



国家电网公司
电力科技著作出版项目

柔性直流输电系统 调试技术

ROUXING ZHILIU SHUDIAN XITONG
TIAOSHI JISHU

国网福建省电力有限公司电力科学研究院 组编



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

柔性直流输电系统 调试技术

ROUXING ZHILIU SHUDIAN XITONG
TIAOSHI JISHU

国网福建省电力有限公司电力科学研究院 组编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书介绍了柔性直流输电技术的基本原理,结合厦门±320kV 柔性直流输电科技示范工程实例,讲述了各种主流的电力系统仿真技术,并对实际工程中柔性直流控制保护系统的构成进行了介绍,重点阐述了柔性直流工程现场的单体调试、分系统调试及带电系统调试等各阶段的调试内容及调试方法。

本书共分为8章,包括柔性直流输电技术概述、柔性直流控制原理、柔性直流输电仿真技术、柔性直流输电控制保护系统的构成、柔性直流输电现场单体调试、柔性直流输电现场分系统调试、柔性直流输电系统调试、柔性直流输电端对端系统调试。

本书可供从事柔性直流输电工程调试、运行、检修、设计、培训等相关工作的专业技术人员使用,也可作为高等院校、科研单位及相关制造厂商的学习与参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

柔性直流输电系统调试技术/国网福建省电力有限公司电力科学研究院组编. —北京:中国电力出版社,2017.12

ISBN 978-7-5198-1326-0

I. ①柔… II. ①国… III. ①直流输电-电力系统-调试方法 IV. ①TM721.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第265394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:崔素媛 安 鸿

责任校对:朱丽芳

装帧设计:张俊霞 张 娟

责任印制:杨晓东

印 刷:北京瑞禾彩色印刷有限公司

版 次:2017年12月第一版

印 次:2017年12月北京第一次印刷

开 本:787毫米×1092毫米 16开本

印 张:24.75

字 数:607千字

定 价:128.00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

编委会

主 编 蔡振才

副主编 张孔林 唐志军

参 编 林国栋 石吉银 晁武杰 邹焕雄

胡文旺 郭健生 翟博龙 黄青辉

李 超 冯学敏 李兆祥 陈文兴

王云茂 邓超平 谢立明 林少真

施 晟 陈锦山 林金东 林文彬

余斯航

前 言

柔性直流输电是以电压源换流器为核心的新一代直流输电技术，采用最先进的电压源型换流器（voltage source converter, VSC）和绝缘栅双极型晶体管（insulated gate bipolar transistor, IGBT），是输电技术的一次升级。柔性直流输电系统可以快速地有功功率和无功功率两个目标进行独立调节，具有可控性较好、运行方式灵活、适用场合多等显著优势。近年来，采用模块化多电平换流器（modular multilevel converter, MMC）的柔性直流输电技术在国内外发展迅速。2010年，世界上第一个基于模块化多电平换流器的柔性直流输电工程（Trans Bay Cable 工程）在美国旧金山市投入运行，实现了 MMC 柔性直流输电技术从理论到工程运用的突破。之后，国内外投运的 MMC 柔性直流输电工程越来越多，电压等级、输电容量也不断提高。2015年底，厦门 $\pm 320\text{kV}$ 柔性直流输电科技示范工程正式投运，是世界上首次采用真双极拓扑结构的柔性直流输电工程，输电电压达到了 $\pm 320\text{kV}$ ，输送容量达到了1000MW。随着柔性直流输电工程的不断投运，调试和运维技术力量不足的矛盾日益凸显，迫切需要详细介绍柔性直流输电控制保护系统调试等相关内容的书籍，使工程能够高质量投运并安全稳定运行。

柔性直流输电工程的投运需要经过三个阶段的调试，即系统仿真联调、现场不带电调试和带电系统调试。系统仿真联调需要搭建仿真建模平台，可以是离线的仿真，也可以是在线实时仿真；离线的仿真可对相关的控制策略进行仿真模拟，而控制保护设备的系统联调则需要借助实时仿真系统，对极控制系统、阀控制系统、电子式互感器等各设备的接口以及控制逻辑进行全面的仿真模拟与调试。系统仿真联调可有效验证控制保护系统的控制策略和控制性能，避免工程现场投运过程中因控制策略不当而造成设备损坏，是整个调试过程中非常重要的环节。现场不带电调试阶段主要包含设备单体调试和分系统调试，对设备的性能、二次回路和整组配合等方面进行全面调试，排除设计和安装的错误，是设备送电前的最后一道关口，其调试质量的高低直接关系工程能否顺利投运。带电调试阶段则分为单站系统调试和端对端系统调试，主要考核组成该柔性直流输电工程的全部设备、各分系统以及整个直流输电系统的性能；通过带电系统调试，协调和优化设备之间、各分系统之间的配合，以提高系统的整体综合运行性能，是工程投运前重要的调试阶段。

