

华北电力大学

硕士学位论文

MMC-HVDC 系统的暂态特性分析研究

Research on Transient Characteristics of
MMC-HVDC System

凌博文

2019 年 3 月

国内图书分类号：TM713
国际图书分类号：621.3

学校代码：10079
密级：公开

硕士学位论文

MMC-HVDC 系统的暂态特性分析研究

硕士研究生：凌博文

导师：刘崇茹教授

申请学位：工学硕士

学科：电气工程

专业：电力系统及其自动化

所在学院：电气与电子工程学院

答辩日期：2019年3月

授予学位单位：华北电力大学

Classified Index: TM713

U.D.C: 621.3

Thesis for the Master Degree

**Research on Transient Characteristics of
MMC-HVDC System**

Candidate:	Ling Bowen
Supervisor:	Prof. Liu Chongru
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Subject:	Electrical Engineering
Speciality:	Power System and Its Automation
School:	School of Electrical and Electronic Engineering
Date of Defence:	March, 2019
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

摘 要

当今世界,为了应对经济发展与环境保护、资源紧张的矛盾而大力发展可再生能源。柔性直流输电以其功率独立控制、调节灵活、谐波水平低、无需无功补偿、没有换相失败问题,特别适用于可再生能源发电并网等优点备受学术界和工程界的关注和青睐。而模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的应用,使得柔性直流输电系统的电压等级和输送容量进一步提高,柔性直流输电的应用领域进一步拓宽,柔性直流输电作为灵活、可控的先进输电技术在电网中扮演着越来越重要的角色。本文主要针对 MMC-HVDC 系统交、直流侧故障的暂态特性分析开展了研究工作。

针对 MMC-HVDC 系统暂态特性分析的适应性问题,建立了 MMC 适应不对称故障分析和对称故障分析的控制系统,详细分析了 MMC 控制系统的各个环节和基本工作原理,介绍了 MMC-HVDC 系统常用的接地方式。

针对 MMC-HVDC 系统交流侧故障的暂态特性分析,以换流站近端不对称故障为例详细分析了 MMC 的控制器对故障的响应。控制器响应后,MMC 所提供短路电流包括暂态和稳态两个过程;故障后 MMC 在交流侧表征为电流源,其幅值和相位可由内环电流参考值派克反变换求出;所能提供的最大稳态短路电流被控制器限幅环节限制。结合 MMC 提供短路电流特性提出了一种计算稳态短路电流的方法。最后在 PSCAD/EMTDC 下结合实际工程参数搭建了双端 MMC-HVDC 系统作了仿真验证。

针对 MMC-HVDC 系统直流侧故障的暂态特性分析,详细分析了三种典型直流侧故障机理,分析了暂态过程电压、电流产生机理和特性,并推导了相应的数学计算公式。单极接地故障主要导致非故障极母线和换流器交流侧设备的过电压。单极断线故障会导致非故障极和故障极母线过电压,且故障极母线过电压更严重。双极短路主要会导致桥臂器件和直流线路过电流。最后在 PSCAD/EMTDC 下搭建了双端 MMC-HVDC 系统作了仿真验证。

关键词: 模块化多电平换流器; 暂态特性; 不对称故障分析; 短路电流; 过电压; 过电流

Abstract

Nowadays, in order to deal with the contradiction between economic development, environmental protection and resource shortage, renewable energy is vigorously developed. Flexible HVDC has attracted much attention and favor from academia and engineering circles for its advantages of independent power control, flexible regulation, low harmonic level, no reactive power compensation and no commutation failure, especially for grid-connected renewable energy generation. The application of modular multilevel converter (MMC) makes the voltage level and transmission capacity of flexible HVDC system further improved, and the application field of flexible HVDC is further broadened. As a flexible and controllable advanced transmission technology, flexible HVDC plays an increasingly important role in the power grid. In this paper, the transient characteristics of AC and DC side faults in MMC-HVDC system are studied.

Aiming at the adaptability of transient characteristic analysis of MMC-HVDC system, the control system of MMC adapting to asymmetric fault analysis and symmetric fault analysis is established. The control links and basic working principles of MMC control system are analyzed in detail, and the common grounding modes of MMC-HVDC system are introduced.

Aiming at the transient characteristics of AC side faults in MMC-HVDC system, the response of MMC controller to faults is analyzed in detail with asymmetric faults near converter station as an example. After the controller responds, the short-circuit current provided by MMC includes two processes: transient state and steady state; after the fault, MMC is represented as a current source on the AC side, and its magnitude and phase can be calculated by the inverse Park transformation of the reference value of the inner current; the maximum steady-state short-circuit current provided by MMC is limited by the current limiting link of the controller. A method for calculating steady-state short-circuit current is proposed based on the characteristics of short-circuit current provided by MMC. Finally, a two-terminal MMC-HVDC system based on practical engineering parameters is built under PSCAD/EMTDC and verified by simulation.

Aiming at the transient characteristics analysis of DC side faults in MMC-HVDC system, three typical DC side fault mechanisms are analyzed in detail, the generation mechanism and characteristics of voltage and current in transient process are analyzed, and the corresponding mathematical formulas are deduced. The single-pole grounding fault mainly leads to the overvoltage of the non-fault pole bus and AC side equipment of converter. The single-pole disconnection fault leads to the

overvoltage of non-fault pole and fault pole bus, and the fault pole bus is more serious. The pole-to-pole short circuit fault mainly leads to the overcurrent of bridge arm devices and DC lines. Finally, a two-terminal MMC-HVDC system is built under PSCAD/EMTDC and verified by simulation.

Keywords: modular multilevel converter; transient characteristics; asymmetric fault analysis; short-circuit current; overvoltage; overcurrent

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪 论.....	1
1.1 课题背景及研究的目的和意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 MMC 交流侧故障的暂态特性分析现状.....	2
1.2.2 MMC 直流侧故障的暂态特性分析现状.....	3
1.3 国内外 MMC-HVDC 的工程应用.....	4
1.4 本文主要工作.....	5
第 2 章 MMC-HVDC 系统的基本工作原理.....	7
2.1 MMC 基本结构和工作原理.....	7
2.2 适合不对称分析的 MMC 控制系统.....	8
2.2.1 相序分离环节和锁相环.....	8
2.2.2 MMC 的外环功率控制器和限幅环节.....	9
2.2.3 MMC 的内环电流控制器.....	10
2.2.4 MMC 的环流抑制.....	11
2.2.5 MMC 的通用控制系统.....	12
2.3 MMC-HVDC 系统的结构和接地方式.....	13
2.4 本章小结.....	14
第 3 章 MMC 交流侧故障的暂态特性分析.....	16
3.1 MMC 与发电机近端故障电流对比分析.....	16
3.2 MMC 交流侧近端故障分析.....	17
3.2.1 外环功率控制器对故障的响应.....	17
3.2.2 限幅环节对故障的响应.....	20
3.2.3 内环电流控制器对故障的响应.....	20
3.3 MMC 交流侧故障仿真分析.....	20
3.4 MMC 交流侧故障电流计算.....	25
3.5 本章小结.....	27
第 4 章 MMC 直流侧故障的暂态特性分析.....	28
4.1 MMC-HVDC 系统单极接地故障的暂态特性分析.....	28
4.1.1 单极接地故障理论分析.....	28

4.1.2 单极接地故障仿真验证	31
4.2 MMC-HVDC 系统单极断线故障的暂态特性分析	34
4.2.1 单极断线故障理论分析	34
4.2.2 单极断线故障仿真验证	35
4.3 MMC-HVDC 系统双极短路故障的暂态特性分析	38
4.3.1 双极短路故障理论分析	38
4.3.2 双极短路故障仿真验证	41
4.4 本章小结	43
第 5 章 结论与展望	44
5.1 结论	44
5.2 工作展望	44
参考文献	46
攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果	50
致 谢	51

第 1 章 绪 论

1.1 课题背景及研究的目的和意义

当前, 经济社会快速发展, 能源紧张、气候变化、环境污染等问题日益严峻, 为了应对资源和环境危机, 在全世界范围掀起了一次新的能源革命^[1]。各国大力鼓励和支持以风能、太阳能、海洋能、潮汐能、地热能等多种形式可再生能源的开发和利用, 基于各种形式的可再生能源开发利用以及并网发电稳定性等问题成为研究热点。但是, 由于风力、光照、潮汐等自然资源存在着随机性、间歇性、较为分散、远离用电负荷中心等特点, 因此采用直流输电技术进行能源利用相比交流输电在电力系统调峰、电能质量、电力系统安全稳定等方面具有较大优势, 而基于电压源换流器的柔性直流输电 (VSC-HVDC) 由于其灵活可控等特点能很好的解决这些技术问题。

1990 年, 加拿大麦吉尔大学学者提出了基于 VSC 的直流输电概念。ABB 公司将 VSC 与聚合物电缆结合在一起, 提出了 HVDC Light 的轻型直流输电概念。1997 年, 第一个基于 VSC 的直流输电工程的投产, 国际大电网会议 (CIGRE) 和美国电气与电子工程师学会 (IEEE) 将其定名为“VSC-HVDC”即电压源换流器型高压直流输电。我国专家学者们又称“VSC-HVDC”为柔性直流输电。基于 VSC 的高压直流输电没有换相失败、无功补偿等问题, 还能调相运行, 谐波小, 有功、无功能够独立解耦控制, 易于构成多端输电系统, 相比于基于 LCC 的高压直流输电在可再生能源发电并网、无源网络或孤岛供电、直流配电网、异步系统互联等方面具有巨大优势和广阔应用前景^[2-4]。

国内外已知投运的柔性直流输电工程采用的 VSC 拓扑主要有两电平、三电平换流器以及模块化多电平换流器 (MMC) 三种。两电平、三电平换流器结构简单, 便于制造和维护, 但为维持较高的电压波形质量, 投切频率高, 开关损耗较大, 且谐波含量高, 换流阀承受的电压高^[5]。2001 年由德国慕尼黑联邦国防大学学者 A. Lesnicar 和 R. Marquardt 提出的新型 VSC 拓扑结构即模块化多电平器 (MMC)^[6], 由于 MMC 具有较好的扩展模块化设计, 子模块冗余设计, 输出谐波含量低, 电压质量高, 开关频率低, 开关损耗小等优点, 比较适用于高压大容量的功率传输, 在可再生能源并网、直流配电网、电力市场, 系统互联, 提高电能质量等方面具有巨大的应用潜力。随着 MMC 的调制和控制策略的日臻成熟, 可以预期, 未来在高压大容量乃至特高压直流输电, MMC 型柔性直流输电将扮演着举足轻重的角色^[7]。

由于 MMC 拓扑的优势和广阔应用前景，目前国内外新投运的柔性直流输电工程基本采用 MMC 拓扑，MMC-HVDC 系统接入交流系统的电压等级和传输功率也逐步提高，实际 MMC-HVDC 系统运行中遭受的大干扰如故障可能会对交流电网造成巨大冲击，因此针对 MMC-HVDC 系统的暂态特性分析研究具有十分重要的理论价值和实际意义。

1.2 国内外研究现状

迄今为止，对于 MMC-HVDC 系统的暂态分析研究主要涉及 MMC 交流侧故障特性分析、MMC 直流侧故障特性分析、MMC-HVDC 系统的小信号稳定三方面。关于 MMC-HVDC 系统的小信号稳定分析已有相当多的文献报道了其详细的建模以及分析过程。本文工作主要研究 MMC-HVDC 系统的故障特性，因此下面将着重介绍 MMC 交流侧故障暂态特性分析以及 MMC 直流侧故障暂态特性分析现状。

1.2.1 MMC 交流侧故障的暂态特性分析现状

实际电网运行中，交流电网发生不对称故障，负载或者元件阻抗不平衡导致电网电压不对称的现象十分常见。因此，要求柔性直流输电系统在交流电网发生故障时仍能继续运行以保证交流系统的安全稳定。适用于电网不对称情形下的 MMC-HVDC 的控制策略研究是当前国内外的一个研究热点。文献[8]提出了基于电网电压不平衡时的 VSC-HVDC 负序电压补偿控制，并指出由于电网负序电压的存在而产生有功、无功、直流电压的二倍频波动分量。文献[9]基于电网不平衡 dq 坐标系下 VSC-HVDC 系统的瞬时功率分析，提出了一种既能抑制直流系统二倍频波动又能降低交流侧奇次低频谐波的统一控制策略。文献[10]基于正弦脉宽调制策略，推导了适用于电网稳态运行和不对称条件下的换流器电流控制和直流电压控制的数学模型，并进行了故障仿真分析。文献[11]提出了一种适用于 MMC-HVDC 系统的结合最近电平逼近调制的均压和桥臂环流预估的复合控制策略，该策略在系统对称或不对称情况下均能实现子模块电容均压以及桥臂基频和二倍频的环流抑制。文献[12]基于 MMC-HVDC 的电压、电流动态方程，引入多变量控制保护参数 k 来估算柔直系统在安全运行范围内所能传输的最大功率。文献[13]建立了 MMC-HVDC 系统离散化的数学模型，并设计了一种基于欧拉-拉格朗日模型的不对称控制策略，能有效抑制故障后的功率和直流电压波动。文献[14-16]分别介绍了基于降阶谐振调节器、比例积分谐振调节器以及二阶广义积分谐振调节器进行正、负序分量控制的方法，其中降

阶谐振调节器的跟随性能和动态响应较好，比例积分谐振调节器对数字空间需求大，而二阶广义积分调节器控制精度较高，但实现较为复杂。

目前，针对电网换相换流器(line commutated converter, LCC)交流侧故障的短路电流影响机理研究，已有相当多文献进行报道。文献[17]结合 LCC 的特性分析了直流系统为交流系统贡献短路电流的机理和特性，并给出了一种基于分段函数的直流系统贡献短路电流的计算方法。文献[18]提出了结合直流控制特性的交直流系统故障相互作用分析模型，并给出了一种适用于电网不对称情况下的直流多馈入系统谐波分析计算方法。MMC 不同于 LCC，适用于 LCC 交流侧故障电流研究的结论和计算方法不一定适用于 MMC。文献[19]提出了一种分布式电源逆变器低电压穿越运行控制，建立了故障下短路电流计算模型，并进行了理论分析和验证。文献[20]进行了在换流变压器阀侧、网侧、无变压器三种情形下 MMC-HVDC 发生单相接地故障的对比分析。目前针对 MMC 交流侧故障短路电流特性研究的文献极少，文献[21]开展了 MMC 近端发生三相对称故障的短路电流影响机理研究，但对于电网中更容易发生的不对称故障没有提及。目前国内外针对电网故障或电压不平衡时 MMC 的控制策略研究、谐波和环流抑制策略研究工作开展的较多^[22-29]，但对于交流电网故障，尤其是不对称故障下，MMC-HVDC 系统是否提供短路电流、短路电流特性及其影响因素还没有充分认识，因此十分有必要对 MMC 交流侧故障特性进行详细的机理研究，对工程实际上存在的 MMC 是否提供短路电流、短路电流特性等问题进行比较详尽的回答。

1.2.2 MMC 直流侧故障的暂态特性分析现状

MMC 直流侧故障包括单极接地、断线，双极短路等故障，当直流线路采用架空线路时，极有可能发生瞬时性故障，使系统运行产生影响，因此有必要研究清楚 MMC 直流侧的故障机理，采取合理措施以提高系统的故障穿越能力，避免损坏设备，丢失负荷。

现有的研究对单极接地故障、双极短路故障机理均有定性或定量研究、但对断线故障机理研究较少。文献[30]对 MMC 三种典型直流侧故障特性进行了定性仿真分析，并改进半桥拓扑以抑制直流侧故障电流。文献[31]针对 MMC 交流侧典型接地方式，建立了避雷器不动作时 MMC-HVDC 单极接地故障特性分析模型，并定性讨论了避雷器动作对故障特性分析的影响。文献[32]详细比较了 MMC 交直流侧不同接地方式对单极接地故障特性的影响。文献[33]对 MMC-HVDC 系统直流线路故障进行了仿真分析，但是只提及了接地故障，并未考虑断线故障。文献[34]比较详细地讨论了双极短路下 MMC 子模块过电流

过程。文献[35]分析了变压器绕组接线方式对直流侧故障机制的影响。文献[36]结合双极短路 MMC 的过电流特性，提出了直流电网双极短路电流的通用计算方法。文献[37]对含桥臂阻尼的 MMC-HVDC 系统双极短路后换流器闭锁前、闭锁后以及交流断路器跳开的过程进行了详细的故障机理分析。文献[38]推导了双极 MMC-HVDC 系统经大、小电阻接地的电流计算式，并提出利用旁路电路来保护桥臂和抑制直流侧故障电流。文献[39]分析了 MMC 直流侧断线故障电流的产生机理，并讨论了故障电流对继电保护的影响。文献[40]利用等面积法则讨论三种不同拓扑 MMC-HVDC 处理直流故障对系统暂态稳定性的影响。文献[41]对 MMC 三种直流侧故障进行了简单的仿真分析，并提出相应的控制和保护策略以提高系统的故障穿越能力。由于双极短路故障相对于交流系统近似于发生三相短路，故障电流较大，国内外还有大部分文献在研究改进 MMC 的拓扑以实现直流侧故障的自清除、故障限流、故障穿越和保护以及直流断路器研究^[42-50]，以避免跳开交流断路器，使系统遭受巨大冲击。

目前国内外针对 MMC 直流侧故障特性分析大部分工作是基于仿真分析，对于单极接地故障、极间故障机理分析已有不少文献报道，但是针对断线故障的特性分析研究比较罕见，因此有必要从定量的角度对三种直流侧故障特性进行详细分析加以完善，以便设计和提供相应的控制和保护策略。

1.3 国内外 MMC-HVDC 的工程应用

MMC 以其独特的拓扑结构和技术优势得到了国内外工程界的青睐，而在我国柔性直流输电领域，MMC 型柔性直流工程逐步由低压、小容量、双端向特高压、大容量、多端方向发展，应用领域逐渐拓宽，MMC 的技术优势得到了充分利用。

下表为近几年来国内外投运以及在建的 MMC-HVDC 工程。

表 1-1 投运以及在建的 MMC-HVDC 工程

工程名称	投运时间	容量 (MW)	电压等级 (kV)	应用场合
美国 Trans Bay	2010	400	±200	城市供电
中国上海南汇	2011	18	±30	风电接入
英国-爱尔兰联网	2012	500	±200	联网
德国 DolWin1&2	2013/2014	800/900	±320	海上风电接入
德国 HelWin1&2	2013/2014	576/690	±259/±320	海上风电接入
中国南澳多端	2013	200	±160	风电接入
德国 SylWin1	2014	864	±160	海上风电接入

工程名称	投运时间	容量 (MW)	电压等级 (kV)	应用场合
西班牙-法国联网	2014	2*1000	±320	联网
中国舟山五端	2014	400	±200	风电接入
美国密歇根背靠背	2014	200	70	联网
挪威-瑞典联网	2015	2*720	±300	联网
大连跨海柔直	2015	1000	±320	联网
厦门柔直	2015	2*1000	±320	城市供电
鲁西背靠背	2016	1000	±350	异步联网
德国 DolWin3	2017	900	±320	风电接入
渝鄂直流	在建	5000	±420	联网
张北四端	在建	3000	±500	风电接入
乌东德直流工程	在建	8000	±800	水电送出
白鹤滩直流工程	在建	8000	±800	水电送出

1.4 本文主要工作

本文的主要研究工作是针对 MMC 交流侧故障以及直流侧故障的暂态特性分析进行展开。由于 MMC 交流侧常见故障包括不对称故障以及对称故障，因此针对交流电网发生不对称故障，需要建立适应不对称故障分析的 MMC 控制系统。本文各章节的具体工作内容安排如下：

第 2 章，首先介绍了 MMC 的基本工作原理，搭建了 MMC 的控制系统，包括相序分离和锁相环节、外环功率控制器、正负序内环电流控制器和限幅环节，以及环流抑制控制器。由于 MMC-HVDC 系统的接地方式对于直流侧故障分析有很大影响，最后还介绍了工程常用的在交、直流侧的三种接地方式。

第 3 章，基于第 2 章搭建的 MMC 控制系统，针对 MMC 交流侧常见的三种不对称故障，对比传统发电机近端故障所提供短路电流的特点，分析 MMC 的控制器对故障的响应，包括暂态过程和稳态过程，得出 MMC 对故障点提供短路电流的特性，并提出一种计算 MMC 交流侧故障稳态短路电流的计算方法。不对称故障分析的方法和结论也适用于三相对称故障。最后在 PSCAD/EMTDC 下搭建了双端 MMC-HVDC 系统作了仿真实验验证。

