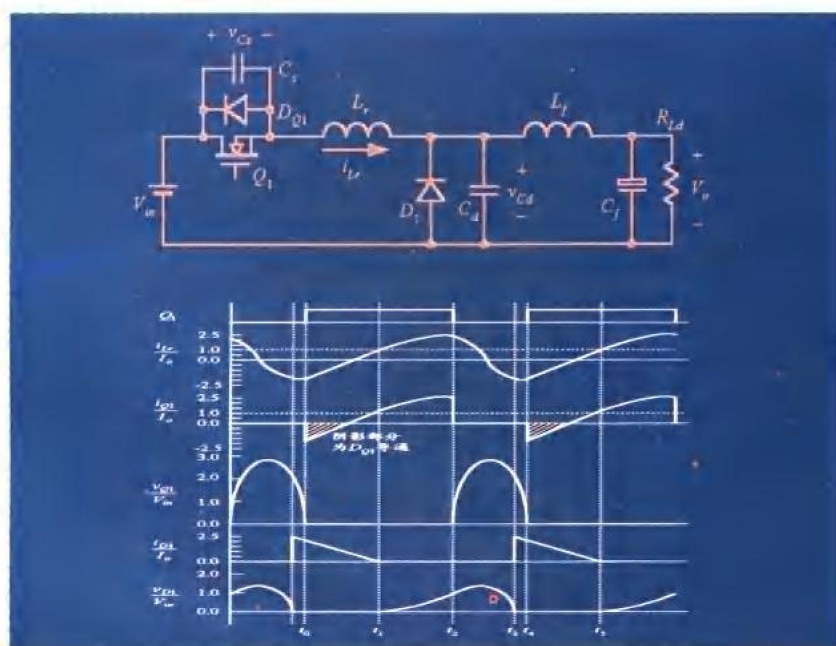


直流开关电源

的软开关技术

阮新波 严仰光 编著



科学出版社

实用电源技术丛书

直流开关电源的软开关技术

阮新波 严仰光 编著

科学出版社

2000

内 容 简 介

本书在介绍基本的直流开关电源原理的基础上,按照直流开关电源软开关技术的发展过程,系统论述了谐振变换器、准谐振变换器和多谐振变换器、零电压开关 PWM 变换器和零电流开关 PWM 变换器、ZVT PWM 变换器和 ZCT PWM 变换器、正激变换器的磁复位技术和软开关双管正激变换器的工作原理和参数设计,以及全桥变换器的三种软开关方式。

本书可作为高等学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阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

直流开关电源的软开关技术/阮新波,严仰光编著. -北京:科学出版社,2000

(实用电源技术丛书)

ISBN 7-03-007766-0

I. 直… II. ①阮… ②严… III. 直流-开关电路-电源-技术
IV. TM91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第32120号

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

2000年1月第一版 开本:787×1092 1/16

2000年1月第一次印刷 印张:16

印数:1—4 000 字数:359 000

定价: 24.00 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。

薄膜集成的电源模块、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 庄蓄田

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

近年来,电力电子技术发展迅猛,直流开关电源广泛应用于计算机、邮电通信、电力系统和航空航天等领域。如今,笨重型、低效的电源装置已被轻小型、高效电源所取代。为了实现电源装置的高性能、高效率、高可靠性,减小体积和重量,必须实现开关管的软开关,为此先后有人提出了谐振变换器(Resonant converters)、准谐振变换器(Quasi-resonant converters)和多谐振变换器(Multi-resonant converters)、零电压开关PWM变换器(Zero-voltage-switching PWM converters)和零电流开关PWM变换器(Zero-current-switching PWM converters)、零电压转换(Zero-voltage-transition, ZVT) PWM变换器和零电流转换(Zero-current-transition, ZCT) PWM变换器。

本书力图按照直流开关电源软开关技术的发展过程来论述各类软开关技术的基本思路、概念和工作原理,使读者能从中得到一些有益的思路,并且举一反三,从而进一步丰富和发展直流开关电源软开关技术。

