

华北电力大学

学术硕士学位论文

基于状态空间法的高压直流输电系统解析模型 的深化研究

Deepening Research on Analytical Model of HVDC Transmission System Based on State Space Method

沈金乙

2021 年 6 月

国内图书分类号：TM74
国际图书分类号：621.3

学校代码：10079
密级：公开

学术硕士学位论文

基于状态空间法的高压直流输电系统解析模型的深化研究

硕士研究生：沈金乙

导师：刘崇茹教授

申请学位：工学硕士

学科：电气工程

专业：电气工程

所在学院：电气与电子工程学院

答辩日期：2021年6月

授予学位单位：华北电力大学

Classified Index: TM74

U.D.C: 621.3

Dissertation for the Academic Master's Degree

**Deepening Research on Analytical Model of HVDC
Transmission System Based on State Space Method**

Candidate:	Shen Jinyi
Supervisor:	Prof. Liu Chongru
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Subject:	Electrical Engineering
Speciality:	Electrical Engineering
School:	School of Electrical and Electronic Engineering
Date of Defence:	June, 2021
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

摘 要

高压直流 (HVDC) 输电系统具有输送容量大、传输距离远、损耗低等优点,易于在不同地区实现交流系统的互联,在我国电力系统现代化建设过程中的重要性日益显著。交直流混合电网的形成对电力系统的安全稳定运行,特别是发生故障时的暂态响应有显著的影响,直流系统的精准建模及快速求解对电力系统的稳定分析尤为重要。现有状态空间模型可以快速准确的反映高压直流输电系统的暂态特性,在此基础上,本文针对现有模型直流电流不精确、缓冲电路存在电流突变量等问题,提出了计及晶闸管缓冲电路的高压直流输电系统解析模型的深化研究。

本文首先建立了高压直流输电系统换流器及其缓冲电路、直流线路和控制系统的状态空间解析模型。将换流器不同运行工况用一组微分方程来表示,结合电力电子理论,重点分析了缓冲电路的动态响应以及换相过程中的电压、电流关系,将缓冲电流作为状态变量引入换流器的状态方程,利用变化的系数矩阵来表示不同工况下缓冲电流的初始值,解决了状态变量非连续性的问题。详细介绍了 HVDC 控制系统及锁相环的控制原理,根据控制逻辑框图建立其时域响应模型,为后文阐述算法打下基础。

本文进一步推导了状态空间模型的解析算法,采用隐式梯形法求解一次设备状态方程,通过电流关系联立得到一次设备的全系统方程。为了准确模拟逆变侧换流阀的动态响应,分别对换流器导通工况和换相工况的结束时间进行精确求解,有效提高了一次设备微分方程的计算精度。对于控制系统,采用后退欧拉法将状态方程化简求解为差分方程,进而实现了控制系统和一次设备仿真的数据交互,最后形成完整的算法流程图。

在建立状态空间模型的理论分析和计算的基础上,用 MATLAB 编程实现了本文提出的模型和算法,进行了稳态运行、设置对称和不对称故障测试的仿真计算,并与 PSCAD/EMTDC 中 CIGRE HVDC 标准算例的仿真结果进行对比。结果表明,本文模型在计及缓冲电路后有效提高了状态方程的计算精度,对晶闸管元件的描述更加贴近 PSCAD 晶闸管元件模型。由此验证了所提解析模型的准确性和有效性,可以为在高压直流输电系统中进行解析计算的建模研究提供参考。

关键词: 高压直流输电; 状态空间; 缓冲电路; 隐式梯形法; 电磁暂态仿真

Abstract

High voltage direct current (HVDC) transmission system has the advantages of large transmission capacity, long transmission distance and low loss. It is easy to realize the interconnection of AC systems in different regions, which is becoming more and more important in the process of power system modernization in China. The formation of AC-DC hybrid power grid has a significant influence on the stable and safe operation of China's power system, especially the transient response when a fault occurs. Accurate modeling and rapid solution of the DC system are particularly important for fast and accurate stability analysis. The existing state space model can quickly and accurately reflect the transient characteristics of HVDC transmission system. On this basis, aiming at the problems of the existing state space model, such as the imprecise DC current and the current sudden change in the snubber circuit, this paper proposes an in-depth study of the analytical model of HVDC system considering the thyristor snubber circuit.

In this paper, the state space analytical models of converter, snubber circuit, DC line and control system of HVDC system are established. The different operating conditions of the converter are expressed by a set of differential equations. Based on the theory of power electronics, the dynamic response of snubber circuit and the relationship between voltage and current in commutation process are analyzed. The snubber current is introduced into the state equation of the converter as a state variable, and the initial value of the snubber current under different working conditions is expressed by the variable coefficient matrix, which solves the problem of discontinuity of state variables. The control principle of HVDC control system and phase-locked loop is introduced in detail, and its time domain response model is established according to the control logic block diagram. The above analysis lays the foundation for the algorithm.

This paper further deduces the analytic algorithm of state space model. The state equation of primary equipment is solved by implicit trapezoidal method, and the whole system equation of primary equipment is obtained by current relation. In order to accurately simulate the dynamic response of the converter valve on the inverter side, the end time of the converter's conduction condition and commutation condition are solved respectively, which effectively improves the calculation accuracy of the differential equation of the primary equipment. For the control system, the backward Euler method is used to simplify the state equation into the difference equation, and then the data interaction between the control system and the primary equipment simulation is realized. Finally, a complete algorithm flow chart is formed.

Based on the theoretical analysis and calculation of state space establishment process, the model and algorithm proposed in this paper are programmed in MATLAB, and the simulation calculation of steady-state operation, symmetric fault and asymmetric fault is carried out. The simulation results are compared with the CIGRE HVDC standard example in PSCAD / EMTDC. The results show that the model have effectively improved the calculation accuracy of the state equation after considering the snubber circuit, and the description of the thyristor component is closer to the PSCAD thyristor component model. The accuracy and effectiveness of the proposed model and algorithm are verified, and can provide a reference for modeling research on analytical calculations in HVDC transmission systems.

Keywords: HVDC transmission system, state space, snubber circuit, implicit trapezoidal integration, electromagnetic transient simulation

目 录

摘 要	I
Abstract	II
第 1 章 绪 论	1
1.1 课题背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 电力系统仿真技术在 HVDC 系统中的应用	2
1.2.2 直流系统建模	3
1.2.3 状态空间理论	4
1.2.4 高压直流输电系统的状态空间模型	4
1.2.5 状态空间模型的现存问题	5
1.3 论文的主要研究内容	6
第 2 章 高压直流输电系统的状态空间解析模型	7
2.1 HVDC 系统结构	7
2.2 换流器模型	8
2.2.1 换流器工况类型	9
2.2.2 换流器状态空间模型解析计算	10
2.3 缓冲电路模型	13
2.3.1 缓冲电路建模过程分析	13
2.3.2 缓冲电路状态空间模型解析计算	16
2.4 直流线路模型	17
2.5 整流侧准稳态模型	18
2.6 控制系统模型	19
2.6.1 整流侧控制模型	19
2.6.2 低压限流环节	20
2.6.3 逆变侧控制模型	20
2.6.4 锁相环模型	22
2.7 本章小节	23
第 3 章 状态空间模型的解析算法	25
3.1 一次设备与控制系统仿真的数据交互	25
3.2 数值积分方法原理	25

3.2.1 隐式梯形法	25
3.2.2 后退欧拉法	26
3.3 一次设备的全系统状态方程计算	27
3.4 换流器的工况变换判断及时刻求解	28
3.4.1 导通工况结束时间求解	28
3.4.2 换相工况结束时间求解	29
3.4.3 熄弧角求解	30
3.5 算法流程图	30
3.6 本章小节	31
第 4 章 状态空间模型的算例仿真与结果分析	33
4.1 PSCAD/EMTDC 软件及 CIGRE HVDC 模型简介	33
4.2 缓冲电路对比仿真	34
4.3 状态空间模型的仿真与分析	35
4.3.1 稳态运行	36
4.3.2 对称故障	38
4.3.3 不对称故障	41
4.4 本章小节	44
第 5 章 结论与展望	46
5.1 结论	46
5.2 展望	47
参考文献	48
攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果	52
致 谢	53

第 1 章 绪 论

1.1 课题背景及意义

随着现代电力系统中电力需求与能量储备分布的不均匀性日益显著, 高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC)技术作为一种能够远距离传输大容量电能的有效方式, 被广泛应用于电力系统中^[1,2]。对比于交流输电系统, 直流系统具有以下几点优势^[3,4]: 第一, 若传输相同的容量, 直流输电工程中建设换流站的成本及运行维护费用要远低于交流输电工程中变电站的成本和运维费用; 第二, 交流输电中同步发电机之间的功角稳定性问题是不可避免的, 而直流输电中并不存在这些问题, 有助于提升系统的传输容量; 第三, HVDC 线路可以连接交流系统, 极大地降低短路容量, 提高电力系统的运行稳定性; 第四, HVDC 中的可控硅换流器不仅可以按照要求对有功功率进行快速有效的调节, 而且具有短时过载能力, 还可以使系统潮流进行反转, 能够实现确保系统稳定运行的能力^[5,6]。

由于能源和电力存在不可避免的大规模跨区域流动的特点^[7], 很多发达国家都将 HVDC 输电技术作为能长距离输送大容量电能的有效途径, 虽然我国 HVDC 输电技术始于 1980 年代后期, 但发展尤为迅速^[8]。我国电力储备分布的特点为北多南少, 西富东贫^[9], 用电负荷却主要集中分布在东南地区, 因此高压直流输电技术在我国远距离输电和异步联网中扮演着至关重要的角色^[10,11]。常用的机电暂态仿真软件(例如 BPA 和 PSASP), 研究对象通常是由小扰动产生的静态稳定问题, 无法精准描述换流阀元件的动态特性^[12]。为了获得高压直流输电系统完整的动态响应行为特性, 通常选用电磁暂态模型来表示直流系统^[13,14]。

HVDC 系统暂态响应过程一般是采用小仿真步长范围的数值方法进行积分计算, 在对其开关元器件动作计算时, 只能在固定的整数步长点或在步长之间应用插值法求得, 如何选择积分步长的大小会对仿真的速度和计算的精度产生显著影响^[15]。为了得到高压直流输电系统精确的时域响应特性, 同时兼顾各个换流阀的实际情况, 准确模拟换流器元件在工况切换过程中的动态特性, 积分步长通常应选择为微秒级, 从而会导致较长的运算时间并产生一定的截断误差, 在阀触发脉冲动作时刻还可能数值稳定性等问题^[16]。针对上述问题, 本文提出了一种基于状态空间理论的高压直流输电系统的解析解法。

由于电网换相换流器中晶闸管元件的半控性, LCC-HVDC 系统中在故障条

件下将发生难以预计的暂态行为,包括逆变器出现换相失败等问题^[17]。所以为了对 HVDC 系统的常见故障做出判断和模拟,需要对逆变侧换流器进行准确描述。另外,缓冲电路是晶闸管中不可忽略的一个重要元件^[18],其主要的功能是降低晶闸管元件的电压突变量 du/dt 和电流突变量 di/dt ,并减弱元件的开关损耗和内部过电压。为了提高换流阀模型动态响应的精确度,需要建立缓冲电路的状态空间模型。基于此,本文对基于状态空间法的高压直流输电系统解析模型进行了深化研究,对缓冲电路模型、解析算法以及故障运行测试进行了优化完善,对晶闸管元件的描述更加精准,有效提升了对换流阀动态行为的模拟精度。

1.2 国内外研究现状

近年来,高压直流输电实际应用工程发展的越来越迅速,HVDC 系统的建模仿真和特性分析成为国内外科研学者关注的重点。并且高压直流输电系统涉及的相关知识和领域较广,在特定的状态、特定的条件下研究的侧重点及研究方法也不尽相同,迄今为止,国内外相关领域已经进行了许多有价值的研究。

1.2.1 电力系统仿真技术在 HVDC 系统中的应用

针对不同的研究目的和研究重点,通常将电力系统仿真技术分为机电暂态和电磁暂态^[19,20]。机电暂态主要研究的是由小扰动产生的静态稳定和由大干扰产生的暂态稳定这两种仿真情况,而电磁暂态仿真针对的是电力系统从微秒到秒时间范围内的暂态过程,通常采用数值积分的方法来描述系统中动态元件的非线性数学模型,同时还要关注整个网络的暂态响应^[21,22]。所以电磁暂态仿真程序的仿真规模十分有限,通常会对非重点关注的部分进行适当的简化,以节省计算的时间和占用的内存。

由于实际使用的高压直流输电系统通常具有电压较高、成本较大、设备数量众多等特点,以实际系统作为直接测试的对象非常危险,而且价格高昂。因此,科研人员通常选择在 PSCAD 仿真软件上对高压直流输电系统进行建模仿真及特性研究^[23]。它的仿真积分步长精确到数十微秒,可以十分准确的描述交直流混合电网的电磁暂态仿真特性。通过对熄弧角的计算,PSCAD 程序可以准确分析在交流电网故障测试下直流输电系统的动态行为,包括确定是否存在换相失败以及之后的恢复过程等。鉴于 PSCAD/EMTDC 程序的上述优点,它被广泛用于交直流系统的相互影响、直流系统的动态性能、直流输电控制策略及保护等方面的研究^[24]。

文献[25]针对国内外的混合仿真平台进行了全面的比较和总结,讨论了现

有混合仿真技术的发展历史和研究现状。结合智能电网的发展历程和“源网荷”交互模式，通过交互接口将电磁系统与信息系统的仿真平台相连接，形成电磁-信息的混合机电仿真系统，为混合仿真技术的发展提供了新的研究方向。

文献[26]从四个方面总结了国内外的高效数字电磁暂态仿真技术，包括基于新型计算机系统的仿真平台、基于并行计算结构的仿真算法、基于快速解决方案的建模技术以及基于混合计算模式的仿真技术。同时，论述了提高仿真性能的要素和重要技术，为未来的研发方向提供了思路。

文献[27]建立了电磁暂态仿真系统参数传递元件的动态迁移电路模型，分析了随机动态模型的基本特征和局限性，并提出基于随机动态方程的电力系统基本数值计算方法，为电力电子化系统的控制策略以及保护措施提供了更加严格的仿真环境。

1.2.2 直流系统建模

直流系统的暂态响应行为是一个多变量的复杂过程，对直流系统的精确建模是分析系统变量变化特征和观察系统暂态响应特性的前提。直流系统由一次设备和控制系统组成，一次设备包括直流电气元件以及它们之间的电路连接，控制系统是各种控制策略对一次设备的实施对象，根据控制框图完成控制逻辑信号的输出。基于不同的换流器仿真方法，HVDC 模型可以分为准稳态模型、恒功率模型、物理阀模型和电磁暂态模型^[28]。

文献[29]基于常用的电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC，提出了一种针对直流系统电磁暂态模型的通用建模方法、控制系统静态和动态特性的验证分析以及控制参数的选择方法，以此确定高压直流输电系统建模的准确性，为精确分析交直流系统的相互作用奠定了基础。

文献[30]建立了由各种类型的换流器和多端直流输电线路组成的多端直流网络等效电路，提出了不同类型的换流器控制方式以及换流站之间的协调机制。通过建立直流输电系统机电暂态仿真的通用模型，来模拟任意类型换流器的机电暂态的仿真特性，并且可以正确反映系统在受到干扰后的响应特性。

文献[31]基于交直流混联电网中的直流电压扰动特性提出了一种直流系统建模的新方法。通过分析电磁暂态模型与机电暂态模型直流系统之间的差异，以及这两种模型在故障响应下的特点，提出了改善机电暂态模型故障响应的关键因素和思路，使机电暂态模型的直流系统更加准确、实用、透明。

1.2.3 状态空间理论

状态空间理论 (state space techniques) 是在自动控制理论的基础上, 一种通过描述系统状态变量的动态行为而对控制系统进行分析和调整的方法^[32-34]。由于状态方程为矩阵表示, 当输入变量、状态变量或系统的输出变量数量增多时, 系统描述关系的复杂度并不会随之增加。状态空间法还可以反映系统内部变量与外部变量之间的联系, 进而可以发现一些重要的系统特性, 尤其是可控性和可观察性^[35]。相关文献证明, 状态空间对变量的表述是比自动控制理论中的输入输出描述更为准确和完整的。

文献[36]提出了一种适用于状态空间的自助建模算法, 针对有源配电网网络的电磁暂态仿真。充分考虑了现有配电系统的组件特征与实际结构特性, 通过选择合适的状态变量, 可以确保模型的特性与规模满足分析的需求, 同时, 可以设置程序的自动执行, 为所有类型的电力系统状态仿真提供参考, 为状态空间理论的后续研究打下了坚实的基础。

文献[37]将 VSC-HVDC 系统划分成直流网络、交流系统和换流器三个部分, 提出了一种分块建模的计算方法, 分别建立了每个模块以及联系各模块环节的线性状态空间模型, 这使得高压直流输电系统线性化状态空间模型的建模过程变得更加方便。

文献[38]针对大规模新能源并网的电磁暂态仿真, 通过将分段技术与换流器的广义状态空间模型相结合, 对周期进行分段, 利用换流器相同工作特性的时间变化, 实现了分段时间内换流器电磁暂态的变尺度建模。该模型达到了换流器仿真效率与仿真精度的平衡, 可以适用于大规模新能源并网换流器的高效仿真, 并且有效提升了仿真精度。

1.2.4 高压直流输电系统的状态空间模型

为了解决电力电子设备仿真精度与系统规模之间的问题, 将状态空间理论引入到电力系统的数字仿真中^[39]。该理论在时域中建模, 根据系统的内部描述关系建立微分方程, 其状态空间模型能够充分表达高压直流输电系统的内部特性。在建模过程中, 状态空间模型将多元时间序列转换为相量时间序列, 并将电力电子设备以相量模型表示^[40]。这种从变量到相量的转换对建立具有多个输入和输出变量的模型有很大帮助, 为电力电子设备 (如换流器) 的建模以及交直流系统的交互仿真提供了新的研究方向^[41,42]。目前, 国内外相关方向的研究人员已经取得了有关高压直流输电系统状态空间模型一定的研究进展。

文献[43]详细介绍了 HVDC 系统小信号线性连续状态空间模型的建立过程,

通过将系统表示为若干互联子系统的集合来形成状态模型，这种方法结构化且灵活，可以直接应用于包括柔性交流输电系统在内的其他系统。

文献[44]建立了一个直流电压和直流电流作为输入变量的 LCC-HVDC 系统状态空间模型，并对不同的直流线路电感和换流器控制系统的增益参数进行了调试与分析，该状态空间模型可用于 LCC-HVDC 系统动态特性的时间效率分析，并以此提出一种可以增加电力系统短期操作裕度、加快系统的暂态响应、有效提升电网实时频率调节的控制策略。

文献[45]提出了一种基于“质量阻尼弹簧”概念的 LCC-HVDC 系统线性化建模方法，便于对系统进行定性和定量的测量，适用于大型电力系统的稳定性分析研究。该模型考虑了直流线路、换流器和控制系统的电气特性，反映了 LCC-HVDC 系统在低频范围内的动态行为，并且可以帮助研究人员直观的理解和解释模态分析或频域分析等经典线性分析工具的仿真结果。

文献[46]基于状态空间理论对 LCC-HVDC 系统建立了全系统的数学模型，分别整理了整流侧与逆变侧换流器在正常运行和换相失败条件下的电路拓扑关系，用一组状态方程来表示各个工况下的换流器数学模型。通过一组辅助变量，将高压直流输电系统的主设备状态空间模型从一组非齐次的微分方程化简整理为齐次线性微分方程组，从而更易求得其解的解析表达式。

