



电源系列丛书

软开关电源 原理与应用

王增福
李昶 编著
魏永明

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



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电源系列丛书

软开关电源原理与应用

王增福 李 昶 魏永明 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 提 要

本书系统地介绍了软开关电源的谐振变换器、零电压(零电流)开关 PWM 变换器、零电压(零电流)转换 PWM 变换器、移相控制零电压(零电流)PWM 变换器及有源钳位的各种软开关变换器的工作原理、典型应用和谐振元器件设计原则与计算方法。

本书适合从事开关电源开发、设计和生产的工程技术人员使用,也可为大專院校电力电子技术、电气自动化技术等专业的师生提供参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

开关电源原理与应用/王增福,李昶,魏永明编著. —北京:电子工业出版社,2006.4

(电源系列丛书)

ISBN 7-121-02437-3

I. 软… II. ①王… ②李… ③魏… III. 开关电源 IV. TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 026785 号

责任编辑:魏永昌 特约编辑:刘汉斌

印 刷:北京市李史山胶印厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:18.5 字数:475 千字

印 次:2006 年 4 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:28.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言

软开关电源是相对于硬开关电源而言的。人们通常所说的开关电源,指的是硬开关电源。这种电源,开关器件(开关管)是在承受电压或电流的情况下接通或断开电路的,因此在接通和关断的过程中会产生较大的损耗,即所谓开关损耗。电源的工作状态一定时,开关器件开通或关断一次的损耗也是一定的,因此开关频率越高,开关损耗也就越大。同时在开关过程中还会激起电路分布电感和寄生电容的振荡,带来附加损耗并产生电磁干扰,因而硬开关电源频率不能太高,还要采取防止电磁干扰的措施。

软开关电源的开关器件在开通或关断的过程中,或是加于其上的电压为零,即零电压开关,或是通过开关器件的电流为零,即零电流开关。这种开关方式显著地减小了开关损耗的开关过程中激起的振荡,可以大幅度地提高开关频率,为开关电源小型化、高效率创造了条件。谐振变换器、准谐振变换器、多谐振变换器、零电压开关脉冲调宽变换器、零电流开关脉冲调宽变换器、零电压转换脉冲调宽变换器、零电流转换脉冲调宽变换器、移相控制零电压转换全桥直流/直流变换器、移相控制零电流转换全桥直流/直流变换器及钳位吸收技术均可实现软开关电源。

谐振变换器实际上是负载谐振型变换器,按谐振元器件的谐振方式可分为串联谐振变换器和并联谐振变换器;按负载与电路的连接关系可分为串联负载谐振变换器和并联负载谐振变换器。在谐振变换器中,谐振元器件自始至终处于谐振的工作状态,参与能量变换的全过程。这类变换器对负载变化很敏感,一般采用频率调制的控制方法。

准谐振变换器和多谐振变换器的特点是谐振元器件参与能量变换的某一阶段,不是全程参与。这类变换器需要采取频率调制控制方法。

零电压开关脉冲调宽变换器和零电流开关脉冲调宽变换器是在准谐振变换器的基础上,增加一个辅助开关管来控制谐振元器件的谐振工作过程,实现恒定频率控制。它与准谐振变换器的不同之处在于谐振元器件的谐振时间与开关周期相比是非常短的,一般是开关周期的 $1/5 \sim 1/10$ 。

零电压转换脉冲调宽变换器和零电流转换脉冲调宽变换器的特点是变换器工作在脉冲调宽的方式下,电路简单,工作稳定,辅助谐振电路只是在主开关管开关时工作,实现开关管的软开关,其他时间停止工作。

