



国家电网公司
电力科技著作出版项目

模块化多电平换流器 直流输电建模技术

赵成勇 许建中 李探 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

模块化多电平换流器 直流输电建模技术

赵成勇 许建中 李探 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书围绕模块化多电平换流器直流输电(MMC-HVDC)的建模进行详细探讨,从各个层面、不同时间尺度建立 MMC-HVDC 的解析分析模型、电磁暂态模型及物理实验样机。本书包括概述、MMC 拓扑及基本控制策略、超大规模 MMC 电容电压平衡优化算法、考虑内部动态特性的 MMC 小信号模型、基于小信号模型的 MMC 谐波稳定性分析、基于受控源的 MMC 通用建模方法、基于戴维南等效的 MMC 整体建模方法、MMC 平均值模型在直流电网中的应用、RT-LAB 中 MMC-HVDC 仿真建模、MMC 纳秒级暂态建模、MMC-HVDC 物理模拟系统设计与实验的相关内容。

本书适合从事柔性直流输电工作的学者及工程师阅读。

图书在版编目(CIP)数据

模块化多电平换流器直流输电建模技术 / 赵成勇, 许建中, 李探著. —北京: 中国电力出版社, 2017.2

ISBN 978-7-5123-9609-8

I. ①模… II. ①赵… ②许… ③李… III. ①模块化—多电平逆变器—直流输电—建立模型—研究 IV. ①TM464

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 178538 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 刘 薇(liuwei@sgcc.com.cn)

责任校对: 王开云

装帧设计: 张俊霞 赵姗姗

责任印制: 邹树群

印 刷: 三河市万龙印装有限公司

版 次: 2017 年 3 月第一版

印 次: 2017 年 3 月北京第一次印刷

开 本: 710 毫米×980 毫米 16 开本

印 张: 14

字 数: 258 千字

印 数: 0001—1500 册

定 价: 70.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

前言

2001 年,德国联邦国防军大学的 R. Marquardt 和 A. Lesnicar 提出了模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)拓扑结构。MMC 较传统两电平、三电平电压源换流器拓扑结构具有更大的经济技术优势,如模块化设计、低谐波含量、低损耗等。因此,MMC 迅速得到了工程和学术界的广泛关注,并成为目前柔性直流输电系统的优选主流拓扑。

目前国内、外已有多个基于 MMC 的柔性直流输电工程建成投运。2010 年西门子公司投运了世界首个 MMC-HVDC 工程——美国跨湾工程,之后又建设了数个 MMC-HVDC 工程。ABB 公司基于其所提出的级联两电平拓扑结构(结合模块化技术和压接技术,其本质仍为 MMC)建成数个工程并投运。我国柔性直流输电技术发展也呈现蓬勃之势,且所有投运的工程均采用 MMC 拓扑结构,包括上海南汇、广东南澳、浙江舟山、福建厦门柔性直流输电工程等。此外,目前世界范围内在建的柔性直流输电工程也均采用 MMC 或类似拓扑。

基于 MMC 拓扑结构,柔性直流输电已由最初的低电压、小容量示范工程向高电压、大容量方向快速发展,广泛应用于大型风电场并网、交流电网异步联网、城市中心供电等多种场合,并展现出巨大的经济技术优势。随着智能电网与能源互联网的提出与发展,其必将成为未来输电领域的重要发展方向。

同时,MMC 的提出也为学术界和工程界带来一系列需要研究的问题,如其复杂的内部特性带来的更为复杂的控制系统和动态解析模型、高电平 MMC 为电磁暂态仿真带来的巨大挑战等。本书立足于 MMC-HVDC 的发展背景,针对 MMC 的动态数学模型和电磁暂态仿真模型等建模方面的主要问题,总结了本研究团队在柔性直流输电建模方面的主要研究成果,主要包括考虑内部动态特性的 MMC-HVDC 动态数学模型及其稳定性分析、不同时间尺度下的电磁暂态仿真建模、物理样机系统的搭建等内容。

本研究团队带头人赵成勇教授在 2014 年出版的著作《柔性直流输电建模和仿真技术》一书中,对柔性直流输电的控制策略、系统建模等方面的基本原理进行了介绍。本书在该著作的基础上,对理论和方法进一步拓展和深入,集合了本研究团队近两年在柔性直流输电建模方面的主要研究成果。

