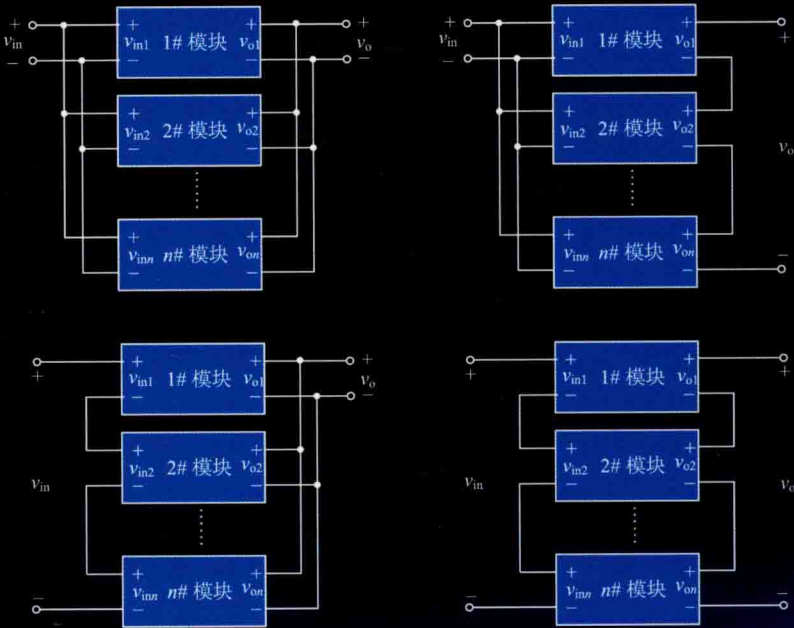


Series-Parallel Conversion Systems
Consisting of Multiple Power Electronics Converter Modules

多变换器模块 串并联组合系统

阮新波 陈 武 方天治 著
庄 凯 章 涛 颜 红



科学出版社

多变换器模块串并联组合系统

Series-Parallel Conversion Systems Consisting of
Multiple Power Electronics Converter Modules

阮新波 陈 武 方天治 庄 凯 章 涛 颜 红 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

多变换器模块串并联组合系统是指将多个标准化电力电子变换器模块在输入侧和输出侧分别进行串联或并联,以构成满足不同需求的电力电子变换系统,该系统具有降低开发难度、方便扩容、实现系统冗余、提高可靠性等优点。本书重点阐述分别以 DC-DC 变换器和 DC-AC 逆变器为基本模块的多变换器模块串并联组合系统的控制技术,分析了各模块输入均压/均流与输出均压/均流之间的关系,揭示了输入/输出均衡(均压/均流)控制与系统稳定性之间的关系,并提出了通用控制策略,实现了输入/输出均衡稳定控制及其与系统输出电压控制的解耦。针对输入串联型 DC-DC 变换器系统,进一步提出了基于输出电压上翘特性的无互联输入均压控制策略,有效提高了系统可靠性。针对输入串联型 DC-AC 逆变器系统,基于通用控制策略,提出了复合式均衡控制方法,即在控制输入均压的同时控制输出电流/电压相位相同,从而实现输入均压和输出均流/均压。提出了极端负载条件下输入串联型多变换器模块系统的输入均压控制策略。

本书是一本理论分析与工程设计相结合的专著,可作为高校电力电子技术专业及相关专业的硕士生、博士生和教师的参考书,也可供从事直流电源、逆变器和电力电子变压器研究开发的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

多变换器模块串并联组合系统=Series-Parallel Conversion Systems Consisting of Multiple Power Electronics Converter Modules/阮新波等著. —北京:科学出版社,2016. 11

ISBN 978-7-03-050441-8

I. ①多… II. ①阮… III. ①变换器-串联电路-控制系统②变换器-并联电路-控制系统 IV. ①TN624

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 264474 号

责任编辑:范运年 / 责任校对:彭 涛

责任印制:张 伟 / 封面设计:铭轩堂

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 2 月第二次印刷 印张:12

字数:242 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

多变换器模块串并联组合系统是指将多个标准化电力电子变换器模块在输入侧和输出侧分别进行串联或并联,以构成满足不同需求的电力电子变换系统,该系统具有降低开发难度、方便扩容、实现系统冗余、提高可靠性等优点。根据联接方式不同,多模块串并联组合系统可以分为四种基本类型:①输入并联输出并联(input-parallel output-parallel, IPOP);②输入并联输出串联(input-parallel output-series, IPOS);③输入串联输出并联(input-series output-parallel, ISOP);④输入串联输出串联(input-series output-series, ISOS)。每类多模块串并联组合系统都有其特定的应用场合:IPOP 系统适用于输出电流较大的场合,IPOS 系统适用于输入电压较低而输出电压较高的场合,ISOP 系统适用于输入电压较高且输出电流较大的场合,ISOS 系统适用于输入电压和输出电压均较高的场合。

