

Technology
实用技术

脉宽调制DC/DC 全桥变换器的软开关技术

(第二版)

阮新波 著



科学出版社

脉宽调制 DC/DC 全桥变换器的软开关技术 (第二版)

阮新波 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

脉宽调制(PWM) DC/DC 全桥变换器适用于中大功率变换场合,为了实现其高效率、高功率密度和高可靠性,有必要研究其软开关技术。本书系统阐述 PWM DC/DC 全桥变换器的软开关技术。系统提出 DC/DC 全桥变换器的一族 PWM 控制方式,并对这些 PWM 控制方式进行分析,指出为了实现 PWM DC/DC 全桥变换器的软开关,必须引入超前桥臂和滞后桥臂的概念,而且超前桥臂只能实现零电压开关(ZVS),滞后桥臂可以实现 ZVS 或零电流开关(ZCS)。根据超前桥臂和滞后桥臂实现软开关的方式,将软开关 PWM DC/DC 全桥变换器归纳为 ZVS 和 ZVZCS 两种类型,并讨论这两类变换器的电路拓扑、控制方式和工作原理。提出消除输出整流二极管反向恢复引起的电压振荡的方法,包括加入箝位二极管与电流互感器和采用输出倍流整流电路方法。介绍 PWM DC/DC 全桥变换器的主要元件,包括输入滤波电容、高频变压器、输出滤波电感和滤波电容的设计,介绍移相控制芯片 UC3875 的使用以及 IGBT 和 MOSFET 的驱动电路,给出一种采用 ZVS PWM DC/DC 全桥变换器的通讯用开关电源的设计实例。

本书是一本理论知识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、博士生和教师的学习参考书,也可供从事开关电源研究开发的工程技术人员借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

脉宽调制 DC/DC 全桥变换器的软开关技术—2 版/阮新波著. —北京:科学出版社,2012

ISBN 978-7-03-035495-2

I. 脉… II. 阮… III. 脉宽调制-变换器-开关电源 IV. TN624

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 209505 号

责任编辑:刘红梅 杨 凯 / 责任制作:董立颖 魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:王秋实

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

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>

北京佳艺恒彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 1 月第 二 版 开本:787×1092 1/16

2013 年 1 月第一次印刷 印张:14

印数:1—3 000 字数:257 000

定 价:39.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

第二版前言

时光荏苒。1999年9月,我和我的导师严仰光教授撰写的专著《脉宽调制 DC/DC 全桥变换器的软开关技术》在科学出版社出版,到今天,时间已悄然过去了13年。该书是基于我的博士学位论文和博士后研究报告整理而成的,出版后受到了国内高校电力电子技术领域的教师和同学的欢迎,也得到了电源研发人员的好评。由于出版时间已久,出版社无法多次重印,很多读者来信或打电话给我们,希望能给他们复印该书。网络上也出现了热心读者扫描后的电子版本,以供下载。所有这些,一方面给了我们很大的鼓励,另一方面也给了我们很大的压力。13年的时间,相关的技术已有新的发展,我们也在继续脉宽调制 DC/DC 全桥变换器软开关技术方面的研究。因此,我决定将《脉宽调制 DC/DC 全桥变换器的软开关技术》进行修订,以奉献给我们的同行。

这次的修订工作主要体现在以下几个方面:

(1) 对第1章进行了修改。保留了原来的1.1节;原来的1.2节是阐述全桥逆变器的不同控制方法及其特点,由于全桥逆变器与 DC/DC 全桥变换器有一定的区别,这次为了突出重点,删去了这部分内容;对原来的1.3节(现为1.4节)进行了适当修改,进一步突出 DC/DC 全桥变换器的基本工作原理。增加了1.2节隔离型 Buck 类变换器、1.3节输出整流方式。1.2节基于 Buck 变换器推导了各种隔离型 Buck 类变换器,包括正激变换器(含单管和双管)、推挽变换器、半桥变换器、全桥变换器,其目的是揭示这些隔离型 Buck 类变换器之间的相互关系。1.3节基于半波整流电路推导了全波整流电路、全桥整流电路和倍流整流电路,以揭示这三种整流电路之间的相互关系。1.4节介绍了不同控制方式下倍流整流电路的全桥变换器的工作原理。

