

河南省基础与前沿技术研究计划项目成果

交流斩波功率变换器及其 控制技术研究

JIAOLIU ZHANBO GONGLU BIANHUANQI JIQI
KONGZHI JISHU YANJIU

金 楠 崔光照 著

中原出版传媒集团
大地传媒

 河南科学技术出版社

河南省基础与前沿技术研究报告项目成果

交流斩波功率变换器及其 控制技术研究

金楠 崔光照 著

河南科学技术出版社

·郑州·

图书在版编目 (CIP) 数据

交流斩波功率变换器及其控制技术研究/金楠, 崔光照著. —郑州: 河南科学技术出版社, 2015. 10 (2017. 1 重印)

ISBN 978-7-5349-7708-4

I. ①交… II. ①金… ②崔… III. ①功率变换器-研究 IV. ①TM761

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 073930 号

出版发行: 河南科学技术出版社

地址: 郑州市经五路 66 号 邮编: 450002

电话: (0371) 65788613 65788624

网址: www.hnstp.cn

策划编辑: 孙 彤

责任编辑: 孙 彤

责任校对: 张景琴

封面设计: 张 伟

责任印制: 朱 飞

印 刷: 河南新华印刷集团有限公司

经 销: 全国新华书店

幅面尺寸: 170 mm×240 mm 印张: 9.75 字数: 200 千字

版 次: 2015 年 10 月第 1 版 2017 年 1 月第 2 次印刷

定 价: 36.00 元

如发现印、装质量问题, 影响阅读, 请与出版社联系并调换。

前 言

交流电压变换是现代功率变换技术的重要研究内容，其中，交流斩波功率变换在交流电压变换领域中具有独特的技术优势，例如动态响应速度快、谐波含量低、滤波器体积小，且不需要使用大容量电解电容或电感等储能元件。近年来，其研究和应用发展迅速，已经扩展到电机控制、无功补偿、动态电压恢复等领域。作为一项工程应用技术，交流斩波功率变换技术研究还存在变换器结构复杂、换流过程烦琐、控制方案不完善等问题。针对这些问题，特别是针对交流斩波功率变换器拓扑及其控制技术，我们进行了深入研究，力求进一步提高系统性能。本书是我们近年来研究成果的总结，全面系统地介绍了该变换器的基本概念、关键技术、设计方法，同时给出了实例。

本书共分九章。第1章介绍交流斩波变换器的发展历史、现状及发展趋势。第2章介绍通过设计新颖的接线方式与功率流向，使用智能功率模块实现双向开关功能，进行交流斩波功率变换，以解决全控双向功率开关设计复杂的问题。第3章介绍桥式交流斩波 Buck、Boost 功率变换器的非互补控制换流策略，该技术消除了传统换流控制中的输出电压失控区间，能够实现功率变换全周期控制。第4章针对现有交流斩波功率变换器模型存在受负载性质制约的问题，介绍依据改进后的系统等效电路建立反映负载特性的连续模型、离散模型。第5章介绍在系统建模基础上，通过采用串联校正、前馈控制、预测控制三种控制方法，设计适用于该变换器的复合控制策略。第6章介绍利用桥式交流斩波功率变换器，设计新型动态电压恢复器



及其控制方案。研究电源电压在突升、突降、欠压、过压故障下，敏感负载电压的动态恢复控制方案。第7章介绍实验平台的设计与实现。结合功率变换系统、信号处理系统以及供电规划的分析，设计并实现系统的实验平台，为理论研究提供验证手段。第8章介绍样机功能测试与实验结果分析。在多种性质负载条件下，对交流斩波功率变换器进行性能测试。模拟电源电压故障情况，对动态电压恢复功能进行分析、验证。第9章对本书内容进行总结，对下一步工作提出建议。

本书由郑州轻工业学院金楠副教授、崔光照教授著，其中金楠著第1、2、3、4、7、8章，崔光照著第5、6、9章。本书在编写过程中得到了上海交通大学唐厚君教授的关心和指导。在实验平台搭建过程中得到了姚辰博士和耿鑫博士的帮助。参与协助的研究生有顾冬冬、胡石阳、康冬祎、邓轩轩。多年来一直在外求学、工作，衷心感谢家人的理解和支持。

