

# 华北电力大学

专业硕士学位论文

高压直流输电系统的仿真与交流侧故障时的  
换相失败特性研究

**Research on HVDC Control System and  
Characteristics of Commutation Failure Under AC  
System Fault**

李越

2017年3月



国内图书分类号：TM721.1  
国际图书分类号：621.3 密级：公开

学校代码：10079

## 专业硕士学位论文

# 高压直流输电系统的仿真与交流侧故障时的换相失败特性研究

硕士研究生：李越  
导师：刘崇茹 教授  
企业导师：安宁  
申请学位：工程硕士  
专业领域：电气工程  
培养方式：全日制  
所在学院：电气与电子工程学院  
答辩日期：2017年3月  
授予学位单位：华北电力大学

Classified Index: TM721.3

U.D.C: 621.3

Thesis for the Master Degree

**Research on HVDC Control System and  
Characteristics of Commutation Failure Under AC  
System Fault**

**Candidate:** Li Yue  
**Supervisor:** Prof. Liu Chongru  
**School:** School of Electrical & Electronic  
Engineering  
**Date of Defence:** March, 2017  
**Degree-Confering-Institution:** North China Electric Power University

## 摘 要

随着直流输电技术的发展,直流系统的输送功率进一步提升。直流输电线路的增加也带来了更多换相失败的问题。因此能否正确的认识换相失败的问题,并能对其加以预测和判断成为一个亟待解决的问题。目前已经有很多专家学者对该问题展开了研究,现阶段研究发现,当交流系统发生非对称故障时,换流器的换相失败发生情况具有很强的随机性,不但取决于故障的类型,更与故障发生的时刻有关。此外通过对直流输电系统的仿真分析还发现,由于逆变侧相串联的换流器接入连接组别不同的换流变压器,导致换流器发生的换相失败的情况也有所不同。为了全面的分析直流的换相失败问题,对于本文的研究主要考虑了如下三个方面。

首先,换相失败的问题受交流系统发生非对称的故障时刻影响,不同的故障时刻对发生换相失败的临界阻抗影响很大。本文利用换相面积的概念对此问题进行了详细的分析,并且在进行仿真分析时着重注意了故障发生时刻对换相失败造成的影响。

其次,本文对换相失败的产生机理进行了详细的分析,并重点分析了换流器连接组别不同对换相失败问题的影响,并通过仿真与分析结合的方法对故障发生时刻影响同一故障点换相失败发生概率的问题进行了解释。此外结合换流阀在交流系统发生故障的实际触发过程对换相失败的判据进行了修改,基于该方法为分析解释造成换相失败的原因提供参考。

最后,分析直流输电的控制系统,目前主流的直流输电控制系统可分为定熄弧角控制、定直流电压控制技术路线两种。两种控制系统均在我国直流输电工程中大量使用,工程实际经验表明两种控制系统均具有良好的控制响应特性,并能在换相失败后快速恢复。控制系统在交流系统发生故障时通常会采取提前触发的策略以避免换相失败的发生,本文将结合两种控制技术进行详细的介绍和分析。

**关键词:** 交流非对称故障; 直流控制系统; 换相失败; 仿真建模

## Abstract

With the development of High Voltage Direct Current (HVDC) technology, more and more HVDC system connected into alternating current (AC) power grid, the transmission power are dramatically increased as well. Because the converter is made from thyristor, its half controlled character leads commutation failure problem in HVDC system. Therefore the mechanism of commutation failure in HVDC system should be deeply analyzed. Many experts and scholars have been studying this subject for many years. There are three major methods to predict commutation failure, which is minimum extinction angle method, the minimum voltage drop method, and the minimum commutation area identification method. But the research also indicates that the commutation failure of the DC system often influenced by AC fault time. The same fault impedance may have different result with different fault time. Many researches indicate that the phase angle and the amplitude of AC voltage and the control system influence the commutation process a lot. But the tradition method often ignores these problems which makes error in judgment. In my research, the type of transformer connection group is deeply considered, which also influence commutation process. In order to thoroughly discusses and analyses the cause of commutation failure. Main work and study of this article are as follows

The first: the mechanism of commutation failure is analyzed in this paper, which considers the influence of different groups of converter transformer. Then an improved criterion of commutation failure by analyzing the actual trigger process of each valve is proposed in this paper. This theory is reference for the further study.

The Second: the problem of commutation failure are sensitive to the fault time, different time have infect the critical impedance a lot. Based on commutation area, this problem is deeply analyzed in this paper.

The Third: the adjustment of DC control is considered. The main control can be dividing into two types of technology, constant extinction angle control and constant voltage control. Both type of control stagey are widely used in DC project, and both of them have good ability to resist commutation failure. The progress are of DC control are analyzed, and different control strategy are considered in this paper.

**Keywords:** AC Unsymmetrical fault, control system, commutation failure, simulation

## 目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪 论.....	1
1.1 研究背景及选题意义.....	1
1.2 国内外研究动态.....	1
1.3 本文主要工作.....	2
第 2 章 交流侧不对称故障对换相失败的影响.....	4
2.1 换相面积的概念及应用.....	4
2.2 影响换相失败的因素.....	5
2.3 换流变压器连接组别对换相失败的影响.....	8
2.4 换流变压器连接组别对换相失败影响的仿真分析.....	12
2.5 本章小结.....	16
第 3 章 控制系统对换相失败的影响.....	17
3.1 直流分层控制结构.....	17
3.2 双极层控制功能.....	17
3.3 极控制层功能.....	17
3.3.1 定电压控制路线下中极控制层特殊的控制器.....	18
3.3.2 定熄弧角控制策略技术路线中极控制层特殊的控制器.....	20
3.4 不同技术路线应对换相失败的响应策略.....	21
3.5 直流控制系统对换相失败的影响.....	22
3.5.1 采用定熄弧角控制策略的直流输电模型的仿真分析.....	22
3.5.2 采用定直流电压控制策略的直流输电模型的仿真分析.....	25
3.6 本章小结.....	26
第 4 章 分层方式下的控制系统及换相失败情况.....	27
4.1 特高压分层接入方式下的直流输电系统控制系统.....	27
4.2 系统仿真条件.....	29
4.3 控制系统响应特性分析.....	30
4.4 直流控制系统控制逻辑间的配合.....	31
4.4.1 定熄弧角控制系统控制逻辑间的配合.....	31
4.4.2 定直流电压控制控制逻辑间的配合.....	34
4.5 分层接入方式下发生换相失败的情况.....	36
4.6 本章小结.....	38
第 5 章 换相失败判别方法的研究.....	39

5.1 传统判断直流输电系统换相失败的方法.....	39
5.2 改进后的直流输电系统换相失败的方法.....	39
5.3 算例与验证.....	42
5.4 本章小结.....	43
第 6 章 总结与展望.....	44
参考文献.....	45
攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果.....	49
攻读硕士学位期间参加的科研工作.....	50
致 谢.....	51

# 第1章 绪论

## 1.1 研究背景及选题意义

为解决中国能源分布集中在西北部，能源消耗集中在东南部的问题，建立以特高压电网为骨干的网架是电网未来的发展趋势，也是一特四大发展战略的重要组成部分。而高压直流输电技术作为一种能有效远距离输电以及进行电网跨区互联的技术更是实现该目标的重要一环，在我国得到广泛的工程应用。多年来积累的工程技术与实际运行经验使我国的直流输电技术走在了世界的前列也取得了良好的效益。与交流输电的方式相比,直流输电线路具有诸多优点，包括：较大的输电容量、较小的输电损耗、可以有效限制短路电流、没有交流系统的稳定问题、能实现非同步联网。随着设备可靠性的提高，直流输电工程的输送容量也进一步攀升，直流输电工程在电力系统中扮演了重要的角色，若发生故障后没能采取有效的措施甚至威胁到了整个电网的安全稳定运行。然而传统的高压直流输电工程采用晶闸管作为换流器的换流阀，其半控特性的晶闸管元件无法避免会造成直流输电系统在交流系统故障后发生换相失败的问题，进而对电网造成一定冲击，严重时更能引起交流系统失去稳定。

正常情况下，晶闸管的开通是通过施加触发脉冲控制完成的,但关断时须使其承受反向电压并持续一段时间。若施加的反向电压时间太短,则晶闸管未能恢复阻断能力，重新承受正向电压时会重新导通，导致换流器不能正常换相。换流器的换相失败还会导致换流阀过热,以及过电压换流变压器直流偏磁等问题<sup>[1]</sup>。由于直流系统受端的馈入点电气联系越来越近，一条直流线路发生换相失败甚至还会影响其他馈入的直流系统，造成继发性的换相失败。而直流输电控制中参数如设置不当，或者故障较为严重，甚至还会导致直流系统难以恢复，发生连续换相失败的问题。进而引起直流系统闭锁,对电网稳定造成更大的影响。

因此能够从原理上正确认知直流换相失败的成因，对分析电网安全稳定运行以及直流发生故障后的事故分析与处理具有重要意义。而对于目前大电网中直流输电线路馈入越来越多的情况直流系统之间的协调配合也尤为重要，若能深刻掌握换相失败的原理，则对直流在故障后快速恢复的控制，以及相应控制系统参数的整定有一定的帮助。

## 1.2 国内外研究动态

国内已有很多专家学者对于交直流混联系统中直流系统发生换相失败的问题

开展了研究,并取得了一定的科研成果。研究结果表明当交流系统故障后,不能快速恢复阻断能力,容易发生换相失败。根据晶闸管的换相特点,常用以下方法判断换相失败:熄弧角判断法、相位比较法、直流电压过零法、最小电压降落法<sup>[2]</sup>。其中熄弧角判断法最能体现换相过程,EMTP等电磁暂态仿真软件中晶闸管场用该方法进行判断<sup>[3]</sup>。但由于熄弧角无法实际测量,只能通过两测量计算得出,并且固有极限熄弧角并非定值,因此容易导致误判。机电暂态仿真程序中,常用最小电压降落法进行判断,但以电压跌落程度判断非对称故障引起的换相失败,考虑情况过少导致结果很不准确。也可通过比较交流侧的线电压和相电流的相位关系来判断换相失败的发生<sup>[4-13]</sup>。

目前的很多专家学者提出利用小波变换检测换相失败,基于多分辨率分析,分解多种故障后的暂态信号,根据不同的故障特征判断故障。该方法具有良好的准确性,直流线路故障和换相失败故障均可以通过此方法准确地进行分辨,但计算速度较慢所以难以应用<sup>[14]</sup>。

由于直流换相失败的影响较大,因此直流常采用一些紧急的控制措施以最大程度的减少或减轻换相失败带来的影响。主流的控制系统分为定熄弧角与定直流电压控制两种,两种控制系统应对故障后的策略具有差异<sup>[15]</sup>。换相失败预测控制(CFPRED)可以一定程度降低换相失败的发生几率,控制器通过交流系统电压波动程度决定提升的裕度,增大熄弧角 $\gamma$ 。此外采用最小换相裕度(AMIN)限制触发角的最大值,也起到减少换相失败及连续换相失败的发生概率<sup>[16]</sup>。此外专家学者在故障后如何快速恢复的问题上也有了一定的研究。研究表明合理地设定低压限流环节(VDCOL)的参数可以有助于故障恢复,并一定程度减少连续换相失败发生的概率<sup>[17]</sup>。

现阶段越来越多的专家学者提出故障时刻换相失败的影响很大,目前也有专家对故障发生时刻对三相对称短路故障引起的HVDC换相失败的方面进行了分析。研究成果表明交流系统对称故障下,适当的故障时间可以使直流控制系统的调整时间增加,换流器将有机会避免换相失败。由于故障对称,故障发生的时刻对换相过程的影响较小,所以取得的研究成果并不明显。现阶段的研究成果对故障发生时刻敏感的非对称故障引起的换相失败的研究还只是停留在对表面现象的解释和描述阶段,相关的深入研究尚未开展,该方面的研究有待加深。

### 1.3 本文主要工作

根据上文对换相失败问题的介绍,本文主要完成的内容主要有以下三个方面:

(1) 分析影响导致直流输电系统发生换相失败的因素。主要分析交流系统发

生发生非对称故障时引起的换相失败问题，并重点关注换流变压器连接组别不同对换流器换相过程的影响，交流系统故障发生时刻对换相过程的影响以及相同故障点不同时刻换相失败的发生情况差异很大的问题。研究采用理论分析与仿真分析相结合的方法，基于 PSCAD/EMTDC 的仿真软件，重点针对 CIGRE HVDC 的直流输电模型进行仿真研究，分别对比了换流变压器不同接线方式的直流输电模型，控制系统采用定熄弧角控制路线，定直流电压技术路线的直流输电模型的换相情况并得到了一定的研究结论。

(2) 对不同控制策略的直流输电的控制系统进行分析，并介绍相应的仿真模型建立过程。详细介绍了工程使用较多的定直流电压技术路线的控制策略以及定熄弧角技术路线的控制策略。针对两者之间的区别与联系加以分析与介绍。并建立了相应的仿真模型。此外分层接入方式的直流输电系统作为一种新型的拓扑结构，其控制系统需要进行重新的研究。本文基于两种技术路线，分别建立了相应分层接入方式下的控制系统。

(3) 对换相失败的判据加以修改。本文对换相失败判据的改进加入了不同换流变压器连接组别不同对换相失败问题的影响，修改方法从实际的换相过程入手，使其更贴近故障后实际换流器的换相过程。本文应用判据对 CIGRE HVDC 模型的换相失败情况加以分析与计算。

## 第2章 交流侧不对称故障对换相失败的影响

换流器在换相过程中未能完成换相或换相完成后，因为换流阀没有自关断的能力，换流阀若在未完全恢复阻断能力时重新承受正向电压，则导致换相失败的发生<sup>[18]</sup>。交流系统发生故障引发逆变侧换相失败的情况较多，不同的故障类型，系统的运行条件以及故障发生时刻都会成为导致直流换相失败的原因。通常可以利用换相面积对换相问题加以分析，总结分析影响换相的因素。本章结合该方法，重点针对交流非对称故障，以及换流变压器的连接组别分析影响换相的主要因素。

### 2.1 换相面积的概念及应用

利用换相面积是分析逆变器换相过程的有效手段和公认方法。该方法是通过实际参与换相过程的换流阀列写相应基尔霍夫电压方程得到的。图 2-1 为逆变器的结构图，其中： $V_1 \sim V_6$  依次为逆变器的 6 个换流阀； $U_a, U_b, U_c$  分别为交流系统三相相电压； $i_A, i_B, i_C$  为流入交流系统的电流； $L_r$  为换相电感。若换流母线装有完善的滤波器，换流器容量远小于交流系统容量，其电压接近于正弦波形时，为简化分析，可取换流变压器系统侧电压为换相电压，此时换流变压器的漏抗约等于换相电抗<sup>[19]</sup>。以阀  $V_4$  向阀  $V_6$  换相为例，在正常运行情况下，其换相过程和等值电路分别如图 2-1 和图 2-2 所示，其中  $I_d$  为换流器的直流电流； $i_4$  和  $i_6$  分别为流过换流阀  $V_4, V_6$  的电流； $u_{ab}$  加在两换流阀间的换相线电压。图 2-2 两相换相过程及其等值电路。

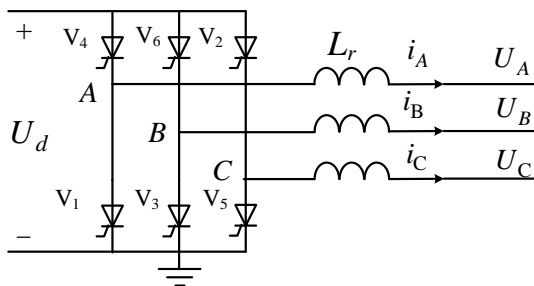


图 2-1 六脉动换流器结构图

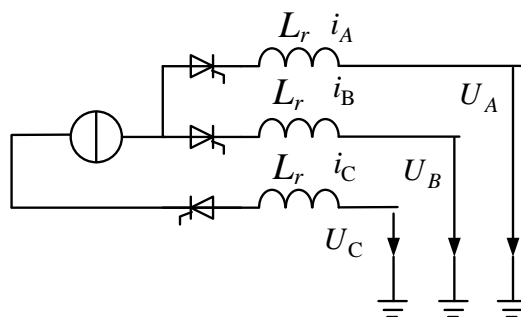


图 2-2 换相时的等值电路

$$L_r \frac{di_6}{dt} - L_r \frac{di_4}{dt} = L_r \frac{di_6}{dt} - L_r \frac{d(I_d - i_4)}{dt} = u_{ab}(t) \quad (2-1)$$

$$2L_r \frac{di_6}{dt} = u_{ab}(t) \quad (2-2)$$

在阀 4 至阀 6 的换相过程  $t \in [t_1, t_2]$  时, 对式 (2-2) 两端同时进行积分。若认为故障发生后由于时间较短并且计及整流侧的定直流电流控制, 通常可认为直流电流短时维持在  $I_d$  不变, 则换流阀处于关断状态时电流  $i_6(t_1)=0$ , 换相完成后阀电流为  $i_6(t_2)=I_d$ 。

$$i_6(t_2) - i_6(t_1) = \frac{1}{2L_r} \int_{t_1}^{t_2} u_{ab}(t) dt = A \quad (2-3)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} u_{ab}(t) dt = 2L_r I_d \quad (2-4)$$

由于阀 4 向阀 6 换相时加在阀组间的电压为  $U_{ab}$ , 若定义换相过程中  $U_{ab}$  对时间的积分为阀换相时的换相面积, 通过计算可以发现该换相面积一个常数, 即认为逆变器在换相时应具有相等的换相面积, 如果换相面积越大, 则表示有越大的换相裕度。若换相面积小于一定值, 则认为晶闸管没能及时恢复阻断能力从而导致换相失败<sup>[20]</sup>。

