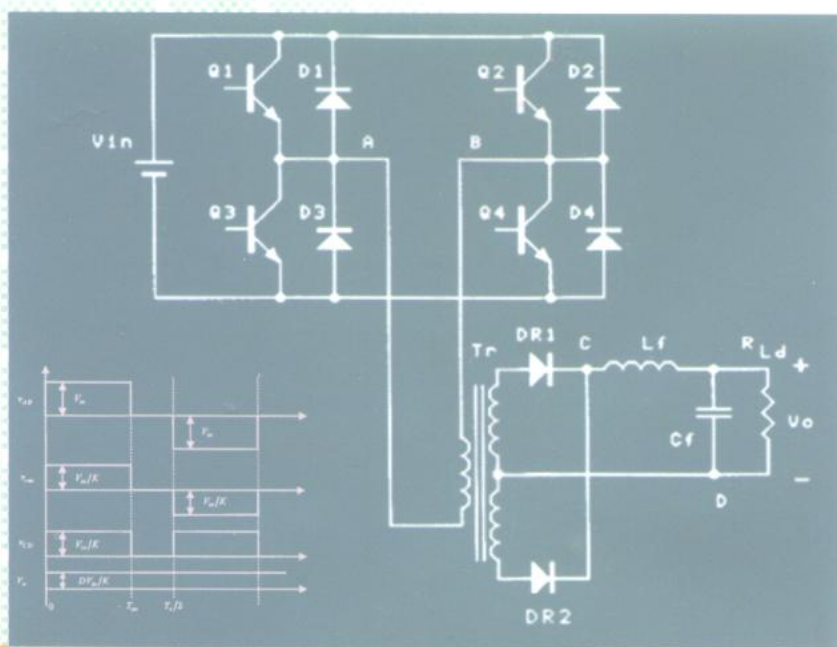


实用电源技术丛书

脉宽调制DC/DC全桥变换器的软开关技术

# 脉宽调制 DC/DC 全桥变换器的软开关技术

阮新波 严仰光 著



科学出版社

科

11624  
100

实用电源技术丛书

# 脉宽调制 DC/DC 全桥变换器的 软开关技术

阮新波 严仰光 著

科学出版社

1999

## 内 容 简 介

脉宽调制(PWM)DC/DC全桥变换器广泛应用于中大功率场合,因此研究其软开关技术具有十分重要的意义。本书共分八章,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,系统地提出它的九种控制方式,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,并讨论了这两类变换器的电路结构、控制方式和工作原理。本书还分析了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,介绍了移相控制芯片UC3875的使用,同时介绍了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,并介绍了软开关PWM DC/DC全桥变换器的其他一些电路拓扑。

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、博士生和教师的参考书,也可供从事开关电源研究开发的工程技术人员参考使用。

### 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/阮新波,严仰光著.-北京:科学出版社,1999

(实用电源技术丛书)

ISBN 7-03-007499-8

I. 脉… II. ①阮… ②严… III. 变换器-控制开关  
IV. TN624

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第10483号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号  
邮政编码:100717

新 蕾 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1999年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16  
1999年9月第一次印刷 印张:8 3/4  
印数:1—3 000 字数:187 000

定 价:13.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

## 序 言

什么是电源? 很难用一句话概括。但是, 现代人谁能离得开电源? 衣食住行离不开电源, 文化娱乐、办公学习、科学研究、工农业生产、国防建设、教育、环境保护、医疗卫生、交通运输、照明、通讯、宇宙探索等等, 哪一样能少得了电源? 只要用电就离不了电源。绝大部分的电是由发电厂生产发送的, 称为市电。白炽灯、电炉、交流电动机等只要接通市电就行; 计算机、电视机、X 光机等虽然也是打开开关就能工作, 但是这些机器里面都已经做了电能变换处理, 将正弦波的交流市电转换成各自需要的直流电、高压电、脉冲电; 在无法提供市电的岛屿、车船上, 可以用蓄电池经过电能变换获得跟市电一样的交流电, 让计算机、仪器设备等工作起来; 进入太空的卫星、飞行器, 把太阳能收集起来, 再经过电能变换, 获得需要的各种电能来维持长期运行; 电能是宝贵的资源, 需要珍惜和节约。绿色照明的节能荧光灯、高光效的 HID 灯电子镇流器, 是经过功率因数校正和高频化处理的电源装置, 既省电又净化了电网; 交流电动机经过频率变换即所谓变频调整速实现了电动机科学运转及电能的合理使用; 水力发电、火力发电、核电站是电的主要来源。太阳光、风力、沼气、潮汐、生物能、化学能等等在特定环境里也能发电, 作为电力的补充, 这些补充发电需要经过 DC/DC 和 DC/AC 电能变换使其便于储存, 并转换成与电网频率一致的正弦波。电网不稳定给用电设备带来许多麻烦, 甚至无法正常工作; 太阳、风力受四季和天气影响, 发出的电更是不稳, 很多场合需要稳压供电, 这有赖于电能变换加以调整。总括起来, 所谓电源乃是利用电能变换技术将市电或电池等一次电能转换成适合各种用电对象的二次电能的系统或装置。