文献[47]为高压直流输电系统的暂态响应提供了一种新的解析算法，为了避免数值积分方法存在的截断误差和数值稳定性等问题，采用解析方法对主设备的暂态过程进行计算，同时采取变步长积分的方式分析控制系统的动态响应，从而使其计算过程不再受限于积分步长的大小，优于当前广泛使用的电磁暂态仿真软件。

文献[48]为了重点描述逆变侧交流母线上发生短路故障时 HVDC 系统的暂态特性，利用准稳态模型对系统的整流侧进行等值，建立了 HVDC 系统电磁暂态的简化模型，在保证逆变侧暂态行为模拟精度不变的同时，有效提升了计算的速度和效率。

1.2.5 状态空间模型的现存问题

综上所述，目前国内外研究人员对状态空间模型的建立过程和分析计算有了一定的研究基础，但仍有一些可以改进的地方。状态空间法建立直流系统模型依然存在以下问题：1) 晶闸管的缓冲电路是一个不可忽略的重要器件^[49,50]，未考虑缓冲电路会使晶闸管关断时直流电流仿真结果存在较大误差；2) 阀电压在阀关断期间发生多次突变，导致了缓冲电流的多次突变峰值，进而每个工况对应的系数矩阵也必须随之改变；3) 考虑缓冲电路后，方程的状态变量不再连

续，每个工况需更新初始值，因此需要精确计算工况切换时间；4) 阀关断期间缓冲电路仍存在少量缓冲电流，影响了换相电流的值，导致工况的切换时间不够准确。

1.3 论文的主要研究内容

本文在南方电网公司科技项目“基于先进控制系统的高压直流故障响应建模研究”的项目资助下，在高压直流系统的故障量解析计算方面，针对含电力电子元件的 HVDC 系统的状态空间模型、一次设备和控制系统的解析算法以及直流输电系统的电磁暂态仿真验证开展研究。论文的主要研究内容如下：

(1) 建立了 HVDC 系统一次设备和控制系统的状态空间解析模型。将换流器一次系统的 24 个运行工况用一组微分方程来表示，分析缓冲电路的动态响应，将缓冲电流作为状态变量引入状态方程，通过变化的系数矩阵表示不同工况下状态变量的初始值。完整建立一次设备中直流线路、换流器及其缓冲电路的状态空间模型。同时，根据控制逻辑框图，建立换流器控制系统时域响应模型，分别得到整流侧、逆变侧及低压限流环节的状态空间方程。

(2) 利用隐式梯形法，将直流线路、换流器和缓冲电路的状态方程化简整理为离散方程，通过电流关系联立得到一次设备的全系统方程。分别对换流器的导通工况和换相工况的结束时间进行精确求解，保证仿真过程中晶闸管的正确开闭和换相。同时，通过后退欧拉法，对控制系统的状态方程进行化简求解，实现控制系统与一次设备仿真的数据交互。

(3) 在 MATLAB 中编程实现本文模型和算法，采用标准算例计算不同运行条件下的暂态过程。与 PSCAD 仿真平台中的 CIGRE HVDC 算例的仿真结果进行对比，并在逆变侧设置对称和不对称故障，以证明本文所提模型和算法的可行性与准确性。

(4) 总结全文所做的工作和主要成果，并展望 HVDC 系统状态空间模型和算法的后续研究工作。

第 2 章 高压直流输电系统的状态空间解析模型

本章基于状态空间法，对一次设备中换流器、缓冲电路、直流线路分别建模，将换流器的 24 个运行工况用一组微分方程来表示，研究缓冲电路换相过程中的电流、电压关系，将缓冲电流作为状态变量建立状态方程。由于本文主要关注逆变侧三相交流母线发生短路故障时直流系统的动态响应特性，因此采用准稳态模型对整流侧部分进行等值化简。同时，根据控制逻辑框图，建立控制系统时域响应模型，分别得到整流侧、逆变侧及低压限流环节的状态空间方程。

2.1 HVDC 系统结构

完整 HVDC 状态空间模型包含整流器和逆变器、直流输电线路以及控制系统三部分，双端 12 脉动 HVDC 系统一次设备结构如图 2-1。其中，整流侧与逆变侧分别有两个换流器、两个换流变压器和一个平波电抗器，二者是通过一个等效的 T 型直流线路相连接^[51]。在直流系统运行过程中，直流线路、换流变压器和平波电抗器的电路拓扑结构保持不变，作为固定元件。然而换流器的各个换流阀将持续导通和关断，从而改变一次系统的电路结构，以下将换流阀元件的各个导通、关断状态定义为换流器的各种运行工况。虽然换流器的运行工况一直在变化，但在一个运行工况内的任意时刻，各换流器的连接关系保持不变，可以根据当时的具体电路结构写出状态方程，并与系统中固定元件的状态方程联立，形成一次系统的完整方程。

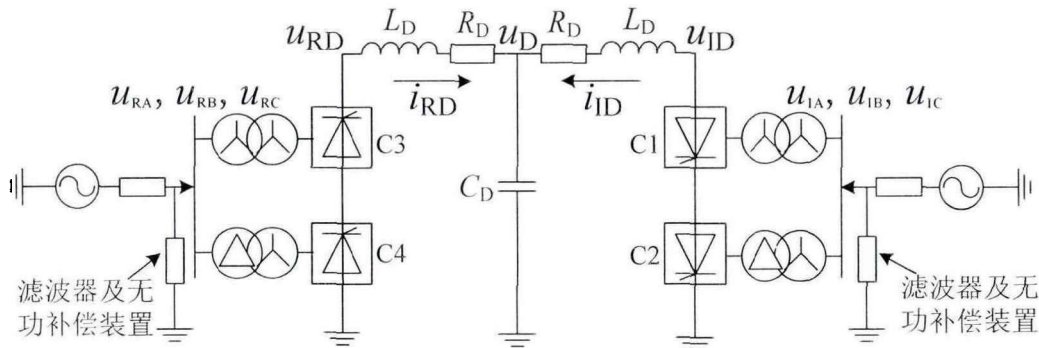


图 2-1 双端 HVDC 一次设备系统结构图

图中： L_D 、 C_D 、 R_D 分别为直流线路的电感电容及电阻； u_D 为直流线路中点电容电压， u_{RD} 、 u_{ID} 、 i_{RD} 、 i_{ID} 为直流线路整流侧和逆变侧的电压与电流，下标中 R 代表整流侧、 I 代表逆变侧； u_{RA} 、 u_{RB} 、 u_{RC} 、 u_{IA} 、 u_{IB} 、 u_{IC} 分别为整流侧与逆变侧的三相交流母线电压，直流线路用 T 型等效电路进行模拟。

由于本文主要研究逆变侧换流器的换相过程及其缓冲电路的动态行为，可适当降低整流侧的模拟精度，将整流器用准稳态模型简化为一个理想电压源和等值电阻的串联，如图 2-2，虚线框内为整流侧等值电路结构。

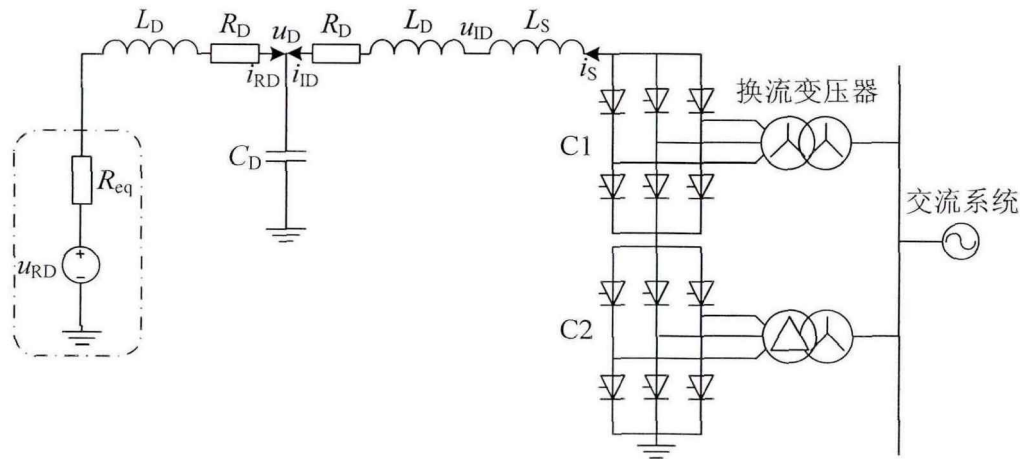


图 2-2 等值单端 HVDC 一次设备系统结构图

2.2 换流器模型

在高压直流（HVDC）输电系统中，通常以 12 脉波换流器作为一个常规换流单元^[52]，换流变压器阀侧绕组的接线方式分别为星形联结和三角形联结，来实现交流侧相差 30°的换相电压。

逆变侧换流器的接线示意图如图 2-3，由上桥臂 V1-V6 和下桥臂 V1'-V6' 的 12 个换流阀元件组成，序号代表 12 个换流阀按照固定的顺序依次导通和关断，构成一次完整的运行周期。导通需要同时满足两个条件：①阀的阳极电位大于阴极电位，即阀电压为正是导通的必要条件；②向门极施加触发脉冲信号，一旦阀成功触发，就会保持导通的状态^[53]。

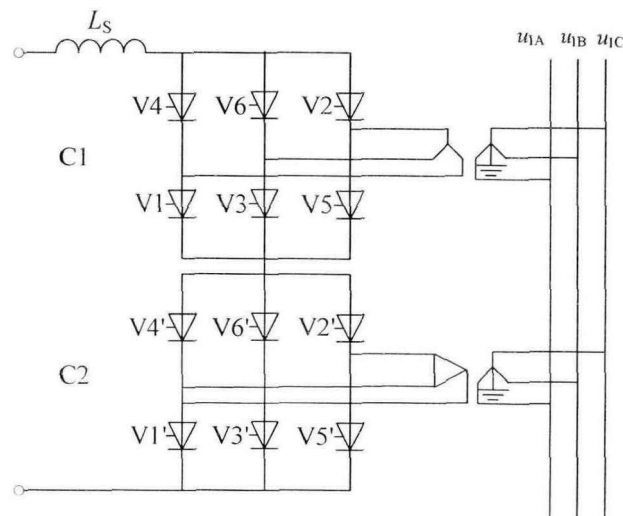


图 2-3 逆变侧 12 脉动换流器的接线示意图

2.2.1 换流器工况类型

通过网侧交流系统两相短路电流方向的变化来实现 12 脉动换流器的工况切换。通常设置换相角 μ 小于 30° ，以实现正常运行过程中有 4 个换流阀或者 5 个换流阀同时导通的“4-5”工况，即在非换相过程中只有 4 个阀处于导通状态（上、下桥臂各有 2 个阀导通），而在换相工况有 5 个换流阀一起导通（处于换相的桥臂有 3 个开通的阀，处于非换相的桥臂仍保持原有的 2 个阀开通）。本节按照“4-5”工况的工作原理对逆变器的运行过程进行举例分析。

V1-V6、V1'-V6'分别为换流器 C1、C2 的 12 个换流阀。假设图 2-3 中的逆变器目前的导通情况为：Y-Y 联结变压器对应的逆变器（简称为 C1）上桥设置为 A 相导通，下桥设置为 B 相向 C 相换相；Y- Δ 联结变压器对应的换流器（简称为 C2）上桥设置为 A 相导通，下桥设置为 B 相导通。即图 2-3 中换流阀 V3、V4、V5、V3'、V4'导通，并将该工况设为起始工况 S0。

接下来，随着三相交流电压的变化，阀 V3 两侧电压值由正变负，到达关断条件，使 C1 下桥变为只有 C 相导通，其他换流阀不变，此时变为 S1 工况。下一次触发脉冲将使得 V5'导通，即 C2 下桥臂变为 B 相向 C 相换相，得到 S2 工况，其他工况以此类推。因此，在逆变器正常运行过程中，逆变侧分别有 12 个导通工况和 12 个换相工况，见表 2-1。

表 2-1 稳态运行中的工况变化过程

工况编号	阀变化	换流器 C1	换流器 C2
S0	V5 导通	A B→C	A B
S1	V3 关断	A C	A B
S2	V5'导通	A C	A B→C
S3	V3'关断	A C	A C
S4	V6 导通	A→B C	A C
S5	V4 关断	B C	A C
S6	V6'导通	B C	A→B C
S7	V4'关断	B C	B C
S8	V1 导通	B C→A	B C
S9	V5 关断	B A	B C
S10	V1'导通	B A	B C→A
S11	V5'关断	B A	B A
S12	V2 导通	B→C A	B A
S13	V6 关断	C A	B A
S14	V2'导通	C A	B→C A
S15	V6'关断	C A	C A
S16	V3 导通	C A→B	C A
S17	V1 关断	C B	C A
S18	V3'导通	C B	C A→B
S19	V1'关断	C B	C B

S20	V4 导通	C→A B	C B
S21	V2 关断	A B	C B
S22	V4'导通	A B	C→A B
S23	V2'关断	A B	A B

2.2.2 换流器状态空间模型解析计算

本文在逆变侧换流器模型中添加了一个平波电抗器元件，并与网侧的换流变压器一并建模。将 Y-Y 和 Y-Δ联结的换流变压器设置为理想变压器，与其串联的等值电感需折算至换流器阀侧。

对于 12 脉动换流器，随着每个晶闸管依次导通和关断，将产生不同的运行工况、不同的电路连接关系以及不同的系数矩阵。以 S0 换相工况为例：可以将逆变器 C1 的工况简写为A|B→C；逆变器 C2 的工况简写为A|B。那么 S0 工况的等值电路如图 2-4。

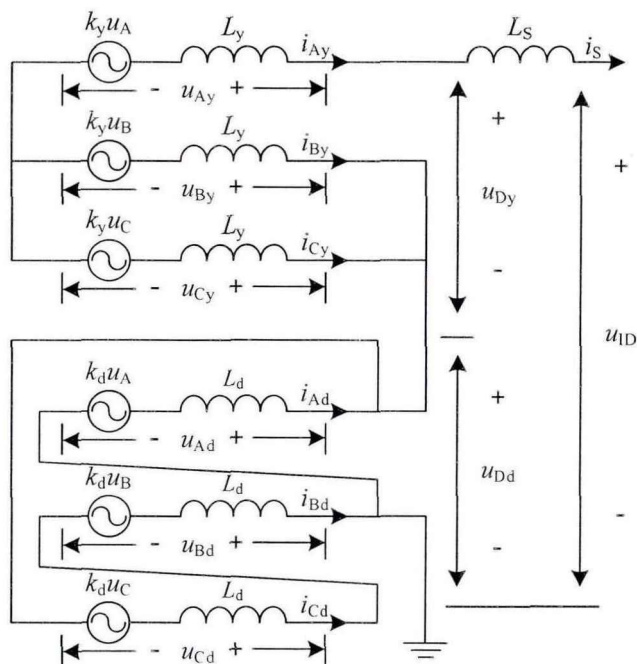


图 2-4 换流器运行工况 S0 的等值电路图

图中： k_y 、 k_d 、 L_y 、 L_d 分别为 Y-Y 和 Y-Δ联结的换流变压器变比及折算至阀侧的电感， L_s 为平波电抗器电感。 i_{Ay} 、 i_{By} 、 i_{Cy} 、 i_{Ad} 、 i_{Bd} 、 i_{Cd} 分别为各桥臂电感电流， i_s 为平波电感电流， u_{Ay} 、 u_{By} 、 u_{Cy} 、 u_{Ad} 、 u_{Bd} 、 u_{Cd} 、 u_{Dy} 、 u_{Dd} 为模型中各处电压差， u_A 、 u_B 、 u_C 为逆变侧交流系统三相母线电压， u_{ID} 为逆变侧的直流出口电压。

根据图 2-4 的等值电路图可得到换流器 S0 工况时的状态方程为^[46]：

$$\begin{cases} L_y p i_{Ay} = k_y u_A - u_{Ay} \\ L_y p i_{By} = k_y u_B - u_{By} \\ L_y p i_{Cy} = k_y u_C - u_{Cy} \\ L_d p i_{Ad} = k_d u_A - u_{Ad} \\ L_d p i_{Bd} = k_d u_B - u_{Bd} \\ L_d p i_{Cd} = k_d u_C - u_{Cd} \\ L_S p i_S = u_{Dy} + u_{Dd} - u_{ID} \end{cases} \quad (2-1)$$

式中：\$p=d/dt\$为微分算子。

由图 2-4 中该工况的等值电路，可分别列写电压和电流的关系式为：

$$\begin{cases} u_{By} - u_{Cy} = 0 \\ u_{Ay} - u_{By} - u_{Dy} = 0 \\ u_{Ad} - u_{Dd} = 0 \\ u_{Ad} + u_{Bd} + u_{Cd} = 0 \end{cases} \quad (2-2)$$

$$\begin{cases} i_{Ay} + i_{By} + i_{Cy} = 0 \\ i_S - i_{Ay} = 0 \\ i_{Bd} - i_{Cd} = 0 \\ i_S + i_{Cd} - i_{Ad} = 0 \end{cases} \quad (2-3)$$

对上式两侧求导，并使用电压变量将其替换，有：

$$\begin{cases} k_y(u_A + u_B + u_C) - (\bar{u}_{Ay} + \bar{u}_{By} + \bar{u}_{Cy}) = 0 \\ L_y(\bar{u}_{Dy} + \bar{u}_{Dd} - u_D) - L_s(k_y u_A - \bar{u}_{Ay}) = 0 \\ k_d u_B - \bar{u}_{Bd} - k_d u_C + \bar{u}_{Cd} = 0 \\ L_d(\bar{u}_{Dy} + \bar{u}_{Dd} - u_D) - L_s(k_d u_A - \bar{u}_{Ad} - k_d u_C + \bar{u}_{Cd}) = 0 \end{cases} \quad (2-4)$$

将式(2-1)~式(2-4)联立，则换流器模型的状态方程可以简写为：

$$\begin{bmatrix} T p x \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ u \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

式中：状态变量 \$x=[i_{Ay}, i_{By}, i_{Cy}, i_{Ad}, i_{Bd}, i_{Cd}, i_S]^T\$；代数变量 \$y=[u_{Ay}, u_{By}, u_{Cy}, u_{Ad}, u_{Bd}, u_{Cd}, u_{Dy}, u_{Dd}]^T\$；输入变量 \$u=[u_A, u_B, u_C, u_{ID}]^T\$；系数矩阵 \$T=\text{diag}(L_y, L_y, L_y, L_d, L_d, L_d, L_d, L_S)\$。

$$\text{其中, } A_0 = \begin{bmatrix} -1 & & & & & & & \\ & -1 & & & & & & \\ & & -1 & & & & & \\ \hline & & & -1 & & & & \\ & & & & -1 & & & \\ & & & & & -1 & & \\ \hline & & & & & & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad B_0 = \begin{bmatrix} k_y & & & & & & & \\ & k_y & & & & & & \\ & & k_y & & & & & \\ \hline & & & k_d & & & & \\ & & & & k_d & & & \\ & & & & & k_d & & \\ \hline & & & & & & & -1 \end{bmatrix},$$

$$C_0 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & & & & & \\ & & & 1 & 1 & 1 & & \\ \hline & & 1 & -1 & & & & \\ 1 & -1 & & & & & -1 & \\ 1 & & & & & & K_1 & K_1 \\ \hline & & & & -1 & 1 & & \\ & & & 1 & & & & -1 \\ & & & 1 & & -1 & K_2 & K_2 \end{bmatrix}, \quad D_0 = \begin{bmatrix} k_y & k_y & k_y & & & & & \\ & & & & & & & \\ \hline & & & & & & & \\ -k_y & & & & & & -K_1 & \\ \hline & & k_d & -k_d & & & & \\ -k_d & & & k_d & & & -K_2 & \end{bmatrix}.$$

