法的连续潮流模型，通过对含负荷参数的潮流方程的确定，建立了含柔性直流输电的交直流混合系统静态电压稳定分析模型；第 7 章给出了本书算例系统所采用的具体参数。

本书由河南理工大学电气工程与自动化学院的韦延方（第 1 章~第 3 章、第 6 章），郑征（负责全书的统筹安排和统稿工作）和王晓卫（第 4 章~第 5 章、第 7 章）共同撰写。本书的撰写工作得到了河南理工大学电气工程与自动化学院领导的大力支持，在此表示感谢。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目（61340015、U1204506、61403127）、河南省科技厅国际联合基金项目（144300510014）、河南省教育厅科学技术研究重点项

目(14A470001)、河南省高等学校控制工程重点学科开放实验室项目(KG2014-04)、河南理工大学基本科研业务费专项项目(NSFRF140117)、江苏省博士后科研资助计划项目(1501058B)、河南理工大学博士基金(B2014-023)、河南理工大学“特色专业提升行动计划”项目(电气工程及其自动化)的支持,特此致谢。本书的出版得到了河南理工大学电气工程与自动化学院的资助和支持,谨在此表示感谢。书中参考了大量的文献资料,尽力对所引用的文献在每章后的参考文献中列出,但是难免有所遗漏,特别是一些被反复引用、很难查实原始出处的参考文献,在此向被遗漏参考文献的作者表示歉意,并向本书所引用的参考文献的作者表示由衷的谢意。

限于作者的水平和经验,书中难免有疏漏之处,欢迎广大读者批评指正。

作者

2015年7月

目 录

| | |
|---------------------------|----|
| 前言 | |
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 引言 | 1 |
| 1.2 HVDC 输电系统概况 | 3 |
| 1.2.1 HVDC 的原理和技术特点 | 5 |
| 1.2.2 HVDC 的发展 | 8 |
| 1.3 VSC-HVDC 输电系统的概况 | 14 |
| 1.3.1 VSC-HVDC 的技术特点 | 14 |
| 1.3.2 VSC-HVDC 的研究状况 | 16 |
| 1.4 MMC-HVDC 输电系统的概况 | 17 |
| 1.4.1 MMC-HVDC 的技术特点 | 17 |
| 1.4.2 国外 MMC-HVDC 的工程应用 | 17 |
| 1.4.3 国内 MMC-HVDC 的工程应用 | 19 |
| 1.4.4 MMC-HVDC 研究现状和存在的问题 | 21 |
| 1.5 交直流系统潮流计算的研究现状 | 31 |
| 1.6 交直流系统电压稳定的研究现状 | 31 |
| 1.6.1 静态电压稳定 | 32 |
| 1.6.2 动态电压稳定 | 33 |
| 参考文献 | 34 |
| 第 2 章 MMC-HVDC 的运行机理与等效模型 | 44 |
| 2.1 引言 | 44 |
| 2.2 MMC-HVDC 的基本机理 | 44 |
| 2.2.1 MMC 的基本概念 | 44 |
| 2.2.2 MMC 的基本原理 | 47 |
| 2.2.3 MMC-HVDC 系统的构成 | 51 |
| 2.3 MMC-HVDC 的稳态运行特性 | 52 |
| 2.3.1 VSC-HVDC 系统的运行特性 | 52 |
| 2.3.2 MMC-HVDC 系统的运行特性 | 53 |
| 2.4 MMC-HVDC 的运行控制方式 | 56 |
| 2.5 本章小结 | 57 |

