

华北电力大学

专业硕士学位论文

差异化步长下模块化多电平换流器的
仿真技术研究

Research on Simulation Technology of Modular
Multilevel Converter with Different Step

王嘉钰

2017年3月

国内图书分类号：TM721.1
国际图书分类号：621.3

学校代码：10079
密级：公开

专业硕士学位论文

差异化步长下模块化多电平换流器的 仿真技术研究

硕士研究生：王嘉钰

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: TM721.1

U.D.C: 621.3

Thesis for the Master Degree

**Research on Simulation Technology of Modular
Multilevel Converter with Different Step**

Candidate:	Wang Jiayu
Supervisor:	Prof. Liu Chongru
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Electrical Engineering
School:	School of Electrical and Electronic Engineering
Date of Defence:	March, 2017
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

摘 要

当今世界，电力系统的容量随着用电负荷量不断增加，负荷性质和类型复杂，其暂态过程非常迅速，电力行业的发展深深牵动着国民经济各行业。由于电力负荷的复杂性、气候的变化、自然灾害的突发性，电力系统在各个时间断面下的状态基本不同，采用传统的物理仿真分析已经受到了很大的限制，对研究整个电力系统动态特性电力系统数字仿真也就愈发重要，并因此而成为电力系统研究、规划和设计的不可忽视的手段。模块化多电平换流器（modular multilevel converter, MMC）以其优良的特性，近些年迅速发展为柔性直流输电的主要支撑力量，那么针对 MMC 的仿真技术研究就显得尤为重要。

本文针对差异化步长下 MMC-HVDC 的仿真适应性进行了研究。从电磁暂态仿真分析原理出发，介绍了基于节点分析法和状态方程法的两类电磁暂态仿真方法，再结合 MMC 本身的结构特性，尤其是针对同步长下电磁暂态仿真的缺陷，提出了差异化步长仿真 MMC-HVDC 的必要性和合理性，后文的研究将依据该理论逐步展开。

为了兼顾 MMC-HVDC 系统电磁暂态仿真的精确性与耗时少的特点，在 PSCAD/EMTDC 平台下实现了一种混合步长仿真算法。该算法在 MMC 详细等效模型的基础上，根据混合仿真的接口原理，建立了交流系统与 MMC 之间的接口模型，使得交流系统和控制系统在大步长下仿真，同时 MMC 则在小步长下进行精确地仿真。在 PSCAD/EMTDC 平台下搭建单端 MMC-HVDC 系统，通过与相同步长的 MMC-HVDC 仿真系统对比，验证了提出的混合步长仿真算法在仿真精度以及仿真速度方面的优越性。

针对隐式梯形法的计算误差问题，对基于戴维南等效原理的 MMC 桥臂电磁暂态仿真详细模型的数学原理进行分析，发现网络结构变化时，由于电容电流会发生突变，而采用隐式梯形法计算时会引入计算误差，PSCAD 的仿真计算结果佐证了这一发现。为此，提出了一种消除采用隐式梯形法的 MMC 桥臂详细等效模型计算误差的方法，在 PSCAD/EMTDC 下对比分析了误差消除前后电容电压在开关变化时刻的仿真结果，通过搭建 MMC-HVDC 仿真模型验证了优化计算模型的准确性。

关键词：模块化多电平换流器；混合仿真步长；接口模型；戴维南等效；梯形积分法；仿真精度

Abstract

Power system is a large time-varying complex system, occupying a very important position in the national economy. With the increasing of system size, the traditional physical simulation analysis has been greatly limited. The digital simulation of power system becomes an irreplaceable tool to study the dynamic characteristics of the whole power system, and becomes an important means of power system research, planning and design. The modular multi-level converter with its excellent characteristics, in recent years the rapid development of the main support for the flexible HVDC power, then the simulation technology of MMC research is particularly important.

The simulation adaptability of MMC-HVDC under different step size is studied. Based on the analysis principle of electromagnetic transient analysis, two kinds of electromagnetic transient simulation methods based on nodal analysis and state equation method are analyzed. Combined with the structural characteristics of MMC, especially for the synchronous electromagnetic simulation flaws. The necessity and rationality of hybrid simulation step on MMC-HVDC is put forward, which provides a theoretical basis for the follow-up research.

To get higher simulation precision, this paper proposes an algorithm which considering hybrid simulation step in MMC-HVDC system electromagnetic transient simulation. First, it is built on the MMC detailed equivalent model. Second, according to hybrid simulation interface method, the interface model is attained between the primary system and MMC. Owing to these two steps, it can realize that the primary system is simulated in big simulation step as well as the MMC is simulated in small step. Finally, 101-level MMC-HVDC system and two-terminal back to back system are built in PSCAD/EMTDC to testify the transient and dynamic response characteristics.

It is found that when the network structure changes owing to fault or switch of breakers calculation error may be introduced when using trapezoidal integration is used because of the mutation of the capacitor current, which is proved by the results of PSCAD simulation. To solve the problem, a method to eliminate the calculation error of MMC arm equivalent trapezoidal integration is proposed in this paper. The capacitor voltages before and after the elimination of the calculation error at the time of switch change are compared in PSCAD/EMTDC. A single-terminal 101-level MMC-HVDC is established and simulation results show that the proposed method is effective and correct.

Keywords: modular multi-level converter (MMC); hybrid simulation step; interface model; Thevenin's equivalent; trapezoidal integration; simulation precision

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 模块化多电平换流器的运行原理.....	2
1.2.1 模块化多电平换流器的结构.....	2
1.2.2 模块化多电平换流器的工作机制.....	3
1.3 模块化多电平换流器仿真研究动态.....	4
1.3.1 电力系统仿真软件现状.....	4
1.3.2 MMC-HVDC 的建模与仿真技术.....	6
1.4 本文主要工作.....	7
第 2 章 差异化步长下 MMC 仿真的适应性研究.....	8
2.1 电磁暂态仿真的理论基础.....	8
2.1.1 电磁暂态仿真的节点分析方法.....	8
2.1.2 电磁暂态仿真的状态方程方法.....	10
2.1.3 两种方法的实现要求.....	11
2.2 存在的问题.....	11
2.2.1 同步长电磁暂态仿真的局限性.....	12
2.3 差异化步长电磁暂态仿真的必要性.....	13
2.4 仿真步长的选择.....	14
2.5 本章小结.....	14
第 3 章 电磁暂态混合步长仿真算法的研究.....	15
3.1 电磁暂态混合仿真接口原理.....	15
3.1.1 接口位置的选取.....	15
3.1.2 接口模型的建立.....	16
3.2 大小步长接口等值模型.....	17
3.3 电磁暂态大小步长时序接口设计规则.....	17
3.3.1 时序接口设计.....	17
3.3.2 大小步长交互仿真程序流程图.....	19
3.4 仿真分析与验证.....	19
3.4.1 101 电平单端 MMC-HVDC 系统仿真验证.....	19

3.4.2 双端背靠背 MMC-HVDC 系统发生功率阶跃.....	25
3.5 不同仿真步长比的仿真适应性	28
3.6 本章小结	29
第 4 章 提高 MMC 高效电磁暂态模型仿真精度的方法	30
4.1 MMC 详细等效模型.....	30
4.2 提高 MMC 高效电磁暂态仿真精度的方法	32
4.2.1 电磁暂态计算的数值方法	32
4.2.2 计算误差的产生	32
4.2.3 提高仿真精度的方法	33
4.3 仿真分析	35
4.4 本章小结	37
第 5 章 结论与展望	39
参考文献	41
攻读硕士学位期间发表的论文及其它成果	44
攻读硕士学位期间参加的科研工作	45
致 谢	46

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景及选题意义

新时期，能源已经提升到国家的战略地位，关乎个人和国家的生存和发展，甚至整个地球的命运，每一次的技术革命都可以看成是能源的革命，从人力到蒸汽动力，蒸汽时代到来，从蒸汽到电能，从此光亮照亮了地球的夜晚，从电能到如今的原子能，太阳能等，新型能源蓬勃发展，可持续发展的社会理念深入人心，世界能源生产与消费的格局正在悄然发生变化。当前，资源的可持续供应问题成为约束世界能源发展的重要因素。为应对复杂的能源形势，解决能源开发利用造成的生态环境影响，进入 21 世纪以来，各国高度重视能源科技创新，我国新能源变革的目标可以归纳为：逐步减少化石能源的使用，以可再生能源替代，同时提高化石能源的高效率清洁的利用水平。新能源革命的浪潮不断推进，我国响应时代号召，大力发展新能源，电网的新能源发电量不断增加，努力建设安全、优质、经济、环保的智能电网^[1]。

同时，我国的电网建设也不甘落后，不断突破电网新技术，不断加入新能源、电力设备的应用，使得电力系统发展日趋复杂，从而电网运行人员更加难于对其进行监测、分析和调控。进入 21 世纪后，国内外大面积的停电事故时有发生，包括 2003 年意大利“9.28”大停电、2003 年美国 - 加拿大“8.14”大停电^[2-3]、2011 年巴西“2.4”大停电、印度“7.30”、“7.31”大停电等^[3]，这些事故给社会秩序和国民经济造成了严重的影响的同时，还警醒世人，电力系统的安全稳定运行相对于其经济性更为重要^[5]。

在上述的大停电事故中，电力系统从第一次元件故障，到整个系统崩溃，一般会有一个较长的过程，如果这期间运行人员能够进行正确的处理，完全可以避免大停电事故。可见，电网需要更加高效的状态监测和故障诊断系统，预想事故分析也相当必要，及时了解系统每个时刻的状态，并采取防范措施，可以尽快解除故障，恢复稳定，甚至提前预防事故的发生^[6]。

电力系统规模庞大，系统元件数目多，负荷多样且时刻变化，电能暂时也无可替代，电力行业已然成为国民经济的支柱行业。随着近年国家加大了对电网的改造，以及智能电网战略的提出^[7]，对电力系统的分析研究显得愈加重要。随着系统规模的不断增加，传统的物理仿真分析已经受到了很大的限制，电力系统的数字、实时

仿真已成为电力系统规划、设计和研究的重要手段。数字仿真的结果直接作为电力系统调度规划的参考依据，其结果的准确性直接关系到电网运行和规划决策的正确性。计算机技术的迅速发展，也为数字仿真提供了有利的条件。

1.2 模块化多电平换流器的运行原理

1.2.1 模块化多电平换流器的结构

图 1-1 所示的即为模块化多电平换流器 (modular multilevel converter, MMC) 的三相拓扑结构，O 点表示零电位参考点。每个换流器由 A 相、B 相、C 相 6 个桥臂构成，其中任意一个桥臂均由 N 个结构相同的子模块 (sub-module, SM) 与一个电抗器 L 串联构成，上下两个桥臂构成一个相单元^[8]。

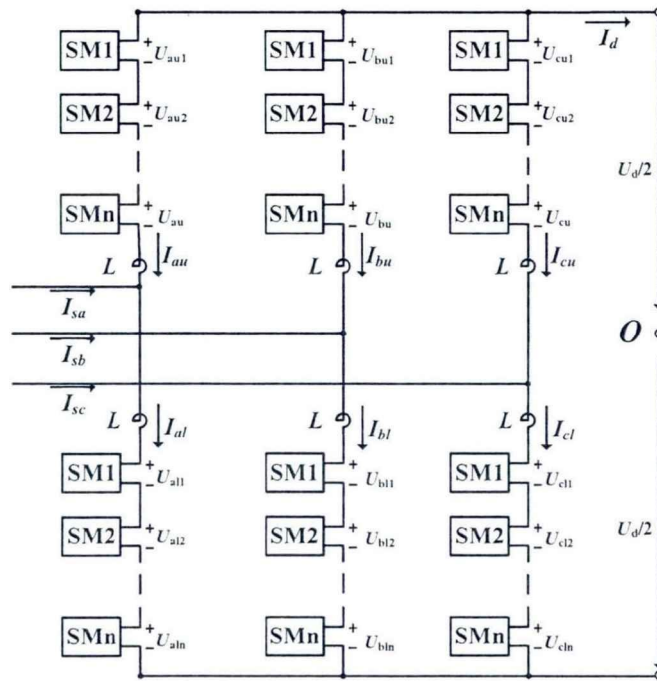


图 1-1 MMC 结构

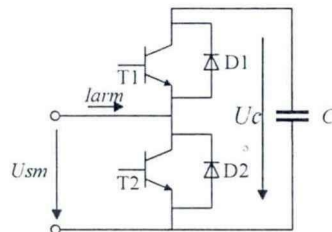


图 1-2 子模块拓扑结构

图 1-2 为 MMC 的半桥结构子模块 (half-bridge SM, HBSM)，其中子模块的

结构主要是由 2 组 IGBT 开关 (T1 和 T2) 反并联二极管 (D1 和 D2) 构成开关组元件, 以及电容 (C) 组成。图中主要涉及到的桥臂电流、子模块端口电压和子模块电容电压分别用 I_{arms} 、 U_{sm} 和 U_c 表示。

1.2.2 模块化多电平换流器的等值原理

基于戴维南定理等值的 MMC 的等效电路如图 1-3 所示。其中 P 表示换流器直流侧正极母线, 相对于参考点 O 的电压为 $U_{dc}/2$; N 表示换流器直流侧负极母线, 相对于参考点 O 的电压为 $-U_{dc}/2$ 。MMC 中三个相单元严格对称, 每相桥臂可以通过子模块的投入和切除来控制输出子模块电压, 再通过子模块的等效串联结构, 那么每相桥臂可视为一个可控电压源^[9]。例如 a 相, 桥臂等效电阻 R 以及桥臂电抗器 L_0 的压降忽略后可得

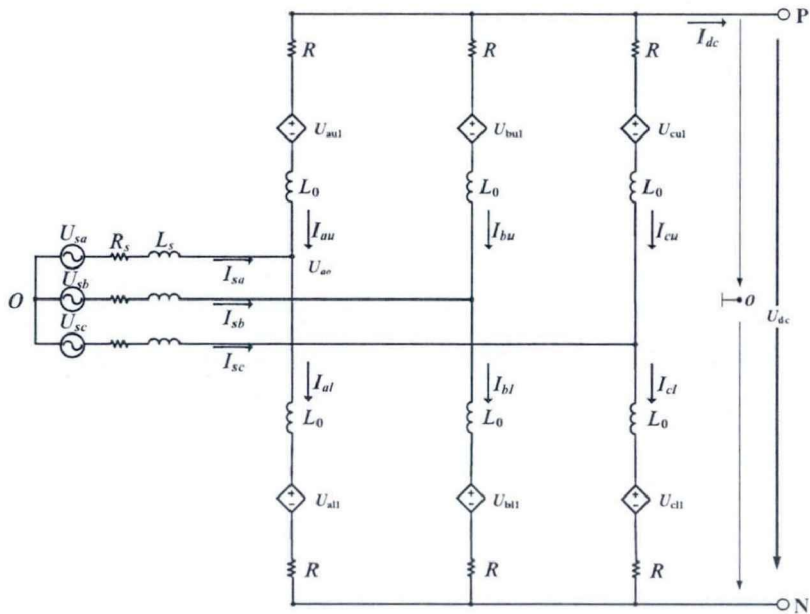


图 1-3 MMC 等效电路图

$$\left. \begin{aligned} U_{aul} &= \frac{1}{2}U_{dc} - U_{ao} \\ U_{aal} &= \frac{1}{2}U_{dc} + U_{ao} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