A_0 、 B_0 、 C_0 、 D_0 为S0工况的系数矩阵，其中， $K_1=L_y/L_s$ ， $K_2=L_d/L_s$ 。

为方便表示，引入系数矩阵 M 、 N 来代替 C 、 D 。 M 、 N 分别为换流器模型中电压关系式(2-2)和电流关系式(2-3)的系数矩阵，因此，可以将状态方程改写成：

$$\begin{cases} Tpx = Ay + Bu \\ My = 0 \\ Nx = 0 \end{cases} \quad (2-6)$$

化简后得： $C = \begin{bmatrix} NT^{-1}A \\ M \end{bmatrix}$ ， $D = \begin{bmatrix} NT^{-1}B \\ 0 \end{bmatrix}$ 。

$$\text{其中, } M_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad N_0 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

M_0 、 N_0 为S0工况电压、电流关系式的系数矩阵。

换流器工况的切换对应等值电路的连接方式改变，用不同的系数矩阵来表示，而换流器模型的状态方程是固定不变的，即系数矩阵 A 、 B 不变， M 、 N 由工况类型决定。因此，根据换流器C1、C2每个换流阀的导通或关断状态，画出相应的等值电路图以及对应的 M 、 N 参数，可得到24个工况的状态方程和相应的系数矩阵。

2.3 缓冲电路模型

缓冲电路（Snubber Circuit）作为一种电力电子器件的保护电路，一般是电容与电阻串联后，并接在晶闸管或二极管的两侧^[54]。其主要工作原理是依据电容电压无法瞬时变化的特点来控制电力电子器件的电压突变率，同时根据电感电流无法瞬时变化的特点来控制器件的电流突变率。

当晶闸管处于导通状态时，阳极电流会逐渐扩大至较高的数值，若电流突变率 di/dt 过高，会导致阳极导电区域的电流密度很大，从而造成晶闸管元件的损坏。缓冲电路则是抑制阳极电流突变率和内部过电压增加的保护电路，同时避免晶闸管两端过大的电压突变率 du/dt 使其误触发。由此可见，缓冲电路是换流器模型中不可缺少的重要组成部分。

2.3.1 缓冲电路建模过程分析

换流阀是用晶闸管和阻尼回路等器件组装而成的换流器桥臂，含缓冲电路的6脉动换流阀的等值电路如图2-5。当晶闸管导通时，阀臂电阻 R_{on} 为零，阀电流为输入的交流电流，缓冲电路无影响。当晶闸管关断时，阀臂电阻 R_{off} 为 ∞ ，在电容充电和放电的过程中产生了缓冲电流，会流进交流电路和直流电路中，在交直流电路的电感上生成了感应电压，尤其对直流电路来说，感应电压会随着周期累加，影响了直流回路电感电流的准确度。为了解决以上问题，建立了缓冲电路的状态方程。

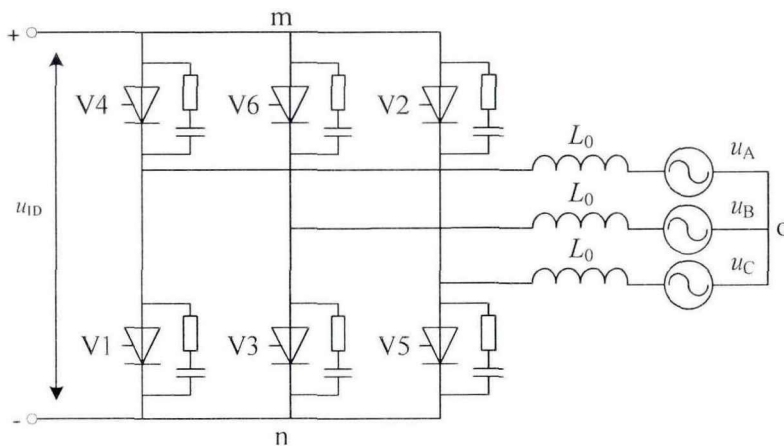


图 2-5 含缓冲电路的 6 脉动换流阀的等值电路图

图中： L_0 为每相的等值换相电抗。共阳极阀组 V2、V4、V6 阳极共点于 m 点；共阴极阀组 V1、V3、V5 阴极共点于 n 点。

对于单个晶闸管元件，其缓冲回路近似表示成一个 RC 回路，如图 2-6。根据电容的元件特性和基尔霍夫定律推导得到：

$$\frac{di_x}{dt} + \frac{1}{RC}i_x = \frac{1}{R} \frac{du_{valve}}{dt} \quad (2-7)$$

式中： R 、 C 分别为缓冲电路的电阻和电容； i_x 为缓冲电流； u_{valve} 为阀电压。

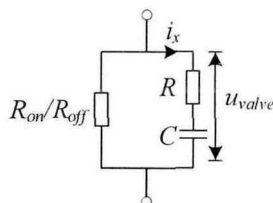


图 2-6 换流阀臂的等效电路

由于无法用阀电压简单表达缓冲电流，将该式加入到现有的状态方程中。因此需通过以下 5 个步骤完成缓冲电路的建模：1. 建立交、直流电流和缓冲电流之间的关系；2. 建立阀电压和直流电压的关系；3. 建立缓冲电流和阀电压的关系；4. 设置不同工况下缓冲电流状态变量的初始值；5. 化简为离散方程并得到新状态变量相关的系数矩阵。

在换流器状态方程式(2-6)的基础上，需要对电流关系式进行修正。不妨设缓冲电路模型的状态变量 $i_x = [i_{xy}, i_{xd}, i_{zy}, i_{zd}]^T$ ，阀电压的代数变量 $u_{valve} = [u_{xy}, u_{xd}, u_{zy}, u_{zd}]^T$ 。其中， i_{xy} 和 i_{xd} 分别为该工况影响 Y-Y 联结和 Y-Δ 联结换流器中直流电流的缓冲电流， i_{zy} 和 i_{zd} 分别为该工况影响 Y-Y 联结和 Y-Δ 联结换流器中交流电流的缓冲电流， u_{valve} 为对应缓冲电流两端的阀电压。与其他状态变量不同的是， i_x 在不同工况下，是不同缓冲电路电流的组合，而不是特定的某一个支路的电流，随着工况的切换，其值是非连续的。

非连续性主要表现在，缓冲电流中， i_{xy} 和 i_{xd} 是阀电流和直流电流的差，数值上等于该时刻未导通阀的缓冲电流之和； i_{zy} 和 i_{zd} 是未导通桥臂中剩余的缓冲电流，数值上等于该桥臂中两换流阀的缓冲电流之差。以下用一个工况的换相过程为例做解释说明。

以 S0 换相工况(A|B→C, A|B)为例：Y-Y 联结变压器对应的换流器上桥的 A 相导通，下桥的 B 相向 C 相换相；Y-Δ 联结变压器对应的换流器上桥的 A 相导通，下桥的 B 相导通。

将交、直流电流 x 和缓冲电流 i_x 的关系记为 $Nx = Ki_x$ ，其中 $i_x = [i_{xy}, i_{xd}, i_{zy}, i_{zd}]^T$ ， $x = [i_{Ay}, i_{By}, i_{Cy}, i_{Ad}, i_{Bd}, i_{Cd}, i_s]^T$ 。

针对 Y-Y 联结的 6 脉动换流器 C1，将阀电流 i_{Ay} 和直流电流 i_s 的差记为 i_{xy} ，此时阀 3、阀 4、阀 5 导通，那么 i_{xy} 是阀 1、阀 2、阀 6 的缓冲电流之和。针对 Y-Δ 联结的换流器 C2，阀 3、阀 4 导通，C 相桥臂上的 2 个晶闸管均关断，但此时桥臂中仍存在缓冲电流 i_{zd} ，其值为阀 2、阀 5 的缓冲电流之差。因此有电流关系式：

Y-Y 联结变压器(A|B→C): $i_{Ay}-i_S=i_{xy}=i_{sy6}+i_{sy1}+i_{sy2}$;

Y-Δ联结变压器(A|B): $i_{Ad}-i_{Cd}-i_S=i_{xd}=i_{sd6}+i_{sd1}+i_{sd2}$ 、 $i_{Bd}-i_{Cd}=i_{zd}=i_{sd2}-i_{sd5}$ 。

将阀电压 u_{valve} 和直流电压 y 的关系记为 $u_{valve}=Qy$, 其中 $u_{valve}=[u_{xy}, u_{xd}, u_{zy}, u_{zd}]^T$, $y=[u_{Ay}, u_{By}, u_{Cy}, u_{Ad}, u_{Bd}, u_{Cd}, u_{Dy}, u_{Dd}]^T$ 。

针对 Y-Y 联结的 6 脉动换流器 C1, 此时为换相工况, 阀 1、阀 2、阀 6 的阀电压相等, 其值为 Y-Y 联结变压器两端电压 u_{Dy} 。针对 Y-Δ联结的 6 脉动换流器 C2, 此时为导通工况, 每个晶闸管的阀电压为其两侧的电压差。因此有电压关系式:

Y-Y 联结变压器(A|B→C): $u_{xy}=3u_{Dy}$;

Y-Δ联结变压器(A|B): $u_{xd}=2u_{Dd}-u_{Cd}$ 、 $u_{zd}=u_{Cd}-u_{Bd}$ 。

将以上关系整理成系数矩阵, 得到 S0 工况的电流关系矩阵 K_0 和电压关系矩阵 Q_0 如下, 其他工况以此类推。

$$K_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad Q_0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

类似的, 可以得到全部 24 个工况的缓冲电流、阀电压与换流器的状态变量 x 、代数变量 y 的关系, 如表 2-2、表 2-3, 并整理为电流关系系数矩阵 K 和电压关系系数矩阵 Q 。

表 2-2 Y-Y 联结的缓冲电流和阀电压的电流、电压关系

对应工况	Y-Y 联结	i_{xy} 电流关系	u_{xy} 电压关系	i_{zy} 电流关系	u_{zy} 电压关系
S21, S22, S23	A B	$i_{Ay}-i_S=i_{xy}=$	$2u_{Dy}+u_{Ay}-u_{Cy}$	$i_{Cy}=i_{zy}=i_{sy5}-i_{sy2}$	$2u_{Cy}-u_{Ay}-u_{By}$
S0	A B→C	$i_{sy6}+i_{sy1}+i_{sy2}$	$3u_{Dy}$		
S1, S2, S3	A C	$-i_{Cy}-i_S=i_{xy}=$	$2u_{Dy}+u_{By}-u_{Cy}$	$-i_{By}=i_{zy}=i_{sy6}-i_{sy3}$	$u_{Ay}+u_{Cy}-2u_{By}$
S4	A→B C	$i_{sy1}+i_{sy2}+i_{sy3}$	$3u_{Dy}$		
S5, S6, S7	B C	$i_{By}-i_S=i_{xy}=$	$2u_{Dy}+u_{By}-u_{Ay}$	$i_{Ay}=i_{zy}=i_{sy1}-i_{sy4}$	$2u_{Ay}-u_{By}-u_{Cy}$
S8	B C→A	$i_{sy2}+i_{sy3}+i_{sy4}$	$3u_{Dy}$		
S9, S10, S11	B A	$-i_{Ay}-i_S=i_{xy}=$	$2u_{Dy}+u_{Cy}-u_{Ay}$	$-i_{Cy}=i_{zy}=i_{sy2}-i_{sy5}$	$u_{Ay}+u_{By}-2u_{Cy}$
S12	B→C A	$i_{sy3}+i_{sy4}+i_{sy5}$	$3u_{Dy}$		
S13, S14, S15	C A	$i_{Cy}-i_S=i_{xy}=$	$2u_{Dy}+u_{Cy}-u_{By}$	$i_{By}=i_{zy}=i_{sy3}-i_{sy6}$	$2u_{By}-u_{Ay}-u_{Cy}$
S16	C A→B	$i_{sy4}+i_{sy5}+i_{sy6}$	$3u_{Dy}$		
S17, S18, S19	C B	$-i_{By}-i_S=i_{xy}=$	$2u_{Dy}+u_{Ay}-u_{By}$	$-i_{Ay}=i_{zy}=i_{sy4}-i_{sy1}$	$u_{By}+u_{Cy}-2u_{Ay}$
S20	C→A B	$i_{sy5}+i_{sy6}+i_{sy1}$	$3u_{Dy}$		

表 2-3 Y-Δ联结的缓冲电流和阀电压的电流、电压关系

对应工况	Y-Δ联结	i_{xd} 电流关系	u_{xd} 电压关系	i_{zd} 电流关系	u_{zd} 电压关系
S0, S1, S23	A B	$i_{Ad}-i_{Cd}-i_S=i_{xd}=$	$2u_{Dd}-u_{Cd}$	$i_{Cd}-i_{Bd}=i_{zd}=i_{sd5}-i_{sd2}$	$u_{Cd}-u_{Bd}$
S2	A B→C	$i_{sd6}+i_{sd1}+i_{sd2}$	$3u_{Dd}$		
S3, S4, S5	A C	$i_{Bd}-i_{Cd}-i_S=i_{xd}=$	$2u_{Dd}+u_{Bd}$	$i_{Ad}-i_{Bd}=i_{zd}=i_{sd6}-i_{sd3}$	$u_{Ad}-u_{Bd}$
S6	A→B C	$i_{sd1}+i_{sd2}+i_{sd3}$	$3u_{Dd}$		
S7, S8, S9	B C	$i_{Bd}-i_{Ad}-i_S=i_{xd}=$	$2u_{Dd}-u_{Ad}$	$i_{Ad}-i_{Cd}=i_{zd}=i_{sd1}-i_{sd4}$	$u_{Ad}-u_{Cd}$
S10	B C→A	$i_{sd2}+i_{sd3}+i_{sd4}$	$3u_{Dd}$		
S11, S12, S13	B A	$i_{Cd}-i_{Ad}-i_S=i_{xd}=$	$2u_{Dd}+u_{Cd}$	$i_{Bd}-i_{Cd}=i_{zd}=i_{sd2}-i_{sd5}$	$u_{Bd}-u_{Cd}$
S14	B→C A	$i_{sd3}+i_{sd4}+i_{sd5}$	$3u_{Dd}$		
S15, S16, S17	C A	$i_{Cd}-i_{Bd}-i_S=i_{xd}=$	$2u_{Dd}-u_{Bd}$	$i_{Bd}-i_{Ad}=i_{zd}=i_{sd3}-i_{sd6}$	$u_{Bd}-u_{Ad}$
S18	C A→B	$i_{sd4}+i_{sd5}+i_{sd6}$	$3u_{Dd}$		
S19, S20, S21	C B	$i_{Ad}-i_{Bd}-i_S=i_{xd}=$	$2u_{Dd}+u_{Ad}$	$i_{Cd}-i_{Ad}=i_{zd}=i_{sd4}-i_{sd1}$	$u_{Cd}-u_{Ad}$
S22	C→A B	$i_{sd5}+i_{sd6}+i_{sd1}$	$3u_{Dd}$		

表中， $i_{sy1}, \dots, i_{sy6}, i_{sd1}, \dots, i_{sd6}$ 分别为 Y-Y 联结和 Y-Δ联结换流器中各阀的缓冲电流。

2.3.2 缓冲电路状态空间模型解析计算

由于无法用阀电压简单表达缓冲电流，需要将式(2-7)加入到现有的状态方程中，并引入缓冲电路模型中的电压关系系数矩阵 Q 和电流关系系数矩阵 K 。因此，缓冲电流和阀电压的关系可以统一描述为式(2-8)形式：

$$pi_x + \frac{1}{RC}i_x = \frac{Q}{R}py \tag{2-8}$$

阀电流、直流电流和缓冲电流的关系可以统一用式(2-9)表示：

$$Nx = Ki_x \tag{2-9}$$

将换流器模型的状态方程式(2-6)，与式(2-8)、式(2-9)联立得到包含缓冲电路的换流器模型状态空间方程。

采用隐式梯形法将状态方程差分化简为离散方程，将初始值的设置用系数矩阵表示，可得：

$$\begin{bmatrix} \frac{T}{\Delta t} & -\frac{A}{2} & 0 \\ N(k) & 0 & -K(k) \\ 0 & M(k) & 0 \\ 0 & -\frac{Q(k)}{R\Delta t} & \frac{P(k)}{\Delta t} + \frac{P(k)}{2RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ y(k) \\ i_x(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{T}{\Delta t} & \frac{A}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{Q(k-1)}{R\Delta t} & \frac{P(k-1)}{\Delta t} + \frac{P(k-1)}{2RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k-1) \\ y(k-1) \\ i_x(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{B}{2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} (u(k) + u(k-1)) \quad (2-10)$$

简写为：

$$Gx_c(k) = Ex_c(k-1) + F(u(k) + u(k-1)) \quad (2-11)$$

其中，状态变量为 $x_c = [i_{Ay}, i_{By}, i_{Cy}, i_{Ad}, i_{Bd}, i_{Cd}, i_s, u_{Ay}, u_{By}, u_{Cy}, u_{Ad}, u_{Bd}, u_{Cd}, u_{Dy}, u_{Dd}, i_{xy}, i_{xd}, i_{zy}, i_{zd}]^T$ ，系数矩阵 A 、 B 、 C 、 D 、 T 的计算方法详见 2.2.2 小节。

$P(k)$ 和 $Q(k)$ 为 $i_x(k)$ 和 $y(k)$ 当前工况的系数矩阵， $P(k-1)$ 和 $Q(k-1)$ 为前一步长所在工况的系数矩阵。当工况由换相转变为导通时，设置前一步长初始值如下：

- 1) 当换流器 C1 从换相工况变成导通工况、换流器 C2 为导通工况时， $i_{xy}=2/3i_{xy}$ ； $i_{zy}=1/3i_{xy}$ ； $u_{xy}=2u_{Dy}$ ； $u_{zy}=u_{Dy}$ 。
- 2) 当换流器 C1 导通、换流器 C2 换相工况转变为导通工况时， $i_{xd}=2/3i_{xd}$ ； $i_{zd}=1/3i_{xd}$ ； $u_{xd}=2u_{Dd}$ ； $u_{zd}=u_{Dd}$ 。
- 3) 若为换相工况， i_{xy} 、 i_{xd} 用前一工况系数， i_{zy} 、 i_{zd} 用当前工况系数。
- 4) 从第二个步长起，当前工况内的系数保持不变。

2.4 直流线路模型

利用准稳态模型等值得到整流侧的等值电阻 R_{eq} ，与直流线路模型串联，从而得到直流线路模型的状态方程。直流输电线路通常可以被分成若干段 T 型电路进行等效模拟，当采用 1 个 T 型等值电路时，图 2-1 中系统的状态方程可以描述为：

$$\begin{bmatrix} pi_{RD} \\ pu_D \\ pi_{ID} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_D + R_{eq}}{L_D} & -\frac{1}{L_D} & 0 \\ \frac{1}{C_D} & 0 & \frac{1}{C_D} \\ 0 & -\frac{1}{L_D} & -\frac{R_D}{L_D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{RD} \\ u_D \\ i_{ID} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_D} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u_{RD} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_D} \end{bmatrix} u_{ID} \quad (2-12)$$

简写为：

$$px_D = A_D x_D + b_{RD} u_{RD} + b_{ID} u_{ID} \quad (2-13)$$

式中， $x_D = [i_{RD}, u_D, i_{ID}]^T$ ， A_D 、 b_{RD} 、 b_{ID} 为相应的系数矩阵。

2.5 整流侧准稳态模型

本文采用准稳态模型对整流侧进行等值化简，将整流侧的数学模型等值为一个理想的电压源与等效换相电阻的串联。准稳态模型可描述为^[55]：

$$R_0 = \frac{3}{\pi} \omega L_y \quad (2-14)$$

$$R_{eq} = B_{rec} R_0 \quad (2-15)$$

$$U_{S0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} B_{rec} E_{rec} k_{ry} \quad (2-16)$$

$$U_s = U_{S0} \cos \alpha - I_{RD} R_{eq} \quad (2-17)$$

$$u_{RD} = U_{S0} \cos \alpha \quad (2-18)$$

式中， ω 为系统的角频率； R_0 为等效的换相电阻； L_y 为Y-Y联结变压器折算至阀侧的电感值； R_{eq} 为整流侧准稳态模型的等效电阻； B_{rec} 为整流侧串联桥个数； E_{rec} 为整流侧交流系统三相电压幅值； k_{ry} 为Y-Y换流变压器的变比； U_s 和 U_{S0} 是高压直流输电系统中计及和不计及换相角和延迟触发角时，整流侧输出的直流电压平均值； u_{RD} 为整流侧准稳态模型等效的理想电压源幅值； α 为换流器控制系统给出的延迟触发角。