2003 年,针对高输入电压的应用场合,我们开始 ISOP DC-DC 变换器组合系统的研究,主要目的是希望降低开关管的电压应力,以方便选取合适的开关管。ISOP DC-DC 变换器组合系统的关键问题是实现各模块的输入均压和输出均流。坦率地讲,当时我们并没有特别关注各模块的输入均压和输出均流之间的关系,以为只要实现各模块的输出均流即可。但是,在实验验证过程中,我们发现采用输出均流控制既无法实现输出均流,也无法实现输入均压。我们开始反思只采用输出均流控制是否存在问题,由此开始分析各模块的输入均压和输出均流之间的关系,探讨只采用输出均流和只采用输入均压时系统的稳定性,并得到了有益的结论。在此基础上,我们将研究范围扩展到以 DC-DC 变换器为基本模块的多变换器串并联组合系统,并进一步扩展到以 DC-AC 逆变器为基本模块的多变换器串并联组合系统,由此对多变换器串并联组合系统有了较深入和系统的研究。基于所取得的研究成果,我们在 *IEEE Transactions on Industrial Electronics*、*IEEE Transactions on Power Electronics*、中国电机工程学报、电工技术学报等国内外重要期刊上和国际会议上发表了一系列论文。鉴于这些论文散落于各种学术期刊和会议论文集中,我们决定将它们进行整理成书,全面系统地阐述多变换器串并联组合系统的控制技术。

本书共 9 章。第 1 章介绍多模块串并联组合系统的主要分类和特点,回顾以 DC-DC 变换器和 DC-AC 逆变器为基本模块的各类多模块串并联组合系统的控制技术。第 2 章至第 4 章针对以 DC-DC 变换器为基本模块的多变换器模块串并联组合系统,阐述其控制技术。其中第 2 章分析各模块输入均压/均流与输出均压/

均流之间的关系,揭示输入/输出均衡(均压/均流)控制与系统稳定性之间的关系,并提出通用控制策略,实现了输入/输出均衡稳定控制及其与系统输出电压控制的解耦;第3章以采用移相控制全桥变换器为基本模块的ISOP DC-DC变换器系统为例,给出了输入均压闭环和系统输出电压闭环的参数设计方法;第4章提出了一种基于输出电压上翘特性的输入串联型DC-DC变换器系统无互联输入均压控制策略,有效提高了系统可靠性。第5章至第8章则是阐述以DC-AC逆变器为基本模块的多变换器模块串并联组合系统的控制技术。其中第5章分析各模块输入均压/均流与输出均压/均流之间的关系,揭示输入/输出均衡(均压/均流)控制与系统稳定性之间的关系,并提出通用控制策略,实现了输入/输出均衡稳定控制及其与系统输出电压控制的解耦;由于DC-AC逆变器输出的是交流电,与DC-DC变换器输出直流电不同,其通用控制策略不仅要考虑有功功率的均衡,还要考虑无功功率的均衡,为此第6章和第7章分别针对ISOP DC-AC逆变器系统和ISOS DC-AC逆变器系统,分别提出了其复合式均衡控制策略,即在控制输入均压的同时控制输出电流(ISOP系统)/电压(ISOS系统)相位相同,从而实现输入均压和输出均流/均压;第8章针对IPOP DC-AC逆变器系统,通过合理引入负载电流前馈,不仅有效改善了系统的输出外特性,并可实现输出限流功能。第9章针对输入串联型多变换器模块系统,提出了轻载(甚至空载)和输出限流(甚至短路)等极端负载条件下的输入均压控制策略。

本书是基于我们研究团队的研究成果整理而成的,其中博士生陈武、方天治、庄凯,硕士生章涛和颜红对本书内容作出了重要贡献,因此他(她)们都是本书的合作作者。本书的整理工作主要由陈武、方天治和我完成,我们一起努力,历时两年,五易其稿,虽然艰辛,但专著定稿之日的喜悦和轻松却是无法形容的。

本书相关研究工作得到了台达电力电子科教发展基金项目“多变换器模块串并联组合系统研究”(批准号为DREO2006006)、国家自然科学基金青年项目“无互联模块化非对称双向高频直流变换器基础研究”(批准号51307024)、面上项目“输入串联型逆变器组合系统的关键技术研究”(批准号51477076)的资助,在此向台达电力电子科教发展基金计划实施委员会和国家自然科学基金委员会表示衷心的感谢!