本书以厦门 $\pm 320\text{kV}$ 柔性直流输电科技示范工程的仿真与调试过程为基础，参考现行的直流输电技术相关标准，重点对调试的三个阶段（系统仿真联调、现场不带电调试和带电系统调试）进行详细而深入的探讨。首先对柔性直流输电的调试技术进行了简要概述，并对柔性直流控制原理进行了介绍；以此为基础对主流的柔性直流输电仿真技术进行了详细的介绍，并给出了实际仿真案例；接着介绍了实际工程中控制保护系统的构成，详细阐述了现场不带电调试阶段（单体调试和分系统调试）的目的、内容和方法；最后，对带电调试阶段（站系统调试、端对端系统调试）的试验项目和试验方法进行详细阐述，给出了实际工

程调试的试验波形及具体试验结果和分析。希望本书总结的柔性直流仿真以及调试经验和试验结果能对我国后续的柔性直流输电工程顺利实施提供有益借鉴和参考，并为推动我国柔性直流输电技术的发展和实际工程广泛应用发挥积极作用。

本书由国网福建省电力有限公司电力科学研究院组织编写。本书的第1章由蔡振才、翟博龙、晁武杰、林金东编写，第2章由蔡振才、石吉银、王云茂、林少真、林文彬编写，第3章由唐志军、晁武杰、邓超平、石吉银、冯学敏编写，第4章由张孔林、邹焕雄、李兆祥、陈锦山编写，第5章由张孔林、郭健生、胡文旺、冯学敏、黄青辉编写，第6章由晁武杰、郭健生、胡文旺、李超、余斯航编写，第7章由唐志军、陈文兴、石吉银、林国栋、谢立明、邹焕雄编写，第8章由石吉银、唐志军、林国栋、施晟编写。全书由唐志军、林国栋统稿。蔡振才、张孔林、唐志军、林国栋、石吉银、晁武杰、陈文兴、王云茂、邓超平、谢立明对全书进行了审核并负责全书的评审工作。

在本书编写过程中，国网福建省电力有限公司领导高度重视并给予了大力支持；同时本书得到了全球能源互联网研究院、国网北京经济技术研究院、南京南瑞继保电气有限公司、中电普瑞电力工程有限公司等单位的大力支持与帮助，在此谨向以上单位表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请广大读者批评指正。

编者

2017年9月

目 录

前言

第 1 章	柔性直流输电技术概述	1
1.1	柔性直流输电发展概况	1
1.2	柔性直流输电主要特点	3
1.3	控制保护系统调试特点	4
1.4	柔性直流输电调试技术	5
第 2 章	柔性直流控制原理	7
2.1	模块化多电平换流器的运行原理	7
2.2	基于 $d-q$ 轴的解耦控制策略	9
2.3	模块化多电平换流器的调制策略	13
2.4	基于最近电平控制 (NLC) 的触发控制	15
2.5	换流站控制对象策略	15
2.6	运行控制策略	16
2.7	直流系统及换流站充电策略	18
2.8	换流变压器分接头控制策略	18
第 3 章	柔性直流输电仿真技术	20
3.1	MATLAB 仿真	20
3.2	PSCAD 仿真	35
3.3	RTDS 仿真	42
第 4 章	控制保护系统的构成	66
4.1	控制保护系统分层架构	66
4.2	控制保护系统主要设备及功能	67
4.3	控制保护系统的通信网络	71
4.4	控制保护系统设备接口及通信协议	77
4.5	运行人员控制系统介绍	84
第 5 章	现场单设备调试	90
5.1	换流变压器保护调试	90
5.2	直流场保护调试	119
5.3	柔性直流工程控制系统调试	169
5.4	直流电子式互感器调试	178

5.5	阀子模块及阀塔调试	198
第 6 章	现场分系统调试	204
6.1	换流变压器分系统调试	204
6.2	直流场保护分系统调试	216
6.3	极控分系统调试	221
6.4	阀控分系统调试	227
6.5	阀冷系统调试	255
第 7 章	站系统调试	271
7.1	换流变压器充电试验	271
7.2	换流阀充电触发试验	274
7.3	空载升压 (OLT) 试验	279
7.4	单极 STATCOM 运行试验	285
7.5	交流电压控制试验	287
7.6	分接头控制试验	291
7.7	双极 STATCOM 试验	293
第 8 章	端对端系统调试	303
8.1	初始运行试验	303
8.2	保护跳闸试验	324
8.3	系统监视与切换试验	334
8.4	单极控制模式试验	339
8.5	动态性能试验	346
8.6	双极启停试验	350
8.7	双极控制模式试验	360
8.8	大功率试验	377
	参考文献	386

