

最新家电技术与维修丛书

# 开关电源

## 应用、设计与维修

常敏慧 申功迈 何希才 编著

 科学技术文献出版社

TN86  
C-519

最新家电技术与维修丛书

# 开关电源应用、设计与维修

常敏慧 申功迈 何希才 编著

科学技术文献出版社

Scientific and Technical Documents Publishing House

北京

20001115

**图书在版编目(CIP)数据**

开关电源应用、设计与维修/常敏慧等编著. -北京:科学技术文献出版社,2000.3

(最新家电技术与维修丛书)

ISBN 7-5023-3373-8

I. 开… II. 常… III. 开关电路-电源-基本知识 IV. TM91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 31995 号

**出 版 者:**科学技术文献出版社

**图 书 发 行 部:**北京市复兴路 15 号(中央电视台西侧)/100038

**图 书 编 务 部:**北京市西苑南一院东 8 号楼(颐和园西苑公汽站)/100091

**邮 购 部 电 话:**(010)68515544-2953,(010)68515544-2172

**图 书 编 务 部 电 话:**(010)62878310,(010)62878317(传真)

**图 书 发 行 部 电 话:**(010)68514009,(010)68514035(传真)

**E-mail:**stdph@istic.ac.cn;stdph@public.sti.ac.cn

**策 划 编 辑:**陈家显

**责 任 编 辑:**陈家显

**责 任 校 对:**赵文珍

**责 任 出 版:**周永京

**封 面 设 计:**樊征然

**发 行 者:**科学技术文献出版社发行 全国各地新华书店经销

**印 刷 者:**三河市富华印刷包装有限公司

**版 ( 印 ) 次:**2000 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

**开 本:**787×1092 16 开

**字 数:**537 千

**印 张:**21

**印 数:**1~3000 册

**定 价:**33.00 元

© 版权所有 违法必究

购买本社图书,凡字迹不清、缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换。

(京)新登字 130 号

## 内 容 简 介

本书主要介绍开关电源应用、设计与维修,内容包括开关电源的基本电路,开关电源集成控制器,开关稳压电源电路设计,开关电源主控元器件,开关电源实例与维修,新型开关集成稳压器应用等,内容丰富、通俗易懂。

可供开关电源设计与维修人员、电子工程技术人员、大专院校师生使用。

我们所有的努力都是为了使您增长知识和才干

科学技术文献出版社是国家科学技术部所属的综合性出版机构,主要出版科技政策、科技管理、信息科学、农业、医学、电子技术、实用技术、培训教材、教辅读物类图书。

# 前 言

开关电源具有效率高、体积小、重量轻等显著特点,因此,近来获得了迅速发展。电路设计师必须要考虑节约电能的问题,否则设计方案再好,也不会通过。而开关电源的采用正是节约能源的一项重要措施。目前,世界各国正在加紧研制新型开关电源,包括新的理论、新的电路方案和新的功率器件。本书参考了国外新的资料,并根据作者亲身实践的经验介绍了新型开关电源的设计方法,为读者设计开关电源提供一种新的思路。现在,计算机、通信、电视机及家用电器中逐渐采用了开关电源,而电源又是电子设备的核心,其质量好坏影响整个电子设备的可靠性,电子设备的故障 60% 来自电源,因此,本书参考了国内的有关资料介绍微型计算机、显示器、打印机、录像机、电视机等中采用的开关电源的原理与维修实例,供读者参考。

本书在编写过程中,参考了刘克文、王英剑、姚行中、苏成富、林平、张海笑、马晓平、王斌、姚德玉、王桂琴、何川等提供的有关资料,在此表示感谢。由于编者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,请读者批评指正。

ABM 04/04

# 目 录

第1章 概论 .....	(1)
1-1 概述 .....	(1)
1-2 开关稳压电源的技术指标 .....	(1)
1-3 开关电源的基本构成 .....	(5)
1-4 开关电源的基本组态 .....	(5)
1-5 开关稳压电源的分类 .....	(13)
第2章 开关电源集成控制器 .....	(14)
2-1 概述 .....	(14)
2-2 SG3524/3525A 集成控制器 .....	(14)
2-3 TL494/495 集成控制器 .....	(21)
2-4 UC3842A/3843A/2842A/2843A 集成控制器 .....	(24)
2-5 UC1861~UC1868 集成控制器 .....	(26)
第3章 开关稳压电源的设计 .....	(30)
3-1 输入回路的设计 .....	(30)
3-2 斩波型开关稳压电源的设计 .....	(34)
3-3 RCC 方式开关稳压电源的设计 .....	(40)
3-4 FCC 方式开关稳压电源的设计 .....	(55)
3-5 谐振开关稳压电源的设计 .....	(64)
3-6 功率反馈式高功率因数开关电源的设计 .....	(70)
3-7 正向激励变换器的设计 .....	(77)
3-8 隔离型开关稳压电源的设计 .....	(84)
3-9 集成开关稳压器的设计 .....	(90)
3-10 开关电源保护电路的设计 .....	(93)
3-11 开关电源设计的相关技术 .....	(98)
第4章 开关电源主控元器件 .....	(110)
4-1 二极管 .....	(110)
4-2 功率晶体管 .....	(111)
4-3 功率 MOS FET .....	(114)
4-4 绝缘栅双极晶体管 .....	(118)
4-5 开关电源中使用的厚膜电路 .....	(120)
4-6 开关电源中使用的磁性部件 .....	(135)
4-7 开关电源中使用的电容器 .....	(139)
第5章 开关电源实例与维修 .....	(145)
5-1 开关电源的典型方式 .....	(145)
5-2 微型计算机电源实例与维修 .....	(148)