第 4 章，对 MMC 直流侧发生的单极接地、单极断线、双极短路三种故障进行故障特性分析，从机理上分析暂态过程中换流器交、直流侧的电压、电流特性，指出三种故障下系统所遭受的最大威胁，并在 PSCAD/EMTDC 下搭建双端 MMC-HVDC 系统作了仿真实验验证。

第 5 章，对本文所做工作和主要创新点进行总结，并展望 MMC-HVDC 暂态特性分析研究的后续工作。

第 2 章 MMC-HVDC 系统的基本工作原理

本章首先介绍了 MMC 的基本拓扑和工作原理，重点介绍适应电网对称状态和不对称状态的控制系统，最后介绍了对故障特性分析有影响的 MMC-HVDC 系统接地方式。

2.1 MMC 基本结构和工作原理

MMC 的典型拓扑如图 2-1 所示，由三相共六个桥臂构成，每个桥臂由级联的 N 个子模块以及串联的桥臂电抗器 L_0 组成，每个子模块由两个绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)器件 T_1 和 T_2 、两个反并联续流二极管 D_1 和 D_2 以及并联电容器 C 组成。正常运行时，MMC 换流站接收系统级的控制信号，通过外环功率控制器、内环电流控制器以及环流抑制控制器产生换流器的三相调制波。三相调制波经最近电平逼近调制或载波移相调制以及相应的均压策略生成各个桥臂开关器件的触发信号。每个相单元上下桥臂的子模块在触发信号的作用下投入或切除，从而实现对 MMC 输出电流大小和相位的直接控制。 T_1 导通， T_2 关断时，子模块电容投入； T_2 导通， T_1 关断时，子模块电容切除。对于 $N+1$ 电平的 MMC，为了维持柔性直流输电系统直流电压，每个相单元上下桥臂投入的子模块数均为 N 。

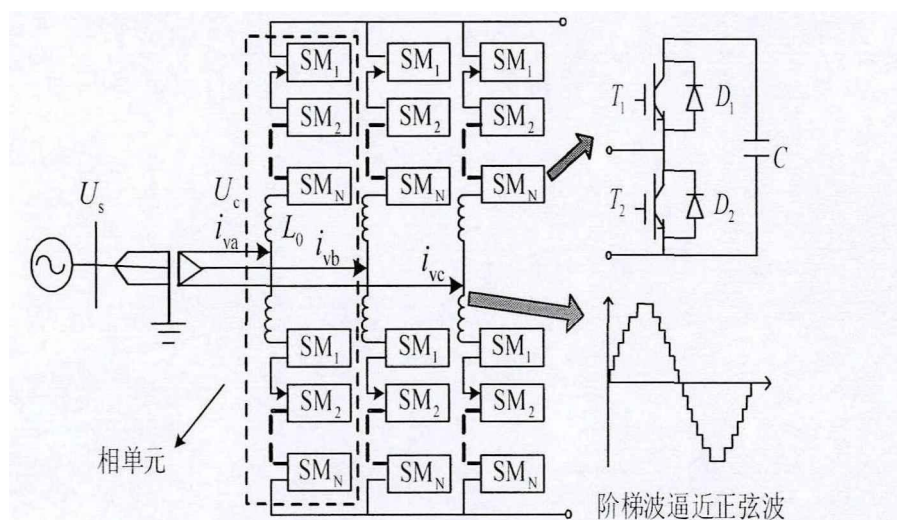


图 2-1 MMC 典型拓扑结构

2.2 适合不对称分析的 MMC 控制系统

MMC 的控制系统建立在 dq 同步旋转坐标系下，电网不对称情况下，电压、电流不平衡，出现正负序分量，传统的 MMC 的内环电流控制器不再适应，会导致控制性能恶化。因此有必要建立能适应电网对称和不对称情形的 MMC 控制系统，主要包括相序分离环节、锁相环、外环功率控制器、限幅环节、正负序内环电流控制器以及环流抑制控制器这几部分。

2.2.1 相序分离环节和锁相环

电网不对称时，电压电流不对称，除正序分量外，还存在负序分量和零序分量。通常换流变压器采用星角接线，零序分量不会进入控制器，而 MMC 的控制器建立在 dq 旋转同步坐标系下，因此需要设计相序分离环节得到正负序 dq 轴电压、电流分量分别控制。相序分离环节采用文献[51]所提方法进行设计，其基本原理如式(2-1)所示：

$$\begin{cases} V_{\alpha\beta}^+ = \frac{1}{2}(V_{\alpha\beta} + V_{\alpha\beta}e^{-j\frac{\pi}{2}}) \\ V_{\alpha\beta}^- = \frac{1}{2}(V_{\alpha\beta} - V_{\alpha\beta}e^{-j\frac{\pi}{2}}) \end{cases} \quad (2-1)$$

式中： $V_{\alpha\beta}$ 为两相静止坐标系下的相量， $e^{-j\frac{\pi}{2}}$ 为移相环节， $V_{\alpha\beta}^+$ 、 $V_{\alpha\beta}^-$ 为分离得到的两相静止坐标系下的正负序分量。再将分离得到的 $V_{\alpha\beta}^+$ 、 $V_{\alpha\beta}^-$ 变换到 dq 坐标系下，即可得到 dq 轴的正负序分量。其中从三相 abc 系统变换到两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系，以及从两相静止 $\alpha\beta$ 坐标系变换到 dq 坐标系的变换方程如下所示：

$$\begin{cases} V_{\alpha\beta} = m \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \cdot V_{abc} \\ V_{dq} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \cdot V_{\alpha\beta} \end{cases} \quad (2-2)$$

式中： V_{dq} 为 dq 坐标系下相量， m 为变换系数，恒功率变换取 $\sqrt{\frac{2}{3}}$ ，恒幅值变换取 1， θ 为 PLL 锁相环输出的相位，相序分离环节的控制框图如下所示。

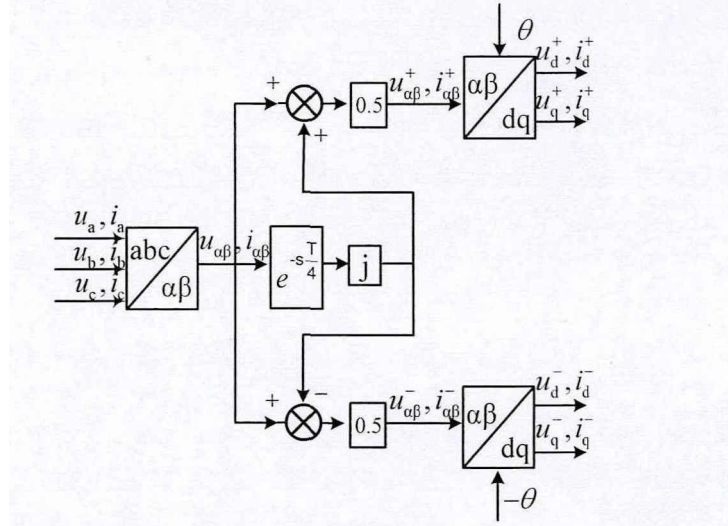


图 2-2 相序分离环节

为了实现在电网不对称下的精准锁相，参照文献[52]介绍的锁相原理，得到锁相环的控制原理如下所示：

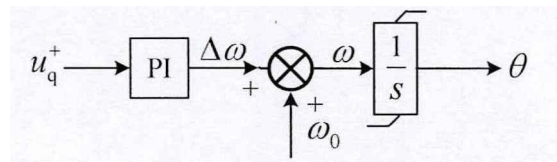


图 2-3 锁相环原理

将图 2-2 相序分离环节得到的电网电压正序 q 轴分量经比例积分控制为 0，即可得到电网电压频率和相位，从而实现精准锁相。

2.2.2 MMC 的外环功率控制器和限幅环节

如图 2-4 所示为 MMC 的外环功率控制器框图，图 2-4(a)-(d)依次为有功功率控制器、无功功率控制器、直流电压控制器、交流电压控制器。外环功率控制器接收系统级的控制目标，通过比例积分控制换流站与交流电网传输的功率、柔直系统的直流电压、交流电网电压，并产生内环电流控制的参考值。

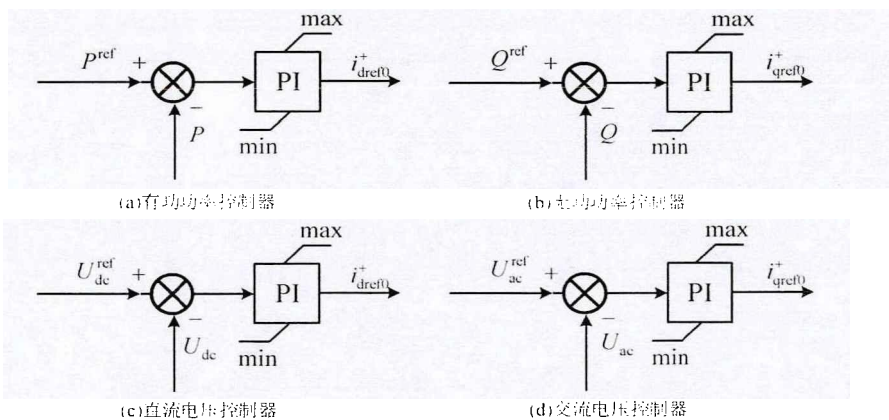


图 2-4 外环功率控制器

系统遭受扰动或发生故障，会导致换流阀的电力电子器件过流而损坏设备，因此在 MMC 的控制系统中设置了限流环节以保护换流阀设备。图 2-5 所示为三种限幅原理图，图 2-5(a)为有功电流、无功电流同比例限幅；图 2-5(b)为保障故障时候的有功输出以保持对重要负荷供电的有功电流优先限幅；图 2-5(c)为保证电压稳定的无功电流优先限幅。

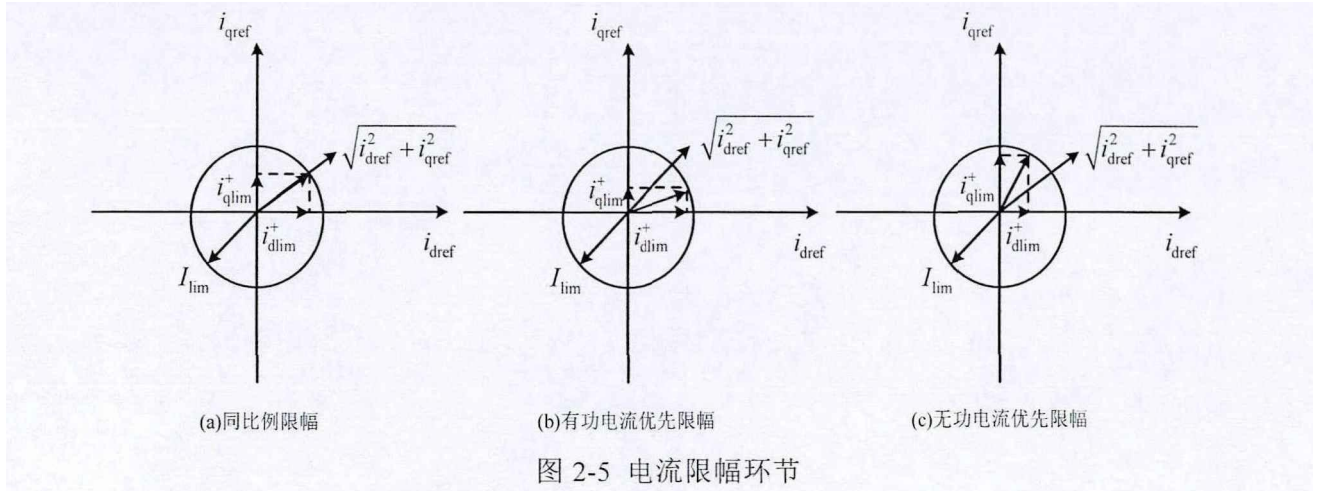


图 2-5 电流限幅环节

2.2.3 MMC 的内环电流控制器

模块化多电平换流器正负序分量在 dq 坐标系下的数学模型^[5]见式(2-3)和式(2-4)，其正、负序系统的控制框图参照图 2-6。

$$\begin{cases} L \frac{di_d^+}{dt} = -Ri_d^+ + \omega Li_q^+ - v_d^+ + u_d^+ \\ L \frac{di_q^+}{dt} = -Ri_q^+ - \omega Li_d^+ - v_q^+ + u_q^+ \end{cases} \quad (2-3)$$

$$\begin{cases} L \frac{di_d^-}{dt} = -Ri_d^- - \omega Li_q^- - v_d^- + u_d^- \\ L \frac{di_q^-}{dt} = -Ri_q^- + \omega Li_d^- - v_q^- + u_q^- \end{cases} \quad (2-4)$$

式中的 v_d^+ 、 v_q^+ 、 v_d^- 、 v_q^- 为内环电流控制器的输入变量，其值可以通过式(2-5)和式(2-6)的比例积分控制得到。

$$\begin{cases} v_{dref}^+ = u_d^+ + \omega Li_q^+ - k_{p1}(i_{dref}^+ - i_d^+) - k_{i1} \int (i_{dref}^+ - i_d^+) dt \\ v_{qref}^+ = u_q^+ - \omega Li_d^+ - k_{p2}(i_{qref}^+ - i_q^+) - k_{i2} \int (i_{qref}^+ - i_q^+) dt \end{cases} \quad (2-5)$$

$$\begin{cases} v_{dref}^- = u_d^- - \omega Li_q^- - k_{p3}(i_{dref}^- - i_d^-) - k_{i3} \int (i_{dref}^- - i_d^-) dt \\ v_{qref}^- = u_q^- + \omega Li_d^- - k_{p4}(i_{qref}^- - i_q^-) - k_{i4} \int (i_{qref}^- - i_q^-) dt \end{cases} \quad (2-6)$$

将式(2-5)-(2-6)代入式(2-3)-(2-4)，作拉普拉斯反变换即可得到正负序电流解耦控制框图，见图 2-7，其中内环正负序 dq 轴电流的实际值与参考值满足式(2-7)的闭环传递函数。

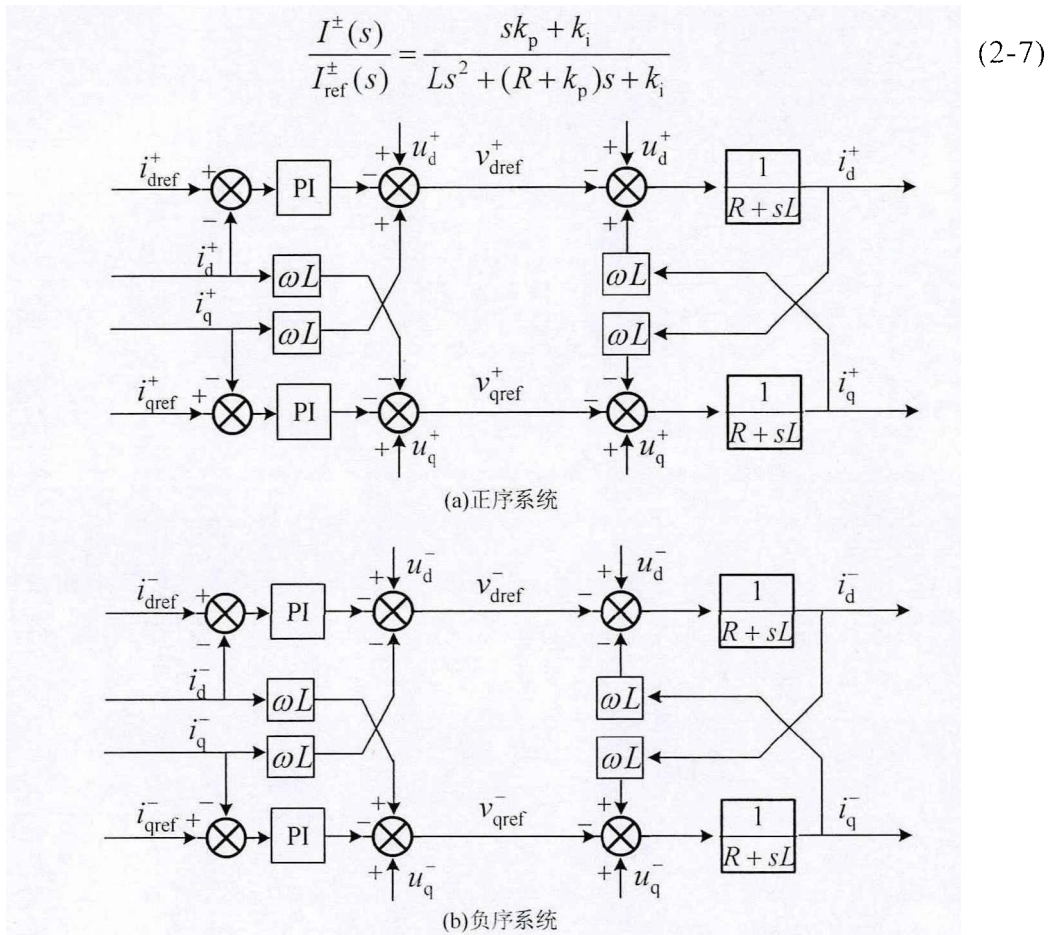


图 2-6 内环电流控制框图

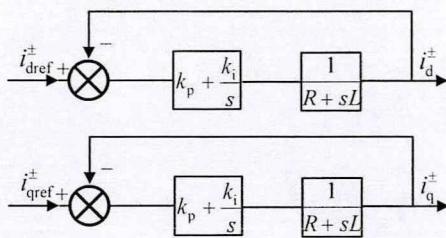


图 2-7 正负序电流解耦控制框图

由图 2-6、2-7 可见，正负序内环电流控制的目的是调整换流器输出的电压使得内环电流实际值跟踪其参考值，并且正负序分量实现了解耦控制。

2.2.4 MMC 的环流抑制

MMC 的内部环流是由于换流器各相上、下桥臂电压之和不平衡导致，通常此环流指流经上下桥臂的二倍频负序分量。MMC 的桥臂起着交直流侧能量交换

的功能，MMC 的相间环流较大会导致子模块电容电压波动较大，换流器交流侧输出的电压波形质量变差，桥臂上的电力电子器件过电流，不对环流采取措施加以抑制可能会导致桥臂过电流保护作用，以闭锁换流器，不利于系统的安全稳定运行，因此必须设计相应的环流抑制控制器。

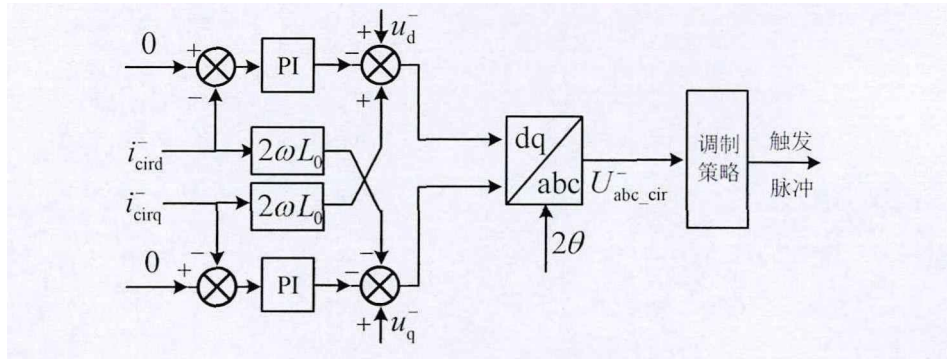


图 2-8 环流抑制控制框图

图 2-8 所示为环流抑制控制器的控制框图，将二倍频环流的 dq 轴分量经比例积分控制抑制为 0，并输出相应的环流抑制电压控制信号经相应的均压和调制策略产生桥臂器件的触发脉冲，MMC 的子模块电容电压均衡控制和调制策略可以参考文献[53-55]，通常有排序和非排序均压策略，最近电平逼近调制以及正弦脉宽调制等，这里不再详细介绍。