柔性直流输电技术概述

如今构建全球能源互联网已成为国际共识，亟须创新先进输电方法以发展远距离、大容量输电，提升输电效率和资源利用水平，提高电网的安全性、灵活性和可控性。柔性直流输电具有独立、精确、灵活方便的有功/无功功率控制方式，潮流翻转直流电压极性不变，电网故障后快速恢复控制能力等优势，在孤岛供电、城市配电网的增容改造、交流系统互联、大规模风电场并网等领域具有广泛的应用前景。柔性直流输电可使当前交直流输电技术面临的诸多问题迎刃而解，为输电方式变革和构建全球能源互联网提供了崭新的解决方案。柔性直流输电技术的研究和产业化对推动我国电力装备向技术高端化、能源节约化、设备智能化发展有着重要的意义。但由于国内柔性直流输电研究处于起步阶段，现有已投运的柔性直流输电工程投运时间较短、缺少长期运行经验，目前国内柔性直流输电在研发设计、控制保护、调试方法、运行方式和维护检修等领域均处于摸索阶段，亟须展开进一步的研究。

1.1 柔性直流输电发展概况

柔性直流输电技术是一种以电压源换流器（voltage source converter, VSC）、可关断器件 [如绝缘栅双极型晶体管（insulated gate bipolar transistor, IGBT）] 和相关调制技术（如脉宽调制技术 PWM、最近电平比较控制 NLC 等）为基础的新型直流输电技术。国际大电网会议组织（CIGRE）和美国电气与电子工程师学会（IEEE）将此项输电技术命名为“Voltage Source Converter based High Voltage Direct Current, VSC-HVDC”；国内学术界将此项基于 VSC 技术的第三代直流输电技术命名为“柔性直流输电”。制造厂商 ABB 公司与西门子公司分别将该项输电技术命名为“HVDC Light”和“HVDC Plus”。

20 世纪 90 年代，由于以全控型器件为基础的柔性直流输电技术具有电流自关断能力、可向无源网络供电等优势而开始受到人们的重视并展开相关研究。1997 年，世界上首个采用 IGBT 模块的柔性直流输电工业性试验工程——瑞典赫尔斯杨工程正式投入运行。1999 年，世界上第一个商业性运行的柔性直流输电工程在瑞典的哥特兰岛投运，该工程输送容量为 80MW，直流电压为 $\pm 80\text{kV}$ ，将南斯风电场的电能送到哥特兰岛西岸的维斯比市。随着全控型电力电子器件额定电压和额定电流的提高，柔性直流输电工程的电压等级和输电容量不断提升，其最大输电容量由最初的 3MW 发展到了 1000MW，直流电压由 10kV 提升到 500kV 以上。



我国在柔性直流输电技术领域属于“后起之秀”。为打破国外技术垄断，2006年5月，国家电网公司确定了《柔性直流输电系统关键技术研究框架》；2008年，国家电网公司正式启动“柔性直流输电关键技术研究及示范工程”重点科技项目；2009年，国家电网公司又将柔性直流输电技术列入坚强智能电网研究体系，使之成为建设坚强智能电网的关键攻关技术之一。2010年4月底，我国完成首个模块化多电平结构柔性直流输电低压样机试验；2011年3月2日，上海南汇柔性直流输电示范工程站系统调试顺利完成并投入试运行，标志着我国具有自主知识产权的柔性直流输电核心技术成功应用于实际工程，工程额定电压30kV、额定电流300A、输送功率18MW、直流电缆长8.6km。2011年3月21日，由中国南方电网有限责任公司（简称南方电网公司）与荣信电力电子股份有限公司共同承建的两电平柔性直流输电系统在中海石油（中国）有限公司文昌油田群投运成功，工程利用原有的海底交流电缆将35kV的交流输电改造为 ± 10 kV的直流输电，实现了海航石油平台的供电。南方电网公司2013年建设投产的南澳三端柔性直流输电工程（ ± 160 kV、200MW），是世界第一个建成的三端柔性直流输电系统。国家电网公司2014年在浙江舟山建设投产多端柔性直流输电示范工程，此工程是世界上第一个五端柔性直流输电工程，分别在定海、岱山、衢山、洋山、泗礁建设一座换流站，容量分别为400MW、300MW、100MW、100MW、100MW；电压等级为 ± 200 kV；直流电缆输电线路长度为141km。2015年建设投产厦门两端真双极柔性直流输电工程，电压等级为 ± 320 kV，容量达1000MW，该工程是截至2015年底世界上电压等级最高、输送容量最大的柔性直流输电工程。

厦门 ± 320 kV柔性直流输电科技示范工程于2013年12月完成项目核准，2014年7月21日开工建设。工程额定电压 ± 320 kV，额定电流1600A，输送容量1000MW，工程新建浦园换流站（送端）、鹭岛换流站（受端）及 ± 320 kV浦园—鹭岛柔性直流输电线路一回，直流线路总长10.7km，全部为陆缆，采用 1800mm^2 大截面绝缘直流电缆敷设，通过厦门翔安海底隧道与两座换流站连接。