本书由赵成勇、许建中和李探共同撰写。其中,第 1 章由赵成勇完成,第 2、4、5 章由李探完成,第 6、7、8 章由许建中完成,第 2、3、10、11 章部分内容

参考了赵鹏豪、彭茂兰、何智鹏、徐延明的硕士论文和张宝顺的博士论文，全书由赵成勇统稿。另外，特别感谢参与本书部分章节材料校对、整理工作的博士研究生张宝顺、张帆、李承昱，硕士研究生彭茂兰、赵鹏豪、何智鹏、徐延明、姬煜珂、熊岩、徐莹、刘启建等人，他们的工作在很大程度上保证了本书的按时出版。

特别感谢加拿大工程院院士、IEEE Fellow、曼尼托巴大学的 Ani. Gole 教授对本团队课题研究的大力支持，同时感谢中国电力科学研究院印永华总工程师和全球能源互联网研究院的汤广福副院长对本书提出的宝贵意见。

本书的研究工作得到了国家“863”高技术研究发展计划项目（2013AA050105）和国家自然科学基金项目（51177042）的资助，在此表示感谢！

由于作者水平有限，书中难免存在错误和不当之处，敬请广大读者批评指正为盼。

编 者

2016 年 10 月

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 MMC-HVDC 的发展	1
1.2 MMC-HVDC 建模研究现状与主要问题解决思路	4
1.3 本书的主要内容	7
参考文献	8
第 2 章 MMC 拓扑及基本控制策略	12
2.1 MMC 拓扑	12
2.2 MMC 子模块拓扑和直流故障阻断能力评价指标	12
2.3 MMC 基本控制策略	22
2.4 调制与电容电压均衡控制策略	25
2.5 相间环流抑制策略	28
2.6 小结	31
参考文献	31
第 3 章 超大规模 MMC 电容电压平衡优化算法	34
3.1 基于质因子分解法的高效分组方法	34
3.2 希尔排序方法	42
3.3 基于质因子分组和希尔排序的高效均压算法	45
3.4 仿真实验验证	46
3.5 小结	48
参考文献	48
第 4 章 考虑内部动态特性的 MMC 小信号模型	50
4.1 MMC 的内部谐波特性	50
4.2 MMC 详细小信号建模	52
4.3 环流抑制策略的建模	58

4.4	外部控制系统建模及其与阀模型的接口实现	60
4.5	模型验证	64
4.6	小结	69
	参考文献	70
第 5 章	基于小信号模型的 MMC 谐波稳定性分析	72
5.1	MMC-HVDC 模态分析与内部谐波模态识别	72
5.2	MMC 内部谐波稳定性分析	75
5.3	小结	81
	参考文献	82
第 6 章	基于受控源的 MMC 通用建模方法	83
6.1	MMC 通用模型的提出	83
6.2	MMC 通用模型的理论证明	85
6.3	MMC 通用模型的验证	91
6.4	小结	96
	参考文献	97
第 7 章	基于戴维南等效的 MMC 整体建模方法	98
7.1	经典戴维南等效模型	98
7.2	基于后退欧拉法的戴维南等效整体模型	100
7.3	基于梯形积分法的戴维南等效整体模型	105
7.4	三种等效模型精度验证和加速比测试	107
7.5	基于后退欧拉法的全桥 MMC 戴维南等效整体模型	109
7.6	小结	112
	参考文献	113
第 8 章	MMC 平均值模型在直流电网中的应用	114
8.1	MMC 平均值模型	114
8.2	MMC 平均值模型适用性分析	116
8.3	MMC 平均值模型的改进	120
8.4	小结	125
	参考文献	125