2.2.5 MMC 的通用控制系统

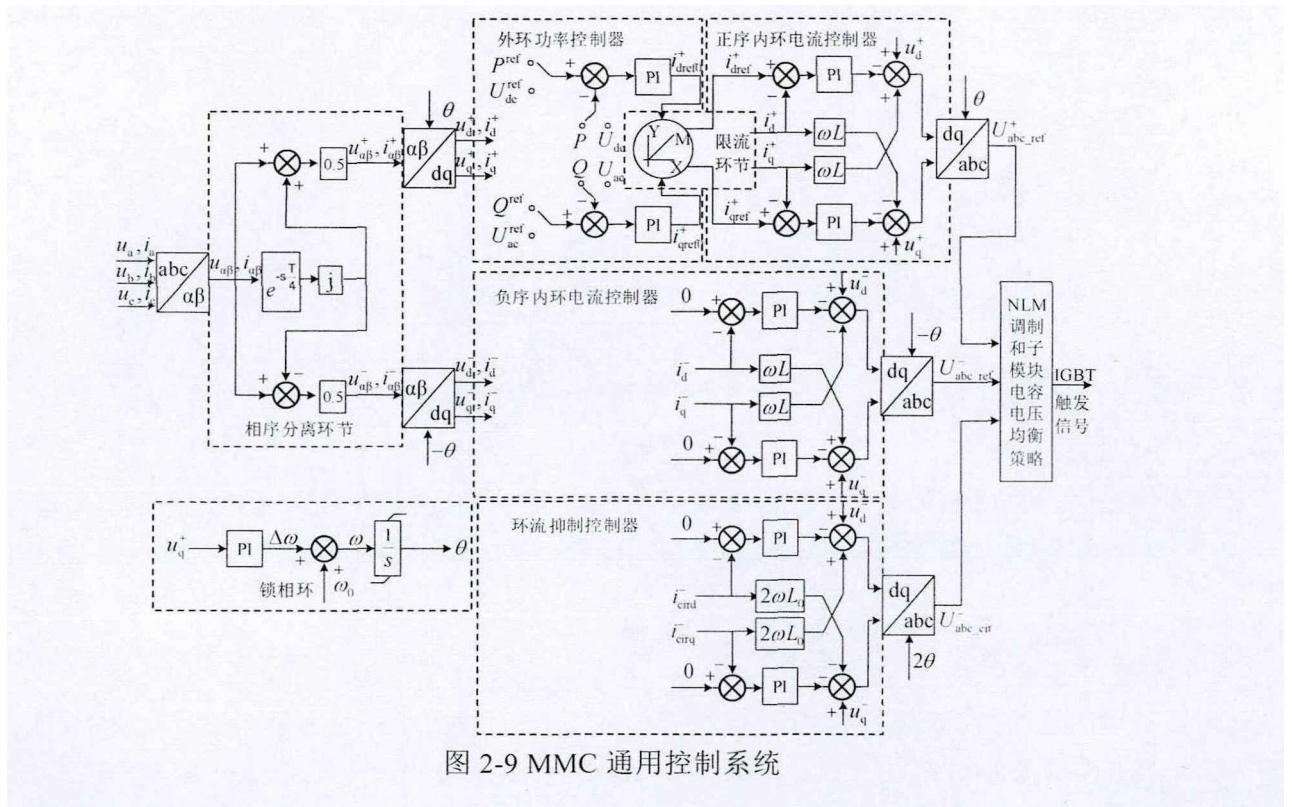


图 2-9 MMC 通用控制系统

图 2-9 所示为综合上述介绍的相序分离环节和锁相环控制、外环功率控制、内环电流限幅、正负序内环电流控制以及环流抑制控制的 MMC 典型通用控制系统，能适应电网对称和不对称情况下的分析和控制，与实际柔性直流输电工程的控制系统基本一致，本文后续章节分析将基于此控制系统。

2.3 MMC-HVDC 系统的结构和接地方式

MMC-HVDC 系统两种典型的结构如图 2-10、2-11 所示：（1）对称单极结构；（2）对称双极结构。对称单极结构在功率发送端和接收端只有一个换流器构成直流侧的正、负极，这种系统结构的最大优点是降低了换流站的建设成本，然而对称单极结构的换流器、变压器、输电线路冗余度不够，一旦直流侧发生故障，需要闭锁换流器，退出运行以保护设备免受绝缘威胁。对称双极结构在功率发送端和接收端均有两个换流器分别构成直流侧的正、负极，系统的冗余度提高，传输容量增大，当发生单极故障时，系统仍然能够保持单极运行，这种系统结构的缺点在于设备冗余增加导致换流站建设成本增大，换流变压器在正常运行时需要承受较大的直流偏置电压。MMC-HVDC 系统具体采用何种结构应综合应用场合、设备投资、运行可靠性等进行考虑。

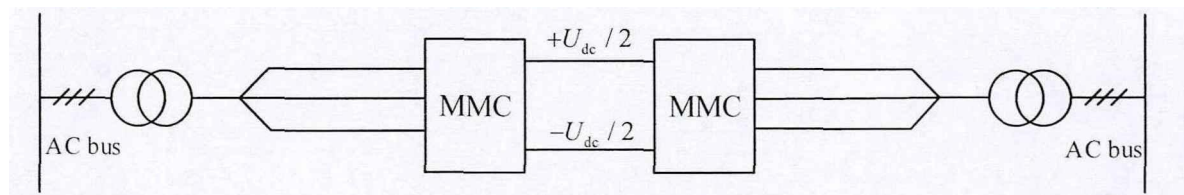


图 2-10 对称单极结构

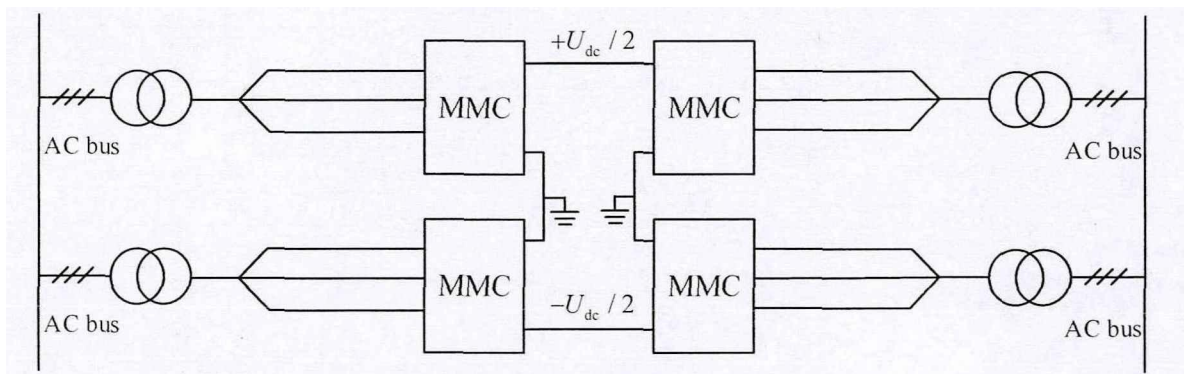


图 2-11 对称双极结构

柔性直流输电系统为维持直流母线电压的恒定和正负性，通常会在换流器的交流侧或直流侧设置接地点。交流侧接地方式分为图 2-12 所示的换流变压器阀侧中性点经电阻接地（如上海南汇风电工程）以及图 2-13 所示的换流器阀侧经星型电抗和电阻接地（如 Trans Bay Cable 工程和中国舟山五端工程）两种。直流侧接地方式为图 2-14 所示的正负直流母线之间经钳位电阻接地。MMC-HVDC

系统直流侧的故障特性与其所采用的接地形式紧密相关,当 MMC-HVDC 系统采用直流侧接地形式时,为了隔离零序分量,变压器阀侧通常采用角形接线,不存在接地故障的通路,故障特性相对简单。本文第四章主要分析 MMC-HVDC 系统采用交流侧接地形式的直流侧故障特性,由于换流器阀侧经星形电抗和电阻接地方式的分析方法与换流变压器中性点经电阻接地的故障特性与机理相差不大,后续关于直流侧故障特性的分析均基于采用对称单极结构的换流器阀侧经星形电抗和电阻接地的 MMC-HVDC 系统拓扑展开。

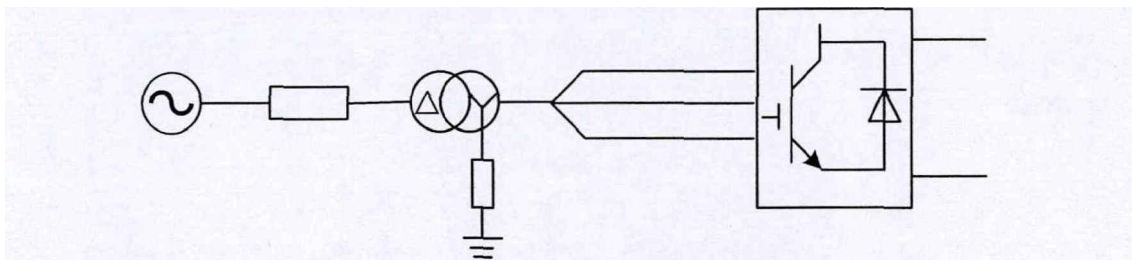


图 2-12 变压器中性点经电阻接地

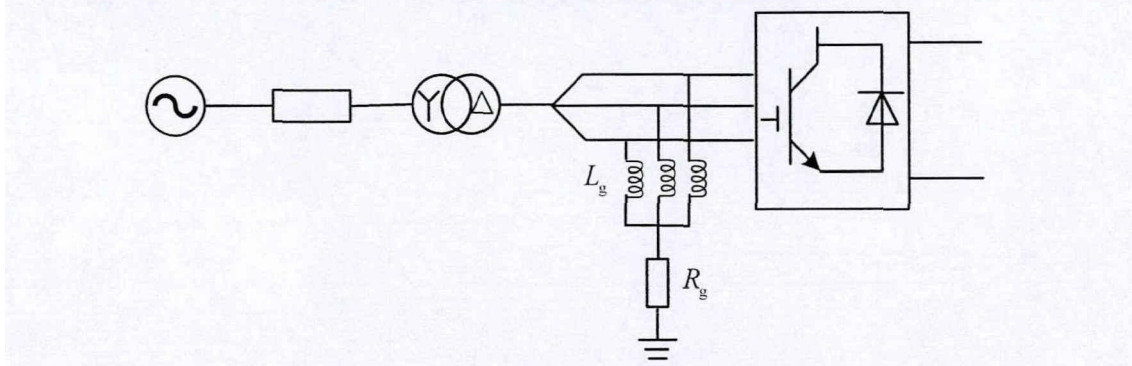


图 2-13 换流器阀侧经星型电抗和电阻接地

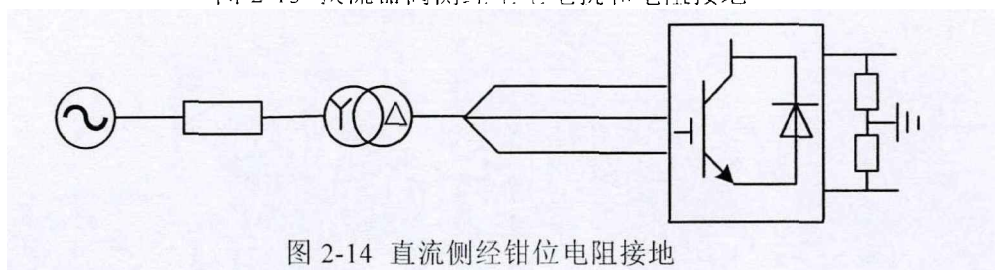


图 2-14 直流侧经错位电阻接地

2.4 本章小结

本章以 MMC 典型的半桥拓扑为基础,阐述了其基本工作原理。然后着重介绍了适应不对称分析的 MMC 控制系统,主要包括电网不对称时分离得到同步旋转坐标系下正负序分量的相序分离环节和利用正序 q 轴电网电压分量实现精准锁相的锁相环控制,接收系统级控制目标产生内环电流控制参考值的外环功率控制器,防止柔性直流输电系统过载、换流阀 IGBT 等器件过流的内环电流限幅环节、实现内环正负序电流实际值跟踪其参考值的正负序内环电流解耦控制器以及

改善内部环流、输出电压波形质量的环流抑制控制器。内环电流控制以及环流抑制控制生成的电压参考信号经合适的子模块电容均压策略和调制算法生成换流阀的触发脉冲，从而实现 MMC 的站级和阀级控制。最后介绍了现在实际柔性直流输电工程典型的对称单极和对称双极拓扑，以及 MMC-HVDC 系统的常见三种接地方式，分别为 MMC 交流侧换流变压器中性点经电阻接地、换流器阀侧经星型电抗和电阻接地以及 MMC 直流侧经钳位电阻接地。

第 3 章 MMC 交流侧故障的暂态特性分析

目前,实际 MMC-HVDC 工程运行中关心的柔性直流输电系统是否提供短路电流、短路电流的大小和相位等问题尚未明晰,而随着 MMC-HVDC 系统接入电网的电压等级提高,传输功率更大,电网故障时,MMC-HVDC 系统可能提供的短路电流不容忽视,因此研究清楚 MMC-HVDC 系统的交流侧故障的暂态特性,重点研究对故障点短路电流的影响机理对于电网规划、设备选型、继电保护整定具有重要意义。

本章基于第 2 章介绍 MMC 的工作原理、运行特性以及适用于不对称故障分析的控制策略,从机理上研究电网发生不对称故障情况下,MMC 是否向交流系统贡献短路电流,所提供的短路电流特性及其影响因素。

3.1 MMC 与发电机近端故障电流对比分析

交流系统故障时有发生,较为常见的为单相接地短路、两相短路、两相接地短路这三种不对称故障。故障瞬间,由于系统电路呈现感性,短路电流中包含衰减的直流分量以及变化的基频分量,对于不对称短路,还存在一系列谐波,想要准确地分析交流系统不对称故障的暂态过程比较复杂。对于交流系统的短路电流分析,通常研究其基频交流分量的变化^[56]。短路瞬间电流直流分量的大小,与电源电压初相角、短路前电流大小有关,短路至稳态时,主要为基频交流分量,谐波含量极少。

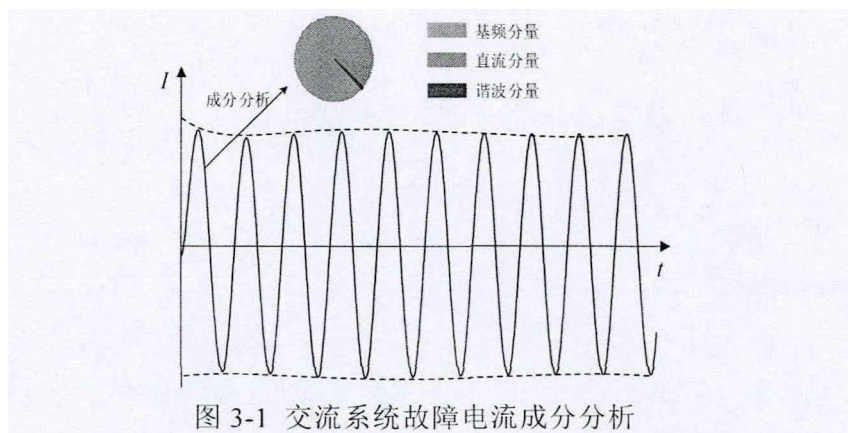


图 3-1 交流系统故障电流成分分析

模块化多电平换流器交流侧近端发生不对称故障时,MMC 为交流系统所提供的故障电流与传统电网中发电机近端故障所提供的短路电流有所不同。不计谐波分量的影响,发电机近端发生不对称故障时,导致电网拓扑结构变化,三相电流的基频分量大小和相位发生变化并产生衰减的直流分量。MMC 交流侧近端发

生不对称故障时，由于 MMC 的控制器响应迅速，通常为毫秒级，控制器响应前这段时间，换流器输出电压几乎未改变，由于该阶段十分短暂，忽略该过程短路电流中存在的直流分量并不影响本文后续的分析，没有深入探究；控制器响应后，换流器输出电压的大小和相位立即发生变化，以使得内环电流跟踪其参考值。MMC 控制器响应过程中，MMC 向故障点提供的短路电流中不含直流分量^[21]。下面章节将具体分析 MMC 的控制器对短路电流的影响。

3.2 MMC 交流侧近端故障分析

图 3-2 为 MMC 交流侧近端故障示意图。MMC 交流侧发生不对称故障时，若未采用正负序解耦控制的 MMC，负序电流的存在会使得 MMC 的控制性能恶化^[57]。

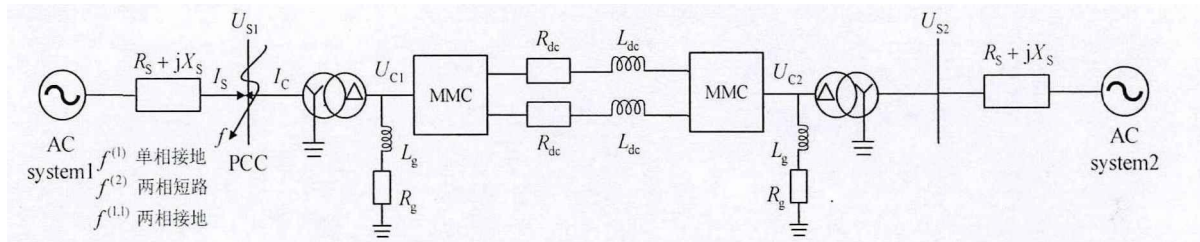


图 3-2 双端 MMC-HVDC 系统交流侧故障示意图

因此本文的分析基于图 2-9 所设计的控制系统，对参与 MMC 控制的三相电压、电流提前分离正负序分量，并利用正序电压的 q 轴分量参与锁相环控制精确锁相。内环采用正负序电流解耦控制，从而避免负序电流恶化控制器性能以及产生的谐波。

MMC 交流侧较严重故障将使换流器过流保护动作以闭锁换流器，本文分析前提为故障期间 MMC 控制系统能将电流限制住，过流保护未动作，因此后文的分析未考虑换流器保护对故障电流的影响。由于换流站近端故障可以等效为在（point of common coupling, PCC）点发生故障，因此本文后续章节以换流站近端（PCC 处）故障，并基于图 2-9 所示的 MMC 控制系统，主要分析 MMC 的外环功率控制器、限幅环节、内环电流控制器等对交流侧近端不对称故障的响应。由于环流抑制控制器主要影响相间环流，对故障电流的影响基本可以忽略，因此本文不作具体分析。因为本文所提控制系统是通用的，当发生三相对称故障时，系统中只含正序分量，本文的分析方法仍然适用，所以下文以更为常见的不对称故障为例开展分析，对于相对简单的三相对称故障详细分析可以参考文献[21]。

3.2.1 外环功率控制器对故障的响应

换流站近端发生不对称故障，若故障端 MMC 采用定有功功率、定无功功率

控制，由于故障导致电网电压跌落，MMC 实际传输功率与控制功率参考值存在偏差。

此时，采用式(3-1)计算有功功率和无功功率，以避免不对称故障期间，有功功率和无功功率的二倍频波动分量对外环功率控制器的影响。

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(u_d^+ i_d^+ + u_q^+ i_q^+ + u_d^- i_d^- + u_q^- i_q^-) \\ Q = \frac{3}{2}(-u_d^+ i_q^+ + u_q^+ i_d^+ + u_d^- i_q^- - u_q^- i_d^-) \end{cases} \quad (3-1)$$

外环功率控制输出的正序有功电流参考值 i_{dref0}^+ 和无功电流参考值 i_{qref0}^+ 可由式(3-2)计算。

$$\begin{cases} i_{dref0}^+ = k_{pp1}(P^{ref} - P) + k_{ii1} \int (P^{ref} - P) dt \\ i_{qref0}^+ = k_{pp2}(Q^{ref} - Q) + k_{ii2} \int (Q^{ref} - Q) dt \end{cases} \quad (3-2)$$

式中 k_{pp1} 、 k_{pp2} 分别为有功、无功功率控制器的比例系数， k_{ii1} 、 k_{ii2} 分别为有功、无功功率控制器的积分系数， P^{ref} 、 Q^{ref} 分别为有功、无功参考值， P 、 Q 为有功、无功的实际值。

故障前稳定运行时，定功率控制换流站与交流电网交换的有功、无功与其控制参考值一致，因此 d、q 轴电流参考值的计算式如下：

$$\begin{cases} i_{dref0}^+ = P / u_d \\ i_{qref0}^+ = -Q / u_d \end{cases} \quad (3-3)$$

交流系统发生不对称故障后，换流站与交流系统交换的有功、无功与其参考值存在偏差，根据式(3-2)，由式(3-3)求得的故障前有功、无功电流参考值绝对值将持续增大，可能会达到 d 轴或 q 轴电流比例积分限幅值。以故障前交流电网流向换流站的有功功率 P 和无功功率 Q 均为正值为例，此时由式(3-3)求得的故障前有功电流参考值 i_{dref0}^+ 为正，无功电流参考值 i_{qref0}^+ 为负，由式(3-2)得到的故障后有功电流参考值 i_{dref0}^+ 正向增大，无功电流参考值 i_{qref0}^+ 负向增大，因此故障前后，定有功功率和无功功率控制器所产生的有功和无功电流参考值正负性一致，交流电网与定功率控制换流站传输的有功和无功方向故障前后一致。当无功功率参考值为 0 时，故障前后 i_{qref0}^+ 为 0。