上述电能变换主要体现在变压、调压, 整流、滤波, 稳定, 变换等。而这些基本的电能变换是通过一系列的技术方法实现的, 并且这些技术方法分别适用于不同的环境条件和要求。

**变压:** 变压器是交流变压最常用的装置, 相位控制也能完成交流变压, 线性补偿、频率变换、时间分割 (脉冲宽度调制, 即著名的 PWM) 等都能实现变压。直流变压最常用的手段就是 DC/DC 变换, 无源和有源分压器是小功率直流变压较简便的方法。

**调压:** 在变压的基础上加以步进和连续的设置就成为调压。根据需要可以手动、自动或遥控。

**整流:** 整流是最早使交流电转换成直流电的方法。利用单相性的无源器件来实现则最简单, 利用有源开关的同步整流器能将整流器的损耗减至极小。

**滤波:** 滤波为获得平滑的直流, 可以通过无源或有源的滤波电路来实现。

**稳定:** 将变压或调压引入自动负反馈控制, 就能使之稳定。若反馈量分别是电压、电流、功率、频率、相位, 则响应获得稳压、稳流、恒功率、稳频、稳相的稳定电源。

**变换:** 变换的特定含义是由一种状态转变到另一种状态。比如交流-直流之间的转换; 正弦波、方波、三角波、梯形波、脉冲波、特物波等波形转换; 低频-高频转换; 光、热、机械、风、磁、理化等能量与电能之间的转换。

电能变换涉及的技术非常多,常见的有参数稳压、线性反馈稳压、磁放大器技术、数控调压技术、相控技术、变频、PWM、SPWM、软开关 PWM、移相谐振、无功补偿、功率因数校正、裂相、电流均分、传感采样、驱动保护、储能、充电、抗干扰、电磁兼容等等。实际需要推动这些技术不断发展和进步,使电源装置能满足负载各种各样的需求。

造就这些电源装置还需要专用的元器件和材料。电能变换用到的器材有功率开关器件、专用的集成电路、软磁材料以及外围无器件等。由于很多电源装置结构相当复杂,为简化设计而出现的集功率开关、变换控制电路、传感保护电路为一体的智能功率集成模块受到欢迎。

厚膜集成的电源模块、积木式的功能模块,灵活机动,既能单独使用,又能相互组合成较大的电源系统。在这里器件和整机的界限已相当模糊。

不同的负载要求不同的电源装置,万能的电源至少今天还未出现。一个特定用途的电源装置,应当具有符合负载要求的性能参数和外特性,这是基本的要求。安全可靠是必须加以保证的。高效率、高功率因数、低噪音是普遍关注的品质。无电网污染、无电磁干扰、省电节能等绿色指标是全球范围的热门话题,并有相关的国际和国家标准规范进行约束。有时特定的使用环境又要求电源具备一些额外的适应性能力,比如高温、高寒、高湿、抗辐射、抗振动、防爆、体积小、重量轻、智能化等。

电源技术发展到今天,已融汇了电子、功率集成、自动控制、材料、传感、计算机、电磁兼容、热工等诸多技术领域的精华,已从多学科交叉的边沿学科成长为独树一帜的功率电子学。

电源技术又是实用性极强的技术,服务于各行各业、各个领域的各式各样的负载,它们的性能特点以及采用的技术方法千差万别,这就造就了电源技术的丰富内涵。

由中国电源学会和科学出版社联合组织出版的《实用电源技术丛书》将展示多彩的电源世界,帮助读者全面了解当今电源的方方面面,并希望读者能从这套丛书中获得启示,在实际工作中找到最佳的电源方案。为此,丛书的选题为求从实际需要出发,内容突出实用性、新颖性和广泛性,写作侧重于原理阐述、实例解剖和经验介绍。我们将尽力让《实用电源技术丛书》成为广大读者的良师益友,但是,电源技术浩若湮海,有限的书目实难尽述。另外,电源的新技术不断涌现,且成长周期相当短,作者的实践有限,谬误之处在所难免,敬请读者指正。

