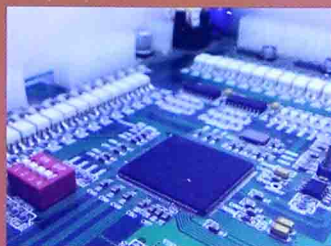


输入串联模块化 电力电子变换器

沙德尚 郭志强 廖晓钟 / 著



科学出版社

014056798

TM712
12

输入串联模块化电力电子变换器

沙德尚 郭志强 廖晓钟 著



科学出版社



TM712

12

内 容 简 介

输入串联模块化电力电子变换器使低压功率器件在高压输入场合的应用有了可能,与多电平变换器相比,控制策略也更简单。同时可以很方便地实现变换器的容错和热插拔控制,大大提高变换器的可靠性。因为无论动态、静态下均要实现模块之间良好的功率均分,即输入电压的均分,所以以前更多的控制策略需要引入输入电压均压环,这样就增加了控制系统设计的复杂度。本书将对输入串联模块化电力电子变换器从输出侧提出一系列的功率均分控制策略,而不需要每个模块的输入电压采样,从而降低了成本。

本书是一部关于输入串联模块化电力电子变换器及其相应控制策略的专著,具有理论知识与工程设计相结合的特点,可作为高等学校电力电子专业及相关专业的研究生、高年级本科生及教师的参考书,也可供从事电力电子研究开发工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

输入串联模块化电力电子变换器/沙德尚,郭志强,廖晓钟著. —北京:科学出版社,2014. 6

ISBN 978-7-03-041087-0

I. ①输… II. ①沙… ②郭… ③廖… III. ①电能-变换器 IV. ①TM712

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 129177 号

责任编辑:张海娜 / 责任校对:钟 洋
责任印制:肖 兴 / 封面设计:迷底书装

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>

骏志印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 6 月第一次印刷 印张:15

字数:300 000

定价:75.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

为了提高数字焊接电源的性能,必须提高电源的开关频率,不能采用数字焊接电源常用的 IGBT,只能采用功率 MOSFET。而工业电源的直流母线电压为 500~700V,为了提高变换器效率,可以将两个全桥模块进行输入串联输出并联。开始采用共同占空比控制,但是当变压器变比不一致,并不能实现良好的功率均分。后来通过两个模块输出电流交叉控制,在不采样每个模块输入电压的情况下,即使在变压器变比不完全一致的情况下,也能实现动态、静态下良好的功率均分。后来通过分析,发现了内在稳定机制。对于输入串联输出并联(ISOP)模块化 DC-DC 变换器,在不采样每个模块输入电压的情况下,提出了输出电流交叉反馈的控制策略,同时把这种思想推广至输入串联输出串联(ISOS)模块化 DC-DC 变换器、输入串联输出并联(ISOP)模块化单级 DC-AC 高频链逆变器、ISOP 模块化 DC-AC 单级高频链逆变器、ISOP 模块化 AC-DC 单级高频链整流器、ISOS 模块化 AC-DC 单级高频链整流器、ISOP 模块化 AC-AC 电子变压器和 ISOS 模块化 AC-AC 电子变压器中。对上述拓扑的稳定性和机制进行了深入的分析,最终通过理论分析给出了所提出方法的稳定性机制。通过仿真和实验验证了所提出的方法对于输入串联不同结构的模块化电力电子变换器的功率均分可行性。

本书共 10 章,第 1 章介绍了高压输入场合电力电子变换器的解决方案,引出了输入串联模块化电力电子变换器的解决方案。第 2 章研究了 ISOP DC-DC 多模块和两模块变换器的控制方法,分析了 ISOP DC-DC 变换器的特性,对提出的控制方法的稳定性机制进行了分析。第 3 章研究了 ISOS DC-DC 变换器的控制方法,同样讨论了从输出侧控制实现各个模块功率均分的控制策略,通过稳定性分析、仿真和实验验证方法的有效性。第 4 章研究了 ISOP 单级 DC-AC 高频链逆变器的控制策略,对于任意负载,分析了输入电压均分和输出电流均分之间的关系。为了抑制模块之间的环流,给出了相应的驱动逻辑,对于不同性质的负载均做了相应的实验验证。第 5 章研究了 ISOS DC-AC 逆变器的控制策略,对于任意负载,分析了输入电压均分和输出电压均分之间的关系,提出了输出侧均压控制方法,在任意负载情况下分析系统输入电压均分和输出电压均分之间的关系。第 6 章研究了 ISOP AC-DC 的拓扑构成和所提出的功率均分控制方法的架构,通过仿真和实验验证了所提出控制策略的可行性。第 7 章研究了 ISOS AC-DC 的拓扑构成和所提出的功率均分控制方法架构。第 8 章研究了 ISOP 模块化 AC-AC 变换器的拓扑构成、输入电压和输出电流均分的关系,仿真和实验验证了所提出控制策略的可