---

5-3	显示器电源实例与维修 .....	(174)
5-4	打印机电源实例与维修 .....	(208)
5-5	UPS 不间断电源实例与维修 .....	(224)
5-6	传真机、复印机电源实例与维修 .....	(256)
5-7	录像机、放像机、VCD 机的电源实例与维修 .....	(265)
5-8	彩色电视机的电源实例与维修 .....	(280)
5-9	其他电子设备的电源实例与维修 .....	(285)
<b>第6章</b>	<b>新型开关集成稳压器的应用 .....</b>	<b>(300)</b>
6-1	RH5RC 系列应用电路 .....	(300)
6-2	TL499A 应用电路 .....	(301)
6-3	LT1072 应用电路 .....	(303)
6-4	RH5RH/I 系列应用电路 .....	(307)
6-5	BA178FP/BA00FP 系列应用电路 .....	(309)
6-6	LTC1159 系列应用电路 .....	(310)
6-7	HA16114P/FP,16120FP 系列应用电路 .....	(312)
6-8	RS5RM/J 系列应用电路 .....	(315)
6-9	FA76 系列应用电路 .....	(316)
6-10	FA53 系列应用电路 .....	(322)
6-11	M62213FP 系列应用电路 .....	(324)
6-12	$\mu$ PC1943/1944 系列应用电路 .....	(326)

# 第 1 章

## 概 论

### 1-1 概 述

目前空间技术、计算机、通信、雷达、电视机及家用电器中的电源逐渐被开关电源取代。现在一般应用的串联调整稳压电源,是连续控制的线性稳压电源,这种传统的串联稳压器,调整管总是工作于放大区,流过的电流是连续的,这种稳压器的缺点是承受过载和短路的能力差,效率低,一般只有 35%~60%。由于调整管上损耗较大的功率,所以需要采用大功率调整管并装有体积很大的散热器。

开关电源的调整管工作在开关状态,功率损耗小,效率可高达 70%~95%,稳压器体积小,重量轻,调整管功率损耗较小,散热器也随之减小。此外,开关频率工作在几十千赫,滤波电感、电容可用较小数值的元件。允许的环境温度也可以大大提高。但是,由于调整元件的控制电路比较复杂,输出的纹波电压较高,瞬态响应较差。所以开关电源的应用也受到一定限制。表 1-1 示出开关电源与线性串联稳压电源的各种性能的比较。

表 1-1 开关电源与线性串联稳压电源的比较

类 型	串联稳压电源	开关稳压电源
效率	低(30%~60%)	高(70%~85%)
尺寸	大	小
重量	重	轻
电路	简单	复杂
稳定度	高(0.001%~0.1%)	普通(0.1%~3%)
纹波(p-p)	小(0.1~10mV)	大(10~200mV)
暂态反应速度	快(50 $\mu$ s~1ms)	普通(500 $\mu$ s~10ms)
输入电压范围	输入电压范围大时,效率降低,无直流输入的自由度	输入电压范围很宽,亦可直流输入,100V/200V 共用亦可
成本	低	普通
EMI 干扰	无	有

### 1-2 开关稳压电源的技术指标

开关电源的技术指标有通用事项,包括电源名称、适用规格等,首先是安全规格,有关开关



电源各国都有相应的安全规格,例如,国际规格为 IEC950、IEC65;亚洲为电气用品管理法(日本);欧洲统一规格为 EN60-950、EN60065,其中北欧的 VDE(德国),BSI(英国),NEMKO(挪威),SEMKO(瑞典),DEMKO(丹麦),SEV(瑞士);南欧的 CEI(意大利),IRATR(西班牙);北美的 UL1950(美国),CSA950(加拿大)。有关 EMI 的规格,日本为 VCCI 1 类,2 类;美国为 FCCP15J A 类,B 类;德国为 VDE0871 A 类,B 类;国际上为 CISPR Pub11, Pub12。电气技术指标有输入与输出条件、附属功能等。机械结构为外形、安装和冷却条件等。环境条件有温度、湿度、振动和冲击等。其他条件有噪声规定、可靠性等。

### (1) 电气技术指标

#### ① 输入技术指标

作为开关电源的输入技术指标有输入电源相数、额定输入电压及电压的变化范围、频率、输入电流等。输入电源一般为单相 2 线制和 3 相 3 线制,还有单相 3 线制及 3 相 4 线制等。输入电源的额定电压因各国或地区不同而异,例如,美国规定的交流输入电源电压为 120V,欧洲为 220~240V,日本为 100V 及 200V,我国为 220V 及 380V。输入电压的变化范围一般为  $\pm 10\%$ ,加上配线路径及各国的具体情况,输入电压的变化范围多为  $-15\%$ ,  $+10\%$ 。

开关电源的输入几乎都是用电容进行平波的电容输入方式,因此,有高次谐波失真带来的电压尖峰的问题,但通常在正弦波的情况下保证上述给定的指标。3 相输入时虽有相电压的不平衡,但规定在输入电压的变化范围之内。