上式中两式相加, 得到

$$U_{aul} + U_{aal} = U_{dc} \quad (1-2)$$

由式 (1-1)、式 (1-2) 可以得出, MMC 正常运行时每相单元中处于投入状态的子模块数保持不变, 这样才能起到维持直流电压 U_{dc} 稳定的效果。

基于 MMC 中三相严格对称性, 则相单元中三组上、下桥臂也严格对称, 直流

电流 I_{dc} 在六个桥臂中也均分。例如 a 相，其输出端电流均分到 a 相上、下两个桥臂当中。进一步地，在不计相间环流的情况下，可以得到 a 相上、下桥臂电流为

$$\left. \begin{aligned} I_{au1} &= -\frac{1}{3}I_{dc} - \frac{1}{2}I_{sa} \\ I_{a1} &= -\frac{1}{3}I_{dc} + \frac{1}{2}I_{sa} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

根据上述原理，当 a 相上桥臂中所有子模块都投入时，a 相下桥臂中所有子模块都要切除使 $U_{a1}=0$ ，才能满足直流电压达到 U_{dc} 。通常情况下，一个相单元中处于投入状态的子模块数要维持为 N 个，上下两个桥臂子模块总数为 $2N$ 个。那么 MMC 最多能输出 $N+1$ 个电平。

以 HBSM 结构的 MMC 为例，子模块的运行方式是根据其中 2 个 IGBT 的开关状态来划分，子模块的切除、投入和闭锁三种状态如表 1-1 所示，其中 1 代表高电平，表示开关闭合，0 代表低电平，表示开关断开，“—”表示子模块电容既不充电也不放电。

表 1-1 子模块运行方式

T1	T2	I_{arm}	充电/放电	输出电压	运行方式
0	1	$I_{arm} > 0$	—	0	切除
0	1	$I_{arm} < 0$	—	0	切除
1	0	$I_{arm} > 0$	充电	V_c	投入
1	0	$I_{arm} < 0$	放电	V_c	投入
0	0	$I_{arm} > 0$	充电	V_c	闭锁
0	0	$I_{arm} < 0$	—	0	闭锁

正常运行时，T1 和 T2 严格互补，从表 1-1 中可以看出，子模块运行于投入或切除两种状态。

1.3 模块化多电平换流器仿真研究动态

1.3.1 电力系统仿真软件现状

电力系统仿真系统大概经历了以下三个历史阶段：

阶段一：以相似理论为基础，以实际旋转电机为代表的动力系统动态仿真系统。电力系统动态仿真实验系统是用于电力系统研究的最早的实时仿真工具。电力系统动态模型实验室硬件通常由多个规模较小的电机、若干个 π 型线路模型，电源，负载，开关模型以及相应的监控和控制系统组成。通常是用于电力系统的机电瞬态和动态过程的实时仿真。这些设备的物理意义非常明确，其主要优点则表现为直观和清晰。缺点是设备昂贵并且占地面积相当大，器件的兼容性以及可扩展性也很差，

难以大范围或规模的推广。但是它们在电力系统仿真中的作用不可忽视，很有可能将其改进后，在未来会大放异彩。

阶段二：数模混合实时仿真系统。数模混合实时仿真系统除了对电机，动态负载等旋转部件进行数字组件仿真外，其余部件与所使用的动态模型部件基本相同。数模实时仿真的灵活性大大提高，其研究深入到电力系统不曾触及的范围，精确模拟电力系统各元件的电磁暂态过程得以实现，当然还能够模拟机电暂态过程，以及对包含动态过程的整个电力系统过程的扰动进行仿真。硬件的性能也影响到仿真的精度。在数模混合仿真系统的实验当中，由于诸如线路和变压器的部件是模拟部件，因而发电机等的数字部件彼此完全解耦。只要数字组件不涉及数值不稳定性，那么数值振荡问题在整个仿真系统中就不会产生^[10]。但是，由于数模混合实时仿真系统的大部分模型仍是以相似理论为基础的物理模型，导致其仿真器件也具有设备昂贵、占地面积大，兼容性和可扩展性差强人意的动态模型的缺点，难以大规模推广。

阶段三：全数字实时仿真系统。虽然电力系统动态仿真实验系统和数模混合实时仿真系统在电力系统的实时研究中起着重要作用，由于数模仿真系统的建模周期长、重复、适用性较差，实验室占地面积较大，科研工作者们更倾向于对性能更加优良的全数字实时仿真系统进行探究。90年代出现的高速数字信号处理器（DSP），开启了开发和研制全数字实时仿真系统的工作新篇章。数字实时仿真系统基本上是以多核并行处理技术为依托，即使在不同的硬件平台上实验，从系统仿真软件下载到该CPU的软件来决定该CPU模拟什么电力系统元件^[11]。当设备带宽和仿真步长满足要求时，系统软件就能决定系统自动化的一次模型。这一卓越的功能为用户提供了充足的空间，用于未来模拟新元件。

当代应用最广泛的电力系统仿真软件主要分为三大类：

- 1) 机电暂态仿真程序，如 PSD-BPA、PSASP（Power System Analysis Software Package）以及 PSS/E（Power System Simulator for Engineering）等；
- 2) 电磁暂态仿真程序，如 PSCAD/EMTDC 和 NETOMAC 等；
- 3) 数模混合实时仿真软件，如电力系统实时数字仿真器 RTDS，ADPSS 等。

电力系统分析软件 PSD-BPA 是美国 BPA（Bonneville Power Administration）邦纳维尔电力局研制，国内从美国引进的仿真软件；PSASP 是中国电力研究院自主研发的电力系统仿真程序，这两个仿真软件是目前应用于国内最广泛的电力系统仿真程序。美国电力技术公司（Siemens PTI）开发了适用范围较广的电力系统仿真软件 PSS/E，加拿大曼尼托巴水电局开发了适用于电磁暂态分析的软件 PSCAD/EMTDC，另外德国西门子公司推出了电力系统仿真分析软件 NETOMAC，以上三款仿真软件在国际范围内已得到广泛认可和应用。目前国内各研究单位和高校已逐渐开始学习和使用。实时数字仿真器 RTDS 形成于加拿大曼尼托巴水电局，其计算效率高，可

实现实时仿真，该系统已被广泛应用于许多国家和地区^[12]。中国电科院研发的电力系统全数字实时仿真装置又名 ADPSS，是基于高性能机群服务器的全数字实时仿真系统^[13]，它继承了 PSASP 的优良特性，并在其基础上进行大规模复杂的交直流电力系统的机电-电磁暂态混合实时仿真、机电暂态实时仿真以及外接物理装置仿真试验等^[14]。

以上所述软件在长时间的实践应用中均有着相当准确可靠的仿真结果，同时又各具特色，因而得到了国内各电网公司及科研机构的广泛应用。

1.3.2 MMC-HVDC 的建模与仿真技术

随着现代电力电子器件和新型控制技术的发展，新一代的基于电压源换流器的高压直流输电（voltage source converter based on HVDC，VSC-HVDC）技术已在工程实际中广泛应用，其在新能源接入、独立无功支持等方面优于传统直流技术^[15-16]。其中，MMC 相比两电平、三电平换流器，具有模块化程度高、开关损耗更低^[17]、阶跃电压更低、波形质量更高、故障处理更强等优势，成为 VSC-HVDC 的发展趋势。

文献[18]首次提出基于戴维南等效原理的 MMC 模型，为 MMC 电磁暂态离线等效模型和实时仿真模型研究奠定了坚实的理论基础。

文献[19]提出了一种基于节点电压法的仿真方法，该方法将原有的 MMC 等值网络矩阵分割成若干个小矩阵，以此减少等值网络矩阵计算维度，提升了仿真速度，但这种方法造成了子模块与主网络之间相差一个步长的仿真时间。

文献[20]提出了一种快速同步解决方案，通过诺顿等效将原有的桥臂等值为 2 节点等值电路输出给等值网络矩阵，但该文献对电容采用了梯形积分法，如不加处理会出现梯形积分的计算误差问题。

为此，文献[21]采用了后退欧拉法来避免误差，但牺牲了仿真精度。

文献[22]利用实时数字仿真器 RTDS 的小步长环境将 MMC 每相电路分别封装，利用小步长线路模型进行互联的建模方法，该方法虽然考虑了小步长的仿真精度优势，但是目前 RTDS 处理器计算容量不足，导致其不能进行大容量、高电平的 MMC 仿真。

文献[23]研究了桥臂的电气特性，通过建立桥臂数学模型来模拟闭锁状态和解闭锁状态，并依据一些简化条件，得到了桥臂的简化模型，再根据此简化模型形成了桥臂的等效电路以及相应电气关系，使之可以模拟 MMC 闭锁与解闭锁状态。该算法可以大幅提高仿真速度。但该方法因为简化桥臂模型，在一定程度上也会损失仿真精度。

文献[24]通过进一步推导 Dommel 等值计算方法,用历史电流源来递推 MMC 模型中电容、电感,使得递推公式里不会再出现支路电流的中间计算,提高了仿真计算速度,但此文献引用了隐式梯形积分法,而且基于历史电流源的计算过程意味着递推公式中的电流会出现包含 2 倍仿真步长的分量,一旦子模块的状态改变,很容易引起计算误差。

1.4 本文主要工作

本文的主要工作是围绕着 MMC 的混合步长仿真以及仿真精度的提高两个方面展开。其中在展开 MMC-HVDC 混合仿真研究之前,需要建立 MMC-HVDC 混合仿真模型,而 MMC-HVDC 在电磁暂态混合仿真中却存在的建模困难和仿真效率低等问题。因此,本文首先对 MMC-HVDC 混合步长仿真的适用性进行了分析与探讨,在此基础上,建立了大规模 MMC-HVDC 混合步长仿真的详细等效模型系统,最后针对 MMC 电磁暂态模型仿真精度的提高进行了优化和研究。

第 2 章,讨论了差异化步长下 MMC-HVDC 的仿真适应性。从电磁暂态仿真分析原理出发,分析了基于节点分析法和状态方程法的两类电磁暂态仿真方法,再结合 MMC 本身的结构特性,尤其是同步长下电磁暂态仿真的缺陷,分析了差异化步长仿真 MMC-HVDC 的必要性和合理性,并提出了差异化步长具体值的选取方法,为第 3 章的研究内容提供了一定的理论依据。

第 3 章,实现了一种基于 PSCAD/EMTDC 的 MMC-HVDC 型柔性直流输电系统电磁暂态混合步长仿真算法。在 MMC 详细等效模型的基础上,根据混合仿真的接口原理,建立了交流系统与 MMC 之间的接口模型,使得交流系统和控制系统在大步长下仿真,同时 MMC 则在小步长下进行精确地仿真。本章最后,利用 PSCAD/EMTDC 平台搭建单端 MMC-HVDC 系统,通过与相同步长的 MMC-HVDC 仿真系统对比,验证了本章提出的混合步长仿真算法在仿真精度以及仿真耗时方面的优越性。

第 4 章,对基于戴维南等效原理的 MMC 桥臂电磁暂态仿真详细模型的数学原理进行分析,发现当仿真过程中发生故障或开关动作等而引起网络结构变化时,由于电容电流会发生突变,当采用梯形积分法计算时会引入计算误差,PSCAD 的仿真计算结果佐证了这一发现。为次,本章提出一种消除 MMC 桥臂详细等效模型梯形积分计算误差的方法,在 PSCAD/EMTDC 下对比分析了误差消除前后电容电压在开关变化时刻的仿真结果,最后通过搭建 MMC-HVDC 仿真系统验证了优化计算模型的准确性。

第 5 章总结全文,并展望了 MMC 仿真技术研究的后续工作。

第 2 章 差异化步长下 MMC 仿真的适应性研究

电力系统仿真包含两个重要组成部分，其一为电磁暂态仿真，其能准确模拟系统的状态、能得到较稳定的数值解、适用于各种故障下的分析，在全世界范围应用广泛。其二为机电暂态仿真，机电暂态忽略了元件的电磁暂态过程，更加关注机械和电气量的变化关系，其过程更接近于稳态。二者的恰当使用能够解决电力系统各种情况下的暂态仿真问题。电磁暂态仿真涵盖了电力系统设计、规划、运行及科研的方方面面，能够解析电力系统的暂态行为和精确模拟暂态过程，成为电力系统分析不可或缺的工具。

2.1 电磁暂态仿真的理论基础

2.1.1 电磁暂态仿真的节点分析方法

电力系统电磁暂态仿真从原理上可以概括为对动力学系统时域响应的求取，包括系统本身的数学模型和与之相适应的数值计算方法^[25]。电力系统的数学模型包括系统的约束方程（由系统的网络拓扑决定）；伏安关系方程（由各元件自身特性决定）。前者约束方程即满足基尔霍夫定律的 KCL 和 KVL 方程，为代数方程；后者伏安关系方程可以是代数方程、微分方程，也可以为非线性方程。

以图 2-1 所示的电感为例，式 (2-1) 表示了电感微分方程基本的 $U-I$ 关系，电磁暂态仿真采用式 (2-1) 的形式；而机电暂态仿真则采用式 (2-2) 所示的电压电流相量形式的代数方程：

$$\left. \begin{aligned} v_p - v_q &= L \frac{di_{pq}}{dt} \\ i_p - i_q &= C \frac{dv_{pq}}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_p - \dot{V}_q &= j\omega L \dot{I}_{pq} \\ \dot{I}_p - \dot{I}_q &= j\omega C \dot{V}_{pq} \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

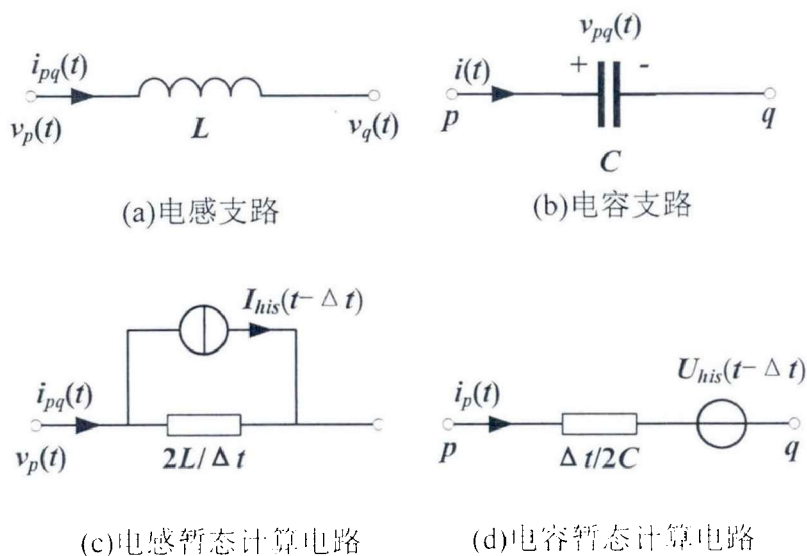


图 2-1 L、C 支路及其暂态计算等值电路

从式 (2-2) 可以看到流过电感的电流以及电感上面的压降之间的关系，进一步地，当系统中元件的特性能够以此种相量形式的约束表达时，电力系统模型即可用节点电压方程表示

$$YU = I \tag{2-3}$$

而电力系统暂态仿真的基础就是利用数值求解方法分析求解电力系统全系统的数学模型（方程）。全系统数学模型（方程）可以由一组微分方程和代数方程来代替，这组方程由电力系统各元件模型根据网络拓扑关系形成，即

$$px = f(x, y) \tag{2-4}$$

$$g(x, y) = 0 \tag{2-5}$$

代数方程组包含用同步旋转坐标参考系描述各节点电压电流之间关系的网络方程、各发电机定子绕组电压平衡方程和用于考虑静态特性的负荷功率与节点电压之间的关系式。微分方程包括各发电机转子运动方程、描述各发电机暂态和次暂态电动势变化的微分方程、描述各发电机励磁系统暂态过程的微分方程和描述各原动机及调速系统暂态过程的微分方程，以及描述感应电动机和各种动态元件暂态过程的微分方程^[26]。