| | |
|---------------------------------------|-----------|
| 参考文献 | 57 |
| 第3章 模块化多电平换流器控制策略 | 59 |
| 3.1 引言 | 59 |
| 3.2 多电平换流器脉冲宽度调制算法 | 59 |
| 3.2.1 空间矢量脉冲宽度调制 | 60 |
| 3.2.2 开关频率优化脉冲宽度调制 | 60 |
| 3.2.3 载波移相脉冲宽度调制 | 60 |
| 3.3 模块化多电平换流器脉冲宽度调制算法 | 60 |
| 3.3.1 载波同相层叠脉冲宽度调制 | 61 |
| 3.3.2 载波交替反相层叠脉冲宽度调制 | 61 |
| 3.3.3 载波正负反相层叠脉冲宽度调制 | 62 |
| 3.3.4 三种调制方法实验对比 | 62 |
| 3.3.5 三种调制算法的相关数学推导 | 69 |
| 3.4 子模块电容电压控制 | 74 |
| 3.4.1 子模块电容电压平衡控制 | 74 |
| 3.4.2 子模块电容电压稳定控制 | 76 |
| 3.4.3 仿真分析 | 78 |
| 3.5 本章小结 | 80 |
| 参考文献 | 80 |
| 第4章 含 MMC-HVDC 的交直流系统稳态模型和潮流计算 | 82 |
| 4.1 引言 | 82 |
| 4.2 MMC-HVDC 简化等效模型 | 82 |
| 4.3 含 MMC-HVDC 的交直流系统潮流计算 | 84 |
| 4.3.1 含 MMC-HVDC 交直流系统潮流方程 | 84 |
| 4.3.2 交直流潮流统一迭代算法 | 85 |
| 4.4 算例分析 | 87 |
| 4.4.1 含两端 MMC-HVDC 的 IEEE-57 节点系统 | 88 |
| 4.4.2 含多端 MMC-HVDC 的 IEEE-57 节点系统 | 90 |
| 4.4.3 不同算例和不同控制方式之间的性能比较 | 91 |
| 4.5 本章小结 | 91 |
| 参考文献 | 91 |
| 第5章 基于保留非线性的改进潮流算法 | 93 |
| 5.1 引言 | 93 |
| 5.2 自动微分技术 | 93 |

| | | |
|--------------|--------------------------------------|------------|
| 5.3 | 改进的交直流潮流算法 | 96 |
| 5.4 | 基于保留非线性的交直流潮流算法 | 98 |
| 5.5 | 算例分析 | 100 |
| 5.5.1 | 含两端 MMC-HVDC 的交直流系统 | 101 |
| 5.5.2 | 含三端 MMC-HVDC 的交直流系统 | 103 |
| 5.5.3 | 含两馈入 MMC-HVDC 的交直流系统 | 104 |
| 5.5.4 | 不同算例和不同控制方式之间的性能比较 | 104 |
| 5.6 | 本章小结 | 105 |
| | 参考文献 | 106 |
| 第 6 章 | 含 MMC-HVDC 的交直流系统静态电压稳定 | 108 |
| 6.1 | 引言 | 108 |
| 6.2 | 连续潮流算法 | 108 |
| 6.3 | 含 MMC-HVDC 的交直流系统电压稳定模型 | 111 |
| 6.3.1 | 含参数的潮流方程 | 111 |
| 6.3.2 | 基于统一迭代法的连续潮流算法 | 111 |
| 6.4 | 算例分析 | 115 |
| 6.4.1 | 运行方式 1 | 116 |
| 6.4.2 | 运行方式 2 和 3 | 117 |
| 6.4.3 | 运行方式 4 | 118 |
| 6.4.4 | MMC-HVDC 运行在 4 种方式下的性能比较 | 119 |
| 6.5 | 交直流系统连续潮流算法雅可比矩阵元素 | 119 |
| 6.6 | 本章小结 | 122 |
| | 参考文献 | 123 |
| 第 7 章 | 修改后的 IEEE 节点算例系统参数 | 126 |
| 7.1 | 修改后的 IEEE-5 节点系统 | 126 |
| 7.2 | 修改后的 IEEE-14 节点系统 | 127 |
| 7.3 | 修改后的 IEEE-30 节点系统 | 128 |
| 7.4 | 修改后的 IEEE-39 节点系统 | 130 |
| 7.5 | 修改后的 IEEE-57 节点系统 | 132 |
| 7.6 | 修改后的 IEEE-118 节点系统 | 134 |
| | 参考文献 | 135 |

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

目前,我国电力系统已从区域性电网过渡到全国性互联电网。众所周知,我国地域辽阔,能源分布和负荷发展极不均衡,其中 60%的煤炭资源集中在山西平朔、陕西神户和内蒙古西部地区,72%的水力资源集中在西南地区,如金沙江、岷江、雅鲁藏布江和怒江等河流,而负荷中心却集中在北京、广东和上海等东部沿海城市,其电能消费约占全国的 50%以上。因此,一边是守着优越条件“望水兴叹”、“望煤兴叹”,而另一边是为缺电而苦恼,提出实施“西电东送”这一伟大工程无疑为解决矛盾提供了可能。西电东送工程为把西部资源优势转化为经济优势提供了新的历史机遇,对加快我国能源结构调整和东部地区发展将发挥极其重要的作用^[1-6]。