工频频率为 50Hz 或 60Hz,在频率变化范围不影响开关电源的特性时多半为 48~63Hz。还有船舶用的特殊电源频率为 400Hz,但因输入电容滤波器的电容电流及输入整流二极管的损耗增加等,降低了效率,若考虑要满足 EMI 的规定,可以采取减小此影响。

开关电源最大输入电流是表示输入电压为下限值时,输出电压及电流为上限值时的输入电流。额定输入电流是在输入电压及输出电压、电流为额定时的电流。开关电源的输入平波方式是电容输入方式,有较大的峰值电流,要有考虑电流的波峰系数(最大值/有效值之比,通常为 3.5)以及功率因数的规定。

输入电压瞬时跌落或瞬时断电时,在额定输出电压与电流条件下规定的输入电压是额定输入电压。瞬时断电有 10ms 与 20ms,若实用时按规定瞬时断电,多数情况下不会有问题。在输入的下限,输出保持时间变得很短,但 100% 输出时,在较低额定输入条件下,实用上问题也不大。

在规定的间隔对输入电压进行通断时,输入电流达到稳定状态之前流经的最大瞬时电流为冲击电流。对于开关电源是输入电源接通时与其后输出电压上升时流经的电流,这是由于输入开关的承受能力所限制,峰值电流一般为 30~50A。

一般情况下,当输入电源跌落与瞬时断电时,防止冲击电流的功能不能动作。另外,用热敏电阻只能防止冷启动时的冲击电流,由于每隔几十秒通断时防止功能不能动作,因此,也要规定通断的重复时间。

漏电流是流经输入侧地线的电流,从安全考虑一般规定为 0.5~1mA。

效率是指输入输出为额定值时,其输出功率与输入有效功率之比值。效率随输出电压、电流与输出路数及开关方式不同而异,多为 70%~80%。并随输入与输出的条件而变化,因此,要注意电子设备的散热条件等。

#### ② 输出技术指标

输出端的直流电压的公称值称为额定输出电压,对于其公称电压规定有精度与纹波系数

等。

额定输出电流是指输出端供给负载的最大平均电流。根据电子设备的不同,多路电源中某路输出电流增大,另路输出电流就得减小,保持总的输出电流不变。市售的开关电源产品为其使用通用性,多是在初级侧允许功率范围以内,增大次级侧各路输出功率。

稳压精度也称为输出电压精度或电压调整率,输出电压变动有多种原因。例如:

(a)静态输入电压的变动,这是指在其他指标为额定情况时,在规定的范围内输入电压缓慢变动时输出电压的变动。

(b)静态负载的变动,这是指其他指标为额定条件下,输出电流在规定的范围内缓慢变动时的输出电压的变动。在规定负载变动范围,由于多路输出的条件有非稳定输出的情况,包括规定最低负载电流。最低负载电流以下的规定精度一般是指保护功能不动作的范围内的情况。另外,对于多路输出的电源,电路方式的不同也会受到其他输出负载变动的影晌。

(c)环境温度的变动,这是指在规定的温度范围内,其他指标为额定值时输出电压的变动。

(d)初始特性的变动,这是指输入输出为额定值时,接入输入电源之后到规定时间时输出电压的变动,多为接入输入电源后 30 分钟时的值。

(e)经时特性的变动,这是指输入输出为额定值时,接入输入电源后的规定时间到下一次规定时间时输出电压的变动,也称为长时间特性的变动,一般多为接入输入电源后 30 分钟到 8 小时的值。

(f)动态输入电压的变动,这是指以规定的变化幅度输入电压急剧变化时输出电压的变动,一般是把输入电压的上限与额定输入电压以及额定输入电压与输入电压的下限作为变动幅度。

(g)动态负载的变动,这是指规定的变化幅度,输出电流急剧变化时输出电压的变动,后述的脉冲负载的规定等情况除外。

输出电压可调范围是指在保证电压稳定精度条件下,由外部可能调整的输出电压范围,一般为  $\pm 5\%$  或  $\pm 10\%$ 。条件是输入电压的下限时输出电压的最大值,以及输入电压的上限时输出电压的最小值。

若由电子设备的结构决定负载电流时,输出电流的变动范围则是电流变动较小的负载、感性负载等冲击电流较大的脉冲式负载的电流变动范围。

纹波是与输出端呈现的输入频率及开关变换频率同步的分量,用峰-峰值表示,一般为输出电压的 0.5% 以内。噪声是输出端呈现的除纹波以外频率的分量,也用峰-峰值表示,一般为输出电压的 1%,也包括与纹波没用明确区分的部分,规定是纹波与噪声总合值,多数场合是规定纹波噪声总合的情况,为输出电压的 2% 以内。

### ③ 附属功能

#### (a) 过电流保护

输出短路或过负载时对电源或负载要进行保护,即为过电流保护。保护特性有额定电流下垂特性,即  $\Gamma$  字型特性、恒流特性、恒功率特性,多数为下垂特性。过电流的设定值一般为额定电流的 110% ~ 130%。但在不损坏电源与负载的范围内,特别不规定短路保护时的电流值的情况也很多。一般为自动恢复型。

#### (b) 过电压保护

过电压保护就是输出端出现过电压时对负载进行保护的功能,过电压保护值一般规定为额定输出电压的 130% ~ 150%。对于输出电压可调范围比较大的电源,过电压保护值规定