(2) 对第4章进行了修改。对4.6节的参数设计进行了简化,以便于工程设计。对4.9节进行了更新,补充了近年来国内外在加辅助网络帮助开关管实现零电压开关的 PWM 全桥变换器方面的相关研究成果。

(3) 增加了3章新的内容,即第6章~第8章。第6章针对输出整流二极管反向恢复引起的电压振荡,在零电压开关 PWM 全桥变换器中增加两只箝位二极管,有效消除了输出整流二极管上的电压振荡。第7章在第6章的基础上,介绍利用电流互感器使箝位二极管电流快速复位的零电压开关 PWM 全桥变换器,以提高变换器的效率和可靠性。第8章介绍零电压开关 PWM 倍流整流全桥变换器,它不仅可以宽负载范围内实现零电压开关,而且可以避免输出整流二极管的反向恢复。

(4) 对原书的第7章(现为第10章)进行了适当修改,更新了实验结果。

(5) 删去了原书的第8章,将其部分内容整合到本书的第4章和第6章中。

(6) 原书第 2 章、第 3 章、第 5 章保留,第 6 章调整为第 9 章。

(7) 对所有的电路图和波形进行了重新绘制,以便于读者阅读。

本书新增加的内容是基于近年来我和我的博士生的研究成果撰写的,这些学生是:王建冈、刘福鑫、陈武、陈乾宏。他(她)们的努力付出丰富了本书的内容。我的学生张欣和李亚龙制作了新的原理样机,更新了第 10 章的实验结果。在此,衷心感谢我的学生们!

南京航空航天大学丁道宏教授和严仰光教授在百忙之中详细认真审阅了全部书稿,提出了许多宝贵建议,华中科技大学王学华博士认真校阅了全部书稿,在此一并表示衷心的感谢!

本书的出版得到了科学出版社的大力支持,科学出版社的刘红梅女士和杨凯先生为本书的出版做了大量工作,特此致谢!

作 者

2012 年 8 月

第一版前言

电力电子技术近年来发展迅猛,随着通讯技术和电力系统的发展,对通讯用开关电源和电力操作电源的性能、重量、体积、效率和可靠性提出了更高的要求。为了满足这些要求,软开关技术应运而生,许多学者先后提出了谐振变换器(Resonant Converter)、准谐振变换器(Quasi-Resonant Converter)和多谐振变换器(Multi-Resonant Converter),它们实现了开关管的零电压开关(Zero-Voltage-Switching, ZVS)或零电流开关(Zero-Current-Switching, ZCS),减小了开关损耗,提高了变换器的变换效率,开关频率大大提高,减小了体积和重量。但是这些变换器的电流和/或电压应力较大,而且要采用频率调制(Frequency Modulation),不利于优化设计滤波器。为了保留谐振变换器的优点,实现开关管的软开关,同时采用 PWM 控制方式,实现恒定频率调节,利于优化设计滤波器,20 世纪 90 年代出现了零转换变换器(Zero-Transition Converter)。所谓零转换变换器,就是只是在开关管开关过程中变换器工作在谐振状态,实现开关管的零电压开关或零电流开关,其他时间均工作在 PWM 控制方式下。

由于单管构成的变换器,如 Buck、Boost、Cuk、Forward、Flyback 等一般适用于中小功率的应用场合,而全桥变换器则适用于中大功率应用场合,特别是通讯用开关电源和电力操作电源,因此研究其软开关技术具有十分重要的意义。

本书作者阮新波于 1993 年攻读博士学位开始到 1998 年博士后出站,一直师从导师严仰光教授,不间断地研究 PWM DC/DC 全桥变换器的软开关技术,历时近六年。在这段时间,我们与国内许多电源专业厂商和研究机构有过十分愉快的合作和交流。在作者获得博士学位后,博士论文《移相控制零电压开关 PWM 变换器的研究》受到许多同行的关注,他们多次鼓励作者,希望我们以博士论文为蓝本,将我们的研究内容整理出版,奉献给从事电源技术研究的同行们。我们诚惶诚恐,一直不敢这样做,主要是我们的研究还比较肤浅,惟恐辜负大家的期望。1998 年 6 月,作者完成《PWM DC/DC 全桥变换器的软开关技术研究》博士后研究报告,再次受到鼓励。几经考虑,作者斗胆将这两篇论文重新整理成书,奉献同行,希望没有让大家失望。我们也希望电力电子和电源界的各位前辈和同行批评指正,提出宝贵意见和建议。