根据我国有关部门规划,西电东送将主要由北、中、南三大输电通道构成。北线是将黄河上游的水电和山西、内蒙古坑口火电送往华北电网京津唐地区;中线是将三峡和金沙江干支流水电输向华东电网;南线是将贵州乌江、云南澜沧江和桂滇黔三省交界处的南盘江、北盘江、红水河的水电以及黔滇两省的坑口火电向华南输送。预计截止到 2030 年,距离超过 1000km 的西电东送容量中,北线为 19.8GW,中线为 51.3GW,南线为 29.3GW,三大通道总输送容量为 100GW^[3]。

因此,在西电东送工程中,如何解决远距离大容量输电已成为不可避免的现实问题。目前可行的技术方案有特高压交流输电技术和高压直流(High Voltage Direct Current, HVDC)输电技术。在特定的条件下, HVDC 系统与交流输电系统相比,在技术和经济上具有一定的优势,主要表现在以下几个方面^[1-6]:

(1) 与输送相同功率的交流线路相比, HVDC 的直流输电线路造价更低,传输效率更高,且所需输电走廊较小;

(2) HVDC 输电方式的功率和能量的损耗较小;

(3) HVDC 输电线本身不存在交流输电系统自身固有的稳定问题,输送距离和功率也不受电力系统同步运行稳定性的限制;

(4) 线路稳态运行时没有电容电流,没有电抗压降,沿线电压分布较平稳,线路本身无需无功功率补偿;

(5) 可以实现交流系统间的非同步相连;

(6) 交流系统经由 HVDC 相连时,短路容量没有增加;

- (7) 利用 HVDC 的快速调节性能可提高交流系统的稳定性, 并可隔离故障;
- (8) 潮流和功率控制更为容易等。

此外, 由于常规能源的紧张和环境的日益严峻问题, 可再生能源的开发和利用受到前所未有的重视, 与之相适应的分布式发电 (Distributed Generation, DG) 技术因此得到快速发展。大电网与 DG 相结合被世界许多能源、电力专家公认为是能够节省投资、降低能耗和提高电力系统可靠性和灵活性的主要方式, 是 21 世纪电力工业的发展方向^[4]。HVDC 输电技术是 DG 大规模接入电网系统的关键技术之一, 其将电力电子技术与现代控制技术相结合, 通过对电力系统参数的连续调节控制, 从而可以大幅降低输电损耗、提高输电线路输电能力和保证电力系统稳定水平。因此, HVDC 输电在 DG 领域有着巨大的应用潜力, 将会带来巨大的经济效益和社会效益。

与传统交流输电系统相比, 交直流混合系统具有较大的输送容量和更为灵活的运行方式。多条直流连络线的引入, 提高了整个系统的可控程度, 但同时也带来一些特殊问题: 交直流系统间、直流子系统间相互影响, 且各直流控制系统结构和参数存在差异, 从而使交直流系统安全稳定性问题更加突出, 对电网稳定运行和控制提出了更高的要求。传统 HVDC 采用晶闸管换流设备, 只能控制导通角, 需反向电压以实现关断, 可能出现的换相失败故障, 已成为系统安全运行的一大威胁; 而换流过程需要消耗大量无功功率, 更对其接入的交流系统的电压稳定性提出了严峻挑战^[7-9]。

随着新型电力电子器件和现代控制技术的快速发展, 采用电压源换流器 (Voltage Source Converter, VSC) 和脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 技术的电压源换流器型高压直流 (VSC-HVDC) 输电系统已经投入运行。VSC-HVDC 可对交直流系统交流母线无功功率进行动态补偿, 从而可为受端系统提供良好的电压支撑, 有利于防止系统中晶闸管换相失败, 并有助于在故障后快速恢复直流功率。自 1997 年世界上首个 VSC-HVDC 试验工程成功投运以来, VSC-HVDC 凭借其独特的技术优势, 一直吸引着国内外众多学者和工程研究人员的高度关注^[10, 11]。目前, 国内外已有数十项 VSC-HVDC 的工程应用, VSC-HVDC 在向无源网络供电、新能源并网和城市供电等领域具有广阔的应用前景^[11]。