当故障端换流站采用定直流电压、交流电压控制时，外环直流电压控制输出的正序有功电流参考值 i_{dref0}^+ 和无功电流参考值 i_{qref0}^+ 可由式(3-4)获得。

$$\begin{cases} i_{dref0}^+ = k_{pp3}(U_{dc}^{ref} - U_{dc}) + k_{ii3} \int (U_{dc}^{ref} - U_{dc}) dt \\ i_{qref0}^+ = k_{pp4}(U_{ac}^{ref} - U_{ac}) + k_{ii4} \int (U_{ac}^{ref} - U_{ac}) dt \end{cases} \quad (3-4)$$

式中 k_{pp3} 、 k_{pp4} 分别为直流电压、交流电压控制器的比例系数， k_{ii3} 、 k_{ii4} 分别为直流电压、交流电压控制器的积分系数， U_{dc}^{ref} 、 U_{ac}^{ref} 分别为直流电压、交流电压参考值， U_{dc} 、 U_{ac} 分别为直流电压、交流电压实际值。

交流系统不对称时，负序电压的存在使得直流电压中除直流分量外主要含二倍频分量^[8]。因此本文在图 3-3 的直流电压控制器中加入了二倍频陷波器以消除直流电压中二倍频波动分量的影响。图 3-3 中 U_{dcmea} 为直流电压测量值。

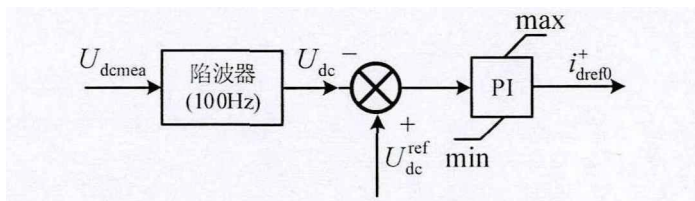


图 3-3 直流电压控制器

不对称故障期间，由于故障的严重程度不同导致 PCC 点电压跌落程度不同，从而导致换流站的输入输出功率存在较大偏差。因此在不对称故障期间，外环采用定直流电压、交流电压控制产生的正序有功电流参考值 i_{dref0}^+ 、正序无功电流参考值 i_{qref0}^+ 的绝对值将会增大，并将逐渐上升到限值或稳定于上下限值间的某一值。同理，假设故障前，有功和无功功率的流向为从定电压控制换流站流向交流电网，此时有功功率 P 和无功功率 Q 的值均为负，由式(3-3)求得的故障前有功电流参考值 i_{dref0}^+ 为负，无功电流参考值 i_{qref0}^+ 为正，因此由式(3-4)求得的故障后有功电流参考值负向增大，无功电流参考值正向增大，有功电流和无功电流参考值正负性故障前后一致，故障后换流站向交流电网继续输送有功和无功。当故障前，定交流电压控制换流站是消耗无功时，由于故障后定交流电压控制器的作用，换流站需要发出无功以提高电压，此时根据式(3-3)、(3-4)求出的故障前后无功电流参考值正负性相反，故障后无功电流参考值将会反向增大直至达到 q 轴比例积分限幅值，此时定交流电压控制换流站与系统交换无功功率流向故障前后不一致。

综上所述，当换流站交流侧近端发生不对称故障时，换流站有功功率流向故障前后一致；而无功功率流向一致性与换流站的控制方式和运行方式有关。定无功控制的换流站无功功率流向故障前后一致。对于定交流电压控制的换流站，当故障前换流站发出无功时，故障前后无功功率流向一致；当故障前换流站吸收无功时，故障前后无功功率流向相反。由于通常情况下，柔直系统传输有功功率较大，换流站故障前后有功功率流向一致，因此对于相同故障，逆变侧近端故障点电流大于整流侧近端故障点电流。

3.2.2 限幅环节对故障的响应

故障时，外环功率控制器产生的正序有功电流参考值 i_{dref0}^+ 和正序无功电流参考值 i_{qref0}^+ 较大，可能会超过限幅环节所设置的限值。因此经过限幅环节后，正序有功电流参考值 i_{dref}^+ 和无功电流参考值 i_{qref}^+ 可能的取值见式(3-5)。

$$\begin{cases} i_{dref}^+ = i_{dref0}^+ \cdot i_{qref}^+ = i_{qref0}^+ & \sqrt{(i_{dref0}^+)^2 + (i_{qref0}^+)^2} \leq I_{lim} \\ i_{dref}^+ = \frac{I_{lim} \cdot i_{dref0}^+}{\sqrt{(i_{dref0}^+)^2 + (i_{qref0}^+)^2}} & \sqrt{(i_{dref0}^+)^2 + (i_{qref0}^+)^2} > I_{lim} \\ i_{qref}^+ = \frac{I_{lim} \cdot i_{qref0}^+}{\sqrt{(i_{dref0}^+)^2 + (i_{qref0}^+)^2}} & \sqrt{(i_{dref0}^+)^2 + (i_{qref0}^+)^2} > I_{lim} \end{cases} \quad (3-5)$$

式中， I_{lim} 为控制器设置的电流限值， I_{lim} 根据实际柔直系统的过载能力以及换流阀设备的过流能力进行选取。

3.2.3 内环电流控制器对故障的响应

由第二章图 2-7 可知，内环电流控制器的作用是让电流实际值跟踪其参考值。MMC 交流侧近端发生不对称故障时，电网电压跌落，且存在 dq 轴的正负序分量 u_d^+ 、 u_q^+ 、 u_d^- 、 u_q^- ，其值大小与故障类型有关。通常，为了抑制故障时存在的负序电流，负序电流控制器的参考值 i_{dref}^- 和 i_{qref}^- 取 0。已知故障时电网电压 dq 轴的正负序分量及正负序内环电流控制器的参考值，根据式(2-3)、(2-4)便可求得换流器输出电压的 dq 轴正负序分量。

不对称故障期间，MMC 内环电流控制器响应后调整换流器输出的正负序电压，从而使正序电流跟踪其参考值，负序电流抑制为 0。MMC 在交流侧表征为电流源，其电流源的形式由外环功率控制器以及限幅环节产生的 i_{dref}^+ 、 i_{qref}^+ 经派克反变换求得， i_{dref}^+ 、 i_{qref}^+ 中高倍频分量含量极少时，换流器输出三相对称电流，控制器响应的过程中，MMC 输出电流不含有直流分量。

3.3 MMC 交流侧故障仿真分析

为了验证本文对 MMC 交流侧近端发生不对称故障的理论分析，在 PSCAD/EMTDC 下搭建双端 201 电平 MMC-HVDC 系统如图 3-2 所示。系统的额定容量为 1500MVA，额定直流电压为 640kV，联接变压器采用 YNd 接线，系统参数设置如表 3-1 所示。整流侧 MMC 采用定有功功率、无功功率控制，传输功

率参考值分别为 $P^{\text{ref}}=1000\text{MW}$, $Q^{\text{ref}}=300\text{Mvar}$ 。逆变侧 MMC 采用定直流电压、交流母线电压控制,电压控制器参考值分别为 $U_{\text{dc}}^{\text{ref}}=640\text{kV}$, $U_{\text{ac}}^{\text{ref}}=400\text{kV}$ 。故障分别设置在整流侧和逆变侧近端 PCC 点, 3.5s 时刻发生单相接地故障, 故障点接地电阻 $R_f=0.01\Omega$, 持续 1s 故障消除。

表 3-1 双端 MMC-HVDC 系统参数

参数	数值
交流系统等效电阻 R_s/Ω	1.634
交流系统等效电抗 L_s/H	0.0479
联接变压器额定容量 S_T/MVA	1590
变压器变比	400/333
MMC-HVDC 系统主电路参数	
变压器漏抗 L_T/H	0.0505
桥臂电抗 L_0/H	0.05
直流侧电阻 R_{dc}/Ω	0.15
直流侧电抗 L_{dc}/H	0.025
交流侧接地电阻 R_g/Ω	1000
交流侧接地电抗 L_g/H	1000
有功功率控制器 PI($k_{\text{pp}1}, k_{\text{ii}1}$, 限值)	(0,33.33,±1.118)
无功功率控制器 PI($k_{\text{pp}2}, k_{\text{ii}2}$, 限值)	(0,33.33,±0.6)
直流电压控制器 PI($k_{\text{pp}3}, k_{\text{ii}3}$, 限值)	(5,33.33,±1.118)
交流电压控制器 PI($k_{\text{pp}4}, k_{\text{ii}4}$, 限值)	(1,33.33,±1.0)
MMC 控制系统参数	
内环电流限幅值 $I_{\text{lim}}/(\text{标么值})$	1.3
内环正序电流控制器 d 轴 PI($k_{\text{p}1}, k_{\text{i}1}$)	(1,33.3)
内环正序电流控制器 q 轴 PI($k_{\text{p}2}, k_{\text{i}2}$)	(1,33.3)
内环负序电流控制器 d 轴 PI($k_{\text{p}3}, k_{\text{i}3}$)	(3,33.3)
内环负序电流控制器 q 轴 PI($k_{\text{p}4}, k_{\text{i}4}$)	(3,33.3)
锁相环控制 PI($k_{\text{p}}, k_{\text{i}}$)	(5,50)

图 3-4、3-5 分别为整流站近端 PCC 点发生单相接地故障, MMC 内环电流控制器电流跟踪曲线和交流侧输出电流波形。

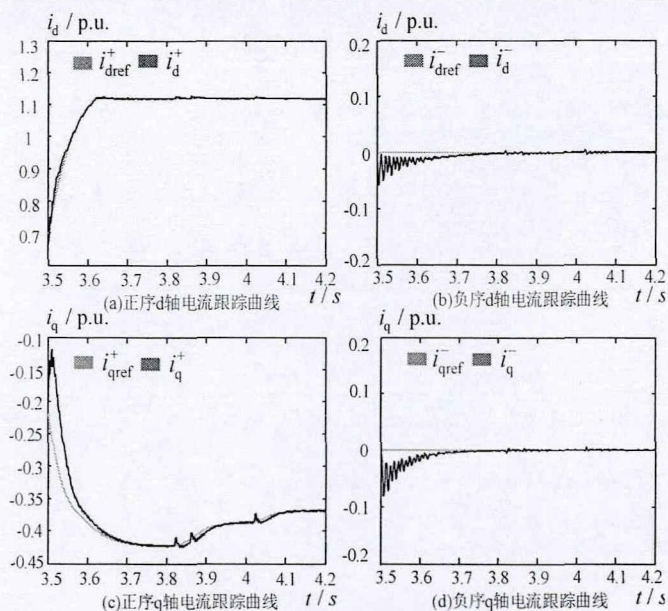


图 3-4 内环电流控制器跟踪曲线

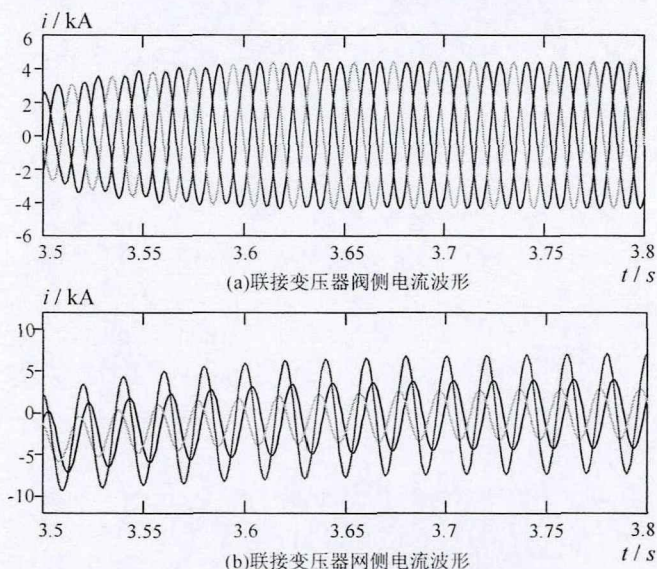


图 3-5 MMC 交流侧输出电流波形

由图 3-4 可得，整流站近端发生单相接地故障时，正序 d 轴电流参考值 i_{dref}^+ 正向增大于 3.62s 后达到限值，正序 q 轴电流参考值 i_{qref}^+ 负向增大于 4.1s 稳定于限值之间的某一值，这验证了定有功和无功功率控制换流站故障前后有功和无功功率流向保持一致。正序 d 轴电流 i_d^+ 、q 轴电流 i_q^+ 分别跟踪其参考值，负序 d 轴电流 i_d^- 、q 轴电流 i_q^- 分别跟踪其参考值，被抑制为 0。图 3-5 中联接变压器阀侧电流由于负序分量被抑制为 0，短路至稳态时为较完美的三相对称正弦波，网侧电流由于联接变压器网侧星型接地，有零序电流的通路，其波形为正序电流分量与零序分量的叠加。

图 3-6、3-7、3-8 分别为逆变站近端 PCC 点发生单相接地故障，MMC 内环电流控制器跟踪情况、正序电流跟踪曲线的局部放大图以及交流侧输出电流波形。关于 MMC 交流侧发生不对称故障时的有功功率、无功功率、直流电压等仿真曲线可以参考文献[12.58]。

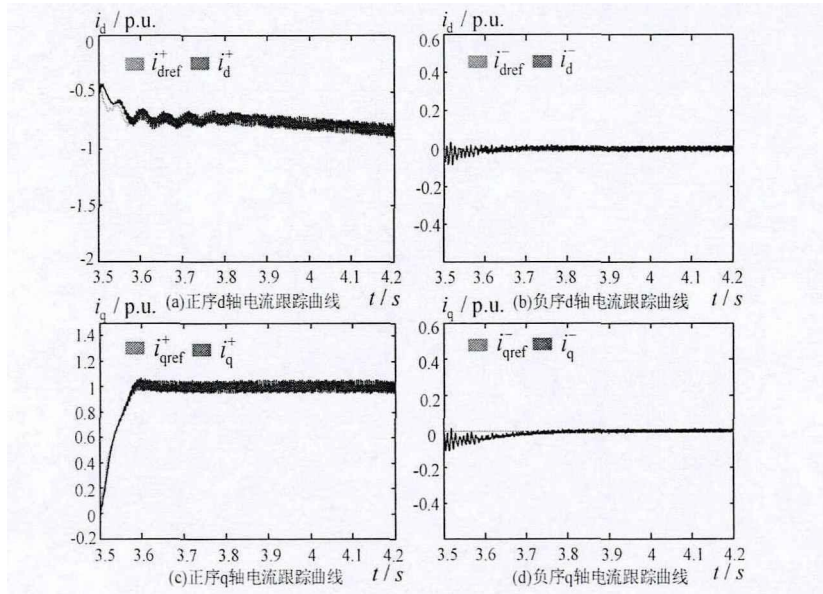


图 3-6 内环电流控制器跟踪曲线

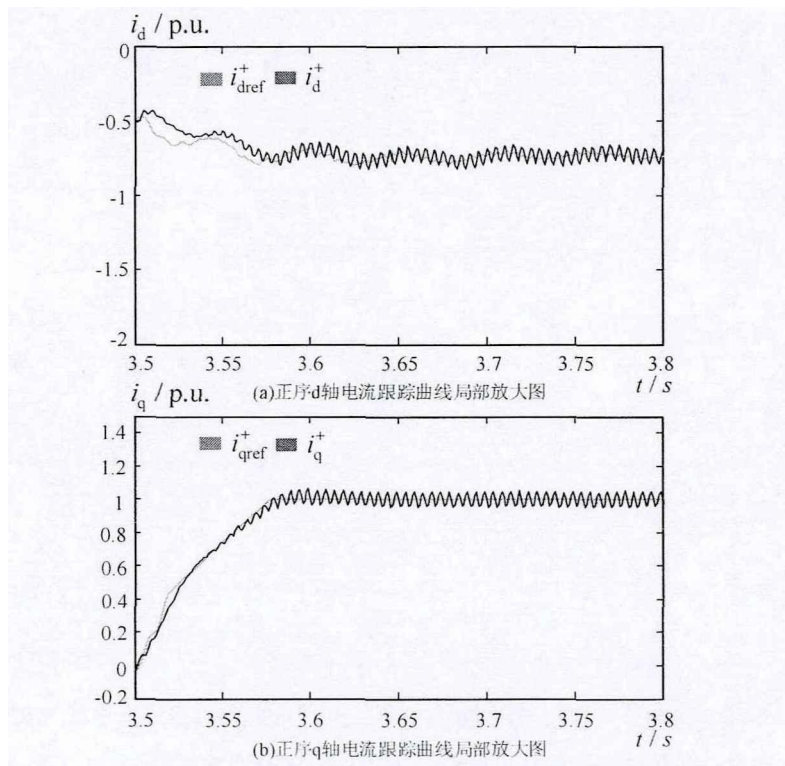


图 3-7 正序电流跟踪曲线局部放大图

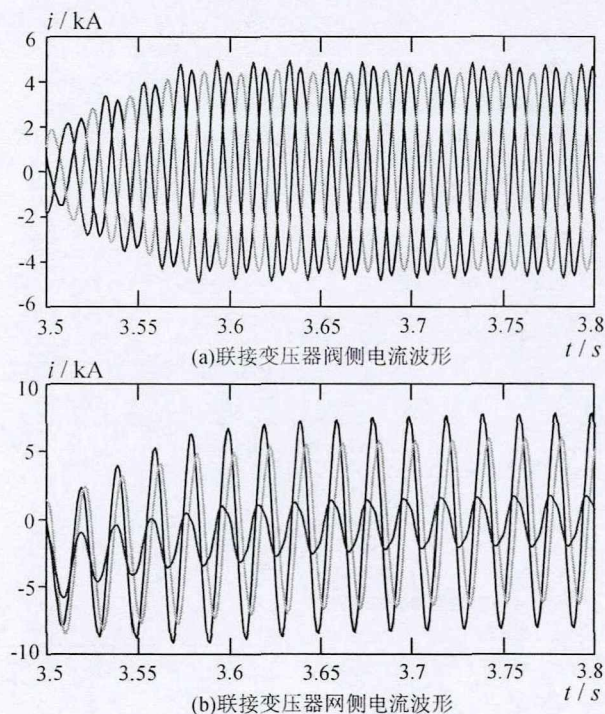


图 3-8 MMC 交流侧输出电流波形

由图 3-6 可得, 逆变站近端发生单相接地故障时, MMC 内环正负序电流均能跟踪其参考值, 负序电流被抑制为 0。正序 q 轴电流参考值 i_{qref}^+ 3.6s 后达到限值, 正序 d 轴电流参考值 i_{dref}^+ 未达到比例积分限值, 逐步稳定于限值之间的某一值。由图 3-7 可看出, 此时 i_{dref}^+ 中含有较高偶数倍频的波动分量, 因为图 3-3 设计的直流电压控制器只消除了二倍频分量的影响, 因此由式(3-4)第一个式子, 当 i_{dref}^+ 未达到限值时, 直流电压中较高偶数倍频波动分量会产生 i_{dref}^+ 相应频次的分量从而影响换流器输出电流的对称性。此时, 图 3-8 中联接变压器阀侧电流并不是较完美的三相对称正弦波, 网侧电流同样为正序分量以及零序分量的叠加。

MMC 交流侧发生两相短路、两相接地短路的分析与上面类似, 两相短路由于没有零序分量的存在, 变压器网侧、阀侧电流均为正序分量, 采用定直流电压控制的逆变站发生较严重的两相接地短路故障时, 此时直流电压难以平衡, i_{dref}^+ 达到限值, 阀侧电流为较完美的三相对称正弦波。观察图 3-6 的正序电流跟踪曲线, i_{dref}^+ 随着故障的持续逐渐负向增加到限值、 i_{qref}^+ 由较小的负值逐渐正向增加到限值, 这验证了换流站故障前后有功功率流向一致, 而无功功率由故障前吸收少量无功转变为故障后提供无功以维持交流电压。从图 3-5 和图 3-8 也可以看出, 故障后 MMC 侧电流波形基本是关于横轴对称, 也验证了 MMC 控制器响应后, MMC 输出电流不含有直流分量。图 3-9 中给出了整流站、逆变站近端 PCC 点发