## 2.2 影响换相失败的因素

换相失败作为逆变器的常见故障, 故障初期直流电流变化较小时, 可以认为换相面积不变, 可推导出以 A 相为特殊相时逆变侧关断角的计算公式<sup>[19]</sup>:

$$\begin{aligned} \gamma_{V1,V4} &= \arccos\left(\frac{\sqrt{2}kI_d X_c}{\sqrt{3-3\Delta U_A + \Delta U_A^2}} + \cos\beta\right) - \arctan \frac{\Delta U_A}{\sqrt{3}(2-\Delta U_A)} \\ \gamma_{V2,V5} &= \arccos\left(\frac{\sqrt{2}kI_d X_c}{\sqrt{3-3\Delta U_A + \Delta U_A^2}} + \cos\beta\right) + \arctan \frac{\Delta U_A}{\sqrt{3}(2-\Delta U_A)} \\ \gamma_{V3,V6} &= \arccos\left(\frac{\sqrt{2}kI_d X_c}{U_L} + \cos\beta\right) - \varphi = \gamma_0 \end{aligned} \quad (2-5)$$

式中,  $k$  为换流变压器变比,  $U_L$  为非故障相换流母线电压的线电压有效值,  $X_c$  为换相电抗,  $I_d$  为直流电流。系统三相对称时  $\varphi$  等于零, 当逆变侧交流系统发生不对称故障时需对计算得到的熄弧角进行修正。阀的关断角小于固有极限关断角认为发生换相失败。

通过对公式(2-5)的分析可知, 在不考虑故障发生时刻以及控制系统的作用时,

影响换相失败的因素主要有 1、换流母线的电压跌落情况，2、换流母线线电压相角偏移量，3、直流电流增量。此外交流系统若发生非对称故障，由于故障后三相电压的相电压的幅值相角不对称，将导致不同换流阀在换相过程中具有不同的换相面积，因而导致不同换流阀发生换相失败的可能性不同。

若利用换相面积的分析方法，我们可将影响换相过程的因素分为以下几类。

### 1) 换流母线幅值相角的影响

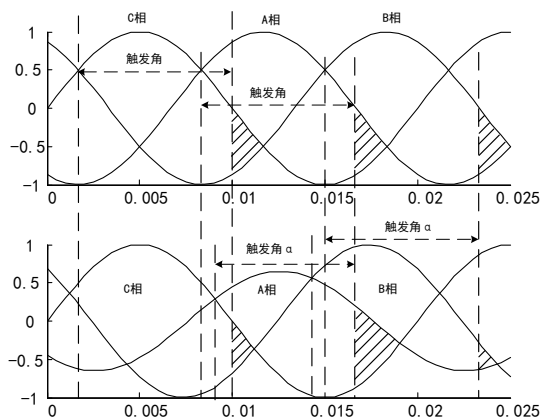


图 2-3 换流母线幅值相角对换相过程的影响

换相面积表示换流阀经历换相过程时所能提供的最大裕度，换相面积一旦小于某临界值则表示换流阀未能在承受反向电压期间完成换相过程，换流器发生换相失败。图 2-3 所示，由于目前的换流阀脉冲采用分相控制，故障发生时锁相环通常来不及动作，触发脉冲的起始时刻维持故障前位置不变。当换流母线的线电压相位发生前移时，实际的触发角指令等效增加，换相面积减小直流输电系统容易发生换相失败，线电压相位后移时的情况则正相反。影响换相过程的还有线电压幅值的大小。由于换相面积表示为线电压对时间的积分，电压幅值的跌落将直接导致积分面积的减小，造成换相裕度减小。上述两个因素为影响直流系统是否换相失败的关键因素，三相故障时虽然线电压相位偏移量较小，但往往电压的幅值跌落情况较大。而非对称短路故障情况下，虽然该种故障幅值跌落情况较小，但由于两种影响因素的同时作用，对换相过程的影响也较大。不同换流桥连接的换流变压器连接组别不同，不对称故障时连接组别不同的变压器线电压变化情况不同，从而对换相过程的影响不同。

### 2) 直流输电控制系统调整作用的影响

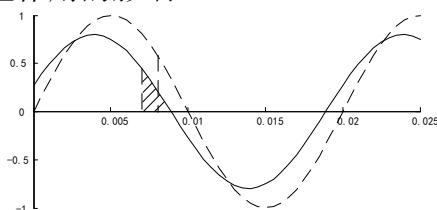


图 2-4 直流输电控制系统调整作用的影响

控制系统通常在检测到发生故障后,进行提前触发以增大换相裕度,帮助换相。如图 2-4 所示故障后控制系统若能快速可靠的提前触发将有效的增大换相面积,减小换相失败的概率。故障后控制系统常采用定熄弧角控制策略控制熄弧角尽可能维持不变,并且装设换相失败预测装置。换相失败预测装置起检测故障并对换流器提前触发的作用,常用的检测方法有检测不对称故障的零序电压检测法,和检测对称故障的  $\alpha/\beta$  电压变换法。

### 3) 故障发生时刻对换相过程影响

交流系统发生非对称故障时需要考虑故障时刻对换相的影响。图 2-3 为非对称故障时换流阀的换相过程,  $U_{ab}$  作为换相电压的阀的换相面积有所增加不易发生换相失败,  $U_{bc}$  作为换相电压的阀的换相面积最小最不利于换相。而直流系统的调整作用随着时间的增加而增强,若故障发生于图 2-3 中以  $U_{bc}$  作为换相电压的阀换相完成后,直流系统距离下次最不利于换相的过程将有半个周波的时间。较长的调整时间将能使控制系统发挥更大的作用,从而发生换相失败的可能性降低。

### 4) 直流电流对换相过程影响

换流器的换相过程时可用公式 (2-3) 描述,通过对公式两端积分可以得到公式 (2-4), 公式右端为换相面积。由于发生短路故障后,直流电流增加导致公式中  $I_d$  增大,即需要更大的换相面积才能保证换相过程的顺利进行。传统的最小熄弧角判据忽略了故障时直流电流的变化,并在计算电压相位修正量时只考虑了相电压幅值跌落对线电压的影响,影响计算精度。

### 5) 谐波对换相过程影响

谐波会造成线电压波形的畸变,影响换相过程。交流系统三相不对称时,会在换流器的交直流侧产生各次谐波,其中交流侧主要为 3 次谐波电压,直流侧主要为 2 次谐波电流。通常直流侧 2 次谐波电流通常大于交流侧 3 次谐波电压,特别当非对称故障较为严重或直流侧等值谐波阻抗较小时,2 次谐波电流的幅值甚至接近于直流分量。

### 6) 锁相环输出的同步初相位的影响

换流阀脉冲采用分相控制,若交流系统发生不对称故障,三相电压幅值与相角不再对称,锁相环往往受到负序电压的影响不能将相位锁定在线电压的过零点上,从而使不同换流阀的触发角发生不同程度的偏移,进而使某些阀组的换相裕度变小容易发生换相失败的问题。

目前的直流输电换流阀通常采用等间隔触发控制方式,其原理是以锁相环 PLL 输出的输出相位  $\theta$  为基准,并以固定的触发间隔对换流器的各阀组进行导通。采用该种控制策略可以有效抑制非特征谐波对换流器的影响,但由于触发序列相对固定,因而在交流系统的三相电压不对称时,采用该种控制方式的换流器的触发角相差较大,其中部分换流阀由于换相裕度较小容易造成控制器调节困难的问题。

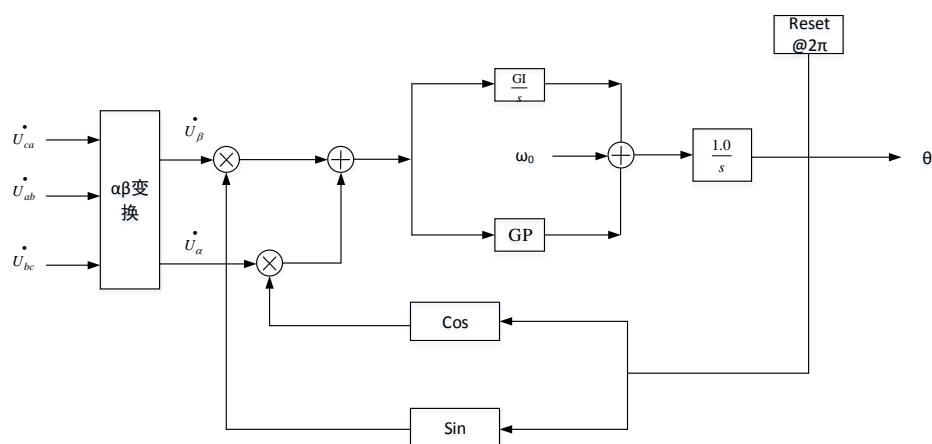


图 2-5 锁相环实现过程

PLL 利用闭环调整的策略将输出的相角值锁定为输入换相电压  $\dot{U}_{ac}$  的相位值，再以相同的时间间隔对不同的换流阀依次进行触发。换流母线的三相电压首先经过  $\alpha\beta$  变换后，转换为  $\alpha\beta$  静止坐标系的两个分量  $\dot{U}_\alpha$ ， $\dot{U}_\beta$ ，输出量再经过 dq 变换为同步旋转坐标系下的相互垂直的电压  $U_d, U_q$ 。计算出的  $U_d$  作为误差输入至 PI 调节器中，通过负反馈最终达到锁相功能。其中 PLL 的输出相位  $\theta$  若超越  $2\pi$  时则重新置 0。

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_{ca} \\ \dot{U}_{ab} \\ \dot{U}_{bc} \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_\alpha \\ \dot{U}_\beta \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

当三项电压不对称时。交流系统含有负序电压分量因而 PLL 不一定能准确地锁定换相电压的相位。锁定的初相位通常可以利用公式 (2-8) 计算。通过公式分析，不对称故障的发生会使锁相环无法完成精确锁相，带来的相差导致实际与给定的触发指令间出现偏差，从而影响换相过程的进行。

$$\varphi_{PLL} = \arctan\left(\frac{U_\alpha \cos \varphi_\alpha - U_\beta \cos \varphi_\beta}{-U_\alpha \sin \varphi_\alpha - U_\beta \sin \varphi_\beta}\right) \quad (2-8)$$

## 2.3 换流变压器连接组别对换相失败的影响

### 2.3.1 换流变压器连接组别与等相位间隔控制

目前的直流工程采用等相位间隔控制技术，该技术保证各阀组的触发脉冲具有

相同的间隔时间，当交流系统三相电压对称时，12 脉动换流器各换流阀的触发角相等且相差 30°。若交流系统三相电压不对称，特别是交流系统发生非对称故障时，各个阀的触发角相差较大导致个别阀容易发生换相失败的问题。若一端换流器发生换相失败，直流电流将迅速增大导致另一侧换流器也发生换相失败。

### 2.3.2 交流系统故障对换相过程的影响

非对故障发生后连接组别的不同直接影响变压器低压侧出口电压的幅值与相角进而影响换相面积。两个 6 脉动换流桥经过不同的换流变压器，串联得到 12 脉动换流器。若把直流系统视为等效电流源，交流系统 A 相经过渡电阻  $z_f$  发生单相接地短路故障时可按照以下过程进行分析。流过故障点短路电流的正负零序分量可表示为  $I_{f(1)}, I_{f(2)}, I_{f(0)}$ ，故障后换流母线电压的正负零序分量为  $\dot{U}_{m(1)}, \dot{U}_{m(2)}, \dot{U}_{m(0)}$  可由式 (2-9)，式 (2-10) 计算得到。

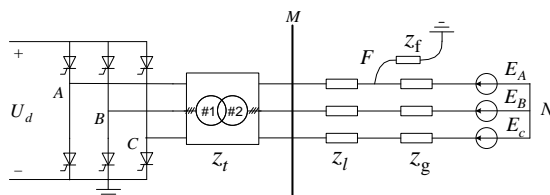


图 2-6 逆变侧交流系统故障示意图

$$\dot{I}_{f(1)} = \dot{I}_{f(2)} = \dot{I}_{f(0)} = \frac{\dot{U}_{f|0|}}{z_{\Sigma(1)} + z_{\Sigma(2)} + z_{\Sigma(0)} + 3z_f} \quad (2-9)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_{m(1)} &= \dot{U}_{m|0|} - \dot{I}_{f(1)} z_{mf(1)} \\ \dot{U}_{m(2)} &= -\dot{I}_{f(2)} z_{mf(2)} \\ \dot{U}_{m(0)} &= -\dot{I}_{f(0)} z_{mf(0)} \end{aligned} \quad (2-10)$$

式中， $\dot{U}_{f|0|}$  为故障前故障处的电压， $z_{\Sigma(1)}$ 、 $z_{\Sigma(2)}$ 、 $z_{\Sigma(0)}$  分别为系统侧等效正负零序阻抗，换流母线到故障处的正、负、零序等值阻抗分别为  $z_{mf(1)}$ 、 $z_{mf(2)}$ 、 $z_{mf(0)}$ 。考虑到连接组别的影响，故障后阀侧的相电压可通过式 (2-11) 得到

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Ya} &= \frac{1}{k} (\dot{U}_{m(1)} + \dot{U}_{m(2)} + \dot{U}_{m(0)}) \\ \dot{U}_{Yb} &= \frac{1}{k} (a^2 \dot{U}_{m(1)} + a \dot{U}_{m(2)} + \dot{U}_{m(0)}) \\ \dot{U}_{Yc} &= \frac{1}{k} (a \dot{U}_{m(1)} + a^2 \dot{U}_{m(2)} + \dot{U}_{m(0)}) \\ \dot{U}_{Da} &= \frac{\sqrt{3}}{k} (\dot{U}_{m(1)} + \dot{U}_{m(2)}) \\ \dot{U}_{Db} &= \frac{\sqrt{3}}{k} (a^2 \dot{U}_{m(1)} \times e^{-jk \times 30^\circ} + a \dot{U}_{m(2)} \times e^{jk \times 30^\circ}) \\ \dot{U}_{Dc} &= \frac{\sqrt{3}}{k} (a \dot{U}_{m(1)} \times e^{-jk \times 30^\circ} + a^2 \dot{U}_{m(2)} \times e^{jk \times 30^\circ}) \end{aligned} \quad (2-11)$$

其中,  $a = e^{j120^\circ}$ ,  $U_{Ya}, U_{Yb}, U_{Yc}, U_{Da}, U_{Db}, U_{Dc}$  为星接侧与角接侧三相电压, 由于不对称故障时正负零序分量相互耦合<sup>[21]</sup>, 换流母线电压  $U_a, U_b, U_c$  出现三相电压幅值相角不对称的情况。以 A 相发生单相短路为例, 故障后各相电压变化情况如图 2-7 所示<sup>[21]</sup>。

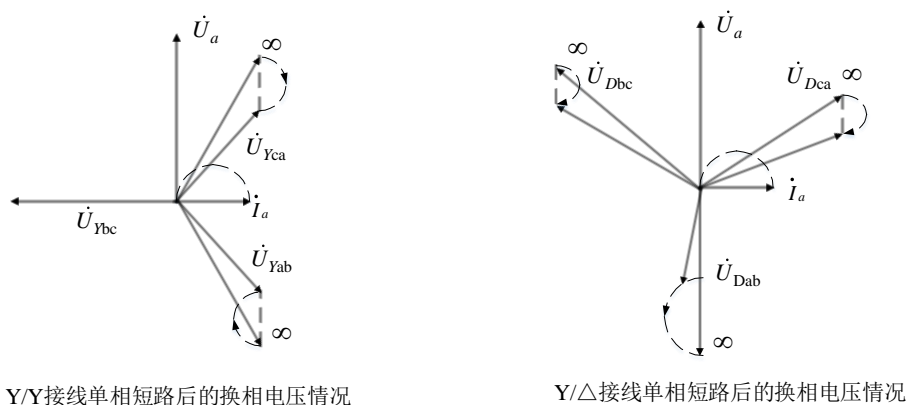


图 2-7 换流母线单相接地短路后换相电压的相量图

因此, 不同的连接组别的换流器故障后低压侧出口处的电压幅值相角具有较大差异, 因而在分析换相失败的问题上有必要对不同的换流器分别分析。

含有直流馈入后系统特性相比纯交流系统有所区别。为研究含有直流馈入的交流系统中发生交流系统不对称故障时换流母线电压幅值相角的变化, 本文在 CIGRE HVDC 的直流系统中模拟了不同故障时刻的 A 相经过渡电阻接地短路故障, 其仿真统计结果如表 2-1 所示。

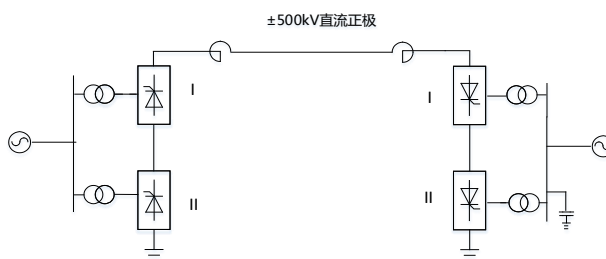


图 2-8 CIGRE HVDC 直流输电模型

对该系统进行仿真测试, 逆变侧换流母线经过渡电阻发生单相短路故障, 故障电阻取为 110 欧姆, A 相为特殊相故障发生时刻为 3.005s, 故障的持续时间取 0.02s 的仿真结果如图 2-9 所示。图中可以发现, 交流侧发生不对称故障时两侧换流器发生换相失败的情况可能不同, 换流变采用 YNy0 型接法一侧的换流器发生换相失败而采用 YNd1 接法的换流器则正常换相。导致问题发生的原因主要是故障发生的时刻对换流器的影响。故障发生时, 阀侧星接侧正处在阀 4 至阀 6 的换相过程当中, 此时两阀换相时的换相电压为  $U_{ab}$ 。根据之前的分析距离换相开始时刻越接近, 则换相时失败的可能性越高。对于阀侧角接的换流器的控制系统有接近 30° 的调节时间, 因此避免了换相失败。通过仿真分析我们可以发现, 在分析换相失败的问题

时，故障触发的时刻对该问题的影响很大，并且需要分析故障后两端换流器的差异，极端情况下可能会发生如仿真图 2-9 所示的结果，一端换流器发生换相失败而另一端的换流器正常换相的情况。为分析故障发生后不同连接组别换流变压器换流器的换相失败情况，进行了如表 2-1 所示的仿真。