目前已投运的 VSC-HVDC 工程的换流器基本是由 2 电平或 3 电平等拓扑组成的, 此种结构的拓扑已经获得了广泛的应用, 但其本身存在着一些缺陷, 用于 HVDC 工程时有诸多不足之处。例如, 绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 串联所带来的静态、动态均压和电磁干扰, 以及受电平数的限制, 2 电平或 3 电平换流器拓扑输出特性较差; 2 电平或 3 电平的 VSC 多采用 PWM 调制, 器件开关频率高, 开关损耗较大; 2 电平或 3 电平的 VSC 拓扑用于高压领域时, 因受单个开关器件耐压的限制, 仍然免不了使用开关器件的直接串联, 对各器件开通和关断的一致性、串联器件的均压特性等要求较高, 一定程度上限制了其在 HVDC 工程中的进一步应用。以在风电场的应用为例, 已有研究表明^[12, 13], 尽管 VSC-HVDC 性能优良、运行灵活, 但因其损耗较高、换流器容量限制等缺陷, 使得其在较大型风电场并网中

的应用不是一个最优的方案,传统的 HVDC 效果优于 VSC-HVDC。若采用基于多电平拓扑的 VSC 构成换流器,则可弥补上述 2 电平或 3 电平的某些缺陷,并且从动态特性和谐波影响等方面考虑出发,采用多电平拓扑的 VSC 更具有优势。

常见的多电平换流器有二极管箝位型、飞跨电容型和级联 H 桥型,其中二极管箝位型、飞跨电容型在 VSC 输出电平数较多时,所需的悬浮电容将急剧增加,给系统控制及设备装配带来较大的困难,并且因受 VSC 电平数目的限制,输出特性差、难以模块化生产;而级联 H 桥型需要的独立直流电源较多,不易实现四象限运行,对于有功功率传输的场合,需要大量额外的独立直流电源,增加了工程应用的成本,并且其拓扑中不存在公共的直流正、负极母线,不适合用于直流输电领域^[11, 14-16]。

为此,德国慕尼黑联邦国防军大学的学者 Marquardt R 在 2001 年提出了模块化多电平换流器 (Modular Multilevel Converter, MMC) 拓扑^[17],并研制了 2MW、17 电平的试验样机。MMC 将电容与开关器件视为一个整体来构建子模块,该拓扑无需器件直接串联,通过子模块串联提升换流器的电压及功率等级,易于扩展到任意电平输出,具有较低的谐波畸变,且可采用较低的开关频率,从而降低了损耗,提高了效率;并且,MMC 的模块化结构使其可扩展性强,容易实现冗余控制。因而,MMC 在无功补偿、有源滤波器、电机拖动、电力牵引、直流输电等领域具有广阔的应用前景^[18-22];并且,MMC 可提供一个公共直流侧,更易实现背靠背的连接,因此适合用于 VSC-HVDC 输电领域。

与 VSC-HVDC 相比,基于 MMC 的 VSC-HVDC 系统在减少开关损耗、容量升级、电磁兼容、故障管理等方面具有明显的优势^[18, 23-25]。目前,世界上已有 4 项投入运行的基于 MMC 的 VSC-HVDC 实际工程:美国旧金山市 (San Francisco) 的 TBC (Trans Bay Cable) 工程、我国上海的南汇风电场柔性直流输电示范工程、广东南澳 $\pm 160\text{kV}$ 多端柔性直流输电示范工程和浙江舟山多端柔性直流输电示范工程。2010 年 11 月,世界上首个基于 MMC 的 VSC-HVDC 工程——TBC 工程在美国旧金山市北部投入运行^[26]。我国的上海南汇风电场示范工程是我国第一个基于 MMC 的 VSC-HVDC 工程,于 2011 年 7 月 25 日正式投入运行^[27]。目前,由于基于 MMC 的 VSC-HVDC 技术尚处于起步阶段,其基础理论和工程应用等相关问题仍需要作进一步的研究。针对基于 MMC 的 VSC-HVDC 交直流电力系统这一新的电网模式,将系统稳定性问题和分布式电源、系统互联的发展结合考虑,并根据近年来 VSC-HVDC 技术的日趋成熟、实用输送容量的快速增长这一事实,对含有基于 MMC 的 VSC-HVDC 交直流混合电力系统的潮流及其稳定性开展探索研究,具有重要的理论和现实意义。

