

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

学士学位论文

BACHELOR' S THESIS



论文题目: <u>电力电子化电力系统多速率</u> 仿真中的关键接口技术研究

学生姓名:_	欧阳自强
学生学号:_	5130519140
专业:_	电气工程及其自动化
指导教师:_	严正、舒德兀
学院(系):	电子信息与电气工程学院



摘要

现代电网相关技术发展迅速,电力系统对灵活性及可控性要求提高,电力电子设备被 广泛装备,其中柔性交流输电(Flexible AC Transmission Systems, FACTS)是电力电子化电力 系统中的重要应用,其响应速度快,控制方式灵活,可以调整潮流分布,优化电网运行。 静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)是一种基于全控型电力电子器 件的 FACTS 设备,STATCOM 通过逆变电路与电网并联,在运行中对无功功率进行动态补 偿,可以达到稳定电压、提高系统稳定性、调整功率因素、改善电能质量等目的。其无功 调节响应速度快,输出电流谐波成分低,开关损耗小。但与此同时,对于系统的仿真也出 现了新的问题,传统的机电暂态仿真程序基于电气量基波相量建立数学模型进行分析,对 于电力电子器件通常采用准稳态模型简化,对动态过程中的高频成分和非线性特性不能很 好描述,而电磁暂态仿真程序基于电气量三相瞬时值建立数学模型进行分析,对元件特性 可以较好表达,但是运算量庞大,仿真规模较小。而多速率仿真将全系统拆分为大步长仿 真子系统和小步长仿真子系统,通过合适的接口连接进行混合仿真,既满足了仿真的精确 性要求,仿真速度和规模也得到了保证。

针对电力电子化电力系统多速率仿真中的接口问题,本文基于频移分析理论对 PI 型等 值输电线路建模设计接口。分别以 IEEE9 节点系统和南方电网交流网络系统作为算例进行 仿真,在混合仿真中,电磁子系统在商业软件 PSCAD 中搭建,机电子系统仿真通过 C++ 语言编写程序完成,两个子系统间通过 socket 通讯传递数据,基于频移分析建模的混合仿 真接口通过 MATLAB 编写程序实现,仿真时由 PSCAD 调用相应程序。其仿真结果分别与 全网电磁暂态仿真结果以及传统接口混合仿真结果进行对比,验证了本文提出接口方法的 可行性和有效性。

关键词: 电磁暂态, 暂态稳定性, 多速率仿真, 接口模型, 电力电子, STATCOM



RESEARCH ON KEY INTERFACE TECHNOLOGY IN MULTI-RATE SIMULATION OF POWER ELECTRONICS DOMINATED POWER SYSTEM

ABSTRACT

Modern grid related technologies are developing rapidly. Power system requires increased flexibility and controllability. Power electronics are widely deployed in modern power grids. Flexible AC Transmission Systems (FACTS) is an important application in power electronics dominated power systems. It has fast response and flexible control methods. And it can adjust the power flow distribution and optimize the grid operation capability. Static Synchronous Compensator (STATCOM) is a FACTS device based on fully-controlled power electronics. The STATCOM is connected in parallel with the grid via an inverter. It dynamically compensates reactive power during operation to achieve stable voltage, improve system stability, adjust power factor, and improve power quality. Its response speed is fast, the output current harmonic component is low, and the switching loss is small. At the same time, however, new problems have arisen in the simulation of the system. The conventional electromechanical transient simulation program is based on the analysis of fundamental phasor. For the power electronic device, the quasi-steady state model is usually used to simplify the dynamic process. The high-frequency components and nonlinear characteristics are not well described. The electromagnetic transient simulation program is based on the three-phase instantaneous value of the electrical quantity. The mathematical model can better express the component characteristics. However, the amount of computation is large and the simulation scale is small. The multi-rate simulation divides the whole system into a large-step simulation subsystem and a small-step simulation subsystem, and performs hybrid simulation through appropriate interface connections, which not only satisfies the accuracy requirements of the simulation, but also ensures the simulation speed and scale.

Aiming at the interface problem in multi-rate simulation of power electronics dominated power system, this paper designs the interface model for PI-type equivalent transmission lines based on the theory of shifted frequency analysis. The IEEE9 node system and the China Southern Power Grid AC network system are used as examples to simulate. In the hybrid simulation, the electromagnetic subsystem is built in PSCAD, the electromechanical subsystem simulation is completed by C++ language programming. The data is transmitted between the two subsystems through socket communication. The hybrid simulation interface based on shifted frequency analysis is implemented by MATLAB, and the corresponding program is called by PSCAD during simulation. The simulation results are compared with the whole network electromagnetic transient simulation results and the traditional interface hybrid simulation results, which verifies the



feasibility and effectiveness of the proposed interface method.

Key words: electromagnetic transient, transient stability, multi-rate simulation, interface model, power electronics, STATCOM



н	코
	×

第一章	绪论	1
1.1	课题研究背景及意义	1
1.2	电力电子化电力系统现状	2
1.3	多速率混合仿真研究	3
	1.3.1 发展过程	3
	1.3.2 多速率仿真建模方法研究	5
	1.3.3 机电电磁混合仿真接口研究	7
	1.3.4 多速率仿真接口研究	9
1.4	本文主要工作与论文结构	10
第二章	链式 STATCOM 工作原理及控制策略	13
2.1	链式 STATCOM 工作原理	13
	2.1.1 基本工作原理	13
	2.1.2 典型结构	15
2.2	无功检测方法与链式 STATCOM 数学建模	18
	2.2.1 瞬时无功理论	18
	2.2.2 链式 STATCOM 数学模型	20
2.3	链式 STATCOM 控制策略	23
	2.3.1 系统级控制	24
	2.3.2 装置级控制	25
	2.3.3 器件级控制	27
	2.3.4 直流侧电压平衡控制	29
2.4	链式 STATCOM 工作特性仿真研究	30
	2.4.1 控制策略仿真研究	31
	2.4.2 故障工作特性仿真研究	33
第三章	多速率混合仿真	38
3.1	电磁暂态仿真	38
	3.1.1 电磁暂态程序计算方法	38
	3.1.2 微分方程数值求解方法	39
	3.1.3 基本元件数学模型	40
3.2	机电暂态仿真	43
	3.2.1 暂态稳定性计算方法	43
	3.2.2 方程数值求解算法	44
	3.2.3 网络元件数学模型	46
3.3	多速率混合仿真基本原理	48
	3.3.1 基本原理	49
	3.3.2 网络等值电路	49
	3.3.3 数据交互方式	52
第四章	混合仿真接口技术研究	54



4.1	频移分析基本理论	54
4.2	频移分析建模	56
	4.2.1 基本电气元件建模	56
	4.2.2 算法比较	58
4.3	PI 型等值输电线路模型	59
第五章	仿真实例与分析	61
5.1	仿真实现方法	61
5.2	IEEE9 节点算例	62
5.3	南方电网交流网络算例	69
第六章	结论	75
6.1	本文结论	75
6.2	工作展望	75
参考文	献	77
本科期	间学术成果	82
谢辞		83



第一章 绪论

现今,电力电子技术不断发展并在工程得到实用,现代电网有大量电力电子设备接入, 在发电侧,光伏、风电等可再生能源经逆变器并网;在输电侧,高压直流输电和柔性交流输 电设备改变了传统电网构成;在配电侧,分布式电源由变流器组成微电网系统。它们对电力 系统产生了重要的影响,也引发了一些新的思考:例如如何保证网络运行安全可靠,如何增 强系统稳定性,如何提高运行经济性以及如何改善电能质量。可以预见,电力电子化电力系 统将会成为未来发展趋势,但是,电网中大量由电力电子装置为代表的大量非线性开关器件 也给仿真带来了前所未有的挑战。传统的机电暂态仿真和电磁暂态仿真有各自的局限性,无 法满足电力电子化电力系统对仿真精度和效率等各方面客观需求,相比之下,多速率混合仿 真在一定程度上弥补了两者的不足,其基本原理为基于仿真时间步长和动态元件的时间常数 对整个系统进行分区,对常规的大规模交流网络采用大步长的机电暂态仿真,对需要详尽研 究的部分(例如高频电力电子装置)采用小步长仿真,两者通过建立接口进行数据通讯,这 样可以同时兼顾仿真精度、速度以及仿真规模的要求。当前,多速率混合仿真为大规模的电 力电子化电力系统分析研究提供了一个既可以满足仿真精度要求又可以大幅度提高仿真效 率的技术手段和方法。

1.1 课题研究背景及意义

自十九世纪以来,电磁学相关研究飞速发展,电能的应用推动了社会发展和工业进步, 第二次工业革命以来,人类进入电气时代,一系列电气设备在实际工程中得到应用,电力 系统的概念逐渐形成。传统电力系统以电网形式分布,将自然界以各种形式表现的能源转 化为电能,之后经由输电线路供应至负荷中心,再传输至各分散用户^[1]。而由于电网规模 的扩大,相关电工技术的进步,新型设备不断接入,现代电力系统的结构和运行模式也相 应地发生了一系列变化。

电力电子技术是电工技术领域当中的新技术,通过电力电子器件完成对电能的控制和 转换^[2],上世纪五十年代第一只晶闸管发明并得到工程应用以来,电力电子技术开始蓬勃 发展,被广泛应用于现代工业的各个学科领域^[3]。晶闸管能可控开通,对电能进行控制和 变换,在变流电路以及电子开关中被广泛应用,早期电力电子器件都是基于晶闸管制成。 到七十年代,电力晶体管(Giant Transistor, GTR)、可关断晶闸管(Gate Turn-Off Thyristor, GTO) 在工程中得到实用,全控型器件的研究迅速发展,GTR 是电流控制型器件,可实现自关断, 在许多变流装置都有应用,但由于驱动电路复杂,驱动功率较大等原因,应用范围有所限 制;GTO 是一种高电压大电流的双极型器件,其工作频率较高,可以自关断,在工程中无 需换流电路,具有高导通电流密度、高阻断电压等优点,在大容量逆变器中有较多应用; 随后,电力半导体场效应晶体管(Power MOSFET)的兴起继续促进了电力电子技术的进步, MOSFET 具有工作频率高、开关速度快的优点,其工作频率可以达到 MHz 级别,但也存在 通态电阻大、电流容量较小的缺点,多被应用在小容量、高频率工作电子装置中;绝缘栅 双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)目前发展迅速,应用场合日渐广泛,其 同时兼顾双极型器件和 MOSFET 的优点,具有高输入阻抗,载流密度大,通态压降小,开 关频率高,有良好的工作特性。

当前的电力电子技术有高集成、高频率、低损耗和可控性强等特点,以弱电作为媒介



对强电进行控制,其技术的进步对电力系统的发展产生了重要影响,目前电力电子装置在 现代电网当中有大量应用。在传统的发电系统中,通过电力电子技术可以对励磁进行控制, 优化发电性能,提高发电效率,改善运行特性,达到预期的控制目标。在可再生能源发电 系统中,风速决定了风力发电功率,通过调整励磁电流频率,可以在机组变速工作运行时 保持定子恒定频率输出。太阳能作为一种容易获得的清洁能源,在能源结构中有重要地位, 其发电功率较大,基于电力电子技术的逆变器可以实现电能形式从直流到交流的转换,完 成并网。在输电系统中,高压直流输电(High Voltage Direct Current, HVDC^[4])借助电力电子 技术进行交流电和直流电的相互转换,采用高压直流的方式对电能进行传输,其工作过程 便于控制和调节,传输容量大,效率高,性能优越,同时具有较好的经济性,在现代电网 中得到了大量应用。柔性交流输电系统(Flexible Alternative Current Transmission Systems, FACTS^[5])是电力电子技术在输电系统中的又一重要应用,在工程实际中,柔性交流输电可 以对电力系统进行灵活控制,对系统电压、功率因素、潮流分布进行调节,有提高系统稳 定性和改善电能质量的作用。在配电系统中,基于电力电子技术设备和相关控制策略形成 的用户电力(Custom Power)技术对配电网性能的保证起到了重要作用,保证电能质量是电力 系统的基本要求, CP 技术可以进行无功补偿、谐波治理和电压支撑, 从而改善配电网电能 质量,保障供电安全性和可靠性^[6]。

由于电力电子技术的特点和突出性能,在电力系统中有广泛应用,同时这也对于现代 电网的发展起到了巨大的推动作用,大量的大功率高压直流输电和柔性交流输电设备装备 电网,可以预见电力电子化电力系统将会成为未来的发展趋势。但与此同时,对系统的仿 真提出了全新的挑战,电力电子设备中含有大量的非线性开关元件,仿真难度大。传统的 机电暂态仿真数学模型基于电气量的基波相量建立,采用正负零序网络模式进行分析,对 于电力电子装置中的高频成分和快速暂态特性难以表达:电磁暂态仿真数学模型基于电气 量三相瞬时值建立,使用微分方程描述元件动态特性,仿真精度较高,通常积分步长在微 秒级别,相应的代价是其庞大的计算量,仿真规模较小。显而易见,在对现代电力系统进 行分析时,两种方法都有各自的局限性。而一定程度上,多速率混合仿真弥补了两者的不 足,可以较好地解决了这一问题,对电力系统进行时域分析时,可以将全电网拓扑进行划 分,对常规的大规模交流网络进行大步长机电暂态仿真,对研究中重点关注的含电力电子 装置网络进行小步长仿真,两者通过合适的接口设计进行交互,同时兼顾仿真精度、速度 以及仿真规模的要求。本文提出的多速率仿真方法在传统机电电磁混合仿真基础上进一步 拓展,与频移理论建模相结合,获取更准确的仿真结果。

1.2 电力电子化电力系统现状

由于各地自然环境,资源分布的不同,电网结构的具体形式也有所区别,我们国家的 能源分布极其不平衡,能源集中区域和消耗集中区域分散在东西部地区。并且电能不可以 大规模储存,生产与消耗需要时刻平衡等特点也制约了电力系统的结构和运行。当前,我 们国家的电网结构主要采用集中式生产、远距离传输、分散使用的模式。在过去几十年的 规划发展过程中,我国的电力系统形成了"西电东送、南北互供、全国联网"的主要结构,区 域电网的互联扩大的电力系统的规模,相互之间关联性、影响加强,局部的操作可能会会 对系统的安全稳定运行带来影响,甚至使得整体行为发生变化。

改革开放以来,我国经济飞速发展,相应的电能需求也持续增长,为了满足大规模电能的远距离传输,一系列相关技术应运而生。基于电力电子技术的发展,大量 FACTS、HVDC、整流及逆变装置在实际工程中应用,过去一段时间,中国进行大量投资,建设了一系列高压输电线路;在交流输电工程中,大量 FACTS 设备投入使用,在大规模范围内进行优化配置,提升了系统的快速动态无功补偿能力,电网稳定性得到提高^[7],但随之也使得



电力系统中各种复杂的动态过程相互影响作用加深。

早期电力系统形成时,电能以直流的形式进行传输,在实际工程实践中,因为变压困 难,运行模式复杂,相关技术发展缓慢。而随着交流设备的发明与发展进步,三相交流输 电模式被最终确定。但电力电子学科的飞速进步使得直流输电技术再次得到发展,比较交 流输电,在某些方面,直流输电具有更大优势^[8]:第一,在相同传输功率下,直流输电系 统造价低、经济型更好,同时绝缘要求相对交流系统更低;第二,两端交流系统不需同步 运行,可以大大提高系统稳定性,甚至可以使不同频率电网间进行非同步互联;第三,在 输电过程中,不存在对地容性电流,所以不用额外无功补偿,同时输电距离不被限制;第 四,动态响应速度快,可快速控制传输有功功率及无功功率,满足系统运行要求。

当前交流输电系统运行中,不可避免存在一些弊端,电能传输过程中损耗过高,影响 经济效益;负荷中心电压支撑不足,使得电压波动较大;系统中非线性、冲击性无功负荷 影响电能质量,谐波含量高;系统中感性负荷大量存在,对无功补偿有更高要求。而柔性 交流输电技术可以在一定程度上解决以上问题,柔性交流输电技术可以控制潮流分布,优 化系统运行模式,增加输电容量;对系统快速动态无功补偿,提高稳定性,改善电能质量; 长距离输电线路的传输功率受稳定极限的限制,FACTS设备可以安装在长距离输电线中间 或受端,为输电线路提供电压支撑^[9],增强长距离输电系统的稳定性。目前,FACTS设备 种类日渐增加,其工作原理,性能也各不相同,早期设备有静止无功补偿器(Static Var Compensator, SVC),其基于传统的半控型器件晶闸管进行控制,目前技术相对成熟,有广 泛应用,基于对全控型电力电子器件的研究,新一代的设备静止同步补偿器(Static Synchronous Compensator, STATCOM)得以发展并在工程上得以应用。

现代电力系统规模不断扩展,大量电力电子装置陆续接入^[10],截止 2018 年底,南方电 网已投入 10 条直流输电线路构成"西电东送"网络,交直流总输电容量超 5000 万千瓦, 国家电网已建成"八交十直" 特高压输电网络、并且有两条直流输电工程核准在建。与此 同时,FACTS 装置已广泛应用于交流网络,其中示范性工程有伊敏至冯屯输电线的 TCSC 工程、鞍山红一变的 SVC 工程、广东电网的 STATCOM 工程、江苏苏州南部电网的 UPFC 工程等。随着高电压、大功率电力电子器件的发展,相关装置在交直流系统中已经发挥着 更加突出的作用^[11],虽然,大功率电力电子装置的应用使得电力系统运行高效,更具备经 济性,但同时也为系统的运行和控制带来了新的挑战。

1.3 多速率混合仿真研究

电网规模扩大,运行控制复杂度增加,我国电力系统构成成分复杂,其中南方电网已成 为世界上最大的交直流混合输电系统,且输电线路之间相互耦合影响,系统中包含大量高频 开关元件,传统单一的机电暂态仿真或电磁暂态仿真不能很好适应对大规模网络中局部子系 统快速动态过程进行研究的需求。在这样的背景下,多速率仿真对全网络进行拆分,根据精 度要求对各个子系统采用不同步长进行仿真分析,为现代电力系统的研究分析提供了新的方 法。

1.3.1 发展过程

电力系统规模巨大,构成元素多样,其组成元件特性各异,在运行过程中,动态过程复杂,所涉及的时间尺度跨度大,电压、频率等电气量的动态响应时间短至几微秒,长至数小时,如图 1-1 所示,电力系统动态可按其时间尺度的不同分为三类:电磁暂态过程、机电暂态过程以及中长期暂态过程^[12]。





图1-1 电力系统动态过程时间尺度

电力系统的电磁暂态过程主要考虑网络中元件电场、磁场、电流以及电压的变化,其暂态过程快,持续时间短^[13],在分析过程中,需要考虑磁场与电场间的耦合关系,对于长输电线,需要考虑其分布参数和波过程;电力系统的机电暂态过程主要考虑电机电磁转矩变化引起的转子机械运动变化过程,其动态变化过程较电磁暂态更慢,持续时间更长,期间系统频率变化不大;电力系统中长期动态过程主要考虑大规模电力系统受到扰动后,在较长时间尺度内有功功率、无功功率的变化情况,其变化过程较慢,在分析时还需要考虑到发电系统、控制系统以及保护系统的动态特性。

在对电力系统进行分析时,很难完全描述所有时间尺度的动态过程,因而,在实际仿真 过程中,通常根据所关心的研究问题,详尽描述其动态过程,而其它过程则采用近似模型进 行简化,选用合适的仿真方法^[14]。以研究换流器与电网之间相互作用为例,其中,当研究 关注发电机与电网间相互作用时,需要考虑中长期暂态和机电暂态的动态过程;若研究只关 注换流器内部的暂态,则需要考虑系统中电磁暂态的动态过程;当关注换流器与电网之间相 互作用时,需同时考虑系统中电磁暂态和机电暂态过程。

为了解决因电力系统规模过大带来的仿真效率过低问题以及对系统中局部需详细研究 子系统高精度仿真的要求,多速率仿真方法(Multi-rate Method)得以提出和应用^[15-16],其主 要包括机电电磁混合仿真方法以及电磁子系统内部的多速率仿真方法。电力系统多速率仿真 基于仿真步长的不同将系统划分为若干个子系统,对系统当中需要详尽研究的部分采用小步 长高精度仿真,其余部分采用大步长进行仿真^[17],子系统间采用合适的接口连接,进行数 据交换。多速率混合仿真对于电力电子化电力系统中非线性元件的动态特性可以较好的描 述,同时可以仿真大规模网络,对现代电力系统分析研究有较大的优势,多速率仿真兼顾仿 真速度与精度,其早期研究基础是机电电磁混合仿真。上世纪七十年代末,西门子公司开发 的 NETOMAC 软件结合了电磁暂态仿真和机电暂态仿真两者之间优点,通过对网络分块, 分别建立相应模型,子网络间进行数据转换和交互,最早实现了对电力系统的混合仿真^[18], 由此也开启了对多速率仿真的研究。

在机电电磁混合仿真中,机电子系统数学模型采取基波相量形式建立,忽略了系统中 高频谐波分量,其计算模型分为正序等值模型和三序等值模型两类,其中三序等值模型考 虑了系统处于不对称状态时的负序和零序分量,电磁子系统可通过状态空间法或节点分析 法进行求解,两者通过接口互联。但随着研究的深入,工程中对仿真精度的要求也随着提 高,多速率仿真方法的研究是在常规机电电磁混合仿真方法基础上的延伸,对复杂系统中 的部分微分方程加速求解,因而全系统各状态变量时间常数不再一致,根据状态变量的不 同时间常数划分成不同仿真速率的集合,对各集合中微分方程采用不同的步长求解。图 1-2

第4页共83页



所示即为多速率仿真发展过程。



1.3.2 多速率仿真建模方法研究

电力系统建模仿真的本质是建立并求解一系列微分方程及代数方程,由于动态过程时 间尺度的巨大差异,对于关心问题的不同,建模方式也相应采取了不同形式的简化和等效, 因此仿真速率也各有差异。

(1) 电磁暂态(Electromagnetic Transient, EMT)仿真程序基于电气量三相瞬时值进行分 析,其系统模型建立在元件微分方程和网络代数方程上,通过数值积分的方法进行计算, 对元件特性可以较好表达,不受时间尺度限制,可以描述高频的电磁暂态过程。目前,用 于电磁暂态求解的主流方法有两种,分别是状态变量法和节点分析法。状态变量法对计算 网络的状态方程通过数值积分离散求解,MATLAB 中就采用该方法计算电路;节点分析法 则以电气元件为单位形成诺顿等值电路,继而构建矩阵进行求解,目前大多仿真软件都采 用该方法。节点分析法因计算机实现容易,更适用于大规模复杂网络计算;状态空间法仿 真规模较小,但数值稳定性更好,不会出现明显数值振荡。