本书共分十章,第一章介绍基本的直流开关电源的工作原理;第二章讨论谐振变换器的工作原理;第三章分析准谐振变换器和多谐振变换器的基本原理和参数分析;第四章介绍零电压开关PWM变换器和零电流开关PWM变换器的基本原理和参数分析;第五章讨论ZVT PWM变换器的基本原理和参数分析;第六章讨论ZCT PWM变换器的基本原理和参数分析;第七章介绍正激变换器的磁复位技术和软开关双管正激变换器;第八章至第十章讨论移相控制全桥变换器的三种软开关方式,包括移相控制ZVS PWM DC/DC全桥变换器、移相控制ZVZCS PWM DC/DC全桥变换器和移相控制ZCS PWM DC/DC全桥变换器。

本书第一章由严仰光教授编写,第二章由严仰光教授和阮新波博士编写,其他各章由阮新波博士编写。在编写第七章时,甘鸿坚博士生提供了部分资料。

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,在此表示衷心的感谢。

本书的出版得到了中国电源学会和科学出版社的大力支持,科学出版社第六编辑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,特此致谢。

由于作者水平有限,所见资料也有限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳切希望读者批评指正。

作 者

1999年6月于南京航空航天大学

目 录

| | |
|--|----|
| 第一章 直流开关电源的基本电路拓扑 | 1 |
| 1.1 概述 | 1 |
| 1.1.1 开关电源的分类 | 1 |
| 1.1.2 直流变换器的分类 | 1 |
| 1.1.3 直流开关电源及其应用 | 2 |
| 1.1.4 对直流开关电源的要求 | 3 |
| 1.1.5 直流开关电源的发展 | 4 |
| 1.2 降压式(Buck)变换器 | 4 |
| 1.2.1 主电路拓扑和控制方式 | 4 |
| 1.2.2 电感电流连续时 Buck 变换器的工作原理和基本关系 | 5 |
| 1.2.3 电感电流断续时 Buck 变换器的工作原理和基本关系 | 8 |
| 1.2.4 电感电流临界连续的边界 | 9 |
| 1.3 升压式(Boost)变换器 | 11 |
| 1.3.1 主电路拓扑和控制方式 | 11 |
| 1.3.2 电感电流连续时 Boost 变换器的工作原理和基本关系 | 12 |
| 1.3.3 电感电流断续时 Boost 变换器的工作原理和基本关系 | 14 |
| 1.3.4 电感电流临界连续的边界 | 15 |
| 1.4 升降压(Buck/Boost)变换器 | 17 |
| 1.4.1 主电路拓扑和控制方式 | 17 |
| 1.4.2 电感电流连续时 Buck/Boost 变换器的工作原理和基本关系 | 18 |
| 1.4.3 电感电流断续时 Buck/Boost 变换器的工作原理和基本关系 | 20 |
| 1.4.4 电感电流临界连续的边界 | 21 |
| 1.5 Cuk 变换器 | 22 |
| 1.5.1 主电路拓扑和控制方式 | 22 |
| 1.5.2 电流连续时 Cuk 变换器的工作原理和基本关系 | 24 |
| 1.5.3 电流断续时 Cuk 变换器的工作原理和基本关系 | 25 |
| 1.5.4 两电感有耦合的 Cuk 变换器 | 27 |
| 1.6 Zeta 变换器 | 28 |
| 1.6.1 主电路拓扑和控制方式 | 28 |
| 1.6.2 电流连续时 Zeta 变换器的工作原理和基本关系 | 29 |
| 1.6.3 电流断续时 Zeta 变换器的工作原理和基本关系 | 31 |
| 1.7 Sepic 变换器 | 31 |
| 1.7.1 主电路拓扑和控制方式 | 31 |
| 1.7.2 电流连续时 Sepic 变换器的工作原理和基本关系 | 32 |
| 1.8 正激(Forward)变换器 | 34 |
| 1.8.1 主电路拓扑和控制方式 | 34 |