根据准稳态模型等值得到的电压幅值 u_{RD} 表达式(2-18)， u_{RD} 只和控制系统给出的延迟触发角 α 和计及 α 和换相角 μ 时的整流侧直流电压的平均值 U_{S0} 有关。而通过 U_{S0} 的计算公式(2-16)可以看出， U_{S0} 的值与Y-Y联结换流变压器的变比 k_{ry} 、串联桥个数 B_{rec} 以及整流侧交流系统三相电压的幅值 E_{rec} 有关，当HVDC系统的参数给定时，显然 k_{ry} 和 B_{rec} 为常数。另外，本章提出的HVDC系统状态空间模型主要用于仿真逆变侧交流母线发生故障时直流输电系统的响应，而不考虑整流侧的故障响应计算，因此， E_{rec} 也视为常量。 U_{S0} 的计算公式(2-16)里 k_{ry} 、 B_{rec} 和 E_{rec} 都是常数，那么 U_{S0} 同样也是一个恒定的常量。

因此, 准稳态模型的等效电压值 u_{RD} 只受换流器控制系统给出延迟触发角 α 的影响, 而控制系统的输出是由一次设备动态行为决定的。也就是说, u_{RD} 只随着控制系统输出量的变化而变化, 在每个积分步长的时间范围内是保持不变的, 因此有:

$$pu_{RD} = 0 \quad (2-19)$$

2.6 控制系统模型

控制系统的数学模型是采用 PSCAD 的 CIGRE HVDC 模型中的控制逻辑, 极控制层由以下三部分组成: 整流侧设置为计及触发角的定电流控制; 逆变侧设置为定电流与定熄弧角控制相互配合, 利用电流偏差控制器(CEC)将这两种控制方式进行平稳切换; 同时, 逆变侧控制系统配备了低压限流环节(VDCOL)。系统两侧的控制系统的输出分别输出触发角至两侧的换流器, 即通过控制换流阀元件各个触发信号, 来调整换流器直流电压的值, 从而实现一次设备的运行控制。

2.6.1 整流侧控制模型

整流侧控制模型的逻辑框图如图 2-7, 测量值 i_{RD} 作为模型的输入量, 先通过测量环节并与整定值 I_{ord} 进行比较, 然后经过一系列的 PI 环节以及限幅环节比较后得到 β_{rec} , 最后通过关系式 $\beta_{rec} = \pi - \alpha$, 输出延迟触发角 α 。

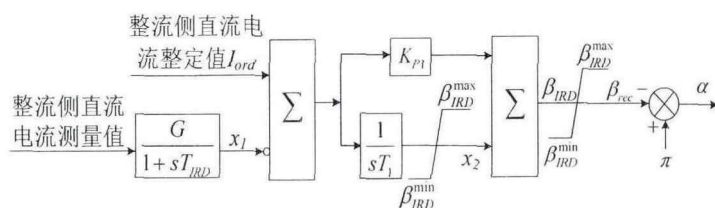


图 2-7 整流侧控制模型的逻辑框图

图中, x_1 、 x_2 为整流侧控制系统的状态变量; T_{IRD} 、 T_I 、 K_{PI} 为控制参数; $\beta_{IRD}^{\max}$ 、 $\beta_{IRD}^{\min}$ 为限幅参数; β_{IRD} 、 β_{rec} 为中间变量。由此列写整流侧控制系统的状态方程:

$$\begin{cases} T_{IRD} p x_1 = G i_{RD} - x_1 \\ T_I p x_2 = I_{ord} - x_1 \\ x_2 = \text{limited} \{ \beta_{IRD}^{\max}, x_2, \beta_{IRD}^{\min} \} \\ \beta_{IRD} = K_{PI} (I_{ord} - x_1) + x_2 \\ \beta_{rec} = \text{limited} \{ \beta_{IRD}^{\max}, \beta_{IRD}, \beta_{IRD}^{\min} \} \\ \alpha = \pi - \beta_{rec} \end{cases} \quad (2-20)$$

其中，控制器的输出存在上下限，用限幅环节 limited 表示，下同，有：

$$\text{limited}\{\beta_{IRD}^{\max}, \beta_{IRD}, \beta_{IRD}^{\min}\} = \begin{cases} \text{当 } \beta_{IRD}^{\min} < \beta_{IRD} < \beta_{IRD}^{\max} \text{ 时, } \beta_{rec} = \beta_{IRD} \\ \text{当 } \beta_{IRD} \leq \beta_{IRD}^{\min} \text{ 时, } \beta_{rec} = \beta_{IRD}^{\min} \\ \text{当 } \beta_{IRD} \geq \beta_{IRD}^{\max} \text{ 时, } \beta_{rec} = \beta_{IRD}^{\max} \end{cases} \quad (2-21)$$

2.6.2 低压限流环节

控制系统的 I_{ord} 是由低压限流环节输出的，VDCOL 的主要作用是当直流电压降低到特定数值时对直流电流的指令加以控制，其控制框图如图 2-8。其输入为逆变侧电压测量值 u_{ID} ，经过分段函数进行限制，并和前一给定的整定量 I_z 进行对比，得到低压限流环节的输出量 I_{ord} 。

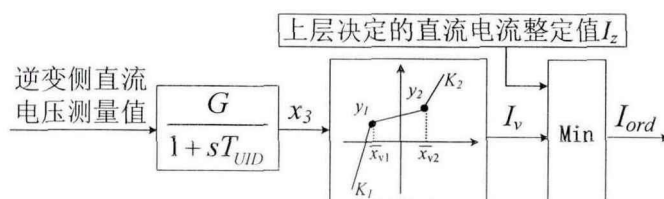


图 2-8 VDCOL 控制模型的逻辑框图

图中， x_3 为低压限流环节的状态变量； T_{UID} 为控制参数； K_1 、 K_2 、 y_1 、 y_2 、 $\bar{x}_{v1}$ 、 $\bar{x}_{v2}$ 为分段函数参数； I_v 为中间变量。由此列写低压限流环节（VDCOL）的微分方程组：

$$\begin{cases} T_{UID} p x_{31} = G u_{ID} - x_{31} \\ x_3 = x_{31} + 0.01 * x_4 \\ I_v = \begin{cases} K_1 (x_3 - \bar{x}_{v1}) + y_1, & x_3 \leq \bar{x}_{v1} \\ K_2 (x_3 - \bar{x}_{v1}) + y_1, & \bar{x}_{v1} \leq x_3 \leq \bar{x}_{v2} \\ K_2 (x_3 - \bar{x}_{v2}) + y_2, & x_3 \geq \bar{x}_{v2} \end{cases} \\ I_{ord} = \min\{I_v, I_z\} \end{cases} \quad (2-22)$$

2.6.3 逆变侧控制模型

逆变侧控制模型的逻辑框图如图 2-9。与整流侧不同的是，逆变侧定电流控制的电流整定值需要降低一定的电流补偿裕度 ΔI ，测量值 i_{ID} 作为定电流控制的输入。而定熄弧角控制的输入为熄弧角测量值 γ 在最近一个仿真周期内的最小值。同样经过一系列的测量环节、PI 环节和限幅环节比较后，输出逆变侧超前触发角 β 。

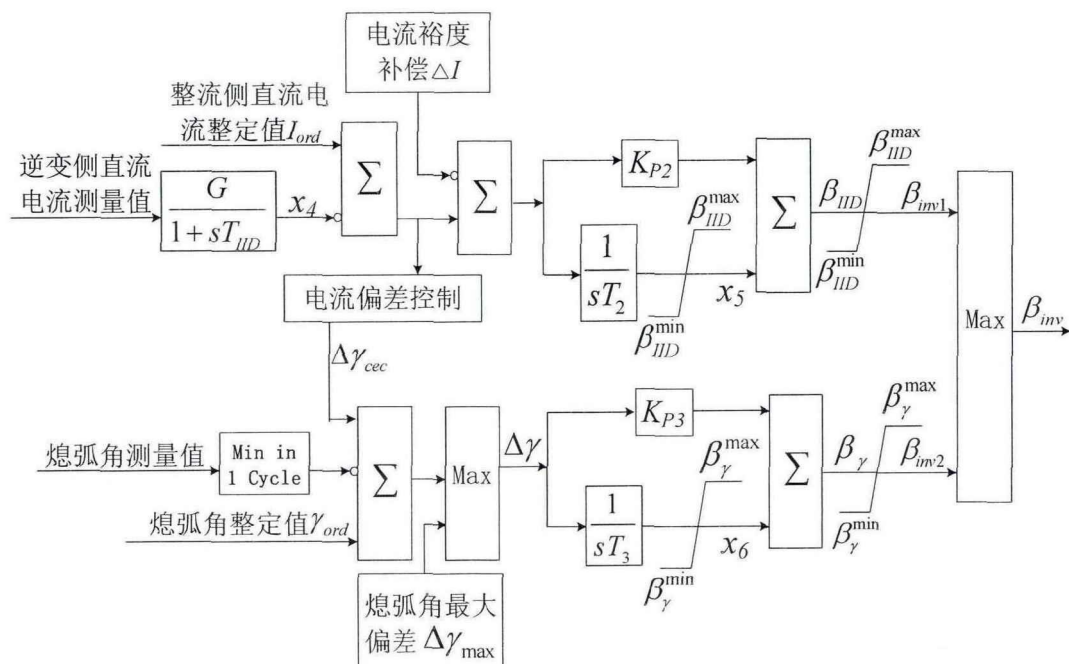


图 2-9 逆变侧控制模型的逻辑框图

图中, x_4 、 x_5 、 x_6 为逆变侧控制系统的状态变量; γ_{ORD} 为熄弧角整定值; I_{ORD} 为低压限流环节输出的电流值; $\Delta \gamma_{max}$ 为熄弧角最大偏差量; $\Delta \gamma_{cec}$ 为CEC环节的输量; T_{IID} 、 T_2 、 T_3 、 K_{P2} 、 K_{P3} 为控制参数; β_{IID}^{max} 、 β_{IID}^{min} 、 β_{γ}^{max} 、 β_{γ}^{min} 为限幅参数, $\Delta \gamma$ 、 β_{IID} 、 β_{γ} 、 β_{inv1} 、 β_{inv2} 、 β_{inv} 为中间变量。由此列写逆变侧控制系统的状态方程:

$$\begin{cases}
 T_{IID} p x_4 = G i_{ID} - x_4 \\
 T_2 p x_5 = I_{ord} - x_4 - \Delta I \\
 T_3 p x_6 = \Delta \gamma \\
 x_5 = \text{limited} \{ \beta_{IID}^{max}, x_5, \beta_{IID}^{min} \} \\
 x_6 = \text{limited} \{ \beta_{\gamma}^{max}, x_6, \beta_{\gamma}^{min} \} \\
 \Delta \gamma = \max \{ \Delta \gamma_{max}, \gamma_{ord} + \Delta \gamma_{cec} - \gamma_{min} \} \\
 \beta_{IID} = K_{p2} (I_{ord} - x_4 - \Delta I) + x_5 \\
 \beta_{\gamma} = K_{p3} \Delta \gamma + x_6 \\
 \beta_{inv} = \max \{ \beta_{inv1}, \beta_{inv2} \}
 \end{cases} \quad (2-23)$$

其中, CEC 环节的控制逻辑和控制方程如下:

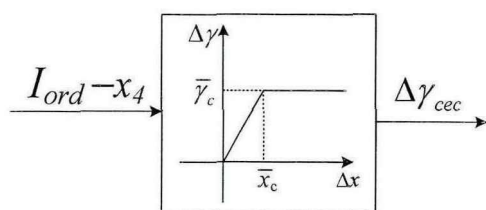


图 2-10 电流偏差环节的控制逻辑框图

$$\Delta\gamma_{cec} = \begin{cases} 0 & , I_{ord} - x_4 \leq 0 \\ \frac{\bar{\gamma}_c}{\bar{x}_c} (I_{ord} - x_4), & 0 < I_{ord} - x_4 \leq \bar{x}_c \\ \bar{\gamma}_c & , \bar{x}_c < I_{ord} - x_4 \end{cases} \quad (2-24)$$

式中， $\bar{\gamma}_c$ 、 $\bar{x}_c$ 为分段函数参数；VDCOL 环节的输出量 I_{ord} 和逆变侧控制系统状态变量 x_4 作为输入，CEC 环节的输出量 $\Delta\gamma_{cec}$ 传递至逆变侧控制系统，实现完整的反馈控制。

2.6.4 锁相环模型

锁相环（Phase-Locked Loop, PLL）是一种具有调节功能的控制电路^[56]，主要应用在闭环跟踪电路中。锁相环的结构包含以下三部分：鉴相器（Phase Detector, PD）、环路滤波器（Loop Filter, LF）、压控振荡器（Voltage Controlled Oscillator, VCO）。在实际应用中，一般是由换流站的交流系统三相电压作为锁相环模型的输入量，其输出为触发脉冲的同步信号，通常和该三相电压存在一定的比例关系。

目前，等时间间隔的触发方式在 HVDC 输电工程中的应用较为广泛^[57]。控制系统通过等间隔触发方式，以正在换相的同步电压相位过零点处作为基准时刻，在延迟触发角指令值 α 电角度后，再依次向各换流阀发出触发脉冲。在 GIGRE HVDC 标准测试系统中，12 脉动的晶闸管换流桥元件中的 PLO 可以完成这一功能。锁相环模型的内部逻辑结构如图 2-11。

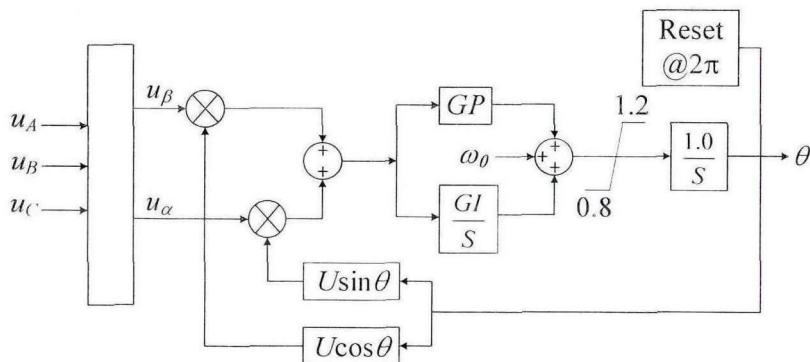


图 2-11 PLO（PLL 和 VCO 系统）内部结构图

PLL 的输入为交流母线的三相正序电压 u_A 、 u_B 、 u_C ，可描述为：

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = U_m \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin(\theta - 2\pi/3) \\ \sin(\theta + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2-25)$$

式中， U_m 为交流系统三相电压幅值， $\theta = \omega_0 t + \varphi_i$ ， ω_0 为交流系统基频角频率， φ_i 为初始相角。

通过一次 $\alpha\beta 0$ 变换将矩阵转换到直角坐标系下，得到 u_α 和 u_β ，有：

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m \sin \theta \\ U_m \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2-26)$$

再通过一次 dq 坐标变换，可以得到 u_d 和 u_q ，有：

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \hat{\theta} & \cos \hat{\theta} \\ \cos \hat{\theta} & -\sin \hat{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

式中， $\hat{\theta}$ 为锁相环模型的输出值，于是有：

$$u_d = u_\alpha \cos \hat{\theta} - u_\beta \sin \hat{\theta} = U_m \sin(\theta - \hat{\theta}) \quad (2-28)$$

$$u_q = u_\alpha \sin \hat{\theta} + u_\beta \cos \hat{\theta} = U_m \cos(\theta - \hat{\theta}) \quad (2-29)$$

通过以上一系列的 $\alpha\beta 0$ 变换和 PI 环节，对交流母线的三相正序电压进行了数据处理，处理后的值作为锁相环模型的输入，输出为一个斜坡信号，稳定后的相位角 θ 正是此时 A 相母线同步电压的相位。

通过锁相环模型求解出三相电压的相位，是为了在 MATLAB 软件中利用母线交流电压的幅值和相角，编程自产出完整的三相交流电压，使模型的输入仅为整流、逆变侧三相交流电压，同时有效避免了由于交流电压不稳定带来对控制参数的误差影响。

2.7 本章小节

本章基于状态空间理论、电力电子理论，结合 CIGRE HVDC 标准算例的换流阀及其控制参数建立了 HVDC 系统的完整状态空间解析模型，该模型包含换流器、缓冲电路、直流线路以及控制系统，并通过准稳态模型对整流侧做出等值化简。主要工作内容如下：

(1) 详细分析了换流阀的换相过程，对换流器的 24 个运行工况进行逐一

列举说明。换流器在各个导通和换相工况下将呈现不同的电路连接关系，将这些不同的拓扑结构用一组微分代数方程来表示。通过改变状态方程的系数矩阵，能够使处于不同运行工况下的逆变器模型描述成统一的微分方程组。

(2) 分析缓冲电路的动态响应，研究缓冲电路换相过程中的电流、电压关系。将缓冲电流和阀电压作为状态变量和代数变量引入状态方程，准确还原了12个换流阀的工作过程。并利用变化的系数矩阵来表示不同工况下缓冲电流的初始值，解决了状态变量非连续性的问题。

(3) 根据控制系统的逻辑框图，建立了控制系统时域响应模型，分别得到整流侧、逆变侧及低压限流环节的状态方程。同时，通过锁相环模型求得交流母线电压的相位，使状态空间模型的输入量仅为整流、逆变侧的交流母线电压，并且避免了由于交流电压不稳定带来对控制参数的误差影响。

本章所做的工作，可以为下一章状态空间模型的解析算法研究提供理论基础，也可以为其他研究高压直流输电系统建模的人员提供有效的参考。

第 3 章 状态空间模型的解析算法

本章首先介绍 HVDC 系统一次设备与控制系统仿真的数据交互以及相关的数值积分方法原理。其次，利用隐式梯形法，将直流线路、换流器和缓冲电路的状态方程化简整理为离散方程，通过电流关系联立得到一次设备的全系统方程；通过后退欧拉法，将控制系统的状态方程化简求解为差分方程。为了准确模拟逆变侧换流阀的动态响应，分别对换流器导通工况和换相工况的结束时间进行精确求解，保证仿真过程中晶闸管的正确开闭和换相。最终，将上述计算过程结合形成完整的算法流程。

3.1 一次设备与控制系统仿真的数据交互

上一章建立了 HVDC 系统的状态空间解析模型，该模型分为一次设备系统和控制系统两个部分，本章将分别建立对应模型的解析算法。在一次设备和控制系统之间，以及一次设备和与之相连的交流系统之间均有数据交换，其数据交互过程如图 3-1。

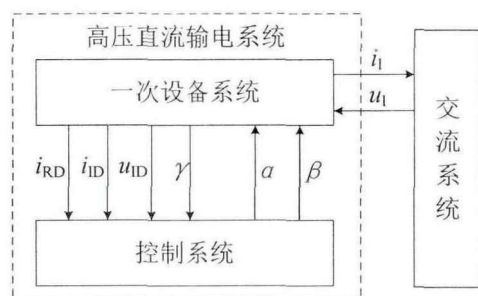


图 3-1 高压直流输电系统的数据交互图

从上图可以很直观的看出，在本文构建的状态空间模型中，一次设备仿真为控制系统提供了 4 个变量值，分别是整流侧直流电流 i_{RD} 、逆变侧直流电流 i_{ID} 、逆变侧直流电压 u_{ID} 以及换流器的熄弧角 γ ；控制系统给一次设备返回的变量有 2 个，分别是延迟触发角 α 和超前触发角 β ；交流系统为一次设备提供逆变侧的三相交流电压 u_1 ；一次设备给交流系统返回逆变侧的三相交流电流 i_1 。