根据采样定理,仿真步长与系统中最高频率有关,因此,电磁暂态仿真步长小,通常 在微秒级别,运算量庞大,仿真过程较慢,仿真网络规模较小^[19]。主要用于分析操作或故 障后的暂态、电磁干扰以及电力电子装置中的快速暂态过程等。

电磁暂态计算程序 EMTP(Electromagnetic Transient Program)^[20]是目前通用的一种数字 仿真程序,在世界范围内有广泛应用,其算法由加拿大的 Hermann W. Dommel 教授在 1969 年提出^[21],该方法在时域中描述电力系统并求解相应方程,运用数字计算机强大的计算能 力,可以很好地完成对电力系统的仿真,成熟的商业软件 PSCAD 便是使用该算法进行计算 求解,此外,常用的电磁暂态仿真软件还有德国西门子研发的 NETOMAC^[22],中国电科院 研发的 EMTPE 等。

(2) 机电暂态仿真程序基于电气量基波相量进行分析,其相量模型在准稳态假定的前提下建立,即系统中电压电流等电气量均以基频正弦波的形式出现,且其幅值、相位的变化速度远小于基频。与电磁暂态仿真相比,对电气元件模型采取了一定的简化,忽略了发电机定子侧、输电线以及负荷的暂态过程,其中对于电力电子器件通常采用准稳态模型进

第5页共83页

() 上海交通大学

行模拟,对于高频成分和非线性特性不能很好描述。其数学模型仅保留了电气量的基频信息,所以相应的积分步长较大,通常在毫秒级别,其计算量较电磁暂态仿真大幅度减小。

机电暂态仿真过程中,系统由微分方程组和代数方程组联立求解,其中微分方程组描述系统变化过程,代数方程组描述网络结构,其初值条件为稳态时的潮流运算结果,两组 方程迭代求解。在仿真过程中,只考虑电气量的基频成分,网络连接采用复导纳进行描述, 常用于仿真大规模网络,主要用于分析电力系统的稳定性问题,包括大扰动后的暂态稳定 性问题和小扰动后的静态稳定性问题^[23-25]。常见的机电暂态仿真程序有美国的 ETMSP,中 国电科院开发的 PSASP 等。

(3) 动态相量(Dynamic Phasor, DP)数学模型基于时变傅里叶分析建立, 文献[26]中提出 了基于状态平均理论的动态相量法, 对于系统中电气量仅考虑其主导频率, 通常电力电子 装置中谐波成分具有一定规律, 该思路应用到对电力电子装置的仿真中具有一定的实用价 值, 文献[27]提出了将动态相量引入到仿真中的想法, 并推导了基频下的电阻、电感、电容 等元件的动态相量模型, 随之, 该方法也被应用于分布参数输电线路^[28]、交流电机^[29]以及 STATCOM^[30]等电气设备的建模中。

动态相量基于时变傅里叶分析对器件进行相应建模,将系统中电气量看作基波与各次 谐波动态相量的组合,在各频率下建立动态相量方程描述元件暂态特性。该理论突破了传 统相量中正弦稳态的假定条件,对不同频率下的暂态过程进行描述,且相互解耦,反应了 系统的宽频特性,较机电暂态仿真具有更优越的性能。采用动态相量对电力电子设备建模 时,可选择系统中占主导地位的频率分析其动态过程。

因此,与传统机电暂态仿真相比,基于动态相量建模仿真可以关注系统更多高频特性,同时在保证精度的同时,一定程度上减小了计算量,提高了仿真速度。但随着关注频率范围的扩大,动态相量方程数量也随之快速增长,计算效率降低。

(4)频移分析 (Shifted Frequency Analysis, SFA)数学模型基于希尔伯特变换 (Hilbert Transform)^[31-32]建立,在无需进行准稳态简化假设的情况下可有效获得基频附近的时域仿真结果。在电力系统运行中,电压电流等电气量频率通常维持基频不变,因此可以被视为一 窄通频带的带通信号,在稳态交流电路理论中,常规方法通常使用复数即相量表示实际正 弦信号。而频移分析建模其基本原理是将电力系统中的工频正弦带通电气量经信号处理无 损变换为只含正频率频谱的复数解析信号 (Analytical Signal, AS)^[33],将解析信号的频谱向 左平移一个基频后至 0Hz 附近 ^[34-35],可得到原始实信号的解析包络信号,即为频移相量。

因为仿真的时间步长与采样频率相关,则频移后的低频率系统意味着大积分步长的可 行性,基于频移相量对电气元件建模可以在不损失精度的前提下采用更大步长仿真,提升 暂态仿真效率,精确地描述基频附近的动态行为。同时基于频移分析的电磁暂态可以提供 其相量结果,准确跟踪三相电力系统中状态变量的变化,其相量提供时域波形的包络,可 以通过变换得到电气量瞬时值。该方法将原始信号频谱左移,使工频交流信号变为解析包 络信号,频谱中频率相应降低,但是,对计算量减少有限,且计算过程采用复数表示,因 此,应用范围受限。

建模方法	数学基础	积分步长	仿真精度
电磁暂态仿真	时域分析	小	高
机电暂态仿真	傅里叶分析	大	较低
动态相量	傅里叶分析	大	较高
频移分析	希尔伯特变换	可调	高

表1-1 多速率仿真建模方法特点

表 1-1 对多速率仿真的建模方法进行了总结。由上述分析可知,目前常见的仿真建模方



法中,电磁暂态仿真精确度最高,可以完整描述系统动态过程,但因采样定理限制,仿真 步长小,效率低,面对大规模复杂网络的仿真,甚至会出现"维数灾难"的问题^[36];机电 暂态仿真因只考虑基频分量,模型相对粗糙,不能很好表达高频和非线性动态;动态相量 模型构建了不同频率下元件微分方程,一定程度优化了电气元件宽频细节的描述,但其数 学模型建立基于局部傅里叶变换,会产生信息损失,不同频率间相互解耦,相互之间影响 不能表达,因此,也存在一些缺点;频移分析模型在电磁暂态模型的基础上,通过希尔伯 特变换对信号进行处理分析,可以在不损失精度的前提下建模,电气量信息无损失,其表 达形式可以同时提供相量值和时域瞬时值,提高了仿真效率。

1.3.3 机电电磁混合仿真接口研究

机电电磁混合仿真是多速率仿真基本形式,其基本思路是根据具体工程实际对系统进 行分块,建立可以表征子系统间相互作用的接口等值电路,之后将等值电路和与之对应的 子系统分别采用电磁暂态仿真和机电暂态仿真,接口等值电路的参数按设计时序进行交互, 反映不同子系统间的相互作用。而两个子系统之间数据形式、计算方法等存在差异,相互 之间如何联接,如何进行信息交互是其中的重点,因而接口研究也是其中关键性问题。



图1-3 多速率仿真网络划分示意图

机电电磁混合仿真中网络可进行分割如图1-3所示,其中子系统1代表大规模交流网络, 系统2代表需要详细研究的局部网络,两个子系统由母线BUS-A和BUS-B分割。因而混合仿 真中接口设计主要包含以下几个要素:(1)如何选择接口位置进行网络划分;(2)两侧网络等 值电路如何表示;(3)接口数据如何交互。以往的研究基于以上问题进行了相应的讨论。

(1) 网络划分及接口位置选择

1981年,Heffernan 等人首先创建了含高压直流输电系统的混合仿真系统^[37-39],利用高 压直流输电系统换流站交流母线进行网络分割,其中的高压直流输电系统通过状态变量法 进行建模,系统其它部分通过传统机电暂态程序进行仿真。将接口位置设立在电力电子设 备与交流大电网的公共连接点处是目前研究中大多数文献所采用的方法,这样有助于缩小 小步长仿真范围,减少计算量,同时也可以相应减少接口数目,易于操作。

而进行网络分块时,接口位置的选择对仿真结果有关键影响,文献[40] [41]提出了将接口位置延伸到交流系统内部的想法,改善了由于电力电子设备交流侧母线作为接口所导致的波形畸变等问题,提高了全系统仿真精度,但是也相应提高了接口处理的复杂度,总体计算量大幅度增加,在目前研究中使用较少。

第7页共83页



(2) 网络等值电路

当全网络分解后,不同子系统间只能以接口等值模型的形式表达相互间的电气关系,等值网络的形式需要尽可能完善地描述其表示系统的电气信息,确保仿真精度。



图1-4 多速率混合仿真接口等值模型

机电电磁混合仿真接口等值模型如图 1-4 所示,可令两个子系统接口电流电压分别为 (*u*_{sub1},*i*_{sub1})和(*u*_{sub2},*i*_{sub2}),其关系可由函数式表示如下:

$$\begin{cases} u_{sub1} = f(i_{sub1}) \\ u_{sub2} = g(i_{sub2}) \end{cases}$$
(1-1)

其中函数*f*与*g*描述了两个子系统间接口处电流电压的对应关系,在实际仿真中,根据不同的近似表达可以得到不同的等值网络。

机电侧子系统通常情况为有源系统,因此在对电磁子系统仿真时,机电子系统多采用 诺顿等值电路或戴维南等值电路表达,文献[42] [43] [44] [45]中就分别采用了戴维南或诺顿 等值完成了混合仿真;在机电子系统仿真时,通常会根据实际混合仿真算例的特点选择电 磁子系统等值方式,当电磁侧子系统研究对象为 HVDC 时,可以根据其采用的定电流控制 策略采用可控电流源表示;若电磁侧子系统研究对象为 FACTS 设备如 SVC 时,可以采用 注入功率源的方式表达。文献[46]中提出将电磁子系统等值为接口母线处一可变阻抗的方 案,文献[47] [48]中则将电磁暂态子系统等值为一可控电流源。

以上提出的等值形式简单可行,使用灵活,目前对于混合仿真的研究中,大多数等值 电路都是围绕这些方案展开,表 1-2 对机电电磁混合仿真中常见的简单等值电路进行了总 结。

表达方法	等值模型	数学表达
电流源	j į	i=j
电压源	₹ ₽	u=e
阻抗		z=u/i
戴维南等值		u=e-zi
诺顿等值		i=j-uy
	第8页共83页	

表1-2 子系统等值网络



在此基础上, 文献[49][50][51]中提出节点分裂接口算法, 给出了混合仿真中机电子系统等值电路中导纳矩阵不对称状态下的计算方案。

由于在混合仿真的过程中,机电子系统采用基频等值阻抗的形式会失去或改变网络的高频特性,不能真实地反应系统中的谐波特性,文献[52]在以往研究的基础上提出了用频率 相关等值阻抗表示机电暂态子系统的方法,该方法可以对系统的宽频动态响应更好地描述, 一定程度上解决了与直流系统混合仿真时接口位置波形畸变的问题。

文献[53]中提出采用频率相关网络等值(Frequency Dependent Network Equivalent, FDNE) 描述机电暂态子系统,该方法可以对系统接口处的宽频动态响应更好地描述,可以较为准 确地表示机电侧网络在各频率下特性,目前该方法在混合仿真中也有一定的应用。

(3) 接口数据交互

在对机电电磁混合仿真的研究中,机电侧与电磁侧计算所采取的数值形式不同,电磁 暂态仿真基于三相瞬时值,机电暂态仿真基于正负零序相量,因此接口数据需要进行相应 转换,文献[54]中提出了采用快速傅里叶变换的方法提取接口电气量相量;文献[55] [56]提 出了采用曲线拟合的方法获得采样时刻电磁侧接口处基波相量幅值与相位,这也是目前在 机电电磁混合仿真中最常用的两种数据转换方式。

文献[57]介绍了一种频移相量建模的仿真方法,同时基于频移相量模型仿真提出了相应 的混合仿真接口方案,以便更好地与电磁暂态仿真子系统交互数据,该接口方案可以同时 获取电气量三相瞬时值和对应相量,可以得到很好的仿真结果。

文献[58]提出在混合仿真中,采用动态相量建模作为电磁子系统和机电子系统的仿真接口缓冲区的方案,该方法避免了采用相率相关等值网络,极大减小计算量,但同时可以获得网络的宽频动态特性。

混合仿真开始后,每个仿真步长结束,接口处电气量信息便会更新,通常多速率混合 仿真中不同子系统间仿真步长不同,所以需要设计合适的数据交互时序进行通讯。文献[59] [60] [61]中都选用了串行时序交互方式,在仿真时,两个子系统轮流独自完成一定时长的仿 真,再将更新后接口数据传递给对方,其中一个子系统进行仿真时,另一子系统处于等待 状态,两者迭代交替进行,而相互等待的状态也较低了混合仿真的效率,这也是目前研究 中最常见的一种交互方案; 文献[62] [63]提出一种并行时序交互方式,该方法无需仿真子系 统相互等待,较串行数据交互时序在效率上得到了大幅度提升,但与此同时也带来了一定 的精确度问题。

1.3.4 多速率仿真接口研究

不同方式的建模仿真方法具有各自的特点,适用于不同场合下的仿真。针对大规模电 力系统中局部子系统进行详尽研究,采用多速率仿真可以满足仿真精度与仿真规模的要求, 可根据采用建模方式的不同对多速率仿真进行分类,其中多区域戴维南等值电路(Multi-Area Thevenin Equivalent, MATE)^[64]和波形松弛技术(Waveform Relaxation, WR)^[65]是其中典型的 两种方法。

(1)采用波形松弛技术实现多速率仿真,可按照微分方程的积分步长将整个系统划分 为若干不同仿真速率子系统并独立进行计算;然后在特定的交互时刻,采用上一时刻互联 子系统的历史值更新接口变量,构造边界方程,采用相关迭代算法求解,直至接口电气量 数值满足精度要求。波形松弛技术可实现边界间的无时延协调,但是计算过程需要迭代, 难以应用于大部分商业仿真软件,若分区数量较多,波形松施技术算法的迭代运算量随之 增加,若系统出现较大干扰,求解效率不稳定。同时,该方法对分网策略依赖性较高,若 不同时间常数的动态元件划分到同一个子系统中,可能导致迭代次数增加,收敛性下降, 甚至出现不收敛的情况。

(2) 多区域戴维南等值电路的方法将整个系统解耦为若干独立的子系统,同时,不同

第9页共83页



子系统之间的相互作用通过多区域戴维南等值电路反映,该方法对接口处理比较简单。分 区后,对不同仿真步长子系统进行协调求解,不同子系统根据不同仿真步长的积分方法进 行离散化,通过对慢速子系统的边界戴维南等值电路进行采样为快速子系统提供协调计算 的等值电路,在对快速子系统进行多次连续积分后,与慢速子系统同一时刻进行一次协调 计算,目前该方法仅局限于全电磁暂态建模,对其它建模方法的应用仍需进一步研究。多 速率 MATE 算法在接口处既保留了不同子系统完整的动态过程,高频信息不损失,子系统 间协调无时延,且子系统分区解耦计算,可以通过并行计算进行加速,但 MATE 算法目前 仍只适用于电磁暂态建模,总体计算量仍然较大。

表 1-3 从接口电气量频率特性、接口时延、精度、效率等方面对几种常见多速率仿真方 法的特点进行了总结:

多速率仿真方法	接口频率特性	接口时延	精度	效率
机电电磁	基频	有时延	较低	盲
机电电磁 (FDNE 接口)	部分高频	有时延	较高	较高
动态相量建模	部分高频	有时延	较高	较高
波形松弛技术	精确高频	无时延	高	较低
MATE	精确高频	无时延	高	较高

表1.3	名谏率	仿直建	榿方	法特	占
121-2		四長日	1 × 11	1/2/1/1	~~

由上述分析可知,接口的频率特性和时延对混合仿真的准确性起到关键性影响,传统 机电电磁混合仿真尽管对接口设计做出大量改进措施,但因建模方式简单,在仿真精度上 受到限制,而波形松弛算法和多速率 MATE 算法各子系统间独立计算,边界协调求解,相 互间交互不存在时延,可以保留接口电气量高频信息,为当前的多速率仿真研究提供了一 个很好的思路。

1.4 本文主要工作与论文结构

在以往关于多速率仿真的研究中,多关注于提高对全系统的仿真效率,各方面都有一 定的进展,在一定程度上满足了工程实际的需求。但随着越来越多的电力电子设备接入电 网,呈现电力电子化电力系统趋势,动态过程时间跨度大,电力电子装置之间的相互作用 加强,因此也对仿真中动态过程和高频特性的描述提出了更高要求。在这样的背景下,目 前关于多速率仿真的研究仍存在以下问题值得深入探讨:

(1)关于机电子系统和电磁子系统的等值网络,在混合仿真对全网络进行分块仿真时, 互联子系统通常以等值电路的形式嵌入,相应等值网络需要尽可能精确的描述子系统的电 气信息,确保仿真精度,目前研究中多采用诺顿等值和戴维南等值电路,该方式简单可行, 但是会导致原子系统高频特性的改变或丢失,如何设计更加全面的等值模型并且准确快速 获得相关等值参数。

(2)目前,串行交互和并行交互是多速率仿真中主要应用的两种数据交互方式,若采用串行交互,子系统仿真时相互等待,会产生时延,影响仿真效率;并行交互无需等待,在一定程度上提高了计算速度,但是当网络拓扑改变,产生电气量突变时,仿真会产生误差,在精度上有所欠缺,如何设计高效且满足精度要求的通讯方案。

(3) 机电暂态仿真基于电气量的正负零序基波相量;电磁暂态仿真基于电气量三相瞬时值,在数据交互时,需要通过三相瞬时值提取相应的基波分量,当前主要采用的方法有 傅里叶分析和曲线拟合法,但是这两种方式都存在一定的延迟,并且不能很好地处理快速 变化的暂态信号。

(4) 目前的研究对于高次谐波分量关注度不高,对于电力电子设备与电力系统间相互



作用不能完全反应,如何建立接口模型更好描述动态过程中的波形畸变和高频特性。

针对当下电力电子化电力系统的发展趋势,本文通过对柔性交流输电设备链式 STATCOM 接入电网后的多速率混合仿真进行讨论。首先对链式 STATCOM 工作原理进行 研究,在此基础上建立数学模型,并完善其控制策略;并且分别对机电暂态仿真、电磁暂 态仿真以及多速率混合仿真的原理进行说明;基于频移分析搭建了混合仿真接口模型。在 此基础上,采用商业软件 PSCAD 对电磁子系统进行仿真,由 C++语言编写程序对机电子系 统进行仿真,在 MATLAB 中编写程序实现接口功能,由 PSCAD 自定义元件调用,建立混 合仿真实验平台如图 1-5 所示:



图1-5 混合仿真实验平台

通过两个仿真算例对本文提出的基于频移分析建模的混合仿真接口进行验证,并与全 系统电磁暂态仿真及传统接口混合仿真结果进行比较,说明了该接口模型的可行性和有效 性。



图1-6 论文整体构架

本文整体框架如图 1-6 所示,其中本章(第一章)主要介绍了我国电力电子化电力系统 的现状和多速率混合仿真的发展历程及研究现状,并讨论了在电力电子化电力系统的大背 景下进行多速率混合仿真的意义;第二章主要介绍柔性交流输电装置中的链式 STATCOM 并网后对系统进行无功补偿的工作原理以及几种典型拓扑结构,在两相旋转坐标系下建立



相应数学模型,基于瞬时功率理论讨论了其相关控制策略,并且对系统故障状态下采用不同控制策略的补偿效果进行仿真分析;第三章主要介绍了电力系统的数字仿真方法,分别对机电暂态仿真和电磁暂态仿真的建模过程和仿真流程进行分析,在此基础上,讨论了基于两者的多速率混合仿真原理、网络等值电路和混合仿真接口;第四章主要讨论频移分析的基本理论,并基于频移相量对电力系统中一些基础元件进行建模,在此基础上,构建了基于频移分析的 PI 型等值电路的混合仿真接口模型;第五章主要采用 IEEE9 节点系统与 STATCOM 互联算例以及南方电网交流系统与 STATCOM 互联算例,分别进行全网络电磁暂态仿真,传统接口混合仿真以及基于频移分析建模接口的混合仿真,并对仿真结果进行比对;第六章对本文的工作和成果进行了总结,文中所提出的基于频移分析建模接口的混合仿真在动态性能上较传统接口混合仿真有一定提高,但其假定电力系统信号为带通信号,因此对于信号高频成分的描述有所不足。在此基础上,对未来的工作和研究方向进行了展望。



第二章 链式 STATCOM 工作原理及控制策略

电网中无功功率的传递对电力系统运行有很大影响,电网中存在大量感性无功负荷^[66], 且由于电力电子器件在电力系统中应用的日益广泛,其中非线性元件在工作中也需消耗一 定无功功率,为系统带来负担。同时电力系统中非线性、不对称和冲击性无功负荷增多会 严重影响到电能质量,导致电压波动、谐波含量高、功率冲击等问题^[67-68],所以可以快速 响应的大容量无功补偿装置对电力系统的稳定可靠运行起到重要作用。

并联电容器是最常见的传统无功补偿装置,其原理简单,操作维护方便,但只能补偿 感性无功,且补偿能力受限于系统电压;同步调相机可以通过调节控制发出不同大小和性 质的无功功率,但其运行和维护相对复杂,动态相应能力较弱。由晶闸管进行控制的静止 无功补偿装置 SVC 原理简单,运行和维护都相对较为容易,可以快速响应进行补偿^[69],有 良好的工作性能,但其缺点在于其谐波成分较大,需额外滤波装置消除谐波,并且需要大 电感或大电容。

随着技术进步,静止同步补偿器 STATCOM^[70-71]迅速发展并且在工程上应用,其基于电 压源逆变器实现动态无功功率调节,在不同运行工况下,控制 STATCOM 可以发出或者吸 收无功功率进行动态补偿,达到稳定电压、提高系统稳定性、调整功率因素、改善电能质 量等目的,其无功调节响应速度快、输出电流谐波成分低、开关损耗小。其中链式 STATCOM 逆变器各相由一系列逆变桥级联构成,具有耐高压、体积小、经济效益高、动态响应快、 控制方便等优点,可模块化构成,且便于扩展^[72-74],目前在电力系统中有广泛应用,可用 于电压稳定控制,快速无功调节,促进新能源接入电网的高效利用。本章将讨论链 STATCOM 的工作原理和相应的控制策略。