《实用电源技术丛书》编辑委员会

## 《实用电源技术丛书》编辑委员会

顾 问:蔡宣三 丁道宏  
主 任:倪本来  
副主任:王鸿麟 张建荣 侯振程  
委 员:马传添 马鹤亭 区键昌 刘凤君 庄蕃田  
李厚福 李朔生 李宗光 陈 坚 严仰光  
张 立 张广明 张志国 张 嵘 张承志  
张占松 张卫平 陆 鸣 段军政 季幼章  
周庭光 赵良炳 赵修科 徐德高 徐会明  
徐泽玮 徐德洪 徐兰筠 袁维慈 黄济青  
龚绍文 喻 翔 谭 信

# 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,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 6 年。在这些年里,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,学位论文《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,奉献给同行,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。

本书共分八章,第一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。第二章系统地提出 PWM DC/DC 全桥变换器的九种控制方式,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。第三章和第四章讨论 ZVS PWM DC/DC 全桥变换器的电路结构、控制方式和工作原理。第五章讨论 ZVZCS PWM DC/DC 全桥变换器的电路结构、控制方式和工作原理。第六章讨论 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。第七章

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。第八章介绍软开关 PWM DC/DC 全桥变换器的其他一些电路拓扑。

本书第一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作了大量工作,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

|  |    |
|--|----|
| <b>第一章 全桥变换器的构成及原理</b> .....               | 1  |
| 1.1 概述 .....                               | 1  |
| 1.1.1 电力电子变换器的分类与要求 .....                  | 1  |
| 1.1.2 电力电子技术的发展方向 .....                    | 1  |
| 1.1.3 直流变换器的分类与特点 .....                    | 2  |
| 1.2 全桥逆变器及其控制 .....                        | 2  |
| 1.2.1 双极性控制方式 .....                        | 3  |
| 1.2.2 有限双极性控制方式 .....                      | 4  |
| 1.2.3 移相控制方式 .....                         | 5  |
| 1.3 PWM DC/DC 全桥变换器 .....                  | 6  |
| 1.3.1 具有续流管的 DC/DC 全桥变换器 .....             | 6  |
| 1.3.2 没有续流管的 DC/DC 全桥变换器 .....             | 8  |
| 1.3.3 DC/DC 全桥变换器中直流分量的抑制 .....            | 8  |
| 本章小结 .....                                 | 10 |
| <b>第二章 PWM DC/DC 全桥变换器软开关技术的理论基础</b> ..... | 11 |
| 2.1 基本工作原理.....                            | 11 |
| 2.2 PWM DC/DC 全桥变换器的控制策略 .....             | 11 |
| 2.2.1 基本控制策略.....                          | 11 |
| 2.2.2 开关管导通时间定义.....                       | 13 |
| 2.2.3 PWM DC/DC 全桥变换器的控制策略族 .....          | 13 |
| 2.3 PWM DC/DC 全桥变换器的两类切换方式 .....           | 16 |
| 2.3.1 三种工作状态.....                          | 16 |
| 2.3.2 三种切换方式.....                          | 16 |
| 2.3.3 斜对角两只开关管同时关断切换方式.....                | 16 |
| 2.3.4 斜对角两只开关管关断时间错开切换方式.....              | 18 |
| 2.4 PWM DC/DC 全桥变换器软开关的实现原则 .....          | 20 |
| 2.5 PWM DC/DC 全桥变换器的两类软开关方式 .....          | 21 |
| 本章小结 .....                                 | 21 |
| <b>第三章 ZVS PWM DC/DC 全桥变换器</b> .....       | 22 |
| 3.1 ZVS PWM DC/DC 全桥变换器的电路拓扑及控制方式 .....    | 22 |
| 3.1.1 滞后桥臂的控制方式.....                       | 22 |