3.2 数值积分方法原理

3.2.1 隐式梯形法

隐式梯形积分法是一种计算微分方程组的有效数值方法^[58]，由于其数值稳

定性好, 可以采用大步长, 具有二阶精度和三阶截断误差, 因此常用于电力系统暂态响应行为的仿真计算。本章采用该方法对一次设备的微分方程进行处理。

对于一阶常微分方程, 即 $dx/dt=f(x)$, 在 $t-\Delta t$ 到 t 的步长范围内, 应用隐式梯形积分公式为:

$$x(t)=x(t-\Delta t)+\frac{\Delta t}{2}\{f[x(t)]+f[x(t-\Delta t)]\} \quad (3-1)$$

以直流线路状态方程式(2-13)为例, 应用式(3-1)将其化简为离散方程有:

$$x_D(k)=H_1^{-1}H_2x_D(k-1)+H_1^{-1}\frac{b_{RD}}{2}(u_{RD}(k)+u_{RD}(k-1))+H_1^{-1}\frac{b_{ID}}{2}(u_{ID}(k)+u_{ID}(k-1)) \quad (3-2)$$

$$\text{其中, } H_1=\left(\frac{E_3}{\Delta t}-\frac{A}{2}\right), H_2=\left(\frac{E_3}{\Delta t}+\frac{A}{2}\right).$$

根据隐式梯形积分法, 可将一次设备的所有微分方程差分化, 对其形成的导纳矩阵求逆, 得到每个元件的离散方程, 迭代求解。

3.2.2 后退欧拉法

后退欧拉法是一种属于 L-稳定的一阶隐式积分方法, 其特点为具有有效抑制数值振荡的能力, 并能使误差衰减的更加快速、稳定。对于从 t 到 $t+\Delta t$ 步长范围内的常系数微分方程 $px=f(x,t)$, 其积分计算公式如下:

$$x(t+\Delta t)=x(t)+\Delta t \cdot f(x(t+\Delta t)) \quad (3-3)$$

在 2.6 节中对 HVDC 控制系统模型进行了详细介绍, 该模型包含了限幅环节和分段函数这种非线性环节, 与主设备的快速变化相比, 控制系统的变化过程要慢得多, 并且主设备系统的各个工况持续时间也不尽相同, 因此可以将控制系统与一次设备分开计算, 采用后退欧拉法进行化简整理。

应用后退欧拉法的计算公式(3-3), 对控制系统整流侧状态方程式(2-20)中前两式进行差分化简, 原方程为:

$$T_{IRD}px_1=Gi_{RD}-x_1 \quad (3-4)$$

$$T_1px_2=I_{ord}-x_1 \quad (3-5)$$

在 t 到 $t+\Delta t$ 的积分步长内, 得到其差分方程表达式:

$$x_1(t+\Delta t)=\frac{T_{IRD}}{T_{IRD}+\Delta t}x_1(t)+\frac{\Delta t}{T_{IRD}+\Delta t}Gi_{RD}(t+\Delta t) \quad (3-6)$$

$$x_2(t+\Delta t)=x_2(t)+\frac{\Delta t}{T_1}(I_{ord}(t+\Delta t)-x_1(t+\Delta t)) \quad (3-7)$$

式(3-6)中的 $i_{RD}(t+\Delta t)$ 是 $t+\Delta t$ 时刻的整流侧直流电流, 作为控制系统 t 时刻的输入变量, 可以从一次设备模型 $t+\Delta t$ 时刻的状态量 $x(t+\Delta t)$ 中获得。因此在求解 $t+\Delta t$ 时刻的控制系统输出时, 需要先求得 $t+\Delta t$ 时刻一次设备模型的状态量 $x(t+\Delta t)$ 。

由此, 整流侧控制系统利用 t 时刻的状态变量 x_1 、 x_2 与 $t+\Delta t$ 时刻的输入量 i_{RD} 、 I_{ord} , 积分步长为 Δt , 可以得到 $t+\Delta t$ 时刻的状态变量和输出变量 α 。同理可以得到控制系统的全部状态方程。

3.3 一次设备的全系统状态方程计算

根据电流关系:

$$i_s(k) = i_{ID}(k) \quad (3-8)$$

直流线路模型、缓冲回路模型中的电流关系满足:

$$i_s(k) = m_D x_D(k) = m_D H_1^{-1} H_2 x_D(k-1) + m_D H_1^{-1} \frac{b_{RD}}{2} U_{RD} + m_D H_1^{-1} \frac{b_{ID}}{2} U_{ID} \quad (3-9)$$

$$i_{ID}(k) = m_C x_C(k) = m_C G^{-1} E x_C(k-1) + m_C G^{-1} F_I U_I + m_C G^{-1} F_{ID} U_{ID} \quad (3-10)$$

式中, $U_{RD} = u_{RD}(k) + u_{RD}(k+1)$; $U_{ID} = u_{ID}(k) + u_{ID}(k+1)$; $U_I = u_I(k) + u_I(k+1)$; $m_D = e_3^T$; $m_C = e_7^T$, e_k 代表第 k 个位置为 1 其余位置为 0 的列向量, e 的维数和与之相乘的状态变量维数相同, k 的值为所提取的状态变量在该组变量中的位置。将式(3-8)~式(3-10)联立:

$$-n_D x_D(k-1) + n_C x_C(k-1) + n_{ID} U_{ID} + n_I U_I - n_{RD} U_{RD} = 0 \quad (3-11)$$

式中, $n_I = m_C G^{-1} F_I$, $n_{ID} = m_C G^{-1} F_{ID} - m_D H_1^{-1} \frac{b_{ID}}{2}$, $n_{RD} = m_D H_1^{-1} \frac{b_{RD}}{2}$, $n_D = m_D H_1^{-1} H_2$, $n_C = m_C G^{-1} E$ 。

式(3-11)与直流线路、换流器、缓冲电路的离散方程联立可得:

$$\begin{bmatrix} x_D(k) \\ x_C(k) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1^{-1} H_2 & 0 & H_1^{-1} \frac{b_{ID}}{2} \\ 0 & G^{-1} E & G^{-1} F_{ID} \\ -n_D & n_C & n_{ID} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_D(k-1) \\ x_C(k-1) \\ U_{ID} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ G^{-1} F_I \\ n_I \end{bmatrix} U_I + \begin{bmatrix} H_1^{-1} \frac{b_{RD}}{2} \\ 0 \\ -n_{RD} \end{bmatrix} U_{RD} \quad (3-12)$$

简写为:

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}(k-1) \\ U_{ID} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix} U_I + \begin{bmatrix} g \\ h \end{bmatrix} U_{RD} \quad (3-13)$$

消去 U_{ID} 可得：

$$\bar{x}(k) = \tilde{A}\bar{x}(k-1) + \tilde{B}U_I + \tilde{C}U_{RD} \quad (3-14)$$

式中, $\tilde{A}=a-bc/d$, $\tilde{B}=e-bf/d$, $\tilde{C}=g-bh/d$ 。在第 j 个步长范围内, 系统的状态量 $\bar{x}$ 应当满足：

$$\bar{x}(k) = \tilde{A}_j\bar{x}(k-1) + \tilde{B}_j(u_I(k) + u_I(k+1)) + \tilde{C}_j(u_{RD}(k) + u_{RD}(k+1)) \quad (3-15)$$

式中, $\bar{x}=[x_D, x_C]^T$ 。 u_I 为逆变侧交流系统电压瞬时值。

需要指出的是, 该状态方程只描述了在单个运行工况下系统的数学模型, 由于换流器中阀在导通和关断状态中不断变换, 换流器及其缓冲电路模型存在不同的换相与导通工况, 系统所对应的状态方程并不完全相同, 因此需通过工况的自动切换来调整系数矩阵, 即需要 3.4 节中对导通工况和换相工况的结束时间做精确计算。

3.4 换流器的工况变换判断及时刻求解

本节针对换流器模型的第 j 个工况, 解释各个工况开始时刻与结束时刻之间的关系。显然, 第 j 个工况结束时刻 t_j 总是等于第 $j+1$ 个工况开始时刻 t_{j+1}^{start} , 与换流器正处于导通工况或是换相工况无关, 也和当前系统是正常运行或是故障状态无关, 即：

$$t_j = t_{j+1}^{start} \quad (3-16)$$

3.4.1 导通工况结束时间求解

换流器运行工况变换的判断包括导通和换相两类情况来进行分析, 当第 j 个运行工况处于导通状态时, 有下图：

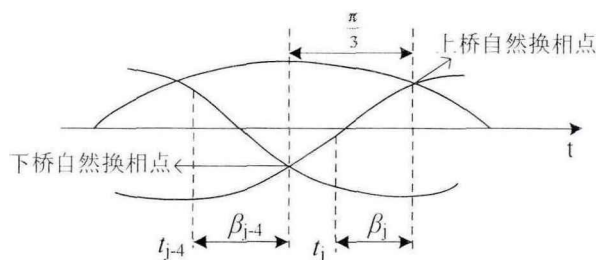


图 3-2 导通工况的结束时刻求解示意图

图 3-2 为单个换流器的交流电压波形图，可以看出第 j 个工况的结束时刻 t_j 由逆变侧控制系统输出的超前触发角 β 决定。 β_{j-4} 和 β_j 分别是第 $j-4$ 个工况的结束时刻 t_{j-4} 和 t_j 时刻的超前触发角，因此有：

$$t_j = t_{j-4} + \frac{\beta_{j-4} - \beta_j + \frac{\pi}{3}}{\omega} \tag{3-17}$$

此外，从图 3-2 可以看出，导通工况的结束时间即为换相工况的开始时间，根据逆变侧三相电压值得自然换相点对应的时刻 t_x ，若直接用自然换相点减去 β_j 即为导通工况的结束时刻，有：

$$t_j = t_x - \frac{\beta_j}{\omega} \tag{3-18}$$

3.4.2 换相工况结束时间求解

通常依据换流阀元件的关断时刻来计算换相工况的结束时间，即流经晶闸管的电流必须降到略大于零的某一数值以下，该值由晶闸管特性决定。根据对应换流变压器的联结方式，可以看出换流器 C1 由换相电流过零点决定，换流器 C2 的换相工况结束时刻在换相电流是直流电流的 2/3 倍的拐点处。但考虑到缓冲电路并联在晶闸管的两端，当换流阀关断时，缓冲电路仍存在少量电流 i_{s0} ，利用阀电流由正变负是最为准确的判断方法，如表 3-1。

表 3-1 换相工况结束时间求解公式

工况编号	Y-Y 联结换流器	Y-Δ联结换流器	结束时刻的求解
S0	A B→C	A B	$i_{s0}+i_{By}(t_j)<0$
S2	A C	A B→C	$i_{s0}+i_{Bd}(t_j)-i_{Ad}(t_j)<0$
S4	A→B C	A C	$i_{s0}-i_{Ay}(t_j)<0$
S6	B C	A→B C	$i_{s0}-i_{Ad}(t_j)+i_{Cd}(t_j)<0$
S8	B C→A	B C	$i_{s0}+i_{Cy}(t_j)<0$
S10	B A	B C→A	$i_{s0}+i_{Cd}(t_j)-i_{Bd}(t_j)<0$
S12	B→C A	B A	$i_{s0}-i_{By}(t_j)<0$
S14	C A	B→C A	$i_{s0}-i_{Bd}(t_j)+i_{Ad}(t_j)<0$
S16	C A→B	C A	$i_{s0}+i_{Ay}(t_j)<0$
S18	C B	C A→B	$i_{s0}+i_{Ad}(t_j)-i_{Cd}(t_j)<0$
S20	C→A B	C B	$i_{s0}-i_{Cy}(t_j)<0$
S22	A B	C→A B	$i_{s0}-i_{Cd}(t_j)+i_{Bd}(t_j)<0$

表中, 剩余电流 i_{s0} 可用缓冲电容电压的微分公式 $i=C \, du/dt$ 表示, 与当前时刻的延迟触发角 α 有关, 有:

$$i_{s0} = \frac{3}{2} \omega C_s U_{lm} \cos(\alpha + 30^\circ) \quad (3-19)$$

式中, ω 为角频率; C_s 为缓冲电容; U_{lm} 为三相交流母线电压的幅值。

3.4.3 熄弧角求解

根据熄弧角的定义, 换流阀元件的关断时刻与该阀对应的正向电压恢复时间之差为熄弧角, 即 $\gamma = \beta - \mu$ 。换相角 μ 由下式计算:

$$\mu = \arccos \left(\cos \gamma - \frac{\sqrt{2} \omega L_c i_s}{E_{rms}} \right) - \gamma \quad (3-20)$$

式中, L_c 为交流系统每相等值换相电感, E_{rms} 为交流系统等值电压电动势的线电压有效值。化简后得到 β 和 γ 的关系为:

$$\gamma = \arccos \left(\cos \beta + \frac{\sqrt{2} \omega L_c i_s}{E_{rms}} \right) \quad (3-21)$$

此外, 熄弧角的值与自然换相点和换流阀的关断时刻有关。因此, 本章算法选择将熄弧角 γ 表示为:

$$\gamma = (t_x - t_j) \omega \quad (3-22)$$

3.5 算法流程图

基于第二章一次设备和控制系统的模型, 以及第三章对状态变量的求解算法, 可以构建高压直流输电系统完整状态空间模型的数据交互, 具体计算流程如下:

首先, 根据整流侧和逆变侧的三相交流母线电压, 利用锁相环模型计算电压相位, 再用 MATLAB 程序自产三相交流电压, 并以此作为状态空间模型的输入。其次, 设置初始时刻的状态变量以及初始工况的系数矩阵, 用式(3-15)计算下一时刻一次设备的状态量, 将整流侧直流电流 i_{RD} 、逆变侧直流电流 i_{ID} 、逆变侧直流电压 u_{ID} 输入到控制系统; 同时, 计算下一时刻控制系统的输出量延迟触发角 α 和超前触发角 β , 并返回至一次设备。其中, α 用来计算准稳态模型中的理想电压源 u_{RD} ; β 用来求解导通工况的结束时间。利用式(3-18)及表 3-1 精

确求解工况切换的时刻，并计算该时刻状态量。此外，在循环过程中需用式(3-22)不断记录熄弧角的值，也输入到控制系统中。综上，HVDC 系统状态空间模型的完整计算流程如图 3-3。

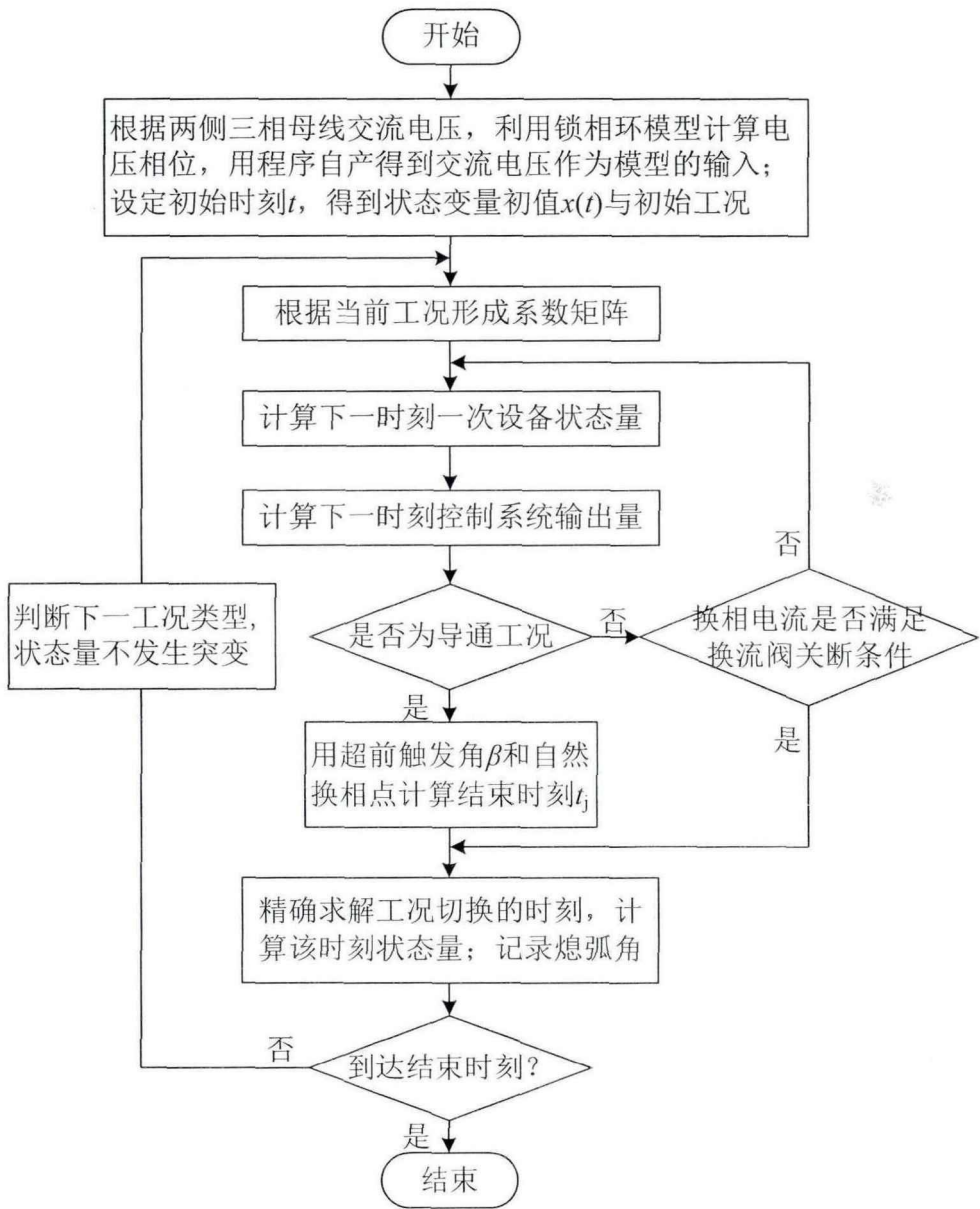


图 3-3 HVDC 系统状态空间模型的计算流程图

3.6 本章小节

本章推导了高压直流输电系统状态空间模型的详细解析算法，对一次设备模型和控制系统分别采用不同的数值积分方法进行求解。主要工作内容如下：

首先，利用隐式梯形法，将直流线路、换流器和缓冲电路的状态方程化简整理为离散方程，通过电流关系联立得到一次设备的全系统方程；由于控制系

统存在分段函数和限幅环节，并对其变量精度要求较低，因此采用后退欧拉法对其状态方程进行差分简化。

其次，通过在计算过程中不断监视导通阀的换相电流和关断阀两侧电压，推算了对换流器导通、换相工况结束时间的计算表达式，从而保证仿真过程中晶闸管的正确开闭和工况的准确切换。

最终，将上述计算过程相互结合，实现了一次设备与控制系统仿真的数据交互，形成了完整的算法流程。

第 4 章 状态空间模型的算例仿真与结果分析

本章对所提的状态空间解析模型和相关算法进行仿真实现，在 MATLAB 中编程实现本文模型和算法，采用标准算例计算不同运行条件下的稳态、暂态过程，与 PSCAD/EMTDC 中的 CIGRE HVDC 标准测试模型的仿真结果进行对比。并在逆变侧设置多种对称和不对称故障，以验证所提模型和算法的可行性与准确性。