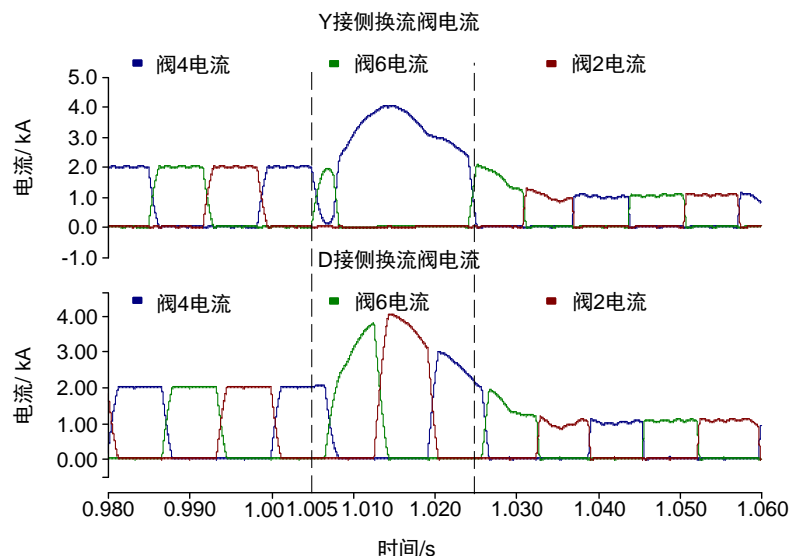


图 2-9 逆变侧换流母线经阻性电阻发生单相短路故障换相失败情况

表 2-1 过渡电阻为 110Ω 时不同故障时刻对换相造成的影响

时间 (s)	YNd1 接线换相失败情况		YNy0 接线换相失败情况	
	半个周波之内	是否换相失败	半个周波之内	是否换相失败
3	阀 3-阀 5	阀 3-阀 5	-	阀 1-阀 3
3.001	阀 3-阀 5	阀 3-阀 5	-	阀 1-阀 3
3.002	阀 3-阀 5	阀 3-阀 5	阀 4-阀 6	阀 4-阀 6
3.003	阀 3-阀 5	阀 3-阀 5	阀 4-阀 6	阀 4-阀 6
3.004	-	-	阀 4-阀 6	阀 4-阀 6
3.005	-	-	阀 4-阀 6	阀 4-阀 6
3.006	-	-	-	-
3.007	-	-	-	-
3.008	阀 6-阀 2	阀 6-阀 2	-	阀 4-阀 6
3.009	阀 6-阀 2	阀 6-阀 2	-	阀 4-阀 6

表 2-1 以 A 相为特殊相，针对不同故障发生时刻的单相短路进行了仿真，接地电阻为 110Ω，故障持续时间 0.02s。为简化分析着重分析故障发生后半个周波换流器是否发生换相失败并取故障持续时间为 1 个周波，原因如下：1、换流器由两组对称的换流阀构成，半个周波的时间不同的换流阀已经分别经历了  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  为换相电压的换相过程，即认为交直流的故障特征已经在半个周波之内得到了完整的体现；2、半个周波后直流系统的调节作用较大，计及调节作用后前半周波没有发生换相失败则后半周波也不应发生换相失败，若发生换相失败则影响因素过多不

易分析。

表中结果可以分为如下几类。1、两组换流器相继发生换相失败：表中显示直流输电的换相失败有先后之分，以故障发生在 3s 时为例，阀侧角接的换流器发生换相失败后造成直流电流的增大，从而导致另一侧的换流器需要更大的换相面积从而引发了换相失败。结果发现换流变压器采用不同的连接组别时发生换相失败的情况有所差异，表 2-1 的结果表明。当接地电阻为  $110\Omega$  时变压器阀侧角接的换流器有更多的次数发生换相失败。2、同时发生换相失败：如在 3.002s 的仿真结果所示。两侧的阀在半个周波之内同时发生换相失败。故障发生后短路电流迅速增大，直流电压迅速减小。3、同时不发生换相失败：如在 3.006s 发生故障的结果所示，在该时刻直流系统可以正常换相，不会发生换相失败的问题。

通过上述分析，我们发现在分析判断换相失败的问题上，要综合考虑时间和变压器连接组别的影响。

## 2.4 换流变压器连接组别对换相失败影响的仿真分析

为分别讨论换流变压器不同连接组别对换相过程的影响，首先将 CIGRE HVDC 的直流输电模型分解为仅含有相同换流变压器连接组别的六脉动换流器。对两种六脉动换流器与 12 脉动的直流输电模型进行单相接地短路故障的测试。故障持续时间取 0.02s，主要分析交流非对称故障发生后半个周波内的换相过程，分析半个周波换相过程的原因已在上节中进行了详细的分析，因此不再赘述。研究主要通过测定不同故障发生时刻时导致换相失败的临界阻抗以及不同时刻不同侧换流器的换相情况，分析出变压器连接组别对换相过程的影响。

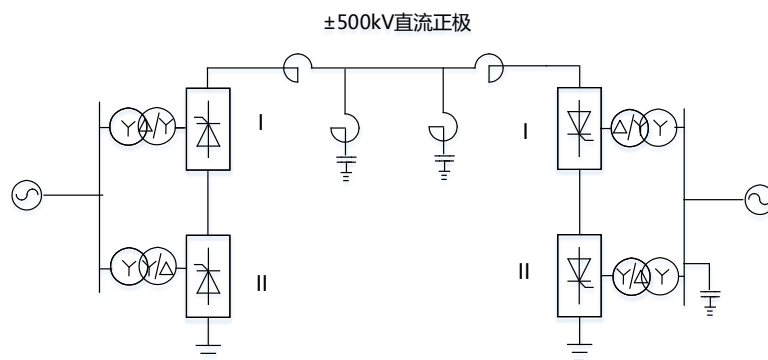


图 2-10 CIGRE HVDC 的直流输电模型

### 1) 当交流系统 A 相发生电阻性短路故障时发生换相失败的情况分析

对换流变压器仅采用 YNy0 接法的六脉动换流器进行 A 相单相接地短路故障的测试，并记录了接地过渡电阻略低于临界阻抗发生换相失败时，首先没能完成换相的阀。表 2-2 为不同时刻发生换相失败时的临界电阻情况。通过表中的结果我们可以发现，故障临界阻抗变化很大，最大最小值差距达到了 2.7 倍。进而反映出仅采

用 YNy0 接线侧换流器对非对称故障的发生时刻十分敏感。此外从结果中可以发现故障发生时刻的临界阻抗具有较强的周期性，这是由于换流器采用上下两组换流阀连接方式完全相同导致的。

表 2-2 仅采用 YNy0 接法的换流器临界阻抗情况

时间(s)	临界电阻 ( $\Omega$ )	换相失败情况
3	40	阀 1-阀 3
3.002	72	阀 1-阀 3
3.004	108.75	阀 4-阀 6
3.006	43.5	阀 4-阀 6
3.008	38.75	阀 4-阀 6
3.01	41.25	阀 4-阀 6
3.014	110	阀 1-阀 3
3.016	43.75	阀 1-阀 3
3.018	39.5	阀 1-阀 3

为换流变压器仅采用 YNd1 接法的六脉动换流器进行 A 相单相接地短路故障的临界电阻情况，结果如表 2-3 所示。与表 2-2 中的结果不同，采用 YNd1 时最大与最小的临界电阻差异减小很多，从而可以发现交流系统发生非对称故障的时刻对此种连接组别的换流器影响相对较小，但换相失败依旧会受到时间的影响。对两种接线方式的换流器中不同故障时刻的临界电阻取平均值加以对比可以发现，采用 YNy0 接法的平均临界阻抗较采用 YNd1 接线方式的平均临界阻抗小很多，进而可以解释采用 YNd1 侧的换流器具有较高的换相失败发生概率的现象。由于采用 YNd1 接法的换流器对换相电压的相角偏移了  $30^\circ$ ，所以故障影响最大的时刻也相对偏移了  $30^\circ$ 。与表 2-2 相同，故障发生时的临界阻抗也具有较强的周期性，周期大约为半个周期。

表 2-3 仅采用 YNd1 接法的换流器临界阻抗情况

时间(s)	临界电阻 ( $\Omega$ )	换相失败情况
3	77.25	阀 6-阀 2
3.002	88.5	阀 6-阀 2
3.004	79.5	阀 6-阀 2
3.006	60	阀 6-阀 2
3.008	75.25	阀 3-阀 5
3.01	77.5	阀 3-阀 5
3.012	88.75	阀 3-阀 5
3.014	79.5	阀 3-阀 5
3.016	56.25	阀 3-阀 5
3.018	74.5	阀 6-阀 2

从之前两组仿真中发现，如果交流系统发生纯电阻性的接地短路故障时，变压器的连接组别不同可能会对直流换相失败情况造成不同的影响，为全面分析该问题，对 CIGRE HVDC 的 12 脉动换流器模型也进行了相同方式的测试，结果如表 2-4 所示。结果表明采用 YNd1 接线方式的换流器有更大的可能性率先发生换相失败。由于两个换流器是相互串联的，当一侧发生换相失败时，直流电流会迅速增大。另一侧的换流器由于需要的换相面积增大，也极易发生换相失败。此外结果表明，采用 12 脉动换流器的临界接地阻抗也具有半个周波为一个周期的特点。并且通过结果可以发现，临界电阻的平均值与之前六脉动换流器的相比明显增大。

表 2-4 12 脉动换流器临界阻抗情况

时间 (s)	临界电阻 ( $\Omega$ )	YNd1 接线换相失败情况	YNy0 接线换相失败情况
3	120	阀 3-阀 5	-
3.002	163.75	-	阀 4-阀 6
3.004	195	-	阀 4-阀 6
3.006	100	阀 6-阀 2	-
3.008	107.5	阀 6-阀 2	-
3.01	117	阀 6-阀 2	-
3.012	161	-	阀 1-阀 3
3.014	185	-	阀 1-阀 3
3.016	94.5	阀 3-阀 5	-
3.018	113	阀 3-阀 5	-

## 2) 当交流系统 A 相发生电感性短路故障时发生换相失败的情况分析

基于之前换流变连接组别对阻性接地故障响应特性的分析结果。可以推测采用 YNd1 接法的换流变压器在交流系统发生非对称故障中可能有更多的可能性发生换相失败问题。但值得注意的是，这种现象短路的接地阻抗在接近换相失败的临界阻抗时才比较明显。原因是如果交流系统的故障比较严重，换流器不可避免的会发生换相失败的问题，而故障的发生时间以及换流变的连接组别对换相过程的影响都将会减小。而交流系统不只会发生电阻性的接地故障，为全面分析变压器连接组别不同带来的影响。也应该分析短路过渡阻抗为感性时的情况。因此在过渡电阻为纯电感时，对之前的三组模型重新进行测试。

由于换流阀具有对称性，临界阻抗具有较强的周期性，因而着重对半个周期内的临界电阻进行仿真与分析。表 2-5 为过渡电阻为纯电感时，故障时刻不同时发生换相失败的临界电阻情况，从结果中可以发现，故障时刻不同发生换相失败的临界阻抗值也不同。但是故障时容易发生换相失败的阀组并未发生改变。与表 2-2 的结果对比发现，临界阻抗的峰值发生的时刻发生了偏移。从而可以发现换相过程最敏

感的时刻随着过渡电阻的性质不同会发生偏移。

表 2-5 感性故障时 YNy0 接法的换相失败问题

时间(s)	临界阻抗 (mH)	换相失败情况
3	485	阀 4-阀 6
3.002	450	阀 1-阀 3
3.004	410	阀 1-阀 3
3.006	445	阀 1-阀 3
3.008	490	阀 1-阀 3
3.01	490	阀 1-阀 3
3.012	450	阀 4-阀 6

表 2-6 为换流变压器仅采用 YNd1 接法的六脉动换流器进行单相接地短路故障的临界阻抗情况，表中也记录了过渡电阻略小于临界值时发生换相失败情况下，没能成功换相的阀。表中发现，如果接地故障为感性电阻时，临界阻抗的差异明显减小，并且与采用 YNy0 接法时换流器的临界阻抗相比，差异也明显减小。而临界阻抗代表了接地故障发生时发生换相失败的最小阻抗，临界阻抗相近代表故障发生后，两组换流器发生换相失败的概率与次数差异减小。

表 2-6 感性故障时 YNd1 接法的换相失败问题

时间(s)	临界阻抗 (mH)	换相失败情况
3	430	阀 4-阀 6
3.002	435	阀 1-阀 3
3.004	450	阀 1-阀 3
3.006	450	阀 1-阀 3
3.008	440	阀 1-阀 3
3.01	435	阀 1-阀 3
3.012	435	阀 4-阀 6

表 2-7 为对 12 脉动换流器临界故障阻抗的测试结果。通过仿真结果可以发现，故障的发生时刻对换相失败具有一定的影响。在 3.004s 时临界阻抗达到最小值，在 3.008s 左右时达到最大值。与从之前两组仿真中发现，如果交流系统发生纯电阻性的接地短路故障时，变压器的连接组别不同可能会对直流换相失败情况造成不同的影响，结果表明采用 YNd1 接线方式的换流器有更大的可能性率先发生换相失败。由于两个换流器是相互串联的，当一侧发生换相失败时，直流电流会迅速增大。另一侧的换流器由于需要的换相面积增大，也极易发生换相失败。此外结果表明，采用 12 脉动换流器的临界接地阻抗也具有半个周波为一个周期的特点。并且通过结果可以发现，临界电阻的平均值与之前六脉动换流器的相比明显增大。

与表 2-4 中的过渡电阻为纯电阻性时的结果相比，表 2-7 中影响临界阻抗的极

值后移了大约 1/4 个周期。因而可以发现影响最大的时刻与接地故障的类型有很大关系。此外与电阻性故障相同，如果采用 12 脉动的换流器，发生换相失败的临界阻抗明显比采用单一接法的 6 流脉动换流桥增大。因而可以推测出连接组别使电压移相的同时，也使容易发生换相失败的时刻进行了偏移。从而对换相过程不利。

表 2-7 感性故障时 12 脉动换流器的换相失败问题

故障时刻 (s)	接地感抗 (mH)	YNy0 侧换相失败情况	YNd1 侧换相失败情况
3	950	阀 4 向阀 6	阀 5-阀 1
3.002	840	半周波后换相失败	阀 4-阀 6
3.004	630	-	阀 4-阀 6
3.006	880	半周波后换相失败	阀 1-阀 3
3.008	945	阀 1 向阀 3。	半周波后换相失败
3.01	940	阀 1 向阀 3。	半周波后换相失败
3.012	850	半周波后换相失败	阀 1 向阀 3

## 2.5 本章小结

本章首先分析了换相失败的产生原因，分析认为影响换相失败的主要原因有换流母线幅值相角、直流输电控制系统调整作用、故障发生时刻、直流电流、谐波、以及故障后锁相环输出几个因素。并且认为非对称故障会影响不同接线方法换流变的阀侧电压，进而影响换相过程。根据仿真发现若交流系统发生非对称故障时，同一短路点不同故障时刻，不同侧换流器的换相失败情况不同，极端情况甚至会发生一端换相失败而另一端正常换相的情况。

此外对影响换相失败的因素进行了分析。通过对不同时刻发生时导致换相失败的临界阻抗以及换相过程的分析可以发现，对于交流系统发生非对称故障的情况，故障发生时刻将影响换相过程，此外换流器容易发生换相失败的时刻也随故障过渡电阻阻抗角大小的变化而变化。当过渡电阻阻值小于不同时刻最小临界电阻阻值时，故障发生时刻不会影响换流器均会发生换相失败。而对于当接地阻抗阻值大于不同时刻最大临界电阻阻值时，换流器均不会发生换相失败。而当接地电阻介于两者之间时，换流器的换相失败问题将变成概率事件，过渡电阻阻值越小发生换相失败的可能性就越大。通过仿真还发现，换流变压器采用不同的连接方法对换流器的换相过程也具有一定的影响，甚至有时会发生一侧换流器发生换相失败而另一侧不发生换相失败的情况。分析表明采用 YNd1 接法侧换流器临界阻抗的平均值较小，因此发生换相失败的几率较大于另一侧的换流器。

## 第3章 控制系统对换相失败的影响

通过第二章的分析，直流输电系统控制系统的调节作用可以有效的增大换相面积，对换流器进行提前触发，从而达到抵御换相失败的效果，因而一个好的直流输电的仿真模型是分析该问题的前提。定直流电压的控制与定熄弧角的控制都是目前工程中使用较多的直流输电控制系统。两种技术路线控制系统的实现过程具有一定差异，它们对交流不对称故障时换流器的换相过程影响如何将在本章进行详细的介绍。

### 3.1 直流分层控制结构

直流输电系统通常采用 12 脉动换流器的连接方式。直流的控制系统常采用三层控制结构各层级之间相互配合的方式，最终将产生的换流阀的触发指令。双极控制层主要负责对上下两极进行协调控制，并根据运行人员设置的输送功率，功率提升速度，产生极控制层所需要的功率/电流参考值。直流输电的每极可能有一组或两组换流器组成，极控制层负责对每极中的各个换流器进行协调控制。根据从双极控制层中获得的极电流/功率指令，进一步产生换流器层控制层中所需要的直流电压、熄弧角、电流的参考值。直流系统中的换流器控制层最终产生相应换流器的触发脉冲指令，并将其送到阀控接口单元<sup>[20]</sup>。

### 3.2 双极层控制功能

直流输电中的双极控制层主要对直流输电系统中的一对极进行协调控制。其具体的功能包括：交流场开关连锁控制；直流场开关连锁控制；功率运行模式选择；功率定值相关计算；电流平衡控制；稳定控制功能；无功功率控制；换流变分接头协调控制；大地/金属运行方式转换；极隔离等。

### 3.3 极控制层功能

极控制层对直流系统中的一对极进行控制，进一步产生换流器层闭环控制所需要的参考值<sup>[21]</sup>。对于常规的直流输电系统，直流输电中的熄弧角，电压，直流电流的参考值通常在此环节中产生，实现该功能的主要环节有：电流指令计算；稳定控制；换流变分接头控制；空载加压试验；站间通讯；极解锁/闭锁控制；启/停顺序控制；直流线路故障重启；低压限流功能（VDCOL）；过负荷限制；保护性监视功能等；电流裕度补偿（CMC）。此外还有定直流电压控制，定熄弧角控制等。不同技术路线的控制系统在此本层中的在实现过程具有较大差异，本章将其实现过程