式 (2-4)、(2-5) 这组代数-微分方程奠定了机电暂态仿真的基础。之后的求解过程便是使用不同的数值积分进行差分，再联立整个差分后的代数-微分方程组，或用交替求解的算法分别求解代数方程组和微分方程组^[25]。

式 (2-1) 所示的伏安关系方程与式 (2-2) 所示的相量形式代数方程在求解算法有很大差异，式 (2-1) 不能通过联立节点方程形成节点电压形式的网络方程。因为联立节点形成节点电压方程的方法仅适用于隐式积分法。所以将式 (2-1) 所示的

伏安关系方程按照采用的数值积分法转化成相应的差分方程，例如梯形积分法表示的差分方程为

$$x(t+\Delta t) = x(t) + \frac{\Delta t}{2} \{f[x(t+\Delta t), y(t+\Delta t)] + f[x(t), y(t)]\} \quad (2-6)$$

其中 t 和 $t+\Delta t$ 分别表示间隔一个积分步长的仿真时刻。

然后在与 $t+\Delta t$ 时刻的代数方程式

$$g[x(t+\Delta t), y(t+\Delta t)] = 0 \quad (2-7)$$

联立求解，从而同时得出 $x(t+\Delta t)$ 和 $y(t+\Delta t)$ 。以上过程描述成电感的形式为

$$\left. \begin{aligned} i_{pq}(t) &= \frac{\Delta t}{2L} [v_p(t) - v_q(t)] + I_{his}(t - \Delta t) \\ I_{his}(t - \Delta t) &= i_{pq}(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} [v_p(t - \Delta t) - v_q(t - \Delta t)] \\ G_L &= \frac{\Delta t}{2L} \end{aligned} \right\} \quad (2-8)$$

那么通过式 (2-8)，我们可以看到电感的暂态等值计算电路由电导 G_L 与前一时刻的历史电流源并联的诺顿等效电路形式构成，如图 2-1 (c) 所示。那么由此形成电磁暂态仿真的基本方程即通过式 (2-8) 解析的差分方程：

$$Gu = i \quad (2-9)$$

此时的式 (2-9) 已经包含了具体的数值积分方法，从而将整个系统的数学模型与数值计算方法结合在一起，这同时也是式 (2-4)、(2-5) 与 (2-9) 的主要区别之处。

2.1.2 电磁暂态仿真的状态方程方法

另一种求解算法即为状态方程法。化成标准形式的一阶联立微分方程组，成为状态方程。有如下形式

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (2-10)$$

式中，对于具有 n 个状态变量， m 个输入（独立电源）的电路， \dot{x} 表示 n 维列向量， u 表示 m 维列向量， A 为 n 阶常数系数方阵， B 为 $n \times m$ 阶常数列控制矩阵。

如图 2-1 所示的电感、电容暂态等值电路中，由于把电容用电压源代替、电感用电流源代替后所得电路为一电阻电路，而由这一电阻电路可导出输出方程，因此，输出方程为一组代数方程，又可以写成

$$y = Cx + Du \quad (2-11)$$

式中 x 表示状态变量, u 表示输入向量, y 表示输出向量, C 和 D 表示系数矩阵, 仅与元件值大小和网络拓扑结构相关。

与式 (2-4)、(2-5) 一样, 用状态方程描述的系统模型同样独立于数值算法。具有标准形式的状态方程可以使用各种成熟的数值计算程序进行求解, 唯一的不足是通常并不能直接得到它。与节点方程相比, 状态方程的形成要复杂和困难的多^[25]。

2.1.3 两种方法的实现要求

节点分析法和状态方程法相当于电磁暂态仿真的左膀右臂, 缺一不可。对节点分析法而言, 差分方程形式的电磁暂态仿真已经使用了具体数值积分方法, 那么具体的数值积分算法本身也应实现以下要求:

- (1) 算法表达形式要简易, 从而简化了历史项电压源或电流源的表达式;
- (2) 算法应具有良好的数值稳定性;
- (3) 算法应具有较高的精度;
- (4) 最后考虑算法的计算速度不能过慢。

欧拉法、显式龙格-库塔法、隐式梯形积分法、改进欧拉法、预测-校正法和隐式多步法等各自有不同的特点^[27], 但都是学者们研究和用过的方法。目前一般认为隐式梯形积分法对于计算速度、精度、数值稳定性和对刚性微分方程组的适应性等要求都能满足。这样根据隐式梯形法得到的式 (2-9) 就构成了电磁暂态类程序 (Electromagnetic Transient Program, EMTP) 的基础。

尽管状态方程法具有灵活的表达形式, 但其仿真计算速度往往差强人意, 远不如节点分析法具有优势, 特别是针对大规模电网仿真, 状态方程法的仿真计算时间很难尽如人意。因此, 节点分析法还是目前广泛应用的电力系统电磁暂态类仿真软件计算的基础, 统称为 EMTP 类程序, 本文研究内容也基于 EMTP 类程序进行的相关算法仿真分析和计算。

2.2 存在的问题

电磁暂态仿真实论和方法在半个世纪前提出的时候, 由于当时软硬件的发展水平较低, 使得很多算法做了一些必要的简化处理, 从而能够保证算法的计算效率和计算速度。随着电网技术的不断发展与壮大, 过去的简化方法已经无法满足当前电网运行的要求, 电磁暂态仿真因此面临新的问题和挑战, 包括:

- (1) 电力系统中的各种新器件的出现对电磁暂态仿真建模过程提出了更高要

求。近年来风力发电系统模型的研究已经成熟，因此可以被纳入电磁暂态类程序的内置模型中，但是还有更多需要被开发和完善的模型来完善电力仿真系统，因此强大的用户定义建模功能就显得尤为重要。

(2) 随着现代电力电子技术的发展，各种应用场合越来越多地出现电力电子设备和控制系统，而仿真结果的精确度又很大程度上依赖于电力电子设备的开关动作和控制系统的动态过程，因此准确考虑开关动作及控制过程愈发关键。

(3) 计算规模随着网络容量的扩大而增加，那么要在保证计算精度前提下提高仿真速度这一问题也亟待解决。

(4) 当系统包含大量电力电子和控制设备时，系统的初始化过程往往比较复杂^[25]。也就是说，电磁暂态仿真起始于网络的稳态运行点，但获得需要的稳态解通常并不容易，目前使用的方法是零状态初始化，而零状态初始化本身就相当于一次暂态计算的过程。

2.2.1 同步长电磁暂态仿真的局限性

机电暂态仿真作为传统的交直流大系统的仿真分析方法，通常机电暂态模型用单相电路表示，物理量采用相量值，积分步长一般为毫秒级。电磁暂态仿真则采用三相电路进行分析，物理量采用瞬时值，可以描述晶闸管元件动作引起的间断过程^[28]，电磁暂态过程通常变化较快，一般积分步长在 $20\mu\text{s}\sim 100\mu\text{s}$ 之间。

随着高压直流输电、柔性交流输电系统等大量电力电子设备引入电力系统，电网的运行控制变得更加复杂。随着电压等级的提升和直流系统规模的扩大，仿真数据处理规模将呈现指数型增长^[30-32]。文献[33]提出了基于 VSC-HVDC (Voltage Source Converter, VSC) 的混合仿真技术，能很好的反映 VSC-HVDC 的动态特性，并在一定程度上提高了 VSC 仿真模型的仿真速度。

在电力系统仿真中，机电暂态仿真方法与电磁暂态仿真方法各有千秋，因此工程上经常将两种仿真结合考虑，国内外学者就机电暂态与电磁暂态的混合仿真已经做了很多有益的研究^[29,34-39]。但是针对 MMC 型柔性直流输电纯电磁暂态混合仿真的研究还少有涉及。原因在于大规模换流系统包含大量的高频电力电子换流器，而目前的电磁暂态仿真程序对于新型直流电网仿真都具有局限性。首先机电暂态类的仿真软件采用 10ms 的仿真步长，无法模拟直流侧的动态过程，在准确性上无法满足要求，在直流的研究中具有很大局限性^[40-42]。其次，电磁暂态类的仿真软件一般采用 $50\sim 100\mu\text{s}$ 的仿真步长，对于控制周期只有几个微妙的高频器件而言，仿真精度也难以达到要求。

2.3 差异化步长电磁暂态仿真的必要性

MMC 是近些年柔性直流输电在主电路拓扑方面的最新成果, 在工程中表现出很高的应用价值, 已成为柔性直流输电主电路拓扑的一种发展趋势, 现今国内外正在建设的大容量柔性直流输电工程均采用 MMC 或类似拓扑主电路。然而, MMC 中包含大量高频动作的电力电子器件, 尤其随着直流电压等级的提高, 其子模块数还要上升, 相应的电力电子器件数亦会增加。那么, 这些紧密耦合的电力电子开关的触发脉冲精度可以达到两三个微妙的量级, 因而在使用仿真工具进行高精度的电力系统仿真时, 传统步长算法已不再适用。

因此, RTDS 技术公司针对柔性直流输电仿真的特质, 充分考虑换流阀的开断状态变化周期很短这一特点, 为满足更高的仿真精度要求, 开发了一种新的仿真算法, 以进一步减少仿真步长。RTDS 公司研发了小步长模型, 步长可以达到 $1.4\sim 2.5\mu\text{s}$ 。利用小步长模型搭建小步长仿真电路网络, 并通过接口变压器与大步长电路相连, 不但能对仿真规模进行有效扩大, 还可以大幅度提高电磁暂态仿真精度。

但是, RTDS 应用了柔性直流输电仿真中所具有的实时性及小步长特点要求大量的硬件计算资源, 制约了柔性直流输电仿真规模的扩大。因此, 离线数字仿真工具 PSCAD/EMTDC 的仿真规模优点便占了上风。PSCAD/EMTDC 目前有三个版本: 学生版 (student)、教育版 (educational) 和专业版 (professional)。不同的版本支持不同的电气子系统数量、电气节点数、页面模块数和所含元件数, 其中对于专业版 (professional) 的电气子系统、电气节点数均无限制, 元件数量也达到了 65536 之多。这样一来, 系统仿真规模的制约将不再是难点。加上 PSCAD/EMTDC 可在时域描述和求解完整的电力系统及其控制的微分方程, 能够模拟仿真生产电力系统所有频段的响应, 限制仅在于用户自己选择的仿真时间步长, 可根据需要在微妙级之间变化。

遗憾的是, 目前 PSCAD/EMTDC 虽然可离线仿真规模较大的 MMC 型柔性直流系统, 但其仿真步长一旦设定, 对定步长系统而言, 在同一个仿真模型下仿真步长将不能更改。那么对于 MMC 型柔性直流系统的仿真, 除了要保证仿真计算速度不致过慢, 即不能一开始选取小步长作为全系统的仿真步长; 还要大幅提高模型仿真精度, 也就是说不能一开始选取大步长作为全系统的仿真步长, 如此会造成换流器中大量的全控型开关器件不能精确地仿真, 因此对换流器而言必须考虑那几个微妙级别的仿真小步长。在综合考量下, 选择考虑小步长仿真换流器的差异化仿真研究就显得尤为重要。

2.4 仿真步长的选择

正确选择仿真步长是电磁暂态仿真中必须解决的另一关键问题。仿真的实时性要求整套计算的所有步骤要在一个仿真步长内完成。一方面，采用小步长可以深入研究系统中更高频率特性的行为特征，因为其提高了系统最大响应频率；另外，采用小步长可以大幅提升系统研究的精度。但另一方面，更高的求解速度使小步长下的系统实现起来较为困难。尤其当系统规模增大时，每一个仿真步长下的计算量将成倍增加，若在保证计算的实时性会更加困难^[42]。一般来说，含直流系统的电磁暂态仿真选取步长为 50~100 μs 即可。但为了更精确对换流器中大量的电力电子器件仿真，可以考虑采用换流器内部仿真步长为 1.4~2.5 μs ，本文后续的仿真分析采用 2.5 μs ，同时交流系统和控制系统选择一般仿真步长 50~100 μs ，本文选取 50 μs 进行仿真分析验证。

2.5 本章小结

本章主要阐述了电磁暂态仿真的理论基础，分别介绍了电磁暂态仿真的节点分析法和状态方程法，并结合 MMC 自身结构特点，因其包含大量高频电力电子器件，导致一般电磁暂态仿真步长难以保证仿真精度同时兼顾仿真速度。所以，阐述了同步长电磁暂态仿真的局限性并提出了差异化步长电磁暂态仿真的必要性和合理性，最后说明了差异化步长的具体值选取。为后续第 3 章的仿真内容提供理论依据。

第3章 电磁暂态混合步长仿真算法的研究

为了克服 PSCAD/EMTDC 无法对换流器中大量的全控型开关器件进行精确地仿真这一不足,本章提出一种基于 PSCAD/EMTDC 的 MMC-HVDC 系统电磁暂态混合步长仿真算法,在 MMC 详细等效模型的基础上,根据混合仿真的接口原理,建立了交流系统与 MMC 之间的接口模型,使得交流系统和控制系统在大步长下仿真,同时 MMC 在小步长下进行精确地仿真。

3.1 电磁暂态混合仿真接口原理

电力系统仿真网络接口问题,其主要思路是:通过系统中某些支路,将大规模电力系统分割成多个子网络,然后将子网络内部的节点电压方程和连接各个子网络的支路电流方程联立求解,方程降阶化简后,先求出子网络之间联络支路上流过的电流,再将联络支路电流纳入各个子网的节点电压方程,最终完成整个网络的求解 [44]。

采用这种方法,需要解决的问题就是:如何设计电磁暂态程序的接口方式需要解决以下四个问题:(1)接口位置的选取;(2)与大步长电磁暂态网络仿真连接的小步长电磁暂态网络表示形式;(3)与小步长电磁暂态网络仿真连接的大步长电磁暂态网络表示形式;(4)接口时序的设计。