2.1 链式 STATCOM 工作原理

STATCOM 采用全控性大功率电力电子器件(例如 IGBT, GTO 等)构成逆变电路,经 由电抗器与系统连接,可对逆变电路交流侧输出电压幅值大小与相位进行控制,等效一可控 交流电压源;或者可直接控制输出交流侧电流,进而控制其与电力系统之间的功率传递^[75], 可以很好地完成动态无功补偿,实现对电力系统进行灵活控制。

2.1.1 基本工作原理

图 2-1 为 STATCOM 原理接线图,其直流侧电容作为储能元件的同时可以提供电压支撑, 逆变器可以将直流电压变换为交流电压,通过 PWM 触发脉冲控制全控器件闭合或开断,从 而控制交流侧电压的大小相位。



图 2-1 STATCOM 原理接线图

考虑到开关器件的耐压,链式 STATCOM 各相由一系列逆变桥(H-Bridge Inverter, HBI) 级联构成,其结构如图 2-2 所示:

第 13 页 共 83 页



图 2-2 链式 STATCOM 结构图

链式 STATCOM 主电路通过电抗器与电网并联,如不考虑工作时损耗,则 R=0,可以 通过对逆变电路进行调节进而控制 STATCOM 向电网输出感性或容性无功功率,到达对系 统进行动态补偿的效果。仅考虑基频,忽略谐波分量,STATCOM 即为一交流可控电压源, 工作时单相等效电路图如下所示:



图 2-3 STATCOM 单相等效电路图

当电流超前电压时,STATCOM发出感性无功功率,当电流滞后电压时,STATCOM发出容性无功功率,其工作时向量图如下:



图 2-4 STATCOM 工作相量图

其中, $\overset{g}{U}$ 为系统侧母线电压相量; $\overset{g}{V}$ 为 STATCOM 交流侧电压相量; $\overset{g}{U}_{L}$ 为等效阻抗压降; $\overset{g}{I}$ 为系统流向 STATCOM 电流相量; R为等效电阻; L为线路电抗; δ 为 $\overset{g}{U}$ 和 $\overset{v}{V}$ 之间相角 差,以 $\overset{v}{V}$ 超前 $\overset{g}{U}$ 为正; φ 为等效阻抗的阻抗角。

由向量图可知:

$$U_L = \frac{U\sin\delta}{\cos\varphi} \tag{2-1}$$

第 14 页 共 83 页



$$V = U\cos\delta - U_L\sin\phi \tag{2-2}$$

STATCOM 交流侧电压即为:

$${}^{g}_{V} = \frac{\overset{g}{U}\cos(\varphi + \delta)}{\cos\varphi}$$
(2-3)

从电网到 STATCOM 功率传输大小为:

$$S = \stackrel{g}{U} \stackrel{g}{I^*}$$
(2-4)

其中有功无功功率分别为:

$$\begin{cases} P = UI\sin(\delta) = U\frac{U\sin(\delta)}{R}\sin(\delta) = \frac{U^2}{2R}\sin^2(\delta) \\ Q = UI\cos(\delta) = U\frac{U\sin(\delta)}{R}\cos(\delta) = \frac{U^2}{2R}\sin(2\delta) \end{cases}$$
(2-5)

则稳态时,电网流向 STATCOM 有功电流 I_p 和无功电流 I_q 大小分别为:

$$\begin{cases} I_p = \frac{U}{2R} \sin^2(\delta) \\ I_q = \frac{U}{2R} \sin(2\delta) \end{cases}$$
(2-6)

可以得知,稳态时, $\stackrel{0}{V}$ 与 $\stackrel{1}{I}$ 之间相角差为 90°, $\stackrel{0}{U}$ 与 $\stackrel{1}{I}$ 之间相角差为 (90- δ),有功功率 方向由电网到 STATCOM,且始终大于 0,用于逆变过程中开关损耗,其等效电阻为*R*,无 功功率方向大小由功角 δ 决定。由式(2-3)可知 δ 与 $\stackrel{0}{V}$ 的大小相对应,调整 δ 的大小,同时调 整 $\stackrel{0}{V}$ 的幅值,即可调节无功功率输出的大小及性质,当 δ >0时,系统向 STATCOM 传输感 性无功,当 δ <0时,系统向 STATCOM 传输容性无功。

电容储能 $W = 1/2Cu_{dc}^2$,其中 u_{dc} 为电容电压,在动态过程中, δ 的改变会使电容器发生充放电过程,同时,电容器两端电压幅值也发生相应改变,若 STATCOM 从系统吸收有功功率,则电容充电,直流侧电压上升;反之若 STATCOM 输出有功功率,则电容放电,直流侧电压下降。

2.1.2 典型结构

STATCOM 根据装置与电网并联的方式可分为直挂式和降压式两种类型,其中直挂式 STATCOM 通过电抗器与交流系统母线连接,其结构如下图所示:



图 2-5 直挂式 STATCOM 结构图

而降压式 STATCOM 则通过变压器与交流系统母线连接,其结构如下图所示:





图 2-6 降压式 STATCOM 结构图

两者与电网连接方式不同,其工作特性也有所差异,由于技术条件的限制,35KV及以上电压等级母线通常采用降压变压器与 STATCOM 联接,变压器漏抗在系统中等效为一电感,但逆变器交流侧输出为调制后的阶梯波形,其 dv/dt 较大,暂态过程迅速,所以在变压器后仍需一电抗器连接,到达抑制高频谐波分量的目的;而直挂式 STATCOM 多应用于电压等级较低的场合,且多采用链式结构,因其级联模块多,输出电压和电流波形更接近与正弦波;对于相同容量等级的装置,降压机型由于变压器的迟滞作用,其动态响应速度相对较慢;降压机型由于连接变压器的存在,变压器损耗比重较大,直挂机型由于采用逆变桥模块级联的方式,电力电子器件数量较多,开关损耗较大;直挂机型模块数量较多,相比较降压机型,故障概率增高,对控制环节要求也更高。

STATCOM 根据各相链节间连接方式的不同可分为星接式和角接式两种类型^[76],其中 星接式 STATCOM 三相链节接电网端分别接入电网三相中,另一端则连接在一起,其结构 图如下所示:



图 2-7 星接式 STATCOM 结构图

若系统电压等级为U,对于容量为S的星接式链式STATCOM,其线电流为:

$$I_L = \frac{S}{\sqrt{3}U} \tag{2-7}$$

因此在设计选择器件时,各相级联单元模块的最大工作电流有效值应大于 *I*_L,若单元 模块的交流输入电压为 *V*,则每一相所需串联的单元模块个数应满足:



(2-8)

$$n > \frac{U}{\sqrt{3}V}$$

为了保证设备运行的安全可靠,链节级联数量通常有冗余设计。

角接式 STATCOM 三相链节直接首尾相连接,接电网端通过连接电感接入电网,其结构图如下所示:



图 2-8 角接式 STATCOM 结构图

若系统电压等级为U,对于容量为S的角接式链式STATCOM,其相电流为:

$$I_p = \frac{S}{3U} \tag{2-9}$$

因此在设计中选择器件时,各相级联单元模块的最大工作电流有效值应大于 *I_p*,若单 元模块的交流输入电压为 *V*,则每一相所需串联的单元模块个数应满足:

$$n > \frac{U}{V} \tag{2-10}$$

为了保证设备运行的安全可靠,链节级联数量通常有冗余设计。

比较以上两种不同的联接方式,两者工作要求和控制策略也有所差异,稳态平衡运行时, 角接式链式 STATCOM 链节单元组承受线电压,流过的电流为相电流;而星接式链式 STATCOM 链节单元组承受相电压,流过的电流为线电流。但在不平衡工作状态或是暂态运 行情况下,星接式链式 STATCOM 中点电压会发生浮动,相电压发生变化,若考虑不平衡 故障时相单元组可能出现的最大电压,星接式链式 STATCOM 的承受电压应留有裕量,为 稳态时 $\sqrt{3}$ 倍,角接式链式 STATCOM 则不需要考虑额外的电压裕量。

在实际控制中,角接式链式 STATCOM 三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 可以分别进行单独控制,三相之间可形成零序电流在环内流动,即三相环流,其等效模型如下图所示:







而星接式链式 STATCOM 三相电流需满足 $i_a + i_b + i_c = 0$,其电流值相互制约,只有其中两相 电流可以单独控制,零序电流无法通过,其等效模型如下图所示:



图 2-10 星接式 STATCOM 等效电流模型图

在不平衡运行工况下,角接式链式 STATCOM 的控制会更加复杂一些。因此对于器件 耐压的考虑和控制策略的设计,两种联接方式有所不同。

2.2 无功检测方法与链式 STATCOM 数学建模

基于瞬时无功理论的检测算法在无功功率补偿的领域中有广泛应用,其基本思想是将三 相信号通过坐标变换变后得到旋转两相坐标下的直流分量,经过计算后可以获得瞬时无功大 小,便于对 STATCOM 进行控制。为了更好地设计链式 STATCOM 的控制算法,需要对其 进行建模,以便研究其输入输出特性,在三相坐标下,其电磁暂态过程可以用一组时变系数 微分方程组进行描述,通过坐标变换,可以得到在旋转两相坐标系下的常系数微分方程,便 于求解和控制策略设计。本节将介绍瞬时功率的计算方法,并推导链式 STATCOM 在旋转 两相坐标系下的数学模型。

2.2.1 瞬时无功理论

链式STATCOM是电力系统中重要的无功补偿装置,在工作过程中需要对系统进行无功 检测,以达到实时无功补偿、增强电网稳定性的目的。传统的功率计算基于正弦稳态电压电 流信号,其功率传输大小[§]为:

$${}^{9}_{S} = P + jQ = {}^{9}_{U} {}^{9}_{I^{*}}$$
(2-11)

有功功率和无功功率可以表示如下:

第 18 页 共 83 页



$$\begin{cases}
P = \operatorname{Re}(S) \\
Q = \operatorname{Im}(S)
\end{cases}$$
(2-12)

其中²为节点电压相量,²为通过电流相量,在电磁暂态仿真的过程中,若要获得相应电压和电流相量以求解功率,首先需要对电压和电流数据进行傅里叶分析,其处理过程可导致时延的产生。

瞬时无功理论基本思路是将三相瞬时电压电流经坐标变换转换为旋转坐标系下的直流 量,继而通过计算获得瞬时功率。上世纪八十年代,三相电路的瞬时功率理论首次提出,该 理论后经不断研究得以逐渐完善^[77],也称为*pq*理论,该理论突破了以往在平均值基础上计 算功率的方法,给出了瞬时有功功率*p*、瞬时无功功率*q*的概念和计算方法。

可令三相电压瞬时值为 u_a 、 u_b 、 u_c ,三相电流瞬时值为 i_a 、 i_b 、 i_c ,通过转换矩阵变换后得到在静止两相坐标系下 α 、 β 轴上的两相瞬时电压 u_α 、 u_β 和两相瞬时电流 i_a 、 i_β :

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} = C_{abc-\alpha\beta} \begin{bmatrix} u_{a} \\ u_{b} \\ u_{c} \end{bmatrix}$$
(2-13)

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = C_{abc-\alpha\beta} \begin{bmatrix} i_{a} \\ i_{b} \\ i_{c} \end{bmatrix}$$
(2-14)

其中
$$C_{abc-a\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$
,此为等功率转换矩阵,若矩阵前系数为 $\frac{2}{3}$,则为等幅值

转换矩阵。

在 $\alpha\beta$ 坐标轴下,两相电压 u_{α} 、 u_{β} 和两相电流 i_{α} 、 i_{β} 在 α , β 轴上的矢量可以分别合成 旋转电压矢量 u^{9} 和旋转电流矢量 i,如下图所示:



图 2-11 αβ 坐标系下电压电流

其中:



$$\begin{cases} g & g & g \\ u_{\alpha} + u_{\beta} = u = u \angle \varphi_{u} \\ g & g & g \\ i_{\alpha} + i_{\beta} = i = i \angle \varphi_{i} \end{cases}$$
(2-15)

$$\begin{cases} i_p = i\cos\varphi \\ i_q = i\sin\varphi \end{cases}$$
(2-16)

式中, $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$,即为电压矢量⁹_u与电流矢量⁹_i间夹角,从而可以计算得到瞬时有功功率 p与瞬时无功功率 q为:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = u \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = ui \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$
(2-17)

即:

$$\begin{cases} p = u_{\alpha}i_{\alpha} + u_{\beta}i_{\beta} \\ q = u_{\beta}i_{\alpha} - u_{\alpha}i_{\beta} \end{cases}$$
(2-18)

同理,也可以将三相电流电压通过 dq 变换得到旋转两相坐标系下的静止电压电流矢量^[78],基频电气量在旋转坐标系下可由直流形式表示,则通过对无功电流的实时监测^[79],可以求取三相电路瞬时有功功率 *p* 与瞬时无功功率 *q* 如式(2-19)所示:

$$\begin{cases} p = u_d i_d + u_q i_q \\ q = u_q i_d - u_d i_q \end{cases}$$
(2-19)

该方法与以上提到方法基本思想一致, 仅为变换坐标系不同, 其具体推导过程在此不再 赘述。

2.2.2 链式 STATCOM 数学模型

为了更好地设计链式 STATCOM 的控制方案,以下将以星形接法链式 STATCOM 为例 在旋转坐标系下建立其相应的数学模型。

链式 STATCOM 的 *a*、*b*、*c* 三相换流器均由一系列 HBI 级联组成,为了便于分析,在 电压平衡时,对于建立相应数学模型作出以下假设^[80]:

- (1) 三相系统平衡
- (2) 链式 STATCOM 采用 PWM 技术进行输出控制,交流侧输出由各相逆变桥输出电压叠加, 建立数学模型时仅考虑三相基波成分,忽略高频谐波。
- (3) 逆变器 a、b、c 三相中级联 HBI 参数一致,各电容电压相等。
- (4) 链式 STATCOM 中电力电子器件存在开关损耗,线路电阻也存在损耗,全部有功功率 损耗由等效电阻 R 表示,与系统连接的电抗用电感 L 表示。

以星接式链式 STATCOM 为例,通过电气量之间关系建立其数学模型,其拓扑结构如 图 2-12 所示:





图 2-12 星形接法链式 STATCOM 接线图

其中 u_a 、 u_b 、 u_c 为系统三相电压, v_a 、 v_b 、 v_c 为逆变器交流侧三相电压,则有:

$$\begin{cases} u_a(t) = U \sin(\omega t) \\ u_b(t) = U \sin(\omega t - 2\pi / 3) \\ u_c(t) = U \sin(\omega t + 2\pi / 3) \end{cases}$$
(2-20)

$$\begin{cases} v_a(t) = nMu_{dc}\sin(\omega t - \delta) \\ v_b(t) = nMu_{dc}(\omega t - 2\pi/3 - \delta) \\ v_c(t) = nMu_{dc}(\omega t + 2\pi/3 - \delta) \end{cases}$$
(2-21)

其中 *n* 为各相级联逆变桥数量, *M* 为调制比, *u_{dc}* 为直流侧单个电容电压, *δ* 为相角差。 由基尔霍夫电压定律,取电流参考方向为系统流向 STATCOM,可以分别写出三相电路 电压电流关系式如下:

$$\begin{cases} L\frac{di_{a}(t)}{dt} + Ri_{a}(t) = u_{a}(t) - v_{a}(t) \\ L\frac{di_{b}(t)}{dt} + Ri_{b}(t) = u_{b}(t) - v_{b}(t) \\ L\frac{di_{c}(t)}{dt} + Ri_{c}(t) = u_{c}(t) - v_{c}(t) \end{cases}$$
(2-22)

由功率守恒原理,可以得知交流侧输入有功功率即为直流侧电容充放电功率,可得到以 下关系式:

$$\begin{cases} nu_{dc}C\frac{du_{dca}(t)}{dt} = v_{a}(t)i_{a}(t) \\ nu_{dc}C\frac{du_{dcb}(t)}{dt} = v_{b}(t)i_{b}(t) \\ nu_{dc}C\frac{du_{dcc}(t)}{dt} = v_{c}(t)i_{c}(t) \end{cases}$$
(2-23)

其中 u_{dca} 、 u_{dcb} 和 u_{dcc} 分别为a、b、c三相直流侧单个电容电压,在理想情况下,三相换流器的各相级联 HBI 参数一致,各电容电压相等,则:

第 21 页 共 83 页



$$3nu_{dc}C\frac{du_{dc}}{dt} = v_{a}i_{a} + v_{b}i_{b} + v_{c}i_{c}$$
(2-24)

将式(2-20)、(2-21)代入式(2-22)、(2-23)中可以得到:

$$\begin{cases} L\frac{di_{a}(t)}{dt} + Ri_{a}(t) = U\sin(\omega t) - nMu_{dc}\sin(\omega t - \delta) \\ L\frac{di_{b}(t)}{dt} + Ri_{b}(t) = U\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) - nMu_{dc}\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \delta) \\ L\frac{di_{c}(t)}{dt} + Ri_{c}(t) = U\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) - nMu_{dc}\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \delta) \\ \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{M}{3C} [\sin(\omega t - \delta)i_{a} + \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi - \delta)i_{b} + \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi - \delta)i_{c}] \end{cases}$$
(2-25)

公式(2-22)经 dq 变换可得:

$$PU_{abc} - PV_{abc} = PRI_{abc} - PL\frac{d}{dt}I_{abc}$$
$$U_{dq0} - V_{dqo} = RI_{dq0} - PL\frac{d}{dt}(P^{-1}I_{dqo})$$
$$U_{dq0} - V_{dqo} = RI_{dq0} - PL\frac{dP^{-1}}{dt}I_{dqo} - PLP^{-1}\frac{dI_{dqo}}{dt}$$
(2-26)

其中P为变化矩阵,上式即为:

$$\begin{cases} L\frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega Li_q = u_d - v_d \\ L\frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega Li_d = u_q - v_q \end{cases}$$
(2-27)

选择旋转变换后电压矢量与 d 轴重合, 同理, 式(2-25)经 dq 变换可得:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_d\\i_q\\u_{dc}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & -\sqrt{\frac{3}{2}}M\cos\delta\\ -\omega & -\frac{R}{L} & -\sqrt{\frac{3}{2}}M\sin\delta\\ \sqrt{\frac{3}{2}}\frac{M\cos\delta}{3C} & \sqrt{\frac{3}{2}}\frac{M\sin\delta}{3C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d\\i_q\\u_{dc}\end{bmatrix} + \frac{1}{L}\begin{bmatrix} u_d\\0\\0\end{bmatrix}$$
(2-28)

上式即为链式 STATCOM 在两相旋转坐标系下数学模型。

在稳态下,电流与直流侧电压满足以下条件:

$$\frac{du_{dc}(t)}{dt} = \frac{di_d(t)}{dt} = \frac{di_q(t)}{dt}$$
(2-29)

将上式代入式(2-28)中可以解得稳态电流 $i_d(\infty)$ 、 $i_q(\infty)$ 和直流侧电容电压 $u_{dc}(\infty)$:

$$\begin{cases} i_d(\infty) = \frac{u_d \sin^2 \delta}{R} \\ i_q(\infty) = -\frac{u_d \sin 2\delta}{2R} \\ u_{dc}(\infty) = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{u_d}{M} (\cos \delta - \frac{\omega L}{R} \sin \delta) \end{cases}$$
(2-30)

由瞬时无功功率理论,旋转变换后电压矢量与 d 轴重合,则 $u_q=0$,可以得到电网向 第 22 页 共 83 页



STATCOM 输送瞬时有功功率、无功功率如式(2-31)所示:

$$\begin{cases} p(t) = u_d(t)i_d(t) \\ q(t) = -u_d(t)i_q(t) \end{cases}$$
(2-31)

则可以计算得到稳态时系统向链式 STATCOM 输送功率:

$$\begin{cases} p(\infty) = \frac{U^2}{2R} \sin^2(\delta) \\ q(\infty) = \frac{U^2}{2R} \sin(2\delta) \end{cases}$$
(2-32)

以上稳态功率计算结果与向量图分析得到结果一致,链式 STATCOM 消耗有功损耗由 系统提供,无功功率传输方向和大小由功角 δ 决定, δ 改变时,电容储能将发生改变,直流 侧电压会在相应变化后维持一恒定值,该结果也说明该数学模型在稳态时的正确性。

2.3 链式 STATCOM 控制策略

链式 STATCOM 控制策略在装置工作中起到至关重要的作用,在运行过程中,需要在 稳态时发挥稳定可靠的无功补偿作用,同时也需要良好的动态性能。其工作模式通过实际需 要和相应运用场合制定,目前主要通过电流控制进行实现,在工程实际中,控制任务包括对 无功电流和有功电流的控制,其实质便是对传输无功和有功功率的控制。

间接电流控制的基本思想是将 STATCOM 看作可控电压源,通过对交流侧输出电压幅 值与相角的控制来实现补偿目标,该方法控制方式简单,有很广泛的应用;电流直接控制通 过 PWM 技术来对目标瞬时电流值进行跟踪。相比之下,通过电流直接控制策略,STATCOM 可视作可控电流源,具有更好的动态性能和更快的响应速度。

控制系统通常采用分层控制的思想,根据控制目标的不同,其控制结构从高至低分为系统级、装置级、器件级三个层次^[82]。最上层为系统级控制,其目标为电力系统,根据系统运行的目标和需求得到无功电流与有功电流的目标值,并提供给下一级控制环节,可以通过目标值的调整维持电压稳定或恒定无功输出等目的;中间层为装置级控制,其目标为STATCOM,通过控制目标和直流侧电压平衡控制策略得到目标输出电流,继而向下一级控制环节提供调制波;最底层为器件级控制,其目标为逆变桥,在控制过程中,根据补偿需要,发生相应的 PWM 脉冲触发 STATCOM 中的全控电力电子器件开通和关断,下图为链式STATCOM 控制结构原理图。