2012年，厦门市最大负荷3506MW，其中厦门岛内最大负荷1561MW。预计2020年厦门市最大负荷将达到6490MW，其中厦门岛内最大负荷为2210MW。厦门电网是福建省沿海主要负荷中心，随着招商引资力度的加大，厦门岛内用电负荷将保持较快的增长速度，同时地区易受台风等自然灾害影响，为满足地区经济持续快速增长的用电需求，对电网供电能力和供电可靠性提出了更高的要求。

厦门岛电网结构示意图如图1-1所示。厦门 ± 320 kV柔性直流输电科技示范工程投运以前，厦门岛主要依靠英春—围里、钟山—东渡、嵩屿—厦禾3个进岛通道共6回220kV线路以及新店燃气电厂—湖边1回220kV线路与主网联络。随着厦门负荷的持续增长，2016年7回220kV进岛线路将无法满足不同岛内供电需求。电气计算表明，当第四通道的新店燃气电厂—湖边1回220kV线路发生N-1故障，第一通道的英春—围里I回线路将超过长期允许输送容量。因此，需要建设新的进岛输电线路，提高厦门岛电网的供电能力及供电可靠性。

我国在柔性直流输电技术方面已实现零的突破并进入快速应用阶段，虽然与ABB、西门子等国外公司相比，我国在柔性直流输电工程经验积累方面还有差距，但随着我国科研人员在柔性直流输电基础理论和工程应用等方面的深入研究，我国柔性直流输电技术水平也将得到不断提升。