|       |  |           |
|-------|--|-----------|
| 3.1.2 | 超前桥臂的控制方式                                  | 23        |
| 3.1.3 | ZVS PWM DC/DC 全桥变换器的控制方式                   | 23        |
| 3.2   | 移相控制 ZVS PWM DC/DC 全桥变换器的工作原理              | 24        |
| 3.3   | 两个桥臂实现 ZVS 的差异                             | 29        |
| 3.3.1 | 实现 ZVS 的条件                                 | 29        |
| 3.3.2 | 超前桥臂实现 ZVS                                 | 29        |
| 3.3.3 | 滞后桥臂实现 ZVS                                 | 29        |
| 3.4   | 实现 ZVS 的策略及副边占空比的丢失                        | 30        |
| 3.4.1 | 增加励磁电流                                     | 30        |
| 3.4.2 | 增大谐振电感                                     | 30        |
| 3.4.3 | 副边占空比的丢失                                   | 30        |
| 3.5   | 整流二极管的换流情况                                 | 31        |
| 3.5.1 | 全桥整流方式                                     | 31        |
| 3.5.2 | 全波整流方式                                     | 32        |
| 3.6   | 仿真结果                                       | 33        |
|       | 本章小结                                       | 36        |
|       | <b>第四章 采用辅助网络的移相控制 ZVS PWM DC/DC 全桥变换器</b> | <b>37</b> |
| 4.1   | 引言   | 37        |
| 4.2   | 辅助网络的工作原理                                  | 37        |
| 4.3   | 电流增强原理                                     | 40        |
| 4.4   | 工作原理                                       | 41        |
| 4.5   | 实现零电压开关的条件                                 | 45        |
| 4.6   | 参数设计                                       | 45        |
| 4.6.1 | 辅助网络的参数选择                                  | 46        |
| 4.6.2 | $L_r, C_r$ 和 $I_c$ 的确定                     | 46        |
| 4.6.3 | $V_{ig}$ 的选取                               | 47        |
| 4.6.4 | $N$ 值的选取                                   | 47        |
| 4.6.5 | $A_g$ 的取值                                  | 48        |
| 4.6.6 | $I_{ag}$ 的选取                               | 49        |
| 4.6.7 | 当负载电流小于 $I_c$ 时 $v_{c1}$ 的情况               | 49        |
| 4.6.8 | 参数设计步骤                                     | 50        |
| 4.7   | 副边占空比丢失及死区时间的选取                            | 51        |
| 4.7.1 | 副边占空比的丢失                                   | 51        |
| 4.7.2 | 与只采用饱和电感方案的比较                              | 52        |
| 4.7.3 | 滞后桥臂死区时间的选取                                | 53        |
| 4.8   | 仿真与实验结果                                    | 53        |
| 4.9   | 其他辅助网络构成的 ZVS PWM DC/DC 全桥变换器              | 57        |
|       | 本章小结                                       | 58        |

|   |    |
|---|----|
| <b>第五章 ZVZCS PWM DC/DC 全桥变换器</b>          | 59 |
| 5.1 ZVZCS PWM DC/DC 全桥变换器的电路拓扑及控制方式       | 59 |
| 5.1.1 超前桥臂的控制方式                           | 59 |
| 5.1.2 滞后桥臂的控制方式                           | 60 |
| 5.1.3 电流复位方式                              | 60 |
| 5.1.4 ZVZCS PWM DC/DC 全桥变换器的电路拓扑及控制方式     | 64 |
| 5.2 ZVZCS PWM DC/DC 全桥变换器的工作原理            | 65 |
| 5.3 参数设计                                  | 69 |
| 5.3.1 实现滞后桥臂 ZCS 的条件                      | 69 |
| 5.3.2 最大占空比 $D_{\max}$                    | 69 |
| 5.3.3 滞后桥臂的电压应力                           | 69 |
| 5.3.4 阻断电容的选择                             | 70 |
| 5.4 仿真与实验结果                               | 70 |
| 本章小结                                      | 73 |
| <b>第六章 PWM DC/DC 全桥变换器的主要元件、控制芯片及驱动电路</b> | 74 |
| 6.1 引言                                    | 74 |
| 6.2 输入滤波电容的选择                             | 74 |
| 6.3 高频变压器的设计                              | 75 |
| 6.3.1 原副边变比                               | 75 |
| 6.3.2 确定原边和副边匝数                           | 76 |
| 6.3.3 确定绕组的导线线径                           | 76 |
| 6.3.4 确定绕组的导线股数                           | 76 |
| 6.3.5 核算窗口面积                              | 77 |
| 6.4 输出滤波电感的设计                             | 77 |
| 6.4.1 输出滤波电感                              | 77 |
| 6.4.2 输出滤波电感的设计                           | 78 |
| 6.5 输出滤波电容的选择                             | 79 |
| 6.5.1 输出滤波电容量                             | 79 |
| 6.5.2 输出滤波电容的耐压值                          | 79 |
| 6.6 UC3875 芯片                             | 79 |
| 6.6.1 工作电源                                | 79 |
| 6.6.2 基准电源                                | 80 |
| 6.6.3 振荡器                                 | 80 |
| 6.6.4 锯齿波                                 | 81 |
| 6.6.5 误差放大器和软启动                           | 81 |
| 6.6.6 移相控制信号发生电路                          | 81 |
| 6.6.7 过流保护                                | 82 |