4.1 PSCAD/EMTDC 软件及 CIGRE HVDC 模型简介

PSCAD/EMTDC 是一个成熟的电力系统仿真软件，在世界范围内广泛使用^[59,60]。它可以分别在时域和频域中实现电磁暂态的仿真计算，其主要作用是当系统受到干扰或参数发生突变时，计算和分析电力系统中重要参数的时变规律。EMTDC 可用作实时数字仿真器的前端，它提供了与 MATLAB 通用仿真软件和 C 语言的接口，从而增强了程序的扩展功能^[61,62]。

CIGRE HVDC 模型的全称是 CIGRE HVDC Benchmark Model。该模型是 1991 年 CIGRE 会议的 HVDC 控制工作组构建的有关 HVDC 系统控制研究的第一个标准模型^[63]，可以作为系统设备测试和策略性能开发的基础，并反映 HVDC 控制研究中的主要问题。PSCAD/EMTDC 软件的算例库中已存在一个 CIGRE HVDC 的标准模型，如图 4-1。

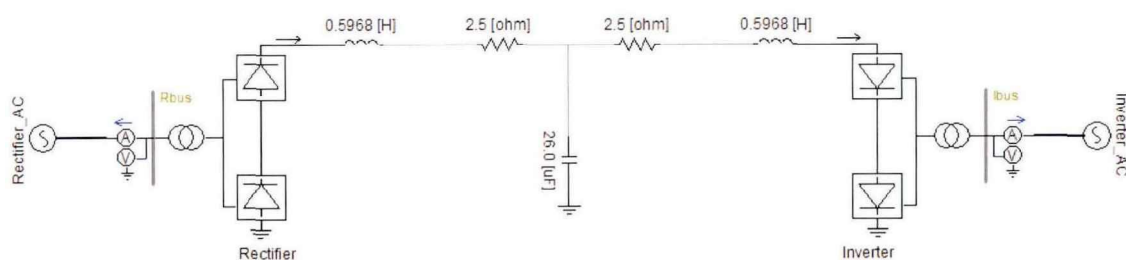


图 4-1 CIGRE HVDC 标准算例模型

基于此，本文的仿真系统采用 PSCAD/EMTDC 平台下的 CIGRE HVDC 标准测试系统。该模型的电气量参数为：直流系统的额定电压和额定电流分别为 500kV 和 2kA。一次设备模型的输入量为交流系统三相电压幅值，整流侧的三相电压幅值为 345kV，逆变侧的三相电压幅值为 230kV，交流系统的频率为 50Hz，整流侧的换流变压器变比为 $1/K_r=345/213.4557$ ，逆变侧的换流变压器变比为 $1/K_i=230/209.2288$ ，系统两侧换流变压器的漏抗标幺值均为 0.18pu。图 4-1 中直流线路的参数如下： $R_D=2.5\Omega$ ； $L_D=0.5968H$ ； $C_D=26.0\mu F$ ； $L_S=0.05H$ 。PSCAD 软

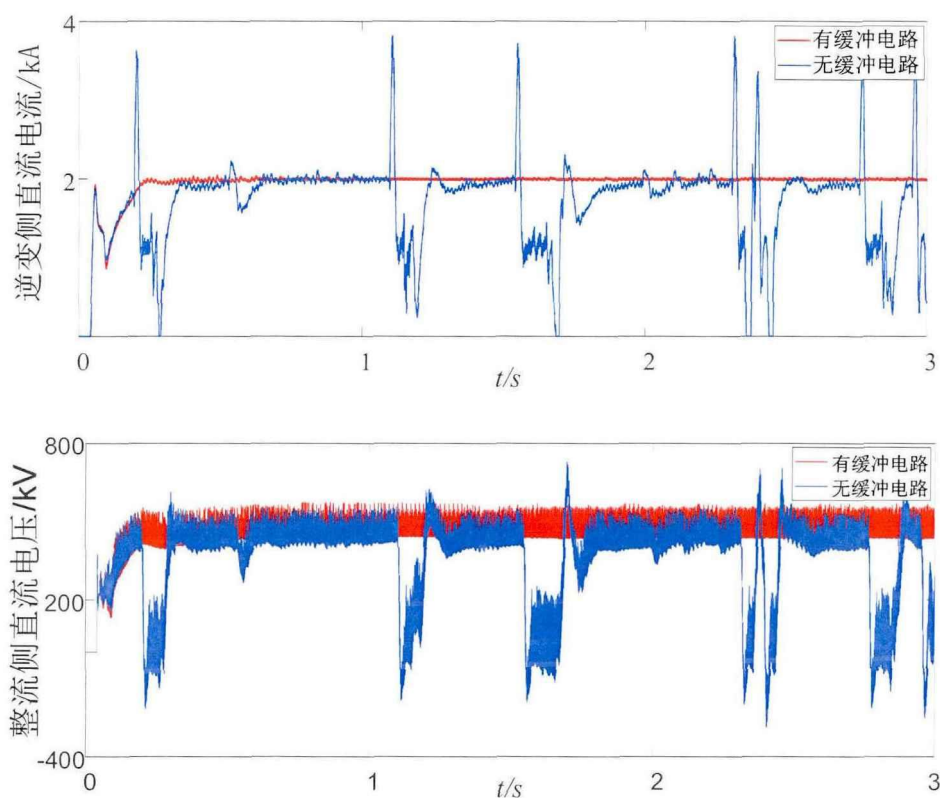
件将仿真步长设置为 50 微秒，总时长为 6 秒。

由于状态空间理论使用隐式梯形积分法进行计算，非状态变量可能会发生数值震荡，本文仿真不考虑数值震荡抑制和插值算法，因此对于 PSCAD 的 CIGRE HVDC 对比模型，一并关闭数值震荡抑制和开关插值算法。

4.2 缓冲电路对比仿真

CIGRE HVDC 模型中缓冲回路由电容和电阻串联组成，电容 $C_S=0.05\mu\text{F}$ ，电阻 $R_S=5000\Omega$ ，缓冲回路的时间常数为 $250\mu\text{s}$ 大于仿真步长的 $50\mu\text{s}$ ，此时缓冲回路的暂态特性是不可忽略的，若要忽略缓冲回路，按照一个步长内缓冲电流衰减百分之九十计为可忽略计算，则仿真频率应在 2kHz 以内，即 0.5ms 的仿真步长，与 PSCAD 的小步长数值积分算法冲突，因此缓冲回路是不可忽略的。

为了与现有状态空间模型进行对比，分别设置计及缓冲回路和不计及缓冲回路的 CIGRE HVDC 模型，仿真得到逆变侧直流电流、整流侧直流电压、直流线路中点电压和逆变侧交流母线电压有效值的波形对比如图 4-2。



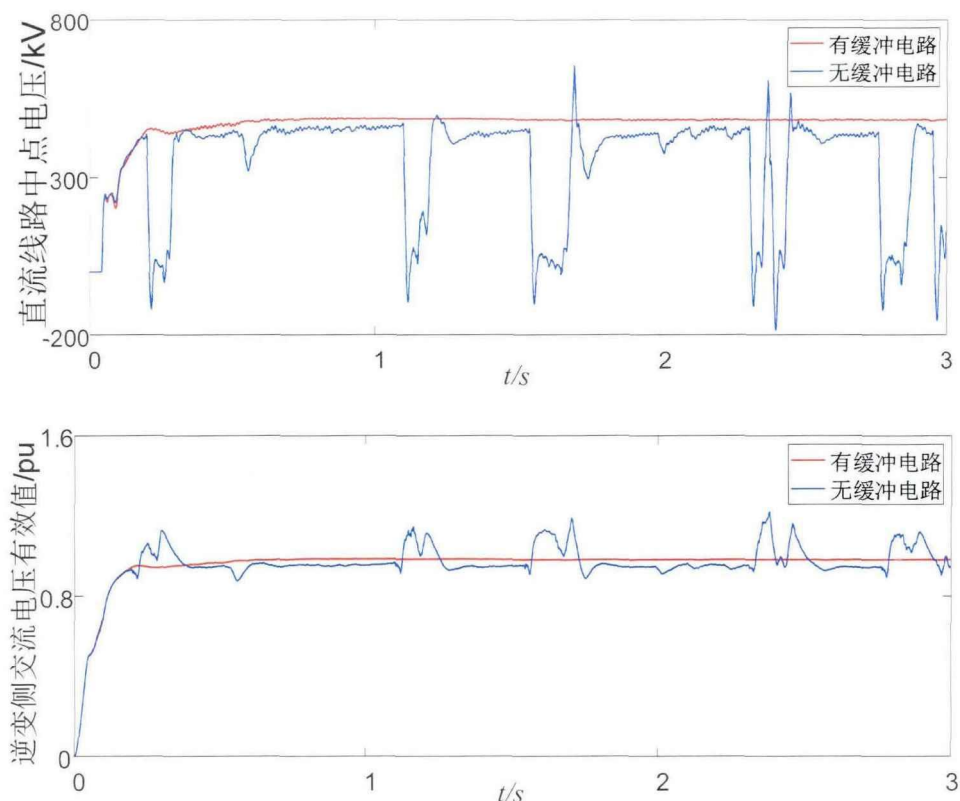


图 4-2 有、无缓冲电路的波形对比图

对比图中曲线可以看出,在不计及缓冲电路时的 di/dt 很大,关断时的 du/dt 很大,同时产生了较高的过电压。这是因为阀电压在阀关断期间发生多次突变,导致了缓冲电流的多次突变峰值,而缓冲电流会流进交流回路和直流回路,在交直流回路的电感上产生感应电压,即突变峰值的导数,数值很大,尤其对直流回路来说,感应电压为同一个方向,其值会随着周期叠加,进而造成直流线路上电压和电流的误差。

此外,本文的状态空间模型需要对状态变量求导,而图 4-2 中的尖峰波形会使其导数值变得很大,对状态方程的计算有较大影响,因此不考虑缓冲电路的状态空间模型误差很大。综上,在 HVDC 系统的状态空间解析模型中,考虑缓冲电路是十分必要的。

4.3 状态空间模型的仿真与分析

本文仅建立了含直流输电线路、换流器和控制系统的 HVDC 系统状态空间解析模型,忽略了交流系统中的无功补偿装置和交流滤波器,通过记录 PSCAD 软件中系统两侧的三相交流母线电压,作为状态方程的输入来验证 HVDC 状态空间模型的有效性。

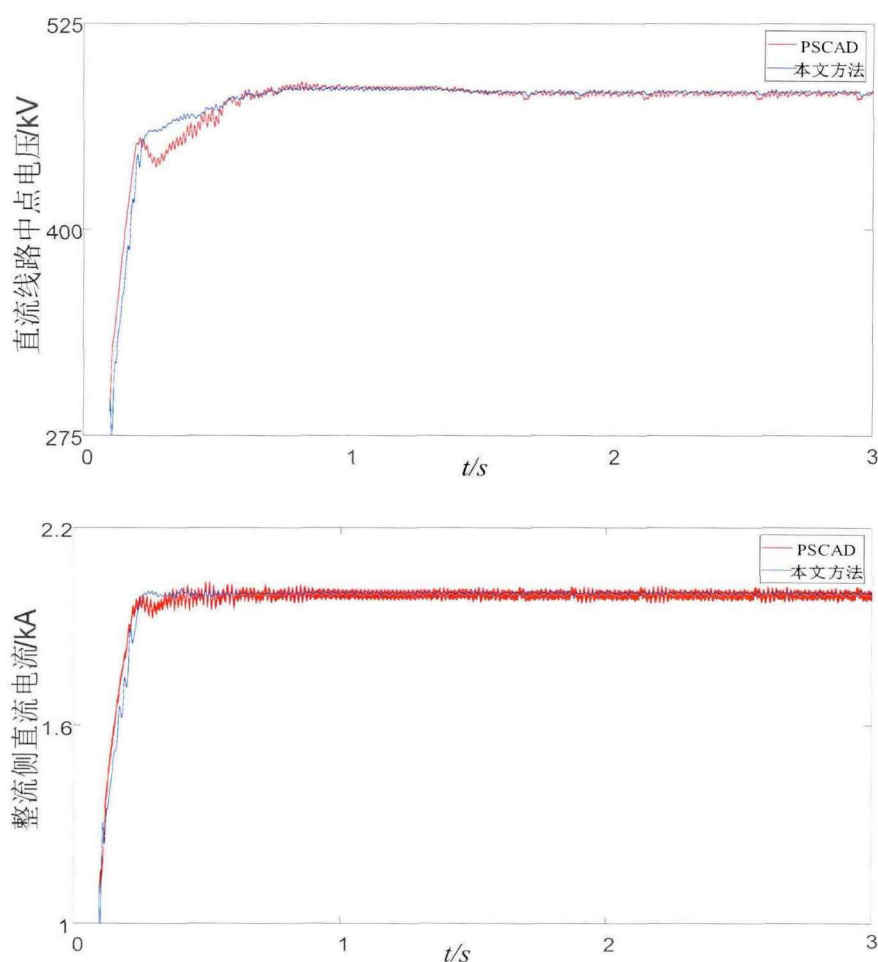
本文使用所建模型进行了对称和不对称两种故障条件下的仿真对比。为了防

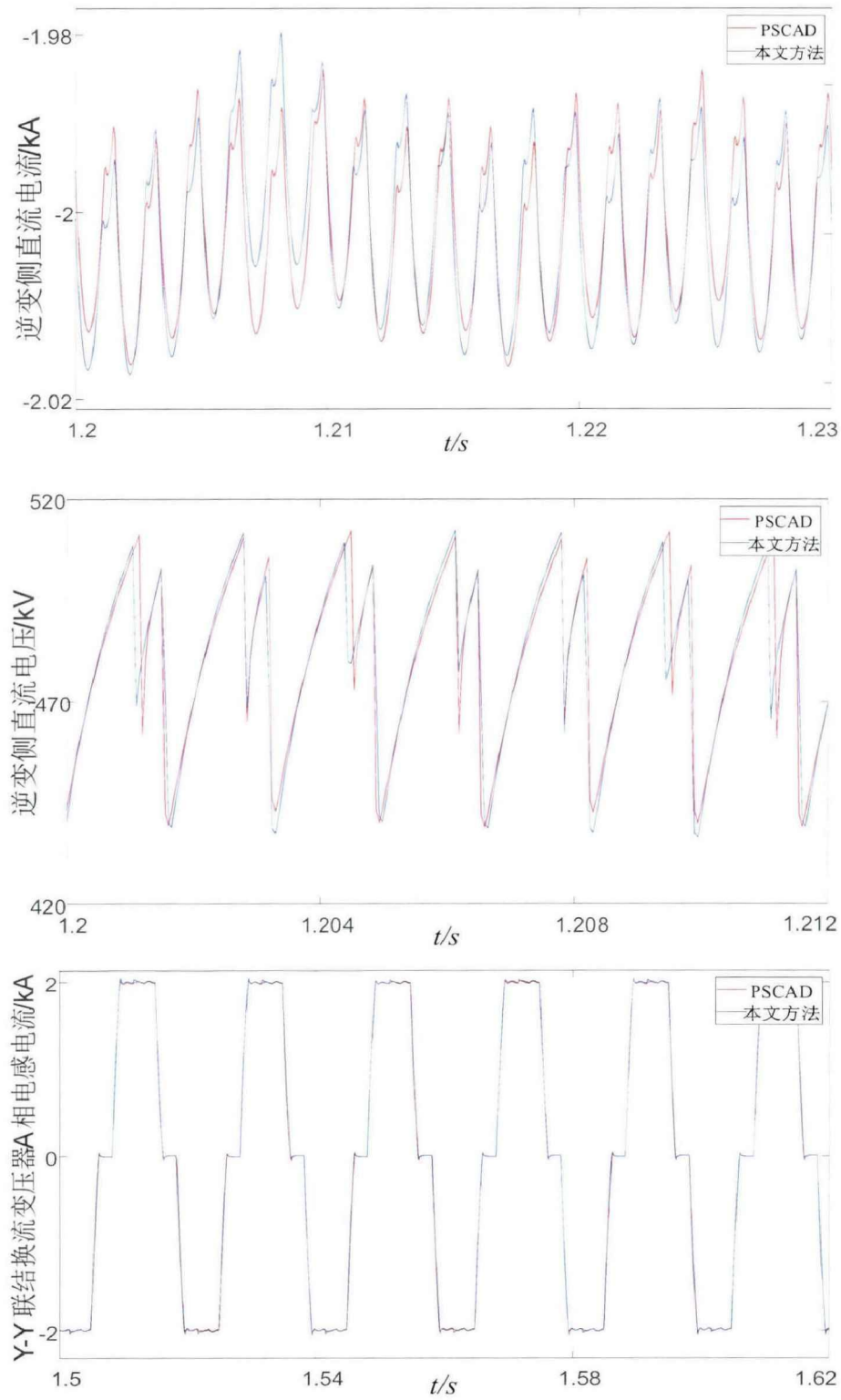
止引发换流阀的换相失败，在逆变侧的交流母线上发生经过渡电阻接地的故障。

4.3.1 稳态运行

将 PSCAD 软件的仿真积分步长设置为 50 微秒，由于 CIGRE HVDC 模型中封装的锁相环在 0.04s 前后采用的模型不同，或者说是环节发生了变化，因此本文从 0.04s 开始进行仿真对比，仿真开始大约 1 秒以后，可以看到相对理想的仿真波形。

稳态运行条件下，PSCAD 软件仿真得到的延迟触发角 $\alpha=21.07^\circ$ ，超前触发角 $\beta=39.65^\circ$ ，熄弧角 $\gamma=15.15^\circ$ ；根据本文所提算法计算得到的分别为 $\alpha=20.73^\circ$ ， $\beta=39.39^\circ$ ， $\gamma=15.00^\circ$ 。由此可见，虽然本文对 HVDC 系统整流侧采用了准稳态模型的等值化简，但并不影响逆变器动态响应的仿真结果，对于整流侧控制模型输出的延迟触发角 α 的计算也是较为精确的。





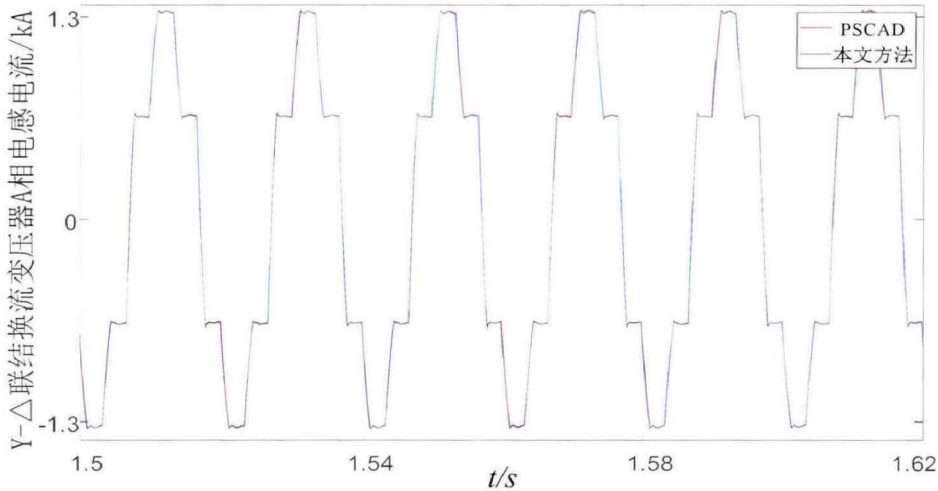


图 4-3 稳态运行时的波形对比图

图 4-3 给出了采用本文方法求得各个状态变量的仿真波形。同时加入 CIGRE 模型的仿真结果，从图中波形的对比可以明显看出，两个模型计算出的仿真曲线几乎是重合的。根据图中的具体数值结果可得，整流侧直流电流、逆变侧直流电流、逆变侧直流电压和直流线路中点电压的误差最大值仅为 0.0371kA、0.0272kA、4.12kV、5.21kV，误差的百分比为 1.85%、1.35%、0.815%和 1.06%；逆变侧的 Y-Y 联结变压器电感电流和 Y-Δ联结变压器电感电流的误差最大值仅为 0.0168kA 和 0.0133kA，误差的百分比为 0.84%和 0.66%。