3.1.1 接口位置的选取

接口位置选为换流器出口母线,则电磁暂态小步长网络与电磁暂态大步长网络的互相等值比较简单,并且不受网络复杂程度的限制。

3.1.2 接口模型的建立

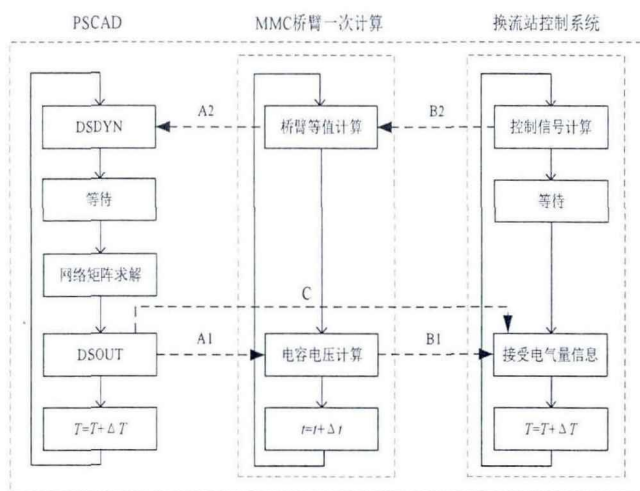


图 3-1 接口实现整体框架图

图 3-1 为混合仿真实接口实现整体框架图，图中三个功能单元分别为 PSCAD、MMC 桥臂一次计算、换流站控制系统，其功能如下：

(1) PSCAD 单元：负责一次系统和控制系统的仿真计算，其主要作用为求解整体等值网络矩阵。一次系统包含交流系统单元与 MMC 桥臂一次计算单元。

(2) MMC 桥臂一次计算单元：在网络矩阵求解前，计算桥臂的等值电路(本章选择戴维南等值电路)；在网络矩阵求解后，计算各个子模块的电容电压。

(3) 换流站控制系统单元：负责控制系统的仿真计算，包括功率控制、子模块电容电压平衡控制和环流抑制控制。

图 2-1 中涉及到数据传递部分，介绍如下：

A1：包括桥臂电流。用于在网络矩阵求解后将桥臂电流传输给 MMC 桥臂一次计算单元来计算电容电压。

A2：包括 MMC 桥臂一次计算得到的桥臂等值电路(戴维南等值电路)。用于在网络矩阵求解之前传输给交流系统。

B1：包括 MMC 桥臂一次计算出的各个子模块的电容电压。用于在网络矩阵求解之后，再经 MMC 桥臂一次计算后得到电容电压，将其传输给换流站控制系统。

B2：包括各个子模块的控制信号。在网络矩阵求解之前，根据上一时刻的状态，给出当前时刻的控制信号，传输给 MMC 桥臂一次计算单元。

C：包括换流站控制系统所需的所有电气量信号。用于在网络矩阵求解后传输给换流站控制系统。

ΔT 表示电磁暂态仿真大步长， Δt 表示电磁暂态仿真小步长。

3.2 大小步长接口等值模型

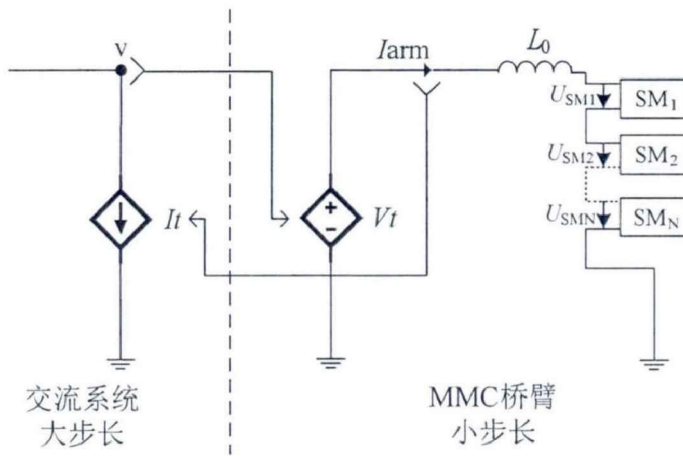


图 3-2 大小步长接口等值模型设计图

如图 3-2 所示，根据节点电压分析法，小步长网络与大步长网络在网络分割点处的电压应该相等。图中 v 点即为网络分割点，接口对侧即为与桥臂电感 L_0 串联三相 MMC 的六个桥臂。而交流系统处于大步长网络中，三相六桥臂（包含 6 个桥臂电感）处于小步长网络中。那么，小步长网络对大步长网络的接口模型可以等效为与交流系统并联的受控电流源 I_t ，其值 I_{arm} 为流过 MMC 桥臂的桥臂电流；而大步长网络对小步长网络的接口可以等效为与 MMC 桥臂并联的受控电压源 V_t ，其值为包含桥臂电感上压降的每个桥臂的总电压。

3.3 电磁暂态大小步长时序接口设计规则

3.3.1 时序接口设计

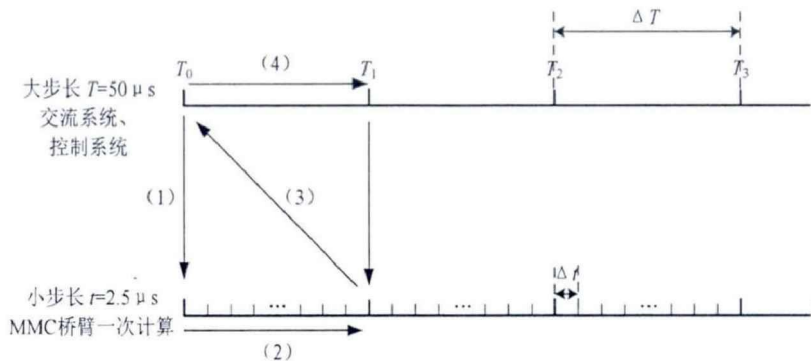


图 3-3 大小步长时序接口设计

混合仿真时序逻辑的宗旨即在稳态运行状态下，采用对侧网络的上一步的计算结果，结合本网络参数进行本网络的计算^[45]。由于交流系统、控制系统在大步长（50μs）环境下运行，MMC 桥臂一次计算在小步长（2.5μs）环境下运行，因此选择交流系统或控制系统的各时间点进行仿真数据交换。时序接口流程如图 3-3 所示，具体交换过程如下：

(1) 仿真开始时刻，桥臂电流 I_{arm} 以及控制系统产生的触发脉冲信号被传递给小步长 MMC 桥臂一次计算的过程；

(2) 在小步长运行环境下，MMC 桥臂一次计算依据戴维南定理等值计算的过程，得到等值网络 U_{eq} 、 R_{eq} 以及电容电压 U_c 。同时根据基尔霍夫定理，计算包含桥臂电感上压降的桥臂总电压 U_{armeq} 。此时大步长网络的仿真处于等待状态；

(3) 因为 (2) 中每一小步长均要计算一次桥臂电压总电压 U_{armeq} ，根据 3.2 节所述接口等值模型可知，最后传递给大步长交流系统的桥臂等效电压源 $U_{armeq}(T_{big})$ 如式 (3-1)：

$$U_{armeq}(T_{big}) = \frac{\sum_{i=1}^k U_{armi}(t_{small})}{k} + U_{L_0} \quad (3-1)$$

其中， $U_{armi}(t_{small})$ 为小步长下每次等值计算的桥臂电压， U_{L_0} 为桥臂电感上的压降， k 为小步长循环次数，因为本章中大步长与小步长相差 20 倍，则 $k=20$ 。

由于在 PSCAD 中利用梯形积分离散子模块电容时，电容电压 U_c 如式 (3-2) 所示，

$$U_c(t_2) = \frac{\Delta t}{2C} [I_c(t_1) + I_c(t_2)] + U_c(t_1) \quad (3-2)$$

其中， t_1 和 t_2 为两个相邻计算时刻，且有 $t_2=t_1+\Delta t$ ， Δt 为电磁暂态仿真小步长； C 为电容值； $I_c(t_1)$ 、 $I_c(t_2)$ 分别为 t_1 、 t_2 时刻流过子模块电容的电流； $U_c(t_1)$ 为 t_1 时刻的电容电压。此时大步长网络的控制系统仍处于等待状态 (T_0)。

可见，当前时刻以及前一个时刻的子模块导通情况共同决定了每个仿真步长的电容电压。那么传回大步长网络的控制系统时， T_0 时刻的电容电压就要选择小步长时段内最后一个 Δt 计算的 U_c ，因最后这一小步长 Δt 在时序上与以 T_0 为初始时刻的第一个大步长 ΔT 是紧密相连的。

另外公式 (3-2) 中计算得到的电容电压 U_c 需要传递给控制系统，通过一定的均压控制策略产生相应的触发信号。

(4) 通过 (3) 传回交流系统和控制系统的网络参数，其中交流系统再计算 T_1 时刻的 I_{arm} ，控制系统再产生 T_1 时刻的触发脉冲信号，作为下一次数据交换的 MMC 桥臂一次计算等值过程的初值。

3.3.2 大小步长交互仿真程序流程图

根据前序所述的电磁暂态仿真大小步长时序接口设计规则，得出混合仿真接口逻辑程序流程图如图 3-4 所示。

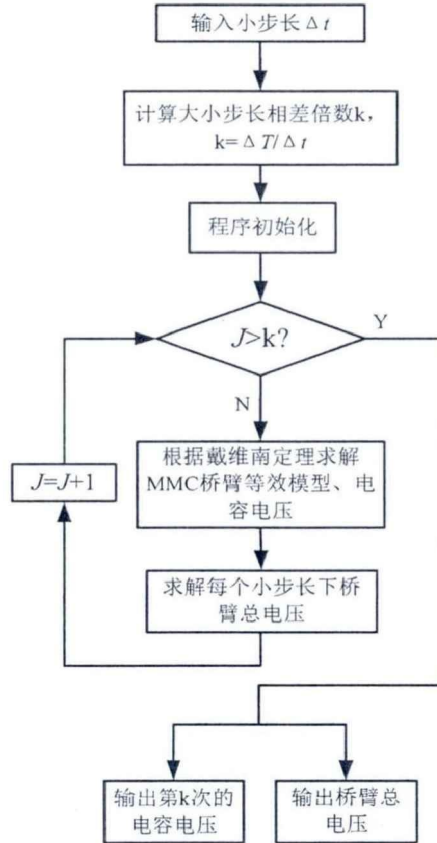


图 3-4 接口逻辑程序实现流程图

其中 J 表示算法程序循环次数。

3.4 仿真分析与验证

3.4.1 101 电平单端 MMC-HVDC 系统仿真验证

3.4.1.1 算法耗时

为了验证本章提出的大小步长交互系统的性能，选择三种现有方案进行对比，对比方案如表 3-1 所示：

表 3-1 三种方案的仿真步长分配

仿真步长(μs)	交流系统	MMC 详细等效桥控制系统
----------	------	---------------

方案	臂模型		
方案一	2.5	2.5	2.5
方案二	50	2.5	50
方案三	50	50	50

为了对比研究三种方案的仿真耗时，在相同的电脑配置下即采用 Intel™ Core™ i5-4440CPU 处理器，8GB 内存，主频为 3.10GHz，进行仿真。并在仿真过程中分别记录了 A 相上桥臂的详细等效建模（表 3-2）、单端 101 电平 MMC-HVDC 系统仿真（表 3-3）程序执行开始前和结束后的计算机 CPU 运行时间，并将 1s 内等效过程的 CPU 运行时间累加，得到的和作为相应方案的仿真耗时 t_{CPU} 。

表 3-2 桥臂等效过程耗时对比

MMC 详细等效桥臂模型	t_{CPU} (s)
方案一	3.2187
方案二	2.7500
方案三	0.2344

由表 3-2 可以看出，方案三即大步长情况下桥臂等效建模过程的 CPU 耗时最短，而方案一即小步长下仿真耗时最长，本章提出的大小步长交互的方案二的仿真耗时介于前两者之间，单从 MMC 桥臂建模来看，方案二能从一定程度上降低仿真耗时。

表 3-3 系统仿真耗时对比

单端 101 电平柔直系统	t_{CPU} (s)
方案一	89.875
方案二	20.469
方案三	3.703

由表 3-3 可以看出，在单端 101 电平 MMC-HVDC 系统下仿真，方案一所占用的 CPU 耗时最长，方案三所占用的 CPU 耗时最少，方案二所占用的 CPU 耗时介于前两者之间。相比于方案一，采用方案二大小步长交互模型在降低整个系统仿真耗时上效果明显。

3.4.1.2 稳态精确度验证

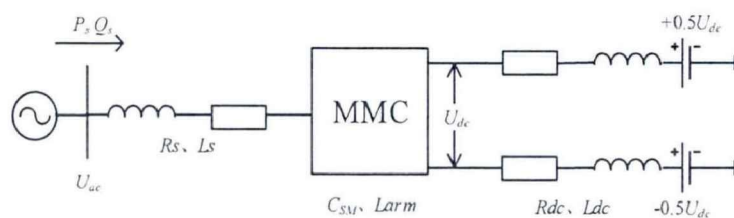


图 3-5 101 电平单端 MMC-HVDC 系统

如图 3-5 所示建立 101 电平单端 MMC-HVDC 系统, 每个桥臂有 100 个子模块。 U_{ac} 表示交流系统线电压有效值; R_s 为交流侧电阻; L_s 为交流侧电感; C_{sm} 为单子模块电容值; L_{arm} 为桥臂电感; P_s 、 Q_s 分别为交流系统输出的有功功率及无功功率; U_{dc} 为直流侧电压源电压; R_{dc} 为直流线路等效电阻; L_{dc} 为直流线路等效电感。系统参数如表 3-4 所示:

表 3-4 测试系统参数

交流系统		MMC	
变量	取值	变量	取值
$U_{ac}(kV)$	110	$C_{sm}(F)$	0.03
$R_s(\Omega)$	0.3142	$L_{arm}(H)$	0.007
$L_s(H)$	0.001	$U_{dc}(kV)$	200
$P_s(MW)$	100	$R_{dc}(\Omega)$	0.15
$Q_s(MVar)$	50	$L_{dc}(H)$	0.025

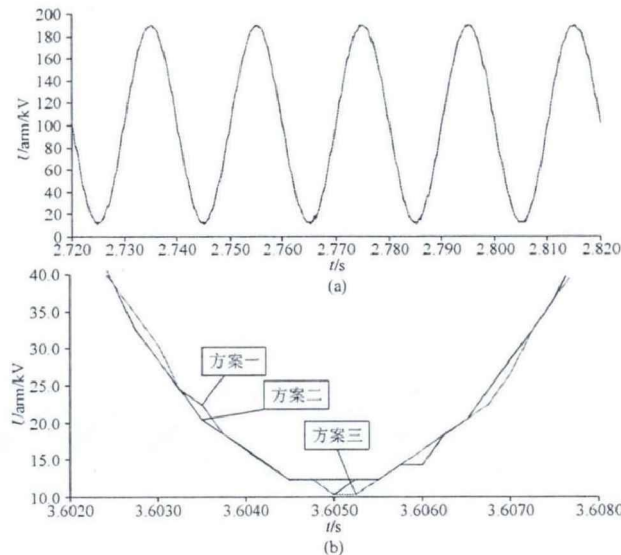


图 3-6 桥臂电压对比

控制系统采用 P-Q 控制, 底层阀控采用基于最近电平调制方式的分层排序的均压控制, 稳态运行桥臂电压波形如图 3-6 所示。从图 3-6 (a) 可以看出, 三种方案的桥臂电压精度相差不大, 放大对比如图 3-6 (b) 所示, 在一定范围内方案一的 (小步长) 桥臂电压与方案二 (大小步长交互) 的桥臂电压吻合度较高。

若要进一步分析三种方案之间的精度差距, 就必须在三种方案各自的步长时间点采集数据进行对比, 考虑到方案一小步长下每 $2.5\mu s$ 就要采集一次数据, 而方案二与方案三是每 $50\mu s$ 采集一次数据, 并默认小步长下的仿真精度最高。所以本文选取方案一中每隔 20 个数据取其平均值作为一次采集量, 分别与方案二和方案三之间的精度误差作进一步对比分析。为了分析三种方案桥臂电压的仿真精度, 在 matlab 中计算了三者之间的绝对误差, 令:

$$U_{err} = |U_{sim1} - U_{sim2}| \quad (3-3)$$

$$U_{err2} = |U_{armd} - U_{arms}| \quad (3-4)$$

其中, U_{err1} 为方案三相对方案一的绝对误差, U_{err2} 为方案二相对方案一的绝对误差, U_{arms} 为方案一桥臂电压, U_{armd} 为方案二桥臂电压, U_{armb} 为方案三桥臂电压。