1.2 HVDC 输电系统概况

直流输电是以直流电的方式进行电能传送。电力系统中发电和用电设备绝大部分都是交流电,因此直流输电的基本工作原理是通过换流装置将送端交流电转换成直流

电(称之为整流),将直流电传送到受端换流装置,然后在受端将直流电转换成交流电(称之为逆变),最后将电能传输到受端系统中去。进行交直流转换的场所,称之为换流站。本书将进行整流的场所称为整流站,进行逆变的场所称为逆变站。两端直流输电系统主要由整流站、逆变站和直流输电线路三部分组成。两端直流输电系统通常具有双向直流送电功能,即具有有功功率反送功能,在此情况下,任一侧的换流站既可作为整流站运行,也可以作为逆变站运行。因此,对于同一高压直流输电工程而言,两侧换流站的设备种类、设备数量甚至设备布置方式几乎完全一样,仅仅在于少数设备的台数和容量有所差别。其中,换流器是换流站中最重要的电气一次设备,除此之外,为了满足交、直流系统对于安全稳定和电能质量的要求,换流站中还装设有以下设备:换流变压器、平波电抗器、滤波器、无功补偿装置、控制保护系统、接地极线路、接地极、远程通信系统等^[28, 29]。

根据换流站的数目,直流输电系统可以分为两端直流输电系统和多端直流输电系统,其中,两端直流输电系统只有两个换流站,与交流系统有两个连接端口,是结构最简单的直流输电系统;具有三个或三个以上的换流站的直流输电系统为多端直流输电系统,它与交流系统有三个或三个以上的连接端口^[30-32]。目前,世界上已经投入运行的直流输电工程大部分为两端直流输电系统,根据工程特点和运行需要,主要分为直流单极输电系统、直流双极输电系统和背靠背直流输电系统三种类型,只有为数不多的多端直流输电系统处于试验运行阶段。因此,本章在此主要介绍两端直流输电系统的分类及其基本概念。

1) 直流单极输电系统

直流单极输电系统^[28]根据回流方式不同,分为单极大地(海水)回线和单极金属回线两种接线方式。前者利用大地或海水作为返回通路,直流输电线路只需要一根极导线,因此这种方式可以大大降低直流输电工程的造价,但是接地极对地下铺设物、通信线路及磁性罗盘均会造成一定的影响和危害。

单极金属回线方式由一根高压极导线和一根低压极导线组成,这种接线方式显然在经济上不是最合理的,但是它往往作为直流双极输电系统的一期工程。

2) 直流双极输电系统

直流双极输电系统^[28]又可分为两端中性点接地方式、单端中性点接地方式和中性线方式。两端中性点接地方式相当于两个单极大地(海水)回线方式。当双极对称运行时,理想情况下,正负两极导线的电流大小相等,方向相反,接地极无电流。实际运行中,由于换流变压器阻抗和触发角等因素,两极导线的电流不是完全相等的,会造成接地极有不平衡电流流过,可以通过调节控制两极的触发角,使其小于额定直流电流的1%。当任意一极输电线路或换流阀发生故障退出运行时,仍可以单极大地(海水)回线方式运行,承担输送50%的电能。由此可见,这种方式很大程度上提高了直流输电的可靠性和可用率。目前投入运行的直流输电工程较多采用这种运行方式。

单端中性点接地方式只将某一端换流站的中性点接地，流过接地极的电流为正负两极导线的电流之差。这种方式发生单极故障时，系统就无法运行。中性线方式是将两端换流站中性点通过中性线相连，并且接地。正常运行时，不平衡电流通过中性线流通，减小了接地极电流。任一极发生故障时，以单极金属回线方式运行，输送 50% 的电力。由于采用了三根导线组成输电系统，因此其线路造价较高，结构较复杂，通常是当地中不允许流过直流电流或接地极选址困难时才采用。

3) 背靠背直流输电系统

背靠背直流输电系统^[28]是指没有直流输电线路的两端直流系统，其整流站和逆变站均装设在同一个换流站内。它的主要作用是实现非同步交流系统互联，承担两系统之间的电力交换任务，相当于系统间的联络线。采用背靠背直流输电的主要特点有：换流站设备相应减少，结构简单，造价比常规换流站的造价低 15%~20%；由于没有直流输电线路，直流回路的电阻和电抗均很小，相应的换流站的损耗很小；同时又不需要远程通信传递信号，没有通信延时，因此其控制系统的响应速度快，直流侧的故障率低。正是由于以上优点，近年来背靠背直流输电工程发展很快，已经在投入运行和正常建设的直流输电工程中占 30% 左右。