生两相短路、两相接地短路时联接变压器阀侧电流仿真曲线，均为三相对称正弦电流曲线，仿真结果与理论分析一致。

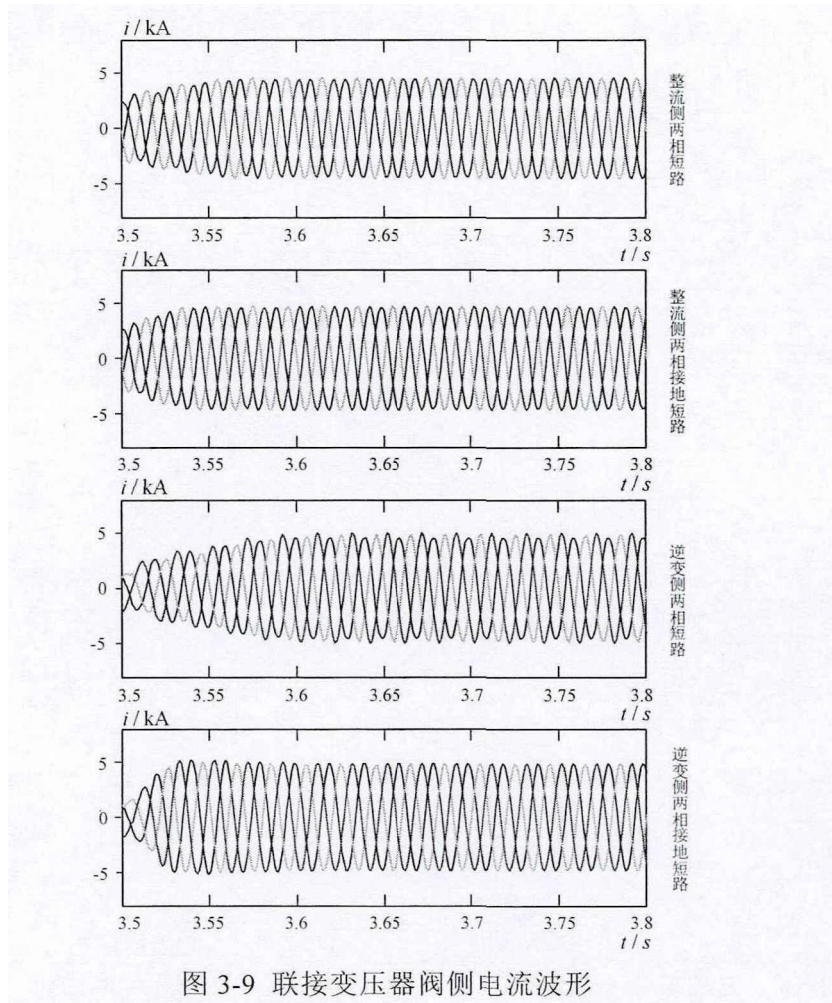


图 3-9 联接变压器阀侧电流波形

3.4 MMC 交流侧故障电流计算

基于上述分析，MMC 交流侧近端发生不对称故障时，MMC 在内环电流控制器、限幅环节的作用下表征为正序电流源，由于正序 dq 轴电流跟踪其参考值，电流源的形式可由正序 d 轴电流参考值 i_{dref}^+ 、q 轴电流参考值 i_{qref}^+ 经式(3-6)的派克反变换得到。当 i_{dref}^+ 、 i_{qref}^+ 的波动分量较小时，由于联接变压器阀侧隔离了零序分量，阀侧电流为较完美的三相对称正弦波。故障期间，换流器所输出相电流的最大值不会超过限幅环节所设置的限值 I_{lim} 。

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dref}^+ \\ i_{qref}^+ \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

式(3-6)中 θ 为锁相环得到的正序电网电压相位。

因此，对于 MMC 交流侧近端不对称故障电流计算，可以采用经典对称分量法计算交流系统为故障点注入的短路电流，MMC 为故障点提供的短路电流可由正序内环电流参考值经式(3-6)反变换求得，故障点电流为交流系统注入电流以及 MMC 提供短路电流的相量和，如图 3-10 所示。

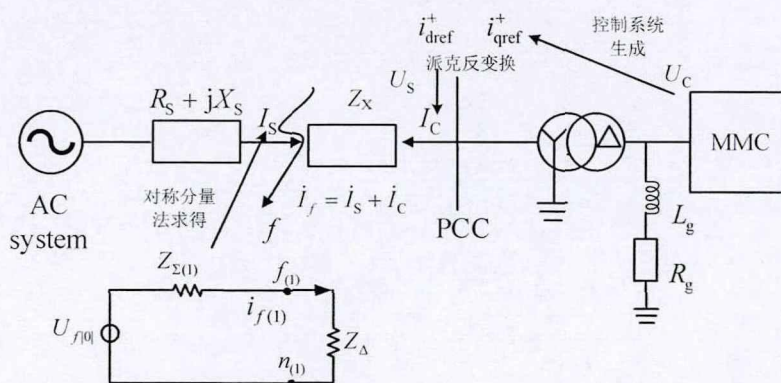


图 3-10 故障电流计算示意图

特别指出，对于接地故障，故障点电流计算需要考虑联接变压器网侧接地的影响，变压器网侧电流还需叠加一定的零序电流分量，但该零序电流的产生与 MMC 无关，经过 MMC 控制器产生的只是变压器网侧电流的正序分量。对于图 3-2 所示双端 MMC-HVDC 系统，系统参数见表 3-1，表 3-2、3-3 给出了整流站、逆变站近端发生不对称故障的短路电流计算结果。MMC 侧故障相电流给的阀侧电流，其值可由式(3-6)和变压器变比换算得到，表中对比的均为短路至稳态时故障相电流的幅值。

表 3-2 整流站近端不对称故障计算结果（单位：kA）

故障类型	阀侧电 流仿真 值	阀侧电 流计算 值	系统侧 电流仿 真值	系统侧 电流计 算值	故障点 电流仿 真值	故障点 电流计 算值	故障点 电流相 对误差
单相接地	4.33	4.33	21.57	21.58	23.47	24.21	3.15%
两相短路	4.44	4.44	18.7	18.7	16.96	17.2	1.42%
两相接地	4.67	4.67	21.57	21.59	22.13	22.69	2.53%

表 3-3 逆变站近端不对称故障计算结果（单位：kA）

故障类型	阀侧电 流仿真 值	阀侧电 流计算 值	系统侧 电流仿 真值	系统侧 电流计 算值	故障点 电流仿 真值	故障点 电流计 算值	故障点 电流相 对误差
单相接地	4.79	4.79	21.56	21.57	29.16	29.47	1.06%
两相短路	4.8	4.8	18.74	18.75	21.05	21.32	1.28%
两相接地	4.81	4.81	21.57	21.59	26.91	27.3	1.45%

可以看出，本文所提出的 MMC 交流侧不对称故障电流的计算方法相对误差

较小，在短路电流实用计算的误差允许范围之内。虽然采用定直流电压控制的逆变站，其正序电流参考值可能会受直流电压中较高偶数频次波动分量的影响，但高倍频分量含量较少，利用上述方法计算的结果误差不大。表 3-2、3-3 对于故障点短路电流的计算结果也验证了 3.2.1 节分析的逆变侧近端故障点电流大于整流侧近端故障点电流。

3.5 本章小结

本章基于 MMC 的运行特性、控制方式，对换流站近端发生不对称故障期间 MMC 的响应作了详细分析，从机理上分析了故障期间 MMC 侧电流的特性、大小以及影响因素，并提出了一种 MMC 交流侧近端发生不对称故障短路电流的计算方法，由于本文所提的 MMC 控制系统适用于电网不对称和对称情况，因此本文分析不对称故障的方法和结论也适用于三相对称故障。

(1) MMC 交流侧近端发生故障，控制器响应后，MMC 输出电流不含有直流分量。

(2) 外环功率控制器产生的内环电流参考值是否达到比例积分限值与故障导致的 PCC 点电压跌落程度有关，故障越严重越容易达到限值，参考值达到限值，功率、电压波动对换流器输出电流的三相对称程度影响越小。

(3) 故障时，内环电流控制器的作用使得实际值跟踪参考值，负序电流跟踪参考值被抑制为 0，正序电流跟踪其参考值，MMC 在交流侧表征为正序电流源形式。

(4) 换流站故障前后有功功率流向一致，无功功率流向一致性与换流站的控制方式和运行方式有关。

(5) MMC 为故障点提供的稳态短路电流为三相对称交流量，可由短路至稳态时的 dq 轴电流参考值派克反变换得到，短路电流大小与 MMC 的控制方式、故障前的运行方式、外环功率控制器的比例积分限值、电流限幅值有关，最大值不会超过限幅环节所给出的限值。

第 4 章 MMC 直流侧故障的暂态特性分析

柔性直流输电系统运行中，不可避免地会遭受扰动或故障，故障对系统安全稳定运行的威胁程度较大。因此研究清楚柔性直流输电系统直流侧发生的单极接地故障、单极断线故障、双极短路故障下的故障特性，对柔直系统的设备选型，保护参数整定等具有理论指导意义和重大的实际价值。

4.1 MMC-HVDC 系统单极接地故障的暂态特性分析

单极接地故障是 MMC 直流侧一种典型故障，其故障特性与 MMC-HVDC 系统的接地方式相关，下文将基于第 2 章介绍的 MMC-HVDC 系统交流侧经星型电抗和电阻接地方式开展单极接地故障特性分析。

4.1.1 单极接地故障理论分析

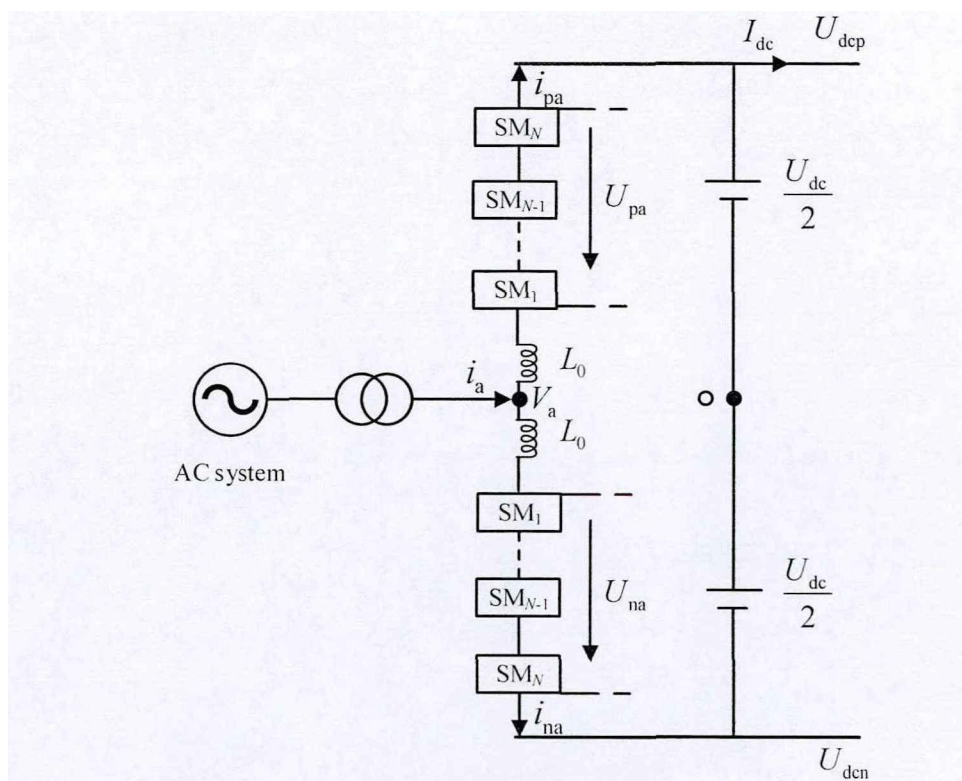


图 4-1 MMC 单相电路图

图 4-1 中， U_{pa} 、 U_{na} 、 i_{pa} 、 i_{na} 分别为换流器 a 相上下桥臂电压、电流， V_a 、 I_a 分别为换流器 a 相输出电压、电流， U_{dc} 、 I_{dc} 分别为直流电压、电流， U_{dcp} 、

U_{dcn} 分别为正、负极直流母线电压。忽略桥臂电阻的影响，MMC 的 a 相上下桥臂电压可由式(4-1)得出：

$$\begin{cases} U_{\text{pa}} = \frac{U_{\text{dc}}}{2} - V_{\text{a}} + L_0 \frac{di_{\text{pa}}}{dt} \\ U_{\text{na}} = \frac{U_{\text{dc}}}{2} + V_{\text{a}} - L_0 \frac{di_{\text{na}}}{dt} \end{cases} \quad (4-1)$$

假设桥臂电流中的二倍频分量被环流抑制器抑制为 0，则 MMC 的 a 相上下桥臂电流表达式为：

$$\begin{cases} i_{\text{pa}} = \frac{1}{2}i_{\text{a}} + \frac{1}{3}I_{\text{dc}} \\ i_{\text{na}} = \frac{1}{2}i_{\text{a}} - \frac{1}{3}I_{\text{dc}} \end{cases} \quad (4-2)$$

将换流器内部电压定义为：

$$e_{\text{va}} = V_{\text{a}} - \frac{L_0}{2} \frac{di_{\text{a}}}{dt} \quad (4-3)$$

将式(4-2)和(4-3)代入(4-1)可得：

$$\begin{cases} U_{\text{pa}} = \frac{U_{\text{dc}}}{2} - e_{\text{va}} \\ U_{\text{na}} = \frac{U_{\text{dc}}}{2} + e_{\text{va}} \end{cases} \quad (4-4)$$

正常运行时，柔性直流输电系统的直流电压恒定，其正负极各自承担一半的额定直流电压。

$$\begin{cases} U_{\text{dcp}} = +\frac{U_{\text{dc}}}{2} \\ U_{\text{dcn}} = -\frac{U_{\text{dc}}}{2} \end{cases} \quad (4-5)$$

因此，由基尔霍夫定律可得，MMC 交流侧三相电压的表达式为：

$$\begin{cases} V_{\text{a}} = e_{\text{va}} + \frac{L_0}{2} \frac{di_{\text{a}}}{dt} + \frac{U_{\text{dc}}}{2} + U_{\text{dcn}} \\ V_{\text{b}} = e_{\text{vb}} + \frac{L_0}{2} \frac{di_{\text{b}}}{dt} + \frac{U_{\text{dc}}}{2} + U_{\text{dcn}} \\ V_{\text{c}} = e_{\text{vc}} + \frac{L_0}{2} \frac{di_{\text{c}}}{dt} + \frac{U_{\text{dc}}}{2} + U_{\text{dcn}} \end{cases} \quad (4-6)$$

结合上式(4-4)，可得出换流器交流侧采用星型电抗并经电阻接地方式下，柔直系统发生单极接地故障的示意图如下所示。

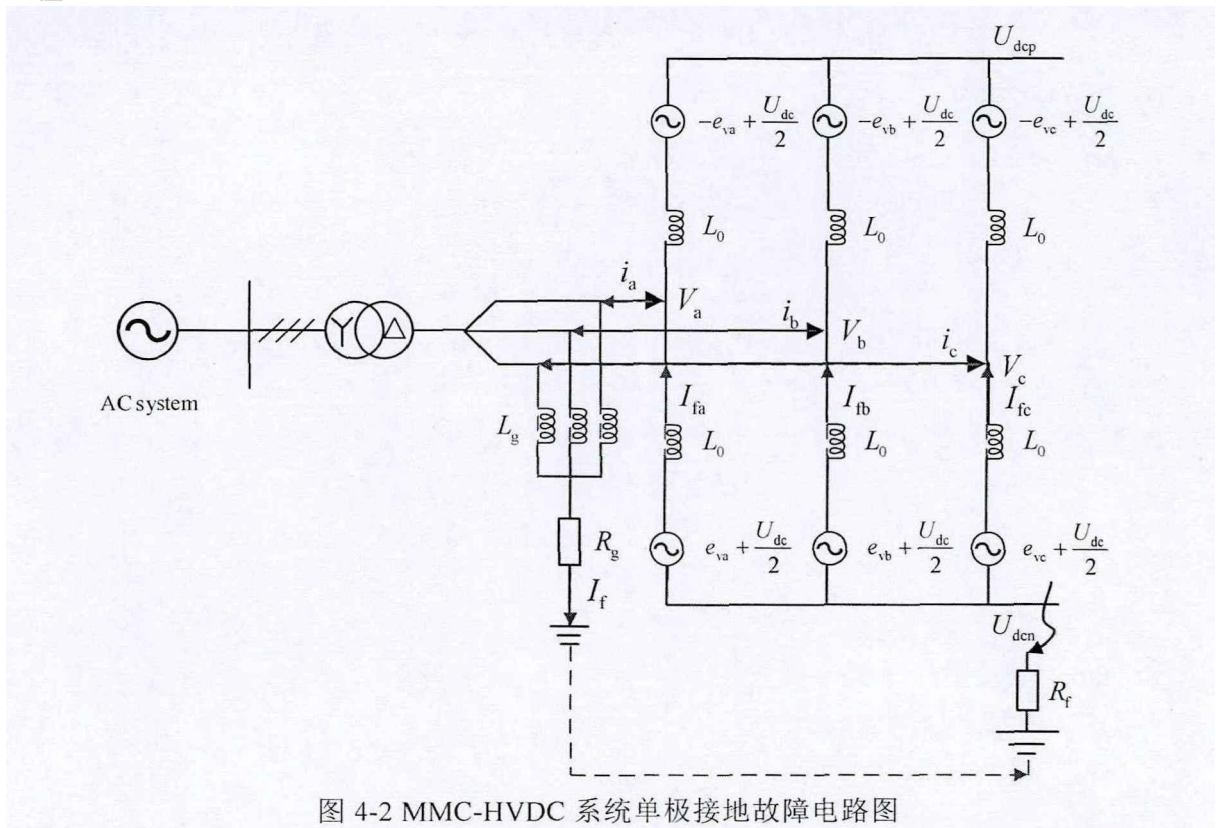


图 4-2 MMC-HVDC 系统单极接地故障电路图

如图 4-2 所示，MMC-HVDC 系统直流侧负极发生单极接地故障，故障电阻为 R_f 。由于换流器阀侧采用星型电抗并经电阻接地，故障期间，故障极所连桥臂的子模块电容放电，故障电流在故障点、故障极所连桥臂以及交流侧接地点之间构成通路，如图 4-2 中红色虚线回路所示。 I_f 为流入故障点电流， I_{fa} 、 I_{fb} 、 I_{fc} 分别为下桥臂 a、b、c 相故障电流，忽略桥臂电阻的影响，可得：

$$\begin{cases} (R_g + R_f)I_f + (L_g + L_0)\frac{dI_{fa}}{dt} = e_{va} + U_{dc}/2 \\ (R_g + R_f)I_f + (L_g + L_0)\frac{dI_{fb}}{dt} = e_{vb} + U_{dc}/2 \\ (R_g + R_f)I_f + (L_g + L_0)\frac{dI_{fc}}{dt} = e_{vc} + U_{dc}/2 \end{cases} \quad (4-7)$$

故障点电流可由下桥臂 a、b、c 三相故障电流得出。

$$I_f = I_{fa} + I_{fb} + I_{fc} \quad (4-8)$$

将式(4-8)代入式(4-7)可得：

$$(R_g + R_f)I_f + \frac{(L_g + L_0)}{3}\frac{dI_f}{dt} = U_{dc}/2 \quad (4-9)$$

由式(4-9)可以得出，换流器交流侧接地电感 L_g 和桥臂电感 L_0 主要抑制故障电流的上升速度，而换流器交流侧接地电阻 R_g 和故障接地电阻 R_f 决定了故障至

稳态时的电流大小。

因此稳态短路故障电流可由下式(4-10)得出：

$$I_f = \frac{U_{dc}}{2} / (R_g + R_f) \quad (4-10)$$

故障时，换流器直流侧正、负极电压可由下式(4-11)得出：

$$\begin{cases} U_{dcp} = U_{dc} - R_f \cdot I_f \\ U_{dcn} = -R_f \cdot I_f \end{cases} \quad (4-11)$$

将式(4-10)代入(4-11)可得：

$$\begin{cases} U_{dcp} = U_{dc} - \frac{1}{2} U_{dc} \frac{R_f}{(R_g + R_f)} \\ U_{dcn} = -\frac{1}{2} U_{dc} \frac{R_f}{(R_g + R_f)} \end{cases} \quad (4-12)$$

由于一般情况下，交流侧接地电阻 R_g 远远大于故障接地电阻 R_f ，式(4-12)可以近似由下式(4-13)表示。

$$\begin{cases} U_{dcp} \approx U_{dc} \\ U_{dcn} \approx 0 \end{cases} \quad (4-13)$$