误差结果如下图 3-7 所示。

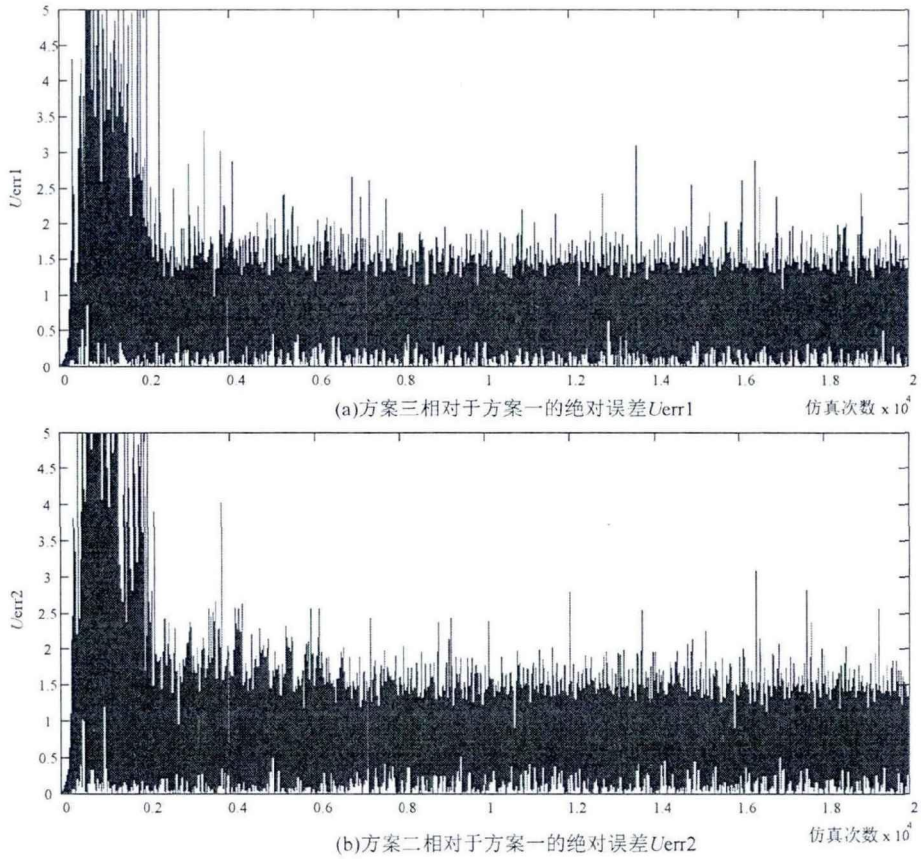


图 3-7 三种方案的桥臂电压误差对比

从图 3-7 (a)、(b) 可知, 横轴表示仿真时间从 0 到 1s 内的仿真次数, 以 $50\mu s$ 计算一次, 总共 2×10^4 次, 纵轴表示方案三 (大步长) 与方案二 (大小步长交互) 相对于方案一的桥臂电压绝对误差值 U_{err1} 、 U_{err2} , 在系统稳态运行下误差范围基本在 2.5kV 以内。由于从图 3-7 (a)、(b) 中难以区分具体哪种方案更接近于方案一的仿真精度, 同时考虑到仿真启动过程误差波动较大, 特取仿真时间从 0.5s 到 1s 的 1×10^4 次数据来对两组绝对误差进行分析。

$$\left. \begin{aligned} e_{sim1} &= \sum_{i=10001}^{20000} U_{err1}(i) \\ e_{sim2} &= \sum_{i=10001}^{20000} U_{err2}(i) \end{aligned} \right\} \quad (3-5)$$

$$\left. \begin{aligned}
 s_{err1}^2 &= \frac{\sum_{i=10001}^{20000} (U_{err1}(i) - \overline{U_{err1}(i)})^2}{10000} \\
 s_{err2}^2 &= \frac{\sum_{i=10001}^{20000} (U_{err2}(i) - \overline{U_{err2}(i)})^2}{10000}
 \end{aligned} \right\} (3-6)$$

其中, e_{sum1} 为绝对误差 U_{err1} 在 0.5s 至 1s 仿真时间内 1×10^4 次计算之和, e_{sum2} 为绝对误差 U_{err2} 在 0.5s 至 1s 仿真时间内 1×10^4 次计算之和, $\overline{U_{err1}(i)}$ 为 U_{err1} 在 0.5s 至 1s 仿真时间内 1×10^4 次的平均值, $\overline{U_{err2}(i)}$ 为 U_{err2} 在 0.5s 至 1s 仿真时间内 1×10^4 次的平均值。

首先, 如式 (3-5) 所示分别将 U_{err1} 、 U_{err2} 求和得到 e_{sum1} 、 e_{sum2} , 判断误差总和的大小, 判定误差总和越小则相对于方案一的误差越小, 那么相应方案的仿真精度更高; 其次, 对两组绝对误差分别求其方差 s_{err1}^2 、 s_{err2}^2 如式 (3-6) 所示, 判定方差越小则 U_{err1} 、 U_{err2} 相对其均值的偏离程度越小, 绝对误差波形的稳定性越好, 那么相应方案的精度越高。具体计算结果如表 3-5 所示。

表 3-5 误差对比情况

绝对误差 U_{err}	e_{sum} ($\times 10^5/\text{kV}$)	方差 s_{err}^2
U_{err1}	7.5502	0.1855
U_{err2}	7.4871	0.1815

由于方案二相对于方案一的绝对误差的方差更小, 且绝对误差之和也更小, 所以可以判定方案二相对于方案三具有更高的仿真精度。

3.4.1.3 暂态仿真

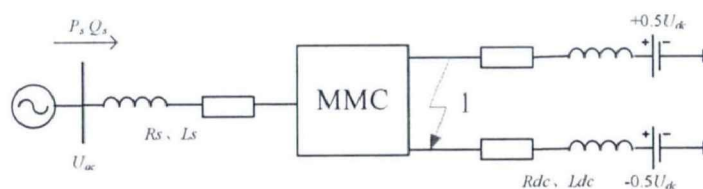


图 3-8 单端系统故障图

如图 3-8 所示单端 101 电平 MMC-HVDC 系统在 $t=1.0\text{s}$ 时, 直流侧发生双极短路故障, 故障持续时间为 5ms, 在 $t=1.005\text{s}$ 桥臂整体闭锁, 相应三种方案的暂态特性如图 3-9 所示 (图中从上到下、从左到右分别为 MMC 的 A 相上桥臂电容电压及放大波形、A 相上桥臂电流及放大波形、故障点交流侧电流、直流侧电流及其放大波形、直流电压及其放大波形)。

双极短路后, 直流电压迅速下降为 0, 但由于故障点与直流电压之间测量点之间有连接电感, 而流过电感的电流不能突变, 结合图 3-9 中故障点直流侧电流波形,

可知逐渐增大的直流侧故障电流会在联系电感上产生一定的压降，使得直流电压测量值由 0 略微增大到一定值。

子模块电容电压在故障刚发生时迅速放电导致电压下降，但交流侧的短路电流也会使得电容出现小幅充电现象，在 $t=1.005\text{s}$ 时，桥臂整体闭锁，则短路电流会使得子模块电容一直充电，最后电容电压达到稳定值。

从仿真精度来看，方案二的仿真精度介于方案一与方案三之间。对比方案二与方案三，说明大小步长交互模型与大步长模型对 MMC-HVDC 系统动态响应特性基本一致，同时大小步长交互模型对桥臂电流、电容电压、直流电压和直流电流的高频振荡和动态特性的描述更为接近小步长下的结果。

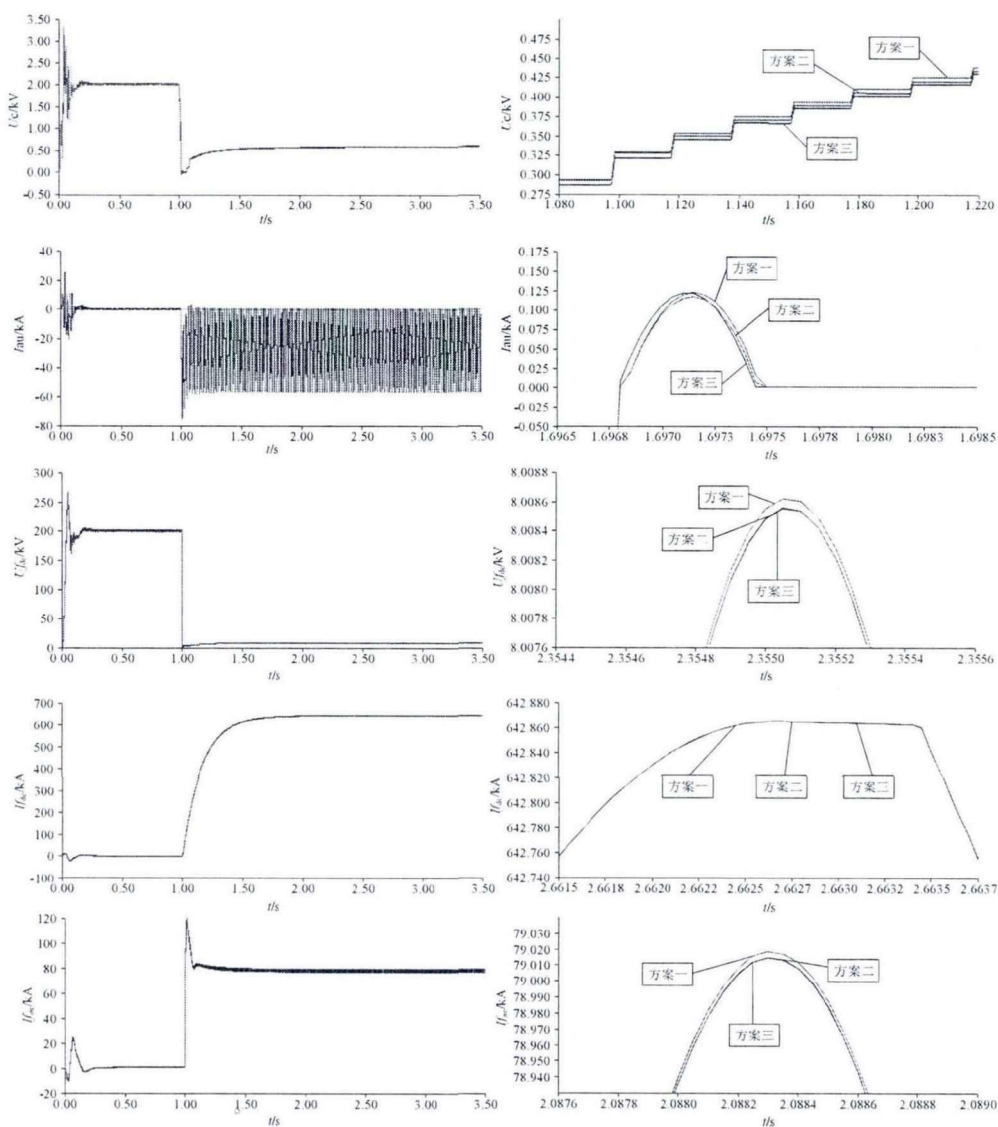


图 3-9 三种方案下双极短路故障特性

3.4.2 双端背靠背 MMC-HVDC 系统发生功率阶跃

表 3-6 系统介绍

	整流侧 MMC1	逆变侧 MMC2
接入交流系统类型	有源交流系统	有源交流系统
桥臂及子模块类型	大小步长交互的详细等效模型 (HBSM)	大步长详细等效 (HBSM)
功率控制器	d-q 控制 (旋转坐标)	d-q 控制 (旋转坐标)
d 轴控制	有功功率	直流电压
调制策略	NLM	NLM
均压策略	分层排序算法	分层排序算法

双端背靠背测试系统介绍如表 3-6 所示，系统结构如图 3-6 所示。其中交流电压源 110kV， $R_{s1}=R_{s2}=0.01\text{ohm}$ ， $L_{s1}=L_{s2}=0.001\text{H}$ ， $R_1=R_2=0.3142\text{ohm}$ ， $L_1=L_2=0.001\text{H}$ ， $R_{dc}=0.15\text{ohm}$ ， $L_{dc}=0.125\text{H}$ ，MMC 每个桥臂有 100 个子模块，每个子模块电容值为 30mF。桥臂电感，MMC1 中为 40mH，MMC2 中为 7mH。稳态时， $P_1=300\text{MW}$ ，

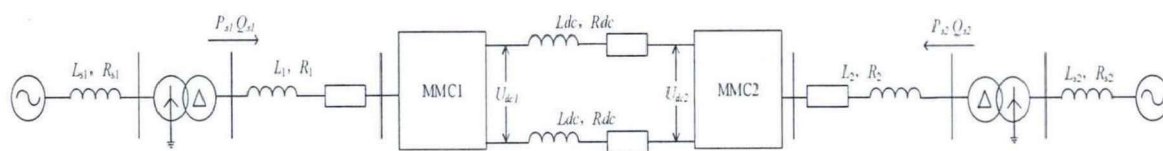


图 3-10 双端 MMC-HVDC 系统结构

$Q_1=-30\text{Mvar}$ ； $P_2=-298\text{MW}$ ， $Q_2=0$ 。直流电压 $U_{dc1}=U_{dc2}=200\text{kV}$ 。

为了进一步验证混合步长系统的稳定性，将图 3-10 所示的双端系统分成两种情况进行仿真验证：（1）如表 3-6 介绍 MMC1 的桥臂模型为混合步长模型，MMC2 则为大步长详细等效模型；（2）MMC1 与 MMC2 的桥臂模型均为大步长详细等效模型，仿真结果如下图 3-11。

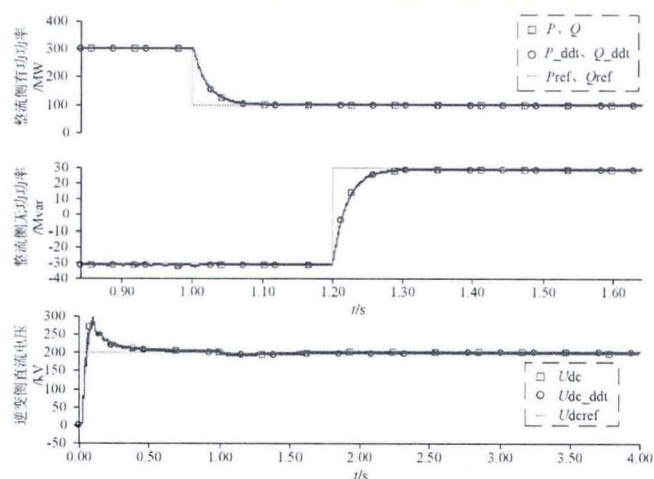


图 3-11 功率阶跃时系统稳定性特性

图 3-11 从上到下依次是整流侧有功功率、整流侧无功功率和逆变侧直流电压的控制响应。其中 P_ddt 、 Q_ddt 、 U_{dc_ddt} 代表工况 (1) 中的有功功率、无功功率和直流电压； P 、 Q 、 U_{dc} 代表工况 (2) 中的有功功率、无功功率和直流电压； P_{ref} 、 Q_{ref} 、 $U_{dc_{ref}}$ 分别表示有功功率设定值、无功功率设定值和直流电压设定值。