第 9 章	RT-LAB 中 MMC-HVDC 仿真建模	126
9.1	RT-LAB 仿真平台	126
9.2	RT-LAB 仿真建模步骤	139
9.3	基于 OP5600 的 MMC-HVDC 仿真建模	141
9.4	基于 OP7000 的 MMC-HVDC 仿真建模	145
9.5	小结	148
	参考文献	149
第 10 章	MMC 纳秒级暂态建模	150
10.1	IGBT 暂态建模	151
10.2	二极管的暂态建模	157
10.3	IGBT 模块热学特性建模	159
10.4	IGBT 及二极管模型的实现	165
10.5	IGBT 模块仿真测试电路	168
10.6	小结	175
	参考文献	175
第 11 章	MMC-HVDC 物理模拟系统设计与实验	177
11.1	物理模拟系统主回路	177
11.2	控制系统架构	183
11.3	控制逻辑设计	193
11.4	子模块测试	199
11.5	系统实验	206
11.6	小结	209
	参考文献	209
索引		212

第 1 章 概 述

1.1 MMC-HVDC 的发展

传统电网换相高压直流输电 (line commutated converter based high voltage direct current, LCC-HVDC) 技术自 1954 年的瑞典本土—哥特兰岛直流输电工程首次投入商业化运行以来, 经过 60 多年的不断发展, 已成为现代电力电子技术在电力系统中最成功的应用之一^[1~15]。尽管 LCC-HVDC 技术在高电压、大容量、远距离直流输电领域发挥了巨大作用^[6~9], 但其自身也存在着诸如需要大量无功补偿、不利于构造多端直流系统和直流电网, 以及换流器依靠交流电网换相易发生换相失败等本质缺陷^[9~15]。

1990 年, 加拿大麦吉尔大学的 Boon-Teck Ooi 教授等人提出了基于电压源换流器的高压直流输电技术 (voltage source converter based HVDC, VSC-HVDC), 其主要特点是采用全控型电力电子器件构成的电压源换流器, 取代 LCC-HVDC 中基于半控型晶闸管器件的电流源换流器^[16~17]。相比于 LCC-HVDC, VSC-HVDC 具有可以实现有功功率和无功功率的完全独立快速解耦控制、可以向无源网络供电, 以及有利于构造并联多端直流输电系统等优点^[18~23]。然而, 由于单个全控绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 的耐压能力有限, 无法满足高电压、大容量的需求, 只有采用压接型 IGBT 模块才可以组成串联阀体, 同时, 在串联阀体中, 由于各个器件的开通关断特性不尽相同, 因此多个 IGBT 模块串联会带来静态、动态均压困难以及电磁干扰等问题^[18~19]。另外, 应用脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 策略时, 换流器开关器件的开关频率较高 (1kHz 以上), 从而导致换流器损耗较大, 降低换流器的运行效率, 且换流器输出电压谐波畸变率高, 需要安装大容量交流滤波器以满足 VSC-HVDC 的并网要求。以上均成为制约两电平、三电平 VSC-HVDC 技术发展的重要因素。

为解决上述两电平、三电平 VSC-HVDC 技术存在的缺陷, 2001 年德国联邦国防军大学的 R. Marquardt 和 A. Lesnicar 提出了模块化多电平换流器 (modular multilevel converter, MMC) 拓扑, 并研制了 2MW、17 电平的试验样机^[24]。由于其特殊的拓扑结构, MMC 较传统两电平、三电平换流器具有明显优势:

(1) MMC 采用子模块 (sub-module, SM) 串联的方式构造换流阀, 避免大量 IGBT 模块的直接串联, 可直接采用焊接型 IGBT 模块, 降低了对器件一致性的要求;

(2) MMC 可以在较低的开关频率 (100~300Hz) 下获得很高的等效开关频率, 运行中的损耗较两电平、三电平大幅下降;

(3) 多电平的 MMC 输出波形接近正弦, 无需装设交流滤波器^[25~30];

(4) 由于其模块化的设计, MMC 更便于扩容及实现冗余配置等。

由于以上技术优势, MMC 一经提出就引起广泛关注, 成为近年来学术界和工程界的研究热点^[31~34]。目前, 在建和规划中的柔性直流输电工程大多采用 MMC 或相似拓扑结构 (如 ABB 公司提出的结合压接技术与模块化设计的级联两电平拓扑), 其已成为柔性直流输电的主流拓扑结构^[35]。