与差异进行详细的对比。

### 1) 电流裕度补偿(CMC)

逆变侧电流控制一般设有裕度,以防止常规运行方式下整流逆变侧同时对直流电流进行控制的情况。但故障发生后或其它原因,有时逆变侧需接管对电流的控制时,需要去除该裕度值。去除裕度的功能是由电流裕度补偿(CMC)控制器完成的。此环节通常设置在整流侧,且当站间通讯保持正常工作时投入使用。实质为比例积分控制器,输入量为实际电流值与参考值,当偏差大于 2%时,则调节器产生电流的补偿量传递至逆变侧电流控制中,以补偿电流裕度。补偿后逆变侧参考值约比整流侧的定值低 2%。当整流侧恢复电流控制时,电流裕度补偿功能自动退出<sup>[22]</sup>。

### 2) 低压限流(VDCOL)

低压限流环节(VDCOL)可以有效地减少故障后换流器消耗的无功,有利于故障后的快速恢复并极大减少连续换相失败的可能。故障状态下,该功能根据直流电压跌落的程度限制电流控制器的定值。待直流电压恢复后,低压限流环节自动退出。低压限流环节需在不正常运行状态下快速可靠启动,因此需在整流侧与逆变侧分别加装低压限流装置。在降压运行模式下,低压限流装置也可以根据直流电压比率提供适当的功能。对电流的限制需要设置下限,保证换流器电压电流下降过多时不发生断流的现象,且下限值应保持固定。

在整流侧与逆变侧的低压限流环节(VDCOL)常需按照不同参数整定。为保证故障后直流系统最大程度的快速恢复,避免逆变器过长时间控制电流。整流侧低压限流中产生的电流整定值要高于逆变侧的整定值。逆变侧输入量的滤波时间常数也往往设置的较大。此种参数设置可以使直流的整流侧更快恢复对电流的控制<sup>[23]</sup>。

### 3) 电压协调控制器

高压直流输电采用双 12 脉动换流器串联的拓扑结构。为保证每一对极的两组换流器时刻维持相同的工作状态,保证加在换流器两端的电压相同,需要设置电压协调控制单元。通过比较两组换流器的端电压,对各自的换流器触发角进行修正,从而达到两端换流器平衡的状态。

## 3.3.1 定电压控制路线下中极控制层特殊的控制器

定电压控制的技术路线被称为闭环型的实测型控制器,通过采集一次系统的相关电气量(电压测量值、电流测量值、熄弧角测量值)进行,与给定值进行比较,闭环产生需要的指令值,达到对换流器进行控制的目的。

常规运行方式下,此种技术路线通过控制换流器的触发角,并与变压器分接头相互配合控制直流电压,并将熄弧角维持在 15°~19°范围内。若熄弧角超出范围则调整分接头档位。极控值中包括电压控制器、电流控制器、逆变侧还装设定熄弧角

控制器，并在常规运行时选择定电压控制器。选择模块完成对不同控制逻辑的切换，并共用一套比例积分控制器，根据选择的结果对应设定调节器的常数。由于不同控制逻辑共用同一个调节器，并且直接通过一次量测量进行逻辑判别，所以具有很快的逻辑切换速度，并且切换过程较为平滑不会引起触发角指令的突变。

此外该控制策略直接通过熄弧角控制电压，功率提升速度快有利于紧急功率支援。电压控制在交流系统波动时有利于控制换流器消耗无功，利于直流系统的安全稳定运行。

控制器的选择模块完成定电压定熄弧角定电流控制之间的逻辑选择配合。控制器配合过程如图 3-1 所示<sup>[24,25]</sup>。在整流/逆变运行模式下，选取不同的输入值与参考值的偏差量选择控制逻辑时，整流侧一般选择输入偏差最小的逻辑，逆变侧选择偏差量最大的逻辑。三种控制系统共用一个比例积分调节器，其比例常数和积分常数通过选择不同的控制逻辑相应整定，最终输出量为触发角指令。当控制器在电流/电压/熄弧角调节器之间切换时，触发角指令不会突变，输送的功率也不会产生波动<sup>[26]</sup>。

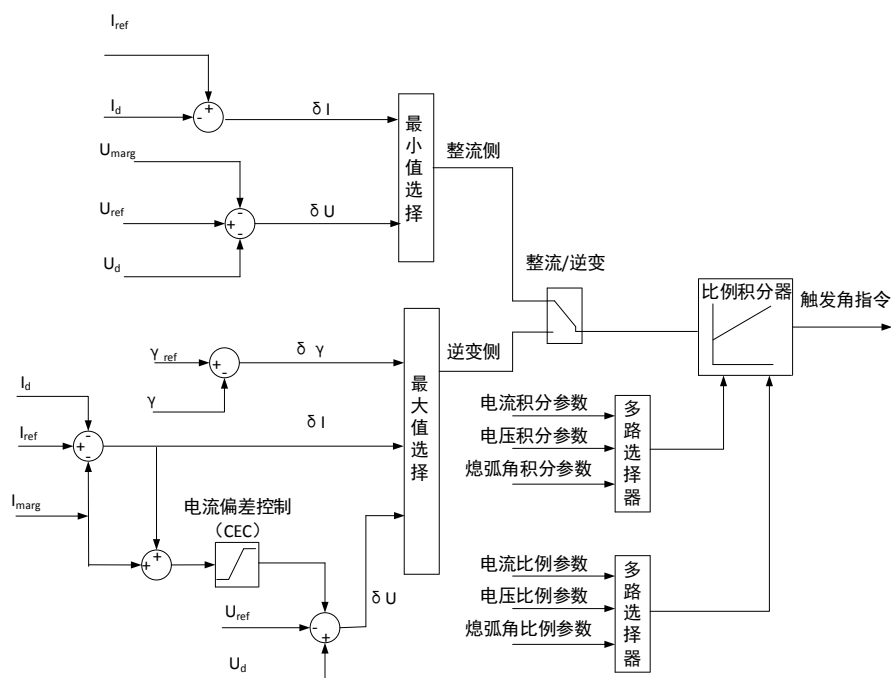


图 3-1 定电压控制系统

### 1) 整流站的控制器选择环节

整流站装有电流控制器与电压控制器，逆变侧为在熄弧角过小防止换相失败还需装设定熄弧角控制。整流站通常还有最小触发角控制。常规运行下为防止选择定电压控制，整流侧的电压参考值需设置裕度，通常取为  $U_{DC,ref}=1.3U_{DCN}$ 。因此正常运行时，电压为额定值，则电压控制器输出保持在 0.3。控制器将选择电流控制。

## 2) 逆变站的控制器选择环节

正常情况下，逆变站选择定电压控制，其电压参考值常取额定的直流电压且不需设置裕度<sup>[23]</sup>。而对于电流控制器，则电流参考值需设置裕度为 0.1。正常情况下，直流电流在额定至附近波动，因此电流控制的差量为负值，约等于-0.12。此外，为避免换相失败以及直流在故障后的恢复，逆变侧还需要设置定熄弧角控制。熄弧角的设定值通常比运行值稍低，为避免与变压器分接头调节作用冲突，也常需要设置一个裕度。因此熄弧角控制也通常为负值，通过此种逻辑，逆变侧将选择输入偏差量为最大的电压控制直流输电的常规控制<sup>[24]</sup>。工程经验表明，采用定电压控制有利于系统的稳定运行，但与常规定熄弧角路线相比，通常需要设置更高的熄弧角，因而变压器以及无功补偿装置的容量需要相应增加。

## 3) 电流误差控制环节(CEC)

电流误差控制环节是逆变站电压控制器输入的一部分，可以在控制特性曲线中增加一段斜率较小的直线，使不同控制逻辑切换的过程更加的平稳。当电流参考值与实际值的差超过 2%时投入。此段曲线作用的起始点是电流误差大于 6%。其输出最大为 5%，由于电流裕度补偿功能，电流误差大于 2%时，电流参考值会不断增大，使电流误差控制功能投入<sup>[25]</sup>。

### 3.3.2 定熄弧角控制策略技术路线中极控制层特殊的控制器

预测关断角控制策略包括三类控制器：电压调节器，电流控制放大器，关断角控制器<sup>[26]</sup>三类控制器有各自的比例积分控制器，并以限幅的方式相互联系，完成控制逻辑转换。其中关断角控制器为预测性的控制器，通过采集换流母线上的量测量计算得出所需的触发超前角，并且在故障下为逆变侧提供正向的  $U-I$  特性曲线，控制逻辑转换准确，平稳。

定熄弧角控制的技术路线采用了换相失败的预测技术，通过换流母线的量测量对故障进行判断，并产生附加的触发超前角对换相失败加以抑制作用。

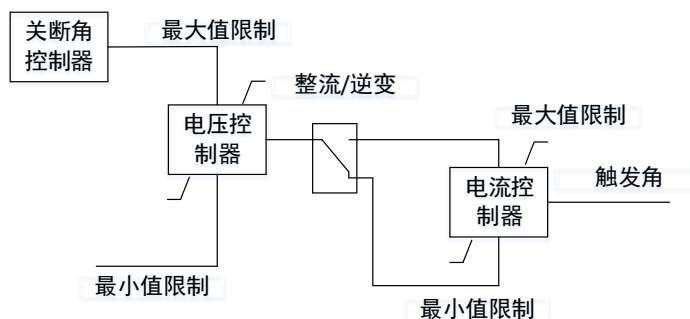


图 3-2 定熄弧角控制系统

#### 1) 电压调节器 (VCAREG-Voltage Regulator)

电压调节器也是极控层中的一个重要组成部分，采用闭环控制侧方法，控制直

流电压在给定值附近波动。电流控制器常作为电压控制器下一级的输出，其输出受到电压控制器的限制，对于整流侧限制电流控制器的下限，在逆变侧限制电流控制器的上限。逆变侧的电压调节器主要用于降压运行方式，逆变侧电压调节器的参考值比额定值略高，当直流额定运行时不启动，降压运行时启动以控制直流电压<sup>[28]</sup>。如果直流电压快速上升，变压器分接头配合电压调节器，可限制直流电压<sup>[27]</sup>。

## 2) 预测性关断角控制器 (AMAX-Alfamax Inverter Control)

最大触发角控制器 (AMAX) 设置在逆变侧限制电压控制器的上限，起定熄弧角控制的作用。常规运行方式下 CCA 的输出将一直保持在输出的上限，即选择 AMAX 的输出作为 CCA 的输出达到定熄弧角控制的功能。最大触发角控制器利用交流系统的电压计算得到需要的触发角，属于一种开环的控制器，在常规运行方式起定熄弧角控制的作用，而在故障状态下，实现定熄弧角提供定电流控制的平滑过渡过程。过渡过程中为逆变侧的特性曲线提供正斜率部分，以防止控制方式转换过程当中发生整流侧与逆变侧对电流进行控制。最大触发角控制器的特性可由下述公式表示，其中正向斜率由补偿项  $I_o - I_d$  提供， $\gamma_{ref}$  是熄弧角的设定值，一般取  $17^\circ$ 。 $I_o$  为直流电流测量值， $I_{dN}$  为直流电流额定值， $U_{di0N}$  为额定空载直流电压； $U_{di0}$  为实际空载直流电压。

$$\beta = \arccos(\cos \gamma_{ref} - 2 * d_x * \frac{I_o}{I_{dN}} * \frac{U_{di0N}}{U_{di0}} - K(I_o - I_d)) \quad (3-1)$$

## 3) 电流控制放大器 (CCA-Current Control Amplifier)

电流控制放大器是定熄弧角技术路线控制系统中最基本的控制环节，本质为比例积分控制器。将直流电流与参考值的差量转化为触发指令。为了减小控制不同步而导致的直流输电系统谐波不稳定问题，电流控制放大器须要和交流电网保持同步<sup>[29]</sup>。电流控制放大器的输出受到电压控制器的限制，整流侧限制其最小值，逆变侧限制其最大值。

## 3.4 不同技术路线应对换相失败的响应策略

定熄弧角、定直流电压技术路线的控制均能利用电气量在系统发生扰动时对换相失败情况进行预测，并使直流系统发生换相失败后快速恢复，保证直流系统的稳定运行<sup>[30-34]</sup>。但两者具有一定的差异，其实现过程不同，应对换相失败的响应也有所不同。

### 1) 换相失败预测环节(CFPRED)

定电压控制技术路线的控制系统具有换相失败预测功能，使换流器提前触发，保证直流系统不发生换相失败。检测换相失败方法有两种：过零序检测法用于检测

单相故障， $\alpha\beta$  检测法用于检测三相故障。该功能仅在交流系统发生故障时启动，当故障时两种检测机制将产生不平衡量，并将不平衡量转换为角度，并取两者较大值，作用在熄弧角控制器上对熄弧角给定值的提升。在交流系统故障下检测故障并增大熄弧角。检测方法与定电压控制技术路线相同，交流系统三相电压平衡时，该功能不启动。故障后控制环节根据不平衡量产生相应触发角度，直接作用在最大触发角控制器上对控制系统提前触发。

## 2) 最小换相裕度(AMIN)

若换流器的换相面积小于极限关断面积时，最小换相裕度(AMIN)控制启动，限制触发角最大值。控制环节计算最小允许的换相面积并与实际换相面积 AMIN\_CALC，若低于 AMINREF 则立即发出点火指令<sup>[35]</sup>。定熄弧角控制与定电压控制技术中该部分起到作用相似功能，起减少换相失败及连续换相失败的作用。若换流器的换相面积小于极限关断面积时，最小换相裕度(AMIN)控制启动，故障后计算换相相面积迅速增大，提前触发，以防止连续换相失败的发生。通常最小换相裕度(AMIN)控制功能退出的时间常数相对较大<sup>[37]</sup>。

## 3.5 直流控制系统对换相失败的影响

交流系统发生故障容易导致换流器发生换相失败，从第二章的分析得知，变压器的连接组别会一定程度影响换流器的换相过程的结论。而作为直流系统中重要组成部分的控制系统是否会一定程度的影响换相失败也是一个值得研究的问题。本文将依据以定直流电压与定熄弧角控制为基础的直流输电仿真模型对本问题展开相关研究。

### 3.5.1 采用定熄弧角控制策略的直流输电模型的仿真分析

定熄弧角控制技术路线的直流输电控制系统是工程当中广泛使用的一种控制系统。根据前两章所述，控制系统的调节作用对换相失败具有一定的抵御功能。本文在 CIGRE HVDC 单极 12 脉直流输电模型的一次系统的基础上，将控制系统替换为定熄弧角控制技术的控制系统。为对比不同控制系统对换相失败的影响，仿真的内容与分析方法依然延续了之前的方式。对相同的短路点的不同故障时刻，以及导致换相失败发生的临界电阻进行了研究与分析。

表 3-1 统计了不同故障发生时刻时导致换相失败的临界电阻阻值，与从之前两组仿真中发现，如果交流系统发生纯电阻性的接地短路故障时，变压器的连接组别不同可能会对直流换相失败情况造成不同的影响，但直流的控制系统也可能成为影响该问题的重要因素，为全面分析该问题，对 CIGRE HVDC 的 12 脉动换流器模型也进行了相同方式的测试。结果表明采用 YNd1 接线方式的换流器有更大的可能性

率先发生换相失败。此外结果表明，采用 12 脉动换流器的临界接地阻抗也具有半个周波为一个周期的特点。并且通过结果可以发现，临界电阻的平均值与之前六脉动换流器的相比明显增大。

与表 2-1 对比发现容易发生换相失败的时刻没有因为控制策略的变化而发生变化，但临界电阻的阻值却发生了较大的变化。造成这种现象的原因是不同控制策略下控制系统的调节程度不同造成的，所以直流控制系统中的参数需设置合理。对表 3-1 进行分析可得，结果中最大与最小的临界电阻阻值仍有较大差异，故障接地电阻小于最小接地电阻  $72.5\Omega$  时，任何时刻都会发生换相失败，而大于最大电阻  $122.5\Omega$  时均不会发生换相失败。而处于数值之间的则有几率发生换相失败。因此分析不同时刻的换相过程，对直流输电模型某一特定的过渡电阻进行了不同故障时刻的测试得到了如表 3-2、表 3-3 中的结果。

表 3-1 不同故障发生时刻的临界电阻阻值

故障时刻 (s)	临界短路电阻 ( $\Omega$ )	故障时刻 (s)	临界短路电阻 ( $\Omega$ )
1.5	75	1.506	72.5
1.501	85	1.507	73
1.502	92.5	1.508	75
1.503	100	1.509	75
1.504	122.5	1.51	75
1.505	105	1.511	82.5

表 3-2 为接地电阻为  $95\Omega$  时，故障持续时间设定为  $0.02s$  时，不同故障发生时刻换流器发生 A 相单相短路时的换相失败的情况。表中记录了最接近故障时刻的没能成功换相的换相情况。根据 2.4 节的分析结论可知，换流变压器的星接侧受故障发生时刻的影响较大，在过渡电阻较大时，若大于角接侧的临界电阻阻值三角形侧的换流器能够成功换相，而星形侧的换流器会发生换相失败。因此当故障过渡电阻较大时，表 3-2 中的结果中仅有变压器阀侧星接侧的换流器发生少量的换相失败。此外与表 2-1 中接地电阻为  $110\Omega$  时的结果相比，换相失败发生的概率极大地减少也表明了不同的控制系统的调节作用对换相失败的临界阻抗有一定的影响。

表 3-2 接地电阻为  $95\Omega$  时换流器发生换相失败的情况

故障时刻 (s)	YNd1 侧换相失败情况		YNy0 侧换相失败情况	
	半个周波之内	一周波之内	半个周波之内	一周波之内
1.5	-	-	-	-
1.501	-	-	-	-
1.502	-	-	-	-
1.503	-	-	阀 4-阀 6	阀 4-阀 6

续表 3-2 接地电阻为 95Ω 时换流器发生换相失败的情况

故障时刻 (s)	YNd1 侧换相失败情况		YNy0 侧换相失败情况	
	半个周波之内	一周波之内	半个周波之内	一周波之内
1.504	-	-	阀 4-阀 6	阀 4-阀 6
1.505	-	-	阀 4-阀 6	阀 4-阀 6
1.506	-	-	-	-
1.507	-	-	-	-
1.508	-	-	-	-
1.509	-	-	-	-
1.51	-	-	-	-
1.512	-	-	阀 1-阀 3	阀 1-阀 3
1.514	-	-	阀 1-阀 3	阀 1-阀 3