行性。第9章研究了ISOS模块化AC-AC变换器的拓扑、输入电压均分和输出电压均分的关系。第10章对全书进行了总结,对未来工作进行了展望。

在输入串联模块化电力电子变换器的研究过程中,作者所在研究团队很多学生先后参与了工作,他们是博士研究生郭志强和许国,硕士研究生邓凯、秦子安、罗天美和宋晓青。在本书的校稿阶段,博士研究生陈健良,硕士研究生袁文、余梦圆、徐令宇、刘弘耀、林钦武、游富琳和袁文琦也做了很多工作。

本书的相关工作得到了国家自然科学基金“全数字软开关DC-DC变换器及其电弧负载的耦合机理研究”(50807005)、北京自然科学基金“以储能为主导的自治微电网系统的研究”(3132032)、教育部新世纪优秀人才支持计划“独立运行微电网建模与控制”(NCET-13-0043)、北京理工大学优秀青年教师基金(2010YC0604)、北京理工大学基础科研基金(20120642009)、新能源电力系统国家重点实验室开放课题“基于模块化固态变压器的高压微电网研究”(LATS140001)和现代焊接国家重点实验室开关课题“高频变速送丝下熔化极双脉冲焊接”(AWPT-M03-2010)的支持,在此表示感谢。

本书的相关成果已发表在国际期刊 *IEEE Transactions on Power Electronics*、*IEEE Transactions on Industrial Electronics* 和 *Journal of Power Electronics* 上,感谢给予指正的主编、副主编和相关审稿人,他们的意见让我们看到了自己工作中的不足,对于提升我们的工作非常重要。

感谢北京理工大学自动化学院的领导对于本书出版的大力支持,付梦印院长(现南京理工大学副校长)和王军政院长、书记对于本书的出版给予了极大的鼓励和支持,廖晓钟副院长、刘向东副院长长期以来对于我们研究团队给予了无私支持,为我们创造了良好的实验条件,让我们心无旁骛地努力工作。

本书是作者所在研究团队近五年来研究成果的总结,由于作者水平有限,不足之处在所难免,恳请前辈及同行不吝赐教,多提宝贵意见和建议。

沙德尚

2014年3月于北京理工大学

目 录

前言

第 1 章 概述	1
1.1 高压输入电力电子变换的器件解决方案	1
1.1.1 功率器件串联	1
1.1.2 多电平主电路结构	2
1.1.3 多电平变换器的 PWM 控制策略	5
1.2 用于高压输入场合的输入串联模块化电力电子变换器的研究	5
第 2 章 输入串联输出并联模块化 DC-DC 变换器	7
2.1 引言	7
2.2 ISOP 模块化 DC-DC 变换器控制策略研究进展	7
2.2.1 相同占空比控制策略研究	8
2.2.2 带输入电压前馈的充电控制策略	9
2.2.3 基于有源输入电压控制的控制策略	9
2.2.4 主从控制方法	9
2.2.5 无电流传感器的电流控制模式	12
2.3 ISOP 模块化 DC-DC 变换器输入输出特性分析	13
2.3.1 ISOP DC-DC 变换器需要解决的问题	13
2.3.2 ISOP DC-DC 变换器输入电压均分、输出电流均分分析	13
2.3.3 模块参数对输入电压均分的影响	13
2.4 ISOP DC-DC 变换器输入电压均分控制	18
2.4.1 ISOP DC-DC 变换器输入电压均分控制原理	18
2.4.2 系统小信号模型及控制环路分析	19
2.5 ISOP DC-DC 变换器输出电流交叉反馈控制	29
2.5.1 关于输出电流均分控制的稳定性分析	30
2.5.2 ISOP DC-DC 变换器交叉电流控制系统分析	34
2.6 本章小结	43
第 3 章 输入串联输出串联 DC-DC 变换器	45
3.1 引言	45
3.2 ISOS 模块化 DC-DC 变换器输入电压均分和输出电压均分关系	47
3.3 两模块 ISOS 移相全桥软开关 DC-DC 变换器控制	48