移相控制零电压转换全桥式直流/直流变换器和移相控制零电流转换全桥式直流/直流变换器及两者混合式的变换器是大中功率软开关电源的主要形式。这类变换器通过改变全桥对角线上下开关管驱动电压移相角的大小来调节输出电压,让超前臂开关管的控制极上的电压领先于滞后臂开关管控制极上的电压一个相位,并在控制器的控制端对同一桥臂的两个反相驱动电压设置不同的死区时间,巧妙利用变压器漏感和开关管的结电容及变压器初次级之间寄生电容来完成谐振过程,实现零电压或零电流开通或关断,错开开关器件大电流与高电压同时出现的硬开关状态,抑制感性关断电压尖峰和容性开通时管温过高,减小了开关损耗与干扰。

钳位吸收电路可以抑制开关器件的浪涌电压或电流,降低开关管的 du/dt 和 di/dt 的影响,大幅度地减小开关损耗,使电路中的储能被利用或反馈到电网,具有“软化”开关过程的作用。

用,所以有人称之为广义软开关变换器或钳位变换器。

本书力图反映软开关电源的基本知识和相关内容,全面论述和分析各类软开关电源变换器的基本构成、工作原理和实际应用。软开关电源是在硬开关电源基础上发展起来的,它是通过在硬开关电源的主体电路上增加谐振、准谐振、多谐振或钳位吸收网络或辅助电路来“软化”开关器件,使开关器件在接通或关断的瞬间电压或电流为零或接近于零。因此硬开关电源方面的知识都适用于软开关电源,为减少篇幅,本书不重点叙述这方面的内容。

在本书编写过程中,我们对国内外已出版的有关软开关电源的论述和部分开关电源及器件生产厂商的技术资料进行了消化、理解、筛选和整理,将其中有价值的、实用性较强的部分编入本书之中。在此对本书涉及的国内外开关电源的专家深表感谢。

本书主要由王增福、李昶、魏永明编写,曲学基、曲敬铠、陈步亮、李然、范斌、张再鸣、张秀庭、李树鹏、石伟、曹丽、王春祥、王清泉、王月明、周桂荣、许京春、和平、金亮、胜利也参加了本书的编写工作。

张乃国教授对本书的编写提出了不少宝贵建议,魏永昌编辑对本书的出版做了大量的工作,在此表示感谢。

由于编著者水平有限,书中错误和不足之处在所难免,希望广大读者批评指正。

编著者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 开关电源的特点及其分类	1
1.2 软开关电源的特点及其种类	4
1.3 开关电源不可忽略的几个技术参数及其测试方法	7
1.3.1 动态响应	7
1.3.2 输出纹波和噪声	7
1.3.3 开关电源的无线电干扰特性及测试	9
1.3.4 可靠性方面的几个参数	12
1.4 本书的结构	14
第 2 章 软开关电源功率开关器件	15
2.1 功率晶体管(GTR)	16
2.1.1 功率晶体管的结构	16
2.1.2 特性与参数	19
2.1.3 GTR 的驱动与保护	25
2.2 功率场效应晶体管(Power MOSFET)	31
2.2.1 结构与工作原理	31
2.2.2 特性与参数	33
2.2.3 栅极的驱动与保护	38
2.3 绝缘栅双极晶体管(IGBT)	45
2.3.1 原理与特性	45
2.3.2 门极驱动	51
2.3.3 IGBT 的保护	58
第 3 章 软开关电源基础电路	63
3.1 基本变换器电路结构与拓扑	63
3.1.1 Buck 变换器	64
3.1.2 Boost 变换器	64
3.1.3 Buck/Boost 变换器	65
3.1.4 Cuk、Sepic、Zeta 变换器	65
3.1.5 单端反激式变换器	66
3.1.6 单端正激式变换器	67
3.1.7 半桥式变换器	68
3.1.8 全桥式变换器	69
3.2 谐振电路的基本概念	70
3.2.1 串联谐振电路	70
3.2.2 并联谐振电路	73
3.2.3 谐振开关	74