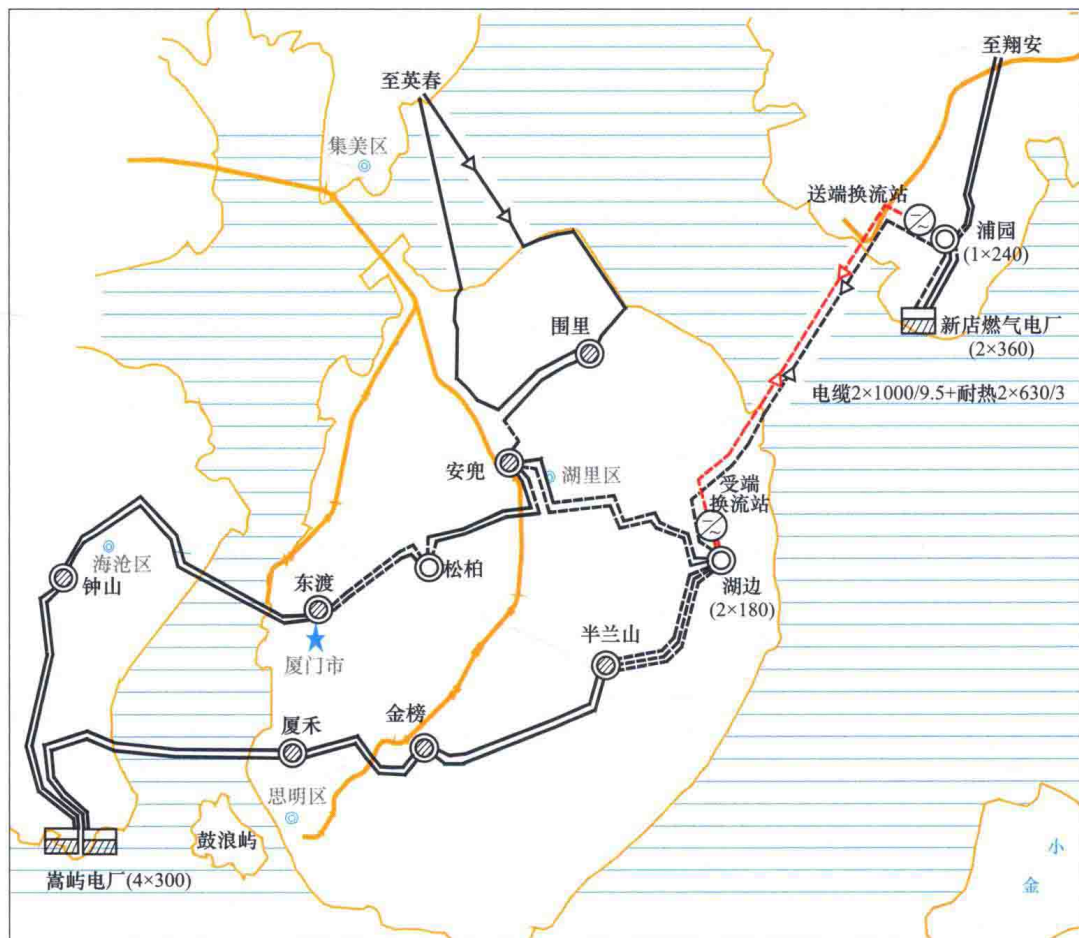


图 1-1 厦门岛电网结构示意图

⊗—换流站；⊙—运维变电站；⊚—变电站；▨—发电厂

1.2 柔性直流输电主要特点

与传统高压直流输电相比，柔性直流输电具有以下特点：

(1) 控制方式更加灵活，可以独立地控制有功功率和无功功率。柔性直流输电灵活的潮流控制能力使其在无功功率方面能够作为静止同步补偿器（static synchronous compensator, STATCOM）使用，可以动态补偿交流系统无功功率，提高交流电压稳定性。当交流系统出现故障时，柔性直流输电系统在输送容量范围内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) 柔性直流输电不存在换相失败的问题。传统直流输电换流器需要在交流电流的作用下完成换相，在受端交流系统故障时容易发生换相失败，导致输送功率中断。而柔性直流输电换流器采用可自关断的全控型器件，可以根据门极的驱动信号实现器件的开通或关断，而无须换相电流的参与，因此不存在换相失败的问题。

(3) 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快速地进行潮流反转，不需要改变直流电压的极性；常规直流输电系统的电流输送



方向不能改变，反送功率时只能反转电压极性，响应时间较长。这一特征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) 柔性直流输电在事故后可快速恢复供电和黑启动。当电网发生故障，受端从有源网络变为无源网络，柔性直流输电换流站可以工作在无源逆变方式，使电网在短时间内实现黑启动，快速恢复控制能力。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。

(5) 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须重新整定，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。

(6) 柔性直流输电系统交直流侧输出电压谐波含量较低。柔性直流输电采用正弦脉宽调制（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。由于开关频率较高，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，通常不需要额外加装滤波器。

(7) 柔性直流输电控制保护系统可以不依赖站间通信工作，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，两侧换流站之间不需要通信联络，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。

(8) 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，无论采用两电平、三电平，还是模块化多电平拓扑结构，可以不安装交流滤波器，或者仅需装设容量很小的交流滤波器，使得柔性直流输电换流站占地面积大幅减少。

(9) 采用模块化设计使柔性直流输电的设计、生产、安装和调试周期缩短。换流站的主要设备能够先期在工厂中组装完毕，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，从而大大缩短了现场安装调试时间，减轻了安装劳动强度，而且布局更加灵活紧凑。

1.3 控制保护系统调试特点

控制保护系统是整个柔性直流输电工程的“大脑”，负责柔性直流输电换流站的运行人员控制、直流控制保护、交流控制保护、站用电控制保护、换流阀控制保护及监视，对于维持系统的正常工作具有重要作用。柔性直流输电系统的控制保护策略直接决定了直流输电系统的运行特性和可靠性。

柔性直流输电控制保护系统框图如图 1-2 所示，其总体分层结构及功能为：上层工作站包括运行人员和调度人员的操作平台等；基本的控制保护平台接受控制命令并下发控制保护信号，实现柔性直流输电系统的控制保护功能；设备参数监控装置（如测量屏柜等）反应并上报系统状态。