3.3.1	两模块 ISOS DC-DC 变换器系统建模	48
3.3.2	输入串联型 DC-DC 变换器系统的等效阻抗	54
3.3.3	两模块 ISOS DC-DC 变换器的输出电压均分控制分析	55
3.4	多模块 ISOS DC-DC 变换器系统特性及其控制	66
3.4.1	占空比重新分配控制	66
3.4.2	占空比重新分配控制的稳定性分析	68
3.4.3	n 模块 ISOS DC-DC 变换器系统冗余控制	70
3.4.4	三模块双管正激 ISOS DC-DC 变换器占空比重新分配控制系统分析	71
3.4.5	仿真及实验结果	78
3.5	本章小结	80
第 4 章	输入串联输出并联模块化高频链 DC-AC 逆变器	82
4.1	引言	82
4.2	双向功率流的 ISOP 逆变器输入电压均分和输出电流均分关系	85
4.3	ISOP 高频脉冲交流环节逆变器主电路拓扑	87
4.3.1	消除环流方案的提出	87
4.3.2	全桥全波型高频链逆变器	88
4.3.3	区域判断逻辑控制	95
4.4	ISOP 高频链逆变器的控制	96
4.4.1	ISOP 高频链逆变器拓扑	96
4.4.2	ISOP 逆变器系统输出电流独立控制	99
4.4.3	输出电流交错控制	102
4.4.4	ISOP 逆变器系统均流分析	107
4.5	ISOP 逆变器控制系统分析	110
4.6	仿真及实验结果	113
4.7	本章小结	118
第 5 章	输入串联输出串联模块化高频链逆变器	120
5.1	引言	120
5.2	ISOS 逆变器中输出均流和输入均压的关系	123
5.3	ISOS 模块化主电路结构及其 PWM 调制策略	125
5.4	输出电压直接交叉反馈控制和所提出控制策略的对比分析	129
5.5	ISOS 模块化高频链逆变器实验分析	136
5.5.1	变压器匝比一致情况下的实验分析	136
5.5.2	变压器匝比不一致情况下的实验分析	138
5.6	本章小结	142

第 6 章 输入串联输出并联模块化高频链 AC-DC 整流器	144
6.1 电路拓扑结构	144
6.2 ISOP 模块化高频链 AC-DC 变换器的稳定机制	151
6.3 仿真分析	163
6.4 实验结果分析	166
6.5 本章小结	169
第 7 章 输入串联输出串联模块化高频链 AC-DC 整流器	170
7.1 电路拓扑结构	170
7.2 ISOS 高频链整流拓扑结构以及控制方法	171
7.3 ISOS 高频整流系统稳定性机制分析	177
7.4 两模块整流器 ISOS 系统的建模和环路增益分析	179
7.5 仿真及实验结果	183
7.6 本章小结	188
第 8 章 输入串联输出并联模块化 AC-AC 电子变压器	189
8.1 输出均流和输入均压之间的关系	189
8.2 系统主电路组成及 PWM 逻辑时序	192
8.3 无输入均压环的系统控制策略与仿真分析	195
8.4 ISOP 两模块 AC-AC 变换器实验结果分析	201
8.5 本章小结	205
第 9 章 输入串联输出串联模块化 AC-AC 电子变压器	207
9.1 输出均压和输入均压之间的关系	207
9.2 系统主电路组成及 PWM 逻辑时序	210
9.3 无输入均压环的系统控制策略	211
9.4 两模块 ISOS 实验结果及其分析	216
9.5 本章小结	220
第 10 章 总结与展望	222
参考文献	224

第 1 章 概 述

1.1 高压输入电力电子变换的器件解决方案

随着现代工业的高速发展,不同功率等级的高压输入开关型电力电子变换器已经渗透到国民经济的各个行业:高压变频器、高压直流输电、固态变压器、电动车用高压快速充电器等。而电力电子功率器件的电压等级和处理容量有限,如 IGBT 目前电压等级为 6.5kV,而常用的 MOSFET 耐压多在 1.2kV 以下,所以传统的电力电子拓扑在高压场合的应用受到了一定的限制。随着电力电子器件耐压的增加,其通流能力可能下降,其导通压降如 IGBT 的 $V_{CE(on)}$ 或 MOSFET 的导通电阻($R_{ds(on)}$)的增加导致变流器的损耗增加。并且随着电力电子器件耐压的增加,成本也有所增加。由于功率器件的限制,高压输入电源不能与传统拓扑一样进行设计,需要采用新型的拓扑配合新型的控制方法实现高输入电压的变换。