感谢河南省基础与前沿技术研究计划项目（编号132300410154）、郑州轻工业学院博士科研基金（2013BSJJ025）对本书的资助。

限于作者水平，书中可能存在错误和疏漏之处，恳请读者批评指正。

著者

2015年3月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 交流斩波功率变换器的研究现状	(4)
1.2.1 新型拓扑研究	(4)
1.2.2 控制技术研究	(8)
1.2.3 PWM 调制技术研究	(10)
1.2.4 交流斩波功率变换器的应用研究	(12)
1.3 本章小结	(22)
第 2 章 桥式交流斩波功率变换器设计	(24)
2.1 交流斩波功率变换器的基本原理	(24)
2.2 交流斩波功率变换与相控式交流电压调节的对比分析	(27)
2.2.1 相控式交流电压调节原理	(27)
2.2.2 斩波功率变换与相控式电压调节对比分析	(29)
2.3 交流斩波功率变换器分析与设计	(30)



2.3.1	电力电子双向开关分析	(30)
2.3.2	单管双向电力电子开关交流斩波功率变换器	(31)
2.3.3	高频交流环节斩波功率变换器	(32)
2.3.4	单管反串联双向电力电子开关交流斩波功率变换器	(32)
2.3.5	桥式交流斩波功率变换器设计	(34)
2.4	本章小结	(36)
第3章	交流斩波功率变换器换流策略与工作模式设计	(37)
3.1	互补控制换流策略及非互补控制换流策略	(37)
3.1.1	互补控制换流策略	(37)
3.1.2	非互补控制换流策略	(39)
3.1.3	桥式交流斩波功率变换器非互补控制换流策略设计	(44)
3.2	桥式交流斩波功率变换器参数设计	(49)
3.2.1	斩波频率设计	(49)
3.2.2	输出滤波器参数设计	(50)
3.3	仿真分析与验证	(51)
3.3.1	桥式交流斩波 Buck 功率变换器仿真分析	(52)
3.3.2	桥式交流斩波 Boost 功率变换器仿真分析	(57)
3.4	本章小结	(59)
第4章	桥式交流斩波功率变换器建模分析	(60)
4.1	桥式交流斩波功率变换器数学模型	(60)
4.1.1	状态空间模型	(60)
4.1.2	能观性分析	(74)
4.2	本章小结	(74)

第5章 系统分析与控制方案设计	(76)
5.1 带积分器的串联超前-滞后校正	(76)
5.2 谐波消除算法设计	(79)
5.3 预测控制器设计	(81)
5.4 仿真分析与验证	(83)
5.4.1 带积分器的串联超前-滞后校正系统仿真分析	(83)
5.4.2 谐波消除前馈控制算法仿真分析	(84)
5.4.3 预测控制算法仿真分析	(86)
5.5 本章小结	(88)
第6章 交流斩波动态电压恢复器拓扑与控制研究	(89)
6.1 桥式交流斩波动态电压恢复器拓扑与工作模式	(91)
6.1.1 桥式交流斩波动态电压恢复器设计	(91)
6.1.2 桥式交流斩波动态电压恢复器换流策略设计	(92)
6.1.3 桥式交流斩波动态电压恢复器理论分析与计算	(95)
6.2 桥式交流斩波动态电压恢复器控制系统设计	(97)
6.3 仿真分析与验证	(98)
6.4 本章小结	(100)
第7章 实验平台设计与实现	(102)
7.1 实验平台总体方案	(102)
7.2 功率电路设计	(103)
7.2.1 功率变换主电路设计	(104)
7.2.2 驱动电路选型与设计	(105)
7.3 系统供电电源设计	(107)
7.4 信号处理系统设计	(110)



7.4.1	控制器设计与实现	(110)
7.4.2	信号检测与调理电路设计	(111)
7.4.3	保护电路设计	(113)
7.5	本章小结	(118)
第8章	测试与分析	(119)
8.1	桥式交流斩波功率变换器性能测试	(119)
8.1.1	阻性负载	(121)
8.1.2	阻容性负载	(122)
8.1.3	阻感性负载	(123)
8.1.4	非线性负载	(123)
8.1.5	功率变换效率分析	(123)
8.1.6	输出电压调节性能分析	(124)
8.2	动态电压恢复器性能测试	(125)
8.2.1	电源电压欠压、突降故障实验	(125)
8.2.2	电源电压过压、突升故障实验	(126)
8.3	本章小结	(127)
第9章	总结与展望	(128)
9.1	总结	(128)
9.2	本书的主要特点	(130)
9.3	研究展望	(131)
参考文献		(133)