本书共分 8 章,第 1 章介绍电力电子变换器的基本类型和 PWM DC/DC 全桥变换器的基本工作原理。第 2 章系统地提出 PWM DC/DC 全桥变换器的 9 种控制方式,归纳出两类开关切换方式,引入超前桥臂和滞后桥臂的概念,提出超前桥臂和滞后桥臂实现软开关的原则及策略,将 PWM DC/DC 全桥变换器归纳为 ZVS PWM DC/DC 全桥变换器和 ZVZCS PWM DC/DC 全桥变换器两种类型。第 3 章和第 4

章讨论 ZVS PWM DC/DC 全桥变换器的电路结构、控制方式和工作原理。第 5 章讨论 ZVZCS PWM DC/DC 全桥变换器的电路结构、控制方式和工作原理。第 6 章讨论 PWM DC/DC 全桥变换器的主要元件,包括输入滤波电容、高频变压器、输出滤波电感和滤波电容的设计,介绍目前常用的移相控制芯片 UC3875 的使用,同时提出一种适用于 IGBT 和 MOSFET 的驱动电路。第 7 章讨论一种采用 ZVS PWM DC/DC 全桥变换器的通讯用开关电源的设计实例。第 8 章介绍软开关 PWM DC/DC 全桥变换器的其他一些电路拓扑。

本书第 1 章由严仰光教授执笔,其他各章由阮新波博士执笔。

清华大学蔡宣三教授和南京航空航天大学丁道宏教授在百忙之中详细认真审阅了全部书稿,提出了许多宝贵建议,南京航空航天大学甘鸿坚博士认真校阅了全部书稿,在此一并表示衷心的感谢。

本书的出版得到了中国电源学会秘书长倪本来先生和科学出版社的大力支持,科学出版社 6 室的张建荣老师和汤秀娟老师为本书的出版做了大量工作,深圳驰源实业有限公司为本书的出版提供了经济资助,特此致谢。

作 者

1999 年 2 月于南京航空航天大学

目 录

第 1 章 全桥变换器的基本结构及工作原理	1
1.1 概 述	1
1.1.1 电力电子技术的发展方向	1
1.1.2 电力电子变换器的分类与要求	1
1.1.3 直流变换器的分类与特点	2
1.2 隔离型 Buck 类变换器	3
1.2.1 正激变换器	3
1.2.2 推挽变换器	5
1.2.3 半桥变换器	7
1.2.4 全桥变换器	9
1.2.5 几种隔离型 Buck 类变换器的比较	10
1.3 输出整流电路	12
1.3.1 半波整流电路	12
1.3.2 全波整流电路	13
1.3.3 全桥整流电路	14
1.3.4 倍流整流电路	16
1.4 全桥变换器的基本工作原理	18
1.4.1 全桥变换器的电路拓扑	18
1.4.2 全桥变换器的控制方式	18
1.4.3 采用全波整流电路和全桥整流电路的全桥变换器的基本工作原理	20
1.4.4 采用倍流整流电路的全桥变换器的基本工作原理	22
本章小结	27
第 2 章 全桥变换器的 PWM 软开关技术理论基础	29
2.1 全桥变换器的 PWM 控制策略	29
2.1.1 基本 PWM 控制策略	29
2.1.2 开关管导通时间的定义	31
2.1.3 全桥变换器的 PWM 控制策略族	32
2.2 全桥变换器的两类 PWM 切换方式	34
2.2.1 斜对角两只开关管同时关断	34
2.2.2 斜对角两只开关管关断时间错开	35
2.3 全桥变换器的 PWM 软开关实现原则	38