| | |
|--|-----------|
| 1.8.2 电流连续时 Forward 变换器的工作原理和基本关系 | 36 |
| 1.9 反激(Flyback)变换器 | 38 |
| 1.9.1 主电路拓扑和控制方式 | 38 |
| 1.9.2 电流连续时 Flyback 变换器的工作原理和基本关系 | 39 |
| 1.9.3 电流断续时 Flyback 变换器的工作原理和基本关系 | 41 |
| 1.10 推挽(Push-pull)变换器 | 42 |
| 1.10.1 推挽逆变器 | 42 |
| 1.10.2 推挽变换器 | 44 |
| 1.10.3 推挽变换器的铁芯偏磁 | 46 |
| 1.11 半桥(Half-bridge)直流变换器 | 46 |
| 1.11.1 半桥逆变器 | 46 |
| 1.11.2 半桥直流变换器 | 48 |
| 1.11.3 考虑漏感时半桥直流变换器的工作原理 | 50 |
| 1.12 全桥(Full-bridge)直流变换器 | 50 |
| 1.12.1 全桥逆变器 | 51 |
| 1.12.2 全桥直流变换器 | 53 |
| 1.12.3 全桥直流变换器中直流分量的抑制 | 56 |
| 1.13 直流变换器之间的关系 | 56 |
| 本章小结 | 57 |
| 第二章 谐振变换器 | 58 |
| 2.1 引言 | 58 |
| 2.1.1 软开关技术的提出 | 58 |
| 2.1.2 软开关技术的实现策略 | 58 |
| 2.1.3 谐振变换器的分类 | 60 |
| 2.2 谐振电路的基本概念 | 61 |
| 2.2.1 串联谐振电路 | 61 |
| 2.2.2 并联谐振电路 | 64 |
| 2.3 串联负载串联谐振变换器 | 66 |
| 2.3.1 拓扑结构和开关模态 | 66 |
| 2.3.2 当 $f_s < \frac{1}{2} f_r$ 时, 变换器为电流断续工作方式 | 69 |
| 2.3.3 低于谐振频率工作 ($\frac{1}{2} f_r < f_s < f_r$) | 71 |
| 2.3.4 高于谐振频率工作 ($f_s > f_r$) | 73 |
| 2.3.5 稳态特性 | 75 |
| 2.4 并联负载串联谐振变换器 | 76 |
| 2.4.1 拓扑结构和开关模态 | 76 |
| 2.4.2 当 $f_s < \frac{1}{2} f_r$ 时, 变换器为电流断续工作方式 | 80 |
| 2.4.3 低于谐振频率工作 ($\frac{1}{2} f_r < f_s < f_r$) | 82 |
| 2.4.4 高于谐振频率工作 ($f_s > f_r$) | 83 |
| 2.4.5 稳态特性 | 85 |
| 本章小结 | 85 |

| | |
|-------------------------------------|------------|
| 第三章 准谐振变换器和多谐振变换器 | 87 |
| 3.1 引言 | 87 |
| 3.1.1 零电流谐振开关 | 87 |
| 3.1.2 零电压谐振开关 | 88 |
| 3.2 零电流开关准谐振变换器 | 89 |
| 3.2.1 工作原理 | 90 |
| 3.2.2 参数设计 | 93 |
| 3.2.3 电压变换比 | 94 |
| 3.2.4 控制策略与工作模式选择 | 95 |
| 3.2.5 仿真结果与分析 | 95 |
| 3.2.6 零电流开关准谐振变换器族 | 97 |
| 3.3 零电压开关准谐振变换器 | 99 |
| 3.3.1 工作原理 | 100 |
| 3.3.2 参数设计 | 102 |
| 3.3.3 电压变换比 | 104 |
| 3.3.4 控制策略与电路拓扑选择 | 105 |
| 3.3.5 仿真结果与分析 | 105 |
| 3.3.6 零电压开关准谐振变换器族 | 106 |
| 3.4 ZCS QRCs 和 ZVS QRCs 的比较 | 108 |
| 3.4.1 对偶关系 | 108 |
| 3.4.2 ZCS QRCs 和 ZVS QRCs 的优缺点 | 109 |
| 3.5 零电压开关多谐振变换器 | 110 |
| 3.5.1 多谐振开关 | 110 |
| 3.5.2 工作原理 | 110 |
| 3.5.3 电压变换比 | 113 |
| 3.5.4 仿真结果与分析 | 114 |
| 3.5.5 零电压开关多谐振变换器族 | 115 |
| 本章小结 | 116 |
| 第四章 ZCS PWM 变换器和 ZVS PWM 变换器 | 118 |
| 4.1 引言 | 118 |
| 4.2 ZCS PWM 变换器 | 118 |
| 4.2.1 工作原理 | 118 |
| 4.2.2 ZCS PWM 变换器与 ZCS QRCs 的比较 | 122 |
| 4.2.3 参数设计 | 122 |
| 4.2.4 仿真结果与分析 | 123 |
| 4.2.5 ZCS PWM 变换器族 | 124 |
| 4.3 ZVS PWM 变换器 | 126 |
| 4.3.1 工作原理 | 126 |
| 4.3.2 ZVS PWM 变换器与 ZVS QRCs 的比较 | 130 |
| 4.3.3 参数设计 | 131 |
| 4.3.4 仿真结果与分析 | 132 |
| 4.3.5 ZVS PWM 变换器族 | 132 |