阮新波

2016年7月于南京航空航天大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 电力电子技术的发展现状和趋势	1
1.2 电力电子系统集成	3
1.2.1 元器件级集成	4
1.2.2 模块级集成	4
1.2.3 系统级集成	5
1.3 DC-DC 变换器串并联组合系统	6
1.3.1 IPOP 系统	6
1.3.2 IPOS 系统	8
1.3.3 ISOP 系统	10
1.3.4 ISOS 系统	12
1.4 DC-AC 逆变器串并联组合系统	14
1.4.1 DC-AC 逆变器	14
1.4.2 IPOP 逆变器系统	15
1.4.3 IPOS 逆变器系统	19
1.4.4 ISOP 逆变器系统	20
1.4.5 ISOS 逆变器系统	21
1.5 本章小结	23
第 2 章 DC-DC 变换器串并联组合系统通用控制策略	24
2.1 输入均压/均流与输出均压/均流的关系	24
2.1.1 IPOP 系统	27
2.1.2 IPOS 系统	27
2.1.3 ISOP 系统	28
2.1.4 ISOS 系统	28
2.2 系统稳定性分析	29
2.2.1 输入均压/均流控制策略	30
2.2.2 输出均压/均流控制策略	31
2.3 DC-DC 变换器串并联组合系统的通用控制策略	34
2.4 DC-DC 变换器串并联组合系统的模块化	37

2.5	实验验证	40
2.6	本章小结	46
第3章	ISOP DC-DC 变换器系统的数学建模及闭环参数设计	47
3.1	基于全桥变换器的 ISOP 系统小信号建模	47
3.1.1	全桥变换器小信号模型	47
3.1.2	基于全桥变换器的 ISOP 系统小信号模型	52
3.2	基于全桥变换器的 ISOP 系统的解耦控制	58
3.3	闭环参数设计	61
3.3.1	输出电压闭环设计	61
3.3.2	输入均压闭环设计	62
3.4	通用控制策略实验验证	65
3.5	ISOP 系统三环控制策略	68
3.5.1	正阻特性单元	68
3.5.2	输入均压环的设计	70
3.5.3	实验验证	73
3.6	本章小结	75
第4章	基于输出电压上翘特性的无互联输入均压控制策略	76
4.1	基于输出电压上翘特性的无互联输入均压控制策略推导	76
4.2	基于输出电压上翘特性的输入串联型组合系统的基本特性	80
4.2.1	ISOP 系统	80
4.2.2	ISOS 系统	83
4.3	系统稳定性分析	84
4.4	实验验证	87
4.4.1	ISOP 系统的实验结果	87
4.4.2	ISOS 系统的实验结果	92
4.5	本章小结	94
第5章	DC-AC 逆变器串并联组合系统的通用控制策略	95
5.1	输入均压/均流与输出均压/均流的关系	95
5.1.1	IPOP 逆变器组合系统	98
5.1.2	IPOS 逆变器组合系统	99
5.1.3	ISOP 逆变器组合系统	100
5.1.4	ISOS 逆变器组合系统	100
5.2	DC-AC 逆变器串并联组合系统的稳定性分析	101
5.2.1	复合式均衡控制策略	102
5.2.2	输出均压/均流控制策略	103

5.3	DC-AC 逆变器串并联组合系统的通用均压/均流控制策略	104
5.4	本章小结	106
第 6 章	ISOP DC-AC 逆变器系统的复合式均衡控制策略	108
6.1	ISOP 逆变器系统中逆变器模块主电路拓扑的选择	108
6.2	复合式均衡控制策略的具体实现	109
6.3	系统控制闭环设计	113
6.3.1	输入均压环和系统输出电压环的解耦分析	113
6.3.2	前级直流变换器环路设计	116
6.3.3	输入均压环设计	119
6.3.4	系统输出电压环设计	123
6.4	仿真验证	124
6.5	实验验证	126
6.5.1	稳态实验	126
6.5.2	动态实验	128
6.5.3	输出电流反馈和输出滤波电感电流反馈的比较	132
6.6	分布式均压均流控制策略	133
6.7	本章小结	134
第 7 章	ISOS DC-AC 逆变器系统的复合式均衡控制策略	135
7.1	复合式均衡控制策略的实现方案	135
7.2	复合式均衡控制策略的解耦分析	138
7.3	系统控制闭环设计	141
7.3.1	输出电压闭环的分析与设计	141
7.3.2	前级直流变换器环路和输入均压环的设计	143
7.4	仿真及实验验证	143
7.5	ISOS 逆变器的分布式控制策略	148
7.6	本章小结	150
第 8 章	IPOP DC-AC 逆变器系统的改进型平均电流控制策略	151
8.1	DC-AC 逆变器的电流三态滞环调制及其外特性改善方案	151
8.1.1	电流三态滞环调制的基本原理	151
8.1.2	逆变器模块的输出电压特性的改善	153
8.2	IPOP DC-AC 逆变器的系统结构及控制方案	156
8.2.1	系统结构	156
8.2.2	控制方案	158
8.3	实验验证	159
8.4	本章小结	162

第 9 章 极端负载条件下 ISOP 系统的输入均压控制	164
9.1 极端负载条件下 ISOP 系统不能实现输入均压的原因	164
9.2 极端负载条件下的输入均压控制策略	166
9.2.1 改变输入均压环权值	167
9.2.2 辅助均压电路	169
9.3 仿真和实验验证	170
9.4 本章小结	179
参考文献	180