2.4 全桥变换器的两类 PWM 软开关方式	39
本章小结	39
第 3 章 零电压开关 PWM 全桥变换器	41
3.1 ZVS PWM 全桥变换器电路拓扑及控制方式	41
3.1.1 滞后桥臂的控制方式	41
3.1.2 超前桥臂的控制方式	42
3.1.3 ZVS PWM 全桥变换器的控制方式	43
3.2 移相控制 ZVS PWM 全桥变换器的工作原理	44
3.3 两个桥臂实现 ZVS 的差异	48
3.3.1 实现 ZVS 的条件	48
3.3.2 超前桥臂实现 ZVS	49
3.3.3 滞后桥臂实现 ZVS	49
3.4 实现 ZVS 的策略及副边占空比的丢失	49
3.4.1 实现 ZVS 的策略	49
3.4.2 副边占空比的丢失	50
3.5 整流二极管的换流情况	51
3.5.1 全桥整流电路	51
3.5.2 全波整流电路	52
3.6 仿真结果与讨论	53
本章小结	56
第 4 章 采用辅助电流源网络的移相控制 ZVS PWM 全桥变换器	57
4.1 引言	57
4.2 电流增强原理	58
4.3 辅助电流源网络	59
4.4 采用辅助电流源网络的 ZVS PWM 全桥变换器的工作原理	61
4.5 滞后桥臂实现零电压开关的条件	66
4.6 参数设计	67
4.6.1 辅助电流源网络的参数选择	67
4.6.2 L_r 、 C_r 和 I_c 的确定	67
4.6.3 设计实例	68
4.7 副边占空比丢失及死区时间的选取	69
4.7.1 副边占空比的丢失	69
4.7.2 滞后桥臂死区时间的选取	69
4.7.3 与只采用饱和电感方案的比较	70
4.8 实验结果	72
4.9 采用其他辅助电流源网络的 ZVS PWM 全桥变换器	74
4.9.1 辅助电感电流幅值不可控的辅助电流源网络	74
4.9.2 辅助电感电流幅值可控的辅助电流源网络	76

4.9.3	辅助电感电流幅值与原边占空比正相关的辅助电流源网络	77
4.9.4	辅助电流源幅值自适应变化的辅助电流源网络	78
4.9.5	谐振电感电流自适应变化的辅助网络	83
	本章小结	84
第 5 章	ZVZCS PWM 全桥变换器	85
5.1	ZVZCS PWM 全桥变换器电路拓扑及控制方式	85
5.1.1	超前桥臂的控制方式	85
5.1.2	滞后桥臂的控制方式	86
5.1.3	电流复位方式	87
5.1.4	ZVZCS PWM 全桥变换器电路拓扑及控制方式	90
5.2	ZVZCS PWM 全桥变换器的工作原理	91
5.3	参数设计	94
5.3.1	阻断电容电压最大值	94
5.3.2	实现超前桥臂 ZVS 的条件	95
5.3.3	最大副边有效占空比 D_{effmax}	95
5.3.4	实现滞后桥臂 ZCS 的条件	96
5.3.5	滞后桥臂的电压应力	96
5.3.6	阻断电容的选择	96
5.4	设计实例	96
5.4.1	变压器匝比的选择	96
5.4.2	阻断电容容值的计算	97
5.4.3	变压器变比和阻断电容容值的校核	97
5.4.4	超前桥臂开关管并联电容的选择	98
5.5	实验结果	98
	本章小结	100
第 6 章	加箝位二极管的零电压开关全桥变换器	101
6.1	引 言	101
6.2	ZVS PWM 全桥变换器中输出整流二极管电压振荡的原因	102
6.3	输出整流二极管上电压振荡的抑制方法	104
6.3.1	RC 缓冲电路	104
6.3.2	RCD 缓冲电路	105
6.3.3	有源箝位电路	105
6.3.4	变压器辅助绕组和二极管箝位电路	106
6.3.5	原边侧加二极管箝位缓冲电路	106
6.4	Tr-Lead 型 ZVS PWM 全桥变换器的工作原理	107
6.5	Tr-Lag 型 ZVS PWM 全桥变换器的工作原理	112
6.6	Tr-Lead 型和 Tr-Lag 型 ZVS PWM 全桥变换器的比较	117
6.6.1	箝位二极管的导通次数	117