| | |
|--|------------|
| 本章小结..... | 134 |
| 第五章 零电压转换(ZVT) PWM 变换器..... | 136 |
| 5.1 引言 | 136 |
| 5.2 ZVT PWM 变换器 | 136 |
| 5.2.1 工作原理 | 136 |
| 5.2.2 辅助电路的参数设计 | 140 |
| 5.2.3 仿真结果与分析 | 141 |
| 5.3 ZVT PWM 变换器族及其优缺点 | 142 |
| 5.3.1 ZVT PWM 变换器族 | 142 |
| 5.3.2 ZVT PWM 变换器的优点和缺点 | 144 |
| 5.4 改进型 ZVT PWM 变换器 | 144 |
| 5.4.1 工作原理 | 144 |
| 5.4.2 辅助电路的参数设计 | 147 |
| 5.4.3 仿真结果与分析 | 148 |
| 5.5 改进型 ZVT PWM 变换器族及其优缺点 | 150 |
| 5.5.1 改进型 ZVT PWM 变换器族 | 150 |
| 5.5.2 改进型 ZVT PWM 变换器的优点 | 151 |
| 本章小结..... | 151 |
| 第六章 零电流转换(ZCT) PWM 变换器..... | 153 |
| 6.1 ZCT PWM 变换器的基本思路 | 153 |
| 6.2 ZCT PWM 变换器 | 153 |
| 6.2.1 工作原理 | 153 |
| 6.2.2 辅助支路的能量调节 | 156 |
| 6.2.3 参数设计 | 159 |
| 6.2.4 仿真结果与分析 | 160 |
| 6.3 ZCT PWM 变换器族及其优缺点 | 163 |
| 6.3.1 ZCT PWM 变换器族 | 163 |
| 6.3.2 ZCT PWM 变换器的优缺点 | 164 |
| 6.4 改进型 ZCT PWM 变换器 | 164 |
| 6.4.1 工作原理 | 164 |
| 6.4.2 参数分析 | 169 |
| 6.4.3 仿真结果与分析 | 170 |
| 6.5 改进型 ZCT PWM 变换器族及其优缺点 | 172 |
| 6.5.1 改进型 ZCT PWM 变换器族 | 172 |
| 6.5.2 改进型 ZCT PWM 变换器的优缺点 | 173 |
| 本章小结..... | 173 |
| 第七章 正激变换器的磁复位技术和软开关双管正激变换器..... | 174 |
| 7.1 引言 | 174 |
| 7.2 RCD 箝位技术 | 174 |

