

# 文本复制检测报告单(全文标明引文)

№:ADBD2021R\_2021072315351220210723154739311183041258

检测时间:2021-07-23 15:47:39

检测文献: 018

作者: Supervisor;Enterprise

检测范围: 中国学术期刊网络出版总库

中国博士学位论文全文数据库/中国优秀硕士学位论文全文数据库

中国重要会议论文全文数据库

中国重要报纸全文数据库

中国专利全文数据库

图书资源

优先出版文献库

学术论文联合比对库

互联网资源(包含贴吧等论坛资源)

英文数据库(涵盖期刊、博硕、会议的英文数据以及德国Springer、英国Taylor&Francis 期刊数据库等)

港澳台学术文献库

互联网文档资源

源代码库

CNKI大成编客-原创作品库

个人比对库

时间范围: 1900-01-01至2021-07-23

可能已提前检测, 检测时间: 2021/4/28 9:40:17, 检测结果: 6.3%

## 检测结果

去除本人文献复制比: 4.6%

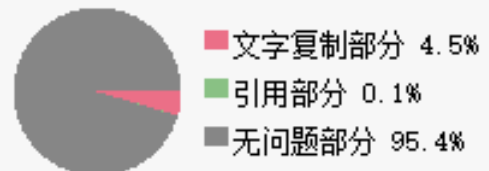
跨语言检测结果: 0%

去除引用文献复制比: 4.5%

总文字复制比: 4.6%

单篇最大文字复制比: 2.1% (LCC-MMC的多端混合直流输电系统协调控制策略研究)

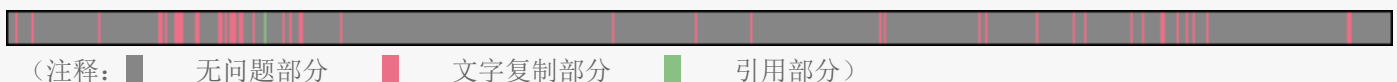
重复字数: [2196] 总段落数: [5]  
总字数: [47940] 疑似段落数: [5]  
单篇最大重复字数: [984] 前部重合字数: [1193]  
疑似段落最大重合字数: [1354] 后部重合字数: [1003]  
疑似段落最小重合字数: [37]



指 标: ☐ 疑似剽窃观点 ☒ 疑似剽窃文字表述 ☐ 疑似整体剽窃 ☐ 过度引用

表 格: 0 公 式: 没有公式 疑似文字的图片: 0 脚注与尾注: 0

12.7% (1354)	12.7% (1354)	018_第1部分 (总10620字)
0.4% (37)	0.4% (37)	018_第2部分 (总9643字)
1.8% (170)	1.8% (170)	018_第3部分 (总9628字)
3.1% (294)	3.1% (294)	018_第4部分 (总9466字)
4% (341)	4% (341)	018_第5部分 (总8583字)



## 1. 018\_第1部分

总字数: 10620

### 相似文献列表

去除本人文献复制比: 12.7% (1354) 文字复制比: 12.7% (1354) 疑似剽窃观点: (0)

1	LCC-MMC的多端混合直流输电系统协调控制策略研究 刘子琳(导师: 张明光; 李正远; 齐振宇) - 《兰州理工大学硕士论文》 - 2020-06-10	8.9% (947) 是否引证: 否
2	基于PSCAD的混合直流输电系统的建模与参数优化 俞翔(导师: 黄琦) - 《电子科技大学硕士论文》 - 2019-04-22	1.8% (190) 是否引证: 否

3	201622170121-俞翔-基于PSCAD的混合直流输电系统建模与参数优化 俞翔 - 《学术论文联合比对库》 - 2019-06-04	1.8% (190) 是否引证: 否
4	31_俞翔_基于PSCAD的混合直流输电系统的建模与参数优化 俞翔 - 《学术论文联合比对库》 - 2019-06-02	1.8% (190) 是否引证: 否
5	特高压直流输电线路改进双端行波故障定位方法研究 孙广;王阳;薛枫;李猛克;董金星;梁伟;乐健; - 《电力系统保护与控制》 - 2020-07-16	0.5% (57) 是否引证: 是
6	适用于风电并网的混合多端直流输电系统控制策略研究 张腊(导师: 刘英培) - 《华北电力大学硕士论文》 - 2019-03-01	0.4% (46) 是否引证: 否
7	基于静止同步串联补偿器的VSC-HVDC的控制策略研究 袁祖慧(导师: 张兴) - 《合肥工业大学硕士论文》 - 2008-03-01	0.4% (42) 是否引证: 否
8	基于静止同步串联补偿器的VSC-HVDC的控制策略研究 - 豆丁网 - 《互联网文档资源 ( <a href="http://www.docin.com">http://www.docin.com</a> )》 - 2017	0.4% (42) 是否引证: 否
9	60520081817916013_廖文辉_查重稿 廖文辉 - 《学术论文联合比对库》 - 2018-04-02	0.3% (36) 是否引证: 否
10	习贺勋 论文 习贺勋 - 《学术论文联合比对库》 - 2012-05-21	0.3% (32) 是否引证: 否
11	柔性直流输电系统及其无网侧电动势传感器控制技术研究 邓明(导师: 年晓红) - 《中南大学硕士论文》 - 2010-06-30	0.3% (31) 是否引证: 否
12	含VSC-HVDC的交直流系统潮流计算方法研究 邓长征;蒋冰华;唐波;黄力; - 《陕西电力》 - 2008-12-20	0.3% (29) 是否引证: 否

#### 原文内容

专业硕士学位论文

多端混合直流输电系统故障特性研究

Research on Fault Characteristics of Hybrid  
Multi-terminal HVDC Transmission System

2021 年 8 月

国内图书分类号: TM723 学校代码: 10079

国际图书分类号: 621.3 密级: 公开

专业硕士学位论文多端混合直流输电系统故障特性研究

硕士研究生:

导师:

企业导师:

申请学位: 工程硕士

专业领域: 电气工程培养方式: 非全日制

所在学院: 电气与电子工程学院

答辩日期: 2021 年 8 月

授予学位单位: 华北电力大学

Classified Index: TM723

U.D.C: 621.3

Dissertation for the Professional Master's Degree

Research on Fault Characteristics of Hybrid

Multi-terminal HVDC Transmission System

Candidate:

Supervisor:

Enterprise mentor:

Academic Degree Applied for: Master of Engineering

Speciality: Master of Engineering

Cultivation ways: Part-time

School:

School of Electrical and Electronic

Engineering

Date of Defence: June, 2021

Degree-Confering-Institution: North China Electric Power University

华北电力大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明: 此处所提交的硕士学位论文《多端混合直流输电系统控制策

略研究》, 是本人在导师指导下, 在华北电力大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知, 论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体, 均已在文中

以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名： 日期： 年月日

华北电力大学硕士学位论文使用授权书

《多端混合直流输电系统控制策略研究》系本人在华北电力大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归华北电力大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解华北电力大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅，学校可以为存在馆际合作关系的兄弟高校

用户提供文献传递服务和交换服务。本人授权华北电力大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于（请在以上相应方框内打“√”）：

保密□，在年解密后适用本授权书

不保密□

作者签名： 日期： 年月日 导师签名： 日期： 年月日

摘要

传统直流输电采用的 LCC 换流器具有传输距离远、输电容量大、技术成熟以及造价低等优点，但是由于采用换流元件的是晶闸管，只能控制导通，不能控制关断。将 LCC 用作逆变站时容易发生换相失败故障，不利于受端系统的稳定运行。而采用模块化多电平 MMC 换流器的柔性直流输电技术因其采用 IGBT 作为换流元件所以不存在换相失败的风险，并且易于控制，但是 MMC 换流站器件价格高、电压等级不高、输电容量低以及难以进行远距离输电等缺陷。故本文结

合 LCC 和 MMC 的优势提出一种多端混合直流输电系统，送端采用双极 12 脉动 LCC 换流器，两个受端均采用 MMC 换流器。这种 新型多端混合直流输电系统能解决传统直流输电的换相失败问题，而且不会存在柔性直流输电中电压等级低、

输电容量小的缺陷。本文通过研究多端混合直流输电系统的拓扑结构及工作原理，

建立数学模型，在 PSCAD 上搭建多端混合直流输电系统模型，进行故障仿真实验，从而对直流系统故障特性进行研究。

首先对 LCC 整流站和 MMC 逆变站的换流器结构和工作原理以及 MMC 中子模块工作模式进行分析，根据 LCC 换流器等效电路列写基尔霍夫方程并建立数学模型，列写 MMC 桥臂电压和输出电流的状态方程，进行 dq 变换，得到 MMC

输出电流和功率方程，建立数学模型，并对其调制方式进行分析。

然后在 PSCAD 搭建多端混合直流输电系统模型，模型分三部分，分别是一

个送端 LCC 整流站，采用的是双极 12 脉动整流器；两个受端逆变站，均采用模块化多电平 MMC 作为逆变器，MMC 换流器采取的是子模块级联结构，并对子模块电容电压实时监测排序实现均压控制，同时也配备有高低压阀组。整体控制采取主从控制策略，MMC1 作为主控站，由于其模块化结构易控制电压，所以采用定电压控制，从控站 1 送端 LCC 采用定电流控制，从控站 2 受端 MMC2 采用功率控制。

最后在模型上设置故障控制，并在 PSCAD 上对换流站交流系统故障和 直流线路故障这些直流输电系统的常见故障进行仿真，分析输电系统在不同故障下的波形特性，研究多端混合直流输电系统故障特性。

关键词：LCC；MMC；多端混合直流输电系统；均压控制；高低压阀组；故障特性。

II

Abstract

The LCC converter used in traditional DC transmission has the advantages of long transmission distance, large transmission capacity, mature technology, and low cost. However, because the converter element is a thyristor, it can only control the conduction, not the shutdown. When LCC is used as an inverter station, commutation failures are prone to occur, which is not conducive to the stable operation of the receiving end system. The flexible DC transmission technology using modular multi-level MMC converters does not have the risk of commutation failure due to the use of IGBTs as commutation components, and is easy to control. However, MMC converter stations have high device prices and low voltage levels. , Defects such as low transmission capacity and difficulty in long-distance transmission. Therefore, this paper combines the advantages of LCC and MMC to propose a hybrid multi-terminal direct current transmission system. The sending end uses a bipolar 12-pulse LCC converter, and both receiving ends use MMC converters. This new hybrid multi-terminal DC transmission system can solve the commutation failure problem of traditional DC transmission, and it will not have the defects of low voltage level and small transmission capacity in flexible DC transmission. In this paper, by studying the topological structure and working principle of the hybrid multi-terminal HVDC transmission system, the mathematical model is established, the hybrid multi-terminal HVDC system model is built on PSCAD, and the fault simulation experiment is carried out to study the fault characteristics of the DC system.

First, analyze the converter structure and working principle of the LCC rectifier station and MMC inverter station, and the working mode of the MMC neutron module. According to the equivalent circuit of the LCC converter, write the Kirchhoff equation and establish the mathematical model. The state equations of the MMC

bridge arm voltage and output current are transformed by dq to obtain the MMC output current and power equations, the mathematical model is established, and the modulation mode is analyzed.

Then set up a hybrid multi-terminal DC transmission system model in PSCAD.

The model is divided into three parts: a sending-end LCC rectifier station, which uses a bipolar 12-pulse rectifier; two receiving-end inverter stations, both of which use a modular multi-level MMC As an inverter, the MMC converter adopts a sub-module cascade structure, and realizes voltage equalization control by real-time monitoring and sequencing of the sub-module capacitor voltage, and is also equipped with high and low voltage valve groups. The overall control adopts a master-slave control

III

strategy. MMC1 is used as the master control station. Because its modular structure is easy to control voltage, it adopts constant voltage control. The sending end LCC of slave control station 1 adopts constant current control, and the receiving end MMC2 of slave control station 2 adopts power. control.

Finally, set up the fault control on the model, and simulate the common faults of the DC transmission system such as the AC system fault of the converter station and the DC line fault on PSCAD, analyze the waveform characteristics of the transmission system under different faults, and study the hybrid multi-terminal DC transmission system Failure characteristics.

Key words: LCC, MMC, hybrid multi-terminal direct current transmission system, pressure equalization control, high and low pressure valve group, fault characteristics.

IV

目录  
摘要

..... I	
ABSTRACT.....	
..... II	
第 1 章绪论	
1	
1.1 课题背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	4
1.2.2 柔性直流输电技术研究现状.....	5
1.2.3 混合直流输电技术研究现状.....	7
1.3 本文工作与章节安排	8
第 2 章多端混合直流输电系统拓扑结构与数学模型.....	10
2.1 LCC 整流器拓扑结构与数学模型.....	10
2.1.1 LCC 整流器拓扑结构.....	
2.1.2 LCC 整流器工作原理.....	
2.1.3 LCC 整流器数学模型.....	
2.2 MMC 换流器拓扑结构与数学模型.....	13
2.2.1 MMC 换流器拓扑结构.....	
2.2.2 MMC 换流器工作原理.....	
2.2.3 MMC 数学模型	15
2.2.4 MMC 的调制方式	16
2.3 多端混合直流输电系统拓扑结构.....	17
2.4 小结	

.....	18
第 3 章多端混合直流输电系统 PSCAD 仿真模型搭建.....	19
3.1 多端混合直流输电系统主电路建模.....	19
3.1.1 多端混合直流输电系统结构.....	19
3.1.2 基于 PSCAD 的多端混合直流输电系统主电路模型搭建.....	20
3.2 直流输电系统控制器 PSCAD 模型搭建.....	24
3.2.1 整流侧控制方式配置.....	24
3.2.2 逆变侧控制方式配置.....	25
3.2.3 电压平衡控制设计.....	29
3.3 系统换流站间协调控制.....	29
V	
3.4 多端混合直流输电系统稳态仿真.....	31
3.4.1 系统稳态运行时换流站直流侧仿真波形.....	31
3.4.2 系统稳态运行时换流站交流系统仿真波形.....	33
3.5 小结.....	
.....	34
第 4 章多端混合直流输电系统交流系统故障特性分析.....	35
4.1 换流站交流系统故障特性.....	35
4.1.1 整流站交流系统故障特性.....	35
4.1.2 逆变站交流系统故障特性.....	36
4.2 交流系统故障下的控制保护.....	36
4.2.1 LCC 最小触发角控制.....	36
4.2.2 MMC 正负序系统内环电流控制器.....	38
4.2.3 MMC1 最大调制比控制.....	39
4.2.4 MMC2 直流电压偏差控制策略.....	39
4.3 交流系统故障仿真分析.....	39
4.3.1 整流站 LCC 交流系统故障仿真分析.....	39
4.3.2 逆变站 MMC1 交流系统故障仿真分析.....	43
4.3.3 逆变站 MMC2 交流系统故障仿真分析.....	47
4.4 小结.....	
.....	50
第 5 章多端混合直流输电系统直流线路故障特性分析.....	52
5.1 直流线路故障类型及特性.....	52
5.2 直流线路故障控制策略.....	52
5.2.1 LCC 直流线路自适应重启功能.....	52
5.2.2 MMC 换流器直流线路故障自清除.....	53
5.3 直流线路故障仿真分析.....	54
5.3 小结.....	
.....	60
第六章结论与展望.....	61
5.1 结论.....	61
.....	61
参考文献.....	