第 1 章 绪 论

1.1 电力电子技术的发展现状和趋势

1902 年,第一只玻璃汞弧整流器的出现,标志着一个新兴学科——电力电子技术诞生。此后,又相继出现了铁壳汞弧整流器、氧化铜整流器以及硒整流器等,这些整流器在电力整流装置中的应用是电力电子技术的初始起步阶段^[1]。1956 年,第一个真正意义上的现代电力电子器件——晶闸管诞生于美国贝尔实验室,从此电力电子技术进入了一个快速发展的阶段。1974 年,电力电子学先驱 William E Newell 博士首次给出了电力电子技术的定义:“电力电子技术是电气工程三大学科——电子、电力和控制的交叉”^[2]。1989 年,著名电力电子专家 Bimal K Bose 博士又对其进行了扩展和细化,指出电力电子技术是多学科的交叉^[3],这些学科包括功率半导体器件、功率变换电路、控制理论、电机、模拟和数字电路、超大规模集成电路、微机应用和计算机辅助设计等,如图 1.1 所示。

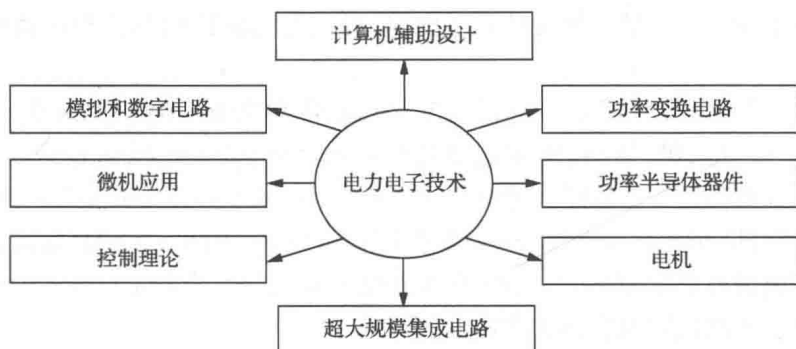


图 1.1 电力电子技术是多种学科的交叉

随着电力电子技术在工农业生产和日常生活各个方面应用的不断深入,电力电子技术所涉及的学科越来越多,如现代控制理论、微电子技术、材料科学、环境科学、生命科学等,逐步形成一门独立的跨学科的高新技术学科。

经过近 60 年的快速发展,电力电子技术在几乎所有行业都得到了不同程度的应用,在国民经济中占有十分重要的地位。近年来,日益凸显的能源需求增长与能源紧缺、能源利用与环境保护之间的矛盾,使得世界各国对可再生能源和新能源的开发和利用更加重视,也为电力电子技术的发展提供了新的机遇和空间,电力电

子技术已逐渐在可再生能源(太阳能、风能等)发电、柔性交/直流输电、电动汽车、节能环保等方面发挥极其重要的作用^[4-9]。

电力电子技术主要涉及三个领域,即电力电子器件、电力电子变换技术和控制技术,这三者相辅相成,相互促进,推动了电力电子技术的发展。

电力电子器件的发展是电力电子技术发展的基础。自1956年第一只晶闸管问世以来,电力电子器件大体经历了四个阶段的发展。

(1) 半控型器件:半控器件以晶闸管(silicon controlled rectifier, SCR)为代表,在低频、大功率变流领域得到广泛应用。

(2) 全控型器件:全控型器件以门极可关断晶闸管(gate turn-off thyristor, GTO)、功率双极型晶体管(bipolar junction transistor, BJT)和功率场效应晶体管(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET)为代表。GTO和BJT属电流型控制器件,其工作频率高于晶闸管;MOSFET为电压型驱动器件,其工作频率高于GTO和BJT。

(3) 复合型器件:复合型器件以绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)为代表,它集成了功率MOSFET和BJT两者的优点,容量较大,开关速度较快。

(4) 功率集成型器件:功率集成型器件以智能功率集成电路(smart power integrated circuit, SPIC)和高压功率集成电路(high voltage integrated circuit, HVIC)为代表,将功率器件及其驱动电路、过压过流保护电路甚至控制电路都集成在一起。

近二十年来,又出现了一些新的器件,如MOS控制晶闸管(MOS-controlled thyristor, MCT)、集成门极换流晶闸管(integrated gate commutated thyristor, IGCT)以及电子注入增强栅晶体管(injection enhanced gate transistor, IEGT)等。随着以碳化硅(silicon carbide, SiC)和氮化镓(gallium nitride, GaN)为代表的宽禁带半导体新型材料的应用,电力电子器件在不断改善自身性能的同时,朝着大容量、高频化、模块化以及智能化方向发展^[10]。