|                                       |   |            |
|---------------------------------------|---|------------|
| 6.6.8                                 | 死区时间设置                                    | 82         |
| 6.6.9                                 | 输出级                                       | 82         |
| 6.7                                   | 驱动电路                                      | 82         |
| 6.7.1                                 | 中小功率 PWM DC/DC 全桥变换器中 MOSFET 和 IGBT 的驱动电路 | 83         |
| 6.7.2                                 | 大功率 PWM DC/DC 全桥变换器中 MOSFET 和 IGBT 的驱动电路  | 84         |
|                                       | 本章小结                                      | 89         |
| <b>第七章 48V/10A 移相控制 ZVS 通讯用开关电源</b>   |   | <b>90</b>  |
| 7.1                                   | 引言  | 90         |
| 7.2                                   | 主电路结构                                     | 90         |
| 7.3                                   | 控制电路及保护电路                                 | 92         |
| 7.4                                   | 驱动电路                                      | 95         |
| 7.5                                   | 电流检测电路                                    | 96         |
| 7.6                                   | 参数选择                                      | 97         |
| 7.6.1                                 | 输入滤波电容                                    | 97         |
| 7.6.2                                 | 高频变压器原副边变比                                | 97         |
| 7.6.3                                 | 谐振电感值                                     | 98         |
| 7.6.4                                 | 开关频率                                      | 98         |
| 7.6.5                                 | 高频变压器                                     | 98         |
| 7.6.6                                 | 谐振电感的设计                                   | 100        |
| 7.6.7                                 | 输出滤波电感的设计                                 | 101        |
| 7.6.8                                 | 输出滤波电容的选择                                 | 102        |
| 7.6.9                                 | 主功率管的选择                                   | 102        |
| 7.6.10                                | 输出整流二极管的选择                                | 102        |
| 7.7                                   | 实验结果                                      | 103        |
| 7.8                                   | 本电源的特色                                    | 106        |
|                                       | 本章小结                                      | 107        |
| <b>第八章 软开关 PWM DC/DC 全桥变换器的其他电路拓扑</b> |   | <b>108</b> |
| 8.1                                   | 引言  | 108        |
| 8.2                                   | ZVS PWM DC/DC 全桥变换器的其他拓扑                  | 108        |
| 8.2.1                                 | 原边电感采用饱和电感                                | 108        |
| 8.2.2                                 | 利用励磁电流                                    | 109        |
| 8.2.3                                 | 并联辅助电路                                    | 110        |
| 8.3                                   | ZVZCS PWM DC/DC 全桥变换器的其他拓扑                | 114        |
| 8.3.1                                 | E. C. Nho 电路                              | 115        |
| 8.3.2                                 | K. Chen 电路                                | 116        |
| 8.3.3                                 | B. Masserant 电路                           | 117        |
| 8.3.4                                 | ZVZCS PWM DC/DC 全桥变换器的共同特点                | 118        |

# 第一章 全桥变换器的构成及原理

## 1.1 概 述

### 1.1.1 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转变为另一种或多种形式电能的装置。按转换电能的种类,可分为四种类型:①直流变换器,将一种直流电能转换成另一种或多种直流电能的变换器;②逆变器,将直流电能变为交流电能的电能变换器,又称直交变换器;③整流器,将交流电转为直流电的电能变换器,又称交直变换器;④交交变频器,将一种频率的交流电直接转换成另一种或可变频率的交流电,或是将频率变化的交流电直接转变为恒定频率交流电的电能变换器。这四类变换器可为单向或双向电能变换器,双向电能变换器中能量可双向流动,而单向变换器的电能只能从一个方向向另一个方向流动。

对电力电子变换器的基本要求是:可靠性高、可维修性好、体积小、重量轻、价格便宜和电气性能好。可靠性高,就是要求电力电子变换器能适应不良的工作条件,有足够长的平均故障间隔时间。可维修性好,就是要求减少对维修人员的技术要求和维修时间短。体积小、重量轻是航空航天用电子变换器的重要要求,随着技术的发展,现在已成为各类产业的共同要求。价格便宜就是要求减少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。电气性能好,要求电力电子变换器满足技术指标或相应技术规范的要求。

### 1.1.2 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),绝缘栅双极性晶体管(IGBT)和场控晶闸管(MCT, MGT, MET)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的发展,进一步促进了高频电力电子技术的发展。非晶、微晶磁芯和高频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)、准谐振(Quasi-resonant converter)和多谐振(Multi-resonant converter)变换技术,零电压开关 PWM (Zero-voltage-switching PWM, ZVS-PWM)和零电流开关 PWM (Zero-current-switching PWM, ZCS-PWM)技术,零电压转换(Zero-voltage-transition, ZVT)和零电流转换(Zero-current-transition, ZCT)技术,以及谐振直流环节逆变器(Resonant dc link inverter, RDCLI)技术等部分或全部实现了变换器中功率器件的零电压开关(Zero-voltage-switching, ZVS)或零电流开关(Zero-current-switching, ZCS),克服了脉宽调制型(Pulse-

width-modulation, PWM)功率开关管开关损耗随开关频率成正比增加的缺点,使功率器件的开关频率提高了一个数量级,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和结构的高绝缘性能与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、零电压或零电流开关电路拓扑和装置的结构、材料与工艺的发展而发展的。