## 第 1 章绪论

### 1.1 课题背景和意义我国的能源有着逆向分布的特点，风能、太阳能等可再生能源以及煤炭、石油、

天然气等不可再生资源大多分布在西北、西南等地区，东部地区的一次能源资源匮乏[1]，但是用电负荷却主要集中分布在东南地区，这就造成能源分布中心与负荷中心不相匹配。为了满足负荷中心的能源电力需求，需要对能源中心的电力进行大容量、大规模的转移[2]。

图1-1 我国能源资源分布图近年来，石油、煤炭、天然气等不可再生能源日益短缺，环境问题也日益突出。

因此国家大力倡导开发利用清洁能源，一方面缓解能源短缺的问题，另一方面通过使用清洁能源代替化石能源来解决环境问题。十三五规划以及十四五规划中就明确提出大力发展太阳能和风能等清洁能源。此时，在这些大背景下，传统的交流输电网络的弊端日益凸显。我国的能源逆向分布的特点以及各种新能源并网的局面决定了使用高压直流输电技术（HVDC）来将电能进行远距离传输是必然选择，与传统交流电网相比，高压直流输电技术（HVDC）的输电线路损耗小、设备设施造价低、

线路运行费用少、运行稳定可靠，有助于解决新能源接入问题，实现电网互联，可实现将大容量电能进行远距离传输，高压直流输电技术有着交流输电难以比拟的优 2 点[3][4]。

表1-1 交流输电与直流输电技术对比比较项目输送距离稳定性无功功率同步问题切断故障电流电压变换新能源接入电网并联交流输电有限较低存在存在容易容易困难困难直流输电理论无限高不存在不存在困难困难容易容易随着电力电子技术的不断突破，高压直流输电（HVDC）技术已经非常成熟，

并逐渐完善为如今大容量高压直流输电工程。全球已建成的高压直流输电工程数量早已过百，主要分布在中国、美国和欧洲等地，总容量超过 12 万兆瓦。虽然我国对高压直流输电技术的研究开始时间比欧美国家相对落后，但是发展极为迅速，历经几十年的研究深入，工程水平已经站在世界前列。只在 2020 年这一年中就有数个特高压直流输电工程建成，其中由南方电网公司设计建造的昆柳龙直流输电工程在 2020 年底正式投运，实现了云南对广东广西的电能传输，大力推进了我国直流输电工程的发展[5][6]。如今，我国的电网建设正处于飞速发展的阶段，西电东送工程及全国性互联电网的部署，高压直流输电技术在电网的发展中起到重要作用[6][7]。

随着技术的进步，传统直流输电已经发展得十分成熟。传统直流输电系统

（LCC-HVDC）采用的换流元件是半控型器件晶闸管，其被广泛运用于海底电缆铺设以及远距离、大容量电能传输的输电工程中，我国目前在网运行的 LCC-HVDC 线路位居世界第一，已经远远超越欧美等发达国家[7]。由晶闸管构成电网换相换流器的传统高压直流输电系统（LCC-HVDC）具有传输距离远、输电容量大、工程造价低、输电损耗小、运行技术成熟等优点[8][9]。但是传统高压直流输电系统（LCC-HVDC）

其逆变站也是采用的 LCC 换流器，导致其存在以下不足：

- （1）换流元件采用的是半控性晶闸管，这就导致逆变侧电网换相时易发生换相失败，导致换流阀闭锁，功率传输中断；
- （2）LCC 换流器输出电压的电平低，易在交流侧形成低次谐波，造成较大的滤波负担；
- （3）LCC 换流器运行时会吸收大量无功功率，因此需要增加无功补偿装置对无功功率进行补偿；
- （4）要使电网安全运行，所需要的电力设备较多，建成的变电站占地面积大。

综上所述，尽管传统高压直流输电系统十分成熟，但其存在易换相失败、需要无功补偿等不足之处[10][11][12]。

随着电力电子技术的进步，出现了以 IGBT 作为换流元件的电压源换流器

（VSC），以 VSC 为换流站的直流输电就叫做柔性直流输电技术。IGBT 器件由于受到电压等级等因素的限制，最初只能应用于低电压等级，因 IGBT 器件可以控制 3

导通和关断，在进行逆变时不会发生换相失败故障，使高压直流输电技术得到大大发展，应用前景更为广阔[13][14]，全控型器件的出现为高压直流输电技术提供了更多可能性。从绝缘栅双极晶体管 IGBT 出现至今，几十年的技术发展使得 IGBT 的电压等级越来越高，使得柔性直流输电技术得到长足发展[15][16]。

柔性直流输电系统的整流侧与逆变侧均采用了以全控型器件 IGBT 来代替传统直流输电中的晶闸管作为换流元件的电压源型换流器 VSC，其不存在换相失败故障，

采用脉宽调制技术通过控制 IGBT 的通断输出所需的交流波形，能够单独控制有功和无功功率实现对交流母线的无功动态补偿[17]。柔性直流输电经过长期发展，已经出现了多种拓扑结构，而其中采用模块化多电平换流器（MMC）的柔性直流输电系统的性能是最出色的，其不存在换相失败问题，还可对负荷密集的城市、弱交流

输电系统、无源系统及孤立负荷进行供电，能够运用于远距离大容量的输电工程，

MMC 的出现不仅使输电系统的运行效益大大提高，也加速了柔性输电技术的发展

[18]。柔性直流输电系统广泛应用于风电等新能源并网等重要领域。但是，由于柔性直流输电系统采用的是全控型器件，其开关频率较高，功率损耗较大，投资成本高，

而且难以实现电能的远距离、大容量传输。并且传输过程中功率损耗大，设备工程造价高，在处理直流侧故障方面经济性较差。

结合 LCC 换流器和 MMC 换流器的优点，可形成同时含有 LCC 换流器作和 MMC 换流器的混合直流输电系统（Hybrid-HVDC）。混合直流输电系统

（Hybrid-HVDC）有良好的控制性能和稳定性，也不用再搭建额外的辅助建压设备

[19]。混合直流输电系统（Hybrid-HVDC）不仅造价低，性价比高，也有 VSC 的稳定控制特性[20]。混合直流输电系统（Hybrid-HVDC）也可扩展成同时含有多个 MMC

和 LCC 的多端混合直流输电系统（Hybrid-MTDC）。

如今，Hybrid-MTDC 系统已经成为了直流输电领域新的研究热点[21][22]，混合直流输电系统同时同时采用 LCC 与 MMC 换流器，实现了两种输电系统的技术互补不仅同时具备传统直流输电与柔性直流输电的优点，并且能够相互弥补各自的不足，在工程中具有更好的发展前景。

混合直流输电技术具有的优点主要如下:

(1) 整流站采用 LCC 换流器, 具备传统直流输电系统 (LCC-HVDC) 的所有优点, 输电距离远、输电容量大及输电损耗小等[23][24];

(2) 混合直流输电系统采用模块化多电平换流器 (MMC) 作为逆变站, 彻底解决了传统直流输电系统可能发生的换相失败问题, 并且能够向孤立负荷网络和弱交流系统送电, 对系统的安全稳定运行十分有利[25][26]。

多端混合直流输电系统由传统直流和柔性直流构成, 综合利用了 LCC 和 MMC 两种换流技术的优点, 并能有效将传统直流输电系统的应用范围大大扩展, 4

多端混合直流输电系统将在未来的电网中承担重要的责任, 对我国电网的改造和发展起到关键作用。系统的运行方式多样、控制系统结构更加复杂, 同时也要求更高的可靠性, 针对其的控制策略和控制参数的设计也面临着新的挑战。针对多端混合直流输电系统的建模仿真和控制策略研究可为实际工程提供有价值的理论指导, 研究多端混合直流输电系统的控制策略具有十分重要的现实意义。

## 1.2 国内外研究现状

1.2.1 传统直流输电技术发展现状在 20 世纪 70 年代, 随着晶闸管开始出现, 直流输电技术得到长足发展。传统直流输电系统 (LCC-HVDC) 其整流和逆变站均采用半控型器件晶闸管作为换流器,

工作时主要通过电网电压变化控制其通断, 从而实现换相。其开关器件通断频率较低, 故器件损耗小, 技术也发展极为成熟, 控制及保护策略完善, 投资成本较低,

适合大容量远距离电能的传输, 基于这些优点, 传统直流输电系统在电力系统中得到了广泛的运用。随着晶闸管通流能力和耐压等级的提高, 瑞典查尔姆斯理工大学首次提出了特高压直流输电技术, 其不仅可以满足远距离大容量的输电需求, 且经济性与稳定更胜过交流输电, 从此特高压直流输电技术便成为多个国家的研究热点,

1990 年, 前苏联搭建了一条用于煤电输送的  $\pm 750\text{kV}$  特高压直流输电线路, 该线路

从哈萨克斯坦通往欧洲负荷中心, 容量达到 600 万 kW[27][28]。

1986 年, 我国就已经确认展开特高压直流输电技术研究, 2004 年正式确定特

高压直流输电电压等级为  $\pm 800\text{kV}$ , 并且对系统过电压水平、电磁环境、空气间隙、

绝缘配合以及设备规范等系列问题进行深入研究[29]。2019 年, 由国家电网研究建设的昌吉-古泉  $\pm 1100\text{kV}$  特高压直流输电线路成功实现全压送电[30], 在 2010 年-2019

年这 10 年时间里, 我国已建设完成的特高压输电工程达 14 个, 并且也有很多大规模 LCC-HVDC 工程处于建设中[31], 其中昌吉-古泉特高压直流工程的电压达到

$\pm 1100\text{kV}$ , 传输功率超过 12GW, 输电线路达到 3293km, 其电压等级、传输功率及传输距离均处于世界前列。在未来 20 年我国预计建设特高压直流输电工程超过

15 条[32][33]。

虽然传统高压直流输电系统 (LCC-HVDC) 由于采用晶闸管作为换流器使得其开关器件损耗小、技术成熟、投资成本低而得到广泛使用, 但美中不足的是, 半控型的晶闸管做不到自关断, 这就导致传统直流输电系统在逆变侧易发生换相失败的故障, 尤其是当受端为弱系统时, 换相失败的可能更是大大增加, 因此, 对于孤岛电网供电和现今急需的新能源并网输电等方面的需求, 传统直流输电难以为继[34][35]。

文献[36]讲述了高压直流输电原理, 阐明了高压直流输电技术在我国广阔发 5

展前景以及目前所面临的控制保护技术有待加强、设备急需升级、评估方法和标准还需完善等技术需求。文献[37]针对现有 AMIN 控制无法精确计算实时换相裕度面积的问题, 提出一种改进型最小换相裕度 (AMIN) 控制策略, 并在 PSCAD/EMTDC

上搭建工程模型进行仿真验证, 证明提出的改进策略效果良好。文献[38]通过分析影响 LCC-HVDC 换相失败的关键因素, 改进了换相失败的预防控制 (CFPREV) 策略。文献[39]提出了一种直流输电线路故障定位策略。利用故障行波波头到达第一次和第二次到达测量端的时刻, 通过改进 D 型双端行波测距方法来消除行波波速对

故障测距的影响并通过仿真验证表明故障测距结果误差较小, 说明改进 D 型双端行波法具有较高的故障测距精度, 同时对不同类型故障和不同过渡电阻具有良好的适应性, 也能应用于近区故障定位。文献[40]通过分析 LCC-HVDC 逆变侧的交流线路

的边界频率特性, 发现高频信号和某些特定频率信号上都存在明显的衰减, 提出了

一种利用后向行波的新型边界保护原理实现换相失败快速保护策略。并建立了  $\pm 800$

kV LCC-HVDC 和 500 kV AC 输电系统的 PSCAD / EMTDC 仿真模型, 模拟不同的故障情况。仿真结果表明, 该新型保护原理对多数换相失败故障均具有较好的抵抗力。文献[41]根据变换器和直流滤波器的阻抗频率特性, 以及叠加原理, 基于故障时线路电流导数 (LCD) 和直流滤波器电流导数 (DFCD) 之间的相关特性, 设计了一种基于电流导数的皮尔逊相关系数的长距离 LCC-HVDC 输电线路保护方案,

用以检测内外故障。经过仿真验证, 所提出的保护方案能够快速、可靠地识别内部和外部故障。文献[42]建立了交流系统故障下传统高压直流输电系统模型, 基于交流系统的故障序列网络, 提出了具有 LCC-HVDC 馈电的交流系统的故障稳态分析方法。使用 PSCAD / EMTDC 软件搭建模型验证该方法适用于带有 LCC-HVDC

馈电的交流系统中严重程度不同的故障。

随着新能源的大力发展, LCC-HVDC 由于其逆变侧易发生换相失败故障、需要增设大量无功补偿装置增加大量成本以及无法实现新能源并网和向孤岛与弱系统输电等缺陷, 传统直流输电技术难以突破这些技术难关, 已经不能满足新时代下的电力系统发展需求。

1.2.2 柔性直流输电技术研究现状柔性直流输电技术 (VSC-HVDC) 是一种基于电压源换流器 (VSC) 的高压直流输电技术, 其与传统直流输电技术不同之处在于不再采用晶闸管而是以可关断的全控型器件 IGBT 作为换流元件, 整流和逆变两端均采用 VSC 换流器, 利用脉宽调制技术 (PWM) 输出所需的交流波形。相比较于传统直流输电技术, 柔性输电技术有以下几个优点[43]:

(1) 采用全控型器件 IGBT 取代传统直流输电中的半控型器件晶闸管, 不仅 6



- 可以控制导通还能控制关断，可设置导通角，更利于控制；
- (2) 柔性直流输电可以向孤岛等无源网络以及弱系统供电并且不会出现换相失败问题；
  - (3) 柔性直流输电采用脉宽调制技术（PWM），输出电压质量高无需电感滤波；
  - (4) 不需要增设无功补偿装置来平衡无功功率；
  - (5) 柔性直流输电换流站建无需通信且易构成多端直流输电系统；
  - (6) 柔性直流输电只需改变电流方向就可实现潮流翻转。

世界上最早提出柔性直流输电技术的是加拿大麦吉尔大学的 Boon-Teck Ooi 等人，他们在 1990 年最先提出柔性直流输电技术这一概念，直到 1997 年，世界上首个柔性直流输电工程赫尔斯扬输电工程才在瑞典建成，从此柔性直流输电技术正式进入工程应用阶段，从此柔性直流输电技术得到了飞速发展[44]。我国的柔性直流输电技术发展极为迅速，不仅建成了多项柔性直流输电示范工程，并且进一步研究出了多端柔性直流输电系统，采用多端柔性直流输电技术可以兼具 MMC 换流器和多端直流输电的优势，其具有的灵活性和冗余性不仅保障了电能质量，同时也实现大容量远距离电能传输的，还解决了新能源并网等问题[45]。要实现这些优势首先得保障系统的稳定运行，这就需要对直流输电系统的控制策略深入研究，保证系统能够安全稳定运行。

文献[46]提出了一种基于小波熵的保护方法，结合小波和熵识别不同故障的频域和时域特征对MMC-HVDC架空线进行保护，经过仿真验证表明该方法能够快速、准确地确定扰动或故障类型。文献[47]将 MMC 子模块作为电源及其导通电阻的串联连接，基于电网规划，参考实际参数建立了一套具有大规模新能源整合用于 AC &DC 的数字平台的输电系统。通过将模型运行结果与实际运行状态进行对比，该方法和体系结构具有一定的实用性和有效性。

指 标		
疑似剽窃文字表述		
<div>1. 总容量超过 12 万兆瓦。虽然我国对高压直流输电技术的研究开始时间比欧美国家相对落后，但是发展极为迅速，历经几十年的研究深入，</div> <div>2. 研究可为实际工程提供有价值的理论指导，研究多端混合直流输电系统的控制策略具有十分重要的现实意义。</div> <div>1.2 国内外研究现状</div> <div>1.2.1 传统直流输电技术</div>		
2. 018_第2部分		总字数：9643
相似文献列表		
去除本人文献复制比：0.4%(37) 文字复制比：0.4%(37) 疑似剽窃观点：(0)		
1	LCC-MMC的多端混合直流输电系统协调控制策略研究 刘子琳(导师：张明光;李正远;齐振宇) - 《兰州理工大学硕士论文》 - 2020-06-10	0.4% (37) 是否引证：否
原文内容		

文献[48]出了一种基于直接 Lyapunov 法的协调控制策略，以在变化的负载和直流母线电压下处理多端子（MT）模块化多电平转换器（MMC）的 HVDC 系统中交流电网的一致性。且在 matlab 上验证了该控制策略行之有效。文献[49]提出了一种用于 MMC-HVDC 电网中的极对地故障的故障电流计算方法，使用结合电压电流关系（VCR）的改进节点电压法来计算 MMC-HVDC 故障电流并获得相应的表达式。将通过该方法计算出的结果与在 PSCAD / EMTDC 上进行仿真模拟的结果进行对比，验证了该方法的有效性，并进一步总结了 MMCHVDC 电网中的地对地故障的特征。柔性直流输电技术相对于传统直流输电技术有其独特的优越性，但是其仍然存在几点不足：

- (1) 由于使用的是 IGBT，设备造价昂贵，成本高；
  - (2) 开关频率高，损耗较大；
  - (3) 由于可关断器件性能限制，输电容量较小
- 由于传统直流输电技术与柔性直流输电技术各自都存在优势与不足，所以考虑将二者结合起来，即在送端和受端采用不同的换流器，就形成了混合直流输电，同时也可构成多端混合直流输电系统。
- 1.2.3 混合直流输电技术研究现状混合直流输电技术是将 LCC 和 VSC 并入 HVDC 系统中，可以结合两个换流器的优点。文献[50]将混合高压直流输电系统分为四种类型：端对端混合直流输电系统、极与极混合的直流输电系统、混合双馈入/多馈入直流输电系统、多端混合直流输电系统。端对端混合系统是指在整流侧采用晶闸管作为换流元件的 LCC 换流器，将 IGBT 作为换流元件构成的 VSC 换流器作为逆变站；极与极混合系统是一极采用LCC,另一极采用 VSC，著名的 Skagerrak HVDC 输电工程就是在之前的三极传统直流输电系统中加了采用电压源换相器的一极形成了四极系统；混合双馈入/多馈入系统指的是送端采用 LCC 和 VSC 混合的换流站，典型工程就是我国舟山 5 端柔性直流输电工程，是世界上首个 5 端柔性直流工程；多端混合系统是指有多个送端和受端，并且送端和受端采用不同的换流器，我国在 2020 年 12 月 27 日正式投运的昆柳龙直流输电工程采用的就是多端混合系统，电压等级±800 KV、输送距离 1452 Km，输电容量达到 800 万千瓦，工程横跨云南、贵州、广东和广西四省。系统图如图 1-2



所示,其中云南作为送端采用的是 LCC 换流器,广东和广西作为受端均采用的是 MMC 换流器。

图1-2 乌东德混合三端直流系统图目前国内外学者对混合直流输电系统的研究也取得了一些成果,文献[51]通过分析混联型直流输电系统当送端发生电压降落时受端运行特性,在逆变侧 MMC 电 8

压控制及 LCC 电流控制的基础上,优化了混联直流输电系统的电压协调控制逻辑,

提出一种自适应电压协调控制方法。并在 PSCAD/EMTDC 中建立模型仿真分析验证了该方法能提高当送端电压跌落时的传输功率。文献[52]提出了一种基于二极管桥式多端口混合直流输电断路器的故障切除方案,通过在 PSCAD 上进行仿真模拟

验证了该方案的可行性,并且在实际工程应用中能有效降低成本。文献[53]提出了

一种可以有效消除恒定直流分量和衰减的非周期性分量的影响的特征分量提取算法,并在 PSCAD / EMTDC 上建立 Hybrid-HVDC 系统进行仿真,将研究的特征分量提取算法与现有方法进行比较,证明了提出的算法的可行性。

混合直流输电技术应用前景广阔,但是目前对其的研究还比较少,

### 1.3 本文工作与章节安排

本文结合传统直流输电系统(LCC-HVDC)与模块化多电平柔性直流输电系统

(MMC-HVDC)设计了一种新型多端混合直流输电系统(Hybrid-MTDC),并对该系统在正常状态的协调控制策略以及各种典型工况下稳定运行的控制策略进行了深入研究。

全文共分为五章,章节安排如下:

(1)第一章介绍了传统直流输电系统与柔性直流输电系统的基本原理并总结概括了它们各自具有的优缺点。同时对这两种直流输电系统目前的研究现状以及具体的工程应用进行了详细介绍并引出了结合这二者优势的混合直流输电系统,最后简要介绍了混合直流输电系统的分类、工程应用以及研究现状。