电力电子变换技术发展到今天已相当成熟,按其功能可分为四种形式^[11, 12]: ①将交流电变换为直流电的整流电路(AC-DC); ②将直流电变换为交流电的逆变电路(DC-AC); ③将一种形式交流电变换为另一种形式交流电的交流变换电路(AC-AC); ④将一个直流电压变换为另一个直流电压的直流变换电路(DC-DC)。每种形式的变换电路又有多种拓扑结构。电力电子变换技术的发展,为电力电子装置更加高频化、小型化、高效率以及提高综合经济效益创造了条件。

控制技术是电力电子技术的主要组成部分之一。随着全控型电力电子器件的出现,各种控制技术得到了迅速发展和广泛应用,如相控方式、脉宽调制方式和脉频调制方式等。现代控制理论和现代人工智能控制方式,如模糊控制、基因控制、

神经网络控制等的发展,也逐步引入到电力电子系统中^[13]。

随着电力电子技术应用范围的日益扩大,人们对电力电子产品的性能要求也不断提高。与此同时,各个应用领域新的需求对电力电子技术本身的发展提出了新的挑战。目前,电力电子产品的开发大多是根据客户的不同用途和要求进行特殊设计的,即所谓客户定制。由于电力电子产品的开发涉及到众多领域,如器件、电路拓扑、控制、磁性材料、封装、机械结构、热设计、电磁兼容等,往往开发周期长、成本高,在开发过程中进行了大量的重复性劳动,劳动效率低,这些都限制了电力电子产品生产成本的进一步降低和可靠性的进一步提高。为了降低成本,缩短开发周期,这就要求提高电力电子产品的标准化程度,以便于大规模生产,使产品能够满足快速变化的市场和客户需求,这是电力电子技术发展所面临的主要挑战之一。国际电力电子学界普遍认为,解决上述问题的必由之路是电力电子系统集成、标准化和模块化技术^[14, 15]。

1.2 电力电子系统集成

从晶闸管诞生之日起,电子技术的发展就以两大分支为主,一是以处理信息为目标的微电子技术,二是以处理功率(能量)为目标的电力电子技术。微电子技术经历了分立器件、大规模集成电路、超大规模集成电路、极大规模集成电路、系统集成芯片的发展过程,集成化仍将是微电子技术的发展趋势。相比于微电子技术,电力电子系统的集成化发展相对较为缓慢。电力电子装置大部分仍然由多个分立器件构成。借鉴于微电子技术发展的成功经验,人们自然会联想到,如能将其集成化技术的发展思路应用于电力电子技术,将可以提高电力电子产品的标准化,降低开发成本,缩短开发周期,由此提出了电力电子系统集成的概念。电力电子系统集成是指将电力电子装置内大量非标准化的分立器件按照一定的功能组合在一起,形成具有一定通用性的标准模块,再把这些标准模块像搭积木一样,方便地构成各种电力电子装置。

电力电子系统集成的思想最早由美国海军研究机构提出,当时针对大功率军用场合,提出了电力电子积木(power electronics building block, PEBB)的概念^[16]。之后,美国电力电子系统中心(center for power electronics system, CPES)开始系统研究电力电子系统集成技术,并针对商用的中、小功率场合,提出通过高密度混合集成和多层互连技术,将电力电子系统中的电力电子器件、驱动电路、保护电路、控制电路、通信接口电路等集成到一起,形成具有通用性的标准化电力电子集成模块(integrated power electronics module, IP EM),用以构成各种不同的电能变换系统^[17]。

电力电子系统集成所具有的显著优点和广阔的应用前景,吸引了国际上许多

大学和公司开展这方面的研究工作,如美国的康奈尔大学、阿肯色大学、通用电气公司、国际整流器公司等。我国也及时关注了电力电子系统集成这一重要发展趋势,国家自然科学基金委员会电气工程学科在 2003 年确定“电力电子系统集成基础理论及若干关键技术研究”重点项目,由浙江大学、西安交通大学和西安电力电子技术研究所承担。南京航空航天大学等高校也开展了这方面的研究工作,并取得了较好的研究成果。

总的来说,电力电子系统集成可以分为三个层次。第一层次是元器件级集成,包括有源器件集成和无源元件集成,其中有源器件集成是将电力电子器件、驱动电路、保护电路以及通信电路等集成起来,无源元件集成是将电感、电容和变压器等无源元件进行电磁集成;第二层次是模块级集成,它是将各种集成好的有源器件和/或无源元件集成起来,构成通用性较强的标准化变换器模块;第三层次是系统级集成,它是将各种标准化变换器模块集成为满足不同需求的各种电力电子应用系统。

1.2.1 元器件级集成

按集成对象不同,元器件级集成技术可以分为两大方向,即无源元件集成技术和有源器件集成技术。

无源元件集成包括磁性元件集成(如变压器与电感的集成、电感与电感的集成等)、磁性元件与电容元件的集成以及磁性元件、电容元件和电阻元件的集成等。磁性元件集成即是将两个或多个分立磁件绕制在一副磁心上,从结构上集成在一起,通过一定的耦合方式和合理的参数设计,可以有效减小磁件体积和损耗。磁性元件与电容元件的集成主要是指电感与电容的集成和变压器与电容的集成,如 1975 年 Reeves 提出了一种电感和电容集成方案^[18]。无源元件集成技术甚至可以将电阻元件与磁性元件以及电容元件进行集成,其中磁性元件和电容元件作为主电路元件,而电阻元件则可以作为吸收电路或控制电路的部分元件使用^[19]。