由式(4-13)可得出，MMC-HVDC 系统直流侧负极发生接地故障时，正极电压近似为正常运行时电压的两倍，而负极电压由于接地降至为 0。接地故障发生时，非故障极母线承受两倍正常运行电压可能威胁绝缘。

将式(4-13)代入式(4-6)可以得到交流侧电压的表达式如下。

$$\begin{cases} V_a = e_{va} + \frac{L_0}{2} \frac{di_a}{dt} - L_0 \frac{di_{fa}}{dt} + U_{dc} / 2 \\ V_b = e_{vb} + \frac{L_0}{2} \frac{di_b}{dt} - L_0 \frac{di_{fb}}{dt} + U_{dc} / 2 \\ V_c = e_{vc} + \frac{L_0}{2} \frac{di_c}{dt} - L_0 \frac{di_{fc}}{dt} + U_{dc} / 2 \end{cases} \quad (4-14)$$

由式(4-14)可以看出，柔直系统直流侧发生单极接地故障时，在换流器交流侧电压中存在较大的直流偏置电压分量，可能会损害系统的绝缘，MMC 交流侧设备绝缘设计需要考虑单极接地故障下直流电压偏置导致的过电压。

4.1.2 单极接地故障仿真验证

为了验证上述的理论分析，在 PSCAD/EMTDC 下搭建了双端 MMC-HVDC 系统进行了仿真验证，双端系统示意图参照图 4-3，仿真系统的参数见下表 4-1，MMC1 采用定有功功率和定无功功率控制，MMC2 采用定直流电压和交流电压

控制。

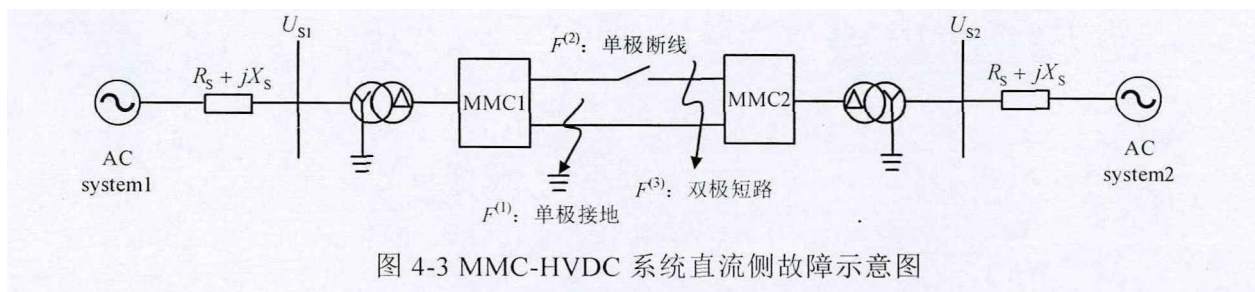


图 4-3 MMC-HVDC 系统直流侧故障示意图

表 4-1 MMC-HVDC 系统参数

参数	数值
交流系统等效电阻 R_S/Ω	0.8
交流系统等效电抗 L_S/H	0.02913
联接变压器额定容量 S_T/MVA	1700
联接变压器变比	525/260
联接变压器漏抗 L_T/H	0.07745
桥臂电抗 L_0/H	0.075
故障点接地电阻 R_f/Ω	0.01
直流线路等效电阻 R_{dc}/Ω	0.15
直流侧平波电抗 L_{dc}/H	0.025
交流侧接地电抗 L_g/H	2
交流侧接地电阻 R_g/Ω	500
额定直流电压 U_{dc}/kV	525
额定传输有功功率 P^{ref}/MW	1000
额定传输无功功率 $Q^{ref}/Mvar$	0

仿真系统参数

仿真中在 2s 时刻发生负极接地故障，故障持续 0.5s，图 4-4(a)-(d)依次为换流器阀侧电压、正、负极直流电压、故障电流、故障极所连桥臂子模块电容电压的仿真波形。由图 4-4(a)可得，当柔直系统发生单极接地故障时，换流器阀侧交流电压中存在 $U_{dc}/2$ 大小的直流电压偏置分量。由图 4-4(b)可得，当柔直系统发生单极接地故障时，故障极电压近似为 0，正常极电压变为正常值的 2 倍。因此故障期间，换流器交流侧和直流侧均有过电压的风险，系统绝缘设计应考虑这一因素。由图 4-4(c)可得，故障电流的稳态值大小由交流侧接地电阻、故障点电阻和直流电压大小决定，入地电流为零序分量。由图 4-4(d)可得，当 MMC-HVDC 系统发生单极接地故障时，故障极所连桥臂的子模块电容放电，电容电压值相对

正常值降低，且由于桥臂电流中包含故障电流分量，故障极所连桥臂的子模块电容电压波动量较正常运行时大。

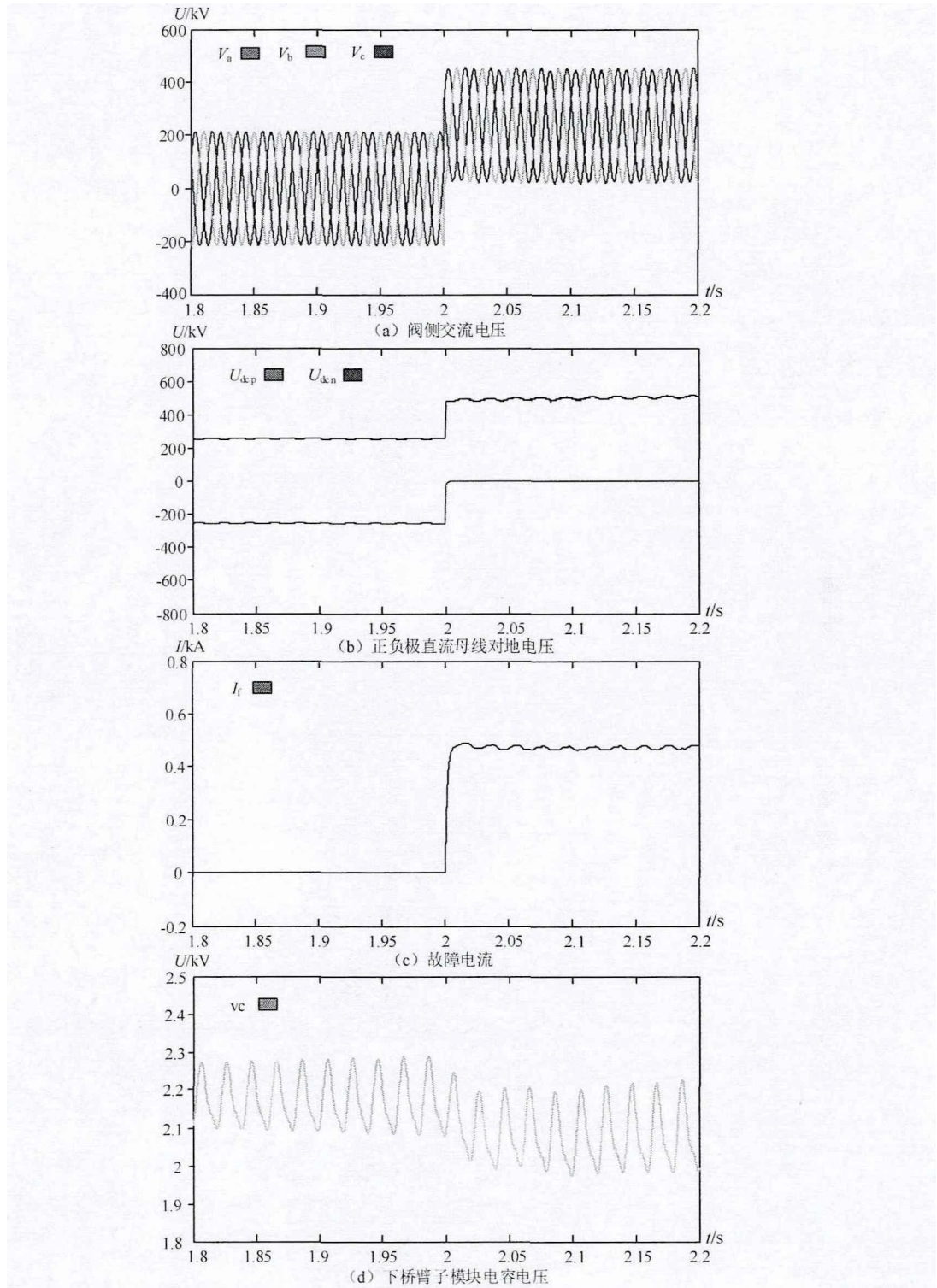


图 4-4 单极接地故障仿真波形

综上所述，通常情况下柔直系统交流侧接地阻抗较大，单极接地故障电流较小，不会导致换流阀器件过流，而换流阀交流侧设备、直流侧非故障极母线均存

在过电压威胁，可能损坏绝缘。

4.2 MMC-HVDC 系统单极断线故障的暂态特性分析

4.2.1 单极断线故障理论分析

MMC-HVDC 系统发生单极断线故障时，将中止功率的传输。若定功率控制的换流站处于整流模式，此时换流站子模块电容将持续充电，子模块电容电压上升。若定功率控制的换流站处于逆变模式，若不调整换流站功率指令，换流站子模块电容将持续放电，以维持功率传输，子模块电容电压降低。由于故障时定功率控制站子模块电容电压变化，在双端换流站中性点之间的电压差不再为 0，从而在换流站双端中性点，交流侧接地电阻，非故障极桥臂及直流线之间产生故障电流。故障电流回路如下图 4-5 所示：

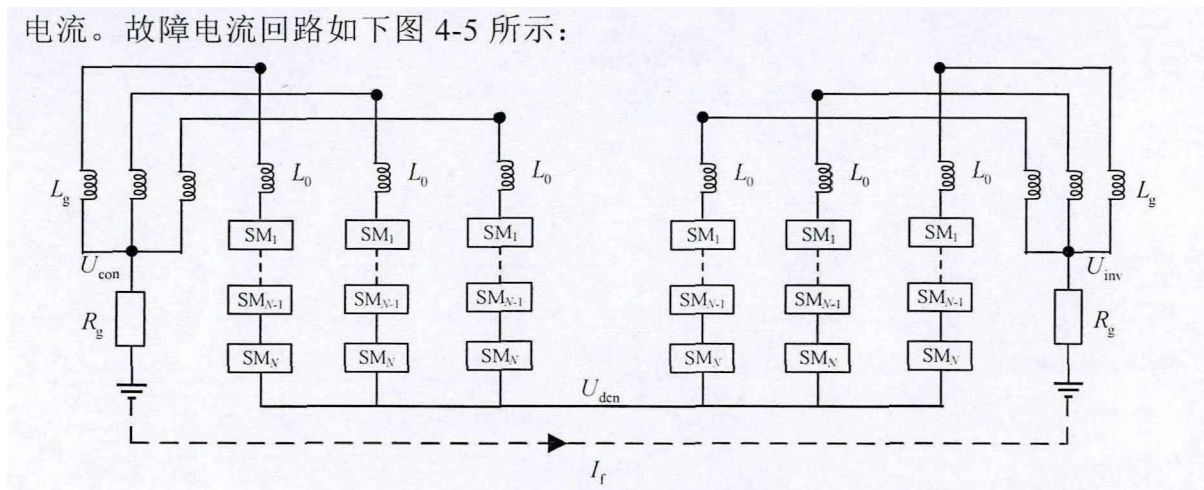


图 4-5 单极断线故障电流通路

定功率换流站处于整流模式，单极断线故障期间，子模块电容在定功率控制器作用下持续充电，电压逐渐升高，子模块电容电压可由下式计算。

$$U_{sm}(t) = \sqrt{P \cdot t / (3NC) + U_{sm0}^2} \quad (4-15)$$

式中： $U_{sm}(t)$ 为 t 时刻的子模块电容电压值； P 为系统传输有功功率； C 为子模块电容； N 为桥臂子模块数目； U_{sm0} 为故障前子模块电容电压； t 为以故障时刻为初始时刻所经过的时间量。

由于故障电流流经接地电阻产生功率损耗，因此由式(4-15)所求得的子模块电容电压偏高，因此利用下式进行修正。

$$U_{sm}(t) = \sqrt{\frac{P \cdot t - \sum_{j=0}^{N-1} \frac{(NU_{sm}(j) - NU_{sm0})^2}{8R_g} \Delta t}{3NC} + U_{sm0}^2} \quad (4-16)$$

式中： R_g 为接地电阻； Δt 为采样时间间隔； U_{sm0} 为故障前子模块电容电压

值： $U_{sm}(j)$ 为在时间 t 内第 j 个时间间隔的子模块电容电压值。

定功率换流站处于逆变模式时，子模块电容在定功率控制器作用下持续放电，电压降低，直至直流电压与换流器阀侧交流相电压幅值之间的调制比达到限值，此时子模块电容电压可由下式得到：

$$U_{sm} = 2\sqrt{2}U_{ac} \cdot M_{max} / (\sqrt{3}N) \quad (4-17)$$

式中： U_{ac} 为交流侧阀侧线电压有效值； M_{max} 为调制比限值。

如图 4-5 所示， U_{con} 为整流侧中性点对地电压， U_{inv} 为逆变侧中性点对地电压， U_{dcn} 为负极直流母线对地电压，根据双端 MMC-HVDC 系统运行原理可得：

$$\begin{cases} U_{con} = \frac{NU_{smcon}}{2} + U_{dcn} \\ U_{inv} = \frac{NU_{sminv}}{2} + U_{dcn} \end{cases} \quad (4-18)$$

式中： U_{smcon} 为整流侧子模块电容电压； U_{sminv} 为逆变侧子模块电容电压。

因此，双端中性点对地电压差为：

$$\Delta U = U_{con} - U_{inv} = \frac{N}{2}(U_{smcon} - U_{sminv}) \quad (4-19)$$

由于单极断线故障导致两侧子模块电容电压变化不一致，存在压差，在双端中性点与非故障极之间存在故障电流 I_f 的通路，如图 4-5 所示，故障电流的计算式如下：

$$I_f = \Delta U / (2R_g) \quad (4-20)$$

4.2.2 单极断线故障仿真验证

为了验证上述理论分析，在 PSCAD/EMTDC 下搭建双端 MMC-HVDC 系统进行仿真验证，双端 MMC-HVDC 系统的示意图如图 4-3 所示，双端系统参数参照表 4-1，整流侧换流站采用定有功功率和无功功率控制，逆变侧换流站采用定直流电压和交流电压控制。仿真中在 2s 时刻发生正极断线故障，2.5s 时故障消除。下图 4-6(a)-(c)分别为整流侧定功率控制换流站直流电压、正负极直流母线对地电压以及上下桥臂子模块电容电压仿真波形。

如图 4-6(a)所示，由于单极断线故障存在，直流系统功率传输中断，整流侧定功率控制换流站交直流侧功率不平衡，直流电压上升。如图 4-6(b)所示。正极对地电压逐渐上升，负极对地电压逐渐下降，正负极之间直流电压逐渐增大，由于正极故障，功率传输中断，故障极直流线路电感中的能量被电容吸收，正极直流母线在交直流侧均有充电过程，因此正极直流母线对地电压变化幅度较负极

大。图 4-7 为正极充电示意图，正极在交直流侧充电电路如图 4-7 中红色虚线所示， L_L 为直流线路电感， C_L 为直流线路对地电容。

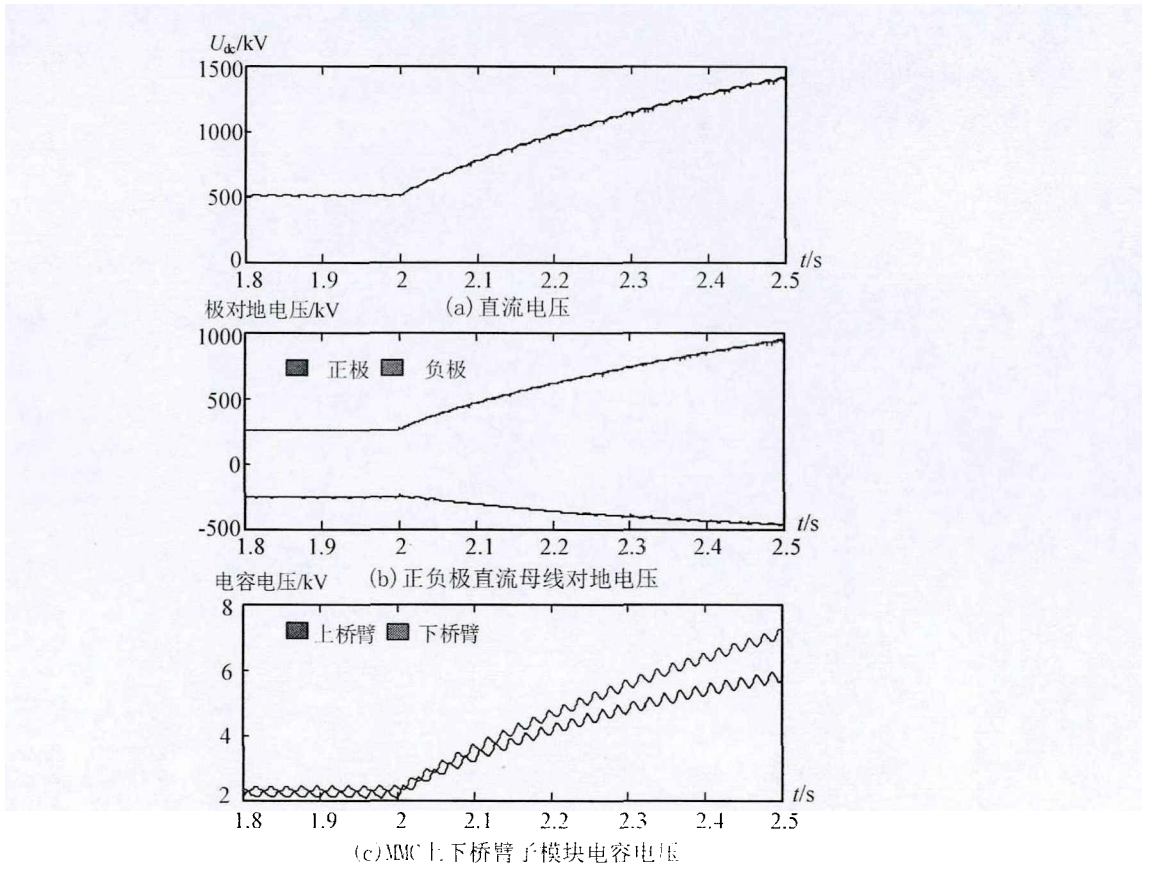


图 4-6 定功率控制换流站电压波形

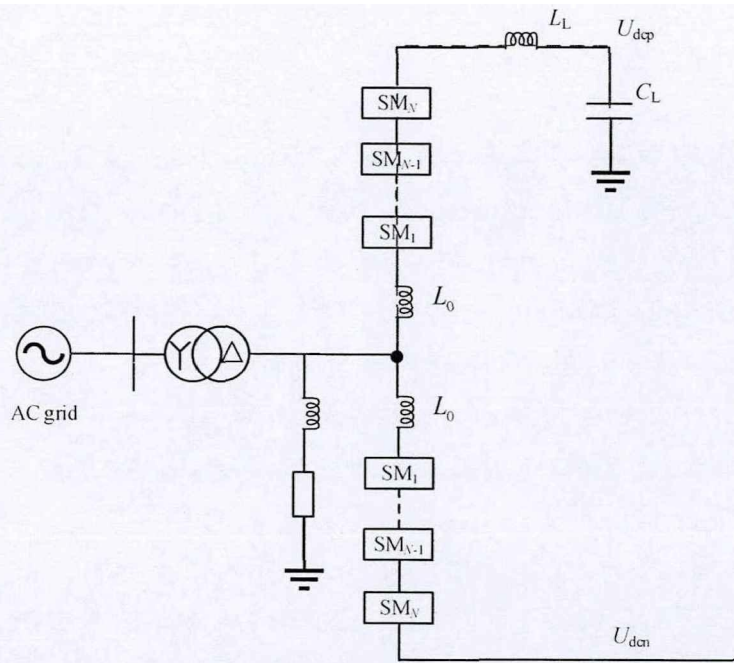


图 4-7 正极充电示意图

如图 4-6(c)所示, 单极断线发生后, 在定功率控制器作用下, 上下桥臂子模块电容持续充电, 上下桥臂子模块电容电压均上升, 且由于负极存在故障电流的通路, 下桥臂子模块电容存在放电过程, 因此下桥臂子模块电容电压上升幅度较上桥臂电容小。