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

交流功率变换是把一种形式的交流电变换成另外一种形式的交流电的技术。广义的交流 - 交流功率变换包括改变电压、电流、频率和相位等。从变换过程的角度,交流功率变换技术可分为直接交流变换技术(Direct AC to AC)和间接交流变换技术(Indirect AC to AC 或 AC - DC - AC)。从实现功能的角度可分为工频调压技术(包括交流相控调压和交流斩波调压)和变压变频技术(包括周波变换、矩阵变换等)两种^[1]。

交流斩波变换器基于直流斩波变换器原理,利用双向电力电子开关,直接对交流电能进行变换^[2]。基本的 DC - DC 变换器,只要实现功率开关的双向化,同时施以适当的控制方案,就可以实现 AC - AC 斩波变换,如图 1 - 1 所示。

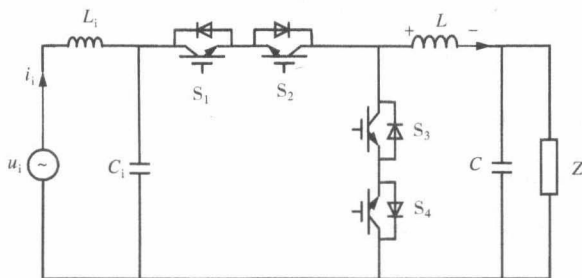


图 1 - 1 Buck 型交流斩波变换器功率电路



双向功率开关是实现直接 AC - AC 变换器的重要元件。受功率开关器件发展水平的限制,真正意义上的单体双向开关尚未出现。目前所进行的研究均采用由两个或多个单体功率管构成的组合式双向开关,其组合方式包括串联组合式和并联组合式。文献^[3]系统介绍了双向开关电路的分类,然后对双向晶闸管电路、交流斩波电路、矩阵变换器电路等典型的双向开关电路分别进行了分析和介绍,对于含有双向开关的一些其他电路也进行了简单介绍。

交流电压变换器被应用在诸多领域,包括电力系统、生活照明、工业加热、感应电机软启动与速度控制、高压静电除尘等方面。

早期交流电压变换器采用晶闸管触发角相位控制方式^[4],调节速度较慢,功率因数低,如图 1-2 所示。由于在调整输出电压的同时会产生大量的谐波电流,导致电网电能质量下降,配合使用的滤波电路体积大、成本高。随着电力电子技术的发展,人们开始不断研究新的

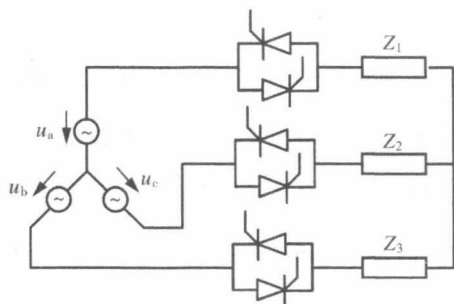


图 1-2 晶闸管相控交流电压调节器

的方案以克服晶闸管相控调压器的不足。DC - AC 逆变器、AC - DC - AC 间接交交变换器、矩阵式变换器以及交流斩波变换器都能够实现交流调压的功能,但各有优势和不足。

与 DC - AC、AC - DC - AC 变换器相比较,交流斩波变换器没有中间直流环节,是一种直接型 AC - AC 变换器。大容量电解电容或电感是中间直流环节所使用的储能元件。目前由于大多数变换器采用电压型逆变器(VSC)方案(图 1-3),需要使用大容量电解电容作为储能元件。由于电解电容的寿命受温度、电压等条件影响较大,电解电容寿命较短成为影响功率变换器寿命的主要因素。另外,大容量电解电容成本较高,这也提高了系统的维护成本。电解电容内部含有大量的化学电解材料,处理不当,会给环境带来严重的污染。交流斩波变换器正是由于不