1.2.1 HVDC 的原理和技术特点

HVDC 是指以直流形式输送电能的方式，通过整流站将交流电能转换为直流电能，再经逆变站将直流电能变换为交流电能，实现电力的输送和系统互联。两端 HVDC 系统的基本拓扑构成如图 1-1 所示，主要包括换流站（整流站/逆变站）、直流输电线、滤波装置、整流装置、换流变压器、控制和保护装置等^[28-30]。

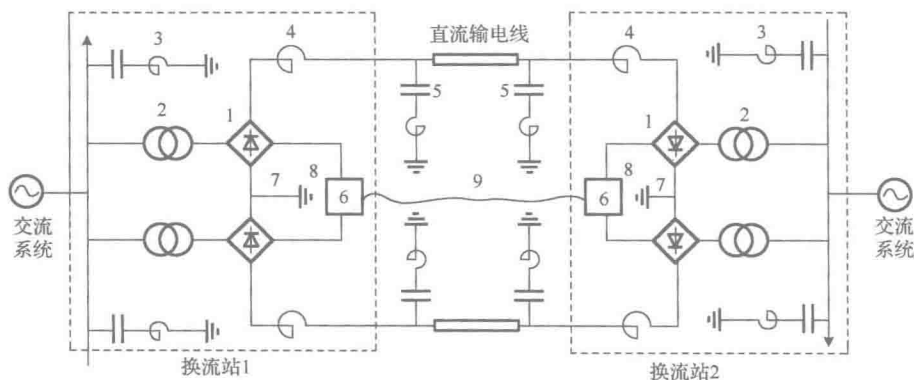


图 1-1 直流输电系统的基本构成

图中，1 为换流器，2 为换流变压器，3 为交流滤波器，4 为平波电抗器，5 为直流滤波器，6 为控制保护系统，7 为接地极引线，8 为接地极，9 为远程通信系统，各个部分的功能如下。

1) 换流器

换流器的功能是实现交流-直流或直流-交流的变换。其中，工作在将交流电转变为直流电的状态时，换流器处于整流状态；工作在将直流电转变为交流电状态时，换流器处于逆变状态。组成换流器的基本器件为各种电力电子器件。早期的换流器采用汞弧阀器件，20世纪70年代以后采用半控型的晶闸管，近年来全控型的门极关断晶闸管和绝缘栅双极型晶体管逐步应用于直流输电系统换流器中。

同时，在直流输电系统中，换流器不仅具有整流和逆变功能，还具有开关功能。在交、直流系统故障以及故障后的恢复过程中，通过对换流器的快速控制，可以有效地保护交、直流输电系统，提高系统运行的稳定性和安全性。

2) 换流变压器

换流变压器可实现交、直流系统之间的电压匹配和电气隔离，并且可以抑制直流故障电流和削弱交流系统入侵直流系统的过电压。换流变压器可以采用三相三绕组式、三相双绕组式、单相双绕组式和单相三绕组式四种结构。对于中小型直流输电工程，宜优先考虑采用三相三绕组式换流变压器，这是因为这种结构的变压器是接线布置最简单、材料用量最省、占地空间最小、空载损耗最小的。对于大型直流输电工程，在运输条件允许时，宜采用单相三绕组式换流变压器。由于换流变压器与产生大量谐波的非线性设备——换流器相连，所以换流变压器与普通电力变压器的设计、制造和运行均有所不同，主要表现在：短路阻抗大、绝缘要求高、噪声大、损耗高、有载调压范围宽、直流偏磁严重等方面。

3) 平波电抗器

平波电抗器安装于直流输电线路出口，与直流滤波器一起共同构成换流站直流谐波滤波电路，从而减少直流电流纹波。同时，它还可以防止线路冲击波进入换流器，防止轻载时直流电流断续，减少逆变器换相失败的概率等。平波电抗器有干式和油浸式两种形式，其电感通常为0.27~1.5H（针对直流架空线路）或12~200mH（针对直流电缆线路）。

4) 无功补偿装置

由电力电子器件构成的换流器运行伴随着无功功率的消耗。一般来说，基于晶闸管的整流器和逆变器吸收的无功功率分别为所传输的直流功率的30%~50%和40%~60%。如此巨大的无功功率如果全部由交流电网提供，势必会造成交流输电线路电压大幅度增加和交流母线电压大幅度降低，最终影响换流站设备的正常运行。因此，换流站设备所需的无功功率采取就地平衡的无功补偿原则。目前，已有换流站的无功补偿装置主要有以下三大类。