有源器件集成技术主要是指将电力电子装置中的电力电子器件、保护和控制电路等封装在同一个硅片上或同一个模块内,可以有效地减小体积和元器件之间连接引线带来的影响。如电机驱动中常用的智能功率模块(intelligent power module, IPM),就是将电力电子器件、驱动电路以及过电压、过电流和过热等故障检测电路集成在一个模块中。

1.2.2 模块级集成

模块级集成技术是指将各种已集成好的有源器件、无源元件、控制电路以及保护电路等集成为一个具有特定电能处理功能和较强通用性的标准化模块单元。如美国 CPES 提出采用多芯片封装技术来实现电力电子模块级集成,他们将各种电

力电子器件以裸芯片形式安装在具有高导热性的陶瓷或金属基板上,同时将控制电路、门极驱动电路、缓冲电路、电流和温度传感器以及保护电路等也采用专用集成电路裸芯片或表面贴装元件的形式组装在同一块陶瓷基板上,采用薄膜覆盖、低温烧结等封装技术实现内部电气连接,最后再与无源元件通过两维或三维立体封装为一个小系统,由接口电路接受外部微控制器提供的控制信号,以实现电能变换的控制。

1.2.3 系统级集成

系统级集成技术就是将各种标准化的电能变换模块单元集成为满足不同需求的各种电力电子应用系统。系统级集成的一个重要分支是将多个标准化模块单元的输入端/输出端通过串并联的方式进行组合集成^[20],从而达到满足更高性能的目的。比如,将多个标准化模块单元的输入端串联从而应用于高输入电压场合,将多个标准化模块单元的输出端并联从而应用于大电流输出场合。根据联接方式不同,多个标准化模块串并联组合系统可以分为四种基本类型(图 1.2):①输入并联输出并联(input-parallel output-parallel, IPOP);②输入并联输出串联(input-parallel output-series, IPOS);③输入串联输出并联(input-series output-parallel, ISOP);④输入串联输出串联(input-series output-series, ISOS)。更进一步,还可以将以上四种基本类型的串并联组合系统的输入和输出再加以组合,由此得到多个标准化模块构成的混合串并联组合系统。

每类串并联组合系统都有其特定的应用场合。IPOP 系统适用于输出电流较大的场合,IPOS 系统适用于输入电压较低而输出电压较高的场合,ISOP 系统适用于输入电压较高而输出电流较大的场合,ISOS 系统适用于输入电压和输出电压均较高的场合。

多变换器模块串并联组合系统具有以下优点:①采用标准化模块,有利于缩短系统研发周期,降低开发成本;②当系统由 n 个模块组成时,每个模块的输出功率为系统输出功率的 $1/n$,从而可以降低开发难度;③采用多个变换器模块的串并联组合,容易实现系统的冗余,提高其可靠性;④若采用交错控制技术,可以减小输入/输出电压和输入/输出电流纹波,在相同的电压和电流纹波要求下,可以减小输入/输出滤波器,由此提高变换器的功率密度^[21]。

按照能量变换形式,图 1.2 中的标准模块可为 DC-DC 变换器、DC-AC 逆变器、AC-DC 整流器和 AC-AC 变频器四类。本书重点关注以 DC-DC 变换器和 DC-AC 逆变器为标准模块的串并联组合系统,下面将分别介绍这两类串并联组合系统的研究现状。