与交流智能变电站和传统直流换流站相比，柔性直流输电控制保护系统的调试具有以下

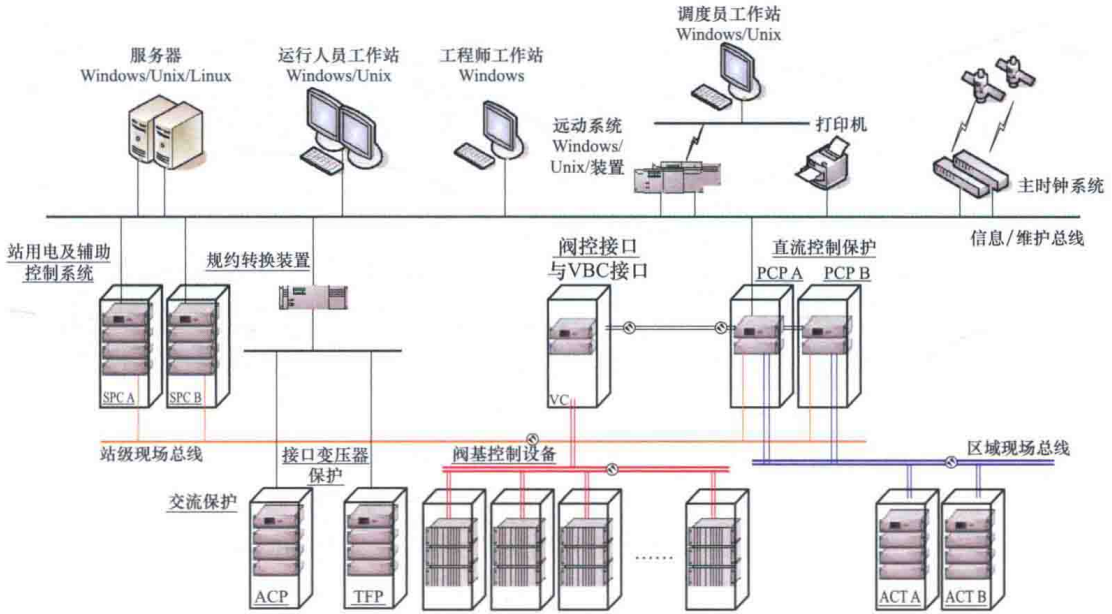


图 1-2 柔性直流输电控制保护系统框图

特点和难点：

- (1) 整个柔性直流输电工程调试重点为控制保护系统调试，难点主要集中在控制策略调试。
- (2) 控制保护设备技术先进，控制、保护原理复杂，调试验证内容多、周期长、难度大。
- (3) 控制保护系统调试工作对厂家依赖性较大，调试工具多为厂家私有工具，目前暂无通用调试工具。
- (4) 二次系统通信协议采用 IEC 61850 标准，录波器等设备采样频率达 5 万 Hz，对设备仪器性能要求较高。
- (5) 控制保护设备暂未实现标准化管理，缺少相应的检验规程等技术规范指导，需要在调试验证过程根据实际情况确定相应的检验内容和程序逻辑，现场装置程序升级较频繁，软件版本不易管理。
- (6) 柔性直流输电工程采用直流电子式互感器，二次侧协议输出暂未实现标准化，缺乏相应的试验验证手段和设备仪器，导致直流电子式互感器性能不易验证。
- (7) 控制保护设备的异常告警信号报文不统一，各厂家对同一类设备的告警信号报文字符表述不统一，给调试人员在理解上造成一定困难。
- (8) 柔性直流输电工程相关技术人员短缺，目前继电保护与自动化等二次专业人员难以承担相应的调试任务。
- (9) 阀控模块与阀之间通过光纤连接，光纤数量巨大，涉及大量的光纤核对工作。

1.4 柔性直流输电调试技术

针对柔性直流输电控制保护系统的特点，涉及的调试内容和技术主要包括：



(1) 柔性直流输电仿真技术。电力系统的特点及其安全性的要求决定了对实际电网的探索与研究很大程度上要依赖于仿真。由于柔性直流输电中电力电子器件的开关动作精度高,为精确地仿真分析器件的开关动作,仿真分析中采用的仿真步长一般在 $100\mu\text{s}$ 以下。因而在柔性直流输电研究中主要使用电磁暂态仿真工具,常用的仿真技术包括 RTDS 仿真、PSCAD/EMTDC 仿真和 MATLAB/SIMULINK 仿真等。

(2) 直流电子式互感器测试技术。直流电子式互感器区别于常规的互感器,具有通信数字化、无二次侧负载、光纤传输等特点,其准确度的校验方法也有所不同。直流电子式互感器校验装置由调压器、升流器/试验变压器、标准电流/电压互感器、电子式互感器校验仪、二次转换器及相关配套设备等组成。测试内容包括幅值误差、角度误差等准确度测试,延时及极性测试等。

(3) 控制保护设备单体调试技术。单体调试主要对单体设备进行功能、采样及开入开出的正确性测试,柔性直流输电控制保护系统涉及的主要单体调试内容包括:直流场保护调试、控制系统调试、直流接口装置调试、交流场保护调试、交流场测控装置调试等。

(4) 分系统调试技术。分系统调试主要是在设备单体调试基础上进行装置间收发性能及互通性的测试。由于涉及不同厂家装置模块且设备间暂未实现标准化管理,需要在调试过程中根据实际情况进行配合和调整。现场分系统涉及的主要调试内容包括:换流变压器分系统调试、直流场保护分系统调试、控制系统分系统调试、阀控分系统调试及阀冷分系统调试等。

(5) 系统调试技术。系统调试主要进行整站功能和性能的测试,包括站系统调试和端对端系统调试。站系统调试主要验证站控的微机监控系统和顺序控制、空载升压控制、正常启停、STATCOM 控制、换流变压器分接头控制、交流定电压以及定无功控制的功能是否正常,试验内容包括换流变压器充电试验、换流阀充电触发试验、直流场启动试验、带线路自动空载加压试验等。端对端系统调试主要验证组成柔性直流输电工程的全部设备、各分系统以及整个直流输电系统的性能,试验内容包括正常启停试验、双极启停试验、大功率试验、大功率反转试验及一极紧急停运试验、远方遥调试验等。

柔性直流控制原理

2.1 模块化多电平换流器的运行原理

模块化多电平电压源换流器的拓扑结构如图 2-1 所示，它由 6 个桥臂组成，每个桥臂由若干个相互连接且结构相同的子模块与一个阀电抗器串联组成。与以往的 VSC 拓扑结构不同，模块化多电平换流器在直流侧没有储能电容，仅仅通过变化所使用的子模块的数量，就可以灵活改变换流器的输出电压及功率等级，另外，该换流器具有正、负直流母线，适用于高压直流输电场合。