使用大容量电解电容作为储能元件，避免了以上问题的出现，并且该变换器具有寿命长、成本低、绿色环保的特点。

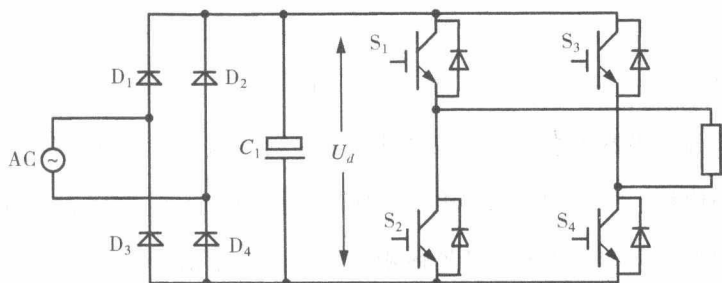


图 1-3 AC-DC-AC 交流功率变换器拓扑

矩阵式变换器是一种直接型 AC-AC 变换器，通过使用双向开关按照一定的开关策略和控制算法，直接对交流电进行功率变换。矩阵式变换器具有调压变频、双向功率变换、单位功率因数高等特点。矩阵式变换器与交流斩波变换器相比功能更多，但系统也更加复杂。单（三）相矩阵式变换器需要使用 8（18）个开关管（图 1-4），而单（三）相交流斩波变换器仅使用 4（12）个开关管。

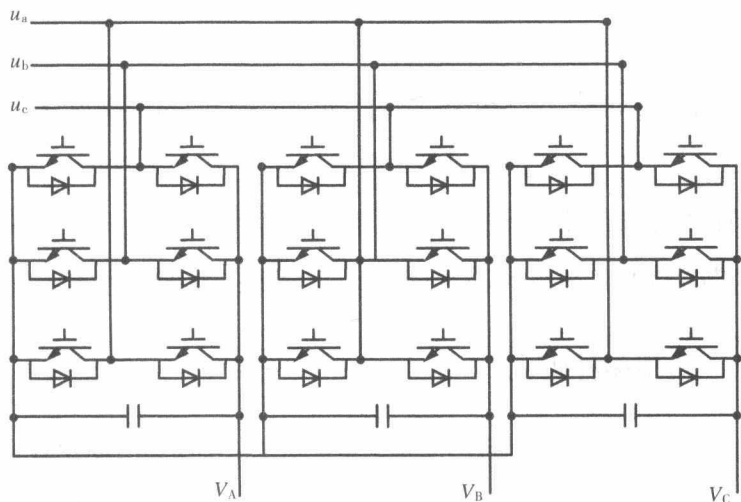


图 1-4 三相矩阵式变换器拓扑



由于使用开关器件数量多,矩阵式变换器成本较高,控制复杂。另外,矩阵式变换器的电压利用率较低,仅为 0.866,而交流斩波功率变换器的电压利用率为 1。在交流电压幅值调节领域,交流斩波变换器与矩阵式变换器相比具有结构简单、成本低、易于维护的特点。

交流斩波控制借鉴了直流斩波控制的思想,利用功率器件组成双向开关,通过控制开关导通信号占空比调节输出电压。使用这种功率变换方法所产生的谐波分布在开关频率附近,配套使用的滤波器体积与相控调压器相比较小。与传统的晶闸管相控电路或其他交流电压变换器相比,交流斩波功率变换器具有以下优点:

- (1) 输出电压谐波含量低,滤波器体积小,输出电压波形质量高。
- (2) 网侧电流波形正弦度好,网侧功率因数与负载功率因数相同。
- (3) 利用 PWM 控制信号调节输出电压,动态响应速度快。
- (4) 不包含中间变换环节的直接 AC-AC 变换,能达到较高的变换效率。
- (5) 不使用大容量电解电容或电感,体积小、重量轻、成本较低。基于以上特点,交流斩波功率变换器成为交流电压变换领域新的研究热点。

1.2 交流斩波功率变换器的研究现状

交流斩波功率变换器的研究主要包括新型斩波电路设计、缓冲电路设计、换流策略研究、数学模型、高频 AC-AC 变换、多电平变换等方面。

1.2.1 新型拓扑研究

交流斩波控制与晶闸管相位控制相比有许多突出的优点。交流斩波变换具有正弦波电流波形、更高的功率因数、更快的动态性能和更小的输入输出滤波器。

文献^[5]提出一种改进的交流斩波变换器,这种拓扑的主调制开关使用开关管并联整流桥结构,续流开关使用两个开关管。文献^[6]设计了该拓扑的实验方案,对系

统性能指标进行理论分析和实验验证。这种改进电路的优点是仅使用一个调制开关，易于实现。但是，其开关 PWM 信号需要根据电压、电流信号设计，换流过程复杂。

2003 年 Fang Zhengpeng 提出一系列简单拓扑 PWM 控制的 AC-AC 变换器，如 Buck、Boost、Buck-Boost、Cuk 和隔离变换器。这类变换器是基本 DC-DC 变换器的扩展，通过改变占空比控制，成为可以连续调节变比的固态变压器（图 1-5）。所提出 AC-AC 变换器仅使用两个双向开关，与六开关或是更多开关拓扑相比，能够降低损耗，提高可靠性^[2]。