(2)第二章研究了 LCC 换流器与 MMC 换流器的工作原理,建立了二者的数学模型。并结合 LCC 和 MMC 设计了一种新型多端混合直流输电系统拓扑结构。首先分析 LCC 换流器的拓扑结构和工作原理,建立其数学模型。然后对 MMC 换流器的拓扑结构和工作机理进行了研究,建立了 MMC 换流器在 dq 轴下的数学模型。

最后结合 LCC 和 MMC 二者优势,同时也是基于实际的乌东德送电工程建立了多端混合直流输电系统的拓扑结构;

(3)第三章根据建立的多端混合直流输电系统在 PSCAD 上搭建输电系统模型,

并根据控制策略在 PSCAD 上搭建控制系统。首先根据多端混合直流输电系统拓扑

结构及主电路接线图在 PSCAD 上搭建输电系统的主电路。然后根据控制策略在 PSCAD 上建立 LCC 整流器的定电流控制,MMC 的内环电流控制器及外环功率控制器,并构建直流输电电缆模型。最后在 PSCAD/EMTDC 上搭建系统模型进行仿真,验证了所搭建系统在控制下能够稳定运行;

(4)第四章针对建立的多端混合直流输电系统在交流系统侧发生单相接地和发生双向接地故障下的波形特性。首先分析系统发生交流系统故障下的电压电流特 9

性,在所搭建的模型上建立交流系统故障下的控制策略。然后分别在系统的 LCC

整流站、MMC1 逆变站与 MMC2 逆变站的交流系统侧设置单相接地与两相接地故障,通过仿真波形分析其故障特性。

(5)第五章针对建立的多端混合直流输电系统在输电线路不同位置发生单相故障时的故障特性。分析系统在发生直流线路故障时的电压、电流变化,在系统模型上建立直流故障下的控制策略。最后通过在输电线路不同位置处设定单极接地故障,得到系统在直流线路故障下的仿真波形,从而分析其故障特性;

(6)第六章对全文研究成果进行总结,整理概括了全文的研究内容和结论,

并对后期进行更为深入研究工作提出了一些研究方向和展望。 10

## 第 2 章多端混合直流输电系统拓扑结构与数学模型

本章内容分为三部分,分别是 LCC 整流器的拓扑结构与数学模型、MMC 换流器的拓扑结构与数学模型以及多端混合直流输电系统的拓扑结构,为后文的多端混合系统控制策略研究奠定基础。

### 2.1 LCC 整流器拓扑结构与数学模型

2.1.1 LCC 整流器拓扑结构 LCC 整流器是指采用半控型器件晶闸管作为换流元件所构成的换流器,常用于传统直流输电系统中,主要是通过晶闸管的导通和关闭实现电力在交流和直流之间变换,是换流站的核心器件。本文采用的是常规的双极 12 脉动 LCC 整流器,12 脉动是指在原有的 6 脉动的基础上在输入端增加变压器后再增加一组 6 脉动换流器,

因此又称为 12 脉冲整流,其有助于消除高次谐波,拓扑结构如图 2-1 所示。

图2-1 LCC整流器拓扑结构图2-2 LCC整流站基本接线单元整个换流单元由换流变压器、平波电抗器、交流和直流滤波器与 12 脉冲 LCC

整流器构成,完整的换流单元接线如图 2-2 所示,各设备作用如下:

(1) LCC 整流器:整流器就是通过换流阀将交流电转换成直流电的设备,这里的 LCC 整流器采用的是由半控型器件晶闸管为核心器件构成换流阀,其工作原理是通过控制晶闸管的通断实现电流的转换。6 脉动整流器是通过控制 6 个晶闸管依次导通从而实现整流变换,这样的整流器会在电路产生  $6k \pm 1$  次谐波;而 12 脉动整流器则是由两个 6 脉动整流器串联形成,两个 6 脉动整流器各自与换流变压器联结时,其中一个使用 Y-Y 型接法,另一个则采用 Y- $\Delta$ 型接法,通过两种不同联结方式可使得两个 6 脉动换流器交流电压产生  $30^\circ$  的相位差,这样二者叠加就能输出

12 脉动的波形,12 脉动整流器由于其两个 6 脉动整流器产生的 5、7、17、19 次谐

波相互抵消,只剩下  $12k \pm 1$  次谐波注入电网,故本系统采用 12 脉动整流器; 11

(2) 换流变压器:换流变压器的一次侧与交流母线相连,二次侧与整流器的交流侧相连,联结方式分为 Y 型和  $\Delta$ 型接法,其作用主要有:输送电能、实现电压变换、采用两种联结方式得到两个相位差  $30^\circ$  的 6 脉动的波形叠加实现 12 脉动换流、隔离交流系统和直流部分、抑制故障电流、保护电路等,是整流站最重要的设备之一;

(3) 平波电抗器:经过 12 脉冲整流器进行整流之后输出的波形是带有纹波的,

平波电抗器的作用就是抑制这些纹波,所以其一般装设在整流器与直流线路之间,

除此之外,平波电抗器还具有限制短路电流与电气隔离等作用;

(4) 交流滤波器:由电阻、电容、电抗串并联组成,是换流站的重要组成部分,作用是滤除 12 脉冲整流器所产生的  $12k \pm 1$  次谐波,避免谐波对交流系统造成影响,同时具有无功补偿作用,通常装设在换流变压器与交流系统间。

(5) 直流滤波器：主要由高、低压电容器和电抗器等元件组成，通常装设在整流器出口，与高压直流线路并联，是抑制直流侧 12k 次谐波最有效的方式。通过串联电容提高耐压、电容并联加大容量使得输出的直流波形更平稳。

2.1.2 LCC 整流器工作原理 LCC 整流器采用将两个 6 脉动整流桥直流侧串联而成 12 脉动整流器，共 12 个晶闸管，需要 12 个与交流系统同步的触发脉冲控制 12 个晶闸管依次导通，由于是通过换流变压器联结方式不同来移相，两个 6 脉动整流器的触发脉冲顺序一致，12

脉动换流器工作原理也与 6 脉动换流器相同，同样是依靠相间短路使晶闸管承受反向电压关断实现换相。

图2-3 12脉动换整流器接线图如图 2-3 所示，11(12)、31(32)、51(52)阴极连接在一起，为共阴极组，相应的

21(22)、41(42)、61(62)为共阳极组。其中 11(12)、41(42)与三相中的 a1(a2)相相接，31(32)、61(62)与 b1(b2)相相接，与 c1(c2) 相相接的是 51(52)和 21(22)，晶闸管导通顺序依次为 11-12-21-22-31-32-41-42-51-52-61-62 隔为 60°。12

表 2-1 12 脉动整流桥晶闸管工作情况及输出电压时段 1 组导通的晶闸管 2 组导通的晶闸管 1 组整流输出电压 ud1 2 组整流输出电压 ud2

I	11、21	12、22	ua1- uc1=ua1c1	ua2- uc2=ua2c2
II	21、31	12、22	ub1- uc1=ub1c1	ua2- uc2=ua2c2
III	22、32	22、32	ub2- uc2=ub2c2	ub2- uc2=ub2c2
IV	32、42	22、32	ub2- ua2=ub2a2	ub2- uc2=ub2c2
V	32、42	32、42	ub2- ua2=ub2a2	ub2- ua2=ub2a2
VI	42、52	32、42	uc2- ua2=uc2a2	ub2- ua2=ub2a2
VII	42、52	42、52	uc2- ua2=uc2a2	uc2- ua2=uc2a2
VIII	52、62	42、52	uc2- ub2=uc2b2	uc2- ua2=uc2a2
IX	52、62	52、62	uc2- ub2=uc2b2	uc2- ub2=uc2b2
X	62、22	52、62	ua2- ub2=ua2b2	uc2- ub2=uc2b2
XI	62、22	62、22	ua2- ub2=ua2b2	ua2- ub2=ua2b2
XII	22、22	62、22	ua2- uc2=ua2c2	ua2- ub2=ua2b2

表 2-1 为 12 脉动整流桥晶闸管工作电压与输出电压，从中可看出输出电压在一个周期内脉动 12 次。当换流器处于非换相阶段时同时有 4 个晶闸管处于导通阶段（图 2-3 中晶闸管绿色表示导通），当进行换相时通过触发脉冲使下一个晶闸管导通（图 2-3 中晶闸管红色表示即将导通），则同时有 5 个晶闸管处于导通阶段，这两种轮流交替出现的状态叫做“4-5 工况”。

2.1.3 LCC 整流器数学模型整流器接线如图 2-3 所示，稳定运行时，LCC 整流器的数学模型如下：

整流器直流侧输出电压平均值为  $U_{dc1}$ ，计算表达式为： $1=6 \frac{2}{\pi} \cos -6 (2-1) = \cos -1 ( \cos -2 2 ) - (2-2)$  式中 2——换流阀侧空载线电压有效值；

——晶闸管触发控制角； ——换相电抗； ——直流侧电流； ——换相角。其输出有功功率为 PLCC，无功功率为 QLCC，计算表达式如下： $= (2-3) = \tan = \tan (2-4)$  式中 ——功率因数角。13

2.2 MMC 换流器拓扑结构与数学模型

2.2.1 MMC 换流器拓扑结构模块化多电平(MMC)换流器采用全控器件 IGBT 作为换流元件，主电路拓扑结构如图 2-4 所示，MMC 采用的也是桥式电路，不同之处在于 MMC 桥臂采用的是模块级联的方式，不再是简单的将 IGBT 器件串联构成，6 个桥臂都是由 N 个子模块加 1 个电抗器 L0 串联构成。采用这种模块级联的结构不仅易于扩展，也大大降低了对开关器件的要求。

图2-4 MMC换流器主电路拓扑结构

a. 半桥子模块 b. 全桥子模块

图 2-5 MMC 子模块拓扑结构 MMC 子模块有多种结构，本文只介绍两种常见模块：半桥子模块和全桥子模块。图 2-5 为两种子模块拓扑结构，半桥子模块功率器件是全桥子模块的一半，其造价较低，但在相同电流水平下，半桥子模块比全桥子模块少了一半承受通流的功率器件，IGBT 运行压力大。实际的工程运用中大都采用混合型 MMC，即将搬迁子模块和全桥子模块混合使用，当全桥所占比例为 0 时，即为半桥 MMC，全桥比例达到百分之百，就变成了全桥 MMC。混合型 MMC 设计原则为在保证系统稳定运行的前提下尽可能降低全桥子模块占比。

以乌东德电站送电广东广西输电工程为例，其设计原则为：14

(1) 满足直流线路故障自清除和降压运行要求，全桥所占比例为：广东≥54%，广西≥47%；

(2) 长时间 0 到满压稳定运行要求（涉及阀组在线投退），全桥所占比例为：广东≥77%，广西≥76%

阀组直流电压从 0 到满压运行过程中，全桥比例低于计算值时，在直流电压爬升过程中，桥臂电流在过零点附近时，由于半桥、全桥模块的差异，桥臂电流容易发生扰动，引起过流闭锁，导致阀组投入失败。

表 2-2 为混合型 MMC 不同全桥比例技术对比表，从表中中可以看出随着全桥子模块所占比例越来越高，系统能实现的功能也越强，抗故障能力也越强，系统抗干扰达到 80%之后才能无条件支持阀组在线投退。

表 2-2 混合型 MMC 不同全桥比例技术对比技术对比混合型全桥比例	二极管阻断	MMC	50%	60%	70%	80%	90%	100%
支持直流线路故障自清除	√	√	√	√	√	√	√	√
支持广东和广西功率互济	×	√	√	√	√	√	√	√
支持 70%和								
80%降压运行	×	√	√	√	√	√	√	√

支持阀组在线投退 × √

有条件 √

有条件 √

有条件 √ √ √

2.2.2 MMC 换流器工作原理由于 MMC 输出电压受上下桥臂投入子模块数控制，故其工作原理与两电平和三电平采用 PWM 调制不同，是通过控制子模块投入数目采用阶梯波的形式来逼近正弦波。三相 MMC 拓扑如图 2-4 所示，当 MMC 稳定运行时，存在如下特点：

(1) 端口电压等于上、下桥臂电压之和： $U_d = U_{d1} + U_{d2}$  式中  $U_d$ ——直流侧端口电压； $U_{d1}$ ——j (a、b、c) 相上桥臂电压； $U_{d2}$ ——j (a、b、c) 相下桥臂电压。要使直流侧电压  $U_{dc}$  恒定不变，则要求每相中正常投入的子模块数保持相同且恒定。

(2) 通过调节子模块的投入和切除使输出电压为正弦交流电。

(3) 上下桥臂投入子模块数目可以在 0-N 之间进行变化，则 MMC 最多可输

出  $N+1$  电平。

(4) 电流对称分布，每相上、下桥臂电流  $i_{d1}$ 、 $i_{d2}$  可表示为： $i_d = i_{d1} + i_{d2}$

$i_d = i_{d1} + i_{d2}$  (2-6) 式中  $i_d$ ——直流侧电流； $i_{d1}$ ——j (a、b、c) 相的交流电流。上下桥臂处于投入状态的子模块数满足下式：

$N_{d1} + N_{d2} = N$  (2-7) 式中  $N_{d1}$ ——上桥臂子模块投入数； $N_{d2}$ ——下桥臂子模块投入数。各个子模块电压均为  $U_c$ ，则：

$U_d = U_{d1} + U_{d2} = (N_{d1} + N_{d2}) U_c = N U_c$  (2-8)

MMC 输出电压在  $-U_{dc}$  和  $U_{dc}$  共  $N+1$  个电平之间变化，中间值为  $0.2 U_{dc}$

2.3 MMC 数学模型 MMC 换流器电路接线图如图 2-6 所示，直流侧端电压为  $U_{dc}$ ，上桥臂用  $p$  表示，

下桥臂用  $n$  表示，如 a 相上桥臂电压就用  $u_{pa}$  表示，下桥臂电压则为  $u_{na}$ 。

图 2-6 MMC 换流器电路接线图由于对称性，三相的基尔霍夫方程都相同，对其中一相上、下桥臂分别列写电压方程，可得 MMC 微分方程： $U_{dc} = u_{pa} + u_{na}$  (2-9) 上下桥臂差模电压设为  $u_{diff}$ ，共模电压设为  $u_{com}$ ，则有：

$u_{diff} = u_{pa} - u_{na}$  (2-10) 将式 (2-10) 与式 (2-9) 联立，可得 MMC 交直流侧动态特性方程：

$(\frac{1}{L} \frac{d}{dt} + \frac{R}{L}) i_d = \frac{1}{L} (U_{dc} - u_{diff})$  (2-11) 式中  $i_d$ ——j 相的环流。将式 (2-11) 简化，可得三相交流侧基频动态方程：

$u_{diff} = \frac{2}{3} (u_{pa} - u_{na})$  (2-12) 式 (2-12) 为 MMC 交流侧动态方程，稳定运行时电压和电流都是正弦交流波形，不利于控制。因此对其进行派克变换，将三相交流量转化为 dq 轴下的直流量进行控制。接下来对输入交流系统中的有功功率  $P_s$ 、无功功率  $Q_s$  进行拉普拉斯变换，可得频域方程： $U_{diff} = \frac{2}{3} (U_{pa} - U_{na})$  (2-13) 由式 (2-13) 输出电流表达式可知 MMC 换流器交流侧流出电流取决于上下桥臂的差模电压和交流系统电压。

对式 (2-11) 中三相内部环流动态方程进行 d-2q-2 坐标变换可得到内部环流动态方程在 d-2q-2 坐标系下的表达式：

$\frac{1}{L} \frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L} (U_{dc} - u_{diff})$  (2-14) 再对式 (2-14) 进行拉普拉斯变换，得到频域方程：

$U_{diff} = \frac{2}{3} (U_{pa} - U_{na})$  (2-15) 从式 (2-15) 中可看出 MMC 换流器的内部环流只取决于上下桥臂的共模电压。

2.2.4 MMC 的调制方式 MMC 采用的是全控器件 IGBT，主要通过在一个周期内多次对 IGBT 施加导通和关断信号将子模块在投入和切除状态转换，使得上下桥臂投入的子模块个数发生变化，从而输出所需正弦波形，所以 MMC 的调制方式实际上就是对 IGBT 开通和关断的控制方法。调制方式关系到输出波形与正弦波的接近程度，因此对于 MMC

换流器的调制方式，必须尽可能做到简单、高效。

调制方式是通过控制 IGBT 通断来输出正弦波，故可根据以下几点判断调制方式的好坏：17

- (1) 输出的波形尽可能接近正弦波；
- (2) 输出谐波分量少；
- (3) IGBT 开关次数少，在输出合适的波形的前提下，用最少的开关次数；
- (4) 响应速度足够快，要满足快速跟踪的要求；
- (5) 计算量尽可能少，容易实现。

图 2-7 MMC 的最近电平逼近调制图 2-7 为 MMC 的最近电平逼近的调制波，设  $v_j$  (j=a、b、c) 点任意 t 时刻调制波的值为  $u_{vj}$ ，子模块电容电压的平均值为  $U_c$ ，当调制波电压开始变化时，该相上下桥臂投入的子模块数量要发生相应的增减，实际应用中调制波与输出的波形差值应不超过  $U_c/2$ 。任意 t 时刻，上下桥臂投入的子模块数分别为  $n_{pj}$ 、 $n_{nj}$ ，计算如下：

$n_{pj} + n_{nj} = N$  (2-16) 式中  $\text{round}(x)$  表示与 x 最接近的整数。由于每个桥臂子模块数目均为 N，则有

$0 \leq n_{pj}, n_{nj} \leq N$ 。在实际系统中，控制器一般是经过恒定的控制周期  $T_{ctrl}$  发出调制信号，

则在下一时刻子模块数为： $n_{pj} = \text{round}(\frac{u_{pj}}{U_c} N)$  (2-17) 这样每过相同的周期  $T_{ctrl}$  发一次信号不断更新调制波，最终 MMC 输出随调制波变化的阶梯波。