1.1.1 功率器件串联

功率器件的串联被应用在高电压中^[1-4],高压输入可采用功率器件串联,而功率器件串联组成的模块可以被当做单个功率器件来使用。这种方法的优点是较成熟的低压拓扑可以应用在高电压场合,只要串联的各个功率器件的驱动完全相同,就可以保证串联的各个功率器件均分输入电压。ABB 公司采用功率器件的串联技术研发出世界上第一条轻型高压直流输电线(LHVDC),如图 1.1 所示。虽然其控制策略简单,但是实际应用过程中,实现串联开关管的均压非常困难,尤其是瞬态期间,动态均压更加困难。为了实现各个开关管均压的目标,要采用非常复杂的有源驱动技术。如果此拓扑用在高频隔离的电力电子变换器中,由于输入的高压,变压器的绝缘设计变得很困难。而现有高频磁芯的物理尺寸限制了单个高频变压器的功率传递能力,同时一旦某一阀体损坏,系统无冗余运行能力。

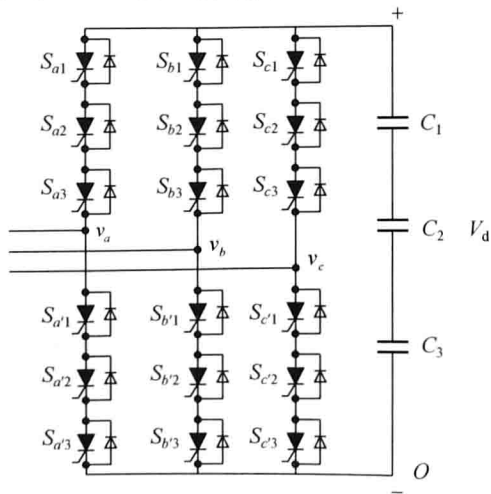


图 1.1 基于功率器件串联的三相逆变器

1.1.2 多电平主电路结构

多电平技术被广泛地应用在高电压和中高电压的电机驱动、开关电源和电力系统中。根据其组成的主电路结构,多电平技术可以分为中点钳位(neutral point clamped)、级联技术(cascaded)和混合模式。

1. 中点钳位多电平

中点钳位多电平分为:二极管钳位^[5,6]、有源钳位^[7,8]和飞跨电容^[9-11]。二极管中点钳位三电平如图 1.2 所示。根据输入、输出是否电气隔离,二极管钳位多电平变换器既可以包括不隔离型,也可以包括隔离型。工作在高频隔离三电平 DC-DC 包括:半桥模式二极管中点钳位三电平、全桥模式高频隔二极管中点钳位三电平和混合全桥三电平。

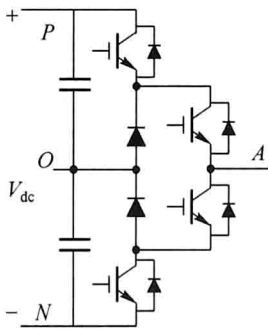


图 1.2 二极管中点钳位三电平

对于二极管中点钳位多电平变换器,功率器件的功率损耗是不均匀的,不同功率器件的结温是不一样的,限制了变流器的输出功率。同时,DC 输入侧的电容上的电压很难均衡,为了实现电容上电压均衡,可以采样直流分压电容上电压,实现有源控制,但是增加了系统的复杂度和控制成本^[12]。同时开关管的驱动逻辑复杂,随着电平数的不断增加,分压电容电压不均衡问题就更加突出^[13],因此在某些场合如高调制比下限制了该型变流器的使用。同时随着电平数的不断增加,串联的钳位二极管的数量也同步增加,二极管的均压是个挑战。而且驱动逻辑变得越来越复杂,增加了控制器的负担。

与二极管钳位相比,用有源管代替二极管,如图 1.3 所示,可以实现功率器件损耗分配的一致,但是中点电压不平衡的问题依然没有解决。增加了有源开关管以后,开关管的驱动逻辑更加复杂^[14]。

飞跨电容如图 1.4 所示,飞跨电容没有二极管,但是增加了钳位电容。如果不采用特殊的控制,就无法实现各个功率器件损耗分配的一致,需要使用中点电压控制技术。同时钳位电容上的电压也需要控制,存在预充电问题。否则在启动瞬间,钳位电容上的电压还没有建立,某些开关要承受很大的电压应力,甚至损毁^[15]。

2. 级联 H 桥

级联模式如图 1.5 所示,需要提供多个电气完全隔离的、具有相同幅值的、独立的 DC 电压源。为了得到多个独立的 DC 电源,如果输入为高压交流,则可以通过低频移相变压器实现电气隔离和变压比调整,通过工频整流得到电气隔离的 DC 电源,但