目前, 我国已投运和建设中的柔性直流输电工程都采用 MMC 拓扑。2011 年, 上海南汇风电场柔性直流输电工程建成并投运, 直流电压为 $\pm 30\text{kV}$, 额定功率为 18MW, 其用于实现南汇风电场并网, 并形成交流输电线路和柔性直流输电线路并列运行方式, 该工程也是亚洲首个柔性直流输电工程^[36]。2013 年 12 月, 广东汕头南澳多端柔性直流输电示范工程建成投运, 直流电压为 $\pm 160\text{kV}$, 额定功率为 200MW, 该工程同样用于大型风电场接入交流电网, 是世界上首个多端柔性直流输电工程^[37]。2014 年 6 月, 浙江舟山多端柔性直流输电工程建成并投运, 该工程用于实现多个海岛之间的互联, 也是世界上端数最多的多端柔性直流输电工程^[38]。2015 年 12 月, 福建厦门柔性直流输电工程建成投运, 额定电压为 $\pm 320\text{kV}$, 额定功率为 1000MW, 工程首次提出采用真双极的接线方式, 其用于实现厦门城市中心供电, 是我国首个 1000MW 级的柔性直流输电工程^[39]。另外, 我国有多个柔性直流输电工程在建或规划中。如即将投运的云南电网与南方主网鲁西背靠背直流异步联网工程, 其首次采用大容量 MMC-HVDC 与 LCC-HVDC 组成混合双馈入直流形式, 其中 MMC 单元容量达 1000MW, 直流电压达 $\pm 350\text{kV}$; 国家电网公司规划的渝鄂柔性直流背靠背联网工程, 直流电压等级达到 $\pm 420\text{kV}$, 输送容量达 $4 \times 1250\text{MW}$ (单个 MMC 阀的容量达 1250MW)。值得一提的是, 国家电网公司正在规划的四端张北直流电网工程, 其电压等级将达到 $\pm 500\text{kV}$, 单端容量达 3000MW, 建成后该工程也将成为世界上首个直流电网工程。

同时, 国外也有多项 MMC 柔性直流输电工程投运或在建。2011 年, 西门子公司投运了世界上首项 MMC-HVDC 工程——美国跨湾工程 (Trans Bay 工程), 标志着 MMC 从理论研究正式步入工程实际。之后西门子公司建设了数项 MMC-HVDC 工程, 如 2014 年投运的法国—西班牙联网工程 (INELFE 工程), 其传输容量达到 $2 \times 1000\text{MW}$ (双极直流系统), 直流电压达到 $\pm 320\text{kV}$ ^[40]。ABB 公

司将其压接技术和换流器的模块化设计结合，设计了级联两电平换流器 CTLC (cascaded two-level converter)，其本质仍为 MMC 拓扑，但其结合了压接技术，从而使单个子模块的电压等级成倍提高，基于 CTLC，ABB 公司建设并投运了多项柔性直流输电工程，如德国的 DolWin1 离岸风电场并网工程等。

目前世界范围内投运及在建的 MMC-HVDC 工程如表 1-1 所示^[35, 40~43]。纵观国内外柔性直流输电工程的发展，可见 MMC 的应用为柔性直流输电领域带来了革命性的改变，已成为目前主流的新一代柔性直流输电拓扑结构，并从低电压、小容量示范工程逐渐向高电压、大容量方向快速发展，其在风电场并网、异步联网、城市中心供电、改善传统直流运行特性等应用场合都展现出巨大的经济技术优势。随着我国“能源互联网”概念的提出和发展，基于 MMC 的柔性直流输电代表了未来直流输电领域的重要发展方向。