2.3 多端混合直流输电系统拓扑结构高压直流输电技术分为两种：一是传统直流输电技术，整流站和逆变站均采用以晶闸管为换流元件的 LCC 换流器进行电力转换；二是柔性直流输电技术，换流站采用以 IGBT 为换流元件的 VSC 换流器或 MMC 换流器。本文所研究的是在 2020

年底南网正式投运的乌东德输电工程的基础上，结合传统直流输电技术和柔性直流 18

输电技术二者各自的优势设计的多端混合直流输电系统，系统拓扑结构如图 2-8 所示。

图 2-8 多端混合直流输电系统拓扑结构

图 2-8 中系统采用的是一个送端，两个受端的三端结构，整流和逆变分别采用 LCC 换流器和 MMC 换流器。系统送端采用的是 12 脉动 LCC 换流器进行整流，输出高压直流电，具有造价低，技术成熟，送电容量大，送电距离远的优点；两个受端均采用模块化多电平 MMC 换流器进行逆变，输出正弦交流电。综合考虑输电可靠性以及经济性，子模块中全桥占比为 80%，采用 MMC 换流器的优点是不用加无功补偿装置、没有换相失败问题、可以为无源网络供电、能够独立调节有功和无功、

谐波水平低、占地面积小等。

送端 LCC 整流站交流系统端配置了交流滤波器和无功补偿装置，直流端装设了直流滤波器，出口装设有平波电抗器，用来抑制纹波，并起到电气隔离的作用。

电力从送端发出，经过直流线路 1 段，到达受端 1，经过直流电感进入 MMC1 进行逆变成正弦交流电输入交流系统中；电力继续传输经过直流线路 2 段，经过直流电感进入 MMC2 进行逆变成正弦交流电输入交流系统。

2.4 小结本章主要对传统直流输电系统的整流部分 LCC 整流器和柔性直流输电系统的逆变站 MMC 换流器拓扑结构和工作原理进行了研究，并提出一种送端为 LCC 整流器，两个受端 MMC 换流器的多端混合直流输电系统。具体如下：

(1) 分析了 LCC 整流器的拓扑结构，组成元件的用途分别进行阐述，并对其主要换流器件 12 脉动换流器的结构及工作原理进行详尽分析，建立了整流器的数学模型。

(2) 对逆变站 MMC 换流器的拓扑结构和子模块工作原理进行阐述，以此为基础对 MMC 换流器的工作原理进行分析，建立 MMC 换流器数学模型，并对其调制技术—最近电平逼近的调至方式进行研究分析。

(3) 设计出本文中结合 LCC 整流器和 MMC 换流器的多端混合直流输电系统的拓扑结构，并阐述了其设备构成以及输电过程。

3. 018_第3部分		总字数：9628
相似文献列表		
去除本人文献复制比：1.8%(170)文字复制比：1.8%(170)疑似剽窃观点：(0)		
1	高比例新能源传输电网柔性拓扑结构与特性研究 胡开伟(导师：郝晓弘) - 《兰州理工大学硕士论文》 - 2020-06-11	1.0% (100) 是否引证：否
2	基于MMC的高压大功率DC/DC变换器拓扑与控制策略研究 索之闻(导师：李庚银;王伟胜) - 《华北电力大学(北京)博士论文》 - 2017-06-01	0.4% (34) 是否引证：否
3	索之闻博士论文最终稿 索之闻 - 《学术论文联合比对库》 - 2017-06-14	0.4% (34) 是否引证：否
4	基于MMC的高压大功率DCDC变换器拓扑与控制策略研究 索之闻 - 《学术论文联合比对库》 - 2017-02-28	0.4% (34) 是否引证：否
5	直流配电网运行特性及协调控制研究 蒋贤强(导师：徐青山;袁晓冬) - 《东南大学硕士论文》 - 2018-05-01	0.3% (30) 是否引证：否
原文内容		

19

第 3 章多端混合直流输电系统 PSCAD 仿真模型搭建

第二章已经对多端混合直流输电系统的拓扑结构以及工作原理进行了研究，本章就要在第二章的基础上在 PSCAD 中搭建出多端混合直流输电系统的仿真模型。

3.1 多端混合直流输电系统主电路建模

3.1.1 多端混合直流输电系统结构多端混合直流输电系统模型如下图 3-1 所示：

图 3-1 多端混合直流输电系统结构框图图 3-2 直流系统主接线图图 3-1 所示为多端混合直流输电系统结构，主电路分为送端、受端和直流线路三部分：送端为双极 12 脉动 LCC 整流器，受端有两个，均采用模块化多电平 MMC 换流器，控制保护系统控制换流站的运行，保证电能的持续传输，三个控制保护系统之间保持通信畅通；直流线路为两段电缆线路，分别是直流线路 1 和直流线路 2。

送端和受端均接入交流系统当中，其中送端交流系统发出功率，受端交流系统吸收 20 功率。直流系统按顺序依次为交流滤波器、换流变压器、整流器、平波电抗器、直流输电线路以及两个 MMC 逆变器。

图 3-2 为直流系统主接线图，系统为正负双极结构，送端整流站双极共有 4 个 LCC 整流阀，均为 12 脉动整流器，其中靠近高压输电线一侧的为高压阀组，靠近接地线一侧为低压阀组。两个受端均采用模块化多电平 MMC 换流器，双极均有 4 个 MMC 换流器，与整流站类似，靠近输电线一侧为高压阀组，靠近接地线一侧为低压阀组。

3.1.2 基于 PSCAD 的多端混合直流输电系统主电路模型搭建在 PSCAD 搭建的多端混合直流输电系统自主电路模型如图 3-3 所示，交流系统电压 500kV，频率 50Hz，换流站 A 为双极 12 脉动 LCC 换流站，换流站 B 和换流站 C 均为双极 MMC 21 电平换流站，直流线路电压等级正负 800kV，输送功率为换流站 A 8000Mw，换流 B 为-5000Mw，换流站 C 为-3000Mw。换流站 A、B、C 均为自定义组件，内部为换流器组件。表 3-1 为仿真系统模型参数。

图 3-3 多端混合直流输电系统主电路模型表 3-1 仿真系统模型参数主要参数 LCC 整流站(A) MMC1 逆变站(B) MMC2 逆变站(C)

采样周期 Ts/μs	50	50	50
交流侧额定电压/kV	525	525	525
直流侧电压/ kV	±800	±800	±800
输送功率/Mw	8000	-5000	-3000
换流站结构双极 12 脉动换流器全桥占比	80%	全桥占比	80%
柔直桥臂电抗/mH	—	100	100
子模块电容/μF	—	10000	10000
单桥臂子模块数 N	—	20	20



输电线路长度/km LCC-MMC1 段长 908.4 MMC1-MMC2 段长 21

3.1.2.1 交流滤波器组设计交流滤波器需考虑以下几点：滤波能力好；损耗小；满足无功要求；一定的冗余能力。因本系统采用 12 脉动整流器，故交流侧只有  $12k \pm 1$  次谐波存在，为了减小投切滤波器组时对系统产生电压冲击，将交流滤波器分为多组，在需要的时候灵活投切。

本文在交流母线处配置 3 组交流滤波器，其结构如图 3-4 所示。

图 3-4 交流滤波器组

3.1.2.2 换流变压器换流变压器是直流系统重要设备，将交流系统与换流器相连，并具有将交直流系统电气隔离，抑制故障电流等作用。换流变压器参数设置如表 3-2。

表 3-2 换流变压器参数设置

变压器参数

交流侧额定电压等级/k V

阀侧额定电压等级/k V

正序漏抗

/p. u.

空载铁损

/p. u.

换流变压器 10000 525 719 0.18 0.0005

变压器参数

铜损/

p. u.

空心电抗/ p. u.

涌流衰减时间常数/s

饱和曲线膝点电压/ p. u.

磁化电流百分比/%

换流变压器 0.0024 0.2 1 1.25 0.1

3.1.2.3 LCC 整流器 PSCAD 模型本系统采用双极 12 脉动 LCC 整流器，由两个 6 脉动整流器串联形成，两个 6 脉动整流器各自与换流变压器联结时，其中一个使用 Y-Y 型接法，另一个则采用 Y- $\Delta$  型接法，通过两种不同联结方式可使两个 6 脉动换流器交流电压产生  $30^\circ$  的相位差，这样二者叠加就能输出 12 脉动的波形，12 脉动整流器由于其两个 6 脉动整流器产生的 5、7、17、19 次谐波相互抵消，只剩下  $12k \pm 1$  次谐波注入电网。整流器模型如图 3-5 所示。

图 3-5 双极 12 脉动 LCC 整流器

3.1.2.4 平波电抗器平波电抗器主要装设在换流器出口，用来抑制直流线路中谐波及纹波，使电流更加平稳，同时还能够限制短路电流，并且起到电气隔离的作用。本文在 PSCAD

中搭建的模型使用的平波电抗器的参数为 0.15H。

3.1.2.5 直流滤波器主要由高、低压电容器和电抗器等元件组成，通常装设在整流器出口，与高压直流线路并联，是抑制直流侧 12k 次谐波最有效的方式。通过串联电容提高耐压、

电容并联加大容量使得输出的直流波形更平稳。本文设置 4 组直流滤波器，如图 3-6

所示，参数设置见表 3-3。

图 3-6 直流滤波器组

表 3-3 换流变压器参数设置

直流滤波器类型三调谐滤波器 TT12/24 TT2/39

C1/ $\mu$ F 2.0 0.35 0.8

C2/ $\mu$ F 3.415 0.81 1.825

C3/ $\mu$ F 11.773 - -

L1/mH 11.773 89.35 11.99

L2/mH 10.2066 48.86 964

L3/mH 4.77 - -

R1/k $\Omega$  - 10 5.7

3.1.2.6 直流电缆线路直流电缆线路是连接各换流站，输送电能的直流线路。在 PSCAD 中创建地下电缆系统，主要分为以下几个步骤：1) 在电路中创建电缆配置元件；2) 在电路中添加 2 个名称相同（与电缆配置元件名称相同）的电缆接口元件；3) 在输电段配

置编辑器中添加传输线模型并添加电缆数据，本系统传输线采用的是 Frequency

Dependent ( Phase ) 模型，电缆采用的是同轴电缆模型。创建的电缆模型见图 3-7。

电缆配置元件传输线及电缆模型图 3-7 直流电缆线路图 24

3.1.2.7 MMC 逆变器 PSCAD 模型受端 MMC 逆变器的 PSCAD 模型如图 3-8 所示，其采用的子模块为混合子模块，即半桥子模块与全桥子模块级联而成，其中全桥子模块占比为 80%。图 3-9 为 MMC 逆变器的拓扑结构图，从图中可看出其子模块中包含有全桥子模块及半桥子模块。

图 3-8 MMC 逆变器 PSCAD 模型图 3-9 MMC 逆变器拓扑结构图

## 3.2 直流输电系统控制器 PSCAD 模型搭建

3.2.1 整流侧控制方式配置 LCC 整流器采用的是半控型器件晶闸管作为换流元件，主要通过控制晶闸管的触发角来实现对系统的控制，送端一般分为定电流控制、定电压控制以及定功率控

制，本文中采用的为定直流电流。对 LCC 整流器的控制量为触发延迟角  $\alpha$ ，通过 PI

控制器对整流器直流侧电压、电流以及换相角  $\gamma$  进行调节。为了保证系统稳定运行，

对触发延迟角  $\alpha$  采用附加滞后触发控制方式。控制框图如图 3-10 所示:

图 3-10 LCC 定电流控制框图图 3-10 中,  $I_{dc\_ref}$ 、 $I_{dc1}$  分别表示 LCC 整流器直流侧电流参考整定值和测量值,

当二者之间存在偏差时, 其偏差值进入 PI 控制器, 系统会通过调整触发角  $\alpha$  使直流测电流实际值对参考值进行跟踪。根据控制框图 3-10, 可列写状态方程:  $\frac{dI_{dc1}}{dt} = -\frac{1}{T_{dc}} I_{dc1} + \frac{1}{T_{dc}} I_{dc\_ref}$

1 = -1 (3-1) 式中  $\frac{1}{T_{dc}}$  —— PI 控制器参数;  $\frac{1}{T_{dc}}$  —— PI 控制器参数;  $T_{dc}$  —— LCC 直流侧电流测量的时间常数。整流侧在 PSCAD 中的实际控制模型如图 3-11 所示。

图 3-11 直流系统整流侧控制模型

3.2.2 逆变侧控制方式配置 MMC 换流器采用全控型器件 IGBT 作为换流元件, 通过将 IGBT 和电容组成的子模块级联的方式构成三相换流桥。MMC 换流器属于电压源型换流器, 可参考 VSC

设计内环电流控制器和外环控制器。根据第二章的 MMC 换流器数学模型, 通过调节差模电压  $dq$  轴分量  $u_{diffd}$ 、 $u_{diffq}$  和共模电压  $dq$  轴分量  $u_{comd}$ 、 $u_{comq}$  可实现电流实际值对参考值的快速跟踪以及抑制内部环流, 由此可设计内环电流控制器。外环控制器主要分为功率控制器和电压控制器, 可通过对有功功率、无功功率以及交流侧和直流侧电压的控制输出内环控制器所需的电流参考值。MMC 内外环控制器结构框图 26

如图 3-12 所示。

图 3-12 MMC 内外环控制器结构框图

3.2.2.1 内环电流控制器设计 MMC 内外环控制器主要设计方法如下: 式 (2-13) 中, MMC 输出到交流系统中电流在  $dq$  坐标系下表示为  $i_{vd}$ 、 $i_{vq}$ , 扰动量为  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$ ,  $dq$  轴电流之间存在耦合。

通过控制上下桥臂差模电压  $u_{diffd}$ 、 $u_{diffq}$ , 实现输出电流  $i_{vd}$ 、 $i_{vq}$  对参考值  $i^*_{vd}$ 、 $i^*_{vq}$  的快速跟踪。对式 (2-13) 进行简化, 设:  $\frac{d}{dt} = -\frac{1}{T_{dc}} + \frac{1}{T_{dc}}$  (3-2) 可得到控制量上下桥臂差模电压  $u_{diffd}$ 、 $u_{diffq}$  表达式:

$u_{diffd} = -\frac{1}{T_{dc}} [i^*_{vd} - i_{vd}] (1 + \frac{1}{T_{dc}}) = \frac{1}{T_{dc}} [i^*_{vd} - i_{vd}] (2 + \frac{1}{T_{dc}})$  (3-3) 由此可得到控制量  $u_{diffd}$ 、 $u_{diffq}$  的控制框图如图 3-13 (a) 所示:

a) 控制器框图 b) 输出电流响应框图图 3-13 内环电流控制器输出电流跟踪控制框图 27

图 3-13 所示控制框图实现的是内环电流控制器中输出电流对参考电流值的跟踪这一功能, 内环电流控控制器另一大功能内部环流抑制则需要通过控制共模电压

$u_{comd}$ 、 $u_{comq}$  来实现。MMC 中 a 相输出电流的时域表达式如下:

$i_a = \sin(\omega t) + \frac{1}{\omega L} \sum_{h=6}^{\infty} \frac{1}{h^2} \cos(h\omega t) + \frac{1}{\omega L} \sum_{h=9}^{\infty} \frac{1}{h^2} \cos(h\omega t)$  (3-4) 已知内部环流主要包括直流分量和 2 次谐波分量, 根据式 (3-4) 中可知谐波量主要是 5、7、11、13 及以上次。内部环流中的直流分量是输电线路的工作电流, 2

次谐波分量只在三相桥臂间流动, 不是工作电流, 但是会造成损耗。为了减小损耗,

保证电力稳定高效运输, 2 次分量是需要我们进行抑制的。参照输出电流控制设计,

对式 (2-15) 进行代换, 因此可得到实际控制量上下桥臂共模电压  $u^*_{comd}$ 、 $u^*_{comq}$  的

表达式为:  $u^*_{comd} = -\frac{1}{T_{dc}} [i^*_{vd} - i_{vd}] (3 + \frac{1}{T_{dc}}) = \frac{1}{T_{dc}} [i^*_{vd} - i_{vd}] (4 + \frac{1}{T_{dc}})$  (3-5) 根据上下桥臂共模电压  $u^*_{comd}$ 、 $u^*_{comq}$  的表达式设计控制框图如图 3-14 (a) 所示。

a) 控制器框图 b) 内部环流响应框图图 3-14 内环电流控制器内部环流抑制控制框图在 PSCAD 中搭建的内环电流控制器实际控制模型如图 3-15 所示。 28

图 3-15 逆变侧内环电流控制器模型

3.2.2.2 外环控制器设计外环控制器控制对象有有功功率、无功功率、直流侧电压以及交流侧电压 4 种,

每个时刻都只能控制一种变量。外环控制器的目标是输出内环控制器所需的电流参考值  $i^*_{vd}$ 、 $i^*_{vq}$ 。其中有功类控制量与电流的  $d$  轴分量组成独立回路, 无功类控制量与电流  $q$  轴分量组成独立回路。

为了防止器件电流过大, 必须将电路中负序电流参考值设定为 0, 在负序电流为 0 的情况下, 正序电流与有功功率和无功功率的关系为:  $P = 3 I_{d0} I_{d1} \cos\phi$  (3-13) 设计的功率控制器如图 3-16 所示, 电压控制器如图 3-17 所示, 其中给电流参

29 考值加了限幅环节, 防止器件中电流过大。限幅电流表达式如下:  $I_{d0} = \min(I_{d0\_ref}, I_{d0\_max})$  (3-14) 式中  $I_{d0\_max}$  —— MMC 交流侧相电压最大值;