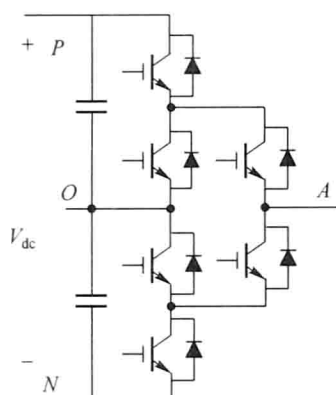


图 1.3 有源钳位三电平

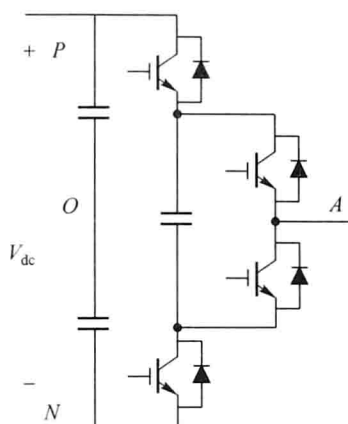


图 1.4 飞跨电容三电平

是体积非常笨重,造价也非常昂贵^[16]。也可以采用高频变压器进行隔离,如该技术用在固态变压器(solid state transformer)中,但通常采用两级变换^[17-19],包括级联模式双向 AC-DC 变换和高频隔离双向 DC-DC 变换。对于 AC-DC 变换,通常采用基于移相载波的共同占空比控制。实际上,每个模块电路参数具有离散性,所以很难实现每个独立直流电压源幅值的精确控制。当直流电源负载不相等时,采用共同占空比控制,每一路的直流电压源幅值是不一样的,容易造成某些模块的过压损坏。因此,可以实时采样直流侧电压,通过闭环的均衡控制策略,实现直流侧电压的均衡控制^[20]。

除了直流电压均等的级联 H 桥电路结构之外,级联式逆变器还可以人为地工作在直流电压不相等的模式,即不对称级联 H 桥结构。但是直流电压幅值之间要满足一定的关系。图 1.6 给出了 3 个模块组成的主电路原理图,虽然模块数只有 3 个,但是可以产生 15 个电平。在不增加功率器件数量的情况下,大大增加了电平数,也就大大减小了交流侧的电压总谐波含量,降低了交流侧滤波器的设计负担。

但是对于每个模块,功率等级差别很大,每个模块中功率器件的电压应力可能不同,不利于模块化标准化的设计和制作。

模块化多电平变换器(MMC)是由西门子公司首先提出的采用多个子模块串联的一种新型拓扑结构,其拓扑结构如图 1.7 所示。每个子模块由 IGBT 半桥和一个并联电容器组成。MMC 被广泛应用在高压输入场合,图 1.7 给出了采用串联半桥的 MMC。此拓扑非常灵活,由于采用了模块化的设计,只要增加 MMC 串联的个数,就可以应用在各种电压等级的场合,且容量扩充非常容易。MMC 模块技术已经被西门子应用在 HVDC 直流输电技术中^[21]。但是 MMC 也有缺点,其存在电容电压平衡的问题,并且在启动时,要对模块的电容预充电。