从以上结果分析可以看出，在 HVDC 系统稳态运行时，本文采用的状态空间解析模型及算法，在 CIGRE HVDC 模型上验证对比的仿真结果波形十分相近，误差在允许范围内，从而验证了本文所提方法的有效性和准确性。

4.3.2 对称故障

故障一：逆变侧交流系统母线电压突降至 0.9pu。

逆变侧的交流母线在 2 秒时出现三相短路接地故障，电压跌落至 0.9pu，1s 后电压恢复。采集系统两侧交流电压的瞬时值，利用锁相环模型得到交流电压的相位，再生成对称的三相交流电压，作为对称故障测试的输入量。本文所提算法和 CIGRE 模型仿真得到的状态变量波形曲线如图 4-4。由数值计算结果可得，整流侧、逆变侧直流电流、直流线路中点电压和逆变侧换流变压器电感电流的误差最大值仅为 0.0384kA、0.0349kA、6.13kV 和 0.0198kA，误差的百分比为 1.75%、1.92%、1.25%和 0.99%。

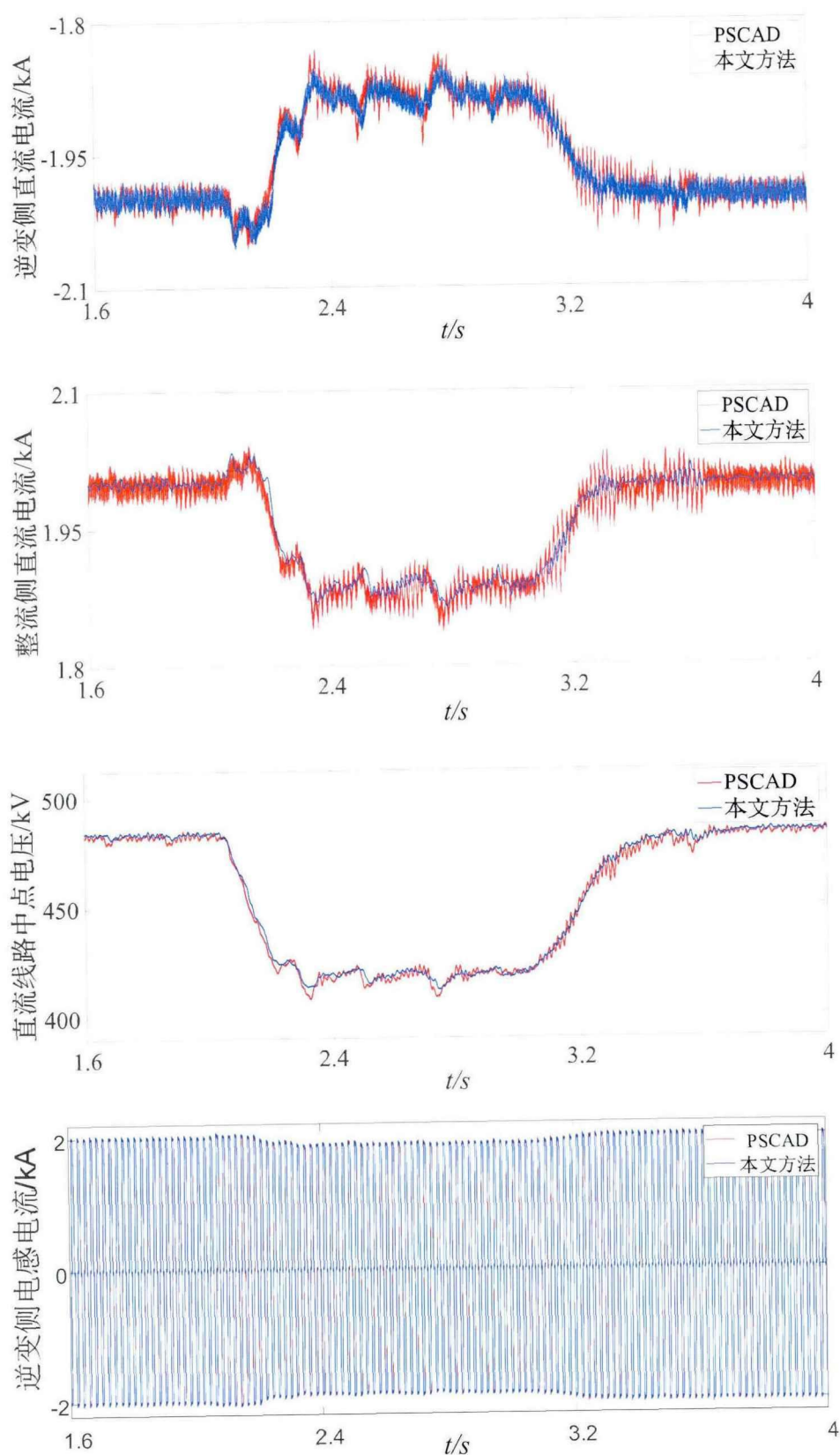
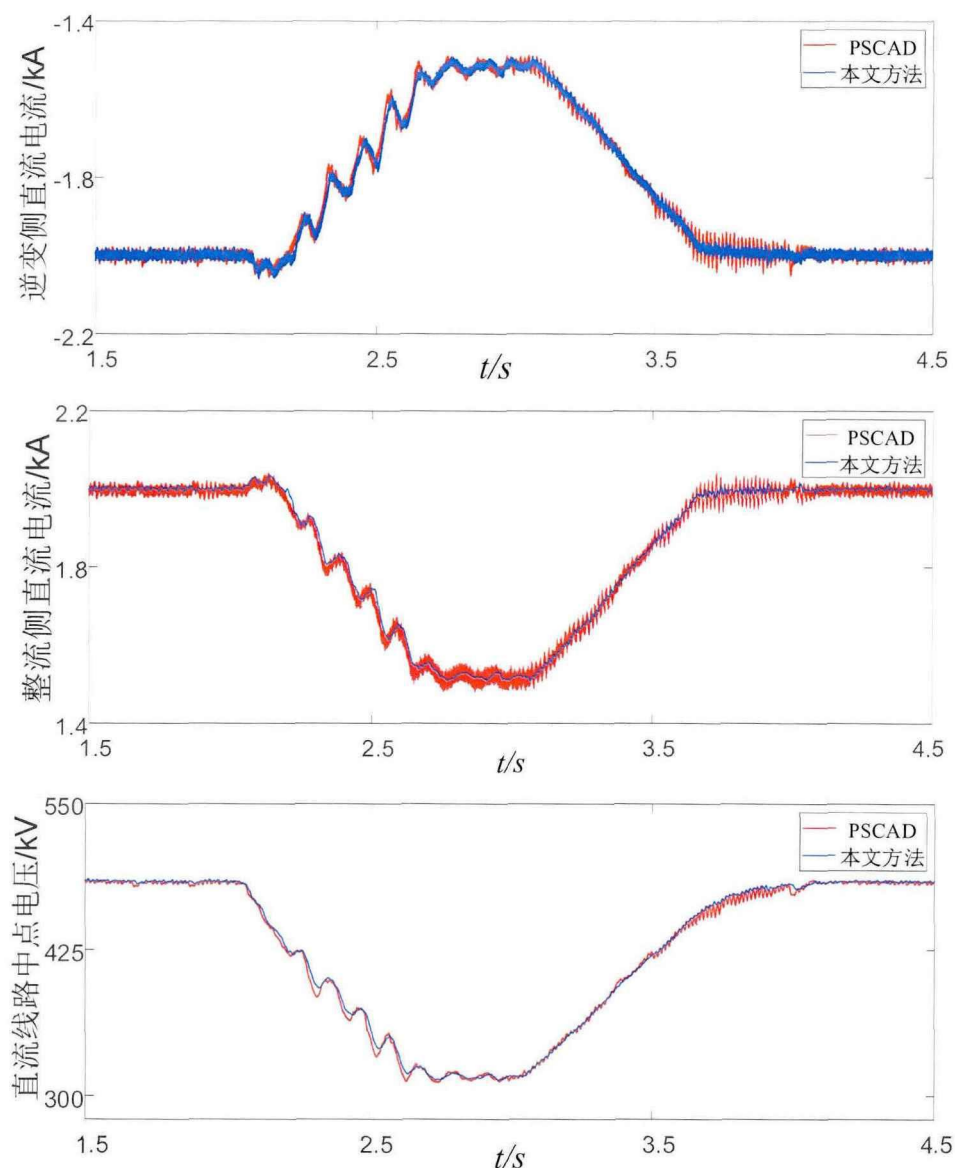


图 4-4 对称故障 1 的波形对比图

故障二：逆变侧交流系统母线电压突降至 0.7pu。

逆变侧的交流母线在 2 秒时出现三相短路接地故障，电压跌落至 0.7pu，1s 后电压恢复。采集系统两侧交流电压的瞬时值，利用锁相环模型得到交流电压的相位，再生成对称的三相交流电压，作为对称故障测试的输入量。本文所提算法和 CIGRE 模型仿真得到的状态变量波形曲线如图 4-5。由数值计算结果可得，整流侧、逆变侧直流电流、直流线路中点电压和逆变侧换流变压器电感电流的误差最大值仅为 0.0392kA、0.0377kA、6.67kV 和 0.0204kA，误差的百分比为 1.96%、1.89%、1.36%和 1.02%。



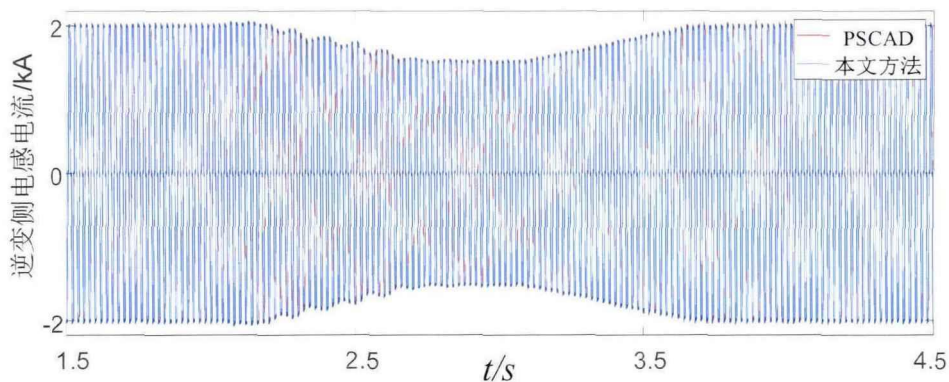
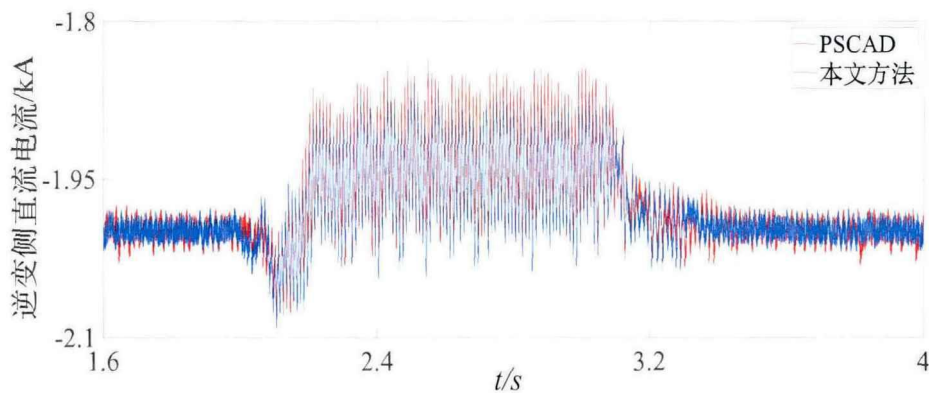


图 4-5 对称故障 2 的波形对比图

4.3.3 不对称故障

故障三：逆变侧 A 相交流电压幅值跌落至 0.9pu。

2s 时逆变侧换流母线出现 A 相经阻抗接地故障，降至 0.9pu，故障保持 1s 后排除。分别采集逆变侧每相电压的幅值和瞬时电压值，根据每相电压幅值用程序自产出三相不对称的交流电压，并和 PSCAD 中的瞬时电压值进行对比调整，作为不对称故障测试的输入量，本文所提算法和 CIGRE 模型仿真得到的状态变量波形曲线如图 4-6。由数值计算结果可得，整流侧、逆变侧直流电流、直流线路中点电压和逆变侧换流变压器电感电流的误差最大值仅为 0.055kA、0.061kA、9.77kV 和 0.0293kA，误差的百分比为 2.68%、2.91%、1.99%和 1.47%。



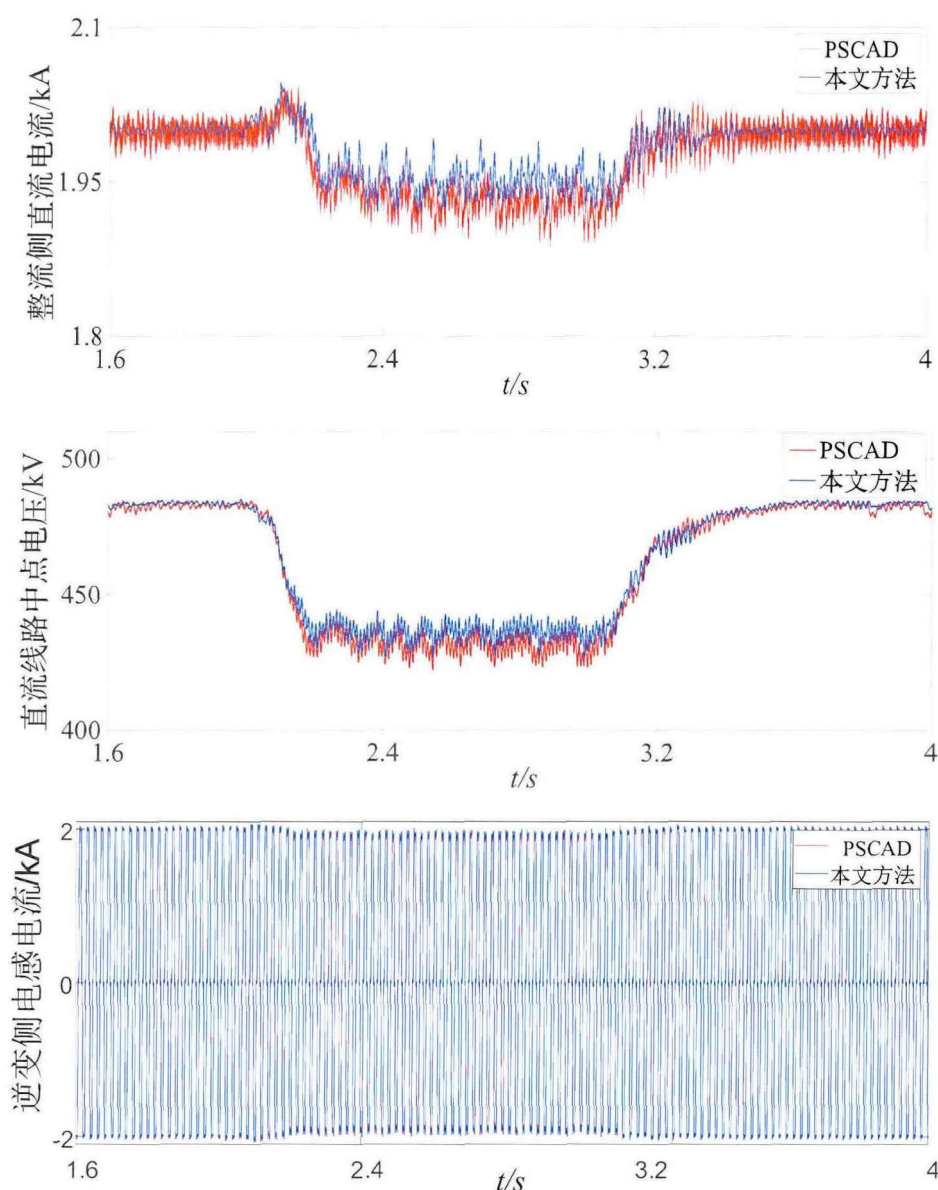


图 4-6 不对称故障 1 的波形对比图

故障四：逆变侧 A 相交流电压幅值突降至 0.7pu。

2s 时逆变侧换流母线出现 A 相经阻抗接地故障，降至 0.7pu，故障保持 1s 后排除。分别采集逆变侧每相电压的幅值和瞬时电压值，根据每相电压幅值用程序自产出三相不对称的交流电压，并和 PSCAD 中的瞬时电压值进行对比调整，作为不对称故障测试的输入量，本文所提算法和 CIGRE 模型仿真得到的状态变量波形曲线如图 4-7。由数值计算结果可得，整流侧、逆变侧直流电流、直流线路中点电压和逆变侧换流变压器电感电流的误差最大值仅为 0.058kA、0.063kA、9.98kV 和 0.0387kA，误差的百分比为 2.82%、3.01%、2.03%和 1.94%。

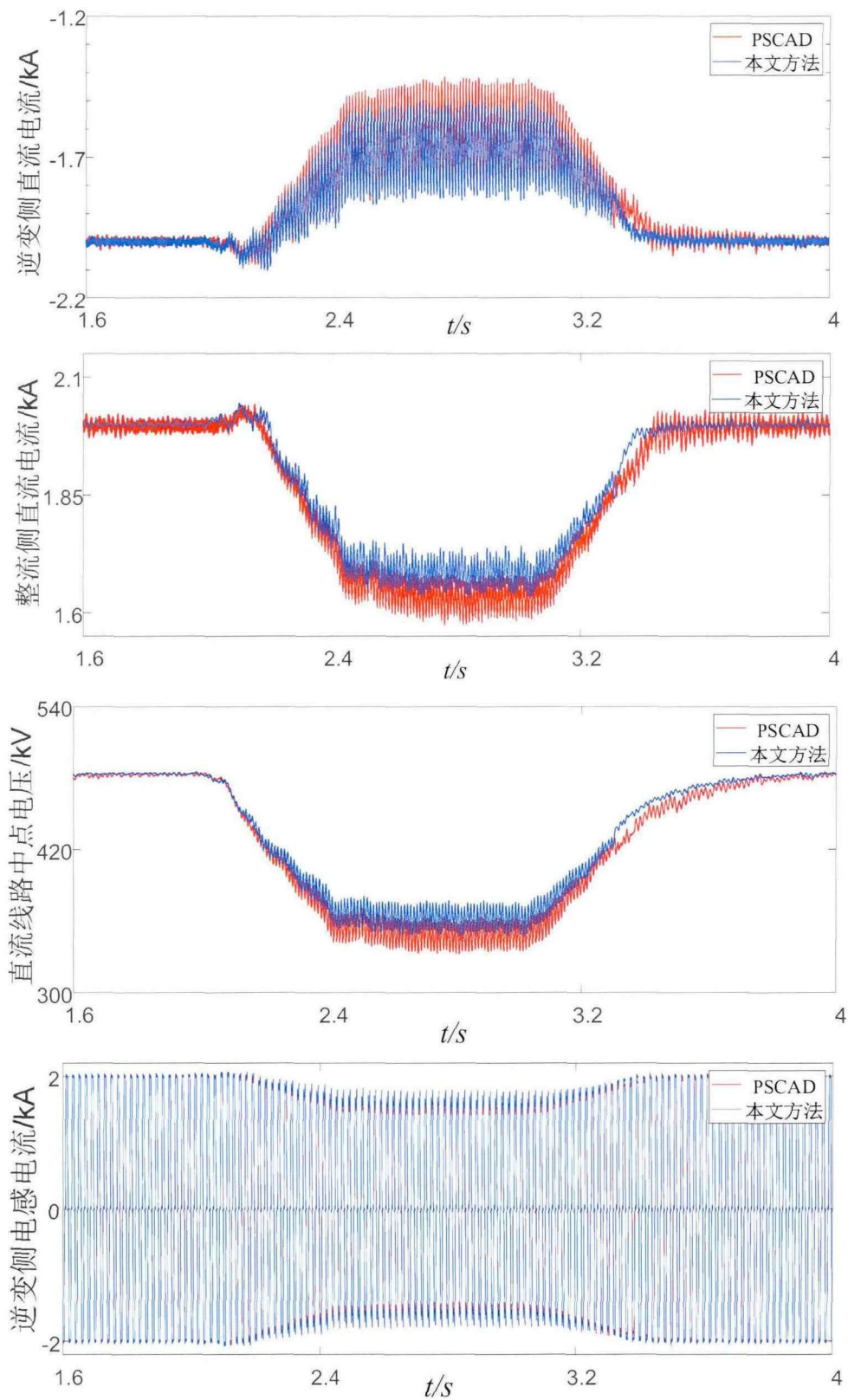


图 4-7 不对称故障 2 的波形对比图

将稳态运行和故障测试的各状态变量仿真数据汇总成表格，如表 4-1。

表 4-1 状态变量的仿真误差及误差百分比

状态变量	最大误差及误差百分比							
	整流侧直流电流		逆变侧直流电流		直流线路中点电压		逆变侧电感电流	
稳态运行	0.037kA	1.85%	0.027kA	1.35%	5.21kV	1.06%	0.013kA	0.66%
故障一	0.038kA	1.75%	0.035kA	1.92%	6.13kV	1.25%	0.019kA	0.99%
故障二	0.039kA	1.96%	0.037kA	1.89%	6.67kV	1.36%	0.020kA	1.02%
故障三	0.055kA	2.68%	0.061kA	2.91%	9.77kV	1.99%	0.029kA	1.47%
故障四	0.058kA	2.82%	0.063kA	3.01%	9.98kV	2.03%	0.039kA	1.94%