$I_{d0\_ref}$  —— 上一个周期测量的  $q$  轴电流实际值;  $I_{d0\_max}$  —— 上一个周期测量得到的  $d$  轴电流实际值。

a) 有功功率控制器 b) 无功功率控制器图 3-16 外环功率控制器回路框图

当采用定电压控制时, 控制框图如图 3-17 所示。

a) 直流电压控制器 b) 交流电压控制器图 3-17 外环电压控制器回路框图

3.2.3 电压平衡控制设计

3.2.3.1 子模块电容电压平衡控制 MMC 换流器为子模块级联结构, 其桥臂两端的电压为投入子模块电容电压之和。由于各子模块之间相互独立, 故电容电压易不平衡的现象。本文中系统 MMC

逆变器所采用的为对称混合 MMC 结构, 上下桥臂子模块对称分布, 采取均压控制算法使得电容电压平衡, 通过控制哪些子模块的投入来控制子模块的输出电压。

对每个子模块的电容值电压进行检测并进行排序。当对子模块进行充电时优先对电容电压低的子模块充电, 当子模块放电时, 优先使电容电压高的子模块放电。

3.2.3.2 高低压阀电压平衡控制对于 MMC 换流站, 由于不平衡电流存在会导致高低压阀组功率输出存在差异, 而使得高低压阀组的电压失去平衡, 因此可以根据流过高低压阀组的电流值对阀组发出控制指令, 使得阀组控制能够实现对不平衡电流带来的电压偏差之进行跟踪,

从而对阀组电压进行修正, 实现高低压阀组的电压平衡。控制框图如图 3-19 和 3-20

所示。 30

图 3-18 LCC 整流站高低压阀均压控制图 3-19 MMC 逆变站高低压阀均压控制

3.3 系统换流站间协调控制多端混合直流输电系统的协调控制策略的关键是确保各换流站之间协调配合保证输电稳定性，输出稳定的正弦波形。直流电压的稳定在多端混合直流输电系统中的重要性堪比频率稳定在交流系统中的重要性，因此只要各换流站通过协调配合使直流线路电压保持稳定，就能实现功率平衡，从而保证输电稳定。

多端混合直流输电系统有三个换流站，分别是 LCC 整流站和两个 MMC 逆变站对换流站之间采取主从控制。本文中选取逆变站 MMC1 作为主控站，对其采用定直流电压空值，稳定直流电压，保持功率平衡。本文中多端混合直流输电系统所采取的主从控制 U-P 特性曲线如图 3-20 所示。

图 3-20 系统主从控制 U-P 特性曲线图 3-20 中虚线框为系统运行范围，功率为正表示换流站从交流系统吸收功率输出到直流线路中，功率为负表示换流站从直流线路中吸收功率传输到交流系统中。31

主控站为 MMC1 逆变站，其采取的是定直流电压控制，其电压为一条实线，保持不变，因其为受端，要从直流线路中吸收功率，故其功率为负；从控站为 LCC 整流站，采用的是定直流电流控制，LCC 为送端，输出功率到直流线路中，所以功率为正，MMC2 为从控站 2，采用的是功率控制，也要从直流线路中吸收功率，其功率也为负。三者的功率满足关系式  $P_1+P_2+P_3=0$ 。

当本文中多端混合系统的主控站 MMC1 发生故障退出检修时，三端系统就变成两端系统，此时从控站 MMC2 就要转变成主控站，控制直流电压保持稳定，实现整个系统的功率平衡。

3.4 多端混合直流输电系统稳态仿真在 PSCAD 上搭建了多端混合直流输电系统模型，验证设计的协调控制策略的可行性，仿真时长为 5s，仿真步长为  $50\mu s$ ，采样周期为  $50\mu s$ 。

#### 3.4.1 系统稳态运行时换流站直流侧仿真波形

- a) 换流站直流侧电压/kV
- b) 换流站直流侧电流/k A 32
- c) 换流站直流侧有功功率/Mw

图 3-21 稳态运行时换流站直流侧仿真波形图 3-21 为 LCC 整流站及逆变站 MMC1 和 MMC2 直流侧仿真波形，从图中可看出系统在 1s 内波形波动较大，这是由于系统刚启动时，控制系统刚开始进行调节误差导致，波形存在波动属于正常现象。1s 后系统进入稳态运行，波形处于平稳状态。

从图 3-21 a) 直流侧电压波形中可看出，系统直流线路电压基本保持稳定，略小于  $\pm 800kV$ ，换流站 A (LCC 整流站) 电压最高，正负双极电压差值达到了  $1700kV$ ，

换流站 B (逆变站 MMC1) 与换流站 C (MMC2) 电压幅值略低，并且  $U_{dc-A} > U_{dc-B}$

$> U_{dc-C}$ 。这种现象是由于当电流从换流站 A 流出，经过直流线路 1 段，其线路会有部分消耗，到换流站 B 后直流侧电压就小于换流站 A 直流侧电压，再经直流线路 2 段，电压又有部分损耗，故幅值再度降低。

从图 3-21 b) 直流侧电流仿真波形中可看出换流站 A 直流侧电流为正，换流站 B、C 直流侧电流为负值，这是因为测量时均选择从换流站流出方向为正向。电流从换流站 A 流出，经直流线路流入换流站 B 和换流站 C 中，只考虑电流大小，不考虑正负时，三换流站直流侧电流幅值基本满足  $I_A=I_B+I_C$ 。

图 3-21c) 为换流站直流侧输出有功功率波形，从图中可看出，换流站 A 功率

为正，说明换流站 A 输出有功功率，换流站 B 及换流站 C 输出功率均为负，说明

二者均从直流线路吸收功率，正好符合 A 为送端，B、C 为受端的设计。从功率大小来看，换流站 A 输出功率超过  $7000Mw$ ，换流站 B 吸收功率接近  $4000Mw$ ，换流站 C 吸收有功  $3000Mw$ ，再加上直流线路损耗，功率保持平衡。

整体来看，换流站直流侧电压、直流电流及输出有功功率波形在 1s 后都基本保持平稳状态，并未发生大的波动，说明系统在本章设计的多端混合直流输电系统协调控制策略能够稳定运行，说明协调控制策略具有可行性，能够给实际工程作为参考。33

#### 3.4.2 系统稳态运行时换流站交流系统仿真波形

- a) 逆变站 MMC1 交流侧电压波形 b) 逆变站 MMC2 交流侧电压波形
- c) MMC 换流器内环电流 d q 轴分量 d) LCC 整流器交流侧有功无功功率/Mw/MVar
- e) MMC1 交流侧有功无功功率/Mw/MVar f) MMC2 交流侧有功无功功率/Mw/MVar

图 3-22 换流站交流系统仿真波形图 3-22 为换流站交流系统仿真波形，其中图 3-22 a) 及 3-22 b) 为截取的当系统进入稳定运行状态后的 2s-2.3s 间两个 MMC 换流器交流侧输出三相交流电压波形，

黄线、绿线和红线分别表示 a、b、c 三相波形。从波形中可看出两个 MMC 换流器输出的三相电压波形基本接近正弦波，说明采用的最近电平调制 (NLC) 调制效果较好。

图 3-22 c) 为 MMC 换流器中内部环流在 d 轴和 q 轴分量波形，蓝线表示 d 轴电流分量，绿线表示 q 轴分量。从图中可看出，在系统刚启动时，内环电流出现波动，幅值在 0.3 左右，在 0.6s 后系统启动完成开始进入稳态运行，其内部环流的 d

轴和 q 轴分量基本被抑制到 0，抑制效果明显。说明采取的内环电流控制器的内部

环流抑制控制能够有效抑制系统的内部环流，改善输出波形，有助于提升系统运行效率，减小损耗，保护器件。

图 3-22 d)、3-22 e) 及 3-22 f) 分别为换流站 A、B、C 的有功功率、无功功率仿真波形，蓝色曲线为有功功率波形，绿色曲线为无功功率波形。换流站 A 交流系 34

统发出功率  $7500Mw$ ，发出无功功率接近  $1000MVar$ ，换流站 B 交流系统吸收有功功率约为  $4000Mw$ ，发出无功约  $100MVar$ ，换流站 C 吸收有功接近  $3000Mw$ ，吸收无功功率  $900MVar$ ，再对比之前的三换流站直流侧互功率，可以发现，交流系统输出功率经换流站 A 进入到直流线路中，其中换流器 A 和直流线路均消耗了部分功率，功率再经换流站 B 和 C 输入到二者所接的交流网络中，这就完成了完整的功率传输。传输过程中除了线路损耗和换流器消耗的部分功率外，基本满足送端发出的功率等于两受端吸收功率之和，整个输电过程功率保持平衡，说明系统在协调控制

策略能够持续的稳定运行，输送功率始终保持平衡，则所设计的协调控制策略在实际工程中具有可行性，能够被应用到实

际工程当中。

3.5 小结本章基于第二章中对多端混合直流输电系统的理论研究，在 PSCAD 软件上搭建了多端混合直流输电系统模型，对模型建立过程进行了简要概述，最后对所搭建的多端混合直流输电系统模型进行仿真，验证了所搭建的系统能够稳定运行，说明搭建的多端混合直流输电系统的准确性。

(1) 对多端混合直流输电系统的拓扑结构进行分析，并画出主电路接线图，根据系统的主电路接线图，在 PSCAD 上搭建出系统的主电路模型。

(2) 对各换流站之间采用主从控制策略，由于 MMC 换流器采取的模块化级联结构，在控制直流电压方面具有优势，故将逆变站 MMC1 选为主控站，采用定直流电压控制，控制直流侧电压的稳定，保持功率的平衡。整流站作为从控站 1，采取定直流电流控制，逆变站 MMC2 作为从控站 2，采用定有功功率控制策略。根据系统的协调控制策略，在 PSCAD 上搭建出相应的控制模型。

(3) 在 PSCAD 上对搭建的输电系统模型进行仿真验证，仿真结果证明系统在提出的协调控制策略控制下能够稳定的运行，传输功率始终保持平衡，运行效果良好，说明所搭建的直流输电系统能够稳定运行，为之后的故障特性研究奠定了基础。

35

第 4 章多端混合直流输电系统交流系统故障特性分析

要保证多端混合直流输电系统长期稳定运行，光有其在稳态下的控制策略是远远不够的，当系统运行出现故障时，就需要有控制和保护策略来保证系统能够安全稳定运行，并尽可能提高系统运行效率，减少因异常工况下运行带来的损耗。本文的多端混合直流输电系统是参照南方电网公司 2020 年底正式投运的乌东德送电工程所设计，系统运行的电压等级高，电流大，当系统运行在异常工况下，如发生交流系统故障或直流线路故障，控制和保护策略应当及时作出响应，防止电流过大烧坏器件，尽可能维持系统稳定运行，保证功率传输，并且隔离故障部分，不让故障范围扩大。当一个 MMC 换流站需要检修时，可以实现第三端在线退出，转变成两端输电系统，功率能够稳定传输；当检修完毕，在控制策略作用下，同样可以实现第三端在线投入。

4.1 换流站交流系统故障特性

4.1.1 整流站交流系统故障特性

输电系统换流站交流系统故障指的是与换流站相接的交流系统侧三相某相或几相发生了接地造成电压该相为 0。故障类型可分为：单相接地故障、两相接地故障以及三相接地故障，其中单相接地故障较为常见，两相接地和三相接地发生的可能性很小。故本文中以单相接地故障为例进行分析，当系统整流侧发生单相接地故障时，交流系统不再是三相对称系统，交流系统电压开始降低，根据第二章中 LCC

换流器数学模型中式 2-1 的整流器输出直流侧电压公式可知直流侧电压  $U_{dc1}$  是与阀侧空载线电压成正相关的，当交流系统电压下降时，直流侧电压也会发生降落。

指 标
疑似剽窃文字表述
1. 交流系统电压 500kv，频率 50Hz，换流站 A 为双极 12 脉动 LCC 换流站，换流站 B 和换流站 C 均为双极 MMC 21 电平换流站，直流线路电压等级正负 800kv，输送功率为换流站

4. 018\_第4部分 总字数：9466

相似文献列表		
去除本人文献复制比：3.1%(294) 文字复制比：3.1%(294) 疑似剽窃观点：(0)		
1	电网不平衡故障下电力电子变压器控制策略 冯宇鹏;吴金龙;王先为;刘欣和;牛化鹏;姚为正; - 《电力建设》- 2016-07-01	0.7% (64) 是否引证：否
2	柔性直流配网不平衡控制研究 杨峰(导师：徐习东) - 《浙江大学硕士论文》- 2016-01-01	0.7% (62) 是否引证：否
3	交流系统故障时MMC-HVDC系统的控制和保护策略研究 曹春刚(导师：赵成勇) - 《华北电力大学硕士论文》- 2012-03-01	0.6% (61) 是否引证：否
4	基于模块化多电平换流器的柔性直流换流站过电压分析与保护 许伟(导师：崔翔;高冲) - 《华北电力大学硕士论文》- 2014-03-01	0.4% (34) 是否引证：否
5	不对称交流电网下MMC-HVDC系统谐波分析 陈和洋;郭峰;叶荣; - 《电器与能效管理技术》- 2021-03-30	0.3% (32) 是否引证：否
6	并网光伏逆变器无功控制策略 廖波;晁阳;李根富; - 《南方电网技术》- 2013-12-20	0.3% (32) 是否引证：否
7	多直流馈入系统运行特性分析 刘翀(导师：印永华;蒋卫平;朱艺颖) - 《中国电力科学研究院硕士论文》- 2009-07-01	0.3% (30) 是否引证：否
8	特高压直流输电线路快速保护研究 全冰冰(导师：邹贵彬;王敬华) - 《山东大学硕士论文》- 2014-04-30	0.3% (29) 是否引证：否



系统稳态运行时，直流线路电流  $I_{dc}$  表达式为： $I_{dc} = \frac{U_{dc1} - U_{dc2}}{R_{dc}}$  (4-1) 式中  $U_{dc1}$ —— 逆变侧直流电压值；

—— 直流线路等效电阻。由式 4-1 可知，直流线路等效电阻不会发生变化，直流线路电流与整流站和逆变站直流侧电压差值成正比的。由于逆变站 MMC1 采用的是定直流电压控制策略，

故其直流侧电压值不会发生较大改变，所以当电压  $U_{dc1}$  发生跌落时，电流  $I_{dc}$  也会开始下降。当整流侧直流电压  $U_{dc1}$  跌落到小于逆变侧直流电压  $U_{dc2}$  时，电流将会迅速减小到 0。则整流站无法输出功率，导致输电中断。

另外，当系统发生单相接地故障时，由于其为三相不对称故障，故障电流、电压会有负序分量，负序分量在经过换流器变换会变成二倍频率分量进入直流线路中， 36

即在直流线路中会出现 100Hz 的电流、电压分量。根据这一特点，可以通过测量直流线路中是否有 100Hz 分量来判断整流站交流系统侧是否发生三相不对称故障。

4.1.2 逆变站交流系统故障特性当逆变站发生交流系统单相接地故障时，由于三相电压不再平衡，系统中出现负序分量（由于联结变压器的特殊接线方式，MMC 交流侧无零序电流通路，也就不存在零序分量）。逆变站交流系统故障特性如下：

(1) 交流系统不平衡，存在负序分量，MMC 作为电压源型换流器，正常运行时只输出正序波形，无法抵消负序分量，再与直流量和正序分量叠加会使电流过大烧坏器件；

(2) 交流系统单相故障会使交流电压幅值降低，造成直流线路电压上升。由上一节分析可知，当逆变站直流电压上升，而整流站直流电压不变，直流电流下降。

逆变站吸收功率受限，导致功率不平衡，输电系统无法正常运行。

(3) 与整流站交流系统故障相同，由于负序电流的存在，经过换流器变换产生二倍频率（100Hz）分量进入直流线路中，会引起直流线路电压波动，造成功率传输不稳定。

#### 4.2 交流系统故障下的控制保护

4.2.1 LCC 最小触发角控制由式 2-1 中可知整流侧直流电压除与阀侧空载线电压正相关外，还与触发角  $\alpha$  的余弦值正相关，故触发角越小，直流电压越大，故当发生交流系统故障时，可将触发角减小到最小值，工程上一般取  $5^\circ$ ，可得到最大直流侧电压。最小触发角控制框图如图 4-1 所示。

图 4-1 最小触发角控制框图

4.2.2 MMC 正负序系统内环电流控制器当发生交流系统故障时，由于负序电流的产生会使得电流值过大，容易超出功率器件的允许电流值，故 MMC 控制器设计目标为抑制负序电流，避免电流过大损坏器件。参考第三章的内环电流控制器设计，可以得到控制量差模电压的正负序分 37

量在 dq 和 d-lq-1 坐标下的指令值  $u^*_d(s)$ 、 $u^*_q(s)$  和  $u^*_{d-l}(s)$ 、 $u^*_{q-l}(s)$  表达式： $u^*_d = \frac{1}{2}(u^*_d + u^*_{d-l})$ 、 $u^*_q = \frac{1}{2}(u^*_q + u^*_{q-l})$  (4-1)

$u^*_{d-l} = \frac{1}{2}(u^*_d - u^*_{d-l})$ 、 $u^*_{q-l} = \frac{1}{2}(u^*_q - u^*_{q-l})$  (4-2) 根据式 (4-1) 和 (4-2) 控制量表达式可以得到正负序系统的内环电流控制器

框图如图 4-2 和 4-3 所示。

a) 控制器框图 b) 输出电流响应框图

图 4-2 正序系统内环电流控制器框图

a) 控制器框图 b) 输出电流响应框图图 4-3 负序系统内环电流控制器框图前文中已经提过，负序系统的内环电流控制器的目的是为了抑制负序电流，所以在控制时负序电流参考值  $i^*_{vd}=0$ 、 $i^*_{vq}=0$ 。正序电流参考值按照第三章中的计算方法确定。 38