### 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。随着电力电子技术和计算机科学与技术的发展,以直流变换器为核心的开关电源应用越来越广,得到各国电力电子专家和学者的重视,目前已成为一个重要的新兴产业。

直流变换器有非电气隔离型和有隔离型两类。以所用功率开关管的数量来分类,单管非隔离直流变换器有六种基本类型,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。双管直流变换器有双管串接的升降压式(Buck-Boost)等。全桥变换器(Full-bridge converter)是常用的四管直流变换器。

隔离型直流变换器也可以所用功率开关管数量来分类。典型单管直流变换器有正激变换器(Forward)和反激变换器(Flyback)两种,双管变换器有双管正激变换器(Double transistor forward converter)、双管反激变换器(Double transistor flyback converter)、推挽(Push-pull converter)和半桥(Half-bridge converter)四种,四管直流变换器就是DC/DC全桥变换器(Full-bridge converter)。

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,即双管隔离型直流变换器的输出功率为单管的两倍,为四管全桥变换器的一半。故DC/DC全桥变换器在直流变换器中功率最大,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实现单管变换器功率开关管零电压开关(ZVS)或零电流开关(ZCS)的技术,但是这类软开关技术不同于脉宽调制(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PWM控制,但是主开关管和辅助开关管的开关应力依然很大。单管直流变换器等用ZVT或ZCT技术具有PWM控制的特点,但需要外加功率器件,且该器件仅用于实现主功率器件的零转换,不能增加变换器的有功输出。双管和四管变换器却可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。

## 1.2 全桥逆变器及其控制

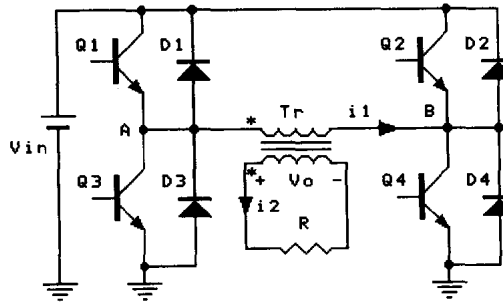
DC/DC全桥变换器由全桥逆变器和输出整流滤波电路构成,在讨论DC/DC全桥变换器前,首先讨论全桥逆变器的构成和工作原理,有利于深入理解变换器的工作。

### 1.2.1 双极性控制方式

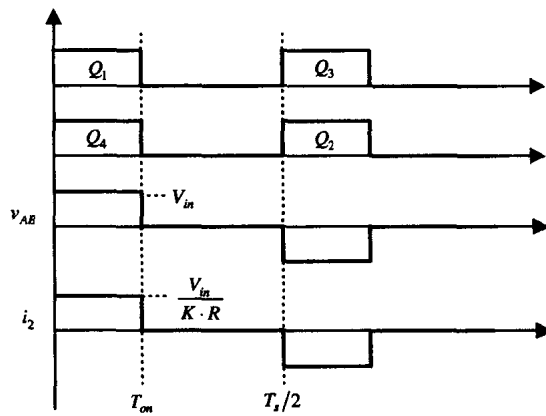
全桥逆变器的主电路如图 1.1 所示, 由四只功率管  $Q_1 \sim Q_4$ , 反并联二极管  $D_1 \sim D_4$  和输出变压器  $Tr$  等构成。输入直流电源电压为  $V_{in}$ , 输出交流电压为  $v_o$ , 变压器  $Tr$  的原边绕组接于  $AB$  两端。变压器原边绕组匝数为  $N_1$ , 副边绕组匝数为  $N_2$ , 变比为  $K = N_1/N_2$ 。

#### 1. 负载为纯电阻

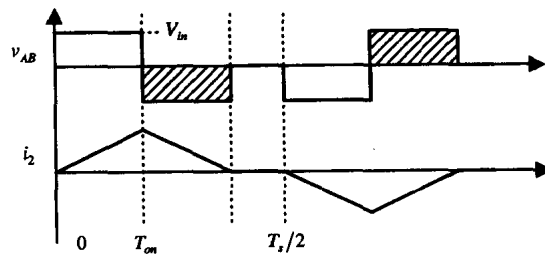
晶体管为脉宽调制(PWM)工作方式, 在一个开关周期  $T_s$  的前半周,  $Q_1$  和  $Q_4$  导通