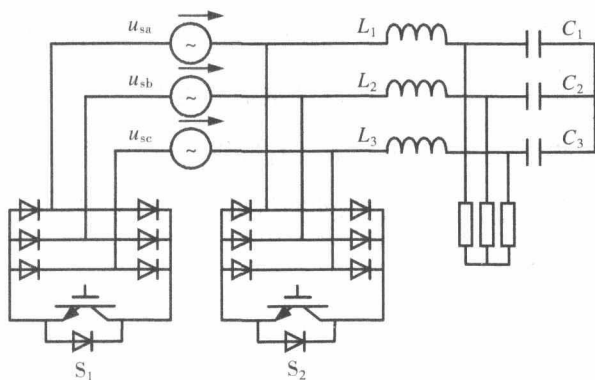


图 1-5 三相交流斩波 Buck 变换器

文献^[7]提出一种四象限高功率因数交流斩波变换器，该拓扑的主要优点是在控制信号有死区时间的情况下，解决了感性负载的换流问题。根据输入电压和输出电流的极性设计换流过程，同极性时工作在 Buck 状态，反极性时工作在反置的 Boost 状态，控制较为复杂。文献^[8]提出一种基于 dsPACE 平台的交流斩波变换器设计方案，实现零电流关断功能，减小开关损耗。在交流斩波器的输入侧和输出侧都安装了 LC 滤波器，以消除开关纹波与谐波。

以单相交流斩波电路为基础，文献^[9]提出一种新颖的交流斩波变换器拓扑及一种改进的交流斩波 PWM 控制方法。为了提高输出电压的波形质量，该方法采用了输出占空比前馈，并结合输出电压瞬时值反馈的双环控制方案。在该控制方案的基础上，实现交流模块的并联控制，并取得较好的并联效果。



1.2.1.1 换流策略研究

交流斩波器、矩阵式变换器等 AC - AC 变换器应用中的主要问题是换流过程中可能出现的电压尖峰或电流尖峰会影响变换器的稳定工作。文献^[10]提出一种根据电压相位设计的换流策略。该换流策略控制简单,易于实现,理论上不需要增加开关缓冲电路,能够实现变换器的稳定运行。

文献^[11]提出利用两相控制的三相 Buck - Boost 交流斩波变换器,在考虑开关管和电感功耗的条件下,分析了电路的特性。当感性负载增加时,由于感性元件谐振频率会发生变化,输入电流和输出电压的纹波会增大。利用输出滤波器电容变化,调节输出电路谐振频率,会使输出电压的谐波畸变得得到改善。文献^[12]提出一种 Buck - Boost 交流斩波变换器的实现方案,通过使用两个电感解决换流问题。该变换器在输入电压大范围波动情况下,仍然能得到较好的动态性能。

1.2.1.2 缓冲电路研究

文献^[13]提出和分析了一种使用能量回馈直流缓冲电路的 Buck - Boost 型拓扑。由于交流缓冲电路引起能量损失,而能量回馈直流缓冲电路理论上不消耗电能,因此该方案提高了变换效率。文献^[14]分别设计单相和三相 Buck - Boost 型交流斩波器功率电路。能量回馈直流缓冲电路与标准开关模块相连,被用来吸收线路电感中存储的能量,开关损耗减小,从而消除了 RC 缓冲引起的功率损耗。该文还研究了所提出交流斩波器的等效电路,推导出功率因数的表达式。

文献^[15]分别使用电容缓冲和电阻缓冲,给出了改进的换流电路,如图 1-6 所示。这种设计能够提高系统变换效率,但控制复杂,不易于工程实现。文献^[16]利用直流缓冲电容将输入滤波器电容分成两个部分,减小滤波器的容量。同时还研究了该电路的输入功率因数、输入电流谐波畸变和输出电压谐波畸变。文献^[17]提出对于电阻性负载,滤波器影响较小;对于电感性负载,由于输入、输出滤波器存在两个极点,波形畸变较大,输入滤波电容对于总谐波畸变(THD)的影响较大。文献^[18]研究了两开关 Buck 交流斩波变换器输入滤波电容对输入电流相位的影响。