4.2.3 MMC1 最大调制比控制根据 4.1 中交流系统故障特性可知，整流站交流系统出现单相接地故障时，整流站直流侧电压降低，电流减小到 0，使得功率传输中断。为了防止电流减小到 0，

除了采取整流侧最小触发角控制提高整流侧直流电压外，还可以通过适当减小逆变侧直流电压的方式经行调节，避免因整流侧直流电压低于逆变侧直流电压造成功率传输中断。为此，可以在 MMC1 换流器中增加最大调制比控制策略，当交流系统发生不对称故障时，可以启动该控制策略适当降低逆变侧直流电压。

电压调制比  $M$  定义为换流器交流侧输出电压与直流侧电压之的比值。而在 MMC 中调制比为换流器上下桥臂差模电压  $u_{diffm}$  与直流电压的一半的比值： $M = \frac{u_{diffm}}{U_{dc}/2}$  (4-8) 各换流站间直流电流可表示为：

$$I_{dc} = \frac{U_{dc1} - U_{dc2}}{R_{dc}} \quad (4-9)$$

式中  $U_{dc1}$ ——LCC 整流站直流侧电压； $U_{dc2}$ ——MMC1 逆变站直流侧压； $U_{dc3}$ ——MMC2 逆变站直流侧压。由 MMC 换流器数学模型可知，当换流器交流侧电压不变时，上下桥臂的差模电压也不变。再根据式 (4-8) 可知，当上下桥臂差模电压  $u_{diffm}$  不变时，调制比  $m$

越大，直流侧电压越小，二者成反比。则当发生交流系统故障时，只需将电压调制比控制到最大就能有效降低逆变站直流侧电压。当电压调制比小于 1 时，MMC 交流侧输出波形的总谐波畸变率 THD 是随着调制比的变大而减小的，但是当调制比大于 1 时，随着调制比的变大，THD 会迅速上升，所以电压调制比应尽量小于 1。

工程上通常取电压调制比为 0.85，运行时最大值为 1。

最大调制比控制是根据换流器上下桥臂差模电压  $u_{diffm}$ ，计算得到交流系统输出电压基波的平均峰值，再通过式 (4-8) 计算得到实时调制比  $m$  的值，将得到的实时调制比的值与参考值  $m_{ref}$  进行比较，得出二者差值  $\Delta m$ ，输入 PI 控制器中，得到直流电压参考值的偏差量  $\Delta U_{dc2\_ref}$ ，对直流电压参考值进行修正，使得参考值减小。

由于 MMC1 逆变站采用的是定直流电压控制，其直流侧电压会对参考值进行跟踪，

电压参考值变小，实际的电压值也会随之下降。从而达到降低逆变站直流侧电压保证功率传输不被中断的目标。控制策略框图如图 4-4 所示。 39

图 4-4 逆变站 MMC1 最大调制比控制策略框图

4.2.4 MMC2 直流电压偏差控制策略在多端混合直流输电系统正常运行时，整流站输出功率应等于两个逆变站吸收功率，保

持功率平衡。送端交流系统发生单相接地故障时，电压减小，电流也降低，输出功率会大幅下降。此时为了保证能够给 MMC2 受端稳定传输功率，需要 MMC1 换流站输出功率进行调节，但若超出 MMC1 调节范围，即输出功率小于吸收功率。为了稳定直流线路电压，对 MMC2 进行直流电压偏差控制。控制策略框图如图 4-5 所示。

(a) MMC2 外环控制器 (b) 运行方式选择模块图 4-5 MMC2 直流电压偏差控制框图

4.3 交流系统故障仿真分析为了验证本章设计的控制策略，在第三章搭建多端混合直流输电系统模型的基础上，加入新设计的控制策略。系统模型如图 4-6 所示，各器件仿真参数与第三章相同。

#### 4.3.1 整流站 LCC 交流系统故障仿真分析

4.3.1.1 整流站交流侧单相接地故障仿真分析在整流站 LCC 交流系统侧设置 a 相接地故障，设置仿真时长为 5s，仿真步长 40

为  $50\mu s$ ，故障开始时间为 2s，故障持续时间为 0.6s。当 2s 时系统开始发生 a 相接地故障，交流系统电压变小导致整流站直流侧电压快速下降，系统发出故障信号。

LCC 换流器接收到故障信号，迅速转变成最小触发角控制，触发角减小到  $5^\circ$ ，对直流侧电压进行补偿；MMC1 换流器也开始最大调制比控制，降低 MMC1 直流侧电压，避免因整流站直流侧电压低于逆变站直流侧电压使电流减小到 0，从而导致功率传输中断；MMC2 换流器转变为电压偏差控制，维持电压稳定。仿真波形如图

4-8 至 4-11 所示。

a) 直流侧电压/kV (a 相接地故障)

b) 直流侧电流/kA (a 相接地故障)

c) 直流侧有功功率/Mw (a 相接地故障) 41

图 4-8 整流站交流系统 a 相接地故障三换流站电压、电流及有功功率仿真波形

a) 交流系统电压/kV b) 交流系统有功、无功功率/Mw/MVar

图 4-9 整流站交流系统 a 相接地故障下 LCC 交流系统电压及有功、无功功率波形图

a) 交流系统电压/kV b) 交流系统有功、无功功率/Mw/MVar

图 4-10 整流站交流系统 a 相接地故障下 MMC1 交流系统电压及有功、无功功率波形图

a) 交流系统电压/kV b) 交流系统有功、无功功率/Mw/MVar

图 4-11 整流站交流系统 a 相接地故障下 MMC2 交流系统电压及有功、无功功率波形图图 4-8 为系统发生整流站交流系统 a 相接地故障下的各换流站直流侧电压、电流及有功功率波形图，其中左侧为系统在故障控制策略下的仿真波形，右侧为常规控制策略下仿真波形，蓝色曲线代表换流站 A 的波形，绿色曲线为换流站 B 的波形，

红色为换流站 C 的波形。图 4-9 至 4-11 为系统发生整流站交流系统 a 相接地故障下各换流站交流系统电压及有功、无功功率波形。其中左侧为电压波形，a、b、c 三相分别用黄、绿、红三种颜色表示，由于故障发生时间在第 2s，故障时长 0.6s，故选取了包括故障在内的 2s-3s 的仿真波形。右侧为交流系统发出有功功率、无功功率波形图，蓝色曲线为有功功率波形，绿色曲线为无功功率波形。

从图 4-8 a) 波形中可看出 2s 时系统发生整流站交流系统 a 相接地系统故障后，

换流站 A 直流侧电压迅速下降，图 4-8 a) 图中电压幅值降到 1300kV 以下，随后在控制策略作用下，电压值开始回升。对应图 4-8 b1) 中直流电流可以看到在系统整流侧直流电流在发生故障时电流值大幅下降，但并未减小到 0，幅值由稳定运行时 42

的 4 kA 下降到 1 Ka。反映到输出有功功率上，图 4-8 c1) 图中系统在故障控制策略下整流站仍在输出功率，输出功率值由稳定运行时的超过 7000Mw 下降到

1000Mw，功率传输并未完全中断。而且可以看到换流站 C 的直流侧电流只在故障

发生时和故障结束后短暂的出现波动，其他时间波形基本保持稳定，功率波形也几乎不受影响。

从图 4-9 中可看出，当整流站交流系统发生 a 相接地故障后，整流站交流系统因 a 相接地，a 相的电压变为 0，只有 B 相和 C 相电压，交流系统输出的有功功率快速下降，幅值由稳定运行时的 7500Mw 降到在 1000Mw 上下波动，无功功率上升到了超过了 10000MVar。

从图 4-10 中可以看到逆变站 MMC1 交流系统电压波形几乎不受影响，但是从吸收有功功率转为输出有功功率，这是由于当发生故障时为了保证换流站 C 的稳定功率传输，所以从交流系统中输出功率到 MMC1 换流器，进入直流线路中。从图

4-11 中可看到逆变站 MMC2 交流系统电压波形和有功、无功功率基本保持稳定，

不受故障的影响。

整流站交流系统 a 相接地故障仿真结果表明，当系统发生整流站交流系统故障时，在设计的交流系统故障控制策略下，LCC 换流器能够通过最小触发角控制对直流侧电压进行补偿，避免整流侧电压下降过低，同时 MMC1 换流站采取最大调制比控制策略能够有效降低逆变站直流侧电压，防止直流电流降为 0，使得功率能够稳定传输。

4.3.1.2 整流站交流侧两相接地故障仿真分析在整流站 LCC 交流系统侧设置 a、b 两相接地故障，设置仿真时长为 5s，仿真步长为  $50\mu s$ ，故障开始时间为 2s，故障持续时间为 0.6s。其直流侧电压、电流及功率仿真波形如图 4-12 所示。

a) 直流侧电压/kV (a、b 两相接地故障) 43

b) 直流侧电流/kA (a、b 两相接地故障)

c) 直流侧有功功率/Mw (a、b 两相接地故障)

图 4-12 整流站交流系统 a、b 相接地故障三换流站电压、电流及有功功率仿真波形图 4-12 为整流站的交流系统发生 a、b 两相接地故障时三换流站直流线路上的仿真波形，从 a) 电压波形图中可以看出，当 2s 交流系统开始出现两相接地故障时，

整流侧直流电压瞬间下降到约为 1150kV，然后又上升，接下来波形基本与 MMC1



逆变站直流电压波形重合，则其二者电压相等，电流下降到 0，很明显可以从 b) 中的电流波形可以看出，电流值确实下降到 0。对应到 c) 中的功率波形则反映出整流站不再输出功率，逆变站 MMC1 由吸收功率转为输出功率，逆变站 MMC2 吸收来自 MMC1 输出的功率，二者之间功率达到平衡。2.6s 故障清除之后，整流站电压升高，继续输出功率，逆变站 MMC1 也由输出功率转为吸收功率，输电系统重新达到稳定运行状态。

从单相故障波形与两相故障波形对比中可以看出，当系统发生单相故障时，整流站仍能输出部分功率，但是一旦发生两相接地故障之后，将不再输出功率，故当系统发生整流站交流系统故障时，可由此特征判断故障类型。

#### 4.3.2 逆变站 MMC1 交流系统故障仿真分析 44

4.3.2.1 逆变站 MMC1 交流系统单相接地故障仿真在逆变站 MMC1 交流系统设置 a 相接地故障，设置仿真时长为 5s，仿真步长为  $50\mu s$ ，故障开始时间为 2s，故障持续时间为 0.6s。当系统发生故障时，MMC1

换流器内环电流控制器发挥作用，抑制交流侧产生的负序电流，避免负序电流进入直流系统中，导致电流过大烧坏设备，同时也阻止直流线路中出现二倍频分量，保

证系统功率传输稳定。仿真波形如图 4-13 至 4-15 所示：

a) 直流侧电压/k V (a 相接地故障)

b) 直流侧电流/k A (a 相接地故障)

c) 直流侧有功功率/Mw (a 相接地故障)

图 4-13 MMC1 交流系统 a 相接地故障换流站直流侧电压、电流及有功功率仿真波形 45

a) 交流系统电压/kV b) 交流系统有功、无功功率/Mw/MVar

图 4-14 MMC1 交流系统 a 相接地故障 MMC1 交流系统电压及有功、无功功率波形

a) 交流系统电压/kV b) 交流系统有功、无功功率/Mw/MVar

图 4-15 MMC1 交流系统 A 相接地故障 MMC2 交流系统电压及有功、无功功率波形图 4-13 为 MMC1 交流系统 a 相接地故障换流站直流侧电压、电流及有功功率仿真波形。从 4-13 a) 直流侧电压波形中可看出在 MMC1 换流器交流系统发生单相接地故障下，在故障控制策略整流侧与逆变侧直流电压均有略微下降。由于 MMC

换流器中有负序系统内环电流控制器，故交流侧发生的三相不对称故障产生的负序电流无法经过 MMC 换流器流入直流线路中，直流线路中也就没有 100Hz 分量，电压波形较为平稳，未发生较大波动。

图 4-13 b) 为直流电流仿真波形，从图 4-13 b) 中可看出在故障控制策略下，

当发生故障时整流站直流侧电流略有抬升，逆变站 MMC1 侧直流电流波动较剧烈，

MMC2 电流先降低后升高，这个过程经过 0.2s，接下来保持稳定，直到 2.6s 时故障清除，电流先升高后下降，最后进入稳态运行。

图 4-13 c) 为换流站直流侧输出有功功率波形。从 c) 中可以看到 MMC1 在发生故障后，由于启动故障控制策略，换流站 B 有功功率发生波动，直流系统输入换流器功率和交流系统吸收功率不平衡，对于模块中电容进行充电。换流站 A 与换流站 C 有功功率波形均较为平稳，其中换流站 A 输出功率略有抬升，这是由于电流升高所致。换流站 C 的功率只在故障发生时和故障结束系统恢复时发生了些许波动，

其他时间波形均较为稳定。说明功率传输较为稳定。系统的当故障清除之后，交流

系统开始吸收功率，子模块放电，直流系统继续向 MMC1 换流站输入功率，系统恢复稳态运行。

图 4-14 为 MMC1 交流系统 a 相接地故障换流站 MMC1 交流系统电压及有功、

无功功率仿真波形图。从图 a) 中可看出在 MMC1 交流系统发生 a 相接地故障时，46

MMC1 换流器交流系统电压出现波动，交流电压幅值略有降低；从 b) 吸收有功功率转为输出有功功率。图 4-15 为 MMC1 交流系统 a 相接地故障换流站 MMC2 交流系统电压及有功、无功功率仿真波形图，其中 a) 为电压波形，b) 为有功、无功功率波形。从波形图中可看出换流站 MMC2 在故障下输出的交流电压波形极为稳定，

有功功率和无功功率也没有大的波动，说明功率传输也稳定。

4.3.2.2 逆变站 MMC1 交流系统两相接地故障仿真在逆变站 MMC1 交流系统设置 a 相接地故障，设置仿真时长为 5s，仿真步长为

$50\mu s$ ，故障开始时间为 2s，故障持续时间为 0.6s，仿真波形如下图所示。

a) 直流侧电压/kV (a、b 两相接地故障)

b) 直流侧电流/k A (a、b 两相接地故障)

c) 直流侧有功功率/Mw (a、b 两相接地故障) 47

图 4-16 MMC1 交流系统 a、b 两相接地故障换流站直流侧电压、电流及有功功率仿真波形图 4-16 为逆变站 MMC1 交流系统发生 a、b 两相接地故障时的换流站直流侧电压、电流及功率波形，从 a) 中电压可以发现当 2s 系统发生两相接地故障时，三换流站直流侧电压波形均发生剧烈波动，其中 LCC 整流站及 MMC2 逆变站直流侧波形波动幅度较小，而 MMC1 逆变站直流侧波形波动幅度极大。对比电流波形发现整流站直流侧电流在 4kA 附近波动，而 MMC1 与 MMC2 直流侧电压均在 0 上下波动，也就是电流发生变向。从功率波形中不难看出，整流站功率一直为正，在输出功率，逆变站 MMC2 虽然波形波动幅度较大，但仍可以看出在吸收功率，只有 MMC2

功率在输入和输出间变化。在实际工程电力传输过程中，我们可根据系统故障特征对故障点及故障类型进行判断，从而快速排除故障，恢复系统稳定运行。

#### 4.3.3 逆变站 MMC2 交流系统故障仿真分析

4.3.3.1 逆变站 MMC2 交流系统单相接地故障仿真在逆变站 MMC2 交流系统设置 a 相接地故障，设置仿真时长为 5s，仿真步长为

$50\mu s$ ，故障开始时间为 2s，故障持续时间为 0.6s，仿真波形如下。

a) 直流侧电压/k V (a 相接地故障)

b) 直流侧电流/k A (a 相接地故障) 48

c) 直流侧有功功率/Mw (a 相接地故障)

图 4-17 MMC1 交流系统 a 相接地故障换流站直流侧电压、电流及有功功率仿真波形  
a) 交流系统电压/kV b) 交流系统有功、无功功率/Mw/MVar

图 4-18 MMC2 交流系统 a 相接地故障 MMC2 交流系统电压及有功、无功功率波形  
a) 交流系统电压/kV b) 交流系统有功、无功功率/Mw/MVar

图 4-19 MMC2 交流系统 A 相接地故障 MMC2 交流系统电压及有功、无功功率波形图 4-17 为 MMC2 交流系统 a 相接地故障换流站直流侧电压、电流及有功功率仿真波形。从 a) 直流侧电压波形中可看出在 MMC2 换流器交流系统发生单相接地故障下，在故障控制策略整流侧与逆变侧直流电压均有略微下降。由于 MMC 换流器中有负序系统内环电流控制器，故交流侧发生的三相不对称故障产生的负序电流无法经过 MMC 换流器流入直流线路中，直流线路中也就没有 100Hz 分量，电压波形较为平稳，未发生较大波动。

图 4-17 b) 为直流电流仿真波形，从图 4-17 b) 中可看出在故障控制策略下，当发生故障时整流站直流侧电流略有抬升，逆变站 MMC1 侧直流电流减小到 0，MMC2 电流呈现较大幅度的波动，这个过程一直持续到故障排除，电流先升高后降低，最后进入稳态运行。 49

图 4-17 c) 为换流站直流侧输出有功功率波形。从 c) 中可以看到 MMC2 在发生故障后，由于启动故障控制策略，换流站 C 有功功率发生波动，直流系统输入换流器功率和交流系统吸收功率不平衡，对子模块中电容进行充电。换流站 A 有功功率波形均较为平稳，而换流站 B 基本在 0 周围波动。其中换流站 A 输出功率略有抬升，这是由于电流升高所致。说明功率传输较为稳定。当故障清除之后，交流系统开始吸收功率，子模块放电，直流系统继续向 MMC2 换流站输入功率，系统恢复稳态运行。