第 23 页 共 83 页



图 2-13 链式 STATCOM 控制结构原理图

2.3.1 系统级控制

系统级控制在整个控制结构最上层,其主要研究对象为电力系统,根据其运行模式和工作需要,确定链式 STATCOM 总体补偿目标,给下层控制发出相应指令,系统级控制将确定链式 STATCOM 的工作方式。根据电力系统的运行需求,在稳态下,STATCOM 可以加强对电网的无功支持,提高系统稳定性,有系统恒定功率因素控制、指定无功输出控制、恒定交流电压控制等工作模式;同时在暂态下,可以迅速动态相应,应对系统的暂态扰动,维持系统稳定。

根据瞬时功率理论,在两相旋转坐标系下,STATCOM 与系统间传递有功和无功功率已 由式(2-19)给出,可令d轴与电网电压重合,则 $u_a=0$,瞬时传递功率即为:

$$\begin{cases} p(t) = u_d(t)i_d(t) \\ q(t) = -u_d(t)i_q(t) \end{cases}$$
(2-33)

由上式可知链式 STATCOM 与系统间传输无功功率的大小与形式由 *i_q*决定,可以根据 式(2-33)中计算公式得到 *i_q*大小,对无功输出进行开环控制。也可以引入 PI 控制,将无功目 标值与实际值的偏差进行 PI 调节后输出 *i_q*参考值,采用闭环控制方式可以使稳态误差更小, 在工程实践中, PI (比例积分) 控制环节有广泛应用,可以对目标信号进行无静差跟踪。将 给定参考值与实际输出值偏差作为信号,通过比例与积分环节调控形成控制量,继而实现控 制。其中,比例环节可以加速响应速度,优化动态性能,积分控制实现无静差跟踪,提高稳 态性能,下图即为定无功功率控制结构框图。



图 2-14 定无功功率控制结构框图

在电力系统中,潮流中的无功传输将影响交流母线电压数值,链式 STATCOM 可以通 过调节输出无功功率大小和性质从而调节交流母线电压,当母线电压低于目标值时, STATCOM 向系统注入感性无功功率,提高母线电压;反之,当母线电压高于目标值时,注 入容性无功功率,降低母线电压。同样,可以采用 PI 环节降低稳态误差,下图即为定交流 电压控制结构框图。



图 2-15 定交流电压控制结构框图

电容储能大小与电容两端电压 u_{dc} 相关,当 STATCOM 直流侧与外部发生有功功率传递, 电容器发生充放电过程,则电容器两端电压幅值将会发生相应改变,若系统向 STATCOM 传



递有功功率,则电容充电,直流侧电压升高,反之电容放电,直流侧电压降低。由式(2-33) 可知 STATCOM 与系统间传输有功功率的大小与形式由*i_a*决定,可以将直流侧电压目标值 与实际值的偏差进行 PI 调节后输出*i_a*参考值,实现对 STATCOM 的控制,下图即为定直流 电压控制结构框图。



图 2-16 定直流电压控制结构框图

2.3.2 装置级控制

装置级控制在整个控制系统中层,起到承上启下的作用,在工作中,根据上层控制目标 来给出下层控制的 PWM 调制波信息,根据系统级提供*i_q、i_a*参考值实现解耦控制,以下部 分将介绍直接电流控制的原理与方法。

STATCOM 在两相旋转坐标系下时域暂态数学模型已由式(2-27)给出,经拉氏变换后可得:

$$\begin{cases} (sL+R)I_d - \omega LI_q = U_d - V_d \\ (sL+R)I_q + \omega LI_d = U_q - V_q \end{cases}$$
(2-34)

可以由式(2-34)得到 STATCOM 主电路数学模型等效框图如下所示:



可知在两相旋转坐标系下 STATCOM 输出电流分量 i_q 、 i_d 相互耦合,且耦合作用与等效 电阻 R、连接电抗 L、电网基频 ω 有关,在控制时,对 i_q 控制会影响到 i_d ,对 i_d 控制也会影 响到 i_q 。通常,STATCOM 采用前馈解耦的方法解决这一问题,其解耦控制系统结构如下图 所示:





为实现解耦,引入控制输入变量 u_d 和 u_q ,可以假设:

$$\begin{cases} u_d = u_d - v_d + \omega L i_q \\ u_q = u_q - v_q - \omega L i_d \end{cases}$$
(2-35)

将式(2-27)代入(2-35)可得:

$$\begin{cases} u_d' = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d \\ u_q' = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q \end{cases}$$
(2-36)

根据式(2-35)、式(2-36),可在稳态时设计 PI 环节为控制单元,其控制控制方式如下式 所示:

$$\begin{cases} v_d = u_d + \omega L i_q - (K_{p1}(i_d^* - i_d) + K_{11} \int (i_d^* - i_d) dt) \\ v_q = u_q - \omega L i_d - (K_{p2}(i_q^* - i_q) + K_{12} \int (i_q^* - i_q) dt) \end{cases}$$
(2-37)

由解耦控制器和主电路数学模型等效框图可以得到链式 STATCOM 解耦控制框图如下 所示:



图 2-19 链式 STATCOM 解耦控制框图



图 2-20 链式 STATCOM 等效简化控制框图

由图可知*i*_a和*i*_a完全解耦,形成两个独立的闭环控制,开环传递函数为:

$$G(s) = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) \frac{1}{R + sL}$$
(2-38)

闭环传递函数为:

$$H(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)} = \frac{k_p s + k_i / k_p}{s(R + sL)}$$
(2-39)

2.3.3 器件级控制

器件级控制为最下层控制,其工作方式主要是根据载波信息,采用 PWM 技术发出相 应控制脉冲,从而控制逆变桥工作在指定状态,继而完成控制系统的输出。电流直接控制的 方式对目标电流瞬时值进行闭环跟踪,通常可以通过三角载波比较法得到开关信号,瞬时电 流值与参考值偏差经 PI 调节后生成调制波,继而调制波与三角载波比较后得到 PWM 控制 脉冲驱动逆变电路工作,其原理如图 2-21 所示:



图 2-21 电流跟踪控制原理图

图 2-22 为单元 H 桥结构图,直流侧储能电容电压为*u*_{dc},四个可关断全控器件与反并 联二极管构成逆变桥,通过四个触发脉冲 S1、S2、S3、S4 实现对全控器件的导通与关断, 继而完成对逆变输出的全部控制。



图 2-22 单元 H 桥结构图

在 STATCOM 的运行中,上桥臂与下桥臂开关器件须处于互补状态,其触发信号一个为1,另一个则为0,以避免上下桥臂同时导通发生短路,在实际应用中,还需要对调节脉冲进行控制对实现死区时间、最小开通时间和最小关断时间的设置。当 S1、S4 为 1, S2、S3 为 0 时,输出为 u_{dc},当 S1、S2 为 1, S2 为 0 时,输出为 u_{dc},当 S1、S2 为 1, 第 27 页 共 83 页



S3、S4为0时输出为0,当S3、S4为1,S1、S2为0时输出为0。可设置触发脉冲S1、S3 与S2、S4的调制波相互反相,采用三角载波与调制波进行比较,当调制波大于载波时,触 发脉冲为高电平,反之当调制波小于载波时,触发脉冲为低电平,驱动对应开关器件通断。 其调制原理图如图 2-23 所示:



链式 STATCOM 通过 PWM 触发脉冲实现对全控型开关器件通断的控制,从而使得交 流侧输出期望波形,期望波形即为调制波。在理想情况下,希望输出应尽可能逼近调制波, 满足幅值、频率和相位要求,谐波成分减少;而开关工作次数尽可能少,开关损耗小;控制方式简单,计算量小,并且可以快速反应。

载波移相(Carrier Phase Shifted, CPS)调制是一种适合于链式 STATCOM 的调制策略, 该策略波形逼近能力强,输出波形具有较好的质量,反应速度快,设计简单,可以以较低 的开关频率工作^[83-85]。对于 H 桥单元级联组成的多电平逆变器,载波移相调制策略基本原 理是,各逆变单元共用一个相同的调制波,但采用不同的载波分别进行调制,各载波波形、 频率和幅值相同,但相互之间有一定的相位差。因此,各个 H 桥单元的脉冲相互错开一定

第 28 页 共 83 页



的角度,可以用较低的开关频率获得一个较高的等效开关频率。同时在波形叠加后,逆变 器可以得到一个多电平的阶梯波的输出波形,其谐波含量大幅度减少,图 2-24 即为载波移 相调制的基本原理图。



图 2-24 载波移相调制原理图

因此,采用载波移相调制策略对链式 STATCOM 进行控制提高装置电压等级和功率等级,开关频率降低,开关损耗减少。

2.3.4 直流侧电压平衡控制

链式 STATCOM 的级联结构使得其电压等级和输出容量都得到的很大的提升,通过合理的级联数目和开关器件参数组合,可以使得链式 STATCOM 可以不通过降压变压器直接接入系统。但与此同时,在工作中需要维持各级联逆变桥直流侧电压的稳定和平衡,在设计时,会尽量使得各个器件和逆变器桥参数一致,在正常运行时,各H 桥模块直流侧电容都互相独立,互不干扰,直流侧电容电压处于平衡状态。但以上设定只在理想情况下满足,在工程实际中,由于各元件彼此独立,器件参数不可能完全一致,误差不可避免,逆变电路触发驱动也会存在偏差。链式 STATCOM 直流侧电压不平衡可能会影响其正常工作,引起一系列问题,例如输出电压谐波畸变率升高;个别链节单元电压过高退出运行等,因此需要有相应控制策略维持直流侧电压平衡。

引起链式 STATCOM 直流侧电压不平衡的主要原因有以下两点:一是因为在工作中电 网会与 STATCOM 直流侧电容进行能量交换,各链节因为不对称会导致能量交换不平衡,即表现为直流电压不平衡;二是因为各链节元件参数不一致,自身开关损耗不同,使得相内 各换流单元直流侧电压不平衡。

通常,直流侧电容电压平衡采用分层控制的方法,第一层是对全局直流电压进行控制, 通过有功功率的传输来维持整体直流侧电压;第二层控制关注相间平衡,其目的是使链式 STATCOM 的三相直流侧电压相等;第三层控制关注相内平衡,其目的使相内级联单元逆变 桥的电容电压保持一致。

其中,第一层对全局直流电压的控制在上一节曾作讨论,即系统级控制中的定直流电压 控制策略,将直流侧电压目标值与实际值的偏差经 PI 调节后输出 *i*_d参考值,实现对链式 STATCOM 的控制,维持整体直流电压平衡,在此不再赘述。

采用第二层相间平衡控制是由于 STATCOM 各相内部损耗不同,与系统交换有功功率 不同,会导致三相直流侧电压不一致,若不采取措施控制,可能会导致电压差异变大,引起 严重后果,可以将三相直流侧电压平均值与单相直流侧电压偏差经过 PI 环节得到目标有功 电流,再经过 dp 逆变换得到三相目标电流值,其控制结构框图 2-25 所示:





其中 u_{dca} 、 u_{dcb} 、 u_{dcc} 分别为三相直流侧电容电压, u_{dcav} 为三相直流侧电容电压平均值, i_a^* 、 i_b^* 、 i_a^* 分别为三相目标电流值。

采用第三层相内直流电压控制是因为在工程实际中,器件参数不一致,相内各逆变 H 桥模块损耗不同,会影响相内直流电压的分配,所以除了均衡相间电压,还需要对相内各链 节单元采取均压控制,使得各链节电容电压等于平均值。其控制思路是在统一调制波基础上, 各逆变桥单元分别引入偏差量,改变触发脉冲,使有功功率在链节间合理分配,使得相内电 压均衡。在实际控制中,计算得到相内所有逆变桥单元直流侧电压平均值,与单个逆变桥直 流侧电压比较得到偏差值,该偏差信号经过 PI 环节在加上统一调制波信号,即为单个逆变 桥单元调制波,其控制结构如下图所示:



图 2-26 直流电压平衡控制原理图

其中 u_{dcav} 为相内各链节单元逆变桥电容电压平均值, u_{dci} 为单个逆变桥电容电压, modv为整体调制波, mod v^* 单个逆变桥单元调制波。

2.4 链式 STATCOM 工作特性仿真研究

为了对链式 STATCOM 相关工作特性进行分析研究,讨论文章提出控制策略的有效性 以及故障状态下工作特性,在商业软件 PSCAD 中搭建其动态无功补偿主电路,采用恒定交 流电压源代表系统网络,并根据相应理论设计控制方案,PSCAD 仿真步长设为 50μs,图 2-27 为链式 STATCOM 工作仿真电路示意图:




图 2-27 STATCOM 故障状态工作特性仿真电路示意图

2.4.1 控制策略仿真研究

针对控制策略的研究,采用星型连接的直挂式链式 STATCOM 分别对本章提出的指定 无功输出,系统恒定功率因数,并网点恒定电压控制方式进行仿真,验证其有效性。

(1) 指定无功输出控制

控制目标设定链式 STATCOM 向系统输出确定大小无功功率,指令无功输出大小如图 2-28 所示:



图 2-28 STATCOM 指令无功输出

链式 STATCOM 实际无功输出大小如图 2-29 所示:





图 2-29 STATCOM 实际无功输出

由仿真结果可知,STATCOM 可以快速跟踪无功输出指令,其快速动态特性较传统无功补 偿装置有巨大优势,相关控制策略满足理论设计要求。

(2) 系统恒定功率因数控制

控制目标设定系统功率因素为1,链式 STATCOM 实际无功输出大小如图 2-30 所示:



图 2-30 STATCOM 实际无功输出

系统无功潮流如图 2-31 所示:



图 2-31 系统无功潮流

第 32 页 共 83 页



由仿真结果可知,STATCOM 实际输出无功功率即为负荷无功,此时系统无功潮流为 0,功率因素为 1,符合设定控制目标,相关控制策略满足理论设计要求。

(3) 并网点恒定电压控制

控制目标设定公共连接点线电压有效值恒定 11kV,并网点三相电压瞬时值如图 2-32 所示:



图 2-32 并网点三相电压

并网点线电压有效值如图 2-33 所示:



图 2-33 并网点线电压有效值

由仿真结果可知,系统稳态运行时,并网点线电压有效值恒定为11kV,符合设定控制目标,相关控制策略满足理论设计要求。

2.4.2 故障工作特性仿真研究

针对链式 STATCOM 不同控制策略在故障状态下的工作特性进行研究,在系统负荷处 分别设置对称三相接地故障和单相接地故障,仿真系统故障状态下采用恒定无功输出控制、 恒定功率因素控制以及恒定交流电压控制等控制策略时的补偿效果,研究其故障穿越性能。

(1) 三相对称故障

在系统负荷处设置对称三相接地故障,故障开始时刻为 0.3*s*,持续时间为 0.1*s*,当系统 无 STATCOM 无功补偿时,并网点三相电压瞬时值以及线电压有效值分别如图 2-34 与图 2-35 所示:



电力电子化电力系统多速率仿真中的关键接口技术研究



图 2-34 并网点三相电压



图 2-35 并网点线电压有效值

由仿真结果可知,系统负荷发生三相故障期间,三相电压同时跌落,故障结束后,电压 水平恢复。

若采用恒定功率因素控制策略,设定系统目标功率因素为1,并网点线电压有效值如图 2-36 所示:





由仿真结果可知,采用恒定功率因素控制,可保持 STATCOM 输出无功功率满足负荷 需求,提高并网点电压水平,故障发生时,电压水平依然发生跌落,且跌落电压幅值大小与 无补偿时相同,但整体电压水平有所提高。

第 34 页 共 83 页



若采用指定无功输出控制策略,无功功率输出分别设定为 3Mvar 和为 6Mvar,并网点 线电压有效值如图 2-37 所示:





由仿真结果可知,采用指定无功输出控制,可提高并网点线电压水平,且提高电压幅值 与无功输出数值有关,STATCOM补偿无功功率越大,并网点电压越高,故障发生时,电压 水平依然发生跌落,且跌落电压幅值大小与无补偿时相同,但整体电压水平有所提高。

若采用恒定交流电压控制策略,稳态运行时,控制目标设定公共连接点电压有效值恒定 10kV,并网点线电压有效值如图 2-38 所示:





由仿真结果可知,采用恒定交流电压控制,稳定运行时,并网点线电压幅值为 10kV, 故障发生时,电压水平发生短暂跌落,随后恢复至未故障时电压水平,并在随后的故障期间 一致保持为 10kV。

(2) 单相接地故障故障

在系统负荷处设置单相接地故障,故障相为 A 相,故障开始时刻为 0.3*s*,持续时间为 0.1*s*,当系统无 STATCOM 无功补偿时,并网点三相电压瞬时值以及线电压有效值分别如图 2-39 与图 2-40 所示:



电力电子化电力系统多速率仿真中的关键接口技术研究



图 2-39 并网点三相电压



图 2-40 并网点线电压有效值

若采用恒定功率因素控制策略,设定系统目标功率因素为1,并网点线电压有效值如图 2-41 所示:





由仿真结果可知,采用恒定功率因素控制,稳态运行时可保持 STATCOM 输出无功功 率满足负荷需求,提高并网点电压水平,故障发生时,电压水平依然发生跌落,且因系统处 于不对称状态,线电压有效值发生两倍频波动,但整体电压水平有所提高。

若采用指定无功输出控制策略,无功功率输出分别设定为 3Mvar 和为 6Mvar,并网点 线电压有效值如图 2-42 所示:

第 36 页 共 83 页





图 2-42 并网点线电压有效值对比

由仿真结果可知,采用指定无功输出控制,稳态运行时,并网点线电压水平提高,且提 高电压幅值与无功输出数值有关,故障发生时,电压水平依然发生跌落,跌落电压幅值大小 与无补偿时相同,且因系统处于不对称状态,线电压有效值发生两倍频波动,但整体电压水 平有所提高。

若采用恒定交流电压控制策略,稳态运行时,控制目标设定公共连接点电压有效值恒定 10kV,并网点线电压有效值如图 2-43 所示:





由仿真结果可知,采用恒定交流电压控制,稳定运行时,并网点线电压幅值为 10kV,故障发生时,电压水平发生短暂跌落,且因系统处于不对称状态,随后线电压有效值以 10kV 为中心发生两倍频波动,故障结束后,电压水平恢复恒定为 10kV。



第三章 多速率混合仿真

现代电力系统变得越发庞大和复杂,过去基于相似理论进行物理模型试验的动态模拟 仿真^[86]变得更加困难。而伴随计算机技术的发展,数值计算变得更为容易,由此电力系统 数字仿真得到巨大的发展与广泛的应用^[87],其基本思路为建立数学模型,利用数值计算方 法求解模型。数字仿真与动态模拟试验相比较,受系统规模和结构复杂度限制更小,且经 济性更好。电力系统运行复杂,规模庞大,元件多样,动态过程时间尺度差异较大,在实 际工程中,根据研究目的和对象的要求,通常采用不同的仿真方法进行分析,其中电磁暂 态仿真和机电暂态仿真是最常用的两种工具。

面对大规模电力系统中局部子系统高精度仿真的要求,传统单一速率的仿真方法不再适应。多速率混合仿真将全网络进行拆分,根据精度要求对各个子系统采用不同模型、不同步长进行仿真分析,子系统间设计合适的接口连接,进行数据交换^[88],多速率仿真可以在对局部子系统进行详细描述的同时仿真大规模网络,对现代电力系统分析有较大的优势。本章将讨论传统电磁暂态仿真、机电暂态仿真的特点和基本工作原理,并进一步介绍机电电磁混合进行多速率仿真的基本工作原理。

3.1 电磁暂态仿真

电力系统中电磁暂态过程相比机电暂态过程较快,利用数值计算方法分析电磁变化的动态过程,积分步长在微秒级别,以下部分将介绍电磁暂态仿真 EMTP 算法的求解过程,对于计算过程当中的微分方程数值求解的一些方法做出介绍,最后给出了部分元件电磁暂态的数学模型。

3.1.1 电磁暂态程序计算方法

EMTP 算法将电网节点电压作为状态变量,网络中元件的动态特性通常由微分方程描述,可以利用微分方程数值求解方法进行离散化处理,在计算步长 *At* 内将其转换为差分方程,从而由 *t* 时刻电流电压值得到 *t+At* 时刻电流电压值。根据差分方程可将元件表示为等值电阻与等值电流源并联的形式,等值电流源可由 *t* 时刻电流电压计算得到,即为已知量,而等值电阻则由元件参数和积分步长决定。在此基础上,可以构建等值计算网络,继而通过求解节点导纳方程组得到系统中各节点电压,而微分方程求解的初始值可为零初值或指定输入初值。

对于n节点电网,可以得到下列方程:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{u}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{his} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{i}(t) \end{bmatrix}$$
(3-1)

其中[G]为 $n \times n$ 网络电导矩阵, [u(t)]为 $n \times 1$ 节点瞬时电压向量, $[I_{his}]$ 为 $n \times 1$ 节点等效 电流源向量, [i(t)]为 $n \times 1$ 节点注入电流向量。

若有节点接地或连接电压源,则相应节点电压值已知,将上式求解方程中矩阵进行分块可得:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{G}_{11} & \boldsymbol{G}_{12} \\ \boldsymbol{G}_{21} & \boldsymbol{G}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{u}_1(t) \\ \boldsymbol{u}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{his,1} \\ \boldsymbol{I}_{his,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{i}_1(t) \\ \boldsymbol{i}_2(t) \end{bmatrix}$$
(3-2)

第 38 页 共 83 页



其中 $[u_1(t)]$ 为未知节点电压向量, $[u_2(t)]$ 为已知节点电压向量,即可写作下式:

$$[G_{11}][u_1(t)] = [i_1(t)] - [I_{his,1}] - [G_{12}][u_2(t)]$$
(3-3)

通过上式,可由节点注入电流求解未知节点电压值,EMTP算法求解流程如图 3-1 所示:



图 3-1 EMTP 算法求解流程

3.1.2 微分方程数值求解方法

在电磁暂态仿真中,对于元件的数学模型可以由下列给定初值的一阶微分方程进行描述:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x,t) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases}$$
(3-4)

上述微分方程通常利用差分的方法进行数值求解,常用的方法有欧拉法、后退欧拉法、 隐式梯形法、龙格-库塔法等,通常情况下,采用隐式梯形法可以得到较好的计算结果,但 是当遇到网络结构变化时,极有可能发生数值振荡的现象^[89],基于此,可以采用后退欧拉 法或阻尼梯形法^[90]进行处理,用于消除数值振荡的影响。以下对部分常用方法进行介绍

(1) 隐式梯形法

式(3-4)中一阶微分方程,采用隐式梯形法对其进行差分化可以得到以下公式:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \frac{\Delta t}{2} [f(x, t) + f(x, t + \Delta t)]$$
(3-5)