6.6.2 开关管的零电压开关实现	117
6.6.3 零状态时的导通损耗	118
6.6.4 占空比丢失	118
6.6.5 隔直电容的影响	118
6.7 实验结果和分析	121
本章小结	124
第7章 利用电流互感器使箝位二极管电流快速复位的 ZVS PWM 全桥变换器	127
7.1 引言	127
7.2 加箝位二极管的 ZVS PWM 全桥变换器轻载时的工作情况	128
7.3 箝位二极管电流的复位方式	135
7.3.1 复位电压源	135
7.3.2 复位电压源的实现	136
7.4 加电流互感器复位电路的 ZVS PWM 全桥变换器的工作原理	138
7.4.1 重载情况	138
7.4.2 轻载情况	142
7.5 电流互感器匝比的选择	147
7.5.1 箝位二极管的复位时间	147
7.5.2 输出整流二极管的电压应力	148
7.5.3 电流互感器匝比	148
7.6 实验验证	148
本章小结	152
第8章 倍流整流方式 ZVS PWM 全桥变换器	153
8.1 引言	153
8.2 工作原理	154
8.3 超前管和滞后管实现 ZVS 的情况	158
8.4 参数设计	159
8.4.1 变压器变比 K 的确定	159
8.4.2 滤波电感量的计算	160
8.4.3 阻断电容的选择	162
8.5 实验结果	163
本章小结	166
第9章 PWM 全桥变换器的主要元件、控制芯片及驱动电路	167
9.1 引言	167
9.2 输入滤波电容的选择	167
9.3 高频变压器的设计	169

9.3.1	原副边变比	169
9.3.2	确定原边和副边匝数	169
9.3.3	确定绕组的导线线径	170
9.3.4	确定绕组的导线股数	170
9.3.5	核算窗口面积	171
9.4	输出滤波电感的设计	171
9.4.1	输出滤波电感	171
9.4.2	输出滤波电感的设计	172
9.5	输出滤波电容的选择	173
9.5.1	输出滤波电容量	173
9.5.2	输出滤波电容的耐压值	173
9.6	UC3875 芯片的使用	173
9.6.1	工作电源	173
9.6.2	基准电源	174
9.6.3	振荡器	175
9.6.4	锯齿波	175
9.6.5	误差放大器和软启动	175
9.6.6	移相控制信号发生电路	176
9.6.7	过流保护	176
9.6.8	死区时间设置	176
9.6.9	输出级	177
9.7	驱动电路	177
9.7.1	中小功率 PWM 全桥变换器中 MOSFET 和 IGBT 的驱动电路	177
9.7.2	大功率 PWM 全桥变换器中 MOSFET 和 IGBT 的驱动电路	179
	本章小结	183
第 10 章	54V/10A 通信电源设计实例	185
10.1	主电路结构	185
10.2	控制电路和保护电路	187
10.3	驱动电路	190
10.4	电流检测电路	191
10.5	参数选择	192
10.5.1	输入滤波电容	192
10.5.2	高频变压器	192
10.5.3	谐振电感	194
10.5.4	输出滤波电感	196
10.5.5	输出滤波电容	197
10.5.6	主功率管的选择	197
10.5.7	输出整流二极管的选择	198
10.6	实验结果和讨论	198

本章小结	201
附录 CDR ZVS PWM 全桥变换器工作在 DCM 时 $I_{L_{fmin_DCM}}$ 、 $I_{L_{fmax_DCM}}$ 和 I_G 的推导	203
参考文献	207