图 4-18 为 MMC2 交流系统 a 相接地故障换流站 MMC1 交流系统电压及有功、无功功率仿真波形图。从图 a) 中可看出在 MMC1 交流系统发生 a 相接地故障时，MMC1 换流器交流系统电压基本未出现波动，交流电压幅值不变；从吸收有功功率转为输出有功功率。图 4-19 为 MMC2 交流系统 a 相接地故障换流站 MMC2 交流系统电压及有功、无功功率仿真波形图，其中 a) 为电压波形，b) 为有功、无功功率波形。从波形图中可看出换流站 MMC2 在故障下输出的交流电压波形较为稳定，有功功率和无功功率出现较小的波动，说明 MMC2 吸收的功率经过逆变器进入交流系统中的功率传输较为稳定。

4.3.3.2 逆变站 MMC2 交流系统两相接地故障仿真在逆变站 MMC2 交流系统设置 a 相接地故障，设置仿真时长为 5s，仿真步长为 50 μs，故障开始时间为 2s，故障持续时间为 0.6s，仿真波形如下。

a) 直流侧电压/kV (a、b 两相接地故障) 50  
b) 直流侧电流/k A (a、b 两相接地故障)  
c) 直流侧有功功率/Mw (a、b 两相接地故障)

图 4-20 MMC2 交流系统 a、b 两相接地故障换流站直流侧电压、电流及有功功率仿真波形图 4-20 为逆变站 MMC1 交流系统发生 a、b 两相接地故障时的换流站直流侧电压、电流及功率波形，从 a) 中电压可以发现当 2s 系统发生两相接地故障时，三换流站直流侧电压波形均发生剧烈波动，其中 LCC 整流站及 MMC1 逆变站直流侧波形波动幅度较小，而 MMC2 逆变站直流侧波形从动幅度极大。整流站与 MMC1 逆变站直流侧电压均先略微下降后上升且均在波动，二者变化的幅值相似。对比电流波形发现整流站直流侧电流在 4kA 左右波动，而 MMC1 与 MMC2 直流侧电流均出现较大幅度的波动，且电流在 0 上下变化，即电流发生变向。从功率波形中不难看出，整流站功率一直为正，输出功率较为稳定，逆变站 MMC1 首先功率变为正，输出功率，经过 0.1s 的时间，变为负数，仍在吸收功率，MMC2 功率在输入和输出间变化。

5. 018_第5部分			总字数：8583
相似文献列表			
去除本人文献复制比：4%(341)		文字复制比：4%(341)	疑似剽窃观点：(0)
1	王晶盲审硕士论文28 - 《学术论文联合比对库》- 2011-12-28	1.1% (94) 是否引证：否	
2	MMC-HVDC直流输电线路保护原理研究 宁连营(导师：邵能灵) - 《上海交通大学硕士论文》- 2018-01-01	1.1% (92) 是否引证：否	
3	03100_115031910098_宁连营 宁连营 - 《学术论文联合比对库》- 2017-12-27	1.1% (92) 是否引证：否	
4	宁连营 MMC-HVDC直流输电线路保护原理研究 宁连营 - 《学术论文联合比对库》- 2017-12-21	1.1% (92) 是否引证：否	
5	蔡东晓_201721014547_多端混合直流输电系统PI控制器参数优化研究 蔡东晓 - 《学术论文联合比对库》- 2019-04-18	0.6% (54) 是否引证：否	
6	基于RTDS的特高压直流输电仿真系统研究 辛俊峰 - 《学术论文联合比对库》- 2015-11-08	0.5% (47) 是否引证：否	
7	高压直流输电线路继电保护方案研究 郑俊超(导师：文明浩) - 《华中科技大学博士论文》- 2019-08-01	0.4% (37) 是否引证：否	
8	基于MMC的柔性直流输电系统直流侧保护研究 王鑫(导师：杨明玉) - 《华北电力大学硕士论文》- 2019-03-01	0.3% (30) 是否引证：否	



9	基于机器视觉的玉米行道识别系统设计与研究 谭文豪(导师: 桑永英;白彦杰) - 《河北农业大学硕士论文》- 2021-04-30	0.3% (30) 是否引证: 否
10	直流输电保护技术工程解析及谐波保护改进方案研究 张时耘(导师: 尹项根) - 《华中科技大学硕士论文》- 2016-05-24	0.3% (30) 是否引证: 否

原文内容

在实际工程电力传输过程中，当系统出现故障时，我们可根据系统故障波形特征与实际工程中的波形进行对比，从而对故障点及故障类型进行判断，快速排除故障，恢复系统稳定运行。

4.4 小结本章首先从理论上对直流输电系统发生交流系统故障时其电压电流以及功率特性进行分析，针对系统发生的交流系统故障，对 LCC 换流器实行最小触发角控 51

制，将触发角控制到最小值 5°。对 MMC1 换流器采取最大调制比控制策略，对 MMC2 换流器采取电压偏差控制策略。然后通过对第三章搭建的混合直流输电系统PSCAD 模型加入故障控制模块，并对模型送端和两个受端一依次设置交流系统故障进行仿真实验，分析其仿真波形，研究其交流系统故障特性。

(1) 首先通过理论分析系统发生交流故障下直流线路中电压、电流及功率变化情况，根据现有的理论为搭建好的 PSCAD 模型加入故障下控制模块。

(2) 对整流侧交流系统分别设置单相接地及两相接地故障进行仿真实验，通过分析仿真波形发现当整流侧交流系统发生单相接地故障时，其整流站直流侧电压电流均会下降，导致输出功率降低，但是仍在输出功率。当发生两相接地故障时，其电压下降较多，电压与 MMC1 直流侧电压相等，此时 LCC 与 MMC1 之间的线路不存在电压差，故其电流为 0，功率传输中断。

(3) 依次对 MMC1 交流系统侧设置单相接地故障及两相接地故障，分析故障波形发现，当发生单相接地故障时，整流站直流电压与 MMC2 直流电压均较为稳定，波动幅度较小，MMC1 直流电压波动幅度略大，但整体较为平稳。而电流与功率波形中，LCC 及 MMC2 的波形虽然有略微变化，但整体较为稳定，MMC1 侧直流电流发生大幅度的震荡，其功率也随之震荡。发生两相接地故障时，三者的电压、

电流及功率波形均出现震荡，区别在于 LCC 与 MMC2 的电压、电流及功率波形震荡幅度不大，MMC2 的电压、电流及功率波形发生大幅度的震荡。故实际工程中可通过其发生故障时的波形特征来判断发生的故障类型。

(4) 对 MMC2 交流系统侧依次设置单相接地及两相接地故障，仿真波形显示当发生单相故障时，三换流站直流侧电压均发生较小幅度的波动，而电流波形中LCC 直流侧电流略有升高，稳定在 4kA，MMC1 直流侧电流接近于 0，其输入功率也接近 0，MMC2 的电流及功率波形均发生大幅度震荡。当发生两相接地故障时，三换流站的电压、电流及功率波形均发生剧烈波动，区别在于 LCC 与 MMC1 的波形变化幅度小，MMC2 波形变化幅度大。本章对不同换流站交流系统设置单相接地与两相接地故障，分析不同交流故障下的三换流站直流电压、电流及功率波形特征，根据其不同故障下表现出的波形特性可应用于实际工程中判断实际故障的故障点及故障类型。 52

第 5 章多端混合直流输电系统直流线路故障特性分析

5.1 直流线路故障类型及特性直流输电线路是在直流输电系统中连接各换流站，传输电能的重要设备。各换流站通过直流线路连接构成完整的回路，从而实现将功率从整流站向逆变站的传输。

故当直流线路发生短路故障时，短路电流过大会烧坏设备，造成换流阀闭锁，中断功率传输，对系统的稳定运行有极大威胁。常见的直流线路故障可分为三类，分别是单极接地、双极接地及极间短路故障。

(1) 单极接地故障指输电线路一极发生接地短路，远距离高压直流线路有可能因雷电或线路绝缘子污秽引起对地闪络故障，有时输电线路下方有明火，也会引发直流线路对地闪络故障。单极接地故障发生时，由于输电线路接地发生短路，会产生较大的短路电路，烧坏设备，甚至引发火灾，同时可能会造成与故障线路相连的换流阀闭锁，导致该线路无法进行功率传输，只有一条线路能进行功率传输，降低传输功率。

(2) 双极接地故障指直流线路的两极均发生接地短路，其发生的概率较低，一旦发生会造成巨大危害。由于双极直流输电系统的对称性，双极接地故障相当于两条输电线路均发生单极接地故障，此时两极的换流阀均会因故障而闭锁，功率无法传输。

(3) 极间短路故障指输电线路两极之间连成回路，造成短路，其发生的可能性非常小。引起极间短路故障最有可能的原因就是由于输电线路较长，当风比较大时，使两条输电线路搭在一起，形成通路。如果交直流输电线路存在跨越的情况，也有可能发生交流线路和直流线路碰线故障。发生极间短路故障时，断路电流迅速变大，容易烧坏设备，并且也不在向逆变站传输功率。

5.2 直流线路故障控制策略

5.2.1 LCC 直流线路自适应重启功能根据直流线故障特点可知，系统发生的直流线路故障大多都是瞬时性故障，故障发生时直流电流会迅速抬升。对于不太严重的故障，首先通过整流站结构中的平波电抗器和直流滤波器等设备进行限流，然后通过低压限流控制和最大触发角控制降低直流侧电压，进一步限制短路电流。当故障较为严重时，就需要启动 LCC 整流器控制系统中的直流线路故障重启动功能（DFRS）实现故障清除，系统重启动，

恢复输电。 53

DFRS 功能实现过程按时间顺序分为三个阶段：移相、去游离和重启。功能流程如图 5-1 所示：

- (1) 移相将整流器晶闸管触发角  $\alpha$  增加到超过 90°，此时 LCC 换流站由整流转变成逆变，由输出功率转为吸收功率。
- (2) 去游离设置一定的时间（一般设置为 100-500ms），等待故障点熄弧，恢复绝缘状态。
- (3) 重启去游离时间结束，整流侧将触发角控制到最小触发角，换流站重新运行在整流状态，如果故障已清除且恢复绝缘，系统重启，电流升高，直流电压上升到超过设定的电压阈值（可以设定为全压重启、80%降压重启或 70%降压重启），则重启成功，系统恢复稳定运行状态。若故障仍然存在，则依旧处于短路状态，直流电压无法升高到超过设定的电压阈值，重启失败。

图 5-1 DFRS 流程图

5.2.2 MMC 换流器直流线路故障自清除直流线路发生短路故障时，由于短路会使逆变站直流测电压降低，直流电流下降，桥臂两端电压下降，子模块中的电容就开始放电，电流通过短路回路会使直流短路电流迅速上升，将会引起换流器过电流闭锁。所以应在故障初期就通过换流器控制策略实现故障自清除，维持系统稳定运行。

本文设计的 MMC 换流器桥臂子模块数量为  $N$ ，其中全桥子模块数量为  $N_{FB}$ ，

半桥子模块为  $N_{HB}$ ，调制方法采用最近电平逼近，交流电压调制比为  $M_{ac}$ ，则换流器输出电压  $u$  为：54

$= 2\cos(\alpha + \theta)$  (5-1) 式中  $U_{dc}$  —— MMC 直流侧电压额定值；

$\theta$  —— MMC 输出交流电压与交流系统电压的相位差。在系统稳态运行时，若不考虑桥臂中电感和电阻分压，MMC 直流侧电压  $U_{dc}$

可表示为： $U_{dc} = U_{dcn} + \Delta U_{dc}$  (5-2) 式中  $N_{up}$  —— 上桥臂投入子模块数； $N_{down}$  —— 下桥臂投入子模块数； $U_{di}$  —— 桥臂上第  $i$  个电容电压；从式 5-1 中可知当子模块电压均值不变时，直流侧电压随上下桥臂投入子模块数变化而变化。因为全桥子模块可以实现负向投入，即输出电压反向，故当上下桥臂中投入的子模块中半桥子模块闭锁，全桥子模块处于负向投入工作状态时，输出的直流电压就变为负值。

定义直流调制比为换流器输出直流电压  $U_{dc}$  与直流侧额定电压  $U_{dcn}$  之比，用  $M_{dc}$

表示。可将直流测电压  $U_{dc}$  表示为： $U_{dc} = U_{dcn} M_{dc}$  (5-3) 当桥臂中投入的子模块均处于正向投入状态时，桥臂输出电压最大，设为  $U_{max}$ ；

$U_{dc} = U_{dcn} M_{dc}$  (5-4) 说明输出直流电压最大值是桥臂子模块电容电压之和。其值与直流侧额定电压

$U_{dcn}$  接近。则可将式 5-1 和 5-2 改写：

$U_{dc} = 2\cos(\alpha + \theta) U_{di}$  (5-5) 从式 5-5 中可看出，MMC 换流器输出交流侧电压可以通过交流电压调制比  $M_{ac}$

控制，输出直流侧电压可通过直流电压调制比  $M_{dc}$  控制。当发生直流线路故障时，

换流器可以通过交流侧输入能量实现桥臂稳定，即保持最大输出电压不变，通过控制直流电压调制比减小降低直流侧电压，抑制短路电流，实现故障自清除。本文中设计的全桥子模块占比为 80%，故可调节范围为  $[-0.8, 1.0]$ ，输出直流电压为  $[-0.8U_{max}, 1.0U_{max}]$ 。

### 5.3 直流线路故障仿真分析 55

对系统直流线路不同位置依次设置单极接地故障，设置仿真时长为 2.5s，仿真步长为  $50\mu s$ ，故障开始时间为 1.5s，故障持续时间为 0.2s。故障点设置如表 5-1 所示。

表 5-1 直流线路单极接地故障故障点设置

故障点	故障点 1	故障点 2	故障点 3	故障点 4	故障点 5
故障位置	直流线路 1 起点	直流线路 1 中点	直流线路 1 终点	直流线路 2 终点	直流线路 2 终点

对 5 个故障点依次设置单极接地故障，仿真波形如图 5-2 到 5-4 所示，

- 故障点 1 直流侧电压/kV
- 故障点 2 直流侧电压/kV
- 故障点 3 直流侧电压/kV 56
- 故障点 4 直流侧电压/kV
- 故障点 5 直流侧电压/kV

图 5-2 直流线路不同位置处单极接地故障三换流器直流侧电压波形图 5-2 为在 5 个故障点依次设置单极接地故障后，三换流器直流侧电压仿真

波形，仿真时间设置为 2.5s，故障开始于 1.5s，持续时间 0.2s，LCC、MMC1 及 MMC2 换流站直流侧电压波形分别用蓝、绿、红三种颜色表示。从波形中可以看到整流侧直流电压和逆变站 MMC1 直流侧电压均下降，由于 MMC1 采用的 80% 的全桥子模块，具有直流故障自清除功能，电压降低幅值没有 LCC 直流侧电压下降幅值大。电压下降后，LCC 换流器接收到故障信号，启动启动直流线路故障重启动功能 (DFRS)，经过移相、去游离、重启动三个阶段，电压开始回升，最后恢复稳定运行。

图 a)、b) 和 c) 为故障点 1、2、3 的电压波形，分别位于直流线路 1 段起点、中点和终点，对比整流侧电压波形可以看出，故障点 1 的波形电压下降到 850kV，故障点 2 电压降低到 950kV，故障点 3 只有略微下降，说明故障点距离整流站越远，其直流侧电压降低越少。对比 MMC1 直流电压可发现故障点 1 电压只有些许下降，故障点 2 电压由 1600kV 下降到 1400kV，故障点 3 则出现大幅度下降，而 MMC2 直流侧电压在故障点 1 和故障点 2 发生故障时幅值基本没发生变化，只在故障点 3 发生故障时出现小幅下降，说明在线路 1 段发生单极接地故障时，MMC2 直流侧电压所受影响较小。故可根据其故障特性通过直流侧电压降低的幅值来推断故障点的位置。

图 d) 和 e) 为故障点 4、5 的电压波形，分别位于直流线路 2 段起点和终点，

从图中可看出当故障发生时整流站直流侧电压基本没有发生波动，而 MMC1 直流侧电压出现大幅下降，下降到 850kV，MMC2 直流侧电压降低 200kV。可以发现在直流线路 2 段发生故障时，故障点距离 MMC2 换流站越近，故障对 MMC2 直流侧电压影响越大，可据此通过 MMC1 及 MMC2 电压下降的幅值来判断故障点在线路

2 段的位置。

- 故障点 2 直流侧电流/kA
- 故障点 2 直流侧电流/kA
- 故障点 3 直流侧电流/kA 58
- 故障点 4 直流侧电流/kA
- 故障点 5 直流侧电流/kA

图 5-3 直流线路不同位置处单极接地故障三换流器直流侧电流波形图 5-3 为 5 个故障点发生单极接地故障时三换流器直流侧电流波形，故障点 1、

2、3 位于直流线路 1 段，整流站直流侧电流波形随着故障点距离整流站越远，电流升高的幅值越小，相对的，MMC1 直流侧电流上升的幅值越来越大，MMC2 直流侧

电流先升高后降低，且变化幅度较小，说明直流线路 1 段发生的短路故障对 MMC2 直流侧电流影响不大。

故障点 4、5 位于直流线路 2 段，由于故障点 3 与故障点 4 分别位于直流线路 1

段终点和直流线路 2 段起点，所以其电流波形较为接近，故障点 5 最为接近换流站 MMC2，其整流侧电流波形较为平稳，几乎没有发生波动，MMC1 直流侧电流先减小后增大，MMC2 直流侧电流在发生故障下一刻电流瞬间由流入换流器变为流出，且幅值变化较大。 59

a) 故障点 1 直流侧有功功率/Mw

b) 故障点 2 直流侧有功功率/Mw

c) 故障点 3 直流侧有功功率/Mw

d) 故障点 4 直流侧有功功率/Mw

e) 故障点 5 直流侧有功功率/Mw

图 5-4 直流线路不同位置处单极接地故障三换流器有功功率仿真波形图 5-4 为 5 个故障点发生单极接地故障时三换流器直流侧有功功率波形，从中 60

可以看出，在线路 1 段发生单极接地故障时，由于单极短路，整流站流出电流变大，

故其输出功率变大，经过故障控制调节，电压降低，电流减小，使得输出功率也减小。而对于逆变站 MMC1，由于短路，使得电流由换流器流到故障点处，电流反向，

故 MMC1 换流器由吸收功率转为输出功率。且随着故障点距离 LCC 整流站越远，

故障时整流站输出功率上升幅值越小，相对的 MMC1 输出功率的幅值越大。

在线路 2 段发生单极接地故障时，LCC 换流器输出功率波形波动较小，说明线

路 2 段发生故障时，LCC 换流器所受影响较小，MMC1 换流器功率波形变化幅度较大，且随着故障点距离 MMC1 换流站越远，变化幅度越小，MMC2 换流器由吸收功率转为输出功率。