表 3-3 为接地电阻为 78Ω 时换流器发生换相失败的情况, 由于接地电阻值较小, 换流器发生换相失败的概率较高。当过渡电阻较小时, 变压器三角形侧换流器的换相失败次数明显增加, 发生换相失败的概率明显大于星接侧的换流器的概率。这个结果正验证了之前提出的三角形接侧对故障发生时刻不敏感而星接侧的换相过程对故障发生时刻敏感的结论。此外与之前的结果相比容易发生换相失败的换流阀并未发生改变。从而也可以发现控制策略不影响容易发生换相失败的阀组, 但不同的控制策略却由于对换流器提前触发的程度不同, 而影响发生换相失败的临界电阻值的大小。

表 3-3 接地电阻为 78Ω 时换流器发生换相失败的情况

故障时刻 (s)	YNd1 侧换相失败情况		YNy0 侧换相失败情况	
	半个周波之内	一周波之内	半个周波之内	一周波之内
1.5	-	-	-	-
1.501	阀 3-阀 5	阀 3-阀 5	-	阀 1-阀 3
1.502	阀 3-阀 5	阀 3-阀 5	-	阀 1-阀 3
1.503	阀 3-阀 5	阀 3-阀 5	-	阀 4-阀 6
1.504	-	-	阀 4-阀 6	阀 4-阀 6
1.505	-	-	阀 4-阀 6	阀 4-阀 6
1.506	-	-	-	-
1.507	-	-	-	-
1.508	-	-	-	-
1.509	-	-	-	-
1.51	-	-	-	-
1.511	阀 6-阀 2	阀 6-阀 2	-	阀 4-阀 6
1.512	阀 6-阀 2	阀 6-阀 2	-	阀 4-阀 6

### 3.5.2 采用定直流电压控制策略的直流输电模型的仿真分析

定直流电压控制技术路线的直流输电控制系统也使用较多的一种直流控制系统。这种技术路线的换流器当发生故障后，熄弧角跌落到一定裕度以下时便会切换至熄弧角控制环节，保证换相的裕度。为验证控制系统对换相失败的作用，本文基于 CIGRE HVDC 单极 12 脉直流输电模型的一次系统，建立了以定直流电压控制技术路线为基础的直流输电控制系统。并对模型进行了相应的测试。

交流系统发生故障时的临界电阻如表 3-4 所示，通过之前的对比分析发现，采用不同的控制策略导致换相失败的临界电阻值的大小具有一定的差异。但总体趋势相差不大。而不同控制策略的控制系统在故障后的响应速度和特性具有一定差异是导致这种现象发生的主要原因。

表 3-4 不同故障发生时刻的临界电阻阻值

故障时间 (s)	临界电阻 ( $\Omega$ )	故障时间(s)	临界电阻
1.5	100	1.506	95
1.501	110	1.507	97.5
1.502	115	1.508	92.5
1.503	125	1.509	100
1.504	145	1.51	105
1.505	115	1.511	100

故障持续时间设定为 0.02s，接地电阻为 110 $\Omega$  时 A 相单相短路换流器的换相失败情况如表 3-5 所示，不同故障发生时刻换流器最先发生换相失败的阀的情况。仿真分析时取介于最大最小值之间的接地电阻，以分析换相失败随故障发生时刻发生随机性的问题。结果表明不同侧换流器换相失败的情况各有发生，但容易受到故障影响的换流阀却没有发生变化。

表 3-5 接地电阻为 110 $\Omega$  时换流器发生换相失败的情况

故障时刻 (s)	YNd1 侧换相 失败情况	YNy0 侧换 相失败情 况	YNd1 侧换 相失败情况	YNy0 侧换 相失败情 况
	半个周波之 内	一周波之 内	半个周波之 内	一周波之 内
1.5	-	-	-	-
1.501	-	-	-	-
1.502	阀 3-阀 5	阀 3-阀 5	-	阀 1-阀 3
1.503	阀 3-阀 5	阀 3-阀 5	-	阀 1-阀 3
1.504	-	-	阀 4-阀 6	阀 4-阀 6

续表 3-5 接地电阻为  $110\Omega$  时换流器发生换相失败的情况

故障时刻 (s)	YNd1 侧换相 失败情况	YNy0 侧换 相失败情 况	YNd1 侧换 相失败情况	YNy0 侧换 相失败情 况
	半个周波之 内	一周波之 内	半个周波之 内	一周波之 内
1.505	-	-	阀 4-阀 6	阀 4-阀 6
1.506	-	-	-	-
1.507	-	-	-	-
1.508	-	-	-	-
1.509	-	-	-	-
1.51	-	-	-	-

### 3.6 本章小结

本章详细介绍了两种主流的直流输电控制系统，介绍了高压直流输电的控制系统结构，本分别介绍了不同层级控制系统的配置，以及相互间的配合过程。可以发现两种控制策略在实现过程方面具有较多不同之处。

适应两种控制系统的主回路参数也具有一定区别，通常规定电压控制需要有较大的熄弧角，从而需要更大的容量的换流变压器以及额外的无功补偿装置，但熄弧角可以在一定范围内波动，具有一定的灵活性。但总体来说，作为工程中主要使用的两种控制系统，定直流电压控制，与定熄弧角控制均可以满足直流系统对控制精度上的需求。

故障后直流输电的控制系统主要通过提前触发，增大换相裕度抵御换相失败。控制系统中参数若设置得当，则在一定程度上可以防止直流输电发生换相失败。

## 第4章 分层方式下的控制系统及换相失败情况

分层接入的方式将特高压直流输电线路接入不同电压等级电网是一种新的网络结构,该网络结构成为亟待研究的课题,其控制系统需要重新设计。本文结合传统的特高压直流输电控制系统详细分析了分层接入方式下特高压直流系统的控制系统,并介绍了工程中广泛使用的两种不同技术路线的控制系统,据此设计了两种不同的特高压直流输电分层接入方式下的控制系统。基于 PSCAD/EMTDC 的仿真平台,本文针对两种控制系统建立了详细的仿真模型,并分析了控制系统之间的差异。此外本章还针对交流系统故障引发的直流换相失败现象进行了一定的仿真分析。

### 4.1 特高压分层接入方式下的直流输电系统控制系统

中国已投产的特高压直流输电系统与传统直流输电主接线形式不同,采用每极 2 个 12 脉动换流器串联的连接方式<sup>[26]</sup>。由于其特殊的系统接线形式,特高压直流输电系统的设计将另外考虑以下几个方面:

- 1) 特高压直流输电系统需要有灵活的运行方式,控制系统需对每极的换流器单元分别配置。
- 2) 特高压直流输电系统串联的两个换流器之间需要协调配合,保证不同换流器两端的电压相同,具有相同的传输功率。
- 3) 各换流器单元的控制功能和保护配置之间相互独立,保证当一个换流器退出运行时另一个换流器可以独立运行。

对于传统的直流输电控制系统依据第三章的内容可分为双极控制层,极控制层,换流器控制层三层结构。而特高压直流输电系统要求每个换流器需要完成相对独立的控制,部分极控制层的控制逻辑将下放到换流器控制层,极控制层与换流器控制层的分别也更加明显<sup>[27]</sup>。

而分层接入方式的特高压直流输电控制系统则需在特高压直流输电技术基础上更进一步。分层接入方式的特殊之处在于串联的换流器通过不同的换流变压器接入不同电压等级的电网,而受端接入的电网处于相对解耦的状态,为使不同换流器能平衡运行,换流器之间的协调配合将更为重要。

此外传统的特高压直流输电系统中的各个换流器统一接收极控制层产生的触发指令,每个换流阀的触发角都应大致相同,而在分层接入的直流系统中,由于不同换流器接入的换流母线不同,每组换流器在运行时的换相角也不相同。因而换流器更需要相对独立的控制才能保证换流器的稳定运行。其中部分的属于极控制层的控制系统需要下放至换流器控制层。才能满足分层接入条件下对于换流器的控制要

求。为满足分层接入方式下对直流控制的要求，其控制系统较特高压直流的控制系统相比通常有以下异同之处：

### 1) 双极控制层。

与常规的特高压直流输电的双极控制层实现的功能相似，由运行人员控制设定功率指令，并将指令传递至极控层。对于采用受端分层接入的换流站，双极控制层需实现对 500/1000kV 侧交流电网无功的控制功能<sup>[37]</sup>。

### 2) 极控制层。

由于直流系统受端采用特殊的分层接入方式，极控制层控制需要对两个交流系统的频率控制、功率控制等分别响应并统一协调。由于分层接入系统下容易出现不同换流器两端电压不平衡的现象，因此极控制层中需要配置平衡两侧换流器端电压的平衡控制功能，保证正常运行时不同换流器的直流电压相等。

### 3) 换流器控制层。

为了维持接入不同电网的换流器端电压不变，不同的换流器通常需要不同的触发角，对于定直流电压控制与定熄弧角的控制路线，需要下放置换流器控制层的主要有：1、电压调节器，2、电流控制放大器，3、关断角控制器。定熄弧角的控制路线其控制系统的逻辑配合过程依然采用上一级的输出值作为下一级控制器限制的方式实现。而定直流电压控制的配合过程也与常规的配合过程相同，共用同一套比例积分控制器，并通过多路选择器来实现控制方式的选择与切换。

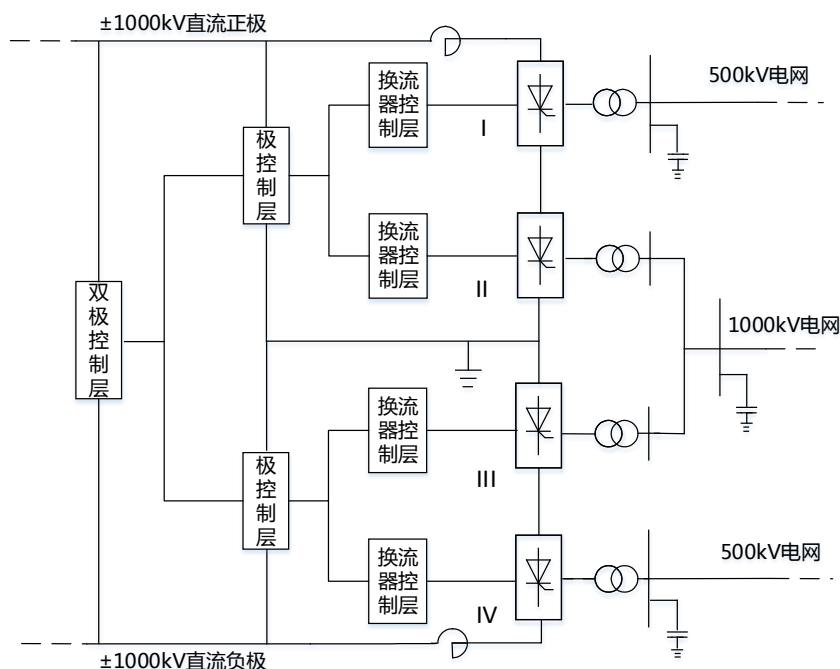


图 4-1 特高压直流分层接入方式控制系统分层结构

## 4.2 系统仿真条件

为了全面验证所建 HVDC 控制模型,对于特高压分层接入方式下,本文研究的直流系统送端接入 500kV 交流电网,受端分别接入 500kV 与 1000kV 交流电网,其额定直流电压  $\pm 800\text{kV}$ ,额定容量 10000MW。分层接入方式下每个换流站都含有双极,每极 2 个串联的 12 脉动换流器,并设置接地极。基于 PSCAD/EMTDC 建立该工程背景下的仿真模型,直流输电模型的如图 4-1 所示<sup>[38]</sup>。其中模型的部分重要参数如下:

- 1) 送端换流站采用单相两绕组的换流变压器,换流变压器参数:

表 4-1 整流侧换流站变压器参数

换流变压器绕组	额定相电压 (kV)	额定容量 (MVA)	在额定分接头 (0) 时的阻抗%
YNd1	306.0/172.8	510	21
YNY0	306.0/99.8	510	21

- 2) 高端换流变压器采用单相两绕组的换流变压器,主要设计参数如下:

表 4-2 逆变侧高压端换流站高压端变压器参数

换流变压器绕组	额定相电压 (kV)	额定容量 (MVA)	在额定分接头 (0) 时的阻抗%
YNd1	300.2/165.8	490	20
YNY0	300.2/95.7	490	20

- 2) 低端换流变压器采用单相两绕组的换流变压器,主要设计参数如下:

表 4-3 逆变侧低压端变压器参数

换流变压器绕组	额定相电压 (kV)	额定容量 (MVA)	在额定分接头 (0) 时的阻抗%
YNd1	606.2/165.8	490	20
YNY0	606.2/95.7	490	20

- 3) 交流系统接入条件

表 4-4 交流系统接入条件

交流系统	受端 500kV 侧	受端 1000kV 侧	送端 500kV 侧
额定电压 (kV)	525	1050	525
额定功率 (MW)	5000	5000	10000
等值阻抗	2.49 + 14.34i	4.03 + 23.22i	0.6715 + 4.9456i
短路比	3.79	9.35	5.52

### 4.3 控制系统响应特性分析

当直流功率输送水平处于最小功率值至额定功率之间时，直流输电控制系统的响应特性满足需要如下要求<sup>[39-54]</sup>：

1) 当直流电流变化超过直流余裕时，直流系统响应时间不能大于 110ms；当直流电流指令的变化量不超过电流余裕时，响应时间不能大于 90ms；

2) 对于直流功率控制器，在交流系统暂态扰动期间使得直流系统具有恒电流控制特性，交流系统扰动持续时间一般小于 10s；

3) 交流系统发生瞬时扰动导致直流系统的运行电压发生变化时，直流功率控制器应能使自瞬时扰动发生后为起始点，因为电压变化导致直流输送功率变化值的 90% 在 1s 之内恢复；

4) 直流系统运行于输送额定功率和最小功率之间的任意方式下，直流功率控制器应使直流功率调节的速度需满足一定要求。当功率指令值阶跃降低或阶跃增加时，90% 的直流功率变化量须在功率整定值变化后的 150ms 内达到；且其阶跃响应特性是时刻调整的。

5) 如果系统有需要，直流系统在整流或逆变侧的交流系统故障后，其输送功率自故障切除瞬间起，恢复至故障前的 90% 时，不得超过 140ms 和 120ms。

为验证对不同控制策略建立的仿真模型正确有效，依据以上要求对控制系统进行仿真，并对两种控制系统的仿真结果进行对比分析。仿真结果中包括整流逆变侧的各类特性，其中 UDL\_11/UDL21 为整流侧/逆变侧的直流电压； $I_d$  为直流电流，GR\_500/GR\_1000 为逆变侧 500kV/1000kV 侧换流器的熄弧角；P500S/P1000S 为换流器注入 500kV/1000kV 交流系统的有功功率。Q500S/Q1000S 为 500kV/1000kV 换流器消耗的无功功率，AOI\_R 为整流侧的触发角指令值。

本文搭建的分层接入方式下的直流输电模型均能达到满足上述指标的中的要求，从而验证了控制系统的有效性，由于篇幅原因本文仅对电流和功率指令值变化时的仿真曲线进行分析。为了测试控制器的性能，在定电流控制运行方式下，将电流指令作从 1.0p.u. 阶跃下降到 0.9p.u.，使之持续 0.5s 之后，再从 0.9p.u. 阶跃上升到 1.0p.u.

仿真结果中第一阶段电流阶跃下降时，定熄弧角控制响应特性约为 50ms，定电压控制响应特性约为 40ms。第二阶段电流阶跃上升时，定熄弧角控制响应特性约为 50ms，定电压控制响应特性约为 60ms。

对于定熄弧角控制，从图中可以看出：当整流侧电流指令阶跃下降时，整流侧电流控制器增大  $\alpha$  角，降低直流电压以维持直流电流为 0.9p.u.，同时逆变侧熄弧角维持不变，而由于换流器无功消耗减少，换流母线电压升高使直流电压略有上升。

经 0.5s 整流站电流指令阶跃上升时，整流侧电流控制器减小  $\alpha$  角，升高直流电流为 1.0p.u.，同时逆变站调节  $\beta$  角，使熄弧角波动后维持在额定值。

对于电压控制，从图中可以看出，两种控制策略整流侧有相同的调节趋势，而逆变侧由于换流母线电压升高，为使直流电压维持 1.0p.u.，逆变侧的熄弧角增大。

经 0.5s 整流站电流指令阶跃上升时，整流侧电流控制器减小  $\alpha$  角，直流电流升高到 1.0p.u.，同时逆变站调节  $\beta$  角，使熄弧角波动后维持在额定值附近。