第 1 章

全桥变换器的基本结构及工作原理

1.1 概 述

1.1.1 电力电子技术的发展方向

高频电力电子技术是电力电子学的一个重要发展方向,是使电力电子变换器更好地实现基本要求诸多方面的重要技术途径。开关器件和元件(磁芯和电容)的高频化是高频电力电子学的基础,功率场效应晶体管(MOSFET)和绝缘栅双极性晶体管(IGBT)已成为现代高频电力电子学的主要开关器件,低栅荷、低结电容的场效应晶体管,进一步促进了高频电力电子技术的发展。近年来,SiC 器件,包括 SiC 二极管^[1]、SiC MOSFET 和 SiC IGBT^[2],已取得较大进展,并已形成商用产品,在中等功率场合已有取代硅基快恢复二极管和 MOSFET 的趋势。为了进一步提高开关频率,GaN 器件已开始引起人们的注意。非晶、微晶磁芯和高温铁氧体最近也取得了重要的进展。电力电子变换器电路拓扑的发展,是高频电力电子学的另一个重要方面,谐振变换器(Resonant Converter)^[3, 4]、准谐振变换器(Quasi-Resonant Converter)^[5]和多谐振变换器(Multi-Resonant Converter)技术^[5, 6],零电压开关(Zero-Voltage-Switching, ZVS)脉宽调制(Pulse-Width Modulation, PWM)^[7]和零电流开关(Zero-Current-Switching, ZCS) PWM 技术^[8],零电压转换(Zero-Voltage-Transition, ZVT)^[9]和零电流转换(Zero-Current-Transition, ZCT)技术^[10],以及谐振直流环节逆变器(Resonant DC Link Inverter, RDCLI)技术^[11]等部分或全部实现了变换器中开关器件的 ZVS 或 ZCS,大大降低了开关器件的开关损耗,由此可以使功率器件的开关频率提高一个数量级,甚至更多。电力电子变换器的高频化是和小型化、模块化紧密相关的,而这又与变换器的高效率及结构的高绝缘性能和高导热性能联系在一起。因而高频电力电子技术是随高频开关器件和元件、ZVS 或 ZCS 电路拓扑和装置的结构、材料与工艺的发展而发展的。

1.1.2 电力电子变换器的分类与要求

电力电子变换器是应用电力电子器件将一种电能变换为另一种或多种形式电能

的装置。按变换电流的种类,电力电子变换器可分为四种类型^[12]:①DC/DC变换器,它是将一种直流电变换成另一种或多种直流电,一般简称直流变换器;②DC/AC逆变器,它是将直流电变换为交流电,一般简称逆变器;③AC/DC变换器,它是将交流电变换为直流电,又称整流器;④AC/AC变换器,它是将一种频率的交流电直接变换成另一种或可变频率的交流电,或将频率变化的交流电直接变换为恒定频率交流电,又称交交变频器。这四类变换器可为单向或双向电能变换器,单向变换器的电能只能从一个方向向另一个方向流动,而双向电能变换器中能量可双向流动。

对电力电子变换器最基本的要求是电气性能好,必须满足相关的技术指标或技术规范要求。在满足电气性能好的情况下,电力电子变换器应满足“三高一低”的要求,即效率高、功率密度高、可靠性高、成本低。效率高不仅可以节约电能,还可以降低散热要求,减小散热器的尺寸和重量。功率密度高,是指在输出相同功率时,电力电子变换器的体积要小,这在航空航天应用场合尤为重要。可靠性高,就是要求电力电子变换器能适应各种恶劣工作条件,有足够长的平均故障间隔时间。成本低,就是要求降低电力电子变换器的研制、开发、生产、试验和使用维修费用,提高其市场竞争力。除此之外,还要求电力电子变换器具有易维修性,即减少对维修人员的技术要求和维修时间短。

1.1.3 直流变换器的分类与特点

直流变换器是电力电子变换器的一个重要部分。随着电力电子技术、计算机科学与技术 and 信息技术的发展,以直流变换器为核心的开关电源应用越来越广,一直得到各国电力电子专家和学者的重视,是目前电源产业的重要方向之一。

按照输入输出是否具有电气隔离功能,直流变换器可分非隔离型和隔离型两类。最基本的非隔离型直流变换器有六种,即降压式(Buck)、升压式(Boost)、升降压式(Buck-Boost)、库克(Cuk)、瑞泰(Zeta)和赛皮克(SEPIC)等。另外还有双管升降压式变换器(Dual-Switch Buck-Boost)、全桥变换器(Full-Bridge)等。