为电压上限时不会发生误动作即可。发生过电压时使开关电源停振,断开输出。恢复的方法一般是再接通输入电源或加复位信号使开关电源恢复正常工作状态。

#### (c) 欠压保护

在输出电压达到规定值以下时,检测输出电压下降值,为保护负载以及防止负载误动作,使电源停止工作,并送出报警信号。

#### (d) 过热保护

电源内部异常或使用方法不当,电源温升超过规定值以上时,使电源停止工作,并送出报警信号。强制风冷情况下,当冷却功能异常时,多数情况规定使用部件最高温度以内使电源动作。

#### (e) 远程通/断控制

规定由外部信号通/断电源的输出所采用的装置,例如,采用 TTL 等半导体器件或继电器与开关等开环通/断控制。还必要规定采用继电器与开关时的机械振荡持续时间。

#### (f) 顺序

不仅要规定输出电压的上升与下降时间,还要规定电源准备就绪的各种信号。

#### (g) 远程检测

用输出端到电压检测点的输出引线对电压降进行补偿。但对于大电流与高精度输出的电源这种功能不太适用。该功能的补偿电压降一般为额定电压的 5%,在输出电压的可调范围内。补偿时要根据负载条件而定,以免引起振荡等故障。

#### (h) 接口

规定输入、输出以及信号等用端子,除端子形状、配列形式与接插件的名称以外,还要标记使用端子的编号。这时输入部与输出部及信号端子要很好分离开。有接插件时要标记对方的编号,以免弄错。

#### (i) 绝缘

用 500V 摇表测得输入端与框体间以及输入输出端子间绝缘电阻一般要为  $50M\Omega$  以上,用 100V 摇表测得输出与框体间绝缘电阻一般要为  $10M\Omega$  以上。

绝缘耐压根据输入电压的不同而异,但除各种安全规格规定以外,输入与输出端子间以及输入与框体间每分钟为交流 1 000V、1 250V 或者 1 500V,输出与框体间一般没有其他特殊的规定。输出端子间必要时规定特殊的绝缘。

### (2) 机械结构

机械结构规定的项目有:机箱的形状,外型尺寸与公差,装配位置,装配孔及螺钉的长度等,框体的材料及表面处理,冷却条件,如强制风冷还是自冷、通风方向与风量及开口尺寸,机外温升,接口位置及显示,操作部件的位置及文字显示的位置、重量等。

### (3) 环境等条件

规定的使用温度范围随使用场所不同而异,一般为  $-5^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ ,保存温度一般为  $-25^{\circ}\text{C} \sim 75^{\circ}\text{C}$ 。在温度急剧变化的场所使用时,有必要规定温度斜率,一般为  $15^{\circ}\text{C}/\text{小时}$  以内。

规定的使用湿度范围一般为 20%~85%,保存湿度范围一般为 18%~90%,结露时必须要有相应指示。一般规定常温与常湿的环境为  $15^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$  及 25%~85%。

对于耐振动的规定,多是在振动频率为 10~55Hz 时,工作时耐振动力为 0.5~1.0G,不工作时为 2.5~4G。耐冲击的规定随电源产品不同而异,为 10~100G 数量级。

对于噪声的规定有输入噪声、雷击浪涌以及静态噪声等。输入噪声是叠加在工频频率上

的脉冲状电压造成的,脉冲宽度一般为  $100\sim 800\mu\text{s}$ ,加的电压为  $1\ 000\text{V}$ ,最近也有规定脉冲宽度为几毫秒,电压为几百伏。雷击浪涌的规定对于通信设备为几千伏,一般为  $1\ 200\text{V}$ 。静态噪声的规定随电容容量与串联电阻值不同而异。

### 1-3 开关电源的基本构成

开关电源就是采用功率半导体器件作为开关元件,通过周期性通断开关,控制开关元件的占空比来调整输出电压。开关电源的构成框图如图 1-1 所示,基本由输入电路、变换电路、输出电路和控制电路等组成。输入电路包括线路滤波器、浪涌电流抑制电路以及整流电路、线路滤波器的主要作用是衰减电网电源线进入的外来噪声。浪涌电流抑制电路主要用于抑制浪涌电流。整流电路是把输入交流变为直流,可分为电容输入型和扼流圈输入型两大类,开关电源中通常采用电容输入型。功率变换电路是其核心部分,主要由开关电路和变压器组成。开关电路的驱动方式分为自激式和他激式两大类;功率变换电路分为非绝缘型、绝缘型和谐振型等;开关变压器因是高频工作,其铁芯通常采用铁氧体磁芯或非晶合金磁芯;开关晶体管要采用开关速度高、导通和关断时间短的晶体管,最典型的功率开关晶体管有功率晶体管(GTR)、功率场效应管(MOS FET)和绝缘型双极型晶体管(IGBT)等 3 种。控制方式分为脉宽调制、脉频调制、脉宽和频率混合调制等 3 种,其中最常用的是脉宽调制(PWM)方式。控制电路的主要作用是向驱动电路提供矩形脉冲列,控制脉冲的宽度从而达到改变输出电压的目的。输出电路是将高频变压器次级方波电压整流成单向脉动直流,并将其平滑成设计要求的低纹波直流电压。