3.3 钳位吸收电路	75
3.3.1 最简单的软启动——串联电感	75
3.3.2 最简单的软关断——并联电容	75
3.3.3 RLD开关开通吸收电路	76
3.3.4 RCD开关关断吸收电路	76
3.3.5 无损LCD吸收电路	76
3.4 特种整流电路	77
3.4.1 倍压整流电路	77
3.4.2 倍流整流电路	78
3.4.3 同步整流(SR)电路	80
3.5 功率因数校正电路	82
3.5.1 无源功率因数校正电路	82
3.5.2 有源功率因数校正电路	82
3.5.3 单级PFC(功率因数校正)电路	83
3.5.4 软开关功率因数校正(PFC)电路	84
第4章 谐振变换器	85
4.1 全谐振变换器	85
4.1.1 串联负载串联谐振变换器	85
4.1.2 并联负载串联谐振变换器	92
4.2 准谐振开关变换器	94
4.2.1 零电流开关准谐振变换器	95
4.2.2 零电压开关准谐振变换器	97
4.3 多谐振开关变换器	104
4.3.1 零电压开关多谐振变换器	105
4.3.2 半桥式多谐振变换器	106
4.3.3 零电压开关多谐振变换器族	107
4.4 软开关谐振变换器的应用	108
4.4.1 电压谐振变换器应用实例	108
4.4.2 电流谐振变换器应用实例	110
4.4.3 多谐振变换器应用实例	115
第5章 有源钳位软开关变换器	120
5.1 有源钳位正激变换器	120
5.1.1 工作原理	120
5.1.2 电路设计	124
5.2 有源钳位反激变换器	125
5.3 有源钳位反激-正激变换器	126
5.3.1 工作原理	126
5.3.2 电路设计	130
5.4 有源钳位变换器的应用	131

第 6 章 软开关 PWM 变换器	135
6.1 PWM 技术	135
6.1.1 工作原理	135
6.1.2 SPWM 波形形成电路	139
6.1.3 PWM 反馈控制模式	142
6.2 ZCS PWM 变换器	147
6.2.1 工作原理	147
6.2.2 ZCS PWM 变换器与 ZCS QRCs 的比较	149
6.2.3 参数设计	149
6.2.4 ZCS PWM 变换器族	150
6.3 ZVS PWM 变换器	151
6.3.1 工作原理	151
6.3.2 ZVS PWM 变换器与 ZVS QRCs 的比较	153
6.3.3 参数设计	153
6.3.4 ZVS PWM 变换器族	154
6.4 ZCT PWM 变换器	155
6.4.1 工作原理	155
6.4.2 参数设计	158
6.5 改进型 ZCT PWM 变换器	159
6.5.1 工作原理	159
6.5.2 参数选值	164
6.6 ZVT-PWM 变换器	165
6.6.1 工作原理	166
6.6.2 辅助电路的参数设计	169
6.7 改进型 ZVT PWM 变换器	170
6.7.1 工作原理	170
6.7.2 辅助电路的参数设计	172
6.7.3 改进型 ZVT PWM 变换器族	173
6.8 ZVS-ZCS 全软开关变换器	174
6.8.1 ZVS-ZCS-Buck-PWM 变换器	174
6.8.2 单管 ZVS-ZCS-Buck-PWM 变换器	178
6.8.3 带反馈的 Buck-PWM 变换器	180
6.9 三电平软开关直流变换器	183
6.9.1 三电平软开关直流变换器	183
6.9.2 改进型 ZVS 三电平直流变换器	187
6.9.3 采用变压器次级辅助绕组的软开关 PWM 三电平变换器	188
第 7 章 移相控制软开关 PWM DC/DC 全桥变换器	192
7.1 相位调制 PWM 拓扑技术	194
7.1.1 工作原理	194
7.1.2 控制电路	196