(a) 全桥逆变器主电路



(b) 电阻负载时变压器原边电压和副边电流波形



(c) 电感负载时变压器原边电压和副边电流波形

图 1.1 全桥逆变器

$D \cdot \frac{T_s}{2}$  时间,  $D$  为占空比,  $D = \frac{T_{on}}{T_s/2}$ , 后半周期为  $Q_2$  和  $Q_3$  导通, 导通时间也为  $D \cdot \frac{T_s}{2}$ 。 $Q_1$  和  $Q_4$  导通时, 若不计晶体管通态压降, 则变压器原边绕组上电压为  $v_{AB} = V_{in}$ ;  $Q_1$  和  $Q_3$  导通时  $v_{AB} = -V_{in}$ ;  $Q_1$  和  $Q_4$  与  $Q_2$  和  $Q_3$  均截止时,  $v_{AB} = 0$ 。故变压器副边开路时, 变压器原边电压  $v_{AB}$  的波形如图 1.1(b) 所示, 为一个方波电压。调节晶体管的导通时间, 即调节占空比  $D$ , 就可以调节  $v_{AB}$  的宽度, 从而调节  $v_{AB}$  的有效值大小。副边电压  $v_o$  波形与  $v_{AB}$  相同, 幅值为  $V_{in}/K$ 。

若副边接电阻负载  $R$ , 则有电流  $i_2$  流过电阻,  $i_2$  的波形与  $v_o$ 、 $v_{AB}$  相同, 幅值  $I_{2m} = \frac{V_{in}}{K} \cdot \frac{1}{R}$ 。变压器原边电流  $i_1$  的波形和副边电流  $i_2$  相同, 幅值  $I_{1m} = \frac{V_{in}}{K^2} \cdot \frac{1}{R}$ , 此式也可写成  $I_{1m} = V_{in}/R_1$ ,  $R_1 = K^2 R$ , 式中  $R_1$  是副边电阻  $R$  折算到原边的值。由此可见, 若变压器为理想变压器, 则接于变压器副边的电阻  $R$  与不用变压器, 而在  $AB$  两端接电阻  $R_1$  的效果是一样的。故  $Q_1$  和  $Q_4$  导通时, 流过  $Q_1$  和  $Q_4$  的电流为  $V_{in}/R_1$ ,  $Q_2$  和  $Q_3$  导通时的电流也为  $V_{in}/R_1$ , 此时反并于功率管的二极管  $D_1$  至  $D_4$  中没有电流通过。

## 2. 负载为电感

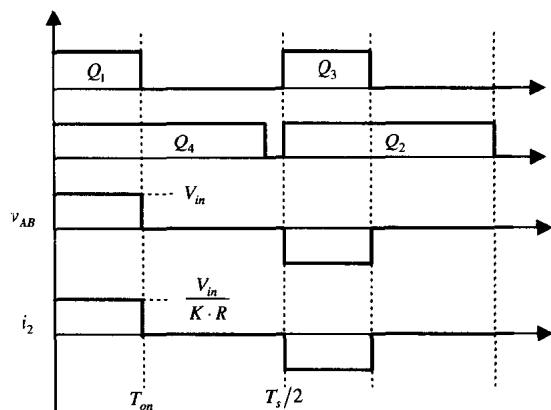
若变压器副边接电感负载  $L$ ,  $Q_1$  和  $Q_4$  导通时,  $v_{AB} = V_{in}$ ,  $v_o = V_{in}/K$ 。在  $v_o$  作用下, 负载电流自零增加, 增加速度为  $\frac{di_2}{dt} = \frac{v_o}{L} = \frac{V_{in}}{K} \cdot \frac{1}{L}$ 。该电流在  $t = D \frac{T_s}{2}$ , 即  $Q_1$  和  $Q_4$  将关断时达到最大值,  $I_{2max} = \frac{V_{in}}{K} \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{DT_s}{2}$ ,  $I_{1max} = \frac{V_{in}}{K^2} \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{DT_s}{2}$ 。 $Q_1$  和  $Q_4$  关断后, 该电流不可能突然变化, 仍将按原方向流动, 故必使  $D_3$  和  $D_2$  导通, 于是  $v_{AB} = -V_{in}$ ,  $v_o$  极性也反向。在这个电压作用下电感电流减小, 减小速度与  $Q_1$  和  $Q_4$  开通时的增长速度相同, 如图 1.1(c) 所示。在这种情况下, 变压器原边和副边电压波形和阻性负载时有很大不同, 出现了一块阴影面积, 在纯电感负载时此阴影面积和阻性负载时的  $v_{AB}$  面积大小相同。故输出电压  $v_o$  的波形不仅由  $Q_1$  和  $Q_4$  的导通状态决定, 而且与负载的性质有关。当占空比  $D \geq 1/2$ , 即  $Q_1$  和  $Q_4$  的导通时间  $T_{on} \geq T_s/4$  时,  $v_{AB}$  波形成为  $180^\circ$  电角宽的方波, 即  $D$  在  $1/2$  至  $1$  范围内变化时,  $v_{AB}$  和  $v_o$  始终为  $180^\circ$  方波, 不受  $D$  的影响。由此可见, 全桥逆变器在感性负载时不宜采用这种脉宽控制方式。