表 1-1 部分在建和已投运的采用 MMC 或类似拓扑的 HVDC 工程

(拟)投运时间	工 程	容量 (MW)	直流电压 (kV)	拓扑结构	建设主要目的
	ULTRANEN (西门子)	2000	±380	MMC	电网互联
	张北直流电网工程	3000	±500	MMC	电网互联、风电场并网
2021 年	North Sea Link	1400	±525	CTLC	电网互联
2020 年	NordLink	1400	±525	CTLC	电网互联
2019 年	(FK CGS) HVDC	410	±140	CTLC	电网互联
2019 年	BorWin3 (西门子)	900	±320	MMC	离岸风电并网
2018 年	Caithness Moray HVDC Link	1200	±320	CTLC	电网互联
2017 年	Maritime Link	500	±200	CTLC	电网互联
2016 年	DolWin2 (ABB)	916	±320	CTLC	离岸风电并网
2016 年	渝鄂柔性直流背靠背联网工程	2500	±420	MMC	电网互联
2016 年	鲁西背靠背异步联网工程	1000	±350	MMC	电网互联
2015 年	SylWin1 (西门子)	864	±320	MMC	离岸风电并网
2015 年	NordBalt	700	±300	CTLC	电网互联
2015 年	DolWin2 (西门子)	800	±300	MMC	离岸风电并网
2015 年	BorWin1 (ABB)	400	±150	CTLC	离岸风电并网
2015 年	DorWin1 (ABB)	800	±320	CTLC	离岸风电并网
2015 年	厦门柔性直流输电科技示范工程 (国家电网公司)	1000	±320	MMC	城市中心供电
2014 年	HelWin2 (西门子)	690	±320	MMC	离岸风电并网
2014 年	Sylwin1 (西门子)	576	±250	MMC	离岸风电并网

续表

(拟) 投运时间	工 程	容量 (MW)	直流电压 (kV)	拓扑 结构	建设主要目的
2014 年	Sylwin1 (西门子)	864	± 320	MMC	离岸风电并网
2014 年	Skagerrak HVDC Interconnections Pole 4 (ABB)	700	500	MMC	电网互联
2014 年	舟山多端柔性直流输电重大科技示 范工程 (国家电网公司)	1000	± 200	MMC	岛屿电网互联
2014 年	INELFE (西门子)	2×1000	± 320	MMC	电网互联, 黑启动
2013 年	南澳多端柔性直流输电示范工程 (南方电网公司)	200	± 160	MMC	海上风电并网
2011 年	上海南汇柔性直流输电示范工程 (国家电网公司)	18	± 30	MMC	风电场并网
2010 年	美国跨湾工程 (西门子)	400	± 200	MMC	城市中心供电

虽然 MMC 拓扑较传统两电平、三电平 VSC-HVDC 具有较大的技术优势,但由于其特殊的拓扑结构,在控制器设计时需解决子模块电容电压的均衡问题和阀内相间环流等问题^[44~45],其控制策略更为复杂。自 MMC 拓扑提出后十余年来,不少学者对其所涉及的控制策略、稳态分析与参数设计、故障特性与保护策略、损耗计算等经典问题展开了研究,并逐渐形成较为完善的系统设计方案。其中,MMC 的建模是非常重要的研究方向,从多个维度来看,其既包括稳定性分析与参数设计时需进行的解析分析数学模型;又包括用于仿真分析时的电磁暂态模型和机电暂态模型;同时也包括样机研制的物理模拟系统。这些建模问题对于 MMC-HVDC 系统的设计和仿真分析都具有重大的研究价值,也是本书所要探讨的主要内容。

1.2 MMC-HVDC 建模研究现状与主要问题解决思路

1.2.1 MMC-HVDC 建模的研究现状

MMC-HVDC 的建模包括解析分析数学模型、(电磁暂态和机电暂态)仿真模型、物理实验平台等诸多方面。国内外学者对其展开了较为详细的研究,并取得了一系列研究成果。但纵观国内、外研究现状,该领域的研究仍存在一些问题。下面主要从解析分析数学模型和电磁暂态仿真模型两个方面,介绍其研究的必要性及现有研究所存在的不足。

1.2.1.1 解析分析数学模型

从系统运行设计角度来看,需对 MMC 进行稳态分析与稳定性分析,以确保设备参数与控制参数选型的合理性。完全通过电磁暂态仿真进行此项工作,对于不同工程该设计方法不具备通用性,效率较低,而且无法从理论上验证并保证结果的正确性。因此,建立 MMC 的解析分析模型是非常重要的。对于 MMC 的稳态分析建模,不少文献及著作已展开了详细探讨,如参考文献[46]重点分析了换流器内部谐波特性,包括子模块电容电压波动、二倍频环流等,从而指导换流器主设备参数的选择。系统的稳定性分析,包括暂态稳定性和静态稳定性两个方面。暂态稳定性一般依赖于系统仿真,其解析分析模型较为复杂,本书不做探讨;而静态稳定性即小信号稳定性,是目前设计控制参数、研究系统阻尼的常用方法,也将作为本书解析分析模型方面的主要内容。目前对于 MMC 的小信号建模,通常忽略子模块电容电压波动、内部环流、环流抑制控制器等内部动态行为,从而简化状态空间模型的建立,如参考文献[47]~[48],这样会对系统特征根和稳定性分析造成一定误差,因此有必要建立考虑内部谐波动态的小信号模型,并对其进行阻尼特性分析。