(1) 机械投切的电容器和电抗器。

(2) 静止无功补偿装置(Static Var Compensator, SVC)。当机械投切的电容器或电抗器无功补偿容量不足或受端电网系统较薄弱时，此时可以考虑安装SVC。

(3) 调相机。当受端系统的容量相对于直流输电系统而言太弱时,即短路比(Short Circuit Ratio, SCR)小于或等于3时,逆变器很容易受交流系统扰动的影响而发生换相失败故障,此时宜装设调相机进行无功补偿。

5) 交流和直流滤波器

各种换流器在运行时会产生一系列谐波,为了满足系统对于电能质量的要求,需要在两侧分别装设交流滤波器和直流滤波器,用来抑制换流引起的谐波电流。交流滤波器与直流滤波器有很多相似之处,但也存在一些重要差别,表现在以下几个方面。

(1) 交流滤波器还要承担向换流站提供无功功率的作用,因此设计时通常将其无功功率容量设计成大于滤波特性所要求的无功功率容量,而直流滤波器则无此设计要求。

(2) 由于交直流电路的特性不同,交流滤波器高压电容器上的电压可以认为是均匀分布在各个串联的电容器上。对于直流滤波器高压电容器而言,由于直流泄漏电阻的存在,直流电压将不再是均匀分布。因此,直流滤波器的电容器单元内部装设并联均压电阻。

(3) 与交流滤波器相连的交流系统存在线路投切、故障等运行状态,因此其等值阻抗变化范围较大。为了防止交流滤波器与系统发生并联谐振,交流滤波器通常采用高通的双调谐滤波器。换流器直流侧的阻抗一般来说都是恒定不变的,因此直流滤波器一般不带有高通性。

6) 控制保护系统

直流输电可以方便、灵活、快速、准确地对输送的有功功率的大小和方向进行控制,以满足交直流混合系统的稳定运行要求。也就是说,直流输电系统的性能,极大地依赖于它的控制保护系统。高压直流输电的控制保护系统,主要完成以下功能。

(1) 直流输电系统的正常起停控制。

(2) 直流输送功率的大小和方向的控制。

(3) 抑制换流器不正常运行及对所连交流系统的干扰。

(4) 对直流输电的各种运行参数,如电流、电压以及控制系统本身的信息进行监视。

(5) 系统发生故障时,保护设备。

7) 接地极和接地极引线

直流输电系统往往利用大地(海水)作为廉价或低损耗回路,因此换流站还需要加装接地极和接地极引线。直流接地极引线是将直流电流引入大地的线路。接地极的作用是钳制中性点电位和为直流电流提供返回通路。换流站的接地极不同于通常的安全接地,设计时需要考虑强大的直流电流长时间流过接地极所产生的电磁效应、热力效应和电化效应。

综上所述,由于HVDC输电没有功角稳定等问题,且具有直流功率调节快捷、运行可靠性强等特点,所以在世界范围内获得了广泛的应用。但是,尽管HVDC在技术

上有诸多优点,然而同交流系统相比,其自身也存在一些缺点,这些缺点在一定程度上限制了其进一步的发展:

- (1) 换流站设备多、结构复杂、一次造价费用较高;
- (2) 换流站正常运行时需消耗大量的无功功率,一般占其输送功率的一半左右;
- (3) 整流器和逆变器在正常运行时会产生谐波,需额外装设滤波装置;
- (4) HVDC 换流站的正常运行控制复杂等。

随着能源紧缺和环境污染日益严峻,以高度分散为特点的可再生能源联网使得灵活、经济、环保的 HVDC 输电线路越来越多的馈入已有的交流系统中,使得交直流系统间的交互作用变得复杂,从而不可避免的出现一系列亟待深入开展的技术问题,诸如实用的潮流计算、换流站交流母线的电压稳定性等。

1.2.2 HVDC 的发展

HVDC 输电的发展从换流器演变的角度来看,可以分为:汞弧阀换流时期、晶闸管阀换流时期、全控型器件换流时期。在 HVDC 输电的发展历程中,其输电类型主要有以下几种:

- (1) 两端直流输电,主要用于长距离大容量输电;
- (2) 多端直流输电,其灵活性较强;
- (3) 背靠背直流输电,主要用于异步联网、非同步联网;
- (4) VSC-HVDC 输电,换流站基于全控型器件(GTO、IGBT 等)组成。

要采用直流输电,必须要解决换流问题。因此,直流输电的发展与换流技术的发展密不可分。从换流器发展的角度来看,直流输电的发展可以分为以下几个阶段^[28]。

1. 汞弧阀换流时期

汞弧阀是通过汞蒸气的电离而实现单向通电的。最早于 1901 年发明的汞弧整流管只能用于整流,而不能进行逆变。1928 年,具有栅极控制功能的汞弧阀研制成功,它不但可用于整流,同时还解决了逆变问题。1939 年,瑞典通用电机(ASEA)公司的 Lamm U 博士发明了具有单相阀结构的分级电极系统,同早期的汞弧阀相比,它为更大峰值反向电压奠定了基础,从而使大功率直流输电成为可能^[33]。以下为以汞弧阀为基础的高压直流输电工程。

1) 瑞典—果特兰岛线路(1954 年)

1954 年,ASEA 公司在瑞典本土与果特兰岛之间建成一条长约 96km 的海底直流输电电缆,传输容量为 20MW,电压等级为 100kV,此线路是世界上第一条工业化直流输电线路。

2) 英吉利海峡工程(1961 年)

长约 64km 的海底直流输电电缆是用来互联英国和法国的,传输容量为 160MW,电压等级为 $\pm 100\text{kV}$ 。

3) 伏尔加格勒—顿巴斯工程 (1962—1965 年)

输电距离为 470km, 传输容量为 720MW, 电压等级为 $\pm 400\text{kV}$, 线路额定电流为 900A, 这是第一条直流架空输电线路, 并可用来增强原有交流系统的稳定性。

4) 康梯—斯堪系统 (1965 年)

这是瑞典与丹麦之间的互联工程, 部分为架空线 (95km)、部分为海底电缆 (85km) 的 250MW/250kV 直流输电线路。

5) 新西兰系统 (1965 年)

部分为海底电缆 (39km)、部分为架空线 (570km) 的 600MW、 $\pm 250\text{kV}$ 直流输电线路, 用来将南岛的剩余水电输送到北岛。

6) 佐久间互联 (1965 年)

用于日本 50Hz 交流系统与 60Hz 交流系统之间的互联, 交换功率为 300MW, 电压等级为 $\pm 125\text{kV}$ 。

7) 撒丁岛—意大利工程 (1967 年)

由于线路经过撒丁岛、海、科西嘉、海和意大利本土, 该输电线路交替采用架空线路与海底电缆, 其中架空线路 292km、海底电缆 121km, 传输功率为 200MW, 电压等级为 200kV。

8) 太平洋联络线工程 (1970 年)

与以上几个直流输电工程有所不同, 太平洋直流联络线与两条 500kV 交流线路并联运行, 增加了原有交流系统的阻尼, 可以抑制其低频振荡。该工程线路总长 1362km, 北起俄勒冈州的塞里罗, 南至加利福尼亚州的希尔玛, 采用双极 $\pm 400\text{kV}$ 方式, 传输功率为 1440MW。太平洋联络线工程作为世界上第一个超高压交直流并联输电系统, 它的研究成果以及在建设运行过程中取得的经验, 具有重要的实用价值。

9) 金斯诺思系统 (1974 年)

线路连接英国的金斯诺思—贝丁顿—威尔士顿, 传输功率为 640MW, 电压等级为 $\pm 266\text{kV}$, 该三端直流系统主要作用是为了在不增加短路容量的情况下, 增加原有交流系统的稳定性。

10) 加拿大尼尔逊河—双极 I 期工程 (1973—1977 年)

该工程负责将大量水电输送到负荷中心 Winnipeg, 输电距离为 895km, 额定容量为 1620MW, 扩建后最终容量为 6500MW, 采用了最大的汞弧阀 (1500kV, 800A), 同时也是最后一个采用汞弧阀换流的直流工程。

由于汞弧阀在运行过程中会发生逆弧、熄弧等故障; 并且阳极和阴极对温度要求不同, 使得温度控制较复杂; 同时需要安装真空装置和特殊的阀厅等辅助设施, 从而导致其价格昂贵、运行维护不便、可靠性较低, 使得直流输电的发展一度受到限制。