### 1.2.2 有限双极性控制方式

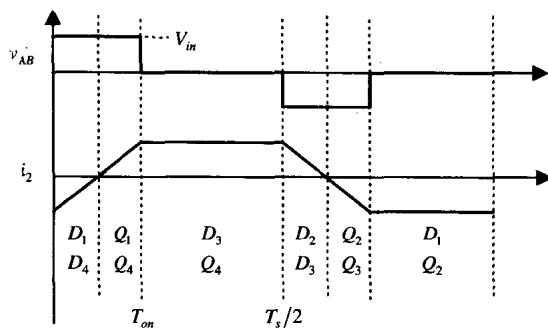
全桥逆变器的另一种控制方式是有限双极性控制方式, 它是让一个桥臂的两个管子 (例如  $Q_1$  和  $Q_3$ ) 为 PWM 工作, 另一桥臂的  $Q_2$  和  $Q_4$  轮流导通半个周期,  $Q_1$  和  $Q_4$  同时导通  $T_{on}$  时间,  $Q_3$  和  $Q_2$  也同时导通  $T_{on}$  时间。这种控制方式时, 逆变器空载和电阻负载时的输出电压  $v_o$  和电流  $i_2$  波形与上一种控制方式相同, 如图 1.2(a) 所示。电感负载时, 电压  $v_{AB}$  和变压器副边电流  $i_2$  的波形如图 1.2(b) 所示。

$Q_1$  和  $Q_4$  导通时,  $v_{AB} = V_{in}$ , 变压器副边电压  $v_o = V_{in}/K$ , 负载电流  $i_2$  的增长率  $\frac{di_2}{dt} = \frac{v_o}{L} = \frac{V_{in}}{K} \cdot \frac{1}{L}$ ,  $L$  为负载电感量。在  $t = D \frac{T_s}{2}$  时,  $Q_1$  关断,  $D_3$  续流, 形成由  $D_3$ 、变压器原边绕组和  $Q_4$  构成的续流回路, 故  $v_{AB} = 0$ 。因为该回路中没有外电源, 若不计电路损





(a) 电阻负载时变压器原边电压和副边电流波形



(b) 电感负载时变压器原边电压和副边电流波形

图 1.2 有限双极性控制方式下的全桥逆变器的主要波形

耗，则电流  $i_2$  保持不变，直到  $t=T_s/2$  时， $Q_4$  关断， $Q_2$  和  $Q_3$  导通，电流  $i_2$  才下降。在这种控制方式下， $v_{AB}$  和输出电压  $v_o$  仅与开关器件状态有关，与负载性质和大小无关。

### 1.2.3 移相控制方式

全桥逆变器的第三种控制方式是移相控制方式，这种控制方式是  $Q_1$  和  $Q_3$  轮流导通，各导通  $180^\circ$  电角， $Q_2$  和  $Q_4$  也是这样，但  $Q_1$  和  $Q_4$  不同时导通，若  $Q_1$  先导通， $Q_4$  后导通，两者导通差  $\alpha$  电角，如图 1.3(a) 所示。其中  $Q_1$  和  $Q_3$  分别先于  $Q_4$  和  $Q_2$  导通，故称  $Q_1$  和  $Q_3$  组成的桥臂为超前桥臂， $Q_2$  和  $Q_4$  组成的桥臂为滞后桥臂。移相控制时，空载电压波形  $v_{AB}$  和输出电压波形  $v_o$  如图 1.3(a) 所示，与图 1.1(b) 和图 1.2(a) 相同。电阻负载后的电压和电流波形也与图 1.1(b) 和图 1.2(a) 相同。电感负载时的电压和电流波形如图 1.3(b) 所示，和图 1.2(b) 相同， $v_{AB}$  和  $v_o$  不会畸变。方波电压  $v_{AB}$  的宽度仅与移相角  $\alpha$  有关， $\alpha=0^\circ$ ，则  $v_{AB}$  为宽  $180^\circ$  电角的方波。 $\alpha$  越大，则  $v_{AB}$  波形越窄，与图 1.2(b) 中减小  $Q_1$  和  $Q_3$  的占空比时情况相同。

由此可见，全桥逆变器的主电路只有一种，但控制方式有三种，其中以有限双极性控制方式和移相控制方式为好，负载性质不会导致输出电压波形畸变，故有限双极性控制方式和移相控制方式这两种控制方式为单脉宽逆变器的常用控制方式。