| | | |
|------------|-----------------------------------|------------|
| 7.2.1 | 工作原理 | 174 |
| 7.2.2 | 参数设计 | 179 |
| 7.2.3 | 采用 RCD 箝位技术的正激变换器的优缺点 | 180 |
| 7.3 | LCD 箝位技术 | 180 |
| 7.3.1 | 工作原理 | 180 |
| 7.3.2 | 参数设计 | 186 |
| 7.3.3 | 采用 LCD 箝位技术的正激变换器的优缺点 | 186 |
| 7.4 | 有源箝位技术 | 186 |
| 7.4.1 | 工作原理 | 186 |
| 7.4.2 | 参数设计 | 191 |
| 7.4.3 | 采用有源箝位技术的正激变换器的优缺点 | 192 |
| 7.5 | ZVT PWM 正激变换器 | 192 |
| 7.5.1 | 工作原理 | 192 |
| 7.5.2 | 参数设计 | 199 |
| 7.5.3 | ZVT PWM 正激变换器的优缺点 | 200 |
| 7.6 | 正激变换器磁复位技术的性能比较 | 200 |
| 7.7 | ZVT 双管正激变换器 | 201 |
| 7.7.1 | 工作原理 | 201 |
| 7.7.2 | 参数设计 | 205 |
| 7.7.3 | ZVT 双管正激变换器的优点 | 206 |
| 7.8 | ZCT 双管正激变换器 | 206 |
| | 本章小结 | 207 |
| 第八章 | 移相控制 ZVS PWM DC/DC 全桥变换器 | 208 |
| 8.1 | 引言 | 208 |
| 8.2 | 工作原理 | 209 |
| 8.3 | 两个桥臂实现 ZVS 的差异 | 213 |
| 8.4 | 实现 ZVS 的策略及副边占空比的丢失 | 213 |
| 8.5 | 整流二极管的换流情况 | 215 |
| 8.5.1 | 全桥整流方式 | 215 |
| 8.5.2 | 全波整流方式 | 216 |
| 8.6 | 仿真和实验结果 | 217 |
| | 本章小结 | 221 |
| 第九章 | 移相控制 ZVZCS PWM DC/DC 全桥变换器 | 222 |
| 9.1 | 引言 | 222 |
| 9.2 | 工作原理 | 222 |
| 9.3 | 参数设计 | 227 |
| 9.4 | 仿真与实验结果 | 228 |
| | 本章小结 | 231 |
| 第十章 | 移相控制 ZCS PWM DC/DC 全桥变换器 | 232 |
| 10.1 | 引言 | 232 |

| | | |
|------|---------------------------|------------|
| 10.2 | 工作原理..... | 233 |
| 10.3 | 超前管和滞后管实现 ZCS 的差异 | 236 |
| 10.4 | 实现 ZCS 的策略及电流占空比的丢失 | 237 |
| 10.5 | 仿真结果与分析..... | 238 |
| | 本章小结..... | 240 |
| | 参考文献..... | 241 |

第一章 直流开关电源的基本电路拓扑

1.1 概 述

1.1.1 开关电源的分类

现代开关电源分为直流开关电源和交流开关电源两类,前者输出质量较高的直流电,后者输出质量较高的交流电。开关电源的核心是电力电子变换器。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-直流变换器,它是将一种直流电能转换成另一种或多种直流电能的变换器,是直流开关电源的主要部件;②逆变器,是将直流电转换为交流电的电能变换器,是交流开关电源和不间断电源 UPS 的主要部件;③整流器,是将交流电转换为直流电的电能变换器;④交交变频器,是将一种频率的交流电直接转换为另一种恒定频率或可变频率的交流电,或是将变频交流电直接转换为恒频交流电的电能变换器。这四类变换器可以是单向变换的,也可以是双向变换的。单向电能变换器只能将电能从一个方向输入,经变换后从另一方向输出;双向电能变换器可实现电能的双向流动。

1.1.2 直流变换器的分类

直流变换器按输入与输出间是否有电气隔离可分为两类:没有电气隔离的称为不隔离的直流变换器,有电气隔离的称为有隔离的直流变换器。

不隔离的直流变换器按所用有源功率器件的个数,可分为单管、双管和四管三类。单管直流变换器有六种,即降压式(Buck)变换器、升压式(Boost)变换器、升降压式(Buck/Boost)变换器、Cuk 变换器、Zeta 变换器和 Sepic 变换器等。在这六种单管变换器中,降压式和升压式变换器是最基础的,另外四种是从中派生的。双管直流变换器有双管串接的升降压式(Buck/Boost)变换器。全桥直流变换器(Full-bridge converter)是常用的四管直流变换器。