隔离型直流变换器可以看成由非隔离型直流变换器加入变压器及相关整流电路推导而来。隔离型 Buck 类直流变换器包括正激(Forward)、推挽(Push-Pull)、半桥(Half-Bridge)和全桥变换器,其中正激变换器包括单管正激变换器和双管正激变换器(Dual-Switch Forward)。隔离型 Boost 类直流变换器包括推挽、半桥和全桥变换器。隔离型 Buck-Boost 类直流变换器即反激变换器(Flyback),它包括单管反激变换器和双管反激变换器(Dual-Switch Flyback)。库克(Cuk)、瑞泰(Zeta)和赛皮克(SEPIC)等变换器也有相应的隔离型电路。

功率开关管的电压和电流定额相同时,变换器的输出功率通常与所用功率开关管数成正比,故双管隔离型直流变换器(如双管正激、推挽、半桥)的输出功率为单管

(如单管正激)的 2 倍,为全桥变换器(有 4 只开关管)的一半。故全桥变换器是直流变换器中功率最大的,在高输入电压和中大功率场合得到广泛应用。

谐振式、准谐振和多谐振技术是不需外加功率开关管实现变换器功率开关管的 ZVS 或 ZCS 的技术,但是这类软开关技术不同于 PWM 技术,有器件应力高、循环能量大和变频控制等缺点。ZVS-PWM 和 ZCS-PWM 技术实现了恒频控制,但是主开关管和辅助开关管的开关应力依然很大,ZVT 或 ZCT 技术具有恒频控制的特点,但需要外加辅助功率器件,且该器件仅用于实现主功率器件的零电压转换或零电流转换,不能增加变换器的有功输出。在直流变换器中,双管和四管变换器可以利用多个主功率器件自身来实现 ZVT 或 ZCT,同时可输出大的功率,这是多管隔离型直流变换器得到广泛应用的重要原因,也是本书的出发点,即本书以隔离型 Buck 类全桥变换器为对象,系统阐述其软开关技术。为简单起见,以下将隔离型 Buck 类全桥变换器简称为全桥变换器。

1.2 隔离型 Buck 类变换器

为了帮助读者深入理解各种隔离型 Buck 类变换器的基本特点及其相互关系,本节首先给出单管正激变换器的推导过程,在此基础上,推导出双管正激变换器、推挽变换器、半桥变换器和全桥变换器。

1.2.1 正激变换器

1. 单管正激变换器的推导

Buck 变换器是直流变换器中最基本的电路拓扑,如图 1.1(a)所示,其中 V_{in} 为输入电压, Q 为开关管, D_{FW} 为续流二极管, L_f 和 C_f 分别为输出滤波电感和输出滤波电容。为了实现输入和输出的电气隔离,可以在开关管 Q 和续流二极管 D_{FW} 之间插入一个变压器 T_r ,如图 1.1(b)所示。变压器 T_r 的原边和副边绕组的匝数分别为 N_p 和 N_s ,原副边匝比 $K=N_p/N_s$ 。当 Q 导通时,输入电压 V_{in} 加在变压器原边绕组上,变压器被磁化,其励磁磁通 ϕ_m 线性增加。当 Q 截止时,滤波电感电流经 D_{FW} 续流,变压器副边绕组被短路,其两端电压为零,相应地,原边绕组电压也为零,这样变压器的励磁磁通 ϕ_m 保持不变。因此,在一个开关周期内,变压器的励磁磁通是增大的,如果这样持续下去,励磁磁通将会一直增大,直到变压器饱和,这会导致功率器件过流损坏。图 1.2(a)给出了变压器原边电压 v_p 和励磁磁通 ϕ_m 的波形。

为了防止变压器饱和,必须在每个开关周期结束之前使变压器的磁通减小到零,即使变压器磁复位。为此,需要加入一个磁复位电路,它在 Q 截止时,让变压器原边绕组上得到一个负的电压,如图 1.2(b)中的阴影部分所示。但此时变压器的副边电