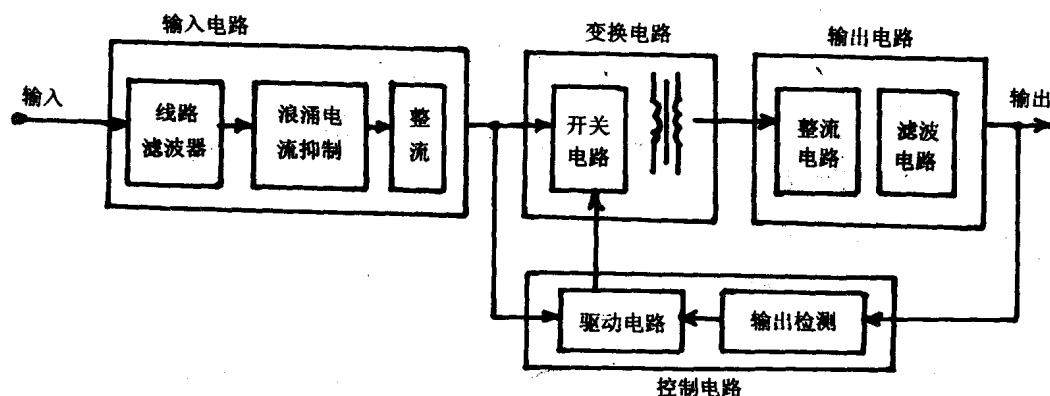


图 1-1 开关电源构成框图

### 1-4 开关电源的基本组态

#### 1. 脉宽调制(PWM)变换器

##### (1) 降压变换器(buck converter)

降压变换器的电路如图 1-2 所示,开关导通时,加在电感  $L$  两端电压为  $(V_1 - V_0)$ 。这期间电感  $L$  由电压  $(V_1 - V_0)$  励磁,磁通增加量为

$$\Delta\Phi_{\text{ON}} = (V_1 - V_0)t_{\text{ON}} \quad (1-1)$$

开关断开时,由于电感电流连续,二极管为导通状态。输出电压  $V_0$  与开关导通时方向相反加到电感  $L$  上。这期间电感  $L$  消磁,磁通减少量为

$$\Delta\Phi_{\text{OFF}} = V_0 t_{\text{OFF}} \quad (1-2)$$

稳态时,电感  $L$  中磁通的增加量与减少量相等,则降压型变换器的电压变比为

$$K = D \quad (1-3)$$

式中, $D$  为占空比,即为

$$D = t_{\text{ON}} / (t_{\text{ON}} + t_{\text{OFF}}) = t_{\text{ON}} / T_S \quad (1-4)$$

$T_S$  为开关周期, $t_{\text{ON}}$  为开关导通时间, $t_{\text{OFF}}$  为开关断开时间。由于占空比  $D$  小于 1, 因此,输出电压低于输入电压,即为降压变换器。

### (2) 升压变换器(boost converter)

升压变换器电路如图 1-3 所示。开关导通时,输入电压  $V_1$  加在电感  $L$  上,电感  $L$  由输入电压  $V_1$  励磁,导通期间,磁通增加量为

$$\Delta\Phi_{\text{ON}} = V_1 t_{\text{ON}} \quad (1-5)$$

开关断开时,由于电感电流连续,二极管变为导通状态。电压  $(V_1 - V_0)$  与开关导通时方向相反加到电感  $L$  上,电感  $L$  消磁,开关断开期间磁通减少量为