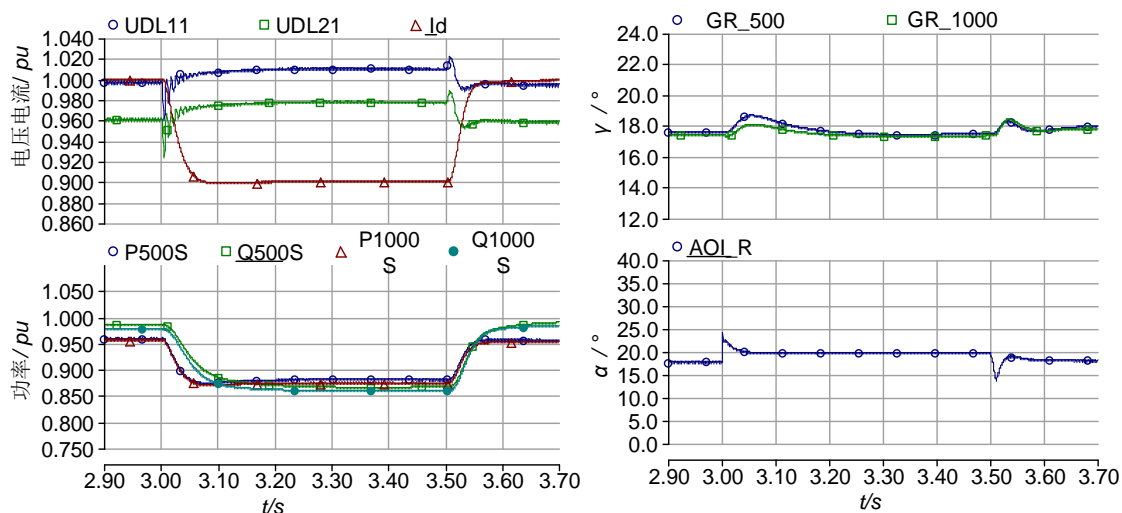


图 4-2 采用定熄弧角控制策略仿真结果

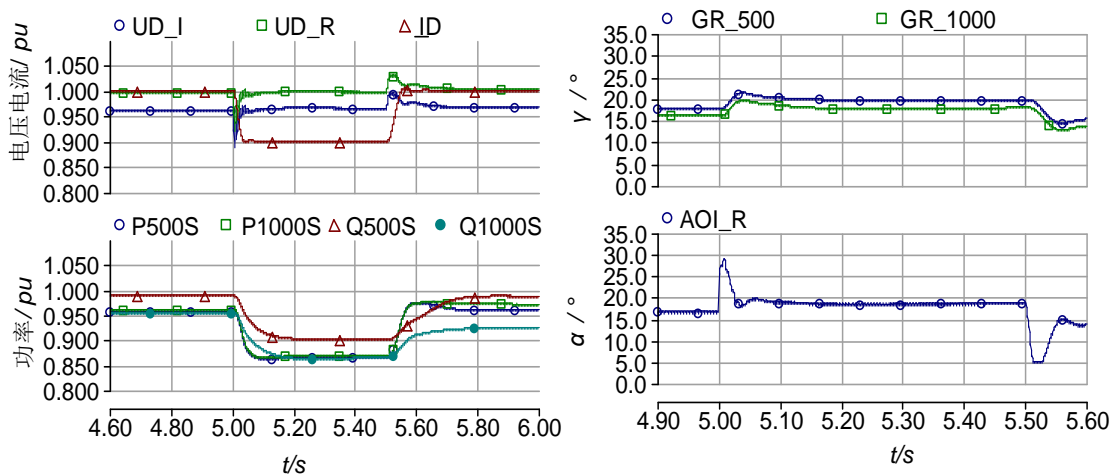


图 4-3 采用定直流电压控制仿真结果

## 4.4 直流控制系统控制逻辑间的配合

### 4.4.1 定熄弧角控制系统控制逻辑间的配合

分层接入方式下由于接入不同系统的换流器能够分别针对电网的波动进行响应，因而在 500kV 侧换流母线发生故障与 1000kV 侧换流母线发生故障后换流器应

该有类似的响应特性。在进行控制系统响应趋势分析时，选取逆变侧 500kV 侧换流母线发生单相接地短路故障时的仿真结果。故障发生时刻设置为 6s，故障持续时间为 0.1s。故障发生后，换流母线线电压最大跌落幅度约 15%。仿真结果包括整流侧与逆变侧直流电压、直流电流、触发角、熄弧角、500kV/1000kV 侧注入系统的有功功率以及换流器消耗的无功功率，E\_1000/E\_500 为 1000kV/500kV 交流母线线电压与相电压。AOI\_500,AOI\_1000,GR\_500,GR\_1000 为 500\1000kV 逆变侧换流器触发角与熄弧角，ARD 为整流侧的触发角。

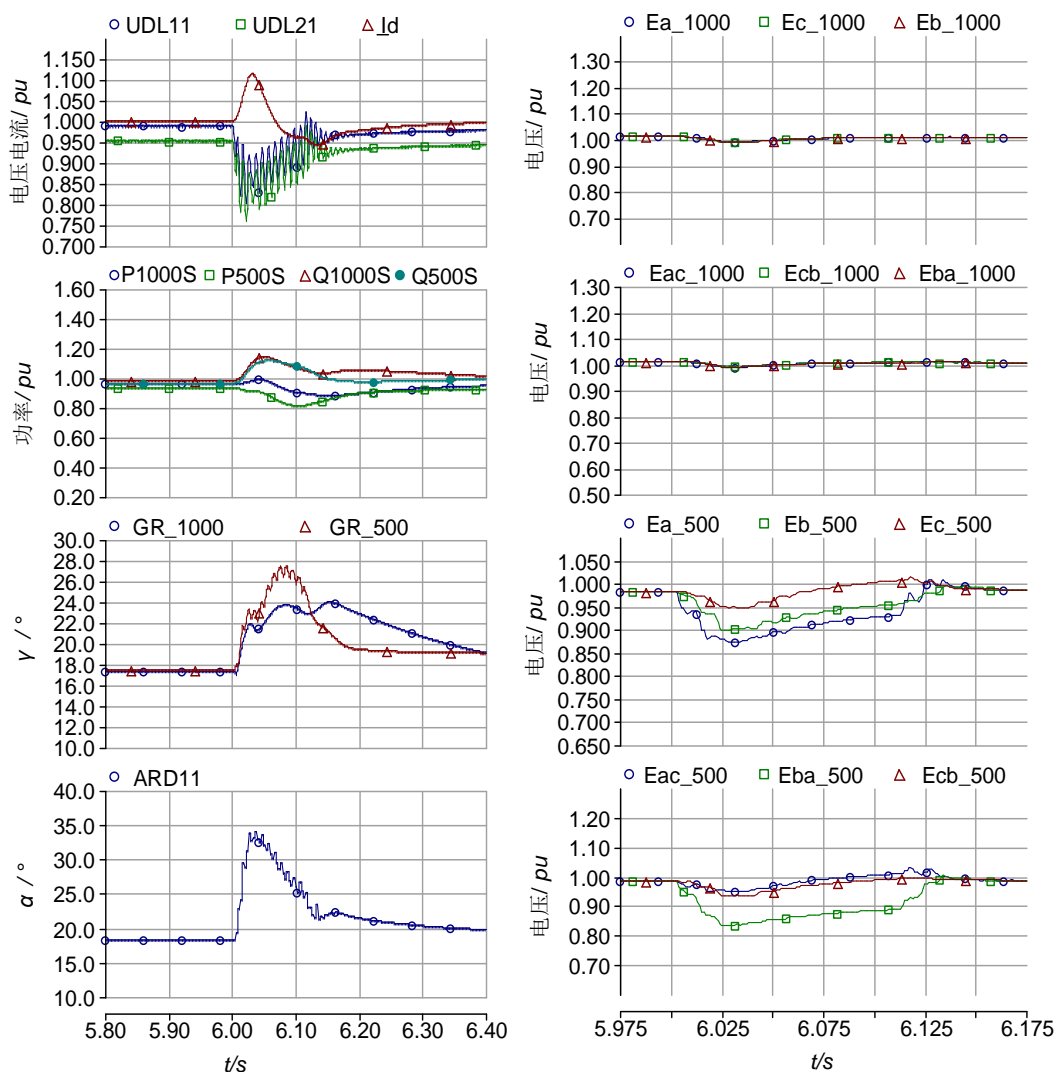


图 4-4 定熄弧角控制器的仿真结果

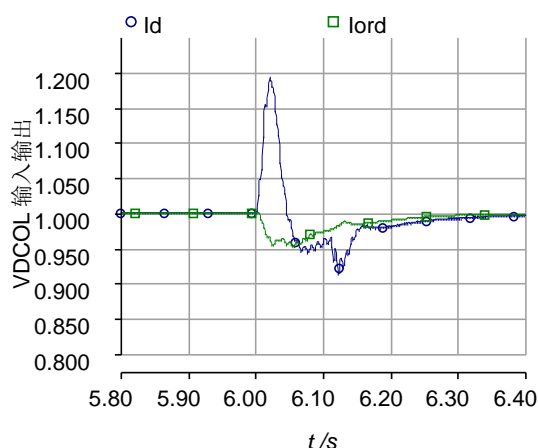


图 4-5 低压限流环节输出值

逆变侧控制系统的仿真结果如图 4-6 所示。控制系统的在故障切除之前，故障后直流电流迅速增大，而低压限流环节启动。此时实际的直流电流与通过低压限流环节产生直流电流指令值之间产生不平衡量。该不平衡量输入值电流积分放大器（CCA）中，致使 CCA 输出按照其上限值输出。其输出上限又受到 AMAX 控制器的限制。

此外低压限流环节作为 AMAX 控制器的输入量之一，也直接影响着开环定熄弧角控制系统所计算出的触发角。

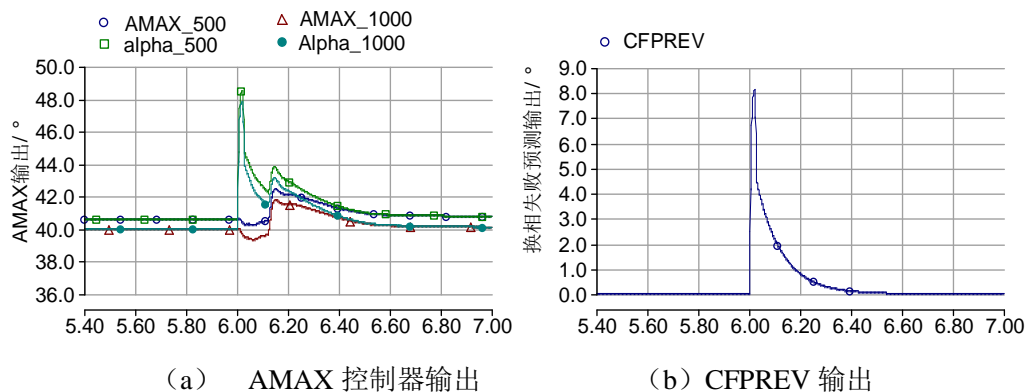


图 4-6 逆变侧的控制系统

AMAX 控制器的限制电流积分放大器（CCA）输出的上限，故障后的输入 CCA 的电流偏差量为正值因而最终输出量为其上限值，即 AMAX 控制器输出的角度。AMAX 控制器产生的触发超前角由两部分组成，其一是开环定熄弧角控制器产生的触发越前角，其二为换相失败预测环节产生的触发越前角。AMAX 控制器输出如图 4-6 (a) 中所示。

换相失败预测 CFPREV 输出如图 4-6 (b) 所示。由仿真结果可知，在故障发生后换相失败预测环节在 6.02s 达到输出峰值，最终使触发角减小 8°以抵御换相失败，

当故障清除后换流母线电压恢复换相失败预测环节的输出迅速减小，直至 6.4s 左右输出几乎为零。而 AMAX 控制器中计算得到触发角在故障开始时变化不大，故障发生 0.05s 之后，定熄弧角控制产生的触发越前角呈现增大的趋势。通过仿真可以发现，通过换相失败预测以及 AMAX 控制器之间的相互配合，故障后换流器的触发越前角整体呈现增大的趋势，以抵御换相失败。

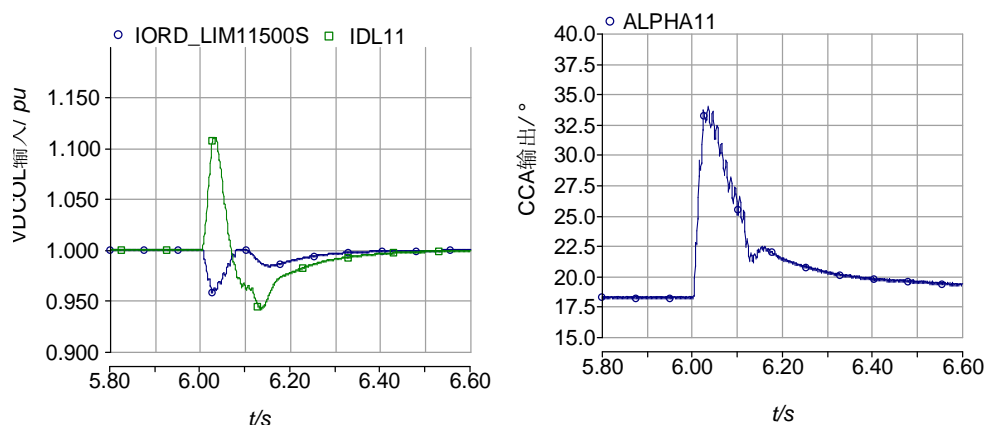


图 4-7 整流侧控制系统的响应特性

整流侧控制系统响应特性曲线如图 4-7 所示。图中 IORD\_LIM11500S 为低压限流环节产生的电流指令值，故障后电流指令值减小。IDL11 为实测的直流电流值，两者差值作为电流积分控制器（CCA）的输入。故障发生后直流电流短时间迅速增大，为限制电流的增加整流侧触发角增大。6.005s 后直流电流与触发角同时呈现减小趋势。

#### 4.4.2 定直流电压控制控制逻辑间的配合

分层接入方式下由于接入不同系统的换流器能够分别针对电网的变化进行响应，因而在 500kV 侧换流母线发生故障与 1000kV 侧换流母线发生故障后换流器应该有类似的响应特性。在进行控制系统响应趋势分析时，选取逆变侧 500kV 侧换流母线发生单相接地短路故障时的仿真结果。故障发生时刻为 6s，故障持续时间为 0.1s。故障发生后，换流母线线电压最大跌落幅度约 15%。仿真结果包括整流侧与逆变侧直流电压、直流电流、触发角、熄弧角、500kV/1000kV 侧注入系统的有功功率以及换流器消耗的无功功率。

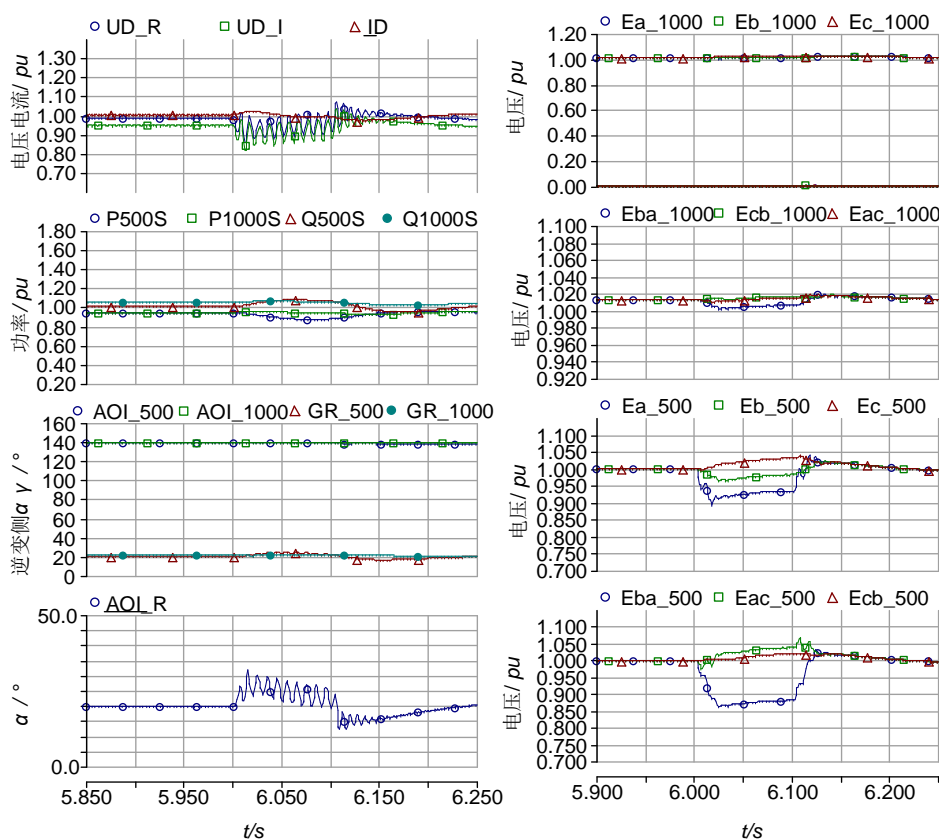


图 4-8 采用定直流电压控制的仿真结果

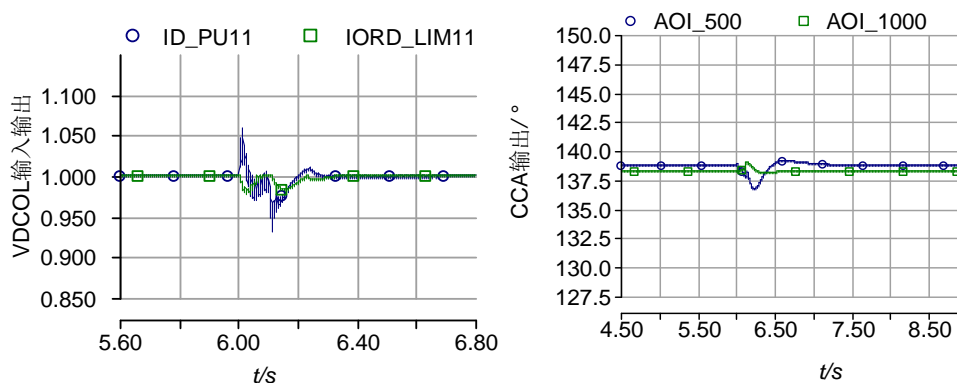


图 4-9 直流电流参考值与换流器触发角的变化情况

图 4-8 中的仿真结果表明故障发生后触发角约提前触发  $4^\circ$  以抵御换相失败。与定熄弧角控制系统不同，定直流电压控制的选择逻辑是比较电流电压熄弧角实测值与参考值的差值大小实现的。图 4-9 为直流电流实测值(ID\_PU11)与直流电流参考值(IORD\_LIM11)，其参考值通过低压限流环节产生。仿真结果发现故障发生后直流电流短时间增大。但由于受端直流电压的下降，电流参考值受低压限流环节限制略有减小。仿真图 4-10 为逻辑切换环节的输入量。通过比较熄弧角，直流电压，直流电流与各自参考值的差值选择的控制方式。其中 G\_500, G\_1000 为熄弧角的偏差量，I\_500, I\_1000 为电流的偏差量，U\_500, U\_1000 为电压的偏差量。通过仿真

可以发现，正常状态下，电压偏差量数值最大，因而常规控制为定电压控制。而故障后，500kV 侧由于熄弧角的减小，产生的偏差量明显增大。所以故障后 500kV 侧采用了定熄弧角的控制系统。故障清除后定熄弧角控制的偏差量明显减少，控制系统最终选择定直流电压控制。而 1000kV 侧由于熄弧角由于变化幅度较小，所以 1000kV 侧则一直处于定直流电压控制的模式。