压也为负,使续流二极管 D_{FW} 导通,从而造成变压器副边绕组短路。为了避免这个问题,可以在副边绕组中串入一只二极管 D_R ,如图 1.1(c)所示。如果磁复位电路由复位绕组 N_r 和复位二极管 D_r 构成,并且将图 1.1(c)中的开关管 Q 与变压器原边绕组交换位置,即可得到最基本的单管正激变换器,如图 1.1(d)所示。在实际应用时,一般让复位绕组和原边绕组的匝数相等,则开关管电压应力为 $2V_{in}$,而开关管的最大占空比为 0.5,以保证变压器可靠磁复位。

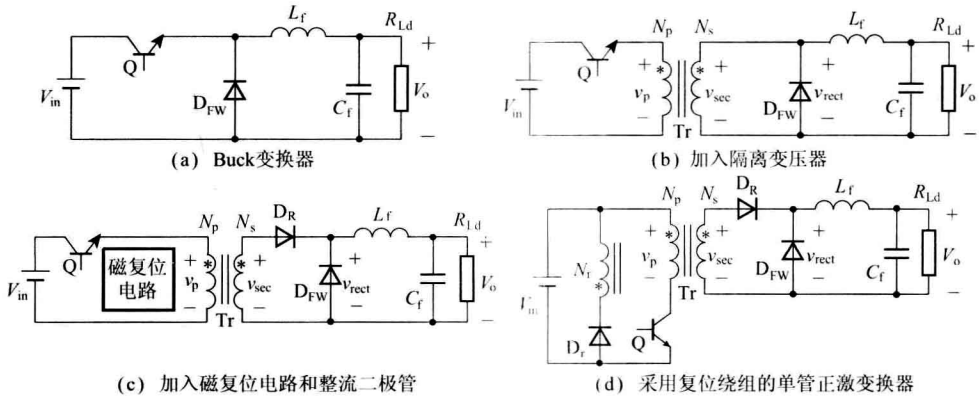


图 1.1 单管正激变换器的推导

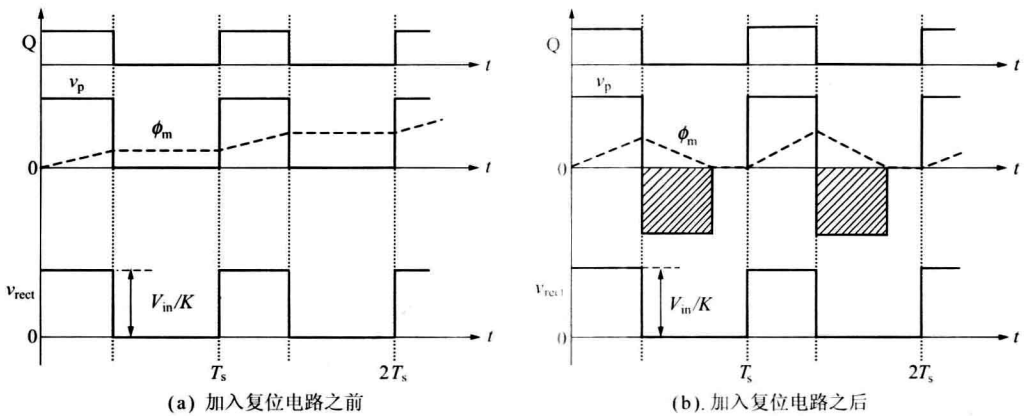


图 1.2 加入复位电路前后变压器原边电压和励磁磁通波形

2. 双管正激变换器的推导

由于单管正激变换器的开关管的电压应力是输入电压的 2 倍,因此它比较适用于输入电压较低的变换场合,当输入电压较高时,可能难以获得电压定额合适的功率器件。比如,输入为单相 $220V \pm 20\%$ 的交流电压,采用功率因数校正(Power Factor Correction, PFC)变换器时,其整流滤波后的直流电压将达到 380V,这样开关管的电压应力为 760V,这时必须采用电压定额为 1000V 以上的功率管。这一功率等级的 MOSFET 的高频性能较差,导通电阻 $R_{ds(on)}$ 也较大。当然,开关管也可以选用 IGBT,但 IGBT 存在电流拖尾,其开关频率不能太高,否则关断损耗较大,变换效率较低。