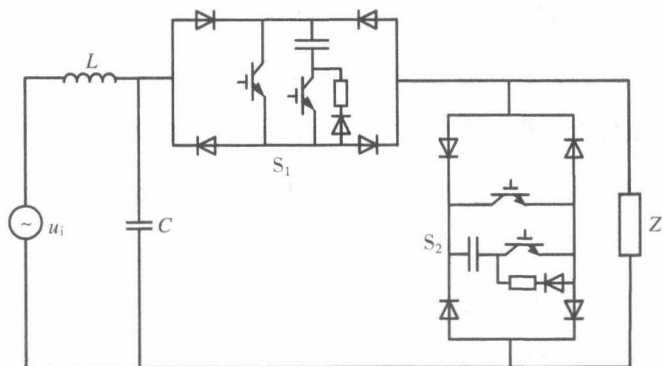


图 1-6 带有缓冲吸收电路的交流斩波功率变换器

1.2.1.3 高频交流环节研究

高频交流环节 AC-AC 变换技术,是电力电子学的前沿研究课题,也是实现新型正弦交流稳压器、电子变压器、交流调压器和同频波形变换器的关键技术基础。文献^[19,20]主要研究了新颖的高频交流环节 AC-AC 变换器电路结构与拓扑族设计、控制策略、稳态原理特性、关键电路参数选取、变换器性能比较。

相对于直流斩波调压电路中的高频斩波信号来说,工频交流电压可视为缓慢变化的直流电压。因此结合直流变压器电压变换的概念,采用直流变压器的串联和并联结构,可实现交流电能的比例变换。文献^[21]研究了高频耦合 AC-AC 变换器的电路结构和控制方案,并进行了仿真和实验验证。该 AC-AC 变换器方案的优点是:可对各种形状的低频电压进行比例变换、全部功率开关的 ZVS 开关、高变换效率、高功率密度、宽频带、适用于各种性质负载。

1.2.1.4 多电平技术研究

随着电力电子技术的不断发展,其应用领域不断向高电压、大功率电能变换拓展。在高压电能变换中,现有器件的电压等级往往不能满足装置的需要,多电平技术是解决这一问题的有效方法。多电平变换电路使用较多的电平数去逼近所希望的波形,使输出电压或电流的质量大大提高,谐波含量减少。文献^[22]介绍了三电平 PWM 交流斩波器的电路拓扑、工作原理,分析了输出电压的谐波含量。文献^[23]提出三电平交流斩波电路的中间电平对应着两种工作模式,虽然产生同样的电平,但



对于浮动电容充、放电的情况正好相反。利用这一特性分析了浮动电容电压的可控性,提出滞环比较方法控制浮动电容电压。文献^[24]在深入分析三电平交流斩波变换器工作原理的基础上,设计其闭环控制系统。与PI控制相比,频率积分控制响应速度快,跟踪效果好,结构简单,这种控制方法能够被应用于多种三电平交流斩波电路。

文献^[25]提出一种多电平交流斩波变换器的实现方案。通过与现有的控制方法进行比较,该文献提出的基于状态的控制方案,结构简单,易于实现。

1.2.2 控制技术研究

在新型拓扑研究基础上,我们对交流斩波电压变换器数学模型和控制方法也进行了大量的研究。所使用的控制方法包括电流滞环控制,基于经典控制理论的比例积分控制、周波控制、无差拍控制及单周控制等。

1.2.2.1 数学模型研究

由于电力电子器件的限制,早期交流斩波变换器使用大功率晶体管作为开关器件。文献^[26]研究了晶体管斩波变换器的稳态数学模型。在较大的工作范围内,文献^[26]的作者通过实验研究了系统性能特点、斩波频率对于系统性能的影响以及所产生的谐波问题。该文献提出在有效控制范围内,负载电流谐波成分可以忽略,该变换器可用于基波电流起主要作用的应用领域。

Buck型AC-AC直接变换器使用了较少的功率器件实现单级功率变换和能量双向流动,有利于提高变换器的功率密度和变换效率。文献^[27]给出其工作原理的详细分析,讨论该变换器的两种PWM调制策略。采用滞环电流控制的Buck型AC-AC直接变换器可对输入电压畸变进行有效抑制,保持输出正弦电压。为了进行稳态和暂态稳定性分析,文献^[28]建立了电子功率变压器数学模型。为简化阻尼振荡分析,不考虑高频变压器和滤波电感,该文献对暂态过程的动态模型进行了简化,通过仿真对简化动态模型和详细模型进行了对比,验证了所提出模型的准确性。