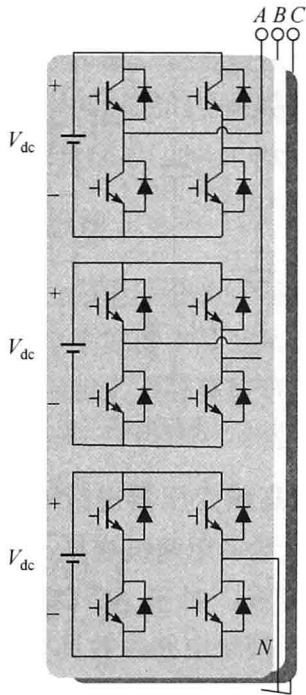


图 1.5 级联模式多电平主电路

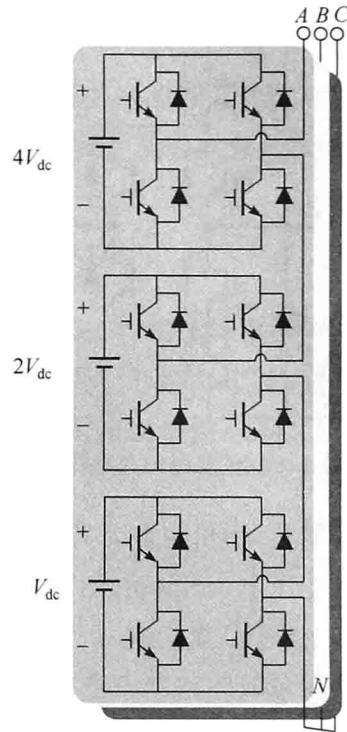


图 1.6 不对称级联 H 桥

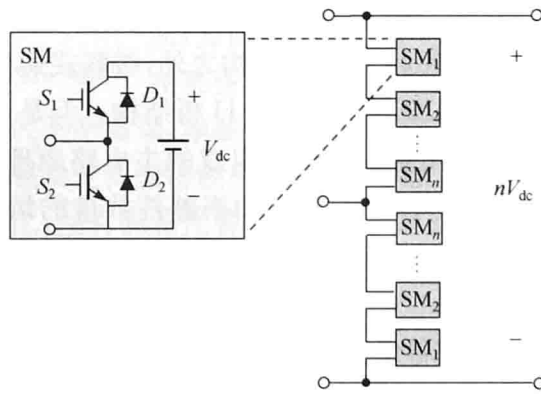


图 1.7 MMC 半桥串联拓扑

3. 混合模式

为了充分发挥各种多电平变换的优点,可以将多种多电平的主电路结构进行混合。常见的有中点钳位+级联全桥(NPC+CFB)^[22]、级联式中点钳位(cascaded NPC)^[23]和有源中点钳位+飞跨电容(ANPC+FC)^[24]。但混合模式不利于电力电子模块的标准化设计和制造。

1.1.3 多电平变换器的 PWM 控制策略

1. 空间矢量脉宽调制策略

可以将多电平的空间矢量脉宽调制策略(SVPWM)算法问题简化成二电平 SVPWM 算法问题,该算法简单、快速,并且对任何电平数都通用。但当电平数很多的时候,合成的矢量很多,算法非常复杂,不适合用于电平数较高的场合。

2. 低频调制方法

低频调制方法就是指消除特定次谐波的方法(SHEPWM),多电平消谐波调制根据不同的调制波幅值,利用基波和谐波解析表达式解算出相应的几组开关角,工作时根据系统运行条件查表确定输出哪组开关角,其优点是能很好地控制谐波,能够有效地降低开关损耗。但是它动态特性差,在线调压困难。同时存在各个模块承担功率不均衡的情况,需要优化各个模块的 PWM 脉冲发生的时刻,以实现较为均衡的功率均分。

3. 载波移相调制策略

载波移相调制策略(carrier phase shifted-PWM, CPS-PWM)是多重化和 SPWM技术的有机结合,CPS-PWM 调制策略是指三角载波依次移开 $1/N$ 三角载波周期,即 $2\pi/N$ 相位角,然后与同一条正弦调制波进行比较,产生 N 组 PWM 调制波信号。

4. 载波平移调制策略

载波平移调制策略(level shifted-PWM, LS-PWM)技术是同样一个调制波和多组三角载波相比较,各个载波之间在空间上进行了上下平移,根据各个三角载波之间的相位关系,可以分为同相层叠(PD)、正负反向层叠(POD)和交替反向层叠(APOD)^[25]。

1.2 用于高压输入场合的输入串联模块化 电力电子变换器的研究

近些年,人们越来越重视对组合变换器模块的拓扑和控制的研究。为了适应高电压的场合,各个变换器模块的输入需要串联在一起,输出可以串联,也可以并联,来满足各种输出电压等级。由于各个模块输入串联,所以各个模块的输入电压只承担总输入电压的一部分,各个模块的电压应力大大降低,整个变换器的效率大大提升,同时整个系统还具有冗余特性,当其中一个模块出现故障时,只要把故障

模块的输入短路就可以保证这个系统的正常运行。但是输入串联的系统要面临输入电压均分的问题,如果输入电压不能均分,承担电压高的模块也会损坏。所以对输入串联的变换器需要采取一定的控制方法实现输入电压的均分。传统的控制方法,如果在各个组成模块的参数不一致的情况下,要实现功率的精确均分,需要采样每个输入电压,引入每个模块输入电压的均压控制环。这样就增加了控制系统的复杂程度,同时也需要增加每个模块额外的电压传感器。

本书提出了在不采样原边每个模块输入电压的情况下,针对不同的拓扑组合,从输出侧提出了一系列功率稳定控制策略,实现了输入串联模块化电力电子变换器的功率均分。对 ISOP DC-DC 变换器、ISOP DC-AC 逆变器、ISOS DC-DC 变换器、ISOS DC-AC 逆变器、ISOP 模块化 AC-DC 变换器、ISOS 模块化 AC-DC 变换器、ISOP 模块化 AC-AC 变换器和 ISOS 模块化 AC-AC 变换器的拓扑组成、PWM 脉冲产生机制进行了研究,对上述拓扑的稳定性和系统的动静态响应进行了深入的分析,最终通过理论分析揭示了所提出方法的稳定性机制。通过仿真和实验验证了所提出的方法对于输入串联不同结构模块化电力电子变换器的功率均分可行性。