1.2.1.2 电磁暂态仿真模型

对 MMC-HVDC 系统的电磁暂态仿真,可应用于系统控制参数调试,交、直流系统稳定性分析、故障分析,控制保护策略设计与验证等各类问题的研究,是工程建设前进行工程设计与系统特性研究的重要手段。

电磁暂态仿真建模又分为离线数字仿真与实时数字仿真^[49~50]。其中,离线数字仿真基于电磁暂态仿真软件及其所建立的各元件电磁暂态数学模型来搭建系统的电磁暂态模型,可较为精确模拟系统几乎所有频率分量下的电磁暂态过程,常用的电力系统仿真软件有 PSCAD/EMTDC 等,但其处理速度受制于软件所安装的计算机性能,当仿真规模较大时,仿真速度很慢,且由于其不具备实时运行特性,因此无法实现与物理控制器的互联并进行硬件在环实验;实时数字仿真基于电磁暂态仿真的建模思想及其所开发的硬件运算单元,通过分布式并行计算等方法,提高运算效率并实现实时数字仿真,由于其仿真的实时性,可与外部物理设备实现互联,实现数字—物理混合仿真,如硬件在环实验(使用实际物理控制器控制虚拟对象)与快速控制原型(使用虚拟控制器控制实际物理对象)等,对于工程投运前的联调等具有较大应用价值。

目前,对于 MMC-HVDC 的离线数字电磁暂态仿真,为准确反映系统的运行特性以及各子模块的运行状态,须仿真 MMC 中全部子模块所包含的大量电力电子开关器件,其电气节点数量较大,最终进行大规模节点导纳矩阵的求逆时将严重限制其仿真运算效率;且工程建设一般都采用超高电平 MMC,未来通过 MMC

构建直流电网也将成为该领域的发展趋势,这都将使电磁暂态仿真中的运算效率问题更加突出。以包含 3000 个子模块的双端 MMC-HVDC 系统为例,设置仿真步长为 $20\mu\text{s}$,仿真时长为 5s,经仿真测试并估算可得,每次仿真需要 3000h (125 天) 以上(仿真平台为 PSCAD/EMTDC V4.2.1,运行于微软 Win7 操作系统,3.20GHz 双核 CPU,2.0GB 内存的计算机),这将导致控制参数优化、故障特性分析、控制保护研究等一系列的仿真工作无法进行。如何建立可精确到子模块级别的 MMC 电磁暂态高效仿真模型,已引起 MMC 领域学术界的广泛关注,而目前所提出的仿真模型,不同程度地存在仿真效率低或精度无法满足要求等问题,在大规模交、直流系统的仿真中,亟须开发仿真速度更快且具有较高精度的仿真提速模型^[51~53]。另外,对于目前所提出的部分简化模型,如平均值模型^[54],其适用性也有待探讨。

现有电磁暂态工具中一般忽略单个电力电子器件开通和关断的暂态过程,而高压 IGBT 与二极管构成的 IGBT 模块作为 MMC 子模块的主要组成部分,若要考虑 MMC-HVDC 中电力电子器件的暂态过程及其产生的影响(开关损耗、温升等),并更精确地模拟 MMC 子模块的动态过程,需采用纳秒级仿真步长,并在仿真软件中开发精确的电力电子器件模型。精确到纳秒级的 MMC-HVDC 电磁暂态仿真模型目前尚无文献探讨。

总之,开展不同时间尺度的 MMC 电磁暂态建模方法的研究,在保证仿真精度的前提下研究提高 MMC 仿真效率的理论和方法,在不具备实时仿真硬件设施的情况下提出适用于不同应用场景的 MMC 高效仿真模型,具有重要的理论和工程意义,本部分也将作为本书讨论的重点内容之一。