在 1.0s 时整流侧有功功率从 300MW 降至 100MW，之后 1.2s 时无功功率从 -30Mvar 阶跃至 30Mvar；逆变侧直流电压保持不变设为 200kV，无功功率设为 0。可以看到，在工况 (1) 下指令值大幅度阶跃变化时，整流侧有功功率和无功功率均能够迅速跟踪，响应时间持续 10ms~20ms，并最终能够稳定到设定值附近，整体的控制响应与工况 (2) 基本一致。整个功率阶跃过程中，逆变侧直流电压一直被维持在 200kV 左右，其最大波动幅度也控制在 4% 以内。

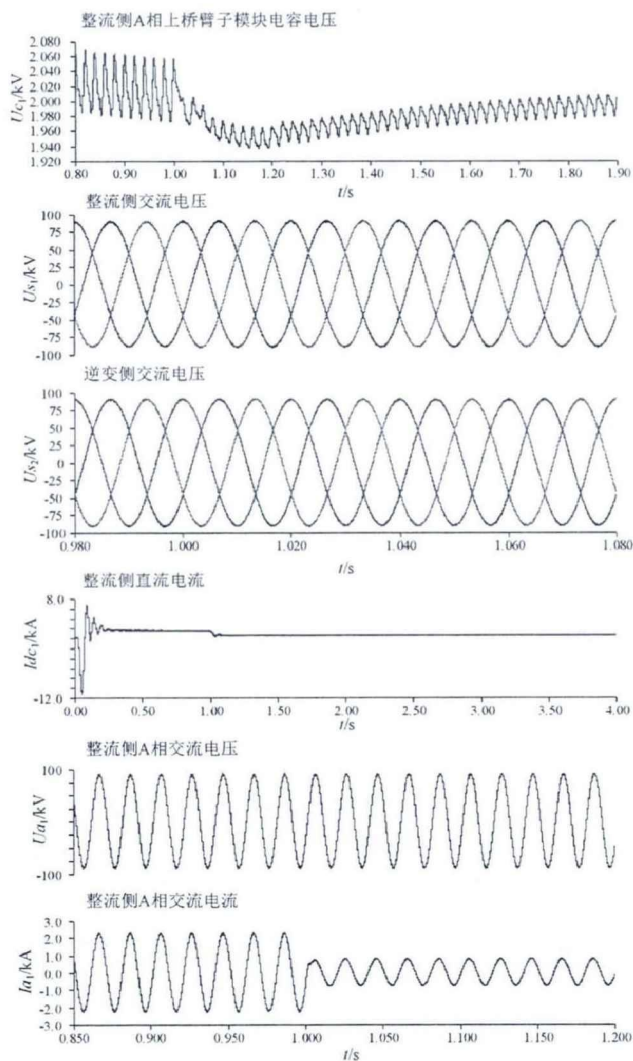


图 3-12 功率阶跃时系统响应情况

图 3-12 中给出了工况 (1) 中整流侧 A 相上桥臂子模块电容电压、整流侧交流电压、逆变侧交流电压、整流侧直流电流、整流侧 A 相交流电压以及 A 相交流电流的动态响应波形。从整流侧 A 相交流电压和交流电流可以看出整个直流输电系统运行情况良好，交流电压与交流电流波形基本为正弦波。从整流侧 A 相上桥臂子模块电容电压可以看到，全过程中电容电压的最大波动幅度基本介于 $\pm 4\%$ 以内，说明子模块均压效果良好。

综上所述，当系统工况发生变化时，采用混合仿真系统可以维持安全稳定运行。混合仿真系统与大步长仿真系统相比，二者对 MMC-HVDC 系统动态响应特性的描述基本一致。进而验证了混合步长系统具有良好的稳定性。

3.5 不同仿真步长比的仿真适应性

为进一步探究不同仿真步长比对 MMC-HVDC 系统的仿真效果影响, 本章仍然采用 3.4.1 小节的系统数据, 不同的仿真步长比用 K 来表示:

$$K = \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (3-3)$$

式中, ΔT 为交流系统仿真大步长, Δt 为 MMC 内部仿真小步长。

相应的 K 值对比如表 3-7 所示。

表 3-7 不同仿真步长比

仿真步长比 K	交流系统 (含控制系统) / μs	MMC/ μs
10	50	5
16	80	5
20	50	2.5
32	80	2.5

按照表 3-7 所示的不同仿真步长比之后的仿真波形如图 3-9 所示, 本章选取了不同仿真步长比下的电容电压均压波形。从图 3-13 可知, 不同 K 值的取值确实对 MMC 的电容电压波形有一定影响, 在仿真时间、系统参数、控制策略完全相同的情况下, 不同 K 值下的电容电压波动率也不尽相同。其中, 以 $t=1.76\text{s}$ 至 1.84s 这段仿真时间内的最大电压波动率为参考, 当 K 取 32 时, $\Delta U_c=4.886\%$; 当 K 取 20 时, $\Delta U_c=4.580\%$; K 取 16 时, $\Delta U_c=5.147\%$; K 取 10 时, $\Delta U_c=4.920\%$, 最大电压波动率的不同印证了 K 值对仿真结果的影响, 但还不能就此认定 K 值越大, 电容电压的波动率就越大, 这与所选的仿真时间段也有一定关系。

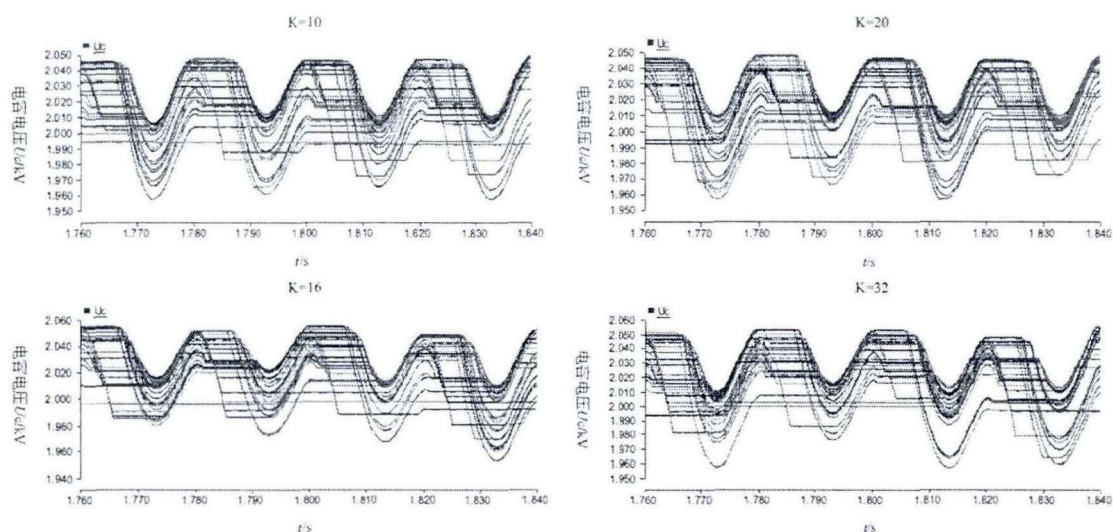


图 3-13 不同仿真步长比下的均压波形

再统计计算机 CPU 耗时，以 1.5s-2.5s 这 1s 的仿真时间作为统计参考，不同仿真步长比 K 值的影响如下图 3-14 所示，其中横轴表示 K 值，纵轴表示 T_{CPU} 实际计算耗时，单位为秒 (s)。

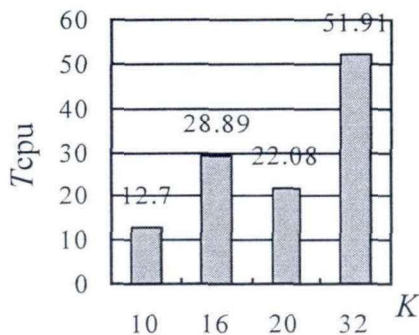


图 3-14 T_{CPU} 对比结果

可以看到，不同 K 值对应的计算机 CPU 计算耗时有很大差异，当 Δt 一定时，呈现 K 值越大，CPU 计算时间越长。值得注意的是， $K=16$ 的计算耗时比 $K=20$ 要稍长一些，是由于 $K=16$ 时交流系统以及控制系统的大步长 ΔT 为 $80\mu\text{s}$ ，MMC 阀组小步长为 $5\mu\text{s}$ ，而 $K=20$ 时的大步长 ΔT 为 $50\mu\text{s}$ ，MMC 阀组小步长为 $2.5\mu\text{s}$ ，两种步长均不相同，不能单独从 K 值来判断 CPU 计算时间的长短。

3.6 本章小结

本章提出一种基于电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 实现 MMC-HVDC 系统混合步长仿真算法的方法。在进行电磁暂态网络仿真时，根据节点电压分析法，将大步长网络的桥臂电流等值为受控电流源与小步长网络并联，同时将小步长网络的桥臂电压等值为受控电压源与大步长网络并联，从而在大小步长交互节点实现网络解列。本章提出的串行接口时序可以很好地适应系统稳定运行、功率阶跃和故障运行情况。与小步长电磁暂态仿真相比，大大减少了仿真算法耗时，提高了混合仿真的计算速度；与大步长电磁暂态仿真相比，有效的提高了混合仿真的仿真精度。

该混合步长仿真技术可扩展应用于多端柔性 HVDC 系统的动态响应研究，在分析交直流大系统时建立换流器的详细电磁暂态模型情况下，该方法可以更精确地描述柔直系统与其他复杂系统相互作用引起的动态过程^[28]，同时节省电磁暂态仿真耗时，提供全面分析交直流系统的各种动态行为的新思路。

本章最后针对大小步长比的仿真适应性进行了简单的论证，可以看到在电磁暂态仿真允许的步长范围内，不同步长比对仿真结果会产生一定的影响，为后续研究仿真步长对交直流系统的影响提供了新思路。

第 4 章 提高 MMC 电磁暂态模型仿真精度的方法

在 MMC 的桥臂电磁暂态仿真详细模型建模过程中，选择戴维南等效原理来进行子模块电容的差分离散化过程时，若采用隐式梯形法计算则会引入一个计算误差。这是由于当仿真过程中出现电力电子器件动作或者发生故障造成子模块电容电流突变的现象，进而引起了系统结构发生变化。本章从隐式梯形积分的离散化机理分析，提出了一种通过求解突变后非状态变量的方法来消除计算误差，从而提高 MMC 桥臂详细等效模型的仿真精度。

4.1 MMC 详细等效模型

MMC 桥臂的戴维南等效模型是基于建立单个子模块的戴维南等效电路并进行代数叠加而实现的，从而将每个 MMC 桥臂等效为一个电压源与电阻串联的 2 节点支路，根据相应的电气关系更新该桥臂中各子模块的电容电压^[46]。

根据戴维南等效定理，本章建立了 MMC 的详细等效模型，具体建模过程如图 4-1 所示。

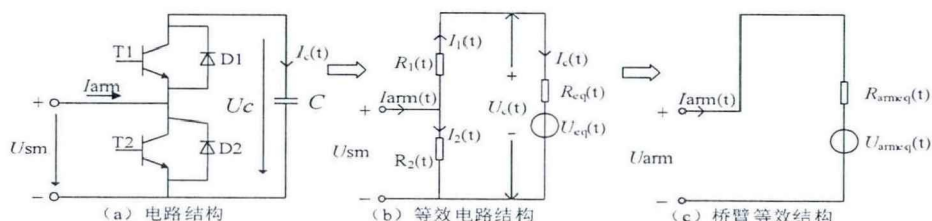


图 4-1 MMC 子模块等效过程

(1) 首先分别用可变电阻 R_1 、 R_2 表示图 4-1 (a) 中的绝缘栅极晶体管 T1 和 T2 以及反并联二极管 D1 和 D2 构成的两组开关组，那么子模块的导通或关断情况就可以由 R_1 、 R_2 值的大小来等效，即当 R_1 为一个相当小的值， R_2 为一个相当大的值时，代表 T1 导通，T2 关断；反之当 R_1 为一个相当大的值， R_2 为一个相当小的值时，代表 T1 关断，T2 导通。

(2) 由电路原理可知，电容的电压电流关系为：

$$C \frac{dU_c(t)}{dt} = I_c(t) \quad (4-1)$$

因此采用隐式梯形积分对式 (2-1) 中的电容进行离散化可得：

$$U_c(t) = \frac{\Delta t}{2C} I_c(t) + \left[\frac{\Delta t}{2C} I_c(t - \Delta t) + U_c(t - \Delta t) \right] \quad (4-2)$$

式中： $U_c(t)$ 、 $U_c(t-\Delta t)$ 分别为当前时刻和前一时刻的电容电压； $I_c(t)$ 、 $I_c(t-\Delta t)$ 分别为当前时刻和前一时刻的电容电流； C 为子模块电容值； t 为电磁暂态仿真时间； Δt 为电磁暂态仿真步长。

式(4-2)表示了任意时刻电容电压与电流之间的关系，若要用戴维南定理表示子模块电容则可以得到每个子模块电容的戴维南等效电阻 $R_{eq}(t)$ 以及戴维南等效电压 $U_{eq}(t)$ 表达式：

$$R_{eq}(t) = \frac{\Delta t}{2C} \quad (4-3)$$

$$U_{eq}(t) = \frac{\Delta t}{2C} I_c(t - \Delta t) + U_c(t - \Delta t) \quad (4-4)$$

(3) 根据步骤(2)得到的电容的戴维南等效电阻及等效电压，再结合可变电阻 $R_1(t)$ 、 $R_2(t)$ 即可求取单个子模块的戴维南等效电阻 $R_{SMeq}(t)$ 与戴维南等效电压 $U_{SMeq}(t)$ ：

$$R_{SMeq}(t) = \frac{R_2(t) [R_1(t) + R_{eq}(t)]}{R_2(t) + R_1(t) + R_{eq}(t)} \quad (4-5)$$

$$U_{ameq}(t) = \sum_{j=1}^N U_{SMeq_j}(t) \quad (4-6)$$

并在此基础上如图 4-1 (c) 所示，桥臂的戴维南等值电阻 $R_{ameq}(t)$ 和等值电压 $U_{ameq}(t)$ 通过将 N 个串联的子模块的戴维南等效模型进行叠加而成：

$$R_{ameq}(t) = \sum_{j=1}^N R_{SMeq_j}(t) \quad (4-7)$$

$$U_{ameq}(t) = \sum_{j=1}^N U_{SMeq_j}(t) \quad (4-8)$$

至此，基于戴维南等效定理的 MMC 的详细等效建模完成，最后根据上述详细建模过程，可以计算子模块电容电流和电容电压表达式：

$$I_c(t) = \frac{R_2(t) I_{arm}(t)}{R_2(t) + R_1(t) + R_{eq}(t)} - \frac{U_{eq}(t)}{R_2(t) + R_1(t) + R_{eq}(t)} \quad (4-9)$$

$$U_c(t) = U_{eq}(t) + I_c(t) R_{eq}(t) \quad (4-10)$$

式中 $I_{arm}(t)$ 为桥臂电流。

4.2 提高 MMC 电磁暂态仿真精度的方法

4.2.1 电磁暂态计算的数值方法

采用数值方法计算电磁暂态过程，常见的做法是将微分方程差分化来计算某一时刻的状态。为了反映 t 时刻电压和电流之间的关系，差分方程可以由纯电阻和电压源构成的电路来取代，其中电阻值的大小取决于积分步长和元件的参数，电流源或电压源的大小取决于历史项的电压和电流值。