综上所述，在直流线路 1 段发生单极接地故障时，随着故障点距离 LCC 换流站越远，其直流侧电压、电流及输出功率变化越小，换流器 MMC1 直流侧电压变

化幅值则是逐渐变大，MMC2 的波形则基本不发生变化，说明距离越远所受影响越

小；在直流线路 2 段发生单极接地故障时，LCC 换流站电压、电流及输出功率波形基本不受到影响，不发生变化，相应的 MMC1 换流器直流侧波形则是随着故障点距离 MMC2 换流器越近，波形变化幅度就越小，MMC2 换流器直流侧电压、电流、功率波形变化越大。

5.3 小结本章主要是在第三章搭建的多端混合直流输电系统模型上进一步对系统运行在直流线路故障下的波形特性进行了研究，针对系统发生直流线路故障时的 LCC

直流线路故障重启动功能和 MMC 换流器的全桥子模块作用下的直流线路故障自清除功能。最后在 PSCAD 上搭建了多端混合直流输电系统模型，对本章所设计的控制策略进行仿真分析，得到如下结论：

(1) 对直流线路发生接地故障的故障特性进行理论分析，并根据现有的理论对在 PSCAD 上搭建好的多端混合直流输电系统模型添加直流线路故障控制模块。

(2) 对直流线路 1 段起点、中点及终点三个不同位置处依次设置单极接地故障进行仿真实验，实验验证了三换流站直流侧电压、电流及功率波形变化特性。对于 LCC 整流站，故障点距离整流站越远，其发生故障时的电压、电流及功率波动幅值越小，相对的 MMC1 换流站波形波动幅度逐渐变大，而 MMC2 换流站直流侧波形则几乎没有影响。对直流线路 2 段起点、终点处依次设置单极接地故障进行仿真

实验，LCC 整流站波形几乎不受影响，MMC1 换流站波形波动幅度则逐渐变小，

MMC2 换流站直流电压、电流及功率波形波动幅度则逐渐变大。

通过研究直流线路不同故障点处的故障特性，可应用于当实际工程中发生直流线路故障时推断故障点位置，以便快速清除故障。 61

## 第六章结论与展望

5.1 结论传统直流输电采用的 LCC 换流器具有传输距离远、输电容量大、技术成熟以及造价低等优点，但其也有不可避免的缺陷—易发生换相失败，大大增加了直流输电的风险，对受端电网的稳定运行有很大威胁。而柔性直流输电技术中采用的模块化多电平 MMC 换流器就完美避免了这一缺陷，其不存在换相失败的风险，并且易于控制，但是存在造价高昂以及输电容量低，远距离输电困难的缺陷。本文结合 LCC

和 MMC 的优势提出了一种多端混合直流输电系统，系统采取一个送端，两个受端的三端混合输电拓扑结构。其中送端整流站采用双极 12 脉动 LCC 整流器，两个受端逆变站均采用 MMC 换流器。这种新型拓扑不仅能解决换相失败问题，还能进行远距离、大容量的电能运输。本文基于多端混合直流输电系统，对其故障特性进行了深入研究，完成的工作和得到的结论如下：

(1) 介绍了 12 脉动 LCC 换流器的拓扑结构并对其工作原理进行分析，建立 LCC 换流器数学模型。简述了模块化多电平 MMC 换流器的拓扑结构，并对子模块

工作状态进行了阐述，并分析了 MMC 换流器工作原理和子模块工作模式。根据 MMC 换流器的等效电路建立基尔霍夫方程，得到 MMC 数学模型，对数学模型进行 dq 变换，推导出在 dq 坐标系下的数学模型。设计了送端为 LCC 换流器，两个送端为 MMC 换流器的多端混合直流输电系统结构。

(2) 根据设计的多端混合直流输电系统结构在 PSCAD 上搭建系统模型，并根据 LCC 换流器定直流电流控制，MMC 数学模型对其内环电流控制器和外环控制器的数学模型，设计出适用于本系统的内环电流控制器和外环控制器。对各换流站

之间采用主从控制策略，将 MMC1 逆变站作为主控站，采用定直流电压控制策略，

LCC 整流作为从控站 1，采用定直流电流控制，MMC2 作为从控站 2，采用定有功功率控制策略。紧接着在 PSCAD 上搭建的多端混合系统模型中加入控制模块，最后进行仿真实验，验证了搭建的系统运行效果良好，具有可行性。



(3) 根据交流系统故障下 LCC 换流器的最小触发角控制策略, MMC 的负序系统内环电流控制器, MMC1 换流器的最大调制比控制策略以及电压偏差控制。在 PSCAD 模型中加入交流系统故障控制模块并设置交流系统故障进行仿真验证, 仿真表明:

- 1) 在系统发生整流站交流系统故障时, 所设计的 LCC 最小触发角控制策略能有效补偿整流站直流侧电压; MMC1 的最大调制比控制能够降低逆变站直流侧电压, 避免直流电流减小到 0, 造成功率传输中断; MMC2 电压偏差控制策略能够有效维持电压稳定, 平衡功率。
- 2) 在系统发生逆变站 MMC1 交流系统故障时, MMC 中的负序系统内环电流控制器能够有效抑制因交流系统发生不对称三相故障所产生的的负序电流, 阻止其进入直流线路中, 避免直流线路中出现 100Hz 电流分量, 防止电流过大造成设备被烧坏。

(4) 对直流线路发生接地故障的故障特性进行理论分析, 并根据现有的理论对在 PSCAD 上搭建好的多端混合直流输电系统模型添加直流线路故障控制模块。

对直流线路 1 段起点、中点及终点三个不同位置处依次设置单极接地故障进行仿真实验, 实验验证了三换流站直流侧电压、电流及功率波形变化特性。对于 LCC 整流站, 故障点距离整流站越远, 其发生故障时的电压、电流及功率波动幅值越小, 相对的 MMC1 换流站波形波动幅度逐渐变大, 而 MMC2 换流站直流侧波形则几乎没有影响。对直流线路 2 段起点、终点处依次设置单极接地故障进行仿真实验, LCC

整流站波形几乎不受影响, MMC1 换流站波形波动幅度则逐渐变小, MMC2 换流站直流电压、电流及功率波形波动幅度则逐渐变大。

通过对交流系统故障及直流线路不同故障点处的故障特性研究, 可对实际工程中发生直流线路故障推断故障点位置提供帮助, 以便快速清除故障。

5.2 展望本文在多端混合直流输电系统控制策略方向的研究取得了一定成果, 后续工作可以围绕以下几个方面展开:

(1) 拓扑结构本文提出的系统拓扑为三端结构, 之后的研究可以考虑更多端的混合直流输电系统, 如四端、五端。当研究风电并网时, 还可将 MMC 设计成送端, LCC 设计成受端。

(2) 协调控制本文所采用的协调控制策略为主从控制, MMC1 为主控站, 采用定直流电压控制, LCC 和 MMC2 为从控站, 分别采用定直流电流控制和定有功功率控制, 之后的研究可以考虑针对换流站设计新控制策略。

(3) 故障特性研究本文只对交流系统故障和直流电路故障下的控制策略做了研究, 之后可以针对高低压阀组的在线投入和退出的控制进行研究, 以及可以对当换流站需要进行检修时, 如何做到系统持续运行时, 第三端的在线投入和切除的研究

#### 参考文献

- [1] Wang Zhixin, Jiang Chuanwen, Ai Qian, et al. The key technology of offshore wind farm and its new development in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009, 13 (1): 216-222.
- [2] 辛培哲, 蔡声霞, 邹国辉, 等. 适应经济社会发展的智能电网发展战略研究[J]. 分布式能源, 2018, 3(1): 21-27.
- [3] 彭吕斌, 何剑, 谢开贵. 特高压交流和直流输电系统可靠性与经济性比较[J]. 电网技术, 2017, 42(04): 2098-2207.
- [4] Hongbo Jiang, Ake Ekstrom. Multiterminal HVDC Systems in Urban Areas of Large Cities[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 23(4): 2278-2284.
- [5] 王旭辉. 世界首个特高压混合直流工程将开建[N]. 中国能源报, 2018-03-29(22).
- [6] 徐殿国, 刘瑜超, 武健. 多端直流输电系统控制研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(27): 2-22.
- [7] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [8] Jung J J, Cui S, Lee J H. A New Topology of Multilevel VSC Converter for a Hybrid HVDC Transmission System[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(6): 4299-4209.
- [9] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [10] Li R S, Asher G. Frequency Control Design for Offshore Wind Farm grid with LCC-HVDC Link Connection [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(3): 2085-2092.
- [11] Zhuang Y, Menzies R W, Nayak O B, et al. Dynamic Performance of A STATCOM at an HVDC Inverter Feeding a Very Weak AC System[J]. IEEE Transactions on power Systems, 1994, 9(3): 2350-2358.
- [12] Chan-Ki K. Dynamic Coordination Strategies between HVDC and STATCOM[C]. Transmission & Distribution Conference Exposition: Asia and Pacific. Seoul, South Korea: IEEE, 2009: 2-9.
- [13] 徐政, 张哲任, 刘高任. 柔性直流输电网的电压控制原理研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 54-59.
- XU Zheng, ZHANG Zheren, LIU Gaoren. Research on Voltage Control Principle of Flexible DC Transmission Power Grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 54-59.
- [14] 吴俊, 方芳, 赵晓明. 柔性直流输电舟山换流站无源 HVDC 启动试验中典型故障分析[J]. 浙江电力, 2016, 35(2): 6-9.
- WU Jun, FANG Fang, ZHAO Xiaoming. Analysis on Typical Faults in Passive 64 HVDC Startup Tests in Zhouyang VSC HVDC Converter Station[J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(2): 6-9.
- [15] Omiš-Bellmunt O, Liang J, Ekanayake J, et al. Topologies of multiterminal HVDC-VSC transmission for large offshore wind farms[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 82(2): 272-282.



- [16] Li Kuan, Li Xingyuan, Chen Shiet al. Investigation of Hybrid Pseudo Bipolar HVDC Performances Supply Power to Passive AC Network[J], 2014, 275 (7): 306.
- [17] Li S, Ma Y, Hua Y. Reliability Equivalence and Sensitivity Analysis to UHVDC Systems Based on the Matrix Description of the F&D Method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 32(2): 456-464.
- [18] 赵成勇. 柔性直流输电建模和仿真技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [19] 王永平, 赵文强, 杨建明, 等. 混合直流输电技术及发展分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 42(7): 256-267.
- [20] 吴亚楠, 安婷, 庞辉, 等. LCC/VSC 混合直流电网模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2077-2083.
- [21] 黄伟煌, 饶宏, 黄莹, 等. 一种基于常规直流输电系统的混合直流改造方案[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 2862-2868.
- [22] Bozhko S, Li R, Blasco-Gimenez R, et al. STATCOM-controlled HVDC Power Transmission for Large Offshore Wind Farms: Engineering Issues[C]. IECON 2006 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics. IEEE, 2006: 4229-4224.
- [23] H?fner J, Jacobson B. Proactive Hybrid HVDC Breakers-A key innovation for reliable HVDC grids[J]. CIGRE paper, 2021, 264.
- [24] Chaudhuri N R, Majumder R, Chaudhuri B. Stability analysis of VSC MTDC grids connected to multimachine AC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 26(4): 2772-2784.
- [25] R.E Torres-Olguin, M.Molinas. A direct power control for hybrid HVDC transmission Systems[J]. IEEE Trondheim Power Tech, 2021.
- [26] 冯明, 李兴源, 李宽. 混合直流输电系统综述[J]. 现代电力, 2015, 32(2).
- [27] 杜至刚. 中国特高压电网发展战略规划研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
- [28] 万启发. 浅谈我国交流特高压输电前景[J]. 高电压技术, 2000(02): 30-32+34.
- [29] 舒印彪, 张文亮. 特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(32): 2-6.
- [30] 世界首个 $\pm 2200\text{kV}$ 特高压直流输电工程成功启动双极全压送电[J]. 变压器, 2019, 56(2): 4.
- [31] 陈堃, 宋宇, 代维谦, 等. 高压直流输电技术发展及其工程应用[J]. 湖北电力, 2018, 42(4): 2-6.
- [32] 熊雄, 季宇, 李蕊, 孙丽敬, 吴鸣, 刘海涛. 直流配用电系统关键技术及应用 65 示范综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6802-6813+7225.
- [33] 韩蕾. 基于 UPFC 提升特高压交直流系统稳定性的研究[D]. 电子科技大学, 2018.
- [34] Yogarathinam A, Kaur J, Chaudhuri N R. Impact of Inertia and Effective Short Circuit Ratio on Control of Frequency in Weak Grids Interfacing LCC-HVDC and DFIG-based Wind Farms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(4): 2040-2052.
- [35] 张桂斌, 徐政. 直流输电技术新发展[J]. 中国电力, 2000, 33(3): 32-35.
- [36] 吴汇文. 我国特高压直流技术的应用与展望[J]. 中国高新区, 2018, (07): 233-234.
- [37] 肖建民, 宋胜利, 卢亚军. 高压直流系统改进型最小换相裕度控制策略[J]. 电力工程技术, 2020, 39(06).
- [38] 欧阳金鑫, 张真, 肖超. 直流输电系统换相失败预防控制改进策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22).
- [39] 孙广, 王阳, 薛枫. 特高压直流输电线路改进双端行波故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24).
- [40] Liu Zhen, Gao Houlei, Luo Sabei. A fast boundary protection for an AC Transmission line connected to an LCC-HVDC inverter station[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2).
- [41] Yunke Zhang, Yongli Li, Jinzhao Song. Pearson correlation coefficient of current derivatives based pilot protection scheme for long-distance LCC-HVDC transmission lines[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 226.
- [42] Song Jinzhao, Li Yongli, Zhang Yunke. Fault steady-state analysis method for the AC system with LCC-HVDC infeed[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 292: PP 206994.
- [43] Jing L, Cai X, Molinas M. Optimal Design of Controller Parameters for Improving the Stability of MMC-HVDC for Wind Farm Integration[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(2): 40-53.
- [44] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020: 38-72.
- [45] 黄强, 邹贵彬, 高磊, 等. 基于 HB-MMC 的直流电网直流线路保护技术研究综述[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2830-2840.
- [46] Huang Weibo, Luo Guomin, Cheng Mengxiao. Protection Method Based on Wavelet Entropy for MMC-HVDC Overhead Transmission Lines[J]. Energies, 2021, 24(3): 678-678.
- [47] Zhou Jingsen, Wei Jinxiao, Xie Gangwen. Architecture Design of Digital Twin 66 Platform for AC&DC Hybrid Transmission System with MMC-HVDC[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1754(2): 022042.
- [48] Janbazi Ghadi Reza, Mehrasa Majid, Ebrahim Adabi M. Lyapunov theory-based control strategy for multi-terminal MMC-HVDC systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021.
- [49] Li Botong, Wang Wenxin, Li Bin. Research on a current calculation method and characteristics of pole to ground faults in true bipolar MMC-HVDC grids

considering line coupling[J]. Electric Power Systems Research. 2021, 292.

[50]Bakas P, et al. A review of hybrid topologies combining line-commutated and full-bridge converters[J]. IEEE Trans Power Electron 2017;32(20):7435 - 48.

[51]马文轩, 李斌, 王振. 受端混联型 LCC-MMC 直流输电系统的自适应电压协调控制方法[J]. 高电压技术, 2021.

[52]张悛宁, 罗易萍, 洪妍妍. 基于多端口混合直流断路器的 LCC-VSC 多端混合直流输电系统故障清除方案[J]. 电力系统保护与控制. 2021, 49(04).

[53]Wang Jian, Zhang Yanxia, Li Ting. Equivalent characteristic impedance based hybrid-HVDC transmission line fault location[J]. Electric Power Systems Research. 2021, 294. 67

攻读硕士学位期间参与的科研项目

[1] 电力系统实时数字仿真平台建设（一期），南方电网有限责任公司科技项目，项目号：YNKJXM20170548.

指 标
疑似剽窃文字表述
1. 2 直流线路故障控制策略
5.2.1 LCC 直流线路自适应重启功能根据直流线故障特点可知，系统发生的直流线路故障大多都是瞬时性故障，
2. 三端混合输电拓扑结构。其中送端整流站采用双极 12 脉动 LCC 整流器，两个受端逆变站均采用 MMC 换流器。

说明：1. 总文字复制比：被检测论文总重合字数在总字数中所占的比例

2. 去除引用文献复制比：去除系统识别为引用的文献后，计算出来的重合字数在总字数中所占的比例

3. 去除本人文献复制比：去除作者本人文献后，计算出来的重合字数在总字数中所占的比例


4. 单篇最大文字复制比：被检测文献与所有相似文献比对后，重合字数占总字数的比例最大的那一篇文献的文字复制比


5. 指标是由系统根据《学术论文不端行为的界定标准》自动生成的


6. 红色文字表示文字复制部分；绿色文字表示引用部分；棕灰色文字表示作者本人文献部分

7. 本报告单仅对您所选择比对资源范围内检测结果负责



 [amlc@cnki.net](mailto:amlc@cnki.net)

 <http://check.cnki.net/>

 <http://e.weibo.com/u/3194559873/>