有隔离的直流变换器也可按所用有源功率器件数量来分类。单管的有正激式(Forward)和反激式(Flyback)两种。双管有双管正激(Double transistor forward converter)、双管反激(Double transistor flyback converter)、推挽(Push-pull converter)和半桥(Half-bridge converter)等四种。四管直流变换器就是全桥直流变换器(Full-bridge converter)。

有隔离的变换器可以实现输入与输出间的电气隔离,通常采用变压器实现隔离,变压器本身具有变压的功能,有利于扩大变换器的应用范围。变压器的应用还便于实现多路不同电压或多路相同电压的输出。

在功率开关管电压和电流定额相同时,变换器的输出功率通常与所用开关管的数量成正比,故四管变换器的输出功率最大,而单管变换器的输出功率最小。

没有隔离的变换器可和有隔离的变换器组合得到单个变换器不具备的特性。

按能量传递来分,直流变换器有单向和双向两种。具有双向功能的充电器在电源正常时向电池充电,一旦电源中断,它可将电池电能返回电网,向电网短时间应急供电。直流电

电动机控制用变换器也是双向的,电动机工作时将电能从电源传递到电动机,制动时将电机电能回馈给电源。

直流变换器也可分为自激式和他控式。借助于变换器本身的正反馈信号实现开关管自持周期性开关的变换器叫做自激式变换器,洛耶尔(Royer)变换器是一种典型的推挽自激式变换器。他控式直流变换器中开关器件控制信号由专门的控制电路产生。

按开关管的开关条件,直流变换器可分为硬开关(Hard switching)和软开关(Soft switching)两种。硬开关直流变换器的开关器件是在承受电压或流过电流的情况下接通或断开电路的,因此在开通或关断过程中伴随着较大的损耗,即所谓的开关损耗(Switching loss)。变换器工作状态一定时,开关管开通或关断一次的损耗也是一定的,因此开关频率越高,开关损耗就越大。同时,开关过程中还会激起电路分布电感和寄生电容的振荡,带来附加损耗,因而硬开关直流变换器的开关频率不能太高。软开关直流变压器的开关管在开通或关断过程中,或是加于其上的电压为零,即零电压开关(Zero-voltage-switching, ZVS),或是通过器件的电流为零,即零电流开关(Zero-current-switching, ZCS)。这种开关方式显著地减小了开关损耗和开关过程中激起的振荡,可以大幅度地提高开关频率,为变换器的小型化和模块化创造了条件。功率场效应管(MOSFET)是多子器件,有高的开关速度,但同时也有较大的寄生电容。它关断时,在外电压作用下其寄生电容充满电,如果在它开通前不将这部分电荷放掉,则将消耗于器件内部,这就是容性开通损耗。为了减小以致消除这种损耗,功率场效应管宜采用零电压开通方式(ZVS)。绝缘栅双极性晶体管(Insulated gate bipolar transistor, IGBT)是一种复合器件,关断时的电流拖尾导致较大的关断损耗,如果在关断前使通过它的电流降为零,则可以显著地降低开关损耗,因此IGBT宜采用零电流(ZCS)关断方式。IGBT在零电压条件下关断,同样也能减小关断损耗,但是MOSFET在零电流条件下开通并不能减小容性开通损耗。谐振变换器(Resonant converter, RC)、准谐振变换器(Quasi-resonant converter, QRC)、多谐振变换器(Multi-resonant converter, MRC)、零电压开关PWM变换器(ZVS PWM converter)、零电流开关PWM变换器(ZCS PWM converter)、零电压转换(Zero-voltage-transition, ZVT)PWM变换器和零电流转换(Zero-current-transition, ZCT)PWM变换器等均属于软开关直流变换器。电力电子器件和零开关变换器电路拓扑的发展,促使了高频电力电子学的诞生。