$$\Delta\Phi_{\text{OFF}} = (V_1 - V_0) t_{\text{OFF}} \quad (1-6)$$

稳定状态时,电感的磁通增加量与减少量相等,则升压型变换器的电压变比为

$$K = \frac{1}{1-D} \quad (1-7)$$

由于  $(1-D)$  小于 1, 因此,输出电压高于输入电压,即为升压变换器。

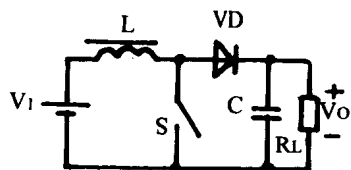


图 1-3 升压变换器的基本电路

电感消磁,磁通减少量为

$$\Delta\Phi_{\text{OFF}} = V_0 t_{\text{OFF}} \quad (1-9)$$

稳定状态时,电感  $L$  的磁通增加量与减少量相等,则升降压型的电压变比为

$$K = \frac{D}{1-D} \quad (1-10)$$

对于这种变换器,输出电压可以高于或低于输入电压,而且可任意设定,所以称为升降压型变换器。

PWM 变换器的控制特性曲线如图 1-5 所示,由特性曲线可知,控制开关的占空比  $D$  就可以改变输出电压的大小。

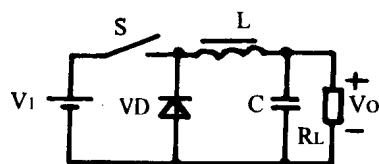


图 1-2 降压变换器的基本电路

### (3) 升降压型变换器(buck-boost converter)

升降压变换器的基本电路如图 1-4 所示。开关导通时,输入电压  $V_1$  加到电感  $L$  上,电感  $L$  励磁。导通期间,电感的磁通增加量为

$$\Delta\Phi_{\text{ON}} = V_1 t_{\text{ON}} \quad (1-8)$$

开关断开时,由于电感电流连续,二极管变为导通状态。输出电压  $V_0$  与开关导通时方向相反加到电感  $L$  上,电

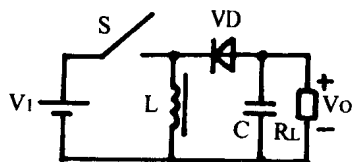


图 1-4 升降压变换器的基本电路

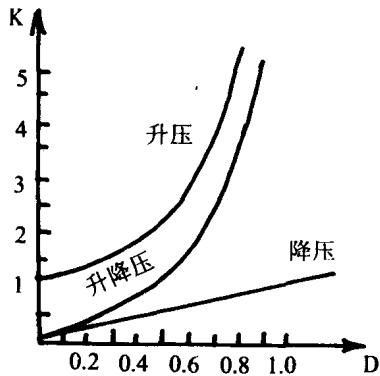


图 1-5 PWM 变换器的控制特性

对于这类变换器,也可以从能量的蓄积与释放的观点来说明其基本工作原理。电感的励磁就是蓄积能量,电感消磁就是释放能量。因此,对于这类变换器,开关导通时,来自输入电源的能量蓄积在电感  $L$  上,开关断开时,蓄积在电感  $L$  中能量释放供给负载,它们是用改变开关占空比来控制能量的蓄积与释放,获得直流输出的一种方式,所以也称为储能型。电感就是储能元件。

## 2. 谐振变换器

### (1) 概述

谐振变换器除了两个附加元件谐振电感  $L_1$  与谐振电容  $C_1$  外,其主要元件与 PWM 电路相同,图 1-6 所示电路称为准谐振变换器。谐振变换器技术是在 PWM 技术基础上发展起来的一种新型功率变换技术,它是在零电压或零电流下进行开关转换即所谓软转换,是以谐振正弦波进行功率调制,克服了 PWM 技术的缺点。谐振型技术采用改变开关频率、固定功率开关的导通或关断时间方式实现稳压。

在硬转换过程中,PWM 中使用的开关是在大电流和高电压处关断,这样,在开关瞬间开关自身必然消耗大量的功率。谐振型技术实施的软转换,它在正弦波的零电流或零电压处关断开关,开关损耗为零,远低于 PWM 技术中的开关损耗。此外,由于谐振电感和电容值是固定的,仅产生一个大大降低谐波的恒频正弦波,从而电磁干扰和射频干扰都会减少。

谐振电源具有较高的工作频率。PWM 技术固有的开关损耗使得实际的开关频率只能达到  $400 \sim 500\text{kHz}$ 。而谐振型电源中开关损耗很低,所以,它的开关频率可为  $200\text{kHz} \sim 1\text{MHz}$ 。其中,零电压开关在较高频率下比零电流开关更有效,因为它产生较小的高频开关损耗。较高的开关频率可减小变压器和输出滤波元件尺寸和输出纹波。此外,由于反馈电路的频带很宽,电源的瞬态响应要比 PWM 快得多。工作频率的提高,标志着开关电源产品的升级换代,同一功率等级的新产品与老产品相比,不仅重量轻,体积小,而且高频传导或辐射的电磁干扰被滤波、屏蔽或抑制,小信号扰动下的稳定性也能得到改善。

### (2) 零电流谐振开关(ZCS)

用于控制谐振型变换器的集成电路大多采用零电压开关(ZVS, Zero Voltage Switch)和零电流开关(ZCS, Zero Current Switch)控制技术,因此,谐振变换器又可分为零电压开关变换器和零电流开关变换器。而零电流开关是开关变换器中一种单元电路,由半导体开关  $S_1$ , 电感  $L_1$  和电容  $C_1$  组成,它是在零电流下导通与关断,基本电路如图 1-7 所示,有 L 和 M 型两种接法。其中,  $L_1$  用于限制开关的  $di/dt$ ,  $C_1$  用于辅助能量存储和传输。  $L_1$  和  $C_1$  在开关导通时组成串联谐振电路,用谐振开关替代 PWM 电路中的半导体开关可构成各种类型的谐振变换器电路,现以降压式零电流准谐振变换器 ZCS-QRC(ZCS Quasi Resonant Converter)为例说明其