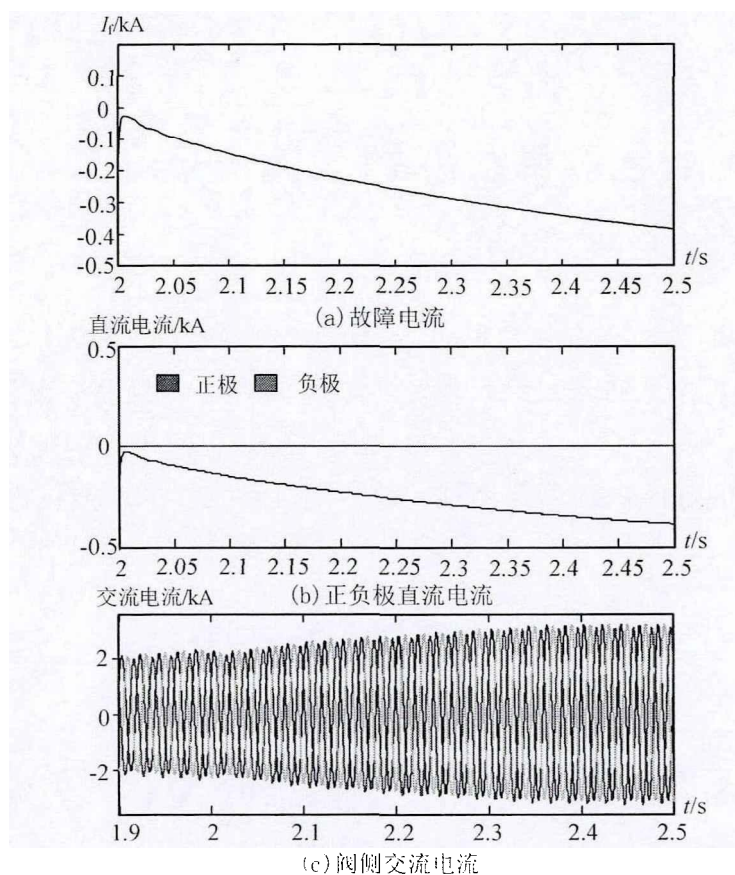


图 4-8 定功率控制换流站电流波形

图 4-8(a)-(c)依次为整流侧定功率控制换流站故障电流、正负极直流电流以及阀侧交流电流仿真波形, 如图 4-8(a)所示, 故障过程中, 由于整流站功率不平衡, 双端换流站子模块电容电压不均衡, 且整流站子模块电容电压持续增大, 由式(4-19)、(4-20)可得双端中性点电压差逐渐增大, 流入故障点电流逐渐增大。如图 4-8(b)所示, 由于正极断线故障导致功率传输中断, 正极直流电流为 0, 负极由于存在故障电流通路, 电流不为 0, 其增长幅度与故障电流类似。如图 4-9(c)所示, 故障过程中, 逐渐增大的零序故障电流导致阀侧交流电流不对称。

综上所述, 柔性直流输电系统发生单极断线故障时, 故障极、非故障极直流母线具有较高的直流电压变化率, 且故障极所在直流母线电压变化率更严重, 可能导致直流母线过压, 损坏绝缘。通常情况下, 交流侧接地阻抗较大, 故障电流较小, 不会导致器件或设备过流。

4.3 MMC-HVDC 系统双极短路故障的暂态特性分析

双极短路故障是柔性直流输电系统直流侧最为严重的故障类型，换流站直流侧一旦发生双极短路，子模块未闭锁前，换流器三相上下六个桥臂子模块电容将对故障点持续放电，交流电网也将通过换流器的桥臂为直流侧故障点馈入电流，从交流侧的角度来看，近似于发生了三相短路，换流器的六个桥臂、直流极母线以及直流线路将严重过电流，威胁设备安全。下文将基于典型的半桥型 MMC 结构详细分析 MMC-HVDC 系统发生双极短路故障的暂态过程。

4.3.1 双极短路故障理论分析

MMC-HVDC 系统直流侧发生双极短路故障，换流站子模块电容放电为故障点注入电流，交流系统也通过换流器三相桥臂为直流侧馈入电流，此时换流阀器件严重过电流，为保护设备安全，通常会在较短时间内闭锁子模块，实际工程一般是在双极故障 10ms 内换流器闭锁，随即交流系统保护检测过电流切断交流电源馈入故障点电流。因此 MMC-HVDC 系统直流侧发生双极短路的暂态过程大概分为闭锁前电容放电和闭锁后电感续流两个阶段。

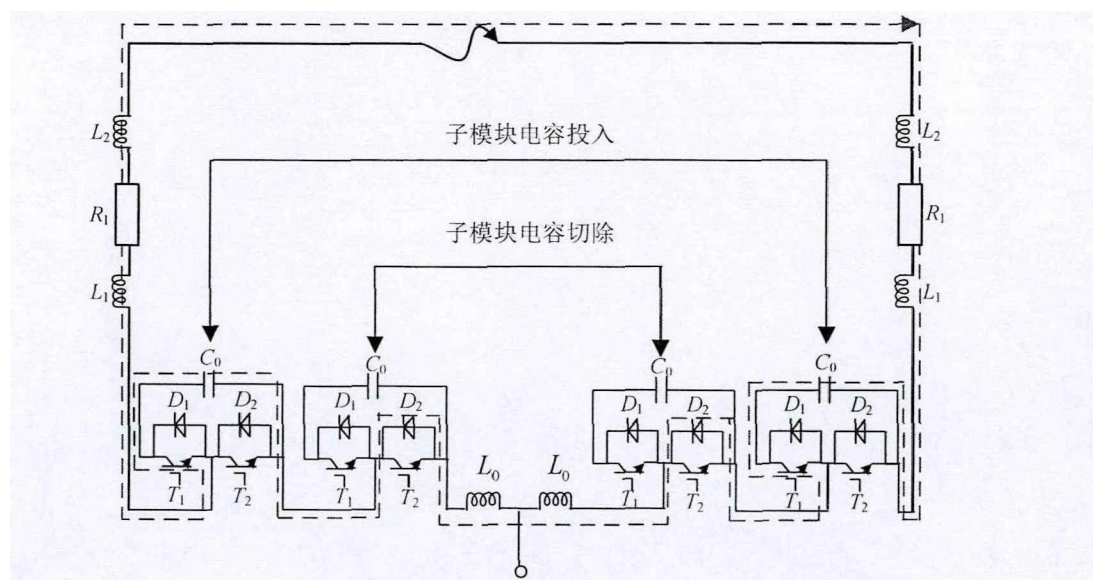


图 4-9 换流器单相等值电路

子模块闭锁前，馈入直流侧极间短路故障的电流主要来自换流器子模块电容放电电流，由于闭锁前直流系统极间故障在交流侧近似于发生了三相短路故障，交流电源馈入直流侧电流三相对称，相互抵消。图 4-9 为极间故障子模块闭锁前换流器单相电路，红色虚线所示为子模块电容放电通路。换流器闭锁前，子模块电容正常投切，处于投入状态的子模块，放电电流流经子模块电容 C_0 和 IGBT 器件 T_1 ，处于切除状态的子模块，放电电流流经二极管 D_2 。放电电流在直流侧经

平波电抗 L_1 、线路等值电阻 R_1 和等值电感 L_2 构成闭合回路。

极间故障期间，换流器闭锁前，子模块电容按照正常的调制方式正常投切，其充放电的状态与投切状态密切相关，闭锁前任一时刻，上下桥臂所投入的子模块数之和为 N 。由于 MMC 的控制系统频率很高，三相上下桥臂子模块电容在控制系统作用下高频投切，因此可以将每相上下桥臂的 $2N$ 个子模块看成并联的两个分组，两个分组高频投切，依次放电。根据上述分析，忽略桥臂电阻可以得到极间故障换流器闭锁前子模块电容放电的等值电路。

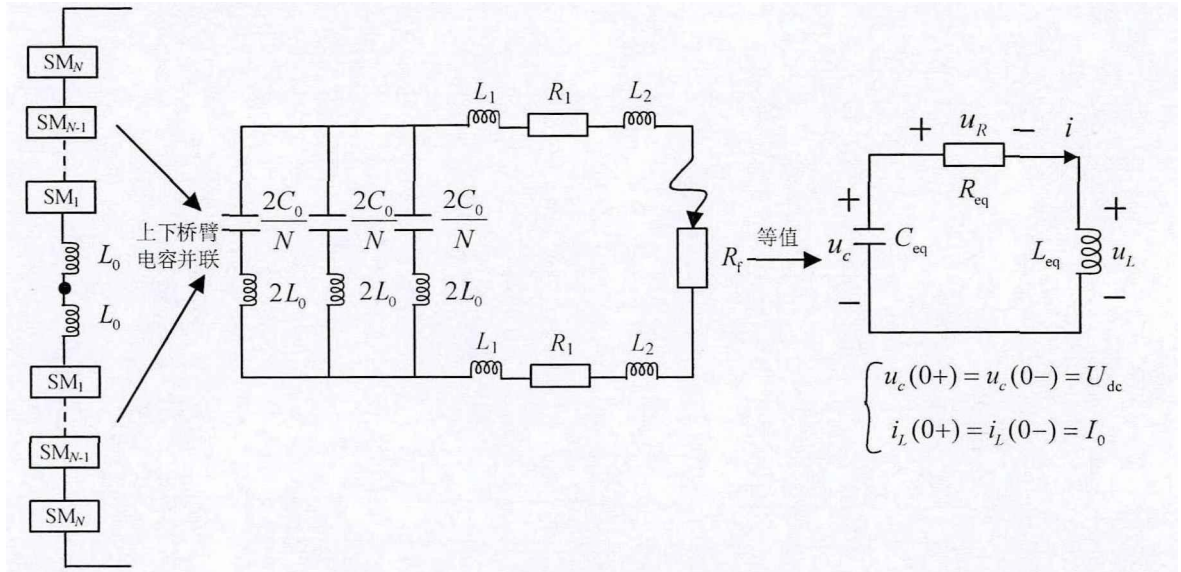


图 4-10 子模块电容放电等值电路

图 4-10 中， U_{dc} 为故障前每相投入的 N 个子模块电容电压之和， I_0 为故障前直流线路电流，其值由故障前系统的运行方式决定，等值电路中 C_{eq} 、 R_{eq} 、 L_{eq} 的表达式如下所示：

$$\begin{cases} C_{eq} = \frac{6C_0}{N} \\ R_{eq} = 2R_1 + R_f \\ L_{eq} = \frac{2}{3}L_0 + 2L_1 + 2L_2 \end{cases} \quad (4-21)$$

假设双极短路故障发生在 $t=0$ 时刻，则图 4-10 所示的子模块电容放电等值电路为已知初始条件的二阶欠阻尼振荡放电过程，因此可以求得电容电压 u_c 和直流电流 i 。

$$u_c = e^{-\delta t} \left[\frac{U_{dc}\omega_0}{\omega} \sin(\omega t + \beta) - \frac{I_0}{C_{eq}\omega} \sin(\omega t) \right] \quad (4-22)$$

$$i = e^{-\delta t} \left[\frac{U_{dc}}{\omega L_{eq}} \sin(\omega t) - \frac{I_0\omega_0}{\omega} \sin(\omega t - \beta) \right] \quad (4-23)$$

式(4-22)、(4-23)各参数表达如下:

$$\begin{cases} \delta_1 = R_{eq}/(2L_{eq}) \\ \omega_0 = \sqrt{1/(L_{eq}C_{eq})} \\ \omega = \sqrt{1/(L_{eq}C_{eq}) - (R_{eq}/(2L_{eq}))^2} \\ \beta = \arctan(\omega/\delta) \end{cases} \quad (4-24)$$

通常情况下, $(R_{eq}/(2L_{eq}))^2 \ll 1/(L_{eq}C_{eq})$, 则有 $\omega = \omega_0$, $\beta = \pi/2$, 代入式(4-23)可得:

$$\begin{aligned} i &= e^{-\delta_1 t} [U_{dc} \sqrt{\frac{C_{eq}}{L_{eq}}} \sin(\omega t) + I_0 \cos(\omega t)] \\ &= e^{-\delta_1 t} \sqrt{\frac{U_{dc}^2 C_{eq}}{L_{eq}} + I_0^2} \sin(\omega t + \alpha) \end{aligned} \quad (4-25)$$

式中 $\alpha = \arctan(\frac{I_0}{U_{dc}} \sqrt{\frac{L_{eq}}{C_{eq}}})$ 。

由于二极管的存在, 电容电压过零后不会反向充电, 全部子模块电容放电完毕后, 直流线路上电流将会达到最大值, 最大值的表达式如下:

$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{U_{dc}^2 C_{eq}}{L_{eq}} + I_0^2} \quad (4-26)$$

由式(4-26)可知, 双极故障期间, 换流器闭锁前, 线路上最大故障电流的值主要由初始直流电压 U_{dc} 、线路初始电流 I_0 , 以及等值电容 C_{eq} 和等值电感 L_{eq} 决定。一般情况下, 系统运行的直流电压和输送的功率是确定的, 不可随意更改。因此限制故障电流的两个可行措施为减小子模块电容值和增大桥臂电抗, 线路平波电抗值。桥臂电抗串联在三相上下桥臂回路, 其不仅对三相子模块电容放电有较好抑制的效果, 而且对于交流侧馈入桥臂的电流也有很好的抑制作用, 而平波电抗器会影响直流系统的动态特性, 因此平波电抗器的选取应该兼顾系统的动态响应和故障特性, 合理设置参数。

直流系统发生双极故障后要求换流器快速闭锁, 此时子模块电容放电阶段结束, 换流器各桥臂进入了电感续流阶段。闭锁后电感续流的电流通路如图 4-11 所示。由于电感电流不能突变, 因此闭锁后续流阶段换流器每相上下桥臂反并联二极管 D_2 仍导通。忽略二极管的非线性, 电感续流衰减至零后, 交流系统通过子模块反并联二极管 D_2 馈入电流, 此时交流系统与换流器桥臂构成三相不控整流桥, 由于桥臂电抗参与了故障期间换流器交直流侧的能量交换, 交流系统馈入的短路电流包含有直流分量, 为“准正弦波”状态, 此时换流器每相上下桥臂在每

1/4 工频周期内，存在同时导通的阶段。通常交流系统馈入阶段时，系统保护已经响应并动作，因此不再对短路至稳态阶段作具体分析。

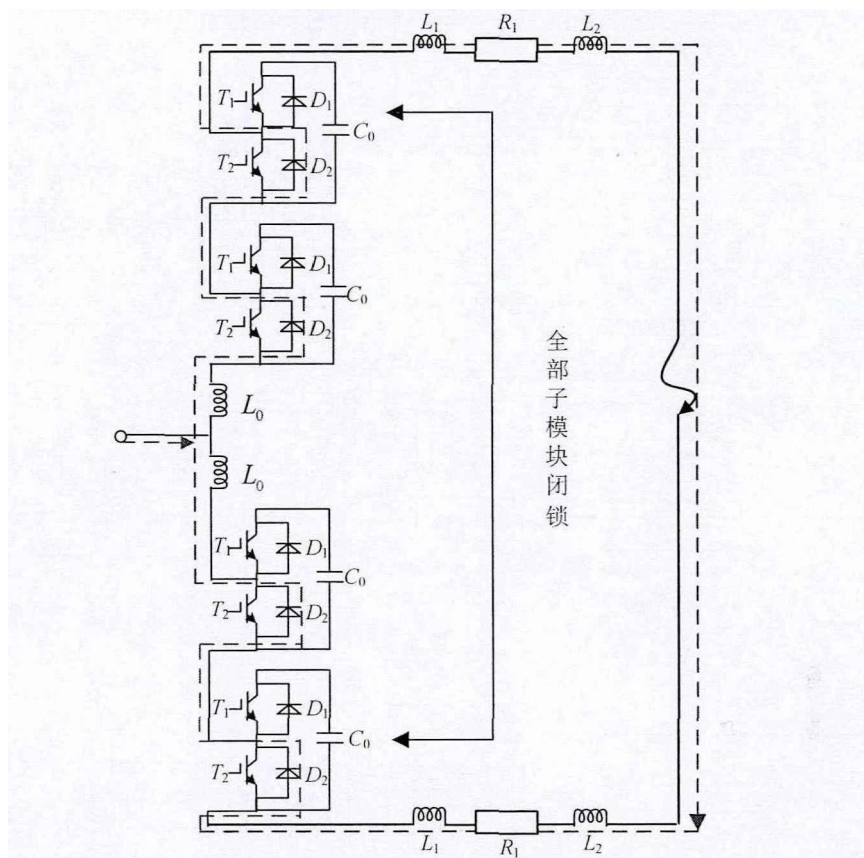


图 4-11 闭锁后电感续流通路

假设闭锁时刻直流线路电流为 I_1 ，则续流阶段线路电流为：

$$i = I_1 e^{-\delta_2 t} \tag{4-27}$$

式中 $\delta_2 = R_{eq} / L_{eq}$ 。

由上述分析可知，闭锁前电容放电阶段，桥臂过电流的器件为子模块的 IGBT 器件 T_1 和反并联二极管 D_2 ；电感续流阶段，桥臂过电流器件只有反并联二极管 D_2 ；子模块电容值越大，电容放电阶段所产生的故障电流越大，桥臂电抗对电容放电阶段、电感续流阶段以及交流馈入阶段的桥臂电流上升均存在限制作用。

4.3.2 双极短路故障仿真验证

基于 PSCAD/EMTDC 搭建如图 4-3 所示双端系统进行仿真，系统参数参见表 4-1，在 $t=3s$ 时刻设置双极短路故障，20ms 后换流器闭锁，3.5s 时刻故障清除。图 4-12(a)-(d)分别为极间故障直流线路电路、上下桥臂电流、上桥臂子模块电容电压以及下桥臂子模块电容电压波形。由图 4-12 可看出，闭锁前子模块电

容放电，电容电压迅速放电至 0，直流线路电流在回路电感抑制作用下上升，闭锁后进入电感续流阶段，直流线路电流缓慢衰减，故障期间，换流器每相上下桥臂存在较大过电流，桥臂电流中包含有较大的直流分量。