1.1.3 直流开关电源及其应用

直流开关电源是具有直流变换器且输出电压恒定或按要求变化的直流电源,其输入为直流电,也可以是交流电。直流开关电源部分或全部具有以下特征:①电源电压和负载在规定的范围内变化时,输出电压应保持在允许的范围内或按要求变化;②输入与输出间有好的电气隔离;③可以输出单路或多路电压,各路之间有电气隔离。直流开关电源与直流线性电源相比有:①电力电子器件在开关状态工作,电源内部损耗小,效率高;②开关频率高,电源体积和重量小。开关电源主要用于向模拟或数字电子设备供电。直流电动机速度或位置控制器实质上也是开关电源,由于电动机有电动和制动两种工作状态,故使用双向变换器,通常称为电动机控制器,很少称之为开关电源。通常的直流开关电源不包括直流电动机控制器。

现代家用电子电器(如电视机、录像机、VCD等),个人计算机,测试仪器(如示波器、

信号发生器、波形分析仪等)和生物医学仪器都采用开关电源。直流开关电源还在工业装置、大型计算机、通信系统、航空航天和交通运输等各个方面使用。大型计算机、通信系统、航空航天器中的电源是分布式电源系统,包括三个部分:第一部分为发电系统,第二部分是一次电源,第三部分是二次电源。发电系统是将其他能量转化为电能和设备,例如人造卫星和空间站中的硅太阳电池阵,飞机上的由航空发动机传动的无刷发电机,通信电源的50Hz地面电源或柴油发电机等。一次电源用于将变化范围较大的输入电压转变为所需的输出电压,如人造卫星中的蓄电池充电放电器和并联调节器,飞机变速恒频电源中的变换器,通信电源中的开关整流器。二次电源则直接面向用电设备,如电子设备、通信设备中印制板上的模块电源等。分布式电源系统的发电系统、一次电源和部分二次电源为多冗余度电源,电源间互相并联,电源模块内有运行状态监控电路,可准确判断电源故障,并切除故障电源,因而有较高的可靠性。同时,一次电源的输出都并有蓄电池,从而防止发电系统或个别一次电源故障引起的汇流条电压中断,实现了不间断供电。因此,分布式电源系统是高可靠的不间断供电系统,目前只有直流供电系统才能实现完善的不间断供电。

1.1.4 对直流开关电源的要求

电源是电子设备正常工作的基础部件,有很高的要求,包括使用要求和电气性能要求。使用要求是:高的可靠性、好的可维修性、小的体积重量、低的价格及使用费用和好的电气性能。

平均故障间隔时间 MTBF 是衡量开关电源和其他设备可靠性的重要标志,某些电源模块的 MTBF 已大于 50 万小时。减小损耗、提高效率和改善散热条件,从而减小电源的温度升高,是提高可靠性的基本方法。加强生产过程质量控制,保证好的电气绝缘和机械强度等也十分重要。

对于中大型开关电源,改善可维修性十分重要。及时诊断出故障部位,不用专用工夹具即能排除故障是可维修性好坏的衡量标志。或者说,不需要熟练工人而能在较短时间内排除故障的电源就具有好的可维修性。因此这些开关电源必须有计算机故障检测、保护、诊断和故障记忆与报警电路。可维修性包括现场维修和车间维修两个方面。现场维修要求在电源系统运行情况下快速卸下故障电源模块,更换新模块,并使新模块方便地投入系统运行。车间维修是对故障电源本身的修理。对于小功率电源模块则一般不再修理。

随着芯片集成度的不断提高,电子设备内功能部件的体积不断减小,因而要求设备内部电源的体积和重量不断减小。直接装在印制板上的模块电源,还要求薄型化。对于为电子设备配套的电源,即使它并不在电子设备内部,也要求有小的体积和重量。提高开关频率是减小开关电源体积和重量的基本措施,因为变压器和电感电容等滤波元件的体积和重量随频率的提高而减小。提高开关频率要求发展高速电力电子器件和高频低损耗的磁芯及电容器,发展高强度、高绝缘性能和高导热性的绝缘材料,发展新型的零开关损耗电路拓扑和相应的电源结构与工艺方法。