7.1.3 栅极驱动信号延迟	198
7.2 移相控制 ZVS PWM DC/DC 全桥变换器	200
7.2.1 工作原理	200
7.2.2 实现 ZVS 的条件	205
7.2.3 次级侧占空比丢失	206
7.3 移相控制 ZCS PWM DC/DC 全桥变换器	206
7.3.1 工作原理	208
7.3.2 实现 ZCS 的条件及策略	210
7.3.3 电流占空比丢失	211
7.4 移相控制 ZVS/ZCS PWM DC/DC 全桥变换器	211
7.4.1 工作原理	212
7.4.2 参数设计	215
7.5 实际应用	216
7.5.1 1.5 kW ZVT 全桥变换器	216
7.5.2 2 kW ZVS/ZCS 全桥 PWM 变换器	218
第 8 章 软开关电源集成控制器	221
8.1 PFM 谐振型集成控制器 MC34066 系列	221
8.1.1 工作原理	222
8.1.2 应用举例	228
8.2 UC386X(61~68)准谐振软开关控制器	230
8.2.1 特点和引脚说明	230
8.2.2 额定参数	231
8.2.3 主要电气参数	231
8.2.4 工作原理	232
8.2.5 典型应用	239
8.3 移相谐振全桥软开关控制器 UC1875/UC2875/UC3875 系列	240
8.3.1 性能特点	240
8.3.2 技术参数	241
8.3.3 引出端功能介绍	245
8.3.4 工作原理	246
8.3.5 典型应用	249
8.4 移相谐振全桥软开关控制器 UC1879/UC2879/UC3879 系列	251
8.4.1 特点和引脚说明	251
8.4.2 额定参数	253
8.4.3 主要电气参数	254
8.4.4 工作原理	255
8.4.5 UC3879 与 UC3875 的比较	260
8.5 UC3855A/UC3855B 软开关功率因数预调节器	261
8.5.1 特点和引脚说明	262
8.5.2 额定参数	264

8.5.3 主要电气参数	265
8.5.4 工作原理	266
8.5.5 典型应用	274
附录 A 软开关电源常用词汇	277
参考文献	285

第1章 绪 论

电源大致可以分为两类:发出电能的电源和变换电能的电源。发出电能的电源是从电源的源头说起的,它有交流和直流、高压和低压、火力发电、水力发电、核能发电、风力发电、太阳能发电诸多方式之分,是通过机械能、热能、化学能等转换而来的。在很多情况下,这种电源难以满足人们使用的要求,需要进行再一次的变换,有人称之为“粗电”。

人们接触最多的发出电能的电源是公用电力网所提供的电源。电力网电源来自发电厂,目前发电厂的发电方式主要有火力发电、水力发电、核能发电等几种形式。火力发电是把热能转换为电能,水力发电是把机械能(水的位能)转换为电能,核能发电是把核能转换为电能。此外,还有风力发电、太阳能发电等可再生能源发电方式。

人们日常接触较多的另一类发出电能的电源是电化学电源,最典型的就是蓄电池和干电池。虽然蓄电池和一些可充电的干电池所储存的化学能是靠电源的充电得到的,但因为它利用(放电)的电能是由化学能直接转变而来的,所以仍属于发出电能的电源。

另外,对于从柴油发电机、风力发电机及从太阳能电池得来的电源,也可以归为发出电能的电源。

变换电能的电源是以满足人们使用电源的要求为出发点的,根据不同的使用要求和特点对发出电能的电源再进行一次变换。这种变换是把一种形态的电能变换为另一种形态的电能,它可以是交流电和直流电之间的变换,也可以是电压或电流幅值的变换,或者是交流电的频率、相位等变换。另一方面,这种电能形态的变换可以是电源的稳定度提高或对其他性能的改进,有人把这种电源称之为“精电”。