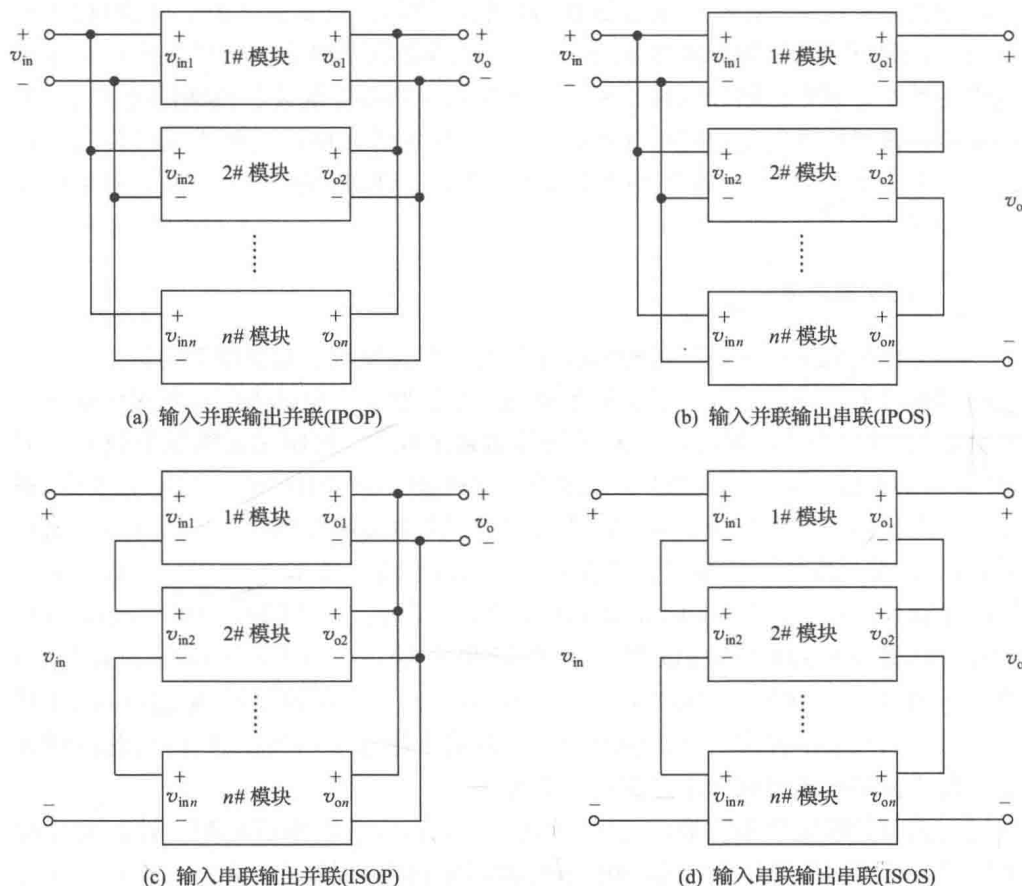


图 1.2 四类多变换器模块串并联组合系统

1.3 DC-DC 变换器串并联组合系统

1.3.1 IPOP 系统

基于直流变换器模块的 IPOP 系统已得到深入研究,并已广泛应用于通讯电源和电压调节模块(voltage regulator module, VRM)等系统中,其关键问题是保证系统中各模块的输出均流。针对这一问题,已提出了多种均流方法,如下垂法^[22]、主从设置法^[23, 24]、民主均流法^[25, 26]等。

下垂法的基本出发点就是通过控制使各个模块的输出外特性呈下垂特性,即输出电压随着输出电流的增大而降低,从而使各模块输出均流,如图 1.3 所示。该方法的实现非常简单,各模块间不需要均流母线,可靠性好。但是由于各模块输出

外特性较软, IPOP 系统的负载调整率较差。同时, 各模块的均流效果较差。

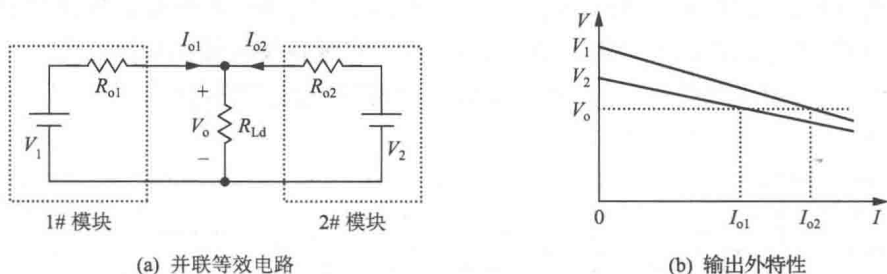


图 1.3 两模块组成的 IPOP 系统均流原理框图

主从设置法是指在 IPOP 系统中指定一个模块为主模块, 其他模块则为从模块。图 1.4 给出了主从设置法的控制框图。其中, 主模块为电压电流双闭环控制, 外环为输出电压闭环, 用来实现系统输出电压调节, 而内环为电感电流闭环; 从模块只有电感电流闭环。图中, G_{vo} 为输出电压调节器, G_i 为各模块的电感电流调节器。主模块输出电压外环的输出信号 I_{ref} 即为均流母线信号, 作为所有模块的电感电流闭环的给定信号, 因此可以保证所有模块的输出电流相等, 即实现各模块输出均流。主从设置法的不足是, 主模块一旦失效, 将导致整个系统崩溃。