降低开关电源生产成本和使用费用是提高市场竞争力的主要条件。

电源的电气性能对电子设备的工作有重要影响,电子设备的发展对开关电源的电气性能要求也不断提高。开关电源在家用电子电器和个人计算机中的应用,对安全性提出了更高的要求,应防止电源故障危害人身安全。

直流开关电源的电气性能包括输入特性、输出特性、附加功能、电磁兼容性和噪声容限。

直流开关电源的输入电源有两种:直流电源和交流电源。交流输入时,交流电压往往要先经整流滤波变换成直流电压后,再通过直流变换器转变为所需的直流电压。使用直流电源时,电源电压额定值及其变化范围,输入电流额定值及其变化范围,输入冲击电流,输入电压的突然下降或瞬时断电,输入漏电流等是必须考虑的因素。输入为交流时还必须考虑输入电压相数,电源额定频率及其变动范围,输入电流波形和输入功率因数等要求。

输出参数有额定输出电压、电流,输出电压可变范围,输出电流变化范围和输出电压的纹波。输出电压稳压精度是直流开关电源的重要技术指标,输入电压的变化、负载电流的变化、工作环境温度的变化和工作时间的增长都会使电源输出电压变化。稳压精度包括负载效应(负载调整率)和源效应(电网调整率)。负载效应是指当负载在 $0\sim 100\%$ 额定电流范围内变化时,输出电压的变化量与输出电压整定值的比值。源效应是指当电网电压在规定的范围内变化时,输出电压的变化量与输出电压整定值的比值。

开关电源还应有输出过压、欠压、过流和过热等保护功能,以免损坏用电设备。在构成电源系统时,开关电源还应有遥控、遥测和遥信功能。

开关电源应有高的电能转换效率、低的噪音、好的电磁兼容性和绝缘性能等。

1.1.5 直流开关电源的发展

高频化、小型化、模块化和智能化是直流开关电源的发展方向。高频化是小型化和模块化的基础,目前开关频率为数百 kHz 至数 MHz 的开关电源已有使用。功率重量比或功率体积比是表征电源小型化的重要指标, $50\text{W}/\text{in}^3$ 的开关电源早已上市,目前已向 $120\text{W}/\text{in}^3$ 发展。模块化与小型化分不开,同时模块化可显著提高电源的可靠性和使用灵活性,简化生产和使用。模块电源的并联、串联和级联既便于用户使用,也便于生产。智能化是便于使用和维修的基础,无人值守的电源机房、航空和航天器电源系统等都要求高度智能化,以实现正常、故障应急和危急情况下对电源的自动管理。

本章将介绍直流变换器的工作原理,包括 Buck 变换器、Boost 变换器、Buck/Boost 变换器、Cuk 变换器、Zeta 变换器和 Sepic 变换器等六种不隔离的直流变换器,以及 Forward 变换器、Flyback 变换器、推挽变换器、半桥变换器和全桥变换器等五种有隔离的直流变换器。这将为后面讨论这些直流变换器的软开关技术打下基础。

1.2 降压式(Buck)变换器

1.2.1 主电路拓扑和控制方式

降压式(Buck)变换器是一种输出电压等于或小于输入电压的单管非隔离直流变换器。图 1.1 给出了它的电路图和主要波形。Buck 变换器的主电路由开关管 Q , 二极管 D , 输出滤波电感 L_f 和输出滤波电容 C_f 构成。

在图 1.1(b)中, v_{be} 是开关管 Q 的驱动电压波形,在 $[0, T_{\text{on}}]$ 期间, Q 导通;在 $[T_{\text{on}}, T_s]$ 期间, Q 截止。设开关管开关周期为 T_s ,则开关频率 $f_s = 1/T_s$ 。导通时间为 T_{on} ,关断时间为 T_{off} ,则 $T_s = T_{\text{on}} + T_{\text{off}}$ 。若设占空比为 D_y ,则 $D_y = T_{\text{on}}/T_s$ 。改变占空比 D_y ,即改变了导通时间 T_{on} 的长短,这种控制方式称为脉冲宽度调制控制方式(Pulse width modulation,