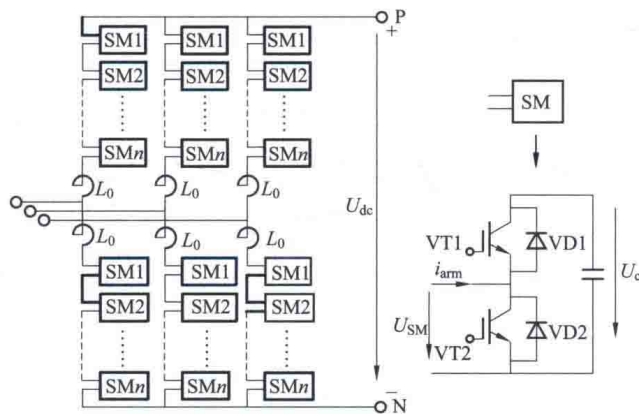


图 2-1 模块化多电平换流器的拓扑结构

如图 2-1 所示，每个子模块由一个 IGBT 的半桥和一个直流储能电容器组成。每个子模块都是一个两端器件，它可以同时在两种电流方向的情况下进行全模块电压 ($VT1 = ON$, $VT2 = OFF$) 和零模块电压 ($VT1 = OFF$, $VT2 = ON$) 之间的切换。

其中，每个子模块有三种工作状态，如图 2-2 所示。

(1) 两个 IGBT 模块都是关断状态。

这种状态可以视为两电平换流器的一相桥臂两个开关器件关断。当模块化多电平换流器在某些故障状态，比如较严重的直流侧短路故障时，两个 IGBT 的触发脉冲会闭锁，两个 IGBT 进入关断状态。

当电流流向直流侧电源正极（定义其为电流的正方向），则电流流过于模块的续流二极

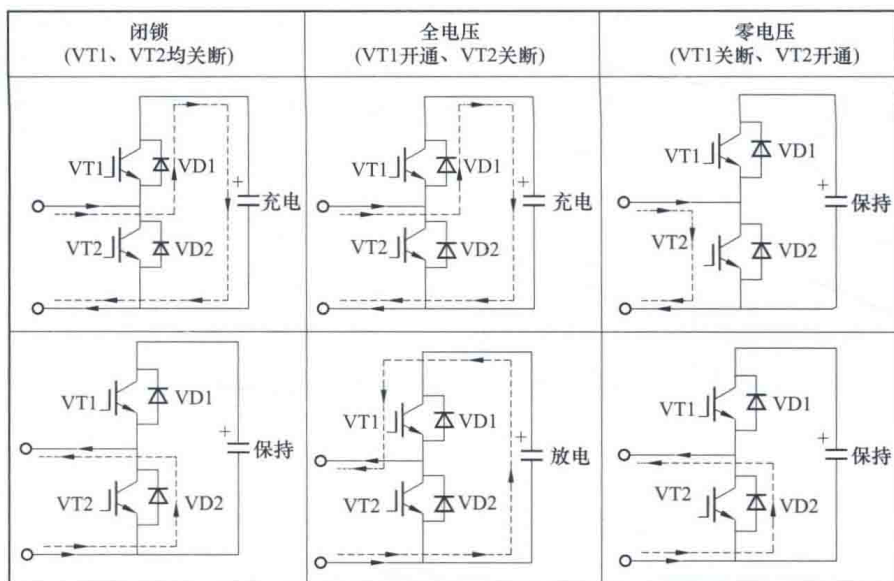


图 2-2 子模块的工作状态

管 VD1 向电容充电；当电流反向流动，则将直接通过续流二极管 VD2 将子模块旁路。在两个 IGBT 均关断时，只有子模块电容被充电而没有放电的可能。在交流开关合上对换流阀充电的过程中，所有子模块将进入此工作状态。

(2) VT1 导通，VT2 关断。

这种状态是 MMC 电路的正常工作状态。在这种状态下，电流仍能双向流动。当电流正向流动时，电流将通过续流二极管 VD1 流入电容，对电容充电；当电流反向流动时，电流将通过 VT1 为电容放电。此时的工作状态具有如下特点：电流可以双向流动；不管电流处于何种流通方向，子模块的输出端电压都表现为电容电压；子模块电容可以充放电，取决于电流的方向，可以利用这一特点对各子模块电容电压进行充放电控制，使子模块电压尽量均衡。

(3) VT1 关断，VT2 导通。

在这种状态下，电流仍能双向流动。在这种状态下，当电流正向流通时，电流将通过 VT2 将子模块的电容电压旁路；当电路反向流通时，将通过续流二极管 VD2 将电容旁路。此时的工作状态具有如下特点：电流可以双向流动；不管电流处于何种流通方向，子模块的电容电压不会受到影响；子模块输出端引出的仅是开关器件的通态压降，约为零电压。