上述的等值电路称为暂态等值计算电路。暂态等值计算电路的连接对应到各元件之间的实际接线方式，形成的网络再进行求解，即可得出任意时刻不同元件之间的伏安关系。再依次在各个积分步长内对各个元件的伏安关系进行递推，便可得到整个暂态过程的稳定数值解。

4.2.2 计算误差的产生

根据第二章的描述，对于电力系统中的元件，可以列出暂态过程中反应伏安关系的微分方程，然后再应用数值积分算法进行求解。

考虑到隐式梯形积分形式上较为简单而且其数值精度高，数值稳定性也好，并能较好地适应刚性微分方程组，因此在电磁暂态类程序中通常采用这种方法进行仿真。但当仿真过程中出现故障或者开关动作等引起网络结构突变时，采用隐式梯形积分法无法获取正确的非状态变量，从而会产生计算误差。

采用梯形积分法的子模块等效模型如图 4-1 (b) 所示，设两个相邻计算时刻为 t_1 和 t_2 ，且有 $t_2=t_1+\Delta t$ ，则有：

$$U_c(t_2) = \frac{\Delta t}{2C} [I_c(t_1) + I_c(t_2)] + U_c(t_1) \quad (4-11)$$

式中： $I_c(t_1)$ 和 $I_c(t_2)$ 分别为相邻 t_1 、 t_2 时刻流经子模块电容的电流； $U_c(t_1)$ 和 $U_c(t_2)$ 分别为相邻 t_1 、 t_2 时刻子模块的电容电压。

作进一步分析可知，当前时刻以及前一个时刻的子模块导通情况决定了每个仿真步长的电容电压。在开关组发生变化时，电容电流 I_c 会发生突变。以开关变化发生在 t_1 时刻为例，那么 $I_c(t_1^-)$ 不等于 $I_c(t_1^+)$ 。而在一般仿真计算中，往往很难求得突变后 t_1^+ 时刻的非状态变量，故而常常采用 t_1^- 时刻的变量值等值计算。即在一般应用中，计算过程如式 (4-12) 所示：

$$U_c(t_2) = \frac{\Delta t}{2C} [I_c(t_1^-) + I_c(t_2)] + U_c(t_1^-) \quad (4-12)$$

而实际正确的电磁暂态仿真过程计算应该采用式 (4-13):

$$U_c(t_2) = \frac{\Delta t}{2C} [I_c(t_1^+) + I_c(t_2^-)] + U_c(t_1^+) \quad (4-13)$$

由于电流的突变, $I_c(t_1^-)$ 不等于 $I_c(t_1^+)$, 致使等效电路计算不准确, 并产生一定程度的计算误差。

4.2.3 提高仿真精度的方法

在仿真过程中发生故障或者开关动作等引起网络结构突变时, 采用式 (4-12) 的常用梯形积分方法进行计算, 会引起比较大的计算误差。这是因为网络中故障时刻的非状态变量发生了突变, 在修改网络的导纳矩阵后, 仍以突变前的电量计算下一时刻的等值注入电源^[47], 会导致计算结果不正确。因此, 为了得到正确的突变后的值而能够采用式 (4-13) 进行计算, 本章提出了求解突变后的非状态变量的方法, 从而消除由梯形积分表达式中的边界参数突变而产生的计算误差, 等效桥臂模型修正计算方法流程如图 4-2 所示。

图中, RON、ROFF 分别表示可变小、大电阻; IN1_N、IN2_N 表示单分子模块上、下管开关状态, 其中 IN1_N=0 表示上管导通, IN2_N=0 表示下管导通; IN 表示当前时刻的上管开关状态。

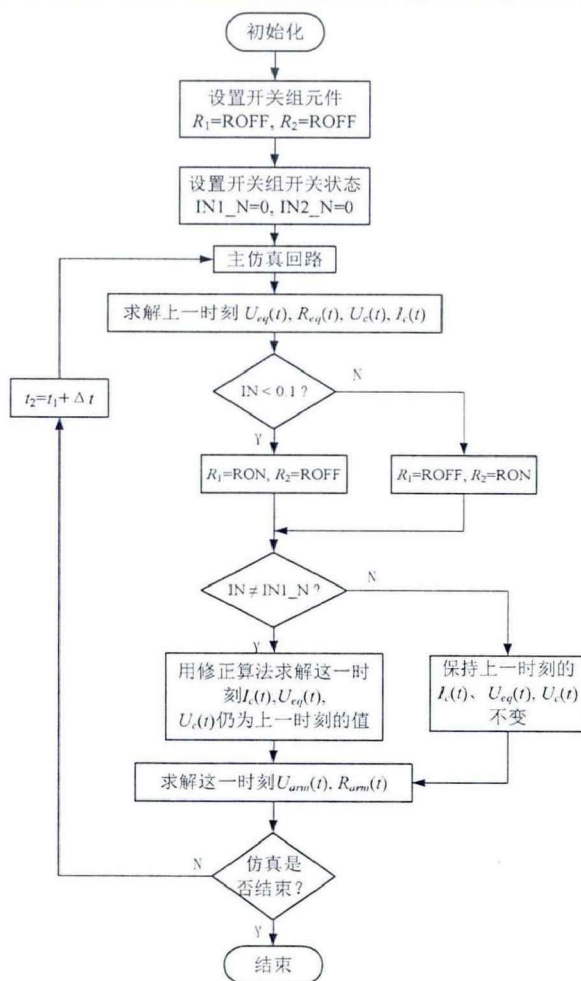


图 4-2 等效桥臂模型修正计算方法流程图

具体实现过程如下：

- (1) 程序初始化；
- (2) 从 $T=0$ 开始仿真计算，按照第 2 节 MMC 建模过程依次求解 $U_{cq}(t)$ 、 $R_{cq}(t)$ 、 $I_c(t)$ 、 $U_c(t)$ ；
- (3) 根据当前时刻上管的开关状态判断 R_1 、 R_2 的等效情况；
- (4) 判断当前时刻上管的开关状态是否发生改变，若改变则考虑电容电流突变特性，修正原始等效建模过程中 $I_c(t)$ 的计算结果；若不改变则保持第 (2) 步的等效结果不变；
- (5) 通过修正后的 $I_c(t)$ 、 $U_{cq}(t)$ 求解这一时刻等效桥臂的 $U_{arm}(t)$ 、 $R_{arm}(t)$ ；
- (6) 判断仿真是否结束，若否则返回 (2) 继续计算。

根据式 (4-3)、(4-4)、(4-10) 和 (4-13)，将图 3 (b) 中的 I_c 、 U_{cq} 、 U_c 替换为修正后的等效值，则有 t_1 时刻的桥臂电流：

$$I_{arm}(t_1) = I_c(t_1) + I_2(t_1) \quad (4-14)$$

令：

$$\begin{cases} U_{SM}(t_1) = R_2(t_2)I_2(t_1) \\ U_{SM}(t_1) = R_1(t_2)I_1(t_1) + U_c(t_1) \end{cases} \quad (4-15)$$

式中： $I_{arm}(t_1)$ 是 t_1 时刻流经 MMC 桥臂的桥臂电流； $I_2(t_1)$ 是 t_1 时刻流过了模块可变电阻 R_2 的电流； $U_{sm}(t_1)$ 是 t_1 时刻子模块端口电压。

同时分析图 4-1 (b) 的等效电路可知，在开关变化的 t_1 时刻，由于桥臂中有电感存在，因此桥臂电流 I_{arm} 不会突变，即 $I_{arm}(t_1^-)=I_{arm}(t_1^+)=I_{arm}(t_1)$ ；对于电容电压 U_c ，在开关变化瞬间亦不突变，即 $U_c(t_1^-)=U_c(t_1^+)=U_c(t_1)$ 。因此，从以上两个条件并结合式(4-14)、(4-15)可计算修正后的 $I_c(t_1^+)$ ，如式(4-16)所示：

$$I_c(t_1^+) = \frac{R_2(t_2)I_{arm}(t_1)}{R_2(t_2) + R_1(t_2)} - \frac{U_c(t_1)}{R_2(t_2) + R_1(t_2)} \quad (4-16)$$

那么 t_1 时刻等效戴维南电压 $U_{eq}(t_1)$ 的修正表达式为

$$U_{eq}(t_1) = \frac{\Delta t}{2C} I_c(t_1^+) - U_c(t_1^-) \quad (4-17)$$

因此 t_2 时刻的电容电压等效修正表达式为

$$U_c(t_2^-) = U_{eq}(t_1) + R_c I_c(t_2^-) \quad (4-18)$$

式中 R_c 是电容等效电阻值。

可见式(4-16)中计及突变前后差异得到的 $I_c(t_1^+)$ 有别于未修正时由式(4-9)得到的 $I_c(t_1)$ 。这是因为，式(4-9)并未考虑电容电流在网络结构变化瞬间的突变特性，仍采用前一时刻的电容电流作为这一时刻的输出，会导致突变时刻的电容电压 $U_c(t_2)$ 产生计算误差。而采用式(4-16)来计算隐式梯形积分中的电流值，能够有效地避免该计算误差。

4.3 仿真分析

如图 4-3 所示，在 PSCAD 中采用 Fortran 语言自定义编写 MMC 等效桥臂模型，搭建 MMC 等效桥臂测试电路，开关组元用可变电阻 R_1 、 R_2 实现，其中 $R_1=0.005\Omega$ ， $R_2=10^6\Omega$ ，交流侧采用单相电压源，电压源内阻为 1Ω ，串联电感为 $0.1H$ ，子模块电容为 $0.03F$ 。

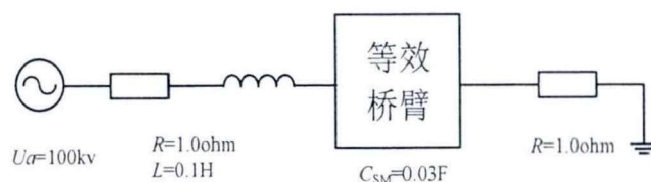


图 4-3 等效桥臂电路测试示意图

1.49s 时，等效桥臂的开关断开，电容不再充电。分三种情况进行仿真，观测电容电流：（1）采用未修正梯形积分边界条件的戴维南等效桥臂模型；（2）采用修正梯形积分边界条件后的戴维南等效桥臂模型；（3）采用器件搭建的详细模型。仿真结果见图 4-4。

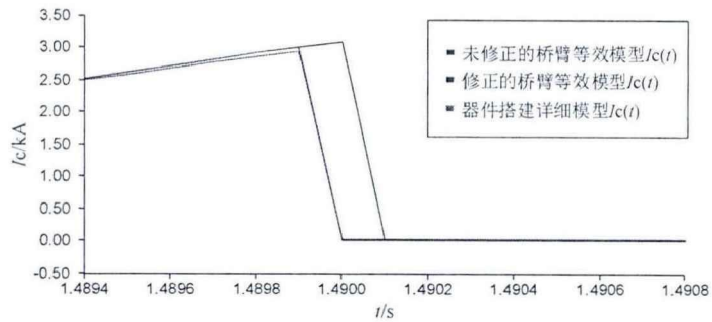


图 4-4 不同桥臂模型下流过电容的电流

可以看出，若桥臂开关状态未发生改变，不论是修正的桥臂等效模型或是未修正的桥臂等效模型其电容电流与详细模型的电容电流趋势基本一致，而在 1.49s 时，开关断开，未修正的桥臂模型其电容电流与详细模型的电容电流偏差较大，而修正后的桥臂模型其电容电流与详细模型的电容电流趋势基本一致。

在 1.49s 时分两种情况进行仿真，观测电容电压：（1）采用未修正梯形积分边界条件的戴维南等效桥臂模型；（2）采用修正了梯形积分边界条件后的戴维南等效桥臂模型。仿真结果见图 4-5。

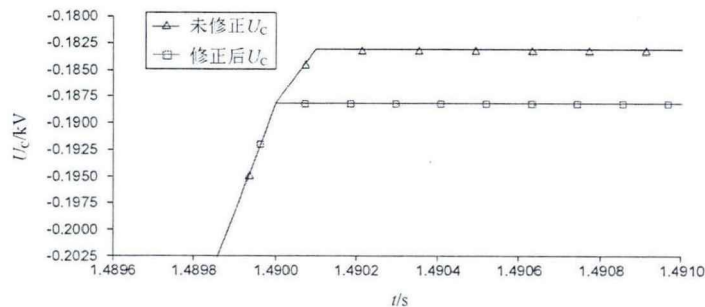


图 4-5 开关变化前后电容电压对比

可以看出，采用未修正的桥臂模型的电容电压继续升高，一个步长后维持新的定值，由于未修正的桥臂模型未考虑开关状态变化瞬间电流的突变，由此得到的电容电压比真实值大；采用修正后的桥臂模型，由于电容电压在开关状态改变时刻并不突变，所以其电容电压仍保持当前时刻的值不变。

单端 101 电平 MMC-HVDC 测试系统如图 4-6 所示。

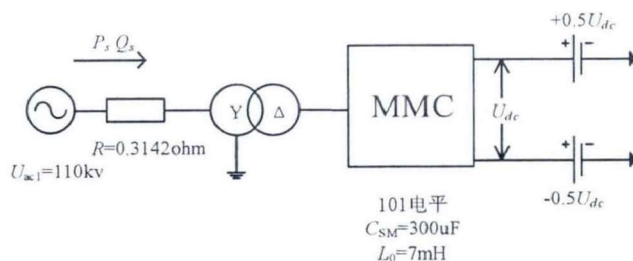
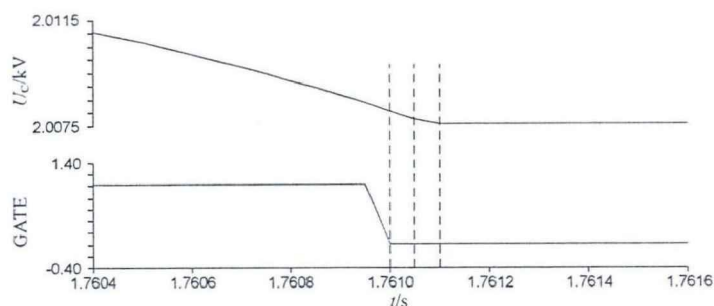


图 4-6 单端 101 电平 MMC-HVDC 系统

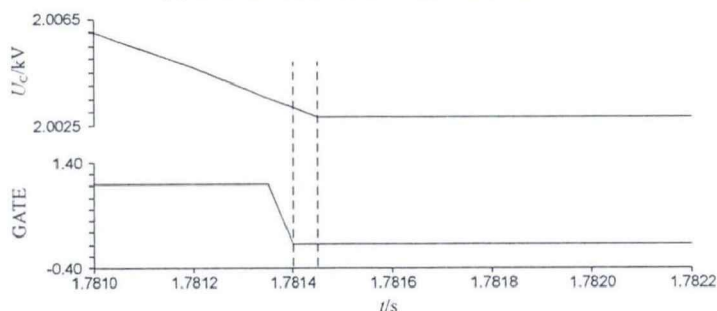
采用两种戴维南等效桥臂模型在单端 101 电平 MMC-HVDC 仿真系统下进行仿真，电容电压和开关状态曲线见图 4-7，当 $t=1.78\text{s}$ 时，开关状态从闭合到断开时，电容从投入状态切换至旁路状态。