本书按以下章节进行设置:第 2 章研究了 ISOP DC-DC 变换器的控制方法,分析了 ISOP DC-DC 变换器的特性,对提出的控制方法进行稳定性分析,最终通过仿真和实验验证控制方法的可行性;第 3 章研究了 ISOS DC-DC 变换器的控制方法,同样介绍了从输出侧控制实现各个模块功率均分的控制策略,通过稳定性分析、仿真和实验验证方法的可行性;第 4 章研究了 ISOP DC-AC 逆变器的控制策略,分析 ISOP 逆变器输出侧控制功率均分的条件,最终通过仿真和实验对控制方法进行验证;第 5 章研究了 ISOS DC-AC 逆变器的控制策略,提出输出侧均压控制方法,分析系统的稳定性和动态响应,最终通过仿真和实验验证方法的可行性。第 6 章研究了 ISOP AC-DC 整流器的拓扑构成,并提出了功率均分控制方法,通过仿真和实验验证了所提出控制策略的可行性。第 7 章研究了 ISOS AC-DC 整流器的拓扑构成并提出了功率均分控制方法,通过仿真和实验验证了所提出方法的可行性。第 8 章研究了 ISOP AC-AC 变换器的拓扑构成,并提出了功率控制方法,通过仿真和实验验证了所提出方法的可行性。第 9 章研究了 ISOS AC-AC 变换器的拓扑构成、稳定的功率控制方法以及仿真和实验验证。第 10 章进行了总结和下一步工作进行了展望。

第 2 章 输入串联输出并联模块化 DC-DC 变换器

2.1 引言

本章总结了已有文献对于输入串联输出并联 (ISOP) 模块化 DC-DC 变换器的控制策略。分析了 ISOP 模块化 DC-DC 变换器的输入输出特性,在公用占空比控制下,分析了不同参数对于各个模块输入电压均分的影响。提出了一种输入均压控制策略,进行了相关的仿真和实验研究。在不采样每个模块输入电压情况下,提出了一种输出电流交叉反馈控制策略,采用劳斯判据,揭示了输出电流交叉反馈控制策略的稳定机制。对 ISOP 多模块 DC-DC 变换器进行了实验研究,表明该控制策略即使在模块参数不一致的情况下,也可以实现各个模块动态、静态下对输入电压的均分。

2.2 ISOP 模块化 DC-DC 变换器控制策略研究进展

通过 ISOP 的方式把隔离式 DC-DC 变换器模块组合起来,如图 2.1 所示,可以适用于输入电压较高、输出电压较低但电流较大且需要电磁隔离的供电场合,如充电机、焊机、加热器等。这些变换器可以是正激、反激、推挽、全桥等形式的隔离式 DC-DC 变换器。

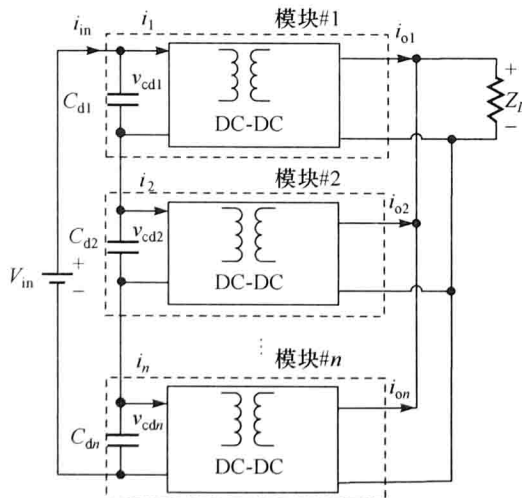


图 2.1 ISOP 模块化 DC-DC 变换器拓扑

为了实现 ISOP DC-DC 变换器功率均分控制,根据功率平衡理论,假设每个模块的变化效率一样,实现了输入电压(IVS)的均分,自然也就实现了输出电流(OCS)的均分。为了实现 ISOP DC-DC 变换器功率均分,相关的学者提出了很多方法,具体可以概括如下。

2.2.1 相同占空比控制策略研究

相同占空比的控制策略(common duty ratio control)^[26,27]可以稳定地实现 ISOP DC-DC 变换器的控制,控制策略如图 2.2 所示。整个控制策略只有一个输出电压环和一个输出电流环。各个模块的占空比相同。如果各个变换器模块参数的不一致,此方法不能实现各个模块之间功率精确均分。当系统各个模块参数基本相同时,各个模块的功率基本可以实现均分,而影响功率均分的主要因素是隔离变压器的匝比。各个模块的功率与变压器的匝比成正比。因此要求各个模块隔离变压器的匝比不能相差太大。另外在输入或负载变化时的瞬态响应能力较差。