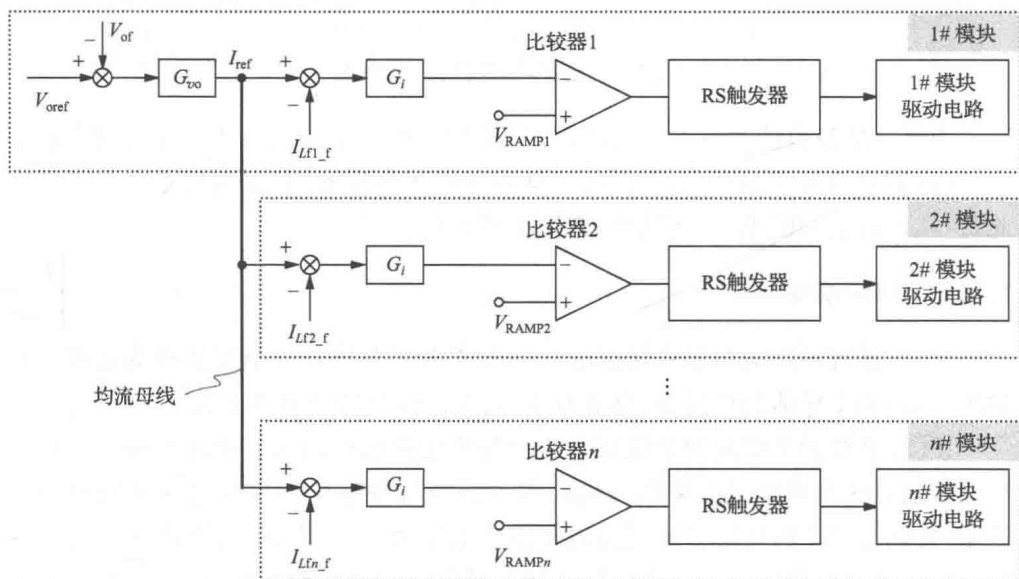


图 1.4 主从设置法的控制框图

民主均流法是指不人为指定主模块, 如图 1.5 所示, 各模块输出电流信号分别通过一个理想二极管连接至均流母线, 这样输出电流最高的模块自动成为主模块,

其输出电流作为均流母线信号。将各模块的输出电流与均流母线信号进行比较,其偏差信号叠加到各模块输出电压环的基准给定信号中,从而调节各模块的输出电流,使输出电流低的模块输出功率增大,最终实现各模块输出均流。由于没有指定主模块,其中任意模块失效,其他模块依然可以继续工作,提高了 IPOP 系统的可靠性。

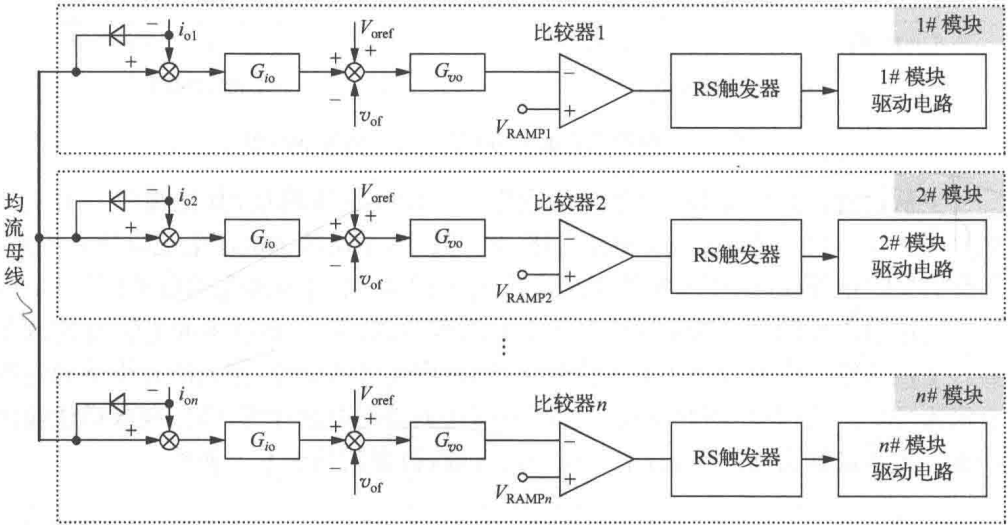


图 1.5 民主均流法的控制框图

由于主从设置法和民主均流法均需要均流母线,而均流母线容易受到噪声干扰,导致均流效果受到影响。而且,一旦均流母线出现断裂,则系统也会失效。因此,主从设置法和民主均流法的可靠性不如下垂法。

1.3.2 IPOPS 系统

IPOPS 系统可以应用于高输出电压场合或者需要将较低电压变换为较高电压的场合,例如半导体制作设备、臭氧发生器、太阳能光伏发电系统等^[28, 29]。

IPOPS 系统的关键问题是保证系统中各模块的输出均压。由于各模块输出侧是串联的,IPOPS 系统可以采用各模块各自调节自身输出电压的方法来保证输出均压,即调节单个模块输出电压为系统输出电压的 $1/n$,其中 n 为 IPOPS 系统中的模块数。但各模块的电压基准信号以及采样电路很难做到一致,因此会影响输出均压效果,而且系统输出电压难以实现精确调压^[30]。文献[31]将同一占空比送至各个模块,该方法非常简单,但在实际电路中各模块的参数很难做到完全一致,因此相同占空比方法并不能很好地实现输出均压。文献[32]提出了各模块共用输出电压环且每个模块均有各自输入电流环的方法。公共输出电压环的输出作为各输