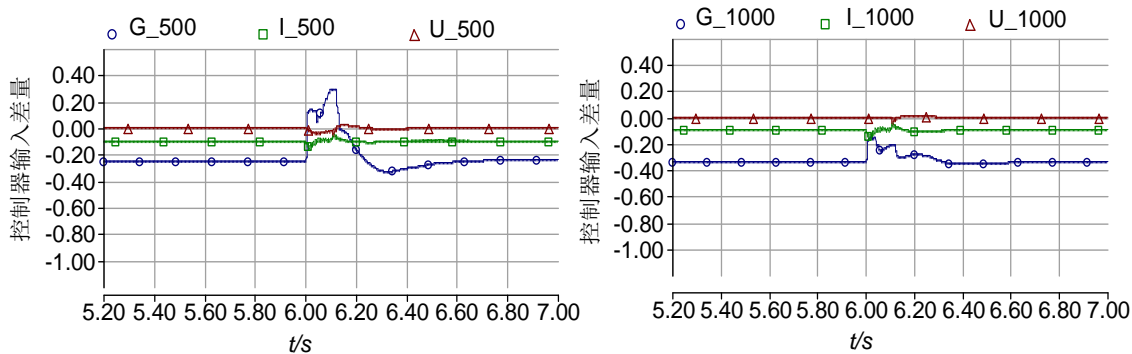


图 4-10 逻辑切换环节的输入量

仿真图 4-11 为整流侧的触发角和整流侧逻辑选择环节的输入量。AOI<sub>R</sub> 为整流侧的触发角，U<sub>R</sub>, I<sub>R</sub> 为输入电压控制器与电流控制器的差量。由于整流侧选择输入差量小的控制逻辑，所以整流侧一直对电流保持控制。此外整流侧配有高速闭环电压控制器和高速闭环电流控制器。为保证逆变侧对电压的控制，整流侧的电压控制器参考值带有一定的余裕。故障后整流侧电压发生跌落时电流偏差量进一步扩大因而控制逻辑选择定直流电流的控制方式。故障发生后，增大触发角以限制直流电流的增大。

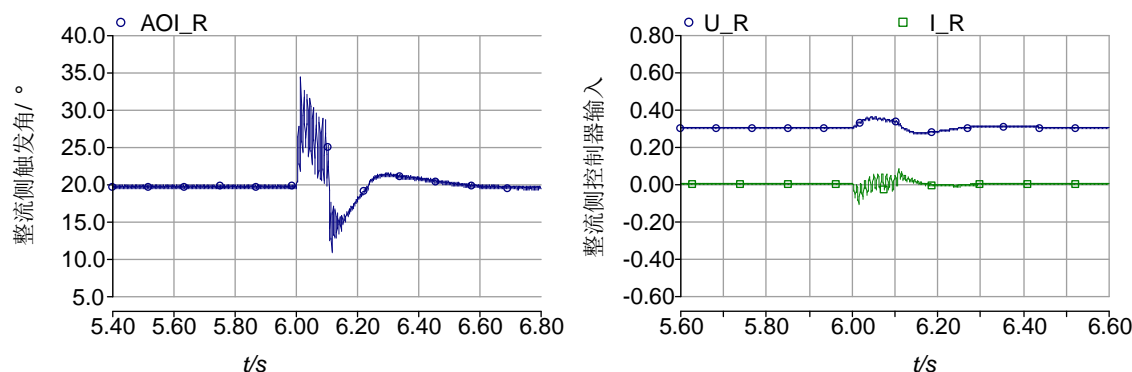


图 4-11 整流侧控制逻辑配合过程

#### 4.5 分层接入方式下发生换相失败的情况

当交流系统发生故障后，严重情况下可导致直流发生换相失败。直流的分层接入方式作为一种新型的拓扑结构，故障导致的换相失败情况值得研究。仿真图 4-12, 图4-13为交流 500kV 侧的换流母线上发生维持 0.1s 的金属性单相接地短路。图4-12、

图 4-13 分别为定熄弧角控制与定直流电压控制的仿真结果。图中主要包括整流侧与逆变侧熄弧角、触发角、直流电压、直流电流、有功注入功率以及换流器消耗的无功功率情况。

对比发现两种控制系统在系统故障后具有相似的仿真结果，并且都能从故障后快速恢复。随着直流电流在故障后的快速增大，导致接入不同受端电网的换流器先后发生了换相失败。在故障后，两种控制策略都通过提前触发的方式短时增加触发超前角以抵御换相失败，但由于故障较为严重，均未能成功。故障清除后，两种控制方式下的直流系统均快速恢复至故障前状态。

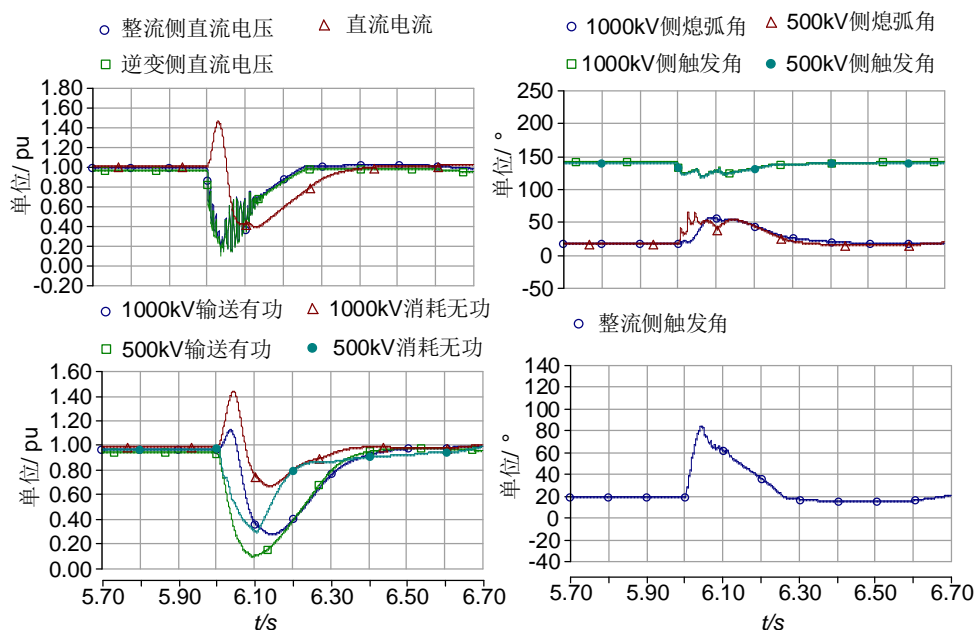


图 4-12、定熄弧角控制策略下发生单相接地故障仿真结果

仿真图 4-12 中采用的控制系统为定熄弧角控制。6s 故障发生后，逆变侧的直流电压迅速跌落，直流电流增加导致不同受端换流器的换相重叠角快速增大，进而造成换相失败。对于整流侧，电流控制器迅速增大  $\alpha$  以限制直流电流的增大。故障清除后，逆变侧先由定电流控制一段时间后转为 AMAX 控制，最终恢复至故障前状态。

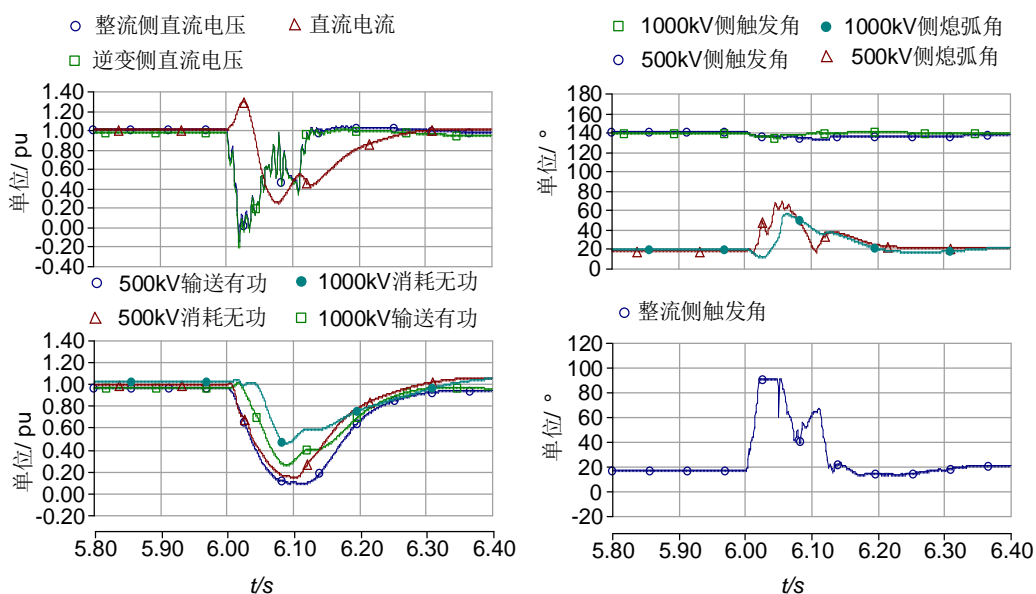


图 4-13 定电压控制策略情况下发生单相接地故障仿真结果

仿真图 4-13 的控制系统为定电压的控制系统。故障发生后，控制系统将迅速由定熄弧角控制接管。图中 6s 时交流系统故障，逆变侧定熄弧角控制接管后触发超前角增大，而对于整流侧的低压限流环节将启动，增大触发角限制电流的进一步增大。换流器所消耗的无功功率也随输送功率的减少相应下降。故障清除后，逆变侧的控制系统，将依次从定电流至定熄弧角控制最终恢复至故障前的定电压控制状态。

## 4.6 本章小结

本章对分层接入方式的直流输电系统的控制系统进行了介绍，并建立了相应的仿真模型。由于分层接入方式下接入不同电网的换流器需要相对独立的控制，因此其控制系统较常规的系统有一定差异。在第三章对控制系统介绍的基础上，本章对分层接入方式下直流输电的控制系统进行了仿真建模。由于不同控制方式的控制系统中的控制逻辑环节配合过程不同，本章通过仿真对该问题进行了详细的分析。

在建立了分层接入方式下的直流模型后，本章又对交流系统故障后导致换相失败的仿真特性进行了一定的研究。研究发现，不同控制系统在故障后通常具有相同的调节趋势。

## 第5章 换相失败判别方法的研究

直流输电系统发生换相失败会导致电力系统的潮流发生较大变化，进而影响电网的安全稳定运行。本章重点对交流系统发生故障时判断换相失败的方法进行研究，得到了一种能够考虑交流故障时刻，直流控制系统，以及考虑交流系统发生不对称故障后判断直流系统是否发生换相失败的方法。

### 5.1 传统判断直流输电系统换相失败的方法

对于换相失败的判别方式常有以下几种，熄弧角判断法、最小电压降落法和最小换相电压时间面积法，有的学者还提出换相失败临界阻抗法<sup>[22]</sup>。由于熄弧角无法实际测量，并且固有极限熄弧角并非定值，因而通过量测量计算得出熄弧角判断换相失败容易导致误判<sup>[23]</sup>。最小电压降落法利用电压跌落程度进行判断，该方法在机电暂态仿真程序中广泛使用，但由于判断时的考虑的因素过于简单并且不能充分考虑交流侧发生非对称故障时的故障特征，造成判断结果不很准确。最小熄弧角判断法常用在电磁暂态的仿真软件中，该方法计算换流故障后各阀的熄弧角并与裕度值进行比较判断换相失败的发生情况，但该方法的假设较为理想对换流器阀侧三角形接线的换流器考虑情况有所欠缺。此外常用的方法还有直流电压过零法，但该方法需要在发生换相失败后才能进行判断，导致不能对换相失败进行有效的预测。

### 5.2 改进后的换相失败判断方法

换相失败通常发生在交流系统故障后很短时间内，故障切除后，通过直流控制的调整，直流逐渐恢复正常。故障期间，控制系统一般提前触发，尽可能的避免换相失败，但控制器输出的触发指令通常受到锁相环调节时间滞后性的影响，锁相环的同步初相位变化，使最终的触发指令值产生偏差。这种现象在非对称故障发生时较为明显。在分析故障初期的换相问题时由于时间较短，本文认为故障时触发时刻与稳态时相比基本保持不变。逆变侧换流器在交流系统发生非对称故障后的实际触发过程如图 5-1 所示。

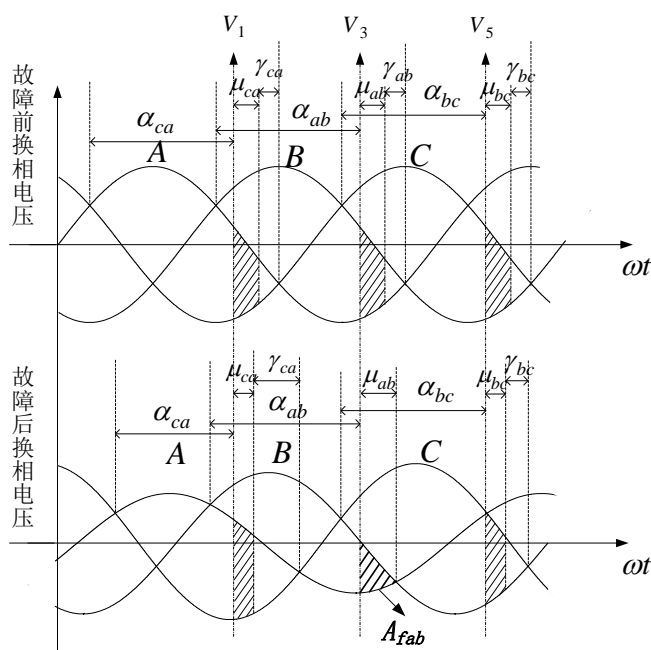


图 5-1 故障瞬间逆变侧换流器的实际触发过程

图中，阀 1、3、5 的触发脉冲对应为  $V_1$ 、 $V_3$ 、 $V_5$ ， $xy(xy=ca,ab,bc)$  相实际的关断角、换相角、触发延迟角为  $\gamma_{xy}$ 、 $\mu_{xy}$ 、 $\alpha_{xy}$ 。故障前各阀正常触发，各个换流阀的实际触发角相同，故障后由于电压的相位存在过零点漂移， $\alpha_{ca}$ 、 $\alpha_{ab}$ 、 $\alpha_{bc}$  不再相等<sup>[24]</sup>。从换相面积的角度分析，故障发生后的阀 5 向阀 1 换相时，图中  $|A_{fab}|$  的换相面积将小于换相过程所需的换相面积，阀 5 向阀 1 换相时将发生换相失败。通过以下步骤可以计算实际熄弧角的大小：

1) 计算故障发生前换流器的触发角  $\alpha_0$ ，换流器触发时刻  $t_0$ ，设故障时刻为  $t$ ，根据触发时刻  $t_0$ ，对各阀的触发次序进行排序。

2) 计算故障后换流母线各相电压的幅值相角，计算出不同连接组别对应的换相电压幅值相角。记为  $U_{Y_{xy}}$ 、 $U_{D_{xy}}$ 。并计算出相应的线电压过零点时刻  $t_{xy}$ 。

3) 计算实际故障后的触发角大小。若不计及控制器的调节作用，根据故障后线电压过零点时刻  $t_{xy}$  与故障前各个换流阀的触发时刻  $t_{xy|0}$  可以计算出触发角的大小  $t_x = t_{xy|0} - t_{xy}$ 。将  $t_x$  折合成电角度即实际的触发角值  $\alpha_{xy}'$ 。

故障后除离故障时刻较近的换流阀外，其他换流阀的换相过程需要计及控制器的调节作用。故障后控制系统通常采用定熄弧角的控制策略。CIGRE HVDC 模型中的定熄弧角控制为比例积分调节器，根据熄弧角的定值与一周波内测量得到的熄弧角最小值的偏差量决定触发角调节量大小。由于积分常数有一定滞后性，而研究的时间尺度极短因而仅考虑比例常数对其造成的影响，可采用式(5-1)计算。距离故障时刻最近的换流阀可不考虑控制系统的作用，熄弧角将之前计算的触发角值  $\alpha_{xy}'$  带入式(5-3)计算得到，其他阀中定熄弧角控制的调节量可由式(5-1)表示，其中  $\gamma_e$  为一