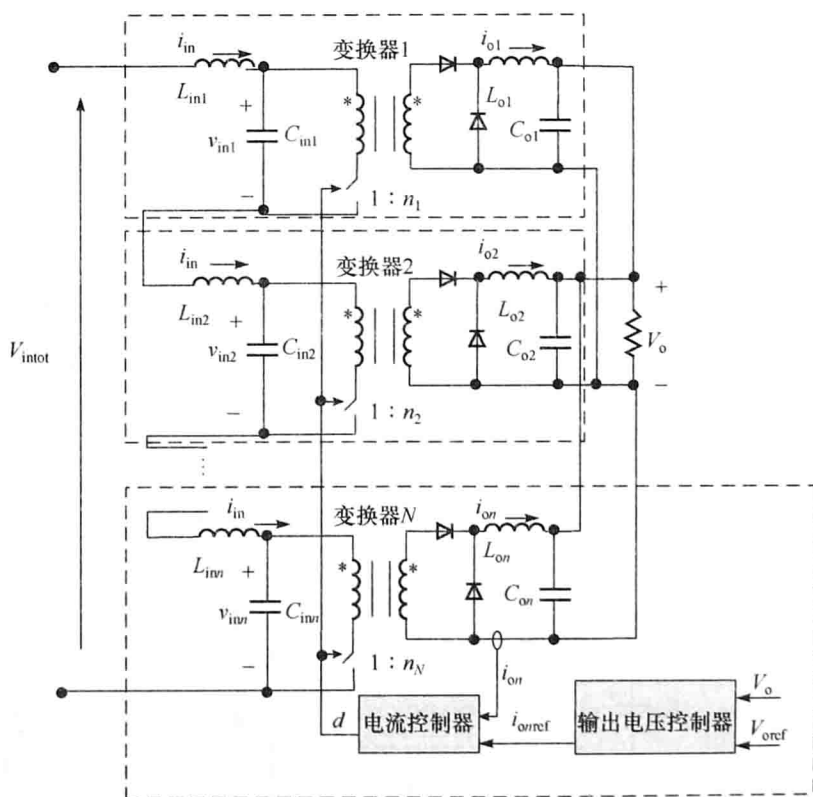


图 2.2 相同占空比的控制策略

2.2.2 带输入电压前馈的充电控制策略

带输入电压前馈的充电控制策略(charge control)^[28]可以应用在 ISOP DC-DC 变换器中,此控制方法的控制策略如图 2.3 所示。为了实现输入电压的均分,此方法对输入电压进行了求差,把求差的结果分别送给两个模块的控制器进行补偿。每个变换器模块均需要采样各自的输入电流以生成 PWM。本质上每个模块是单周期控制^[29],但是这种控制方法需要采样各个模块的输入电压、各个模块的输入电流、输出电压和电流等很多物理量,控制策略复杂,需要很多传感器,增加了控制电路的设计成本。

2.2.3 基于有源输入电压控制的控制策略

对于 ISOP DC-DC 变换器,如果不采样每个模块的输入电压,对每个模块进行独立的输出电压和输出电流闭环控制,则系统是不稳定的,无法实现每个模块功率均分目标。基于输入有源电压控制的三环控制策略^[30],可以实现 ISOP DC-DC 变换器的功率均分,此控制策略如图 2.4 所示。对于每个模块,该控制策略具有三个控制闭环,分别为总输出电压环、各自的输入均压环和各个模块的输出电流内环。电压外环实现输出电压的闭环控制,输入均压环实现输入电压的均分,其控制量与电压外环的控制量进行叠加作为电流内环的给定,电流内环可以增加系统的阻尼,从而提高系统的快速性和抗扰性。从功率守恒的角度来看,ISOP 变换器实现了输入电压的均分,也就实现了输出电流的均分,同时各个模块功率也就实现了功率均分。但是需要采用各个模块输入电压、各个模块输出电流和总的输出电压,采样的物理量众多,控制策略复杂。

为了简化基于有源输入电压控制控制策略,提出了基于有源输入电压控制的双闭环控制策略,主要包括:统一输入电压分配(uniform input voltage distribution)^[31]、输入电压解耦控制(decoupling IVS control scheme)^[32,33]和通用控制策略(general control considerations)^[34]。但是对于每个模块均为电压模式控制,每个模块的输出电流信号参与系统的调节与控制,系统的动态性能受到一定的影响。

2.2.4 主从控制方法

对于 ISOP 模块化 DC-DC 变换器,主从控制方法(master/slave control)^[35]如图 2.5 所示。此时 DC-DC 变换器为反激拓扑。其中一个模块的变换器是主模块,用来稳定输出电压,其他模块是从模块,为了实现输入电压的均分,要同时采样两个模块输入电流的差值。由于采样的信号众多,因而增加了控制系统的复杂程度。