从图 4-7 (a) 中可以看出，开关状态发生变化后，由于电流没有被修正，导致电容电压在开关断开后还持续放电，这是不正确的。

从图 4-7 (b) 可以看出，修正边界条件后，在仿真计算过程中，开关状态发生变化后，子模块电容电压在下一计算时刻就及时体现出开关状态变化的影响。进一步验证了所提方法的正确性。



(a)未修正的桥臂模型的电容电压



(b)修正后的桥臂模型的电容电压

图 4-7 电容电压对比

4.4 本章小结

本章通过分析，认为在开关状态改变时刻前后，桥臂电流及电容电压均具有不突变的特性，根据电容电流突变这一结论，修正了电容电流的计算公式，有效地消

除了因梯形积分计算过程中采用开关状态改变前时刻的值进行计算而引入的计算误差，并在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建了 MMC 等效桥臂模型和单端 101 电平 MMC-HVDC 系统，对比分析了消除计算误差与未消除计算误差的电容电压、电容电流的波形，验证了本章提出的改进优化的计算模型的准确性。

第 5 章 结论与展望

模块化多电平换流器的模块化结构，使之相比于传统电压源型换流器有了更加广阔的发展空间。但对于大容量、高电压、高精度的模块化多电平换流器，仍然有许多问题亟待解决。本文从模块化多电平换流器的电磁暂态仿真技术出发，对模块化多电平换流器混合仿真的适应性、混合仿真的接口模型建立以及提高 MMC 电磁暂态仿真精度三个方面进行了研究。得到的结论如下：

第一，在电磁暂态仿真的理论上，通过分析电磁暂态仿真的节点分析法和状态方程法，并结合模块化多电平换流器自身结构特点，阐述了同步长电磁暂态仿真的局限性并提出了差异化步长电磁暂态仿真的必要性和合理性，最后说明了差异化步长的具体值选取。为后续的差异化步长电磁暂态仿真以及仿真精度的提高奠定了基础。

第二，在差异化步长电磁暂态仿真算法方面，实现了一种基于电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 的 MMC-HVDC 系统混合步长仿真算法的方法。在进行电磁暂态网络仿真时，根据节点电压分析法，将大步长网络的桥臂电流等值为受控电流源与小步长网络并联，同时将小步长网络的桥臂电压等值为受控电压源与大步长网络并联，从而在大小步长交互节点实现网络解列。该算法可以很好地适应系统稳定运行、功率阶跃和故障运行情况。与小步长电磁暂态仿真相比，大大减少了仿真算法耗时，提高了混合仿真的计算速度；与大步长电磁暂态仿真相比，有效的提高了混合仿真的仿真精度。

第三，在提高电磁暂态 MMC 高效仿真精度方面，通过分析在开关状态改变时刻前后，桥臂电流不突变及电容电压不突变的特性，修正了电容电流的计算公式，有效地消除了隐式梯形积分计算过程中采用开关状态改变前时刻的值进行计算而引入的计算误差，该优化精度的算法也直接用于前文混合仿真中模块化多电平换流器的仿真建模当中，进一步提高了电磁暂态的仿真精度。

在前人的研究基础上，本文针对模块化多电平换流器的三个方面获得了一些阶段性的研究成果。但仍需要在此基础上进一步研究：

1、在差异化步长电磁暂态仿真算法研究中，本文对接口模型中传递给大步长交流系统的等效桥臂电压源采用了简单的求平均值等效形式。为了更精确的反应系统运行情况，需要在等效桥臂电压源的求取上展开进一步地研究。例如，考虑预测的方式，通过采集前几次的桥臂电压值来预测交换时刻的等效桥臂电压。

2、在差异化步长电磁暂态仿真算法研究中，本文的交流系统与控制系统沿用统一的大步长。为了更精确的反应实际运行特性，可以考虑交流系统步长更大（ $80\mu\text{s}$ ）而控制系统的控制周期保持 $50\mu\text{s}$ ，同时模块化多电平换流器仍然采用几个微秒级的步长，这就需要对混合步长仿真实接口模型做进一步地研究。

3、在差异化步长电磁暂态仿真算法研究中，本文只涉及到整数倍大小步长比，并未考虑非整数步长比的影响，为了更加深入的研究模块化多电平换流器的电磁暂态仿真技术，需要进一步研究步长溢出带来的影响。

参考文献

- [1] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012:2-11.
- [2] 杨海涛. 大规模高压交直流混联电网安全监控方案探讨[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20):17-21.
- [3] Task-Force, Us Canada Power System Outage. Final Report on the August 14, 2003 Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations[J]. 2004.
- [4] 汤涌, 卜广全, 易俊. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25):167-174.
- [5] 田芳, 黄彦浩, 史东宇, 等. 电力系统仿真分析技术的发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(11):73-75.
- [6] 郑超, 侯俊贤, 严剑峰, 等. 在线动态安全评估与预警系统的功能设计与实现[J]. 电网技术, 2010, 34(3):55-60.
- [7] 张文亮, 刘壮志, 王明俊, 等. 智能电网的研究进展及发展趋势[J]. 电网技术, 2009(13):1-11.
- [8] 屠卿瑞, 徐政, 郑翔, 等. 一种优化的模块化多电平换流器电压均衡控制方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5):15-20.
- [9] 翟晓萌. MMC-HVDC 物理模拟系统子模块控制器的研制[D]. 华北电力大学(北京), 华北电力大学, 2014.
- [10] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17):66-70.
- [11] 罗建民, 戚光宇, 何正文, 等. 电力系统实时仿真技术研究综述[J]. 供用电, 2006, 23(5):13-16.
- [12] 李广凯, 李庚银. 电力系统仿真软件综述[J]. 电气电子教学学报, 2005, 27(3):61-65.
- [13] 彭红英. 静止同步补偿器(STATCOM)建模与仿真研究[D]. 中国电力科学研究院, 2011.
- [14] 田芳, 李亚楼, 周孝信, 等. 电力系统全数字实时仿真装置[J]. 电网技术, 2008, 32(22):17-22.
- [15] 杨用春, 赵成勇, 李广凯. 开放的 VSC-HVDC 物理实验系统建立[J]. 南方电网技术, 2009, 3(5):99-102.
- [16] 李广凯, 江政昕, 赵昕, 等. 电压源换流器高压直流输电的特点与前景[J]. 南

- 方电网技术, 2011, 5(5):13-17.
- [17] 刘炜, 王朝亮, 赵成勇, 等. 基于自抗扰控制原理的 MMC-HVDC 控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9):87-93.
- [18] Gnanarathna U N, Gole A M, Jayasinghe R P. Efficient modeling of modular multilevel HVDC converters (MMC) on electromagnetic transient simulation programs [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1):316-324.
- [19] 许建中, 赵成勇, 刘文静. 超大规模 MMC 电磁暂态仿真提速模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10):114-120.
- [20] 王鹏伍, 崔翔. 模块化多电平换流器的时域等效模型及其快速算法[J]. 电网技术, 2013, 37(8):2180-2186.
- [21] 许建中, 赵成勇, Gole A M. 模块化多电平换流器戴维南等效整体建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8):1919-1929.
- [22] 赵成勇, 刘涛, 郭春义, 等. 基于实时数字仿真器的模块化多电平换流器的建模[J]. 电网技术, 2011, 35(11):85-90
- [23] 郭高朋, 胡学浩, 温家良, 等. 基于大规模子模块群的 MMC 建模与快速仿真算法[J]. 电网技术, 2015, 39(5):1226-1232.
- [24] 周阳, 常非. MMC 电磁暂态快速仿真模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1):1-8.
- [25] 王成山, 李鹏, 王立伟. 电力系统电磁暂态仿真算法研究进展[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(7):97-103.
- [26] 王恒. 基于 Euler-Maclaurin 数值积分方法的暂态稳定计算[D]. 三峡大学, 2014.
- [27] 李嘉. 电力系统暂态稳定分析的混合算法[D]. 广西大学, 2005.
- [28] Mahseredjian J, Dinavahi V, Martinez J A. Simulation Tools for Electromagnetic Transients in Power Systems: Overview and Challenges[J]. 2009, 24(3):1657-1669.
- [29] 王路, 李兴源, 罗凯明, 等. 交直流混联系统的多速率混合仿真技术研究[J]. 电网技术, 2005, 29(15):23-27.
- [30] 李亚楼, 穆清, 安宁, 等. 直流电网模型和仿真的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4):127-135.
- [31] 刘栋, 汤广福, 贺之渊, 等. 模块化多电平柔性直流输电数字-模拟混合实时仿真技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(12):68-73,80.
- [32] 刘栋, 汤广福, 郑键超, 等. 模块化多电平换流器小信号模型及开环响应时间常数分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24):1-7.
- [33] 王冠, 蔡晔, 张桂斌, 等. 高压直流输电电压源换流器的等效模型及混合仿真技术[J]. 电网技术, 2003, 27(2):4-8.
- [34] Maguire T, Giesbrecht J. Small Time-step ($<2\mu\text{s}$) VSC Model for the Real Time

- Digital Simulator[C]. International Conference on Power Systems Transients. 2005.
- [35] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016(7):1760-1771.
- [36] Ou K, Maguire T, Warkentin B, et al. Research and application of small time-step simulation for MMC VSC-HVDC in RTDS[C]. International Conference on Power System Technology. IEEE, 2014:877-882.
- [37] Hui, S.Y.R, Christopoulos, C. A discrete approach to the modeling of power electronic switching networks[J]. Power Electronics IEEE Transactions on, 1990, 5(4):398-403.
- [38] Li W, Belanger J. An Equivalent Circuit Method for Modelling and Simulation of Modular Multilevel Converter in Real-time HIL Test Bench[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5):1-1.
- [39] Pejović, P, Maksimovic, D. A method for fast time-domain simulation of networks with switches[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1994, 9(4):449-456.
- [40] 穆清, 周孝信, 王祥旭, 等. 面向实时仿真的小步长开关误差分析和参数设置[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31):120-129.
- [41] 张怡, 吴文传, 张伯明, 等. 基于频率相关网络等值的电磁-机电暂态解耦混合仿真[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(3):107-114.
- [42] 朱旭凯, 周孝信, 田芳, 等. 基于电力系统全数字实时仿真装置的大电网机电暂态-电磁暂态混合仿真[J]. 电网技术, 2011, 35(3):26-31.
- [43] 贾旭东. 基于 RTDS 的交直流系统实时数字仿真方法研究与实现[D]. 华北电力大学(河北), 2009.
- [44] 岳程燕, 周孝信, 李若梅. 电力系统电磁暂态实时仿真中并行算法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12):1-7.
- [45] 岳程燕. 电力系统电磁暂态与机电暂态混合实时仿真的研究[D]. 中国电力科学研究院, 2005.
- [46] 许建中, 李承昱, 熊岩, 等. 模块化多电平换流器高效建模方法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13):3381-3392.
- [47] 张瑛, 王胜辉, 袁宏. 电力系统仿真计算中的数值振荡问题[J]. 东北电力技术, 1999(4):11-13.

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] Wang Jiayu, Liu Chongru, Liu Min, et al. The Study of Automatic Conversion of Electromagnetic Transient Models from PSCAD to ADPSS[A]. International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE2015)[C]. Destech Publicat Inc, 2015:541-547. (SCI 收录号: WOS: 000361749700092)
- [2] 郭琦, 王嘉钰, 林雪华, 等. 提高 MMC 高效电磁暂态模型仿真精度的方法[J]. 电力建设, 2016, 37(6):49-54. (已刊出)

（二）申请及已获得的专利：

- [1] 刘崇茹, 王嘉钰, 徐东旭, 等. 一种提高 MMC 高效电磁暂态模型仿真精度的方法, CN106055752A[P]. 2016.
- [2] 刘崇茹, 徐东旭, 王嘉钰, 等. 钳位双子模块型 MMC 电磁暂态等效方法, CN105956323A[P]. 2016
- [3] 刘崇茹, 田鹏飞, 李海峰, 王嘉钰, 等. 模块化多电平换流器仿真实验平台及方法, CN104820373A[P]. 2015.
- [4] 刘崇茹, 田鹏飞, 负飞龙, 王嘉钰, 等. 一种搜索圆半径可控的电力系统小干扰特征值计算方法, CN104809666A[P]. 2015
- [5] 郭琦, 王嘉钰, 林雪华, 李岩, 刘崇茹. 一种模块化多电平换流器均压控制方法, CN105375801A[P]. 2015

攻读硕士学位期间参加的科研工作

[1] 南方电网科技项目“大容量高电压柔性直流输电关键技术及工程应用研究”(CSGTRC-K142031), 2015.09-2016.09, 主要参与者。

[2] 国家电网公司科技项目“多端柔性直流输电故障分析及保护控制研究”(SGZJ0000BGJS1500265), 2016.03-2016.09, 一般参与者。

[3] 中国电力科学研究院实验室开放基金项目“电磁暂态模型与图形的自动转换功能研发”(XT83-14-005), 2014.09-2015.11, 主要负责人。

致 谢

首先，对我的研究生导师刘崇茹教授表示衷心的感谢！

在我两年半的研究生生涯中，刘老师的谆谆教诲让我明白，科研虽然辛苦，但辛苦之后的收获才真正鼓舞人心。在过去的两年半学习工作中，我有过彷徨，有过后悔。彷徨是因为面对困难不知该如何前进，后悔是因为自己的懒惰而丢弃了很多大好的机会。但是，每当刘老师用理性的思维、严谨的逻辑鞭策我的时候，我都在想：为什么我不能克服自己缺点更好地完成一项工作？在一次次的接受批评之后，我明白了您的苦心，因为很多时候做很多事情，结果和过程说不清楚谁轻孰重，只有在这件事情结束之前我真正用心完成，就无愧于心。对于科研是这个道理，对于生活中的其他工作亦是如此。是您的开明让我懂得就事论事，对事不对人这个处事原则；是您的开朗让我觉得您就像朋友一样，既是良师又是益友。我会一直记得您爽朗的笑声，在未来的工作中，我也将以您为榜样。

接着我想感谢课题组的同学们。感谢洪国巍师兄，科研道路上的点拨不能少了你；感谢田鹏飞、贞飞龙师兄，不断激励我的科研工作；感谢李海峰大师兄，你是我科研道路的榜样；感谢韩玉蓉师姐，对初来乍到的我关怀备至；感谢同届同门李越，谢谢你一直以来的帮助；感谢王洁聪师妹、徐东旭、胡海洋师弟，有你们的陪伴让我的研究生生涯充实快乐。还要感谢课题组的其他兄弟姐妹们，是你们的关心与帮助，让我度过了两年半丰富难忘的美好时光！

感谢关心我的、支持我的宿舍姐妹们，生活中我们是最棒的姐妹，学习中我们是不抛弃不放弃的伙伴，科研上我们是相互鼓励支持的挚友。我会永远铭记珍惜这段美好的时光，谢谢你们！

最后，我想感谢我的父母和家人，我的一点点成长都离不开你们的支持与陪伴，理解与包容。我将带着你们的期望，在以后的工作和生活中，砥砺前行！