其中 △t 为积分步长。

该方法被广泛应用于电磁暂态仿真程序当中,其计算过程简单,并且具有较高的精度, 但由于非状态变量的突变,该方法会导致数值振荡现象的产生。

(2) 后退欧拉法

式(3-4)中一阶微分方程,采用后退欧拉法对其进行差分化可以得到以下公式:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \Delta t \cdot f(x, t + \Delta t)$$
(3-6)

其中 △t 为积分步长。

第 39 页 共 83 页



后退欧拉法可以很好消除数值积分中产生的数值振荡现象,有较好的稳定性,但缺点 是计算精度较低。

(3) 阻尼梯形法

式(3-4)中一阶微分方程,在积分计算时可以引入阻尼系数α(0≤α≤1),将后退欧拉法 与隐式梯形法按一定比例混合使用,差分化后可以得到以下公式:

$$x(t+\Delta t) = x(t) + \frac{\Delta t}{2} [(1-\alpha) \cdot f(x,t) + (1+\alpha) \cdot f(x,t+\Delta t)]$$
(3-7)

其中 △t 为积分步长。

阻尼系数 α 可根据实际情况选择, α 越大,则振荡衰弱越快,但精度也会相应降低。 当 α =0时,该方法变为隐式梯形法,当 α =1时,该方法变为后退梯形法,当0< α <1时, 即为隐式梯形法与后退梯形法的结合,可以在兼顾计算精度的同时避免数值振荡,

3.1.3 基本元件数学模型

电阻、电感、电容、输电线等是电力系统的基本组成成员,同时也可以通过组合构成其 它复杂元件,可以通过建立合适的模型用于电力系统电磁暂态仿真,以下部分将介绍相关元 件数学模型在时域进行差分化后建立的适用于仿真计算的离散模型。

(1) 电阻模型

如图 3-2 所示的电阻元件,是电力系统中最常见的元件之一,可以用于代表负载或者其 它有功消耗器件。



图 3-2 电阻元件电路

t时刻其节点间压降和通过电流关系可由欧姆定理描述,满足以下关系:

$$i_{12}(t) = \frac{1}{R} (u_1(t) - u_2(t))$$
(3-8)

(2) 电感模型

电感元件可以用于代表输电线阻抗、变压器线圈电感或者其他无功消耗器件,其节点间压降和通过电流关系可由微分方程描述,满足以下关系:

$$u_{1}(t) - u_{2}(t) = L \frac{di_{12}(t)}{dt}$$
(3-9)

采用隐式梯形法对上式进行积分可以得到:

$$\frac{u_1(t+\Delta t)+u_1(t)}{2} - \frac{u_2(t+\Delta t)+u_2(t)}{2} = L\frac{i_{12}(t+\Delta t)-i_{12}(t)}{h}$$

其中Δt 为隐式梯形法的积分步长,即

$$i_{12}(t + \Delta t) = \frac{1}{R_L} [u_1(t + \Delta t) - u_2(t + \Delta t)] + I_{hisL}$$
(3-10)

其中:

$$R_L = \frac{2L}{\Delta t} \tag{3-11}$$

$$I_{hisL} = i_{12}(t) + \frac{\Delta t}{2L} [u_1(t) - u_2(t)]$$
(3-12)

第40页共83页



因此,由式(3-10)中节点间电压与通过电流关系可以得到电感用于暂态计算的等值电路,电路由等效电阻与等效电流源并联构成,其等效电流源取值由前一时刻历史电流电压值计算得到,如图 3-3 所示:



图 3-3 电感元件电磁暂态计算模型

(3) 电容模型

电容元件可以用于表示电力系统中输电线路对地电容、无功补偿器件等,其节点间压 降和通过电流关系可由微分方程描述,满足以下关系:

$$i_{12}(t) = C \frac{d(u_1(t) - u_2(t))}{dt}$$
(3-13)

采用隐式梯形法对上式进行积分可以得到:

$$\frac{i_{12}(t+\Delta t)+i_{12}(t)}{2} = C \frac{[u_1(t+\Delta t)-u_2(t+\Delta t)]-[u_1(t)-u_2(t)]}{\Delta t}$$
(3-14)

其中 Δt 为隐式梯形法的积分步长,即

$$i_{12}(t + \Delta t) = \frac{1}{R_c} [u_1(t + \Delta t) - u_2(t + \Delta t)] + I_{hisC}$$
(3-15)

其中:

$$R_c = \frac{\Delta t}{2C} \tag{3-16}$$

$$I_{hisC} = -i_{12}(t) - \frac{2C}{\Delta t} [u_1(t) - u_2(t)]$$
(3-17)

同样,由式(3-15)中节点间电压与通过电流关系可以得到电容用于暂态计算的的等值电路,电路由等效电阻与等效电流源并联构成,其等效电流源取值由前一时刻历史电流电压值计算得到,如图 3-4 所示:



图 3-4 电容元件电磁暂态计算模型

(4) 输电线模型

在电力系统仿真中,短输电线可以采用集中参数元件模型表示,而对于长输电线,通常会采用分布参数模型,对于无耦合单根均匀无损导线,其分布参数电路如图 3-5 所示:





图 3-5 均匀无损导线分布参数电路

其中 L₀为单位长度无损线路电感, C₀为单位长度无损线路电容, x 为线路长度, 于是可以得到描述其电流电压关系的偏微分方程组如下:

$$\begin{cases} -\frac{\partial u}{\partial x} = L_0 \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial x} = C_0 \frac{\partial u}{\partial t} \end{cases}$$
(3-18)

也即为:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \end{cases}$$
(3-19)

求解上式波动方程可得解为:

$$\begin{cases} u = u_f(x - vt) + u_b(x + vt) \\ i = \frac{1}{Z} [u_f(x - vt) - u_b(x + vt)] = i_f(x - vt) + i_b(x + vt) \end{cases}$$
(3-20)

其中 $v = \frac{1}{\sqrt{L_0C_0}}$,为电磁波传播速度, $Z = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$,为线路波阻抗, u_f 为前行波电压, u_b 为反

行波电压, i_t为前行波电流, i_b为反行波电流, 进一步可以得到下列方程:

$$\begin{cases} u + Zi = 2u_f (x - vt) \\ u - Zi = 2u_b (x + vt) \end{cases}$$
(3-21)

长输电线两端分别记为m和n,波从一端行至另一端传播时间记为 τ ,则有

$$\begin{cases} u_m(t-\tau) + Zi_{mn}(t-\tau) = u_n(t) + Z[-i_{nm}(t)] \\ u_n(t-\tau) - Z[-i_{nm}(t-\tau)] = u_m(t) - Zi_{mn}(t) \end{cases}$$
(3-22)

其中, u_m 为m端电压, i_{mn} 为m端电流, u_n 为n端电压, i_{nm} 为n端电流。

由式(3-21)可以得到长线两端电流电压关系为:

$$\begin{cases} i_{mn}(t) = \frac{1}{Z} u_m(t) + I_{mhis}(t - \tau) \\ i_{nm}(t) = \frac{1}{Z} u_n(t) + I_{nhis}(t - \tau) \end{cases}$$
(3-23)

第 42 页 共 83 页



其中等值历史电流源 I_{mhis}、 I_{nhis}为:

$$\begin{cases} I_{mhis}(t-\tau) = -\frac{2}{Z}u_n(t-\tau) - I_{nhis}(t-2\tau) \\ I_{nhis}(t-\tau) = -\frac{2}{Z}u_m(t-\tau) - I_{mhis}(t-2\tau) \end{cases}$$
(3-24)

因此,由式(3-22)中节点间电压与通过电流关系可以得到输电线用于暂态计算的等值电路,电路由等效电流源可由前一时刻历史电流电压值计算得到,如图 3-6 所示:



图 3-6 无损输电线暂态计算等值电路

特别当波在长传输线中传播时间为τ为积分步长 Δt 的整数倍时,可以得到线路的精确 解,若非整数倍,可以采用插值法进行计算,但会产生一定误差。

3.2 机电暂态仿真

机电暂态仿真主要用于电力系统稳定性分析,系统中动态元件模型通过微分方程描述; 电网参数与状态变量之间关系通过一系列代数方程进行描述。其求解的初值条件为稳态时 的潮流运算结果,通过数值求解计算可以获得暂态下系统状态变量在时域中的变化趋势, 在分析过程,通常只考虑系统中的电压、电流的基频成分,以下部分将介绍机电暂态仿真 的计算过程及主要元件的数学模型建立。

3.2.1 暂态稳定性计算方法

电力系统机电暂态稳定性分析过程中,电力系统可以划分为网络和元件两大部分,其中 元件部分主要是指发电机和负荷等,分别通过对拓扑网络和元件动态过程的建模,可以得 到全系统机电暂态的数学模型,电力系统的机电暂态过程可以用下列一组方程进行描述:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, y)\\ 0 = g(x, y) \end{cases}$$
(3-25)

其中 x 表示系统动态的状态变量, y 表示网络运行参数。

在式(3-25)中,微分方程主要用于描述同步发电机暂态、次暂态电势变化以及运动方程 等相关动态特性;代数方程主要用于描述网络节点电压与注入电流关系,负荷模型的静态 特性,发电机电压平衡方程等。

机电暂态计算的初值条件为稳态时的潮流运算结果,在暂态稳定性计算之前首先需要 对网络潮流进行计算求解,得到系统的稳态运行状况。首先根据网络参数形成导纳矩阵, 再由节点电压,负荷等条件进行潮流计算,获得稳态时电网各节点电压、相角、电流、注 入功率等数据,即为暂态稳定性求解的初始条件。同时在暂态计算的过程中,代数方程组 与微分方程组联立后交替求解,每个步长都需要重新进行潮流计算,若系统网络参数发生 变化,例如发生短路、故障、负荷投切等情况,需要对系统的节点导纳矩阵进行修改,之

第 43 页 共 83 页



后再继续进行求解。

对于 n 节点网络可以得到 n 个方程, 表示为矩阵形式如下:

$$[\boldsymbol{Y}][\boldsymbol{U}] = [\boldsymbol{I}] \tag{3-26}$$

其中[**Y**]为*n*×*n*的节点导纳矩阵,[**U**]为*n*×1节点电压向量,[**I**]为*n*×1节点注入电流向量, 节点注入功率与节点电压相量及节点注入电流相量关系如下式所示:

$$S = U I^{g} I^{g}$$
 (3-27)

将式(3-26)代入式(3-27)可以得到潮流平衡方程即为:

$$S_{i} = P_{i} + Q_{i} = U_{i} \sum_{k=1}^{n} Y_{ik}^{*} U_{i}^{*} = \sum_{k=1}^{n} |U_{i}| |U_{k}| (\cos \theta_{ik} + j \cos \theta_{ik}) (G_{ik} - jB_{ik})$$
(3-28)

对上式实部和虚部进行分解,可以得到节点注入功率方程:

$$\begin{cases} P_i = \sum_{k=1}^{n} |U_i| |U_k| (G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik}) \\ Q_i = \sum_{k=1}^{n} |U_i| |U_k| (G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik}) \end{cases}$$
(3-29)

网络中每个节点包含注入有功功率、注入无功功率、节点电压幅值和节点电压相角四 个变量表征其运行状态,系统中节点可划分为*PQ*节点、*PV*节点以及*Vθ*节点三类,其中*PQ* 节点通常为负荷节点、过渡节点、功率给定的发电机节点等;*PV*节点通常为具有可调节无 功电源的母线;*Vθ*节点全网唯一,通常为担任调频任务的发电厂母线。每个节点有两个已 知变量和两个未知变量,则对于*n*节点网络,可以写出 2*n*个方程,其中 2*n*个给定变量已 知,求解 2*n*个未知量,通过对以上方程组求解可以得到各节点电压以及网络中潮流分布。

通过微分方程求解,可以得到发电机相关等状态变量,从而得到发电机节点的注入电流。在仿真计算时,在一个步长内,代数方程组与微分联立后,求解交替进行,直到仿真时间结束。可以通过发电机的功角差作为判断依据,确定系统是否稳定,如果系统失稳,则提前结束仿真。暂态稳定性求解流程如图 3-7 所示:



图 3-7 暂态稳定性求解流程

3.2.2 方程数值求解算法

在仿真过程中,利用计算机的高速计算性能可以进行数值计算,得到方程的解,以下将



介绍微分方程和非线性代数方程组的基本数值求解算法。

(1) 微分方程的数值解法

微分方程可通过差分的方法进行数值求解,在 2.1.2 部分对常用的一些计算方法做出了 介绍,这里对具体算法过程不再赘述,其中最为常用的算法为隐式梯形法,该方法有较好 的数值稳定性。对于下列已知初始条件的微分方程:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x,t) \\ x(t_0) = x_0 \end{cases}$$
(3-30)

 t_0 时刻 x_0 已知,可求得下一时刻 $t_0+\Delta T$ 时 $x(t_0+\Delta T)$ 值:

$$x(t_0 + \Delta T) = x(t_0) + \int_{t_0}^{t_0 + \Delta T} f(x, t) dt$$
(3-31)

其中 AT 为积分步长, 差分化后可得:

$$x(t_0 + \Delta T) = x(t_0) + \frac{h}{2} [f(x_0, t_0) + f(x(t_0 + \Delta T), t_0 + \Delta T)]$$
(3-32)

如图 3-9 所示,在足够小的积分步长 *ΔT* 内,函数 *f*(*x*,*t*)的积分即为阴影部分面积,将 其近似为一个梯形进行处理,此即为隐式梯形法的几何意义。



图 3-8 隐式梯形法几何解释

(2) 非线性代数方程组的数值解法

非线性代数方程组的数值解通常通过迭代的方式解得,牛顿-拉弗森方法是其中一种重要的求解方法,其迭代收敛速度快,算法效率高效,结果可靠,在电力系统的仿真中有广泛的应用。

非线性代数方程组可表示为以下形式:

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, L \ x_n) = 0 \\ f_2(x_1, x_2, L \ x_n) = 0 \\ M \\ f_n(x_1, x_2, L \ x_n) = 0 \end{cases}$$
(3-33)

其初值近似解用矩阵的形式可以表示为**[x**⁽⁰⁾**]**,其正解为**[x]**,则正解可表示为;

$$[\boldsymbol{x}] = [\boldsymbol{\Delta}\boldsymbol{x}] + [\boldsymbol{x}^{(0)}]$$
(3-34)

其中[**Δ**x]为近似解与正解之间的差值,也即为修正量。

第 45 页 共 83 页



将式(3-33)非线性代数方程组在[**x**⁽⁰⁾]处按照泰勒级数展开忽略高次项,仅保留一次项可以得到下式:

$$\begin{cases} f_{1}(x_{1}, \mathsf{L} \ x_{n}) + \Delta x_{1}^{(0)} \cdot \frac{\partial f_{1}}{x_{1}} \Big|_{(x_{1}^{(0)}, \mathsf{L} \ x_{n}^{(0)})} + \mathsf{L} + \Delta x_{n}^{(0)} \cdot \frac{\partial f_{1}}{x_{n}} \Big|_{(x_{1}^{(0)}, \mathsf{L} \ x_{n}^{(0)})} \approx 0 \\ f_{2}(x_{1}, \mathsf{L} \ x_{n}) + \Delta x_{1}^{(0)} \cdot \frac{\partial f_{2}}{x_{1}} \Big|_{(x_{1}^{(0)}, \mathsf{L} \ x_{n}^{(0)})} + \mathsf{L} + \Delta x_{n}^{(0)} \cdot \frac{\partial f_{2}}{x_{n}} \Big|_{(x_{1}^{(0)}, \mathsf{L} \ x_{n}^{(0)})} \approx 0 \\ \mathsf{M} \\ f_{n}(x_{1}, \mathsf{L} \ x_{n}) + \Delta x_{1}^{(0)} \cdot \frac{\partial f_{n}}{x_{1}} \Big|_{(x_{1}^{(0)}, \mathsf{L} \ x_{n}^{(0)})} + \mathsf{L} + \Delta x_{n}^{(0)} \cdot \frac{\partial f_{2}}{x_{n}} \Big|_{(x_{1}^{(0)}, \mathsf{L} \ x_{n}^{(0)})} \approx 0 \end{cases}$$
(3-35)

写成矩阵形式即为:

$$\left[f(\boldsymbol{X}^{(0)})\right] + \left[\boldsymbol{J}\right] \left[\boldsymbol{\Delta}\boldsymbol{X}^{(0)}\right] \approx \boldsymbol{\theta}$$
(3-36)

其中[J]即为 Jacobian 矩阵,其具体形式为:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{x_1} & \frac{\partial f_1}{x_2} & \mathsf{L} & \frac{\partial f_1}{x_n} \\ \frac{\partial f_2}{x_1} & \frac{\partial f_2}{x_2} & \mathsf{L} & \frac{\partial f_2}{x_n} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{O} & \mathbf{M} \\ \frac{\partial f_n}{x_1} & \frac{\partial f_n}{x_2} & \mathsf{L} & \frac{\partial f_n}{x_n} \end{bmatrix}$$
(3-37)

继而可以解得修正量:

$$\left[\boldsymbol{\Delta x^{(0)}}\right] = -\left[\boldsymbol{J}\right]^{-1}\left[\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x^{(0)}})\right]$$
(3-38)

根据修正量可以修正初值解,得到一次迭代后的近似解如下式所示:

$$\begin{cases} x_1^{(1)} = x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)} \\ x_2^{(1)} = x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \\ \mathsf{M} \\ x_n^{(1)} = x_n^{(0)} + \Delta x_n^{(0)} \end{cases}$$
(3-39)

通过不断的迭代求解,最终结果将无限逼近与正式解,其迭代形式可以表示为下式形式:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{X}^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{J} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \boldsymbol{f}(\boldsymbol{X}^{(0)}) \end{bmatrix}$$
(3-40)

其中k为迭代次数, $\begin{bmatrix} \boldsymbol{x}^{(k)} \end{bmatrix}$ 为k次迭代后近似解, $\begin{bmatrix} \boldsymbol{x}^{(k+1)} \end{bmatrix}$ 为k+1次迭代后近似解。

3.2.3 网络元件数学模型

电力系统中元件的动态性能会影响机电暂态过程以及系统稳定性,因而需要建立合适的 模型描述各元件特性,本部分主要讨论发电机和负荷的数学模型。

(1) 同步发电机模型

在建立同步发电机模型时,其机械运动可以用一组运动方程表达;连接电网后的发电 机电动势与端电压、电流之间关系可以用一组代数方程表达;发电机内部暂态过程可以用



一组微分方程表达。

对于描述同步电机机械运动的转子运动方程可表示为:

$$\begin{cases} T_J \frac{d\omega}{dt} = \frac{\Delta P}{\omega} = \frac{P_m - P_e}{\omega} = \Delta M \\ \frac{d\delta}{dt} = (\omega - 1)2\pi f_0 = (\omega - 1)\omega_0 \end{cases}$$
(3-41)

其中 ω 为转子电气角速度, δ 为转子电气角度, P_m 为原动机输出功率, P_e 为发电机电磁功率, ΔM 为原动机与发电机之间的转矩差,f为频率基准值, $2\pi f_0 = \omega_0$, T_J 为同步机时间常数,其取值与转子自身特性相关。

对于同步电机定子和转子电磁暂态过程的描述,通常采用派克(park)变换后建立模型, 在实际计算中,会对模型进行简化,忽略转速变化对电势的影响,忽略定子非周期分量的 电磁暂态过程。

考虑阻尼回路的次暂态电势变化模型如下所示:

$$\begin{cases} V_{d} + RI_{d} - X_{q}^{"}I_{q} = E_{d}^{"} \\ V_{q} + RI_{q} + X_{d}^{"}I_{d} = E_{q}^{"} \end{cases}$$
(3-42)

$$\begin{cases} T_{d0}^{'} \frac{dE_{q}^{'}}{dt} = E_{fd} - E_{q}^{'} - (X_{d} - X_{d}^{'})I_{d} \\ T_{d0}^{'} \frac{dE_{q}^{'}}{dt} = -E_{q}^{''} + E_{q}^{'} - (X_{d}^{'} - X_{d}^{''})I_{d} + T_{d0}^{''} \frac{dE_{q}^{'}}{dt} \\ T_{q0}^{''} \frac{dE_{d}^{''}}{dt} = -E_{d}^{''} + (X_{q}^{'} - X_{q}^{''})I_{q} \end{cases}$$
(3-43)

若进一步简化,不考虑阻尼回路的次暂态电势变化模型如下所示:

$$\begin{cases} V_{d} + RI_{d} - X_{q}^{'}I_{q} = E_{d}^{'} \\ V_{q} + RI_{q} + X_{d}^{'}I_{d} = E_{q}^{'} \end{cases}$$
(3-44)

$$T_{d0}^{'} \frac{dE_{q}^{'}}{dt} = E_{fd} - E_{q}^{'} - (X_{d} - X_{d}^{'})I_{d}$$
(3-45)

在上述模型中, E_{a} 为交轴次暂态电势, E_{a} 为直轴次暂态电势, E_{q} 为交轴暂态电势, E_{d} 为直轴暂态电势, X_{q} 为交轴资态电抗, X_{a} 为直轴管态电抗, X_{a} 为交轴资态电抗, X_{a} 为直轴暂态电抗, X_{q} 为交轴暂态电抗, X_{d} 为直轴暂态电抗, V_{q} 定子电压交轴分量, V_{d} 定子电压直轴分量, I_{q} 定子电流交轴分量, I_{d} 定子电流直轴分量,R为定子绕组电阻, E_{fa} 由励磁系统决定, T_{d0} 、 T_{q0} 、 T_{q0} 为发电机的时间常数。

发电机输出电磁功率可以由下式得到:

$$P_{e} = \operatorname{Re}(\overset{g}{U}\overset{g}{I^{*}})$$

= Re[(U_{d} + jU_{q})(I_{d} - jI_{q})]
= U_{d}I_{d} + U_{q}I_{q} (3-46)

同步发电机的数学模型建立在旋转坐标系下,其特性描述方程都是基于 dq 轴坐标,而 潮流计算的网络方程建立在静止 xy 坐标系下,因而在发电机方程与网络方程联立求解时, 需将发电机电气量进行坐标变化,其变换关系如下所示:

第 47 页 共 83 页



$$(C_x + jC_y)e^{j\delta} = C_d + jC_q$$
(3-47)