1.2.2 主要问题解决思路

(1) 针对超高电平 MMC 阀控系统子模块电容电压排序算法运算量大,不利于物理控制器的硬件设计并降低电磁暂态仿真效率的问题。通过采用最优质因子分解算法和希尔排序算法,提出一种高效电容均压算法,以降低控制器对硬件设计的要求,而且可直接应用于电磁暂态仿真,提高电磁暂态仿真的运算效率。

(2) 针对考虑内部谐波特性(即子模块电容电压波动、环流等)的小信号建模问题,本书基于动态相量的建模思想,建立了详细的换流器状态空间模型,并对其进行线性化从而得到换流器的详细小信号模型;基于所建立的小信号模型,对 MMC 拓扑结构所特有的内部谐波模态进行详细分析,得出一系列具有较强工程应用价值的结论。另外,本书所建立的换流器状态空间模型也可用于系统稳态状态的求解,指导设备参数选型。本团队研究还发现,由于换流器内部动态特性

而新增入的特征根通常具有弱阻尼特性,而对这部分的特征根分析尚无文献进行探讨,本研究团队对该问题的研究填补了该领域一项重要空白。

(3) 针对 MMC 的电磁暂态仿真建模问题,本研究团队较早开展了相关研究工作,并在该领域取得了较好的研究成果。本书中将重点介绍国内外的经典高效模型及本团队在该领域的主要贡献,主要包括两种高效模型:基于受控源的通用模型和戴维南整体高效模型。基于受控源的通用模型只需采用电磁暂态仿真软件下的已有元件库即可实现,实现方法简单;而戴维南整体高效模型在保证较高精度的前提下对传统戴维南等效模型实现进一步提速,其更适用于大规模交、直流电网的仿真分析。另外,本书也针对部分学者提出的忽略单个子模块的运行特性平均值模型进行研究,探讨其适用性,并提出改进的平均值模型。

(4) 针对 MMC 单个电力电子器件的纳秒级仿真问题。从 IGBT 和二极管的器件工作机理出发,结合器件的热学特性影响,对 IGBT 模块进行详细分析与建模。平均损耗模块、平均热阻模块、热电耦合模块与 IGBT 模块暂态模型互相配合形成完整的 IGBT 模块热电耦合暂态模型。

1.3 本书的主要内容

本书以 MMC-HVDC 建模为主题,汇集了本研究团队在 MMC-HVDC 建模领域所积累的主要研究成果。本书按照模型对实际物理系统的反映详细程度进行章节编排,具体为:

第 2 章讨论 MMC-HVDC 拓扑及基本控制策略。第 3 章提出一种基于质因子分解法和希尔排序法的高效电容均压排序算法,可降低控制器硬件设计要求,同时可用于后续电磁暂态仿真模型中提高换流器的电磁暂态仿真速度。

第 4~5 章基于动态相量的建模思想,建立了 MMC-HVDC 的状态空间方程,并将其进行线性化,从而建立了 MMC-HVDC 的小信号模型;基于所建立的小信号模型,开展了换流器内部谐波稳定性的研究,并得出一系列与谐波稳定性相关的结论,可用于指导实际工程的调试。

第 6~7 章提出 MMC-HVDC 两种高效电磁暂态仿真模型,分别是基于受控源的模型和基于戴维南等效的整体模型,两种模型均能大幅提高超高电平 MMC 的仿真速度且可反映单个子模块的充、放电特性,其中戴维南等效整体模型可实现仿真时间随电平数线性增长。

第 8 章详细介绍了 MMC-HVDC 的平均值模型,并深入研究了其适用性,另外,针对其无法仿真闭锁充电、无法模拟单极接地故障等缺点提出改进的平均值模型。

第9章以RTLAB为例详细介绍实时数字仿真环境下MMC-HVDC的建模,主要包括RTLAB操作环境,以及基于RTLAB的MMC-HVDC系统模型的开发。

第10章介绍纳秒级的MMC-HVDC系统的建模,主要介绍了电力电子器件开关暂态过程及热特性的模拟,并在电磁暂态仿真环境下开发了热电耦合的电力电子器件模块。

第11章介绍本研究团队开发的 $\pm 2\text{kV}$, 100kW MMC-HVDC物理模拟平台,主要介绍其主接线方式、控制系统、控制器间通信、模块测试、系统实验等。