从直流侧来看，模块化多电平换流器的三相桥臂单元是并联在直流侧的，实际中每相桥臂的电压值并不完全相等，因此在各桥臂之间便会产生一定量的环流，此环流的存在会对开关器件产生一定的电流应力并影响换流系统性能。为了削弱此环流的不利影响，在各相桥臂上均串联了阀电抗器。另外，还可以通过附加控制进一步抑制桥臂间的环流。

当子模块投入时相当于在直流回路中串入一个等值电压源，退出时串入幅值为 0 的电压源，因此整个换流器可以看作一个可控电压源，控制子模块投入的数量与时间就可以得到交流侧所期望的多电平电压输出。当子模块数量很多时，就可以非常逼近所期望的电压波形。

由于采用了 IGBT 等全控型器件，柔性直流换流器可以同时具备有功类和无功类两个控制目标。电压源换流器等效示意图如图 2-3 所示，电压源换流器的工作原理分析如下。



假设换相电抗器是无损耗的，在忽略谐波分量时，换流器和交流电网之间传输的有功功率 P 及无功功率 Q 分别为

$$P = \frac{U_s U_c}{X_L} \sin \delta \quad (2-1)$$

$$Q = \frac{U_s (U_s - U_c \cos \delta)}{X_L} \quad (2-2)$$

式中 U_c ——换流器输出电压的基波分量；

U_s ——交流母线电压基波分量；

δ —— \dot{U}_s 和 \dot{U}_c 之间的相角差 ($\angle \dot{U}_s - \angle \dot{U}_c$)；

X_L ——交流母线与换流器之间的等效电抗。

由式 (2-1) 和式 (2-2) 可知，在交流系统电压不变的情况下，有功功率主要取决于

δ ，无功功率主要取决于 U_c 。因此，通过控制 δ

就可以控制直流电流方向及输送有功功率的大小，当交流母线电压超前于换流器逆变电压时，

有功功率从系统流入换流器；通过控制 U_c 就可以控制换流器发出或者吸收无功功率。从系统角度来看，换流器可以看成是一个无转动惯量的电动机或发电机，可以无延时地控制有功功率和无功功率，实现四象限运行，换流器稳态运行时的 PQ 相量图如图 2-4 所示。

有功功率从系统流入换流器；通过控制 U_c 就可以控制换流器发出或者吸收无功功率。从系统角度来看，换流器可以看成是一个无转动惯量的电动机或发电机，可以无延时地控制有功功率和无功功率，实现四象限运行，换流器稳态运行时的 PQ 相量图如图 2-4 所示。

有功功率从系统流入换流器；通过控制 U_c 就可以控制换流器发出或者吸收无功功率。从系统角度来看，换流器可以看成是一个无转动惯量的电动机或发电机，可以无延时地控制有功功率和无功功率，实现四象限运行，换流器稳态运行时的 PQ 相量图如图 2-4 所示。

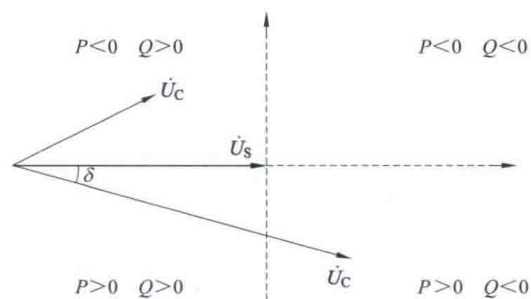


图 2-4 换流器稳态运行时的 PQ 相量图

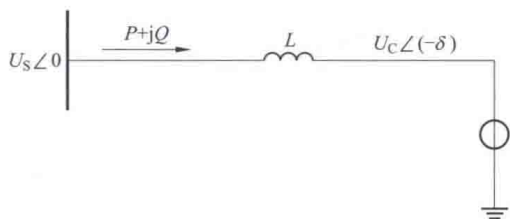


图 2-3 电压源换流器等效示意图

2.2 基于 d - q 轴的解耦控制策略

d - q 解耦控制即直接电流控制，是目前大功率换流器，包括柔性直流输电系统广泛采用的控制方式。此种控制方式分为内环电流控制和外环电压控制两部分。内环电流控制器用于实现换流器交流侧电流的直接控制，以快速跟踪参考电流。外环电压控制器则根据柔性直流系统级控制目标实现定直流电压控制、定有功功率控制、定频率控制、定无功功率控制和定交流电压控制等控制目标。

2.2.1 MMC 数学模型

MMC 电流分布如图 2-5 所示，换流阀交流侧电流 i_a 流入上下桥臂后，由电路的对称性可知，上下桥臂交流分量各为 $1/2$ ，因此交流电流分量在上下桥臂电抗器 $2L$ 上产生的电压降相等；直流电流 I_d 在各桥臂的分量为 $1/3$ ，由于电抗器的电阻很小，直流分量在桥臂电抗器上产生的电压降近似为 0。因此， ap 点的电位与 an 点的电位相等。这样，可以将上下桥臂电抗并列处理，得到如图 2-6 所示的 MMC 等效电路，桥臂电感值为 L 。