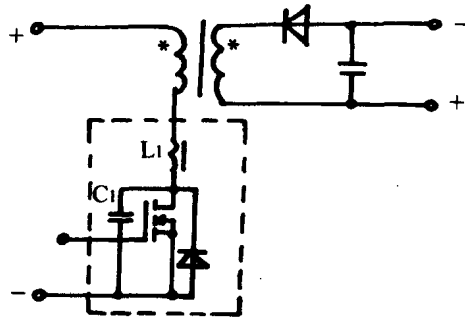
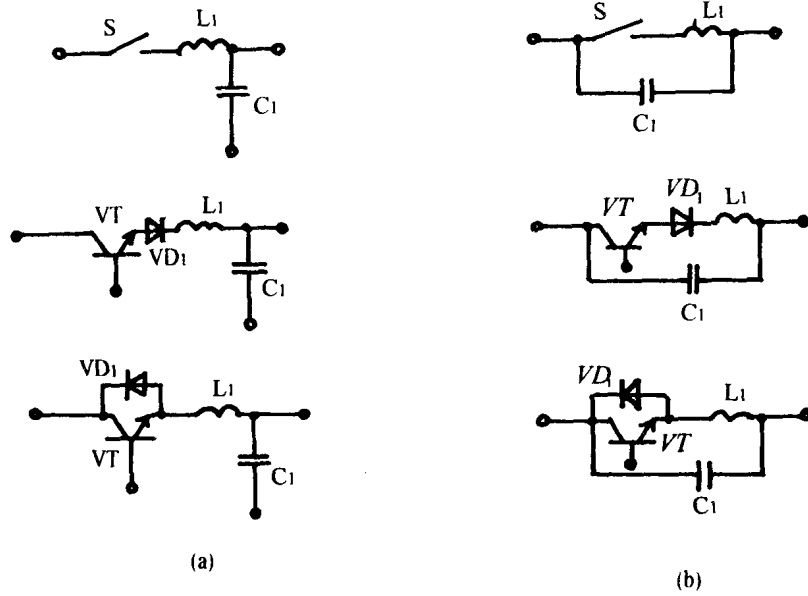
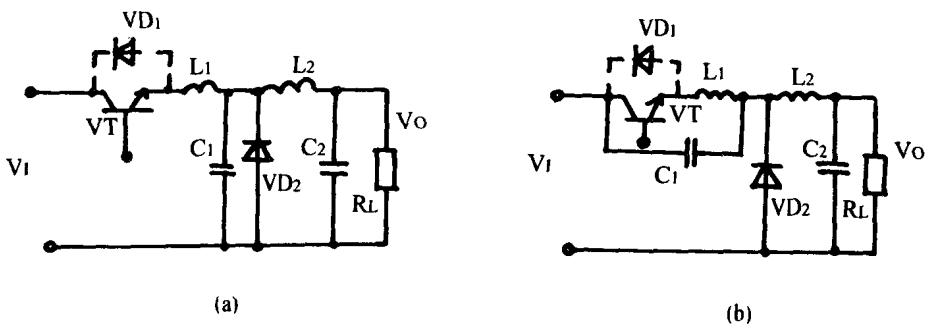


图 1-6 准谐振变换器

工作原理,如图 1-8 所示。为分析方便起见,假设所有元器件为理想器件,设  $L_2 > L_1$ ,从  $L_2$  输入端向输出端看作为恒流源,并定义特性阻抗  $Z_0 = \sqrt{L_1/C_1}$ ,以及  $\omega_0 = 1/\sqrt{L_1 C_1}$ ,  $f_0 = \omega_0/2\pi$ ,图中虚线表示的二极管为全波开关。



(a)L型;(b)M型  
图 1-7 零电流开关的基本电路



(a)L型;(b)M型  
图 1-8 准谐振降压式变换器

电路工作原理简介如下:一个开关周期分为图 1-9 所示的 4 种工作模式。设  $V_T$  导通前,  $VD_2$  流过的电流为  $I_0$ ,此时  $V_{C1} = 0$ 。当  $t = t_0$  时,  $VT_1$  导通进入第 1 种工作模式。

1) 线性阶段  $[t_0 \sim t_1]$  (参见图 1-9(a))。

在此阶段,由于  $VD_2$  流过负载电流  $I_0$  处于续流状态,因此,  $V_{VD2} = V_{C1} = 0$ 。  $L_1$  上的感应电势为  $V_I$ ,输入电流  $i_1$  线性上升并由式(1-11)所定,即

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{V_I}{L_1} \tag{1-11}$$

由于  $t = t_0$  时  $i_1(t_0) = 0$ ,因此

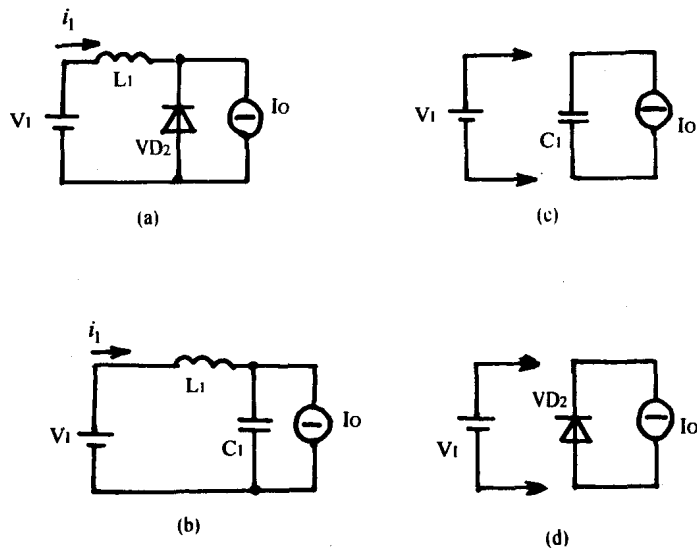


图 1-9 零电流开关的 4 种模式

$$i_1 = \frac{V_I}{L_1}(t - t_0) \tag{1-12}$$

在此阶段终了时,  $t = t_1, i_1(t_1) = I_0$ 。即可得到本阶段持续时间  $T_1$  为

$$T_1 = t_1 - t_0 = \frac{L_1 I_0}{V_I} \tag{1-13}$$

2) 谐振阶段  $[t_1 \sim t_2]$  (参见图 1-9(b))