其中 C_x 、 C_y 为电气量在 xy 坐标系下分量, C_d 、 C_q 为电气量在 xy 坐标系下分量, δ 为 xy 坐标系与 dq 坐标系之间夹角, 写成矩阵形式即为:

$$\begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & -\sin \delta \\ \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_d \\ C_q \end{bmatrix}$$
(3-48)

$$\begin{bmatrix} C_d \\ C_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \end{bmatrix}$$
(3-49)

其中式(3-48)为 dq 坐标系下电气量变换至 xy 坐标系下电气量方式;式(3-49)为为 xy 坐标系 下电气量变换至 dq 坐标系下电气量方式。

(2) 负荷模型

负荷广泛存在于电力系统中,负荷节点上接入装置复杂多样,存在电机、照明、电热、 整流等不同性质的负荷,其数学模型的建立对机电暂态仿真的结果有重要影响,然而,由 于负荷组成成分的多样性,建立精确的负荷模型却极其困难。

最简单负荷模型为代数模型,其中恒定阻抗负荷模型就是其中一种,其计算简单,有 广泛应用,但精度较低,可认为在暂态过程中负荷阻抗保持为Z_L不变,则当负荷节点电压 为U_L时,功率大小[§]_L为:

$${}^{g}_{S_{L}} = P + jQ = \left(\frac{U_{L}^{2}}{Z_{L}}\right)^{*}$$
(3-50)

恒定阻抗负荷模型适用于节点电压变化较小,负荷动态特性影响较小的情况。除此以外, 常用的代数负荷模型还包括恒电流模型、恒功率模型以及它们的组合。

为了进一步对负荷特性进行更完善地描述,可以采用负荷的静态特性模型,将负荷看 作恒定阻抗模型、恒电流模型和恒功率模型的组合,并且负荷大小与频率相关,在电压和 频率缓慢变化时,负荷功率与两者之间关系可以表示为:

$$\begin{cases} P = P_0(a_1U^2 + a_2U + a_3)(1 + \Delta f \cdot L_P) \\ Q = Q_0(b_1U^2 + b_2U + b_3)(1 + \Delta f \cdot L_q) \end{cases}$$
(3-51)

其中 P、Q 为节点注入有功、无功功率, P₀、Q₀为参考功率, a₁、b₁为负荷中恒阻抗模型 部分占比, a₂、b₂为负荷中恒电流模型部分占比, a₃、b₃为负荷中恒功率模型部分占比, Δf 为系统频率变化, L_p、L_q为频率变化引起功率变化系数。其中各部分占比参数需要满足下 式:

$$\begin{cases} a_1 + a_2 + a_3 = 1\\ b_1 + b_2 + b_3 = 1 \end{cases}$$
(3-52)

若进一步考虑负荷中存在电动机的机电暂态过程的影响,可以采用负荷的动态特性模型进行描述,其建模过程在此不再赘述。

3.3 多速率混合仿真基本原理

在电力系统运行过程中,不同时间尺度的动态过程同时发生,且相互影响,不同器件 和电气量之间响应速度差异较大,传统的机电暂态仿真对于动态过程极快的电力电子器件 不能很好描述,而电磁暂态过程因运算量巨大而使得仿真规模有限,因此相互独立的电磁

第 48 页 共 83 页



暂态程序或机电暂态程序对现代电力系统的仿真都难以适应。而多速率混合仿真可以较好 地解决这一问题,在对系统进行时域分析时,基于仿真步长的不同将系统划分为若干个子 系统,对系统当中需要详尽研究的部分采用小步长高精度仿真,其余部分采用大步长进行 仿真,在对其中一子系统进行仿真时,其余子系统以等值电路的形式嵌入,子系统间采用 接口连接进行数据交换,可以同时满足了仿真精度、速度和规模的要求,本节将以基本的 机电电磁混合仿真为例介绍多速率仿真的基本原理和仿真程序接口。

3.3.1 基本原理

在对系统进行仿真之前,首先需要将全网按照一定的原则进行划分,通常使用的分块方 法基于空间位置,其中动态响应迅速、需要进行详尽研究的网络采用小步长进行电磁暂态仿 真,而常规交流网络则采用大步长进行机电暂态仿真,在对其中一个子系统进行仿真,另一 个子系统需要以等值电路的形式接入,两个子系统之间设计接口进行连接。



图 3-9 电力系统分解图

如图 3-9 所示,一个完整的电力系统可以视作电磁子系统与机电子系统的集合,以此为 依据对网络进行划分后,两个子系统间的电气联系只能通过接口的形式表达,因此,在对其 中一个子系统进行仿真时,另一子系统以等值电路的形式嵌入,同时,每个仿真步长结束, 子系统间需要进行数据交互,对接口参数进行更新。因为电磁暂态仿真数学模型基于电气量 的三相瞬时值,而机电暂态仿真数学模型基于电气量的基波正负零序相量,所以在数据交互 时,需要对两侧电气量数据形式进行处理,其仿真原理图图如下所示:



图 3-10 多速率混合仿真原理图

在划分网络时,接口位置的选择对整体仿真过程起到关键性作用,通常的做法是选取电 力电子设备交流侧母线作为接口,这样可以减小电磁暂态仿真的规模,减少接口数量。然后 由于可能发生的系统故障或者不对称现象会导致接口处出现波形畸变的问题,从而使得接口 交换数据的精确性降低,影响全系统仿真精度。若将接口位置延伸到常规交流系统内部,可 以使得接口母线处的波形畸变大幅降低,但与此同时,也提高了电磁暂态仿真的计算量。

3.3.2 网络等值电路

在机电电磁混合仿真中,当全网络分解后,不同子系统间只能以接口等值模型的形式 表达相互间的电气关系,等值网络的形式需要尽可能完善地描述其表示系统的电气信息, 确保仿真精度,以下部分将戴维南等值和诺顿等值为例介绍简单等值电路的求取方式。

第 49 页 共 83 页



(1) 机电子系统等值电路

在对电磁子系统进行电磁暂态仿真时,外部网络即机电子系统需要以一等值电路代替,因为机电侧通常为常规交流网络,即为一有源系统,且等值电路中元件参数符合线性关系,所以可以采用戴维南等值电路或诺顿等值电路的形式表示,下图所示为戴维南等值电路形式,其中 *E*_{rs}为等值电压源,*Z*_{rs}为等值阻抗。*U*_n为接口处电压,*I*_n为接口处电流。



图 3-11 机电子系统戴维南等值电路图

在求取机电子系统戴维南等值电路时,其中一种常见方法是假设机电侧网络中所有电压 源为零,通过在接口母线处注入电流的方式获得电路参数,由网络拓扑可得到*n*个节点机电 子系统导纳矩阵,并且有以下关系:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \mathsf{L} & Y_{1p} \\ Y_{21} & Y_{22} & \mathsf{L} & Y_{2p} \\ \mathsf{M} & \mathsf{M} & \mathsf{M} \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \mathsf{L} & Y_{np} \\ Y_{p1} & Y_{p2} & \mathsf{L} & Y_{pp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \mathsf{M} \\ U_n \\ U_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \mathsf{M} \\ I_n \\ I_p \end{bmatrix}$$
(3-53)

其中, P节点为子系统间接口母线, 其节点数据写在上述等式中最后一行。可令节点处注入 电流为 I_p , 则等式右边即为 $\begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 & I_p \end{bmatrix}^r$, 求解方程组得到 P节点电压为 U_p , 则可以 计算得到戴维南电路等值阻抗 Z_r , 如下:

$$Z_{TS} = \frac{U_p}{I_p} \tag{3-54}$$

由图 3-11 中所示电路,再通过接口电压U_n和接口电流I_n,可以计算得到戴维南电路等值电压源如下式所示:

$$E_{TS} = U_n - Z_{TS} I_n \tag{3-55}$$

当接口母线数量大于1时,可以采用多端口耦合等值电路进行等效,令接口数为*m*,由网络拓扑可得到*n*个节点机电子系统的分块导纳矩阵*Y*如下:

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{tt} & Y_{tr} \\ Y_{rt} & Y_{rr} \end{bmatrix}^{n-m} m$$

$$(3-56)$$

于是可得到有以下关系:

第50页共83页



$$\begin{bmatrix} Y_{tt} & Y_{tr} \\ Y_{rt} & Y_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{n-m} \\ U_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{n-m} \\ I_m \end{bmatrix}$$
(3-57)

同样,接口节点数据写在上述等式中最后一行。同理,在接口节点处注入电流,则等式右边即为 $\begin{bmatrix} 0 & \cdots & 0 & I_{p1} & \cdots & I_{pm} \end{bmatrix}^r$,求解上述方程组即可得到接口节点电压,采用单端口接口网络同样的方法可计算得到多端口耦合等值电路的参数。

(2) 电磁子系统等值电路

同样在对机电子系统进行仿真时,电磁子系统需要以一等值电路代替,通常电磁子系统 中含有电力电子器件,结构相对更为复杂,有些情况下子系统中仅含有无源器件,因此描述 方法不统一,其等值电路形式也更加复杂,通常会对具体情况进行具体分析。若电磁子系统 中仅为常规交流网络,可以视作一有源系统,采用诺顿等值电路;若子系统中包含 FACTS 设备,可以根据设备特性采用恒功率、恒阻抗或恒电流源等值形式;若子系统中包含 HVDC 系统时,可以采用电流源并联恒定大电阻等值形式,此时,通常不采用诺顿等值电路,因为 电力电子器件的频繁开断会导致诺顿等值参数难以计算。下图所示为诺顿等值电路形式,其 中*I_{EMT}*为等值电压源,*Z_{EMT}*为等值阻抗。*U_n*为接口处电压,*I_n*为接口处电流。



同机电子系统等值电路求取方式相似,在接口母线处注入电流 I_p ,则节点电压为 U_p ,则可以计算得到诺顿电路等值阻抗 Z_{EMT} 如下:

$$Z_{EMT} = \frac{U_p}{I_p} \tag{3-58}$$

由图 3-12 中所示电路,再通过接口电压*U_n*和接口电流*I_n*,可以计算得到诺顿电路等值电流 源如下式所示:

$$I_{EMT} = I_n - U_n / Z_{EMT}$$
(3-55)

由此可以得到混合仿真中的接口电路如图 3-13 所示,可以看出,在机电子系统的仿真当中,接口模型由诺顿等值电路给出,相关参数正负零序电流 *I*¹²⁰、导纳 *Y*¹²⁰ 由相量形式表示;在电磁子系统的仿真当中,接口模型由戴维南等值电路给出,相关参数三相电压 *u^{abc}*、阻抗 *z^{abc}* 由瞬时值形式表示。

第 51 页 共 83 页





3.3.3 数据交互方式

在仿真过程中,子系统间需要进行数据交互,而通常两侧子系统仿真步长不一致,可以 令电磁暂态仿真积分步长为 Δt ,机电暂态仿真积分步长为 ΔT ,通常情况下 Δt 较小而 ΔT 较 大,则可以得到两者之间关系为 $\Delta T/\Delta t = n$ 。这表明机电子系统没进行 1 个步长的仿真,电 磁子系统需要同步进行 n 个步长的仿真,当一个 ΔT 步长结束,两侧子系统交换一次数据, 接口处电气量信息更新,根据数据交互时序的不同,主要分为串行、并行和相互迭代的方 式^[91]。

(1) 串行交互方式

若采用串行交互方式进行仿真,两个子系统轮流独自完成 ΔT 时长的仿真,再将更新后接口数据传递给对方,其中一个子系统进行仿真时,另一子系统处于等待状态,两者迭代交替进行,其中一个子系统会延时另一个子系统一个 ΔT 的仿真时间,在t时刻,机电子系统将接口数据传递给电磁子系统,电磁子系统更新机电侧等值电路后仿真至 $t+\Delta T$ 时刻,然后将此时的接口数据传递给机电子系统,机电子系统更新电磁侧等值电路后也仿真至 $t+\Delta T$ 时刻,如此交替进行,重复以上步骤进行仿真过程。仿真时采用该方式交互数据,子系统间相互等待,仿真速度会有所影响,目前混合大多采用该方式,其交互进程如下图所示,其中箭头方向即为步骤进行方向。



(2) 并行交互方式

若采用并行交互方式进行仿真,两个子系统同时独自完成ΔT时长的仿真,再将更新后接口数据传递给对方,在t时刻,机电子系统与电磁子系统同时将接口数据传递给对方,两个子系统分别更新等值电路后仿真至t+ΔT时刻,然后将此时的接口数据传递给对方子系统,如此向下进行,重复以上步骤进行仿真过程。仿真时采用该方式交互数据,子系统仿真同时进行,不需要等待,仿真速度快,较串行数据交互时序在效率上得到了大幅度提升,但精度有所欠缺,特别是在网络结构发生改变时,电气量发生突变,会导致误差加剧。其交互

第52页共83页



进程如下图所示,其中箭头方向即为步骤进行方向。



图 3-15 并行交互方式步骤图

(3) 相互迭代交互方式

若采用相互迭代交互方式进行仿真,两个子系统同时独自完成ΔT 时长的仿真后,将 *t*+ΔT 时刻接口数据相互传递给对方,子系统分别更新等值电路后从*t*时刻仿真至*t*+ΔT 时 刻,如此向下进行,重复以上步骤进行仿真过程。该方式仿真精度得到了提高,但是操作复 杂,计算量大,实用性不高。其交互方式如下图所示,其中箭头方向即为步骤进行方向。



图 3-16 相互迭代交互方式步骤图

两个子系统间交换数据的内容根据等值电路形式和接口形式确定,机电子系统仿真数学 模型基于电气量正负零序基波相量建立,其仿真结果也是以基波相量的形式呈现,电磁子系 统仿真数学模型基于电气量三相瞬时值建立,其仿真结果也是以瞬时值的形式呈现,因此机 电子系统将接口数据传递给电磁子系统时,需要将数据形式转换为三相瞬时值,同样,电磁 子系统将接口数据传递给机电子系统时,需要将数据形式转换为三序相量值。通常电磁子系 统获取基波相量的方式有两种,一是采用快速傅里叶算法,该方法可以较准确得到电气量基 波数据,但系统不对称和波形畸变对计算结果有一定影响,且会产生一定时延;二是采用曲 线拟合算法,该方法基于最小二乘法,计算速度较快,相比傅里叶算法更加灵活。



第四章 混合仿真接口技术研究

目前的多速率混合仿真中,关于接口技术的研究,尚存在一些问题值得深入探讨,传统 接口方法从三相瞬时值中提取基波正序分量,目前多采用 FFT 或曲线拟合法,这会产生一 定的延迟,且不能有效处理信号的动态过程,子系统间不能做到实时数据通讯。

在电力系统仿真中采用频移分析(Shifted Frequency Analysis, SFA)为混合仿真接口提供了一个 很好的思路,通过频移,原系统从基频移动至 OHz 附近,可以在更大步长下精确地描述基 频附近的动态行为。同时频移分析可以提供电气量相量结果,准确跟踪三相电力系统中系统 状态的变化,其频移相量即为时域信号波形的包络,同时也可以通过变换得到电气量瞬时值。

4.1 频移分析基本理论

对于电力系统中时域瞬时信号是 s(t),通常其带通频谱在基频周围 ^[92-93],这里设定基频 f_0 =50Hz,则角频率 $\omega_0 = 2\pi f_0 \approx 314 rad / s$,由傅里叶分析可知,s(t)可以看作以基频为中心 一定带宽范围内信号的叠加,可以表示为:

$$s(t) = \lim_{\Delta\omega\to 0} \sum_{i=-\infty}^{\infty} a_i \cos[(\omega_0 + \Delta\omega)t + \varphi_i]$$

$$= \lim_{\Delta\omega\to 0} \sum_{i=-\infty}^{\infty} a_i \cos(\varphi_i + \Delta\omega t)\cos(\omega_0 t) - a_i \sin(\varphi_i + \Delta\omega t)\sin(\omega_0 t)$$

$$= s_I(t)\cos\omega_0 t - s_O(t)\sin\omega_0 t$$
(4-1)

其中:

$$\begin{cases} s_{I}(t) = \lim_{\Delta \omega \to 0} \sum_{i=-\infty}^{\infty} a_{i} \cos[i\Delta\omega t + \varphi_{i}] \\ s_{\varrho}(t) = \lim_{\Delta \omega \to 0} \sum_{i=-\infty}^{\infty} a_{i} \sin[i\Delta\omega t + \varphi_{i}] \end{cases}$$
(4-2)

式中 $\Delta \omega$ 表示时域瞬时信号 s(t)频域中表示时在基频 ω_0 附近的通频带宽,则 $s_I(t)$ 、 $s_Q(t)$ 以及基频 ω_0 可以包含 s(t)的全部信息,其频域形式如图 4-1 所示:



第 54 页 共 83 页



$$\$(t) = s(t) + jH[s(t)]$$
(4-3)

其中H[·]表示希尔伯特变换,其形式如式(4-4)所示:

$$H[s(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau = s(t) * \frac{1}{\pi t} = \begin{cases} -j & (\omega < 0) \\ j & (\omega > 0) \end{cases}$$
(4-4)

则**\$**(*t*)可表示为:

$$\begin{aligned} \$(t) &= s(t) + jH[s(t)] \\ &= [s_1(t)\cos\omega_0 t - s_Q(t)\sin\omega_0 t] + j[s_1(t)\cos\omega_0 t + s_Q(t)\sin\omega_0 t] \\ &= [s_1(t) + js_Q(t)](\cos\omega_0 t + j\sin\omega_0 t) \\ &= [s_1(t) + js_Q(t)]e^{j\omega_0 t} \end{aligned}$$

$$(4-5)$$

由式(4-5)可知解析信号 **\$**(*t*) 保留了原时域信号 *s*(*t*)的全部信息,变换后的解析信号 **\$**(*t*) 仅含原信号的正频率分量,是一个没有负频率分量的复数函数,其频域形式如图 4-2 所示:



图 4-2 解析信号频谱

令 $S(t) = s_1(t) + js_0(t)$,则S(t)即为原时域瞬时信号s(t)的复数包络^[94],可以表达如下式

所示:

$$S(t) = \{s(t) + jH[s(t)]\}e^{-j\omega_0 t} = \$(t)e^{-j\omega_0 t}$$
(4-6)

由式(4-6)可知在频域下, *S*(*t*)可以通过将解析信号 *≸*(*t*) 频谱向左移动 *ω*₀ 得到, 即为其"频移"特性, *S*(*t*)为原信号的频移相量, 其频域形式如图 4-3 所示:



图 4-3 频移信号频谱

时域瞬时信号 s(t)可以通过取解析信号 \$(t) 实部得到,如式(4-3)所示:

$$s(t) = \operatorname{Re}[\$(t)] \tag{4-7}$$

相似的方法,频移相量也可以通过数学变换回溯原时域瞬时信号:

第 55 页 共 83 页



$$s(t) = \operatorname{Re}[S(t)] = \operatorname{Re}[S(t)e^{j\omega_0 t}]$$
(4-8)

对信号进行频移分析的物理解释如图 4-4 所示,可以看出,基于希尔伯特变换,动态系统中的时域带通信号 s(t)可转换为对应的解析信号 f(t),该信号在频域中消除了原信号的负频率分量,仅保有其正频率分量,在时域中,解析信号则同时含有实部与虚部成分。由傅里叶分析的频移性质可知:一个时域信号 $x(t) 乘 e^{\pm j \omega_s t}$ 即 $x(t)e^{\pm j \omega_s t}$,其频谱也会相应移动 $m \omega_s$,因此频移相量 S(t)可通过其解析信号 f(t)频移得到。



4.2 频移分析建模

4.2.1 基本电气元件建模

电阻、电感、电容是电力系统的基本组成元件,可以通过组合构成其它复杂元件,以下 部分将基于频移相量构建元件数学模型。

(1) 电阻模型

在时域中, 电阻两端电压与流经电流可以表示为:

$$i(t) = \frac{1}{R}v(t) \tag{4-9}$$

由式(4-6),可将上述方程写成:

$$\operatorname{Re}[I(t)e^{j\omega_0 t}] = \frac{1}{R}\operatorname{Re}[U(t)e^{j\omega_0 t}]$$
(4-10)

进而可以得到其频移形式

$$I(t) = \frac{1}{R}U(t) \tag{4-11}$$

(2) 电感模型

在时域中,表示电感两端电压与流经电流关系的微分方程如下:

$$v(t) = L\frac{di(t)}{dt}$$
(4-12)

第 56 页 共 83 页



由式(4-5)、(4-6)可将上述方程写为:

$$\{t\} = V(t)e^{j\omega_0 t} = L \frac{dk(t)}{dt} = L \frac{dI(t)e^{j\omega_0 t}}{dt}$$
(4-13)

经过推导可得:

$$V(t)e^{j\omega_{0}t} = L\frac{dI(t)e^{j\omega_{0}t}}{dt} = Le^{j\omega_{0}t}\frac{dI(t)}{dt} + j\omega_{0}LI(t)e^{j\omega_{0}t}$$
(4-14)

.