由图 4-4~图 4-7 的曲线对比可得，在以上四种故障测试中，采用状态空间模型的计算数据和 CIGRE HVDC 电磁暂态模型的仿真结果大致相同，系统电气量波形较为相似。仿真曲线表明系统在这段暂态过程中没有出现换相失败的情况，然而部分时段结果会存在一定误差。经分析可知，引起差异的主要原因为：

1) PSCAD 中逆变侧控制器的熄弧角测量环节与相应的 PI 控制。PI 参数处于不稳定的边缘，些许增大控制参数 K_p ，直流电压和电流就会发生明显的波动。由于本文的熄弧角测量环节无法与 PSCAD 中的测量方法完全一致，导致熄弧角测量环节的波动范围增大，等同于增大 K_p ，因此触发角的误差是模型和方法共同决定的。

2) PSCAD 软件利用插值算法求得的熄弧角和本文所提算法计算出的熄弧角有些许差别，并且 PSCAD 的插值法和震荡抑制算法存在一定的截断误差，因此计算出的状态量与准确值存在差异。

3) PSCAD 中某些关键的控制技术采用全封装形式，并且在特定控制原理的实现上存在差异。

上述分析原因将对控制系统的调节能力造成一定程度的影响，进而会影响一次设备的状态量。但由仿真对比结果可以看出，两者之间的差异是可以接受的。由此可见，本文所提方法不仅保留了状态空间简化模型解析算法计算效率上的优势，而且计及了缓冲电路，对晶闸管的描述更加精确，有效提高了换流器模型计算的精确度。

4.4 本章小节

本章对高压直流输电系统状态空间模型进行了仿真测试，介绍了 PSCAD /EMTDC 仿真平台及 CIGRE HVDC 仿真模型，主要工作如下：

首先，在 CIGRE HVDC 模型中分别设置计及缓冲电路和不计及缓冲电路两种条件。测试结果表明，在无缓冲电路时，由于阀电压在阀关断期间的多次突变，

导致了缓冲电流和阀电流的多次突变峰值，使各个状态变量的波形产生尖峰，对状态方程的计算产生较大影响，从而证明了计及缓冲电路状态空间模型的必需性和重要性。

同时，在 MATLAB 里编程实现了所提高压直流输电系统的状态空间解析模型和相关算法，采用 CIGRE HVDC 标准算例作为仿真模型，进行了直流系统稳态运行、逆变侧交流母线发生对称故障和不对称故障等 5 种情况下的仿真对比。结果表明，MATLAB 编程计算和 PSCAD 仿真测试的结果在稳态和暂态时的动态响应基本一致，验证了本文所提模型和算法的可行性与准确性。

第 5 章 结论与展望

5.1 结论

本文主要围绕高压直流输电系统的状态空间模型展开研究工作,结合理论分析和仿真算例,详细推导了考虑缓冲电路的状态空间方程,并提出了相应的解析算法,通过 MATLAB 编程和 PSCAD 的标准算例进行了仿真验证。本文的主要工作内容和研究结论如下:

(1) 建立了高压直流输电系统换流器及其缓冲电路、直流线路和控制系统的状态空间解析模型,将换流器一次系统不同运行工况分别用一组微分方程来表示,分析缓冲电路的动态响应,将缓冲电流作为状态变量引入状态方程,准确还原了 12 个换流阀的工作过程。通过变化的系数矩阵表示不同工况下缓冲电流的初始值,解决了状态变量非连续性的问题。同时,根据控制逻辑框图,建立控制系统时域响应模型,实现了控制系统和一次设备仿真的数据交互。

(2) 分别利用隐式梯形法和后退欧拉法将一次设备和控制系统的状态方程差分整理为离散方程,通过电流关系联立得到一次设备的全系统方程。在计算过程中不断监视导通阀的换相电流和关断阀两侧电压,推算了换流器切换工况的判断条件和熄弧角的计算方法。解析算法与 PSCAD 软件的数值积分方法相比,本文算法可以精确求解换流器的导通和换相工况的变换时刻,比 PSCAD 利用插值法得到换相电流为零时刻要更准确,并且没有插值算法和震荡抑制算法的截断误差问题。

(3) 在 MATLAB 里编程实现了状态空间解析模型,与 PSCAD/EMTDC 中的 CIGRE HVDC 标准算例的仿真曲线进行对比。结果表明,本文模型在考虑缓冲电路后有效提高了状态方程的计算精度,可以准确有效的计算直流系统稳态运行和故障后暂态运行的动态行为,由此证明了本文所提方法的准确性和可行性。

5.2 展望

在前人研究的基础上,本文针对高压直流输电系统的状态空间模型获得了一些阶段性的研究成果,但本文工作仍有一些不完善的地方,后续还可以在以下方面继续深入探究:

(1) 本文仅测试了直流系统对逆变侧交流母线故障的响应,下一步可以对换流器故障或者直流线路故障等其他故障情况时的响应进行研究计算;

(2) 本文对换流器运行工况的描述仅停留在正常运行状态,下一步可以考虑换相失败等更多可能的工况组合情况,进一步提升模型的适应性和应用性;

(3) 本文的研究对象是高压直流输电系统,下一步可以将本文基于状态空间法的建模求解思路应用于 MMC-HVDC 或者 VSC-HVDC 系统。

(4) 本文提出的状态空间模型和算法的仿真精度较高,下一步可以将其应用到实际工程中,对工程问题展开具体的研究。

参考文献

- [1] 刘崇茹.交直流混合输电系统运行特性分析[M].北京:科学出版社,2018.
- [2] 赵畹君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力工业出版社,2004.
- [3] Kundur P. Power System Stability and Control[M].McGraw-Hill Professional, 1994.
- [4] 韩民晓,文俊,徐永海.高压直流输电原理与运行[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [5] 赵杰.高压直流输电的前沿技术[J].中国电力,2005(10): 1-6.
- [6] Long W, Nilsson S. HVDC transmission: yesterday and today[J].IEEE Power and Energy Magazine,2007,5(2):22-31.
- [7] 袁清云.特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景[J].电网技术,2005(14):1-3.
- [8] 梁旭明,张平,常勇.高压直流输电技术现状及发展前景[J].电网技术,2012,36(04):1-9.
- [9] 刘璞.高压直流输电线路故障仿真和双端测距研究[D].山东大学,2016.
- [10] 曾南超.高压直流输电在我国电网发展中的作用[J].高电压技术,2004(11):11-12.
- [11] 陈珩.电力系统稳态分析[M].北京:中国电力出版社,2007.
- [12] Lee D , Andersson G . Quasi-static stability of HVDC systems considering dynamic effects of synchronous machines and excitation voltage control[C]// Power Engineering Society General Meeting. IEEE, 2006.
- [13] Hammad A E , Kuhn W . A Computation Algorithm for Assessing Voltage Stability at AC/DC Interconnections[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1986, 1(1):209-215.
- [14] 毕如玉,林涛,陈汝斯,徐遐龄,叶婧.交直流混合电力系统的安全校正策略[J].电工技术学报,2016,31(09):50-57.
- [15] 董曼玲,谢施君,贺恒鑫,等.基于 PSCAD/EMTDC 逆变器自定义定关断角控制的实现[J].南方电网技术,2009,3(1):36-40.
- [16] Michael Sheng-Pu Hwang, Alan R. Wood. Harmonic state-space modelling of a controlled HVDC converter. Electric Power Systems Research, 2015. 124: 65-73.
- [17] 汤奕,郑晨一.高压直流输电系统换相失败影响因素研究综述[J].中国电机工程学报,2019,39(02):499-513+647.
- [18] 赵中原,邱毓昌,于永明,王建生.用晶闸管宏模型分析换流阀内电压分布特性

- [J]. 电网技术, 2003(09):33-36.
- [19] Zhang B , Cui X , Zeng R , et al. Calculation of DC current distribution in AC power system near HVDC system by using moment method coupled to circuit equations[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4):703-706.
- [20] Ye Zhang et al. Large Time Step Electromagnetic Transient Simulation of Large Scale Power System Based on Time Domain Transformation Method[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 223(1).
- [21] Hansen, Arne, Havemann, et al. Decreasing the Commutation Failure Frequency in HVDC Transmission System.[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(3):1022-1022.
- [22] Zhang L, Dofnas L. A novel method to mitigate commutation failures in HVDC systems[C]. Proceedings of International Conference on Power System Technology, Kunming, 2002.
- [23] 董曼玲, 谢施君, 何俊佳, 等. 采用 ATP/EMTP 的 CIGRE HVDC 建模与仿真[J]. 高电压技术, 2010, 36(3):796-804.
- [24] 赵向磊. 基于 PSCAD 的宁东直流输电系统建模与仿真分析[D]. 山东大学, 2014.
- [25] 杨洋, 肖湘宁, 王昊, 刘学忠, 吴磊. 电力系统数字混合仿真技术综述及展望[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(03):203-210+223.
- [26] 董毅峰, 王彦良, 韩佶, 李姚旺, 苗世洪, 侯俊贤. 电力系统高效电磁暂态仿真技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(08):2213-2231+2532.
- [27] 陈鹏伟, 刘奕泽, 阮新波, 陈新, 孙雅旻. 电力电子化电力系统随机电磁暂态仿真算法 [J/OL]. 中国电机工程学报 :1-12[2021-03-31]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201526>.
- [28] 贺杨烺, 郑晓冬, 邵能灵, 侯俊贤, 徐晋, 黄文焘. 交直流混联电网 LCC-HVDC 换流器建模方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11):3119-3130.
- [29] 韩民晓, 丁辉, 陈修宇, 林畅. 高压直流输电系统电磁暂态建模[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008(04):7-11.
- [30] 赵利刚, 洪潮, 涂亮, 张东辉, 甄鸿越, 曾勇刚. 多端直流输电系统机电暂态建模研究与实现[J]. 南方电网技术, 2017, 11(07):26-31.
- [31] 朱林, 陈宇川, 蔡泽祥, 苏海林, 杨欢欢, 金小明, 周保荣, 张东辉. 基于直流系统故障响应特征的机电暂态建模方法[J]. 电力建设, 2016, 37(02):18-24.
- [32] 鲁晓军, 林卫星, 文劲宇, 李云丰, 吴亚楠, 安婷. 直流电网模块式小信号建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11):2880-2889.
- [33] 饶华兴, 李强, 王永, 代祥, 谭炜东. 基于精细积分法的 HVDC 模型的求解[J]. 电

- 力学报,2018,33(02):111-115+181.
- [34] 黄伟煌,李明,郭铸,陈鑫全,黎炳坤.基于小干扰稳定性的多端混合高压直流输电系统控制参数分析与优化方法[J].电网技术,2020,44(08):2941-2949.
- [35] B.D.O. Anderson and R.W. Newcomb. Impedance synthesis via state-space techniques[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1968, 115(7) : 928-936.
- [36] 于浩,李鹏,王成山,丁承第,富晓鹏,俞悦,邢峰.基于状态变量分析的有源配电网电磁暂态仿真自动建模方法[J].电网技术,2015,39(06):1518-1524.
- [37] 鲁晓军,林卫星,文劲宇,等.直流电网模块式小信号建模方法[J].中国电机工程学报,2016,36(11):2880-2889.
- [38] 王磊,邓新昌,侯俊贤,穆世霞,董毅峰,王铁柱.适用于电磁暂态高效仿真的变流器分段广义状态空间平均模型[J].中国电机工程学报,2019,39(11):3130-3140.
- [39] 李崇涛,曾锋,杜正春,吴小芳,袁泉添.基于状态空间方法的频域阻抗计算及其灵敏度分析方法[J].电网技术,2020,44(02):621-629.
- [40] Zhihui Dai et al. State-space analysis based pole-to-ground line fault isolation strategy for LCC-HVDC systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(10) : 1933-1941.
- [41] 赵云灏.高压直流系统动态相量建模与控制策略研究[D].华北电力大学(北京),2017.
- [42] 黄星海.采用电网换相换流器的高压直流系统控制参数整定方法研究[D].华南理工大学,2020.
- [43] Osauskas C, Wood A. Small-signal dynamic modeling of HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 220-225.
- [44] Kwon D, Kim Y J, Moon S I. Modeling and Analysis of an LCC HVDC System Using DC Voltage Control to Improve Transient Response and Short-Term Power Transfer Capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018:1-1.
- [45] Zhang M, Yuan X. Modeling of LCC HVDC system based on mass-damping-spring concept[C]//2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, 2016.
- [46] 李崇涛,林啸,赵勇,等.高压直流输电系统暂态过程的解析解法(一):数学模型[J].电网技术,2017,41(1):1-7.
- [47] 李崇涛,林啸,赵勇,等.高压直流输电系统暂态过程的解析解法(二):算法与算例[J].电网技术,2017,41(1):8-13.
- [48] 程佩芬,李崇涛,傅闯,等.基于状态空间法的高压直流输电系统电磁暂态简化模型的解析算法[J].电工技术学报,2019,34(6):1230-1239.
- [49] 张秋实,傅闯,戴栋,等.高压直流输电开路试验机理分析及解析计算[J].电力系

统保护与控制,2019,47(5):96-105.

- [50] 张秋实. 高压直流输电系统开路试验仿真分析与解析计算研究[D]. 华南理工大学, 2018.
- [51] 李越. 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[D]. 华北电力大学(北京), 2017.
- [52] 文俊, 殷威扬, 温家良, 韩民晓. 高压直流输电系统换流器技术综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(02): 16-24.
- [53] X.Y. Li. A nonlinear emergency control strategy for HVDC transmission systems[J]. Electric Power Systems Research, 2003, 67(3): 153-159.
- [54] 鲁成栋, 肖登明, 秦松林. 特高压直流换流阀的运行性能及其失效机制[J]. 电气技术, 2014(4): 5-10.
- [55] 周长春, 徐政. 直流输电准稳态模型有效性的仿真验证[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 33-36.
- [56] 单俊儒, 刘崇茹, 李欢, 魏伟. 考虑锁相环和换相失败的 LCC-HVDC 闭环动态相量仿真模型 [J/OL]. 中国电机工程学报 :1-12[2021-03-08]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201200>.
- [57] 黎小林, 黄莹, 谢施君, 董曼玲, 贺恒鑫, 张丹丹, 何俊佳. 基于 PSCAD/EMTDC 的锁相环建模与性能分析[J]. 南方电网技术, 2008(04): 42-46.
- [58] 刘栋, 唐绍普, 胡祥楠, 等. 电力系统基础仿真算法对比分析研究[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(2): 137-143.
- [59] 乐健, 胡仁喜, 等. PSCAD X4 电路设计与仿真从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 262-266.
- [60] 尉龙, 宋吉江, 孙磊. 基于 PSCAD 的 CIGRE HVDC 模型控制系统研究[J]. 山东理工大学学报 (自然科学版), 2014, 28(5): 69-75.
- [61] Faruque M O, Zhang Y Y, Dinavahi V. Detailed modeling of CIGRE HVDC benchmark system using PSCAD/EMTDC and PSB/SIMULINK[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 378-387.
- [62] Zhihui Dai, Ningning Liu, Cheng Zhang, et al. State-space analysis based pole-to-ground line fault isolation strategy for LCC-HVDC systems. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(10): 1933-1941.
- [63] 郝婧. 基于 EMTDC 仿真平台的特高压直流输电控制系统建模的研究[D]. 华北电力大学, 2012.

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] 第一作者：Deepening Research on State Space Analytical Model of HVDC Transmission System[C], 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), May 28-30, 2021, Wuhan, China. (EI 收录)
- [2] 第三作者：Effects of Inverter Side Parameters on Stability and Dynamic Performance of HVDC Transmission Control System[C], 2020 10th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES), December 26-28, 2020, Chengdu, China, pp. 61-66. (EI 收录)

（二）参加的科研工作

- [1] 南方电网科学研究院科技项目，基于先进控制系统的高压直流故障响应建模研究。2018.12-2021.04，主研人。

致 谢

时光如白驹过隙，转瞬即逝，三年的研究生生活和七年的华电求学生涯临近结束，临别之际，我要向所有给予我支持、帮助和鼓励的人表示最诚挚的谢意。

首先，对我的研究生导师刘崇茹教授和副导师郑乐老师表示衷心的感谢！从课题的选择，到文章的框架安排，再到论文的撰写和修改，无不倾注着两位老师的汗水和心血。导师们严谨认真的治学态度、忘我投入的工作精神和乐观豁达的人生境界都给我留下了深刻印象。在我的课题完成过程中，我曾多次遇到困难，两位老师总会在百忙中抽出时间给予耐心而细致的指导和鼓励。研究生期间，深深受益于刘老师的关心、爱护和谆谆教导。作为老师，点拨迷津，让人如沐春风；作为长辈，关怀备至，让人感念至深。能师从刘老师，我为自己感到庆幸。在此向两位老师表示我最诚挚的敬意和感谢！

同时，我也要感谢我的师兄姐妹们。感谢喻建瑜师兄，在科研道路上为我答疑解惑、悉心指导，不厌其烦的教我编程建模；感谢苏晨博师兄，对我学术上的启发和帮助，为我推荐参考书籍和论文；感谢王洁聪、徐诗甜师姐，在日常工作和生活中对我关怀备至；感谢同届同门李至峪、侯延琦、谢爵昊、单俊儒，谢谢你们一直以来的帮助和鼓励；感谢董浩云、李志显师弟，有你们的陪伴使我的研究生生活更加充实有趣。还要感谢 634 实验室的每一位伙伴，是你们营造了良好的科研氛围，让实验室像家一样温暖。

在三年的研究生阶段学习生活中，院领导、老师以及身边的许多同学、朋友都给予我无微不至的关心和帮助，在此谨向他们表示衷心的感谢！

最后，特别感谢我的父母，感谢他们给予我的物质支持、精神鼓励和关心爱护，他们的付出、理解和包容是我完成学业的精神支柱，父母的殷切期望是我前进的最大动力。