在  $t = t_1$  时, 输入电流上升到  $I_0$ , 因此, 二极管电流下降到零而截止。  $L_1$  与  $C_1$  谐振, 输入电流继续增大,  $i_1$  除供给负载电流  $I_0$  外, 还以  $i_1 - I_0$  对电容  $C_1$  谐振充电。此阶段状态方程为

$$C_1 = \frac{dV_{C1}}{dt} = i_1 - I_0 \tag{1-14}$$

$$L_1 = \frac{di_1}{dt} = V_I - V_{C1} \tag{1-15}$$

由初始条件  $V_{C1}(t_1) = 0$  和  $i_1(t_1) = I_0$  求得

$$i_1 = I_0 + \frac{V_I}{Z_0} \sin \omega_0(t - t_1) \tag{1-16}$$

$$V_{C1} = V_I [1 - \cos \omega_0(t - t_1)] \tag{1-17}$$

如果是半波开关, VT 在  $i_1$  下降到零的  $t = t_a$  点自行关断(参见图 1-10(a))。如果是全波开关,  $i_1$  在 VT 关断后继续通过  $VD_1$  振荡, 将电容能量返回电源(参见图 1-10(b)), 电流  $i_1$  在  $t = t_b$  时再次为零, 本阶段结束。本阶段起始时间为  $t_1$ ,  $i_1$  下降到零的时间,  $t_a$  和  $t_b$  统称为  $t_2$ , 由式(1-16)可以得到:

$$\omega_0(t_2 - t_1) = \alpha = \sin^{-1} \frac{-Z_0 I_0}{V_I} \tag{1-18}$$

这个阶段的持续时间

$$T_2 = t_2 - t_1 = \frac{\alpha}{\omega_0} \tag{1-19}$$



由此可见,半波时  $t_2 = t_a$ , 随负载电流  $I_0$  的变化,  $\alpha$  在  $\pi \sim 3/2\pi$  之间变化。全波时  $t_2 = t_b$ ,  $\alpha$  在  $3/2\pi \sim 2\pi$  之间变化。

当  $t = t_2$ , 由式(1-17)求得

$$V_{C1}(T_2) = V_1(1 - \cos\alpha) \quad (1-20)$$

3) 恢复阶段 [ $t_3 \sim t_4$ ] (参见图 1-9(c))

晶体管开关在  $t = t_2$  时断开, 此时电容  $C_1$  上电压由式(1-20)决定, 并以  $I_0$  恒流向输出回路放电, 因此, 电容电压  $V_{C1}$  线性下降, 并在  $t = t_3$  时下降到零(参见图 1-10(a)和(b))。其状态方程为

$$C_1 = \frac{dV_{C1}}{dt} = I_0 \quad (1-21)$$

求得

$$V_{C1} = V_{C1}(t_2) \frac{I_0}{C_1} (t - t_2) \quad (1-22)$$

在  $t = t_3$  时,  $V_{C1}(t_3) = 0$ , 考虑到式(1-20), 求得本阶段持续时间为

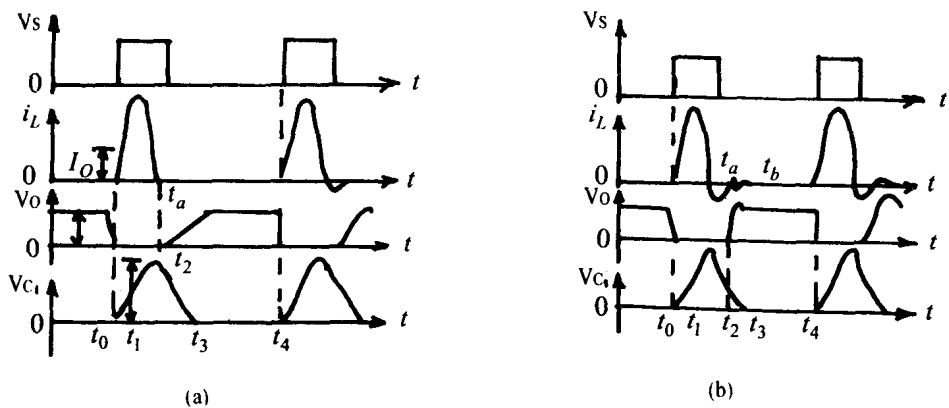
$$T_3 = t_3 - t_2 = C_1 V_{C1}(T_2) / I_0 = C_1 V_1 (1 - \cos\alpha) / I_0 \quad (1-23)$$

4) 续流阶段(参见图 1-9(d))

当电容放电电流下降到  $I_1$ ,  $V_{C1}$  接近零时, 二极管开始导通, 以后  $I_0$  流经二极管。此阶段持续时间为

$$T_4 = t_4 - t_3 = T - T_1 - T_2 - T_3 \quad (1-24)$$

式中  $T$  为开关周期, 典型电路波形如图 1-10 所示。



(a)半波;(b)全波

图 1-10 降压准谐振变换器波形

M 型谐振开关电路原理和波形与 L 型电路类似。输出电压  $V_0$  可以通过每周期输入能量  $W_1$  与输出能量  $W_0$  相等原则求得。其中

$$W_1 = V_1 \int_{t_0}^{t_1} i_1 dt + \int_{t_1}^{t_2} i_1 dt \quad (1-25)$$

$$W_0 = V_0 I_0 \quad (1-26)$$

将式(1-11)和式(1-16)代入式(1-25)积分, 并考虑到  $T_1, T_2, T_3$  和  $\omega_0 = 1/\sqrt{L_1 C_1}, Z_0 = \sqrt{L_1/C_1}$  得到