即:

$$V(t) = L\frac{dI(t)}{dt} + j\omega_0 LI(t)$$
(4-15)

表 4-1 给出了不同表达形式下电感的数学模型:

表4-1 不同表达形式下电感模型				
表达形式	数学模型			
时域瞬时信号	$v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$			
传统相量	$\stackrel{g}{V} = j\omega_0 L \stackrel{g}{I}$			
解析信号	$\Re(t) = L \frac{d\Re(t)}{dt}$			
频移相量	$V(t) = L\frac{dI(t)}{dt} + j\omega_0 LI(t)$			

式(4-15)经隐式梯形法进行差分化可得:

$$\frac{2L}{\Delta t} \left[I(t+\Delta t) - I(t) \right] = \left[V(t+\Delta t) + V(t) - j\omega_0 LI(t+\Delta t) - j\omega_0 LI(t) \right]$$
(4-16)

即**:**

$$I(t + \Delta t) = [V(t + \Delta t) + V(t) + (\frac{2L}{\Delta t} - j\omega_s L)I(t)] \cdot (\frac{1}{\frac{2L}{\Delta t} + j\omega_0 L})$$
(4-17)

其中 △t 为积分步长。

采用解析信号形式表达则有:

$$\{t + \Delta t\} e^{-j\omega_0(t+\Delta t)} = [\{t + \Delta t\} e^{-j\omega_0(t+\Delta t)} + \{t\} e^{-j\omega_0 t} + (\frac{2L}{\Delta t} - j\omega_s L) \times \{t\} e^{-j\omega_0 t}] \times (\frac{1}{\frac{2L}{\Delta t} + j\omega_0 L})$$
(4-18)

等式两边同乘 e^{jω₀(t+Δt)}

$$\Re(t + \Delta t) = \left[\Re(t + \Delta t) + \Re(t)e^{j\omega_0\Delta t} + \left(\frac{2L}{\Delta t} - j\omega_0L\right) \times \Re(t)e^{j\omega_0\Delta t}\right] \times \left(\frac{1}{\frac{2L}{\Delta t} + j\omega_0L}\right)$$
(4-19)

上式取实部可以得到其时域形式。

(3) 电容模型

在时域中, 表示电容两端电压与流经电流关系的微分方程如下:

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$$
(4-20)

由式(4-5)、(4-6)可将上述方程写成频移形式为:

第 57 页 共 83 页



$$I(t)e^{j\omega_0 t} = C \frac{dV(t)e^{j\omega_0 t}}{dt}$$

$$\tag{4-21}$$

经过推导可得:

$$I(t)e^{j\omega_{0}t} = C\frac{dV(t)e^{j\omega_{0}t}}{dt} = Ce^{j\omega_{0}t}\frac{dV(t)}{dt} + j\omega_{0}CV(t)e^{j\omega_{0}t}$$
(4-22)

即**:**

$$I(t) = C \frac{dV(t)}{dt} + j\omega_0 CV(t)$$
(4-23)

表 4-2 给出了不同表达形式下电容的数学模型:

表4-2 不同表达形式下电容模型					
表达形式	数学模型				
时域瞬时信号	$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$				
传统相量	$\overset{g}{V} = rac{\overset{g}{I}}{j\omega_0 C}$				
解析信号	$\Re(t) = C \frac{d \Re(t)}{dt}$				
频移相量	$I(t) = C \frac{dV(t)}{dt} + j\omega_0 CV(t)$				

式(4-23)经隐式梯形法进行差分化可得:

$$I(t + \Delta t) + I(t) = \frac{2C}{\Delta t} [V(t + \Delta t) - V(t)] + j\omega_0 CV(t + \Delta t) + j\omega_0 CV(t)$$
(4-24)

即:

$$I(t + \Delta t) = \left(\frac{2C}{\Delta t} + j\omega_0 C\right)V(t + \Delta t) + \left(-\frac{2C}{\Delta t} + j\omega_0 C\right)V(t) - I(t)$$
(4-25)

其中 Δt 为积分步长。 采用解析信号形式表达则有:

$$\{ (t + \Delta t)e^{-j\omega_0(t+\Delta t)} = (\frac{2C}{\Delta t} + j\omega_0 C) \} (t + \Delta t)e^{-j\omega_0(t+\Delta t)} + (-\frac{2C}{\Delta t} + j\omega_0 C) \} (t)e^{-j\omega_0 t} - \{ (t)e^{-j\omega_0 t} + (-2E)e^{-j\omega_0 t} +$$

等式两边同乘 e^{jω₀(t+Δt)}

$$\{t + \Delta t\} = (\frac{2C}{\Delta t} + j\omega_0 C) \{t + \Delta t\} + (-\frac{2C}{\Delta t} + j\omega_0 C) \{t\} e^{j\omega_0 \Delta t} - \{t\} e^{j\omega_0 \Delta t}$$
(4-27)

上式取实部可以得到其时域形式。

4.2.2 算法比较

为验证频移相量算法的有效性,采用图4-7中简单电阻电感串联电路进行计算,其中 *R*=10Ω, *L*=2H, *f*=50Hz, $u_1(t) = 100\sqrt{2}\cos(\omega t)$, $u_2(t) = 50\sqrt{2}\cos(\omega t + \pi/2)$, $u_1(t)$ 用传统相量形式表示为 $100 \angle 0^\circ$, $u_2(t)$ 用传统相量形式表示为 $50 \angle 90^\circ$ 。

第 58 页 共 83 页





图 4-7 计算电路

作为对比,分别采用电磁暂态仿真 EMTP 算法,传统相量算法以及本文中介绍的频移 相量算法对图 4-7 中电路进行计算,其中 EMTP 算法与频移相量算法采用的仿真步长为 50µs, 得到电流波形如图 4-8 所示:



图 4-8 计算电路电流波形图

可以看出频移相量算法较传统相量算法可以更好描述电路中电气量的动态性能,其仿真 结果与电磁暂态仿真算法得到结果一致。

4.3 PI 型等值输电线路模型

输电线路参数沿线均匀分布,当电能以交流电的形式传输时,导线周围会产生电磁侧, 电磁能量沿线传播。然而在对电力系统进行分析计算时,特别是进行稳态分析时,所关心的 更多是两端电压和电流之间关系,对于输电线路上的波过程^[95]不作过多考虑。通常对于中 等长度线路,在计算时可以采用集中参数代替分布参数,以 PI 型等值电路的形式表达,其 电路模型如下图所示:





图 4-9 传输线 PI 型等值电路

其两端电压和通过电流关系可由下列方程组进行描述:

$$\begin{cases}
i_{1} = i_{12} + i_{11} \\
i_{2} = i_{21} + i_{11} \\
i_{12} = -i_{21} \\
v_{1} - v_{2} = L \frac{di_{12}}{dt} + Ri_{12} \\
i_{11} = C \frac{dv_{1}}{dt} \\
i_{22} = C \frac{dv_{2}}{dt}
\end{cases}$$
(4-28)

将上述方程写成频移形式为:

$$\begin{cases} I_{1} = I_{12} + I_{11} \\ I_{2} = I_{21} + I_{11} \\ I_{12} = -I_{21} \\ V_{1} - V_{2} = L \frac{dI_{12}}{dt} + j\omega_{0}LI_{12} + RI_{12} \\ I_{11} = C \frac{dV_{1}}{dt} + j\omega_{0}CV_{1} \\ I_{22} = C \frac{dV_{2}}{dt} + j\omega_{0}CV_{2} \end{cases}$$

$$(4-29)$$

经隐式梯形法进行差分化可得:

$$\begin{cases} I_{1}(t + \Delta t) = I_{12}(t + \Delta t) + I_{11}(t + \Delta t) \\ I_{2}(t + \Delta t) = I_{21}(t + \Delta t) + I_{11}(t + \Delta t) \\ I_{12}(t + \Delta t) = \frac{V_{1}(t + \Delta t) - V_{2}(t + \Delta t)}{2L / \Delta t + j\omega_{0}L + R} + \frac{V_{1}(t) - V_{2}(t) + (2L / \Delta t - j\omega_{0}L - R)I_{12}(t)}{2L / \Delta t + j\omega_{0}L + R} \\ I_{21}(t + \Delta t) = \frac{V_{2}(t + \Delta t) - V_{1}(t + \Delta t)}{2L / \Delta t + j\omega_{0}L + R} + \frac{V_{2}(t) - V_{1}(t) + (2L / \Delta t - j\omega_{0}L - R)I_{21}(t)}{2L / \Delta t + j\omega_{0}L + R} \\ I_{11}(t + \Delta t) = (2C / \Delta t + j\omega_{0}C)V_{1}(t + \Delta t) + (-2C / \Delta t + j\omega_{0}C)V_{1}(t) - I_{11}(t) \\ I_{22}(t + \Delta t) = (2C / \Delta t + j\omega_{0}C)V_{2}(t + \Delta t) + (-2C / \Delta t + j\omega_{0}C)V_{2}(t) - I_{22}(t) \end{cases}$$

$$(4-30)$$

其中 ∆t 为积分步长。



第五章 仿真实例与分析

为验证提出的基于频移分析对 PI 型等值输电线进行建模的多速率混合仿真接口在实际应用中的准确性,本文分别采用 IEEE9 节点交流网络与 STATCOM 互联系统、南方电网交流网络与 STATCOM 互联系统作为算例进行仿真验证。并且对算例分别进行全系统电磁暂态仿真,传统接口的机电电磁混合仿真以及基于频移分析建模接口的多速率仿真,对采用不同方法仿真得到结果进行对比,进而验证本文提出的基于频移分析建模的混合仿真接口的可行性和有效性。

5.1 仿真实现方法

仿真平台基于本文第三章中介绍的基本理论进行搭建,整个仿真过程在单台计算机上完成。

在多速率混合仿真中,电磁子系统在商业软件 PSCAD 中搭建,而外部机电子系统由戴 维南等值电路表示如图 5-1 所示,整个等值电路由 PSCAD 自带库中标准元件构建,其电压 幅值、相角、频率可控,其等值电阻与电抗根据机电侧网络参数计算得到。混合仿真开始后, 每一步长根据计算得到端口等效电压源实时电压值。



图 5-1 机电子系统戴维南等值电路图

机电侧子系统仿真通过 C++语言编程实现,而外部电磁子系统由诺顿等值电路的形式表达。两个子系统间通过 socket 通讯传递数据。每一个机电暂态仿真步长结束,电磁子系统更新等值电路正负零序电流幅值、相位数据;电磁子系统更新等值电路三相电压幅值、相位数据。

PSCAD 中可以通过自定义元件的方式实现相应功能,基于频移分析建模的混合仿真接口通过 MATLAB 编写程序实现,仿真时由 PSCAD 调用相应程序,其模块在 PSCAD 中实现如图 5-2 所示:





5.2 IEEE9 节点系统算例

本算例采用 IEEE9 节点系统与 STATCOM 联接验证多速率混合仿真的结果,其中在电磁暂态仿真程序 PSCAD 中设置仿真步长为 50µs,机电暂态仿真步长设置为 10ms,下图即为 全系统仿真拓扑结构图。



图 5-3 IEEE9 节点系统混合仿真拓扑结构图

将母线 BUS-2 设定为多速率混合仿真的接口母线,电磁侧为链式 STATCOM 动态无功 补偿及联接电抗器,在 PSCAD 中搭建模型如图 5-4 所示:

第 62 页 共 83 页





图 5-4 STATCOM 电磁暂态模型示意图

机电侧为含三台发电机的九节点系统,表 5-1 给出了系统相关信息:

节点	电压等级 (kV)	节点类型	有功负荷 (MW)	无功负荷 (Mvar)	有功出力 (MW)	最大无功出力 (Mvar)
BUS-G1	16.5	Vθ				999.0
BUS-G2	18.0	PV			163.0	999.0
BUS-G3	13.8	PV			85.0	999.0
BUS-1	230.0	PQ				
BUS-2	230.0	PQ	35.0	10.0		
BUS-3	230.0	PQ				
BUS-A	230.0	PQ	125.0	50.0		
BUS-B	230.0	PQ	90.0	30.0		
BUS-C	230.0	PQ	100.0	35.0		

表5-1 IEEE9节点系统节点信息表

表 5-2 给出了系统变压器相关信息:

	表5-2 IEEE9节点系统变压器信息表					
节点1	电压等级 (kV)	节点2	电压等级 (kV)	漏扛 (p.u.)	变比	
BUS-G1	16.5	BUS-1	230.0	0.0567	16.5 / 242	
BUS-G2	18.0	BUS-2	230.0	0.0625	18.0 / 242	
BUS-G3	13.8	BUS-3	230.0	.0.586	13.8 / 242	

表 5-3 给出了系统支路相关信息:

表5-3 IEEE9节点系统支路信息表



节点1	电压等级	节点 2	电压等级	电阻	电抗	电纳
	(kV)		(kV)	(p.u.)	(p.u.)	(p.u.)
BUS-1	230.0	BUS-A	230.0	0.01	0.085	0.044
BUS-1	230.0	BUS-B	230.0	0.017	0.092	0.0395
BUS-2	230.0	BUS-A	230.0	0.032	0.161	0.0765
BUS-2	230.0	BUS-C	230.0	0.0085	0.072	0.03725
BUS-3	230.0	BUS-B	230.0	0.039	0.17	0.0895
BUS-3	230.0	BUS-C	230.0	0.0119	0.1008	0.05225

为验证仿真结果的正确性,在母线 BUS-3 处设置一三相接地短路故障,接地电阻为 10e-6 欧姆,故障在 1.0s 发生, 1.2s 故障清除,持续时间为 0.2s。以下分别给出了全电磁暂态仿真、传统接口仿真以及 SFA 接口多速率仿真的结果。

其中接口母线三相电压瞬时值、线电压幅值、三相电流瞬时值以及线电流幅值分别如图 5-5、5-6、5-7、5-8 所示。



第 64 页 共 83 页



第65页共83页



链式 STATCOM 交流侧母线三相电压瞬时值、线电压幅值、三相电流瞬时值以及线电 流幅值分别如图 5-9、5-10、5-11、5-12 所示。








由以上全系统电磁暂态仿真,传统接口的混合仿真以及基于频移分析建模接口的混合仿 真所得电压电流波形图可知,三者仿真结果大体一致,在细节上有一定出入,在理论上,全 系统电磁暂态仿真准确度最高,其结果可作为参考值。当系统处于稳态时,三者几乎无差异,



电力电子化电力系统多速率仿真中的关键接口技术研究

故障发生后,基于频移分析建模接口的混合仿真可以更好反应其动态特性,混合仿真不能完 全描述其整个电磁暂态过程,但是在一定程度上反映了相关电气量变化趋势,并且通过观察 仿真结果可以看出,对比于传统接口的混合仿真而言,基于频移分析建模接口的混合仿真动 态性能更好,其仿真波形更接近于全系统电磁暂态仿真波形。

5.3 南方电网交流网络算例

本算例采用南方电网交流网络与 STATCOM 联接验证多速率混合仿真的结果,其中在 电磁暂态仿真程序 PSCAD 中设置仿真步长为 50µs,机电暂态仿真程序中设置仿真步长为 10ms,将广西崇左市桃城变电站 220kV 母线设定为多速率混合仿真的接口母线,电磁侧为 链式 STATCOM 动态无功补偿模型及联接电抗器,机电侧为南方电网交流网络,下图即为 仿真算例拓扑结构图。



图 5-14 南方电网交流网络混合仿真拓扑结构图

其中机电暂态仿真子系统中发电机、负荷以及传输线数量等网络模型参数由表 5-4 给出:

表5-4	南方电网交流网络混合仿真机电子系统网络参数

	系统元件	节点	发电机	负荷	传输线		
_	数量	412	99	216	537		

电磁暂态仿真子系统模型与上一算例一致。

为验证仿真结果的正确性,在广西靖西县武平变电站 500kV 母线处设置一三相接地短路故障,接地电阻为 10e-6 欧姆,故障在 1.0s 发生, 1.2s 故障清除,持续时间为 0.2s。以下分别给出了全电磁暂态仿真、传统接口混合仿真以及 SFA 接口多速率仿真的结果。

其中接口母线三相电压瞬时值、线电压幅值、三相电流瞬时值以及线电流幅值分别如图 5-15、5-16、5-17、5-18 所示。



第70页共83页





链式 STATCOM 交流侧母线三相电压瞬时值、线电压幅值、三相电流瞬时值以及线电流幅值分别如图 5-19、5-20、5-21、5-22 所示。



图 5-20 STATCOM 交流侧线电压幅值

第72页共83页



链式 STATCOM 直流侧三相电容电压瞬时值如图 5-23 所示。



由以上仿真结果波形图可知,当系统处于稳态时,三者几乎无差异。故障发生后,全电 磁暂态仿真完全描述了其整个电磁暂态过程,而混合仿真在整体趋势上与其一致,但是对于 电流电压中的高频成分不能很好表达。其中基于频移分析建模接口的混合仿真动态特性较传 统接口混合仿真更好。



第六章 结论

6.1 本文结论

随着国民经济的飞速发展,为适应资源分布与用电结构的特点,并且伴随相关技术的 进步与突破,现代电力系统的结构也发生了相应的改变。为了满足大规模电能的远距离传 输,保证系统运行的稳定性,提高其经济型,交直流混合输电模式、柔性交流输电系统以 及各类高频开关的电力电子设备大量投入于现代电网。

在对电力电子化电力系统进行分析时,传统仿真方法难以适应,而多速率混合仿真可 以同时兼顾仿真精度、速度以及仿真规模的要求,为现代电力系统的研究提供了新的思路。 针对当下电力电子化电力系统的发展趋势,本文就柔性交流输电设备链式 STATCOM 接入 电网后的多速率混合仿真展开相应研究,具体工作和结论归纳如下:

(1) 对链式 STATCOM 工作原理及几种典型拓扑结构进行研究,在两相旋转坐标系中 建立其数学模型,根据瞬时功率检测的基础上讨论了其相关解耦控制方法,在系统级、装 置级、器件级三个层次框架下制定控制策略,有效实现直流侧电容电压稳定控制,并完成 指定无功功率输出,系统恒定功率因素,母线恒定交流电压控制等功能。研究了在系统故 障状态下,STATCOM 无功补偿对系统的影响,当系统出现故障时,采用相应补偿方案, 可以不同程度提高故障时负荷中心母线电压,提升故障穿越能力。

(2) 对电力系统的数字仿真方法进行研究,分别对机电暂态仿真、电磁暂态仿真以及 多速率混合仿真原理的原理进行介绍,讨论了多速率混合仿真网络等值电路和接口方式。 并以此为依据采用商业软件 PSCAD 和基于 C++语言编程的机电暂态仿真程序为试验平台, 通过相关算例比较了全系统电磁暂态仿真和混合仿真结果,两者仿真结果大体一致,在细 节上有所不同,当系统处于稳态时,其结果几乎无差别,故障发生后,混合仿真随不能完 全描述其整个电磁暂态过程,特别是其中的高频成分,但是能够正确反应电压,电流等电 气量的变化过程,验证了混合仿真理论的正确性。

(3) 基于频移分析对 PI 型等值输电线路进行建模,进行接口模型设计,通过相关算例 比较了对比了传统接口的混合仿真和基于频移分析建模接口的混合仿真结果,相关结果表 明本文提出的接口方法可以更好反应扰动后系统电压、电流等电气量的动态特性,其仿真 波形更接近于全系统电磁暂态仿真波形,验证了基于频移分析建模接口的有效性。

6.2 工作展望

随着相关技术的发展进步,越来越多的电力电子器件接入电网,电网结构也在发生相应的变化,电力电子化电力系统成为现代电网的一个发展趋势,而多速率混合仿真对于其仿真有巨大的优势。当前,关于电磁暂态与机电暂态多速率混合仿真的相关研究在各个方面都有很大进展,其中接口相关技术是关键性问题。目前,很多研究都基于这一点展开,本文仅涉及该课题的部分内容,文中讨论的基于频移分析进行接口建模取得了一定的成果。与此同时,尚存在下列问题值得进一步深入探究:

(1)本文主要讨论了链式 STATCOM 在平衡工况下的控制策略,当系统出现不对称故 障时,采用现有补偿控制策略,虽然负荷中心电压水平整体有所提高,但系统仍处于不对 称状态,线电压有效值发生两倍频波动,而电力系统运行过程中,常常会出现三相负荷不

第 75 页 共 83 页





平衡,常见故障形式也多为不平衡故障,本文并未对其不平衡工况下的运行特性作过多讨论,而忽略其负序分量会导致电压不平衡以及过流等问题,下一步,可以在其负序数学模型的基础上设计相应控制策略,优化其控制效果。

(2)本文所讨论的频移分析理论,其假定条件时电力系统中电压,电流为带通信号,因此其仅适用于模拟 50Hz 基频主导的系统元件,由于相应限制,该接口模型仍基于基频进行计算,对于高次谐波分量考虑不足,应用范围受限。考虑系统中电力电子器件带来的高次谐波,应该采用更好的方法描述其相关特性。

(3)本文所讨论多速率混合仿真,子系统间采用单端口接口联接,而实际电力系统中, 接线方式多样化,对于研究目标,进行混合仿真的网络划分时,两个子系统间可能通过多 端口接口相互联接,本文所采用接口方式未考虑到端口间相互耦合关系,在接下来的工作 中可以进一步研究。

(4) 本文在混合仿真算例中,故障位置选择在机电侧子系统,并针对其结果进行分析, 下一步可以继续研究电磁侧子系统中发生扰动后的仿真结果,并与本文研究进行比较,进 行理论分析。



参考文献

- [1] 刘笙.电气工程基础(第二版)[M].科学出版社,2005. 刘笙.电气工程基础(第二版)[M]. 科学出版社,2005.
- [2] 田广青.电力电子技术发展概况[J].电子质量,1995(01):19-21.
- [3] 王兆安,刘进军.电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [4] 徐政. 《交直流电力系统动态行为分析》[J]. 高电压技术, 2004(6):3-3.
- [5] Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. IEEE, 2000
- [6] 万鑫.电力电子技术在电力系统中的应用及发展[J].电子世界,2012(03):69-71.
- [7] 沈斐,姜齐荣,王兆平.中国柔性交流输电技术(FACTS)研究概况[J].四川电力技术,2005(S1):4-6+10.
- [8] 赵畹君.高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [9] Han Yingduo, Chen Jianye, Jiang Qirong and Wong Manchung, "Study of FACTS and DFACTS in China," Proceedings IPEMC 2000. Third International Power Electronics and Motion Control Conference (IEEE Cat. No.00EX435), Beijing, China, 2000, pp. 39-45 vol.1.
- [10] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程 学报, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [11] 姜建国, 乔树通, 郜登科. 电力电子装置在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2014, 3(23): 2-6.
- [12] 黄家裕等合. 电力系统数字仿真[M]. 水利电力出版社, 1995.
- [13] 夏道止. 电力系统分析(下册)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [14] 周孝信, 田芳, 李亚楼. 电力系统并行计算与数字仿真[M]. 清华大学出版社, 2014.
- [15] Semlyen A, De Leon F. Computation of electromagnetic transients using dual or multiple time steps[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(3): 1274-1281.
- [16] Kasztenny B, Kezunovic M. A method for linking different modeling techniques for accurate and efficient simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(1): 65-72.
- [17] M. L. Crow and J. G. Chen, "The multirate method for simulation of power system dynamics," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, no. 3, pp. 1684-1690, Aug. 1994.
- [18] Kulicke B. NETOMAC digital programfor simulating electromechanical and electromagnetic transient phenomena in AC systems [R]. Germany: Siemens Co., Ltd., 1979.
- [19] 柳勇军,闵勇,梁旭.电力系统数字混合仿真技术综述[J].电网技术,2006(13):38-43.
- [20] B. M. Buchholz, X. Lei and D. W. Retzmann, "Advanced solutions for power system analysis-computer study and real-time simulation," PowerCon 2000. 2000 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.00EX409), Perth, WA, Australia, 2000, pp. 613-618 vol.2
- [21] H. W. Dommel. 电力系统电磁暂态计算理论[M].李永庄,林集明,曾昭华,译. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [22] Lei X , Buchholz B , Povh D , et al. Power system analysis-software approach and real-time simulation[C]// Power Engineering Society Winter Meeting. IEEE, 2002.