个周期之内计算熄弧角的最小值。计及熄弧角控制的调节作用后，实际的触发角  $\alpha_{xy} = \alpha_{xy}' - \Delta\beta$ 。

$$\Delta\beta = K_p \times (\gamma_{ref} - \gamma_e) \quad (5-1)$$

4) 通过式(5-2)，(5-3)可以得到故障后各换流阀的关断角与换相角，式中  $U_{xy}$  为  $xy$  线电压的有效值。

$$\mu_{xy} = \arccos\left(\cos\alpha_{xy} - \frac{\sqrt{2}I_d X_c}{U_{xy}}\right) - \alpha_{xy} \quad (5-2)$$

$$\gamma_{xy} = \pi - \alpha_{xy} - \mu_{xy} \quad (5-3)$$

5) 若故障发生的较为严重，可能出现如不等式(5-4)的情况：

$$\cos\alpha_{xy} - \frac{\sqrt{2}I_d X_c}{U_{xy}} < -1 \quad (5-4)$$

此时，式(5-2)无法求解，此时也应认为  $xy$  相间发生换相失败。

6) 通过该方法可以计算换流变阀侧星接侧与角接侧各阀的关断角值的大小，当其中任意关断角小于极限关断角  $\gamma_{min}$  时，即可以判定直流系统将发生换相失败。此外若满足不等式(5-4)，即可以判定直流发生换相失败。改进后的判断方法的判断流程如图所示。由于此种方法可以一定程度计及故障时刻的影响，因此可以计算出此种类型故障，同一短路点换相失败的发生概率。

$$\min(\gamma_{ca}, \gamma_{ab}, \gamma_{bc}) < \gamma_{min} \quad (5-5)$$

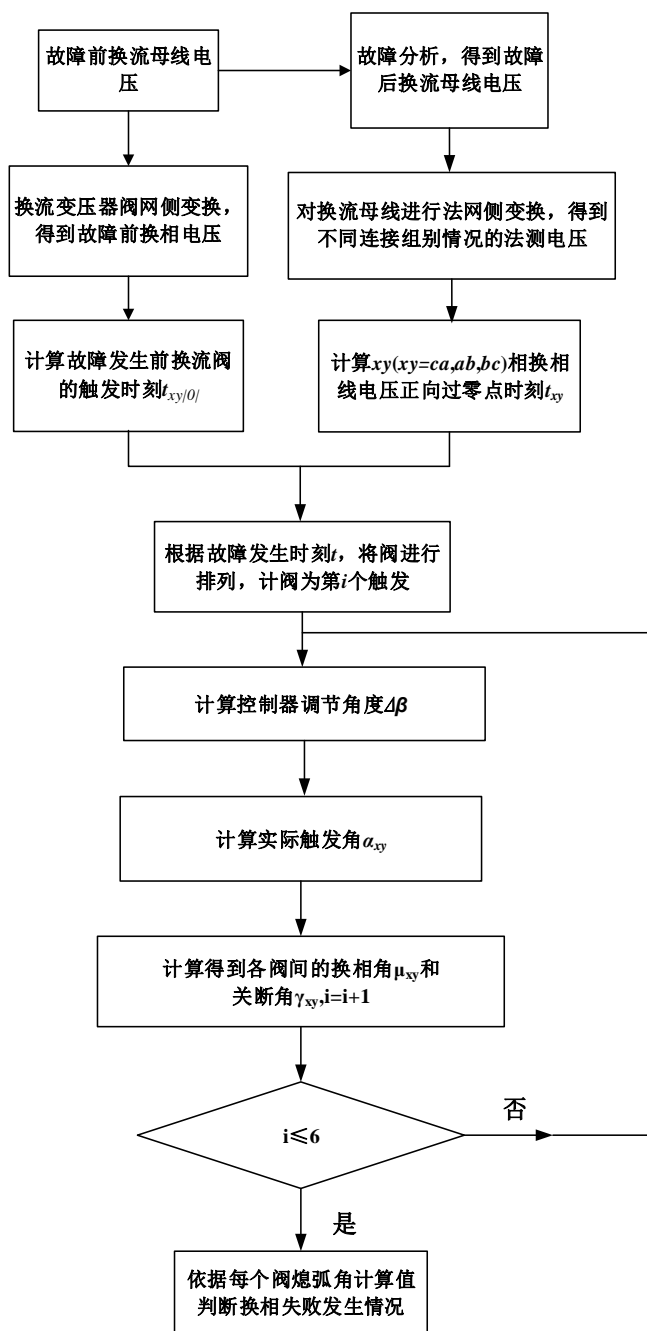


图 5-2 交流故障引发直流换相失败的判断流程

### 5.3 算例与验证

以 CIGRE HVDC 标准模型为研究对象。故障前该系统在额定状态下运行，其直流电流  $I_d=2(\text{kA})$ , 换流母线线电压  $U_l=230\text{kV}$ , 换流变压器变比  $k=1.0\text{p.u.}(230/209.23)$ , 初始运行越前前触发角  $\beta_0=39.0^\circ$ , 关断角  $\gamma_0=16.8^\circ$ 。

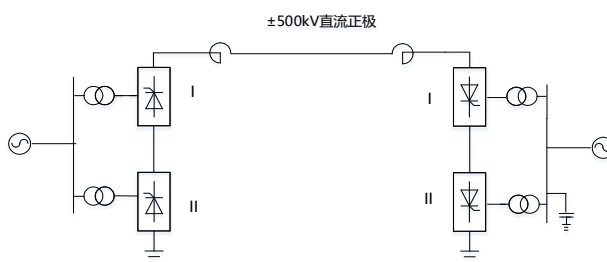


图 5-3 CIGRE HVDC 直流输电模型

以 CIGRE HVDC 的直流输电模型为算例对改进后换相失败的判断方法进行测  
试，针对交流系统换流母线经 110 Ω 电阻接地的情况，换相失败的判断结果如表 5-1  
所示。此种判断方式可以计算阀侧星接阀侧角接的换流阀的换相失败情况，并一定  
程度计及故障发生时刻对换相过程的影响。通过该方法估算的同一地点发生故障  
时换相失败的概率约为 50%。

表 5-1A 相经 110 欧姆过渡电阻故障时判别换相失败情况

故障时刻 (s)	实际换相失败情况	判断结果	YNd1 接线换相失败情况			YNY0 接线换相失败情况		
			$\gamma_{ca}$ (°)	$\gamma_{ab}$ (°)	$\gamma_{bc}$ (°)	$\gamma_{ca}$ (°)	$\gamma_{ab}$ (°)	$\gamma_{bc}$ (°)
2	是	否	13.5395	16.1042	13.9566	15.2931	12.7447	15.144
2.001	是	否	13.4708	12.1956	13.0486	12.0119	13.5039	12.7715
2.002	是	是	15.4999	0.2956	1.7332	2.0659	13.0098	10.4076
2.003	是	是	13.7183	0.0643	1.5286	1.8675	1.1792	11.1531
2.004	是	是	15.5516	15.4721	1.3203	7.7879	10.3868	18.5885
2.005	是	是	16.017	13.9224	7.2875	8.0755	12.2922	17.3993
2.006	否	否	16.9347	18.1461	14.7453	16.3144	15.1533	18.4763
2.007	否	否	15.5064	18.0002	13.5841	16.1625	13.0306	17.5536
2.008	是	是	14.4743	17.5928	13.0637	15.9248	9.97	16.7698
2.1	是	否	13.5417	16.0721	13.9894	15.2915	12.7842	15.1139

### 5.4 本章小结

本章对判断换相失败的方法进行了修改。主要考虑了非对称故障发生时，换流  
变压器连接组别，故障发生时刻，以及控制系统的调节作用带来的影响。该方法从  
阀的实际导通过程入手，可以体现上述几点因素造成的影响，从而为解释换相失败  
的成因提出了一些参考。

## 第6章 总结与展望

随着更多的直流线路接入交流系统,日益复杂的电网格局给系统的安全稳定带来了新的考验。本文主要针对影响直流输电换相失败的因素进行分析。并对直流输电的控制系统进行了介绍。主要完成了以下方面的工作。

1) 导致换流器发生换相失败的因素,交流系统发生不对称故障时,故障发生时刻,换流变压器采用的连接组别,直流输电的控制系统,故障的类型以及轻重程度均对换相失败影响很大。分析结果表明若接地电阻阻值越接近最大的临界阻抗阻值,则换流变压器阀侧采用三角形接法的换流器越容易先发生换相失败,进而导致另一侧换流器也发生换相失败。此外故障后直流输电的控制系统主要通过提前触发,增大换相裕度抵御换相失败。控制系统中参数若设置得当,则在一定程度上可以防止直流输电发生换相失败。

2) 对换相失败的判据进行了修改。分析表明不同侧的换流器在非对称故障下的换相失败情况具有一定差异,为充分体现故障时刻的影响以及换相失败发生随机性的特点。本文结合故障后换流阀的导通过程对换相失败的判据进行了修改,使其更加贴近实际换相过程。修改后判断换相失败的方法能一定程度的体现故障时刻与控制系统的影 响,并一定程度上解释了相同故障点换相失败发生随机性的原因。

3) 介绍不同技术路线的直流输电控制系统,根据两种技术路线的控制系统,本文对两种控制系统的实现过程,差异进行了详细的分析与介绍。基于 PSCAD/EMTDC 的仿真平台。本文在 CIGRE HVDC 模型的一次系统基础上,分别实现了两种控制系统下的直流输电系统。根据两种仿真模型,对换相失败发生的情况进行了详细的对比。在此基础上,还搭建了特高压分层接入不同电压等级电网的直流系统仿真模型,并对模型的控制响应特性进行了测试与分析。

此外,由于时间方面的原因,论文还有部分内容有待进一步的研究

1) 分层接入方式下导致直流输电系统换相失败的原因,分层接入方式作为一种新型的接入方式,导致此类拓扑结构换相失败因素的研究工作还未开展,因此具有一定的研究价值。

2) 对于多馈入直流输电系统发生继发性换相失败的研究,多馈入直流输电系统的直流间会相互影响,因此多馈入是否会对研究结论带来影响值得研究。

3) 由于研究非对称故障时变压器的连接组别对换相失败具有一定的影响,因此是否有必要在故障后对这一侧的换流器进行单独的控制也需要讨论。

## 参考文献

- [1] 郭龙, 刘崇茹, 贲飞龙, 等.  $\pm 1100\text{kV}$  直流系统分层接入方式下的功率协调控制[J]. 电力系统自动化, 2015(11): 24-30
- [2] 林凌雪, 张尧, 钟庆, 等. 多馈入直流输电系统中换相失败研究综述[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 40-46.
- [3] 艾飞, 李兴源, 李伟, 等. HVDC 换相失败判据及恢复策略的研究[J]. 四川电力技术, 2008, 31(4): 10-13.
- [4] Thio C V, Davies J B. Commutation failures in HVDC transmission systems [J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 1996, (2): 946-957.
- [5] Hansen A, Havemann H. Decreasing the Commutation Failure Frequency in HVDC Transmission System [J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2000, (3):1022.
- [6] Liu C, Bose A, Tian P. Modeling and Analysis of HVDC Converter by Three-Phase Dynamic Phasor [J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2014, 29(1): 3-12.
- [7] Wang Y J, Pierrat L. Probabilistic modelling of current harmonics produced by an AC/DC converter under voltage unbalance [J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 1993, 8(4): 2060-2066.
- [8] Hu L, Morrison R E. The use of modulation theory to calculate the harmonic distortion in HVDC systems operating on an unbalanced supply [J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 1997, (2): 973-980.
- [9] Li S, Haskew T, Xu L. Control of HVDC light system using conventional and direct current vector control approaches[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 2010, 25(12): 3106-3118.
- [10] Jovicic D, Pahalawaththa N, Zavahir M. Stability analysis of HVDC control loops[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1999, 146(2): 143-148.
- [11] Nayak O B, Gole A M, Chapman D G, et al. Control sensitivity indices for stability analysis of HVDC systems[J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 1995, 10(4): 2054-2060.
- [12] Hu L, Yacimini R. Harmonic transfer through converters and HVDC links[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on, 1992, (3): 514-525.
- [13] Ishiguro F, Matsumoto T, Nobayashi M, et al. HVDC rectifier control coordinated with generator station in radial operation[J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 1997, 12(2): 851-857.
- [14] 林凌雪, 张尧, 钟庆, 等. 基于小波能量统计法的 HVDC 换相失败故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 61-64.
- [15] 王智冬. 交流系统故障对特高压直流输电换相失败的影响[J]. 电力自动化设备,

- 2009 (5): 25-29.
- [16] 王学之, 周全, 国建宝. 南方电网直流换相失败机理及判别方法[J]. 南方电网技术, 2013, 7(6): 44-47.
- [17] 王海军, 黄义隆, 周全. 高压直流输电换相失败响应策略与预测控制技术路线分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 124-131.
- [18] 王超. 考虑换相失败的换流站开关函数模型[D]. 华北电力大学, 2012.
- [19] 王钢, 李志铿, 黄敏, 等. HVDC 输电系统换相失败的故障合闸角影响机理[J]. 电力系统自动化, 2010 (4): 49-54.
- [20] 夏成军, 梁国开, 涂亮, 等. HVDC 受端换流站动态无功功率恢复特性及控制措施仿真[J]. 南方电网技术, 2015(2015 年 08): 57-63.
- [21] 穆子龙, 李兴源, 金小明, 等. 云广特高压直流送端谐波不稳定问题研究[J]. 电网技术, 2008, 32(20): 8-14.
- [22] 李少华, 王秀丽, 张爱玲, 等. 并联换流器高压直流输电系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 21: 021.
- [23] 刘洋.  $\pm 800\text{kV}$  云广特高压直流控制系统功能[J]. 广东电力, 2012, 25(5): 53-57.
- [24] 贾卓. 提高 RTDS 平台上交直流系统仿真精度的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [25] 张尧, 陈文滨, 林凌雪, 等. 基于 RTDS 双 12 脉动换流器解 / 闭锁策略的仿真[J]. 高电压技术, 2009(6): 1260-1266.
- [26] 孙轶徽. 背靠背直流电站控制系统研究[D]. 湖南大学, 2008.
- [27] 陈琦. 高压直流输电系统的实时数字仿真研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.
- [28] 龙锦壮. 高压直流输电多送出协调控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2010.
- [29] 康建准. 灵宝背靠背直流输电工程两套控制系统的分析研究[D]. 华北电力大学(北京), 2005.
- [30] 苏黎. 高压直流输电对交流系统暂态稳定影响的研究[D]. 西南交通大学, 2008.
- [31] 李永猛, 李兴源, 肖俊, 等. 多馈入直流系统换相失败风险仿真分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(8): 1-5.
- [32] 徐敬友, 谭海燕, 孙海顺, 等. 考虑直流电流变化及交流故障发生时刻影响的 HVDC 换相失败分析方法[J]. 电网技术, 2015, 39(5): 1261-1267.
- [33] 罗隆福, 雷园园, 李勇, 等. 定熄弧角控制器对直流输电系统的影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(5): 97-103.
- [34] 刘志阳. 高压直流输电工程极控系统建模的研究[D]. 华北电力大学(北京), 2007.
- [35] 刘洋.  $\pm 800\text{kV}$  云广特高压直流控制系统功能[J]. 广东电力, 2012, 25(5): 53-57.
- [36] 康建准. 灵宝背靠背直流输电工程两套控制系统的分析研究[D]. 华北电力大学

- (北京), 2005.
- [37] Pilotto L A S, Roitman M, Alves J E R. Digital control of HVDC converters [J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 1989, 4(2): 704-711.
- [38] Wang D, Zhou H, Deng X. Switching Overvoltage Characteristics of 1100-kV UHVDC Converter Station [J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2015, 30(3): 1205-1212.
- [39] Zhang S, Peng Z, Liu P, et al. Design and dielectric characteristics of the 1100 kV UHVDC wall bushing in china [J]. Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, 2015, 22(1): 409-419.
- [40] Rostamkolai N, Wegner C A, Piwko R J, et al. Control design of Santo Tome back-to-back HVDC link [J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 1993, 8(3): 1250-1256.
- [41] Maharsi Y, Do V Q, Sood V K, et al. HVDC control system based on parallel digital signal processors [J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 1995, 10(2): 995-1002.
- [42] Wang J, Liang Z, Xuan X, et al. Study on power control function for double-circuit-on-the-same-tower hvdc transmission systems[C]//Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2014 IEEE PES Asia-Pacific. IEEE, 2014: 1-5.
- [43] Nguyen T T, Son H I, Kim H M. Estimating Stability of MTDC Systems with Different Control Strategy [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2015, 10(2): 443-451.
- [44] Zhang X, Chen C. Maximum available power of multi-infeed hvdc system analysed by sensitivity method [J]. Generation, Transmission & Distribution, IET, 2014, 8(3): 473-479.
- [45] Wang K, Yang S, Yao J. Multi-circuit HVDC system emergency DC power support with reactive control[C]//Power Systems Conference and Exposition (PSCE), 2011 IEEE/PES. IEEE, 2011: 1-5.
- [46] Yang W, Xu Z, Han Z. An emergency power modulation strategy for multi-infeed HVDC systems[C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES. IEEE, 2001, 1: 25-30.
- [47] Zhou X, Sun H, Zhao B, et al. Applying high-voltage direct current emergency control to suppress the peak value of ultra-high-voltage tie-line power oscillation [J]. Generation, Transmission & Distribution, IET, 2015, 9(16): 2485-2492.
- [48] Cao J, Du W, Wang H, et al. A novel emergency damping control to suppress power system inter-area oscillations [J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 2013, 28(3): 3165-3173.
- [49] Zhao R, Zhang Y, Li X, et al. The Research on the Emergency DC Power Support Strategies of Deyang-Baoji HVDC Project[C]//Power and Energy Engineering

- Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific. IEEE, 2011: 1-4.
- [50] Islam S R, Sutanto D, Muttaqi K M. Coordinated Decentralized Emergency Voltage and Reactive Power Control to Prevent Long-Term Voltage Instability in a Power System [J]. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 2015, 30(5): 2591-2603.
- [51] Nayak O B, Gole A M, Chapman D G, et al. Control Sensitivity Indices for stability analysis of HVDC systems [J]. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 1995, 10(4): 2054-2060.
- [52] Du Z, Zhang Y, Chen Z, et al. Integrated emergency frequency control method for interconnected AC/DC power systems using centre of inertia signals [J]. *Generation, Transmission & Distribution*, 2012, 6(6): 584-592.

## 攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果

学术论文:

- [1] 贡飞龙, 刘崇茹, 李越, 等. 含直流馈入的交流系统故障分析模型[J]. 电力系统自动化, 2015(22): 124-130.
- [2] 郭龙, 刘崇茹, 贡飞龙, 李越.  $\pm 1100\text{kV}$  直流系统分层接入方式下的功率协调控制[J]. 电力系统自动化, 2015(11): 24-30.
- [3] 贡飞龙, 刘崇茹, 田鹏飞, 李越. 非对称运行状态下换流器改进开关函数模型[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1301-1307.

## 攻读硕士学位期间参加的科研工作

- [1] 国网浙江省电力公司科技项目：特高压直流接入 750/1000kV 交流技术方案研究，2014.9-2015.12，参与人。
- [2] 国网山东省电力经济技术研究院科技项目：特高压交直流站一体化建设关键设计技术研究，参与人。

## 致 谢

时光匆匆，转眼三年的学习时光又过去了。在这段宝贵的时光里我得到的太多太多，需要感谢的也太多太多。首先需要特别感谢我的导师刘崇茹教授，在老师的引领下，我一步步迈进了直流输电领域的大门，从课题的选择，到文章的框架安排，再到论文的撰写，无不倾注了老师的辛勤与汗水。老师学识渊博，并且做事一丝不苟从不马虎，从每周的组会到平时的交流，老师每次都会给我们耐心的解答问题并提出指导意见，不但言传更会身教。生活中老师乐观谦，很多人都喜欢和老师交流，从任何一个角度刘老师都是一名优秀教师的典范，值得我们学习。

此外还要特别感谢和我一起学习工作的课题组成员，郭龙师兄、贡飞龙师兄、赵云灏师兄、王嘉钰、以及组里的师兄师姐师弟师妹们。在你们的不断帮助和鼓励下，我不断地成长与进步，在欢声笑语之间掌握了很多深刻的专业知识。此外还要感谢我的家人，他们给我提供了良好生活的学习条件，并且作为我精神上最坚强的后盾我十分感谢他们。另外还要感谢母校华北电力大学，这里给我们提供了理想的学习资源，并且给我们提供了丰富多彩的校园生活。

最后我还要感谢审阅本文的各位专家，你们不辞辛苦为本文提出了宝贵的意见和建议，令我受益匪浅。