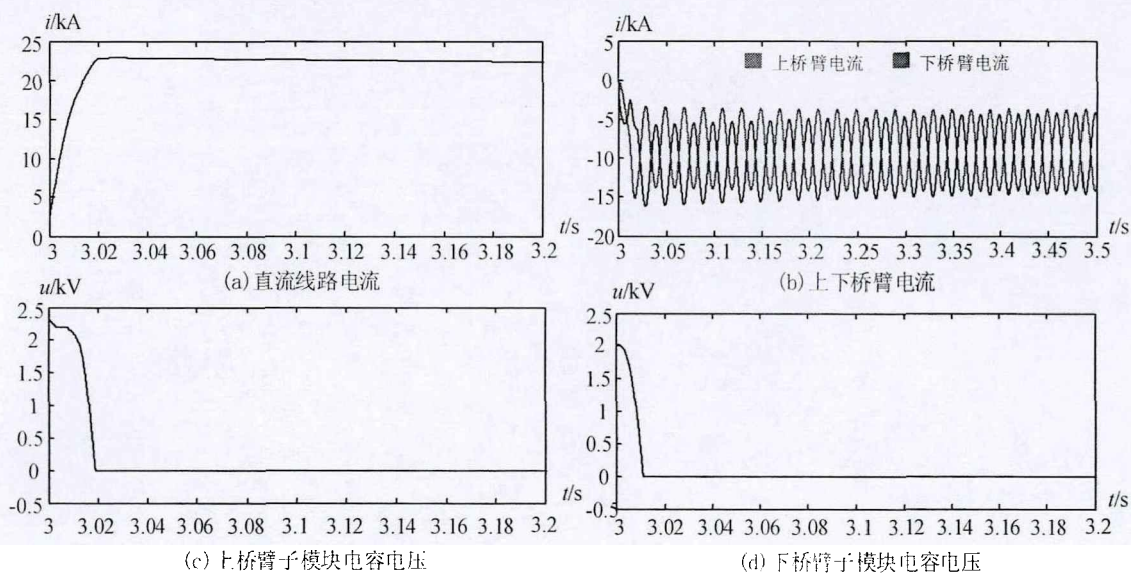


图 4-12 极间故障电压电流波形

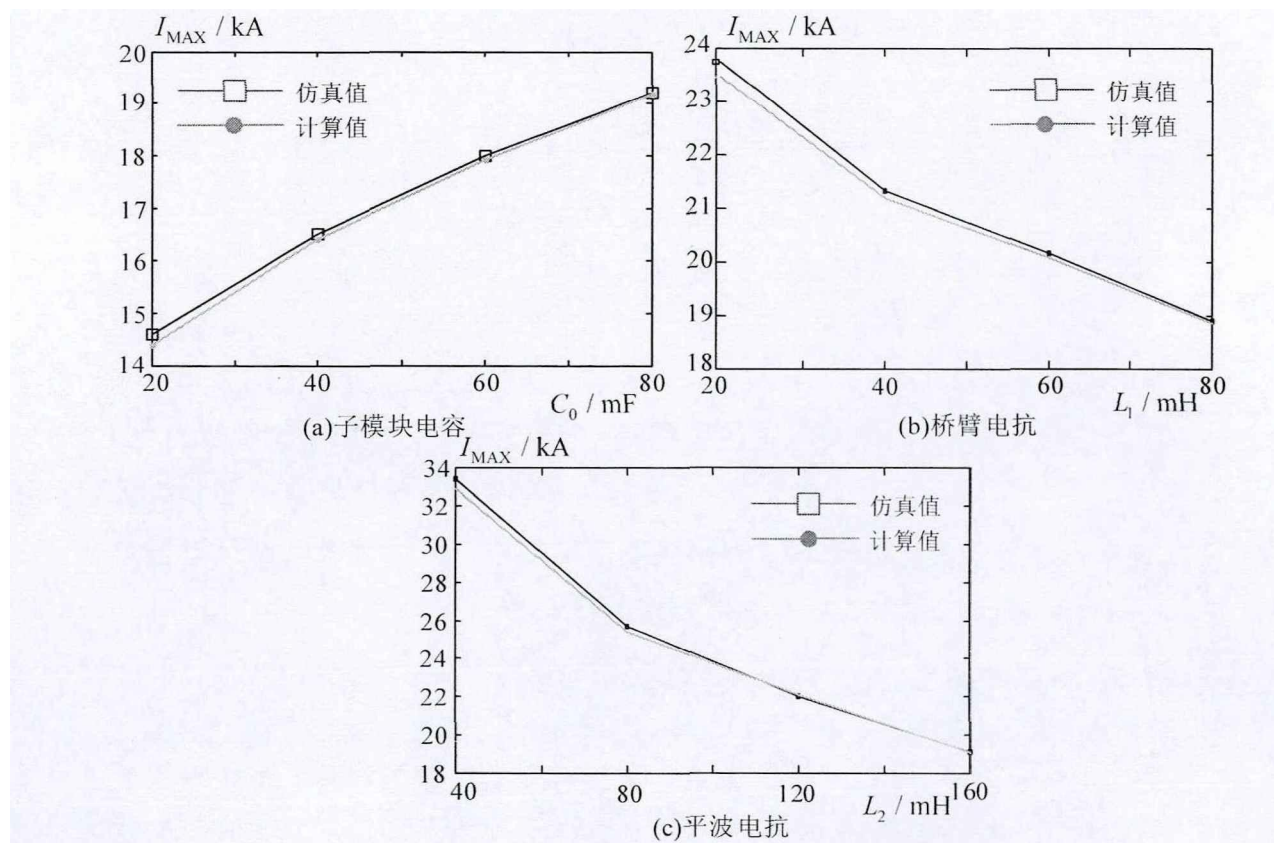


图 4-13 不同参数下直流线路电流峰值

柔性直流输电系统发生极间故障所产生的危害是导致换流阀 IGBT 以及二极

管器件过电流,其暂态过程主要分为闭锁前电容放电阶段以及闭锁后电感续流阶段。电容放电阶段所能产生最大的故障电流与系统运行参数,以及子模块电容、桥臂电感、平波电抗器等参数相关。图 4-13 对比了相同一次系统参数下不同参数下直流线路电流峰值,可以得出,子模块电容值越大,放电电流值越大;桥臂电感、平波电抗越大,对故障电流限制作用越强;由式(4-26)计算得到的电流峰值与仿真结果非常接近。电感续流阶段,线路电流缓慢衰减,反并联二极管中电流与桥臂电流一致。当系统检测到极间故障导致的桥臂和直流线路过电流时,应立即投入相应控制和保护措施,闭锁换流器,使系统退出运行,一般要求电容放电阶段 10ms 内保护就应立即动作以闭锁换流器。

4.4 本章小结

本章基于 MMC-HVDC 系统交流侧常见的经星型电抗和电阻接地方式分析了单极接地故障、单极断线故障、双极短路故障三种典型直流侧故障特性和机理,并在 PSCAD/EMTDC 下搭建了双端 MMC-HVDC 系统作了仿真验证,总结如下:

(1) 单极接地故障:换流器直流侧非故障极母线承受两倍正常运行电压、交流侧变压器等设备需要承受一半正常直流电压值的偏置分量,绝缘设计应加以考虑;由于交流侧接地阻抗较大、换流器没有过流风险。

(2) 单极断线故障:故障极、非故障极直流母线具有较高的直流电压变化率,且故障极所在直流母线电压变化率更严重,可能导致直流母线过压,损坏绝缘;由于交流侧接地阻抗较大,故障电流较小,换流器没有过流风险。

(3) 双极短路故障:极间故障会导致严重过电流,其暂态过程主要分为闭锁前电容放电阶段以及闭锁后电感续流阶段,电容放电阶段所能产生的故障电流与系统运行参数、子模块电容、桥臂电抗等器件参数有关;电感续流阶段,线路电流缓慢衰减;保护应在电容放电阶段 10ms 内动作闭锁换流器以保护阀器件。

第 5 章 结论与展望

5.1 结论

本文主要围绕 MMC 交、直流侧故障的暂态特性展开研究工作，结合理论分析、故障电路建模、仿真验证对 MMC-HVDC 系统的交、直流侧故障的暂态特性进行了详细分析，交流侧故障侧重于故障电流特性，直流侧故障特性侧重于暂态过程的过电压、电流特性。论文的研究结论和成果可为 MMC 的控制器参数设定、交、直流侧故障控制和保护设置提供参考，总结如下：

(1) 建立了 MMC 通用的适用不对称和对称故障分析的控制系统，对控制系统的各环节进行了详细的描述，简单分析了 MMC-HVDC 系统的接地方式对直流侧故障特性的影响。

(2) 针对 MMC 交流侧不对称故障，详细分析了换流器的各种控制器对故障的响应，并总结了 MMC 所提供的短路电流特性，提出了一种计算故障稳态短路电流的方法。

(3) 对交流侧故障短路电流的研究表明，故障后，受内环正负序电流控制器作用，MMC 在交流侧表征为电流源，所提供短路电流包含暂态、稳态两个过程。控制器响应后，暂态过程中短路电流不含有直流分量，稳态短路电流为三相对称交流量，可由内环电流参考值派克反变换求出。稳态短路电流大小受外环功率控制器比例积分限值及内环电流限幅环节限制。换流站故障前后有功功率流向一致，无功功率流向一致性与换流站的控制方式和运行方式有关。

(4) 对于 MMC 直流侧故障特性，基于三种直流侧故障电路模型从机理上分析其暂态过程，推导了其暂态过程的电压、电流的计算公式，并指出各故障过程系统遭受的最严重的威胁。

(5) 对 MMC 直流侧故障的暂态过程电压、电流特性表明：单极接地故障电流较小，主要体现为换流器非故障极直流母线、交流场设备的过电压风险；单极断线故障非故障极电流较小，主要体现为故障极相较于非故障极母线有更高的过电压风险；双极短路故障过电流分为电容放电、电感续流阶段，电容放电阶段结束时将产生最大可能的故障电流，该阶段需要立即闭锁换流器。

5.2 工作展望

本文完成了 MMC-HVDC 系统交流侧故障的暂态特性分析中短路电流特性、

MMC-HVDC 系统直流侧故障暂态特性分析中故障机理的相关工作，其中结合了 MMC 典型控制系统和 MMC-HVDC 系统常见交流侧接地方式开展研究工作。但本文工作仍存在不足之处，还存在一些值得深入研究和探讨的问题：

(1) 本文所做工作虽然是结合 MMC 实际工程典型的控制系统开展交流侧故障研究工作，控制器参数也是参考实际工程选取，并在 PSCAD/EMTDC 进行了仿真验证，但是后续工作仍然需要在实际系统的控保平台上做实验验证。

(2) 本文针对交流侧故障短路电流特性的研究，分析了 MMC 各种类型控制器对故障的响应，包括暂态过程和稳态过程，但是对于控制器未响应前的短暂过程只是简单带过，并没有对该过程进行详细的分析，后续工作可以针对故障至控制器响应这段暂态过程中短路电流的特性进行详细分析。

(3) 本文针对直流侧故障的暂态特性研究，详细分析了其故障机理、暂态过程中的电压、电流特性，但是对于各种故障处理和如何配置适当保护清除故障，故障恢复策略等基本没有介绍，后续工作可以针对这些方面具体展开。

参考文献

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网跨国跨洲互联研究及展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19):5103-5110.
- [2] 马为民, 吴方劫, 杨一鸣, 等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8):2429-2439.
- [3] 张文亮, 汤涌, 曾南超. 多端高压直流输电技术及应用前景[J]. 电网技术, 2010, 34(9):1-6.
- [4] 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, 2010.
- [5] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [6] A. Lesnicar, R. Marquardt. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C]// Power Tech Conference. IEEE, 2004.
- [7] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7):1760-1771.
- [8] 陈海荣, 张静, 屠卿瑞. 电网电压不平衡时电压源换流器型直流输电的负序电压补偿控制[J]. 高电压技术, 2011, 37(10):2363-2369.
- [9] 魏晓云, 卢颖. 电网不平衡时电压源换流器高压直流输电统一控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34):50-57.
- [10] M. Saedifard, R. Iravani. Dynamic performance of a modular multilevel back-to-back HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4):2903-2912.
- [11] 孔明, 汤广福, 贺之渊, 等. 不对称交流电网下 MMC-HVD 输电系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28):41-49.
- [12] 朱明琳, 杭丽君, 李国杰, 等. 三相电网不平衡下 MMC 多变量保护控制策略及系统运行性能研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9):2408-2418.
- [13] 蔡新红, 赵成勇, 庞辉, 等. 基于 MMC 欧拉-拉格朗日模型的 HVDC 不对称故障控制[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17):112-118.
- [14] 赵新, 金新民, 杨捷, 等. 并网逆变器新型不平衡控制方案[J]. 电工技术学报, 2014(s1):257-265.
- [15] Ling Peng, Yongdong Li, B. Francois. Dynamic behavior of doubly fed induction generator wind turbines under three-phase voltage dips[C]//

- International Power Electronics & Motion Control Conference. IEEE, 2009.
- [16] 薛尚青, 蔡金锭. 基于二阶广义积分器的基波正负序分量检测方法[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11):69-73.
- [17] 王铁柱, 万磊, 卜广全, 等. 逆变侧交流系统三相短路时直流系统贡献短路电流的机理和计算方法研究[J]. 电网技术, 2016, 40(5):1313-1319.
- [18] 刘俊磊, 王钢, 李海锋, 等. 计及直流控制特性的直流系统等值模型及其谐波计算[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19):67-73.
- [19] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013(34):65-74.
- [20] Xiaojie Shi, et al. Characteristic Investigation and Control of a Modular Multilevel Converter-Based HVDC System Under Single-Line-to-Ground Fault Conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1):408-421.
- [21] 卜广全, 李英彪, 王姗姗, 等. MMC 对交流系统三相短路故障短路电流影响的机理研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(21):6303-6312.
- [22] 蔡新红, 赵成勇, 庞辉, 等. 向无源网络供电的 MMC-HVDC 系统控制与保护策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3):405-414.
- [23] 肖亮, 徐政, 刘昇, 安婷, 孔明. 向无源网络供电的 MMC-HVDC 送端交流故障穿越策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(15):89-98.
- [24] Jinghua Zhou, Kai Yu, Xiaowei Zhang. Control Strategy for MMC-HVDC Under Unbalanced Grid Conditions[C]// International Conference on Mechanic Automation & Control Engineering. 2012.
- [25] 喻锋, 王西田, 张阳, 等. 适用于不对称交流电网的 MMC 直接环流抑制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(12):3339-3345.
- [26] 梁营玉, 张涛, 刘建政, 等. 不平衡电网电压下模块化多电平换流器的环流抑制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(9):120-128.
- [27] Qingrui Tu, Zheng Xu, Lie Xu. Reduced Switching-Frequency Modulation and Circulating Current Suppression for Modular Multilevel Converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3):2009-2017.
- [28] Qingrui Tu, Zheng Xu, Yong Chang, et al. Suppressing DC voltage ripples of MMC-HVDC under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3):1332-1338.
- [29] Jinyu Wang, Jun Liang, Chengfu Wang. et al. Circulating current suppression for MMC-HVDC under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017. 53(4):3250-3259.
- [30] 张建坡, 赵成勇. MMC-HVDC 直流侧故障特性仿真分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7):32-37.

- [31] 赵成勇, 李探, 俞露杰, 等. MMC-HVDC 直流单极接地故障分析与换流站故障恢复策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21):3518-3526.
- [32] Jiabing Hu, et al. Analysis and Enhanced Control of Hybrid-MMC-Based HVDC Systems During Asymmetrical DC Voltage Faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3):1394-1403.
- [33] Geng Tang, Zheng Xu, et al. Impacts of three MMC-HVDC configurations on AC system stability under DC line faults[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(6):3030-3040.
- [34] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1):1-7.
- [35] 张建坡, 赵成勇, 黄晓明, 等. 基于模块化多电平高压直流输电系统接地故障特性仿真分析[J]. 电网技术, 2014, 38(10):2658-2664.
- [36] Chengyu Li, Chengyong Zhao, et al. A Pole-to-Pole Short-Circuit Fault Current Calculation Method for DC Grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6):4943-4953.
- [37] 马焕, 姚为正, 吴金龙, 等. 含桥臂阻尼的 MMC-HVDC 直流双极短路故障机理分析[J]. 电网技术, 2017, 41(7):2099-2106.
- [38] 郭晓茜, 崔翔, 齐磊. 架空线双极 MMC-HVDC 系统直流短路故障分析和保护[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8):2177-2184.
- [39] 行登江, 吴金龙, 王先为, 等. MMC-HVDC 系统直流断线故障特性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(7):1825-1832.
- [40] 周煜智, 徐政, 唐庚. 三种 MMC-HVDC 直流故障处理方法下电力系统暂态稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7):1621-1627.
- [41] 陈晓芳, 曹春刚, 赵成勇, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23):82-87.
- [42] E. Kontos, R. T. Pinto, P. Bauer. Providing dc fault ride-through capability to H-bridge MMC-based HVDC networks[C]// International Conference on Power Electronics & Ecce Asia. IEEE, 2015.
- [43] Xinyu Yu, Yingdong Wei, et al. A Novel Hybrid-arm Bipolar MMC Topology with DC Fault Ride-through Capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 2017, 32(3):1404-1413.
- [44] 马文忠, 王晓, 孙迎新, 等. 基于二极管钳位逆阻型双子模块的 MMC 直流故障自清除策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(7):2143-2149.
- [45] Jianzhong Xu, Chengyong Zhao, et al. Start-up control and DC fault ride-through strategies of a hybrid MMC-HVDC system suitable for overhead line transmission[C]// Future Energy Electronics Conference. IEEE, 2015.

- [46] A. A. Elserougi, A. M. Massoud, S. Ahmed. Arrester-less DC fault current limiter based on pre-charged external capacitors for half-bridge modular multilevel converters[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 11(1):93-101.
- [47] 李健涛, 郭彦勋, 李海锋, 等. 一种适用于直流电网的阻容型混合式限流器[J]. 南方电网技术, 2018, 12(4):16-23+47.
- [48] O. Cwikowski, B. Chang, et al. Fault current testing envelopes for VSC HVDC circuit breakers[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(6):1393-1400.
- [49] A. Mokhberdorani, D. Van Hertem, et al. Multi-port Hybrid HVDC Circuit Breaker[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(1):309-320.
- [50] 宋强, 杨文博, 李笑倩, 等. 集成直流断路器功能的模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20):6004-6013.
- [51] Cuiqing Du, A. Sannino, et al. Analysis of response of VSC-based HVDC to unbalanced faults with different control systems[C]// IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific, Dalian, 2005.
- [52] 胡应占, 郭素娜. 适用于电网不平衡时的广义积分器锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014(11):148-154.
- [53] C. Verdugo, J. I. Candela, et al. Local and centralized control strategy for capacitor voltage balancing of modular multilevel converter[C]//IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Birmingham, 2016.
- [54] Y. Long, X. Xiao, Y. Xu, et al. A hybrid Modulation method for improved modular multilevel converter applied for power quality compensation in medium voltage[C]// Future Energy Electronics Conference. IEEE, 2013.
- [55] S. Lu, L. Yuan, K. Li, et al. An Improved Phase-Shifted Carrier Modulation Scheme for a Hybrid Modular Multilevel Converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(1):81-97.
- [56] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [57] 邵文君, 宋强, 刘文华. 轻型直流输电系统的不对称故障控制策略[J]. 电网技术, 2009, 33(12):42-48.
- [58] 孔明, 汤广福, 贺之渊, 等. 不对称交流电网下 MMC-HVDC 输电系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28):41-49.

攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果

(一) 发表的学术论文

- [1] Bowen Ling, Chongru Liu, Shitian Xu, et al. Analysis of DC transmission line disconnection fault characteristics based on MMC-HVDC system under symmetrical monopole connection mode[C]. *2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Beijing, China, 2018, pp. 1-4.
- [2] Yu Wang, Chongru Liu, Haoyu Liu, Bowen Ling, Gengyin Li. Real-Time Simulation Model and Experimental Test Bench for Modular Multilevel Converter[C]. *2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Beijing, China, 2018, pp. 1-6.
- [3] 谢国超, 刘崇茹, 凌博文, 徐东旭, 朱毅. 基于改进 MOPSO 的 MMC-HVDC 控制器 PI 参数分层优化[J]. *现代电力*, 2018, 35(4):87-94. (已刊出)

(二) 申请及已获得的专利

- [1] 刘崇茹, 凌博文, 王宇, 安宁, 等. 一种考虑形态变化的奖惩权重型仿真序列相似性分析方法[P]. 北京: CN108959704A, 2018-12-07.
- [2] 刘崇茹, 王宇, 凌博文, 等. 一种含均压控制功能的 MMC 实时仿真建模方法[P]. 北京: CN108897908A, 2018-11-27.
- [3] 刘崇茹, 王洁聪, 谢国超, 凌博文, 等. 基于实时数字仿真器的模块化多电平换流器闭锁建模方法[P]. 北京: CN108229021A, 2018-06-29.
- [4] 刘崇茹, 谢国超, 徐东旭, 凌博文, 王洁聪, 王嘉钰. 一种 MMC-HVDC 系统控制参数优化方法[P]. 北京: CN107168052A, 2017-09-15.

致 谢

毕业即至，回首硕士短短两年半光阴，科研遇阻的苦恼烦闷和解决问题后的愉悦并存。初始满怀努力求知的渴望，如一叶扁舟在知识的海洋飘荡，迷茫探索不定方向；后来经名师和良友指点，用心钻研，渐入佳境，经受风浪险阻，终于得见希望驶向科学的远方。感谢这段迷茫的时光，庆幸自己能够静心阅读大量文献，夯实基础，积累专业知识，最终得以完成课题研究。

师者，传道，授业，解惑。感谢吾师刘崇茹教授能够接纳专业基础相对薄弱的我在门下求学，刘崇茹教授在科研上给予了我很多指导、建议和鼓励，使我逐渐触摸到科研殿堂的门槛。刘崇茹教授认真严谨、一心致力于科研和教学的态度和风范令我敬佩，您的教诲时刻警醒我要在工作和生活中以更高的标准约束自己。刘崇茹教授如良师益友般风趣幽默，待人平和，谦逊礼貌，是我生活中的榜样。在今后的工作和学习中，我将铭记您的教诲，将课题组刻苦钻研、努力奋斗的优良作风继续发扬下去。

听君一言，如沐春风；与君同行，喜乐常伴。感谢课题组的王宇博士、苏晨博博士、王洁聪博士，同门黎晓、谢国超、李欣蔚以及刘昊宇、徐诗甜、王超、喻建渝等师弟师妹们的指点和陪伴，能在科研氛围良好的课题组与君共事将近三年是吾之幸。

最后感恩父母和家人的支持和理解，感恩你们的养育和陪伴，我将不负你们的期望，在未来的工作和生活中保持良好的品质和作风继续前行。