- [23] 马大强. 电力系统机电暂态过程[M]. 水利电力出版社, 1988.
- [24] 王锡凡,方万良.现代电力系统分析[M].北京:科学出版社,2003.
- [25] 李光琦. 电力系统暂态分析.第3版[M]. 中国电力出版社, 2007.
- [26] Sanders S R, Noworolski J M, Liu X Z, et al. Generalized averaging method for power conversion circuits[J]. Power Electronics IEEE Transactions on, 1991, 6(2):251-259.
- [27] Venkatasubramanian, Vaithianathan 'Mani. (1994). Tools for dynamic analysis of the general large power system using time-varying phasors. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 16. 365-376. 10.1016/0142-0615(94)90023-X.
- [28] 黄胜利,周孝信.分布参数输电线路的时变动态相量模型及其仿真[J].中国电机工程学报, 2002, 22(11):1-5.
- [29] Stankovic A M, Sanders S, Aydin T. Dynamic Phasors in Modeling and Analysis of Unbalanced Polyphase Ac Machines[J]. IEEE Power Engineering Review, 2007, 22(2):58-58.
- [30] 刘皓明, 戚庆茹, 李扬,等. 中点钳位式三电平 STATCOM 的动态相量建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(8):18-22.
- [31] S. L. Hahn, Hilbert Transforms in Signal Processing. Norwood, MA: Artech House, 1996.
- [32] A. V. Oppenheim and A. S. Willsky, Signal and Systems. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1996.
- [33] S. Henschel, "Analysis of electromagnetic and electromechanical power system transients with dynamic phasors", Ph.D. dissertation, Univ. British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 1999.
- [34] P. Zhang, J. R. Marti, and H. W. Dommel, "Synchronous machine modelling based on shifted frequency analysis," IEEE Trans. Power Syst., vol. 22, no. 3, pp. 1139–1147, Aug. 2007.
- [35] P. Zhang, J. R. Marti, and H. W. Dommel, "Induction machine modelling based on shifted frequency analysis," IEEE Trans. Power Syst., vol. 24, no. 1, pp. 157–164, Feb. 2009.
- [36] Palensky P, van der Meer A, Lopez C, et al. Applied cosimulation of intelligent power systems: Implementing hybrid simulators for complex power systems[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2017, 11(2): 6-21.
- [37] M. D. Heffernan, K. S. Turner, J. Arrillaga and C. P. Arnold, "Computation of A.C.-D.C. System Disturbances - Part I. Interactive Coordination of Generator and Convertor Transient Models," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 11, pp. 4341-4348, Nov. 1981.
- [38] K. S. Turner, M. D. Heffernan, C. P. Arnold and J. Arrillaga, "Computation of A.C.-D.C. System Disturbances. PT. II - Derivation of Power Frequency Variables from Convertor Transient Response," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 11, pp. 4349-4355, Nov. 1981.
- [39] K. S. Turner, M. D. Heffernan, C. P. Arnold and J. Arrillaga, "Computation of A.C.-D.C. System Disturbances. PT. III-Transient Stability Assessment," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 11, pp. 4356-4363, Nov. 1981.
- [40] J. Reeve and R. Adapa, "A new approach to dynamic analysis of AC networks incorporating 4detailed modeling of DC systems. I. Principles and implementation," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, no. 4, pp. 2005-2011, Oct. 1988.
- [41] R. Adapa and J. Reeve, "A new approach to dynamic analysis of AC networks incorporating detailed modeling of DC systems. II. Application to interaction of DC and weak AC



systems," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 3, no. 4, pp. 2012-2019, Oct. 1988.

- [42] van der Meer A A, Hendriks R L, Ferreira M G J A, et al. Combined simulation method for improved performance in grid integration studies including multi-terminal VSC-HVDC[C]//Renewable Power Generation (RPG 2011), IET Conference on. IET, 2011: 1-6.
- [43] van der Meer A A, Gibescu M, van der Meijden M A M M, et al. Advanced hybrid transient stability and EMT simulation for VSC-HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1057-1066.
- [44] Fang T, Chengyan Y, Zhongxi W, et al. Realization of electromechanical transient and electromagnetic transient real time hybrid simulation in power system[C]//2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific. IEEE, 2005: 1-6.
- [45] Xu L, Tang Y H, Pu W, et al. Hybrid electromechanical-electromagnetic simulation to SVC controller based on ADPSS platform[J]. Journal of Energy in Southern Africa, 2014, 25(4): 112-122.
- [46] Wang X, Wilson P, Woodford D. Interfacing transient stability program to EMTDC program[C]// International Conference on Power System Technology. 2002.
- [47] Plumier F, Geuzaine C, Van Cutsem T. A multirate approach to combine electromagnetic transients and fundamental-frequency simulations[C]//Proc. 10th International Conference on Power System Transients. 2013.
- [48] Huang S, Chen Y, Shen C, et al. A novel hybrid dynamic simulation algorithm based on iterative coordination[C]//IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe. IEEE, 2014: 1-5.
- [49] 岳程燕,田芳,周孝信,吴中习,李若梅.电力系统电磁暂态-机电暂态混合仿真的应用[J].电 网技术,2006(11):1-5.
- [50] 岳程燕,田芳,周孝信,吴中习,李若梅.电力系统电磁暂态-机电暂态混合仿真接口实现[J]. 电网技术,2006(04):6-10.
- [51] 岳程燕,田芳,周孝信,吴中习,李若梅.电力系统电磁暂态-机电暂态混合仿真接口原理[J]. 电网技术,2006(01):23-27+88.
- [52] G. W. J. Anderson, N. R. Watson, N. P. Arnold and J. Arrillaga, "A new hybrid algorithm for analysis of HVDC and FACTS systems," Proceedings 1995 International Conference on Energy Management and Power Delivery EMPD '95, Singapore, 1995, pp. 462-467 vol.2.
- [53] Morched A S, Ottevangers J H, Marti L. Multi port frequency dependent network equivalents for the EMTP[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 2005-2018.
- [54] Anderson G W J. Hybrid simulation of AC-DC power systems[D]. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury, 1995.
- [55] 岳程燕.电力系统电磁暂态和机电暂态混合实时仿真的研究[博士学位论文].北京:中国 电力科学研究院,2004.
- [56] Zavahir J M, Arrillaga J, Watson N R.Hybrid electromagnetic transient simulation with the state variable representation of HVDC converter plant [J].IEEE Transactions on Power Delivery, 1993,8(3):1591-1598.
- [57] D. Shu, X. Xie, Z. Yan, V. Dinavahi and K. Strunz, "A Multi-domain Co-simulation Method for Comprehensive Shifted-Frequency Phasor DC-Grid Models and EMT AC-Grid Models," in IEEE Transactions on Power Electronics.
- [58] D. Shu, X. Xie, V. Dinavahi, C. Zhang, X. Ye and Q. Jiang, "Dynamic Phasor Based Interface



Model for EMT and Transient Stability Hybrid Simulations," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, no. 4, pp. 3930-3939, July 2018.

- [59] Sultan M, Reeve J, Adapa R. Combined transient and dynamic analysis of HVDC and FACTS system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 1271-1277.
- [60] Chan K K W, Snider L A, Dai R C et al. Transient stability simulation with embedded electromagnetic transient SVC model[C]. 14th Power Systems Computation Conference Sevilla, 2002.
- [61] Su H T, Snider L A, Chan KW et al. A new approach for integration of two distinct types of numerical simulator[C]. Proceedings of International Conference on Power System Transmission, New Orleans, USA, 2003.
- [62] Su H T, Chan K W, Snider L A. Parallel interaction protocol for electromagnetic and electromechanical hybrid simulation[J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 2005, 152(3):406-414.
- [63] Chan K K W, Snider L A. Electromagnetic electromechanical hybrid real-time digital simulator for the study and control of large power systems[C]// International Conference on Power System Technology. 2000.
- [64] Chen J, Crow M. A variable partitioning strategy for the multirate method in power systems[J]. 2008.
- [65] Moreira F A, Mart J R, Zanetta Jr L C, et al. Multirate simulations with simultaneous-solution using direct integration methods in a partitioned network environment[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2006, 53(12): 2765-2778.
- [66] 戴晓亮.无功补偿技术在配电网中的应用[J].电网技术,1999(06):11-14.
- [67] 林海雪.电能质量指标的完善化及其展望[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5073-5079.
- [68] 胡铭,陈珩.电能质量及其分析方法综述[J].电网技术,2000(02):36-38.
- [69] 徐殿国,张书鑫,李彬彬.电力系统柔性一次设备及其关键技术:应用与展望[J].电力系统自动化,2018,42(07):2-22.
- [70] 罗承廉, 纪勇, 刘遵义. 静止同步补偿器 (Statcom) 的原理与实现[M]. 中国电力出版社, 2005.
- [71] 粟时平. 静止无功功率补偿技术[M]. 中国电力出版社, 2006.
- [72] Fang Zheng Peng, Jih-Sheng Lai, J. W. McKeever and J. VanCoevering, "A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static VAr generation," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 5, pp. 1130-1138, Sept.-Oct. 1996.
- [73] L. Maharjan, S. Inoue and H. Akagi, "A Transformerless Energy Storage System Based on a Cascade Multilevel PWM Converter With Star Configuration," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, no. 5, pp. 1621-1630, Sept.-Oct. 2008.
- [74] H. Akagi, S. Inoue and T. Yoshii, "Control and Performance of a Transformerless Cascade PWM STATCOM With Star Configuration," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, no. 4, pp. 1041-1049, July-aug. 2007.
- [75] 宋珊,陈建业.基于晶闸管的 STATCOM 原理和实现[J].电力系统自动化,2006(18):49-54.
- [76] 杨程,李旷,张海涛,何师,侯小平.±200MVA 链式静止补偿器 STATCOM 的主电路联接型 式分析[J].电气技术,2011(12):46-49.
- [77] 王兆安、杨君、刘进军、王跃著. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 机械工业出版社. 2006.1.
- [78] 荣飞,罗安,盘宏斌,欧剑波.改进 dq 变换法及在 STATCOM 中应用[J].电力自动化设备,2008(09):36-39. [39]



- [79] 张金斗, 胡顺全, 李瑞来,等. 级联型±2MVar 静止同步补偿器的研制[C] 全国电能质量学术会议暨电能质量行业发展论坛. 2009.
- [80] 王德昌. 模块化有源无功补偿器的研究[D].西南交通大学,2004.
- [81] 魏文辉,宋强,滕乐天,王伟,刘文华,袁志昌.基于反故障控制的链式 STATCOM 动态控制策 略的研究[J].中国电机工程学报,2005(04):21-26.
- [82] 杜明军. 大容量链式 STATCOM 主电路及控制策略的研究[D].北京交通大学,2012.
- [83] 王立乔,齐飞.级联型多电平变流器新型载波相移 SPWM 研究[J].中国电机工程学报,2010,30(03):28-34.
- [84] 王立乔,胡长生,刘兆燊,张仲超.载波相移 SPWM 技术传输带宽的研究[J].电力系统自动 化,2004(09):49-52+91.
- [85] 杨有涛,彭国平,张普雷,郝硕.载波移相调制技术在级联 H 桥 STATCOM 中应用[J].电力电子技术,2016,50(06):4-8.
- [86] 黄振宇,倪以信,陈寿孙,张宝霖.UPFC 动态模型在电力系统动态分析中的实现[J].电力系统自动化,1999(06):26-30+53.
- [87] 陈礼义,顾强.电力系统数字仿真及其发展[J].电力系统自动化,1999(23):1-6.
- [88] H. W. Dommel, "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single-and Multiphase Networks," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, no. 4, pp. 388-399, April 1969.
- [89] 刘益青,陈超英.用以消除数值振荡的阻尼梯形法误差分析与修正[J].中国电机工程学报,2003(07):57-61.
- [90] F. L. Alvarado, R. H. Lasseter and J. J. Sanchez, "Testing Of Trapezoidal Integration With Damping For The Solution Of Power Transient Problems," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, no. 12, pp. 3783-3790, Dec. 1983.
- [91] 柳勇军. 电力系统机电暂态和电磁暂态混合仿真技术的研究[D].清华大学,2006.
- [92] S. R. Sanders, "On limit cycles and the describing function method in periodically switched circuits," IEEE Trans.Circuits Syst. I, vol. 40, no. 40, pp. 564–572, Sep. 1993.
- [93] S. R. Sanders, J.M. Noworolski, X. Z. Liu, and G. C. Verghese, "Generalized averaging method for power conversion circuits," IEEE Trans. Power Electron., vol. 6, no. 2, pp. 251–259, Apr. 1991.
- [94] P. Zhang, J. R. Marti, and H. Dommel, "Shifted-frequency analysis for EMTP simulation of power-system dynamics," IEEE Trans. Circuits Syst. I: Reg. Papers, vol. 57, no. 9, pp. 2564–2574, Sep. 2010.
- [95] 赵智大. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.





本科期间学术成果

[1] 欧阳自强,舒德兀,严正,胡经纬.基于时域坐标变换的大规模交流系统全电磁暂态仿真研 究[J].中国电机工程学报.(已录用)



谢辞

2013年9月,我进入交大学习,直到现在我即将完成自己的学位论文,时间跨度六年, 期间我一度陷入迷茫,为此我曾经选择去部队度过我青春中最好的两年时光,但同时我也 最终坚定了自己信念和理想,让我明白了自己将要去成为一个怎么样的人,希望在未来的 日子里,我可以不忘初心,不负时光,也不负自己。

感谢我的导师严正教授,他卓越的学术成就、严谨的治学态度,在专业领域的突出成 就都深深影响着我,让我受益匪浅,同时老师也是我努力和学习的目标,感谢严老师在我 完成毕业设计过程中给予我的帮助和教导。特别感谢舒德兀老师这段时间一直以来对我的 指导,从我开始确定毕业设计的选题和方向以来,舒老师对我悉心指导,为我指点迷津, 对于我遇到的困难,总是以探讨的方式为我答疑解惑,在科研工作上倾注了大量心血,并 且全方位培养我的学习研究能力,这段时间以来,我从舒老师身上学习到了许多,收获颇 丰,在此,向舒老师表示我衷心的感谢。

最后,感谢我的父母,你们虽已到年近七十的年龄,但是,在我求学的道路上却一直 给予我最大的支持和鼓励,让我可以安心地在大学校园里顺利完成自己的学业,这么多年 来,我的冲动和叛逆,你们都一直默默包容,感谢这二十多年以来你们给我的最无私的爱。

另外也期望我自己能够有信心和能力继续我接下来的学习生涯,希望这次毕业设计的 经历可以开启我对知识的求索。



RESEARCH ON KEY INTERFACE TECHNOLOGY IN MULTI-RATE SIMULATION OF POWER ELECTRONICS DOMINATED POWER SYSTEM

Key words: electromagnetic transient, transient stability, multi-rate simulation, interface model, power electronics, STATCOM

With the continuous development and application of power electronics technology, there are a large number of power electronic equipment access in modern power systems, including but not limited to power generation systems, transmission systems, power distribution systems, and energy storage systems. In the transmission system, High Voltage Direct Current (HVDC) uses the power electronic technology to convert the alternating current and direct current. Its working process is easy to control and adjust. HVDC has large transmission capacity, high efficiency, and good economics. Meanwhile it can improve system stability. Flexible Alternative Current Transmission Systems (FACTS) can flexibly control the power system, improve power system stability and improve power quality. Due to the characteristics and outstanding performance of power electronics technology, it is foreseeable that the power electronic power system will become a future development trend. With the continuous access of power electronic equipment, the structure and operation mode of modern power systems have undergone a series of changes. It also brought some new problems.

The power system is a large-scale, complex structure with varying components and characteristics. In the course of operation, its dynamic process is complex. The time scale span involved is large. The dynamic response time of electrical quantities such as voltage and frequency ranges from a few microseconds to several hours. As shown in Figure 1, power system dynamics can be divided into three categories according to their time scales: electromagnetic transient processes, electromechanical transient processes, and medium- and long-term transient processes.



Fig.1 Power system dynamic time scale



上海交通大学 SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

The electromagnetic transient process of the power system mainly considers the changing process of the electric field, magnetic field and current voltage of the components in the network. The transient process is fast and the duration is short. In the analysis process, the coupling relationship between the magnetic field and the electric field needs to be considered. The distribution parameters and wave process need to be considered. The electromechanical transient process of power system mainly considers the change process of rotor mechanical motion caused by the change of electromagnetic torque of the motor. The transient change process is slower than the electromagnetic transient and lasts longer. The frequency changes little; the long-term dynamic process of the power system mainly considers the changes of active power and reactive power in the long-term scale after the large-scale power system is disturbed. The change process is slow, and it needs to be considered in the analysis. Dynamic characteristics of power generation systems, control systems, and protection systems to analyze long-term control and planning issues in power systems.

In the process of analyzing, it is difficult to fully describe the dynamic of all scales. Therefore, in the simulation process, the dynamic process is usually described in detail according to the research problem of interest, while other processes are simplified by the approximate model, and the appropriate simulation method is selected.

Aiming at the development trend of modern power systems, a large number of non-linear switching devices represented by power electronic devices have brought unprecedented challenges to simulation. Traditional electromechanical transient simulation and electromagnetic transient simulation have their own limitations, which cannot meet the objective requirements of power electronic power system simulation accuracy and simulation efficiency. In contrast, multi-rate hybrid simulation compensates for the shortcomings of the two. The basic principle is to partition the whole system based on the simulation time step and the time constant of the dynamic components, and the large-scale AC network is large. The electromechanical transient simulation under the step size uses a small-step electromagnetic transient simulation for the detailed research part (such as high-frequency power electronic device). The two communicate through the establishment of the interface, so that the simulation accuracy and speed can be considered at the same time. Simulation scale requirements.

This paper discusses the multi-rate hybrid simulation of the flexible AC transmission equipment chain STATCOM after it is connected to the grid. The STATCOM phases are composed of a series of inverter bridges. The DC side of the inverter bridge has independent capacitors, which are connected in parallel with the grid through the reactor. Inductive or capacitive reactive power is output to the grid to achieve dynamic compensation of the system.

In the current multi-rate hybrid simulation research, interface technology is the key point. This paper discusses the basic theory of shifted frequency analysis, and on this basis, builds a model of PI-type equivalent circuits as simulation interface. Shifted frequency analysis (SFA) provides a good idea for hybrid simulation of power systems. Shifted frequency analysis provides electrical phasors and accurately tracks state changes in the power system. The shifted frequency analysis model is based on the Hilbert Transform. By signal processing, the fundamental frequency sinusoidal band-on signal in the power system is converted into an analytic signal (AS) containing only a positive spectrum. After the spectrum of the analytic signal is shifted to the left by a fundamental frequency, the analytical envelope signal of the original real signal is obtained, that is, the shifted frequency phasor.



The time domain transient signal s(t) in the power system is processed to obtain the analytic signal $\mathfrak{F}(t)$:

$$\$(t) = s(t) + jH[s(t)] \tag{1}$$

The analytic signal contains all the information of the original time domain signal. And S(t) can be obtained by moving the analytic signal to the left by, which is the frequency shift phasor of the original signal. The physical interpretation of the shifted frequency analysis of the signal is shown in Fig.2. Based on the Hilbert transform, the time domain bandpass signal s(t) in the dynamic system can be converted into a corresponding analytic signal. The negative frequency component of the original signal is eliminated in the frequency domain, and only its positive frequency component is preserved. In the time domain, the analytical signal contains both real and imaginary components. According to the frequency shift property of the Fourier analysis, the frequency shift phasor S(t) can be obtained by frequency shifting of its analytical signal.



Fig.2 Physical interpretation of shifted frequency analysis

In order to verify the accuracy of the proposed multi-rate hybrid simulation interface based on frequency shift analysis for PI-type equivalent transmission lines, the IEEE9 node AC network and STATCOM interconnection system, China Southern Power Grid AC network and STATCOM interconnection system are used respectively as examples for the simulation. The whole system electromagnetic transient simulation, hybrid simulation of traditional interface and hybrid simulation based on shifted frequency analysis modeling interface are carried out. The simulation results of different methods are compared to verify the feasibility and effectiveness of hybrid simulation interface model proposed in this paper.

The whole simulation process is completed on a single computer, in which the electromagnetic subsystem is built in the commercial software PSCAD, the electromechanical side subsystem simulation is realized by C++ language programming, and the data is transmitted between the two subsystems through socket communication. The interface is programmed by



MATLAB, and the program is called by PSCAD during simulation. The hybrid simulation experiment platform is shown in Fig.3:



Fig.3 Hybrid simulation experiment platform

Based on the interface model proposed in this paper, the results of the IEEE9 node example and the AC network example of China Southern Power Grid are simulated respectively, and compared with the network-wide electromagnetic transient simulation and the traditional interface hybrid simulation results. The following conclusions can be obtained from the simulation results. The results of electromagnetic transient simulation and hybrid simulation are generally consistent, and the details are different. When the system is in steady state, the results are almost identical. After the fault occurs, the hybrid simulation cannot fully describe the whole electromagnetic transient process, especially Among them, the high-frequency components, but can correctly reflect the voltage, current and other electrical changes, verify the correctness of the hybrid simulation theory. The hybrid simulation results based on the frequency shift analysis modeling interface can better reflect the dynamic characteristics of the system voltage, current and other electrical quantities after the disturbance. The simulation waveform is closer to the whole system electromagnetic transient simulation waveform, which verifies the model based on frequency shift analysis. The validity of the interface. The shift frequency analysis phasor discussed in this paper assumes that the voltage and current in the power system are band-pass signals, so it is only suitable for simulating system components dominated by 50 Hz fundamental frequency. Due to the corresponding limitations, the interface model is still based on the fundamental frequency. Calculation, for the consideration of higher harmonic components, the application range is limited. Considering the higher harmonics brought by the power electronics in the system, a better method should be used to describe its related characteristics.