参 考 文 献

- [1] 赵畹君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 刘振亚, 舒印彪, 张文亮, 等. 直流输电系统电压等级序列研究 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (10): 1-8.
- [3] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [4] 徐政. 交直流电力系统的动态行为分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [5] 赵成勇, 孙营, 李广凯. 双馈入直流输电系统中VSC-HVDC的控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (7): 97-103.
- [6] 孙营. HVDC和VSC-HVDC的协调控制策略研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2006.
- [7] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电 [M]. 北京: 电力工业出版社, 1982.
- [8] 徐政, 屠卿瑞, 裘鹏. 从2010国际大电网会议看直流输电技术的发展方向 [J]. 高电压技术, 2010, 36 (12): 3070-3077.
- [9] Chunyi Guo, Zhao Chengyong. Supply of an Entirely Passive AC Network Through a Double-Infeed HVDC System [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25 (11): 2835-2841.
- [10] Chunyi Guo, Yi Zhang, A.M.Gole, et al. Analysis of Dual-Infeed HVDC with LCC-HVDC and VSC-HVDC [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27 (3): 1529-1537.
- [11] 郭春义, 赵成勇, Allan Montanari, et al. 新型混合双极高压直流输电系统的特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (10): 98-104.
- [12] 许烽, 徐政, 傅闯. 多端直流输电系统直流侧故障的控制保护策略 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (6): 74-78.
- [13] 刘海涛, 程林, 孙元章, 等. 交直流系统可靠性评估 [J]. 电网技术, 2004, 28 (23): 27-31.
- [14] 戴熙杰. 直流输电基础 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- [15] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [16] XiaoWang, Boon-Teck Ooi. High Voltage Direct Current Transmission System Based on

- Voltage Source Converters [C]. Power Electronics Specialists Conference, PESC '90 Record, 21st Annual IEEE 1990: 325-332.
- [17] Boon-Teck Ooi, Xiao Wang. Voltage Angle Lock Loop Control of the Boost Type PWM Converter for HVDC Application [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1990, 5 (2): 229-235.
- [18] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电的发展与展望 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (4): 77-81.
- [19] Flourentzou Nikolas, Agelidis Vassilios G. and Demetriades Georgios D. VSC-Based HVDC Power Transmission Systems: An Overview [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2009, 24 (3): 592-602.
- [20] 郭春义, 赵成勇. Novel Control Strategy for Voltage Source Converter Based HVDC and Controller Parameters Optimization [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (15): 1-9.
- [21] 赵成勇, 李金丰, 李广凯. 基于有功功率和无功功率独立调节的 VSC-HVDC 控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (9): 20-24.
- [22] 李金丰, 李广凯, 赵成勇. 三相电压不对称时 VSC-HVDC 的控制策略 [J]. 电网技术, 2005, 29 (16): 16-20.
- [23] Agelidis Vassilios G., Demetriades Georgios D., and Flourentzou Nikolas. Recent Advances in High-Voltage Direct-Current Power Transmission Systems. Industrial Technology, 2006. ICIT 2006. IEEE International Conference on, pp: 206-213.
- [24] Lesnicar A, Marquardt R. An Innovative Modular Multilevel Converter Topology Suitable for a Wide Power Range [C]. 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, Italy: IEEE, 2003.
- [25] 韦延方, 卫志农, 孙国强, 等. 适用于电压源换流器型高压直流输电的模块化多电平换流器最新研究进展 [J]. 高电压技术, 2012, 38 (5): 1243-1252.
- [26] Kurt Friedrich. Modern HVDC PLUS application of VSC in Modular Multilevel Converter Topology. Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on, pp: 3807-3810.
- [27] 刘隽, 贺之渊, 何维国, 等. 基于模块化多电平换流器的柔性直流输电技术 [J]. 电力与能源, 2011, 1 (1): 33-38.
- [28] Hans-Joachim, Knaak. Modular Multilevel Converters and HVDC/FACTS: a success story. Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on, Aug. 30 2011-Sept. 1, pp: 1-6.
- [29] Steffen Rohner, Steffen Bernet, and Marc Hiller. Modulation, Losses and Semiconductor Requirements of Modular Multilevel Converters. IEEE Transactions On Industry Applications,