软开关电源输入和输出都是电能,它属于变换电能的电源。发出电能的电源不属于本书研究的范畴。

1.1 开关电源的特点及其分类

开关电源,就是电源电路中的功率变换器件工作在开关状态,它是在线性稳压电源的基础上产生的。图1-1是线性稳压电源的结构简图。图中的关键元器件是调整管VT。工作时检测输出电压得到 U_o ,将其和参考电压 U_r 进行比较,用其误差对调整管VT的基极电流进行负反馈控制。这样,当输入电压 U_i 发生变化,或负载变化引起电源的输出电压 U_o 变化时,就可以通过改变调整管VT的管压降来使输出电压 U_o 稳定。为了使调整管VT可以发挥足够的调节作用,VT必须工作在线性放大状态,且保持一定的管压降。因此,这种电源被称为线性稳压电源。线性稳压电源的直流输入电路通常是由工作在工频下的整流变压器T和二极管整流电路加电容滤波器组成的。由于交流电源电压变化范围有时较大,因此 U_i 的变化范围也较大。此外,二极管整流电路所接的滤波电容C不可能很大,这样, U_i 就有一定的脉动。但这些都可以通过调节调整管VT的压降,使输出电压 U_o 的精度和纹波都满足较高的要求。图1-1中,整流变压器T的作用有两个:一是通过对其电压比的合理设计,使 U_i 比 U_o 高出一个合适的值,确保调整管VT可工作在放大状态;二是使输出电压和交流输入电压实现电气隔离。

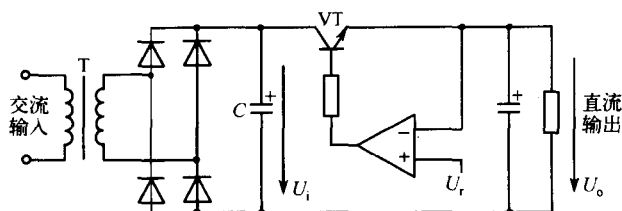


图 1-1 线性稳压电源的结构简图

图 1-1 所示的线性稳压电源虽然可以满足所需直流电压的高低和供电质量(精度、纹波等)的要求,但有两个严重的缺陷:一是调整管 VT 工作在线性放大状态,损耗很大,因而使整个电源效率很低;二是需要一个工频变压器 T,使得电源体积大、重量重。

开关电源就是为了克服线性稳压电源缺点而出现的,图 1-2 是单端反激式开关电源实用电路。它采用了 CW3840 脉宽调制集成控制器,其内部电路包括精密电压源、振荡器、误差放大器、过压及过流比较器、斜坡发生器、脉冲宽度调制及慢启动和程序控制等。

交流市电电压 220 V(或 110 V)经过桥式整流器 VD₁ 整流和 C₁、C₂ 滤波后产生 300 V 的直流电压,经电阻 R₃、R₄ 降压后加在 CW3840 的 15 端上作为工作电压。由于电容器 C₃ 的作用,使 CW3840 的工作电压逐渐升到 12 V。该电压经过 R₇、R₈ 分压后加到 2 端欠压比较器上。该比较器的阈值电压设定在 3 V。当 2 端电压低于 3 V 时,比较器输出低电平,使集成电路中的驱动晶体管截止及启动锁存器锁住,指示处于欠电压故障,并使 8 端及电容 C₉ 上为低电平,保护电源为慢启动。

当 2 端电压高于 3 V 时,比较器输出高电平,使集成电路内部的驱动管导通,整个电源电路进入工作状态,并将启动锁存器打开,使 CW3840 脱离欠电压故障状态。

本电源的工作频率由 R₁₄、C₄ 决定。其数值大约为 50 kHz。

E/A 是误差放大器。它是标准的运算放大器。其反相端 17 接取样电路, N₄ 是取样绕组, R₇、R₈ 是取样电阻,其同相端接 16 端的精密参考电压源,输出信号控制脉宽调制电路。如果输出电压升高,取样绕组 N₄ 的电压就随着升高,通过取样电阻送入误差放大器的反相端,误差放大器输出变低, PWM 输出脉冲变窄,开关管 VT₃ 及推动管 VT₁、VT₂ 导通时间变短,馈送至负载及取样绕组上的能量减少,使输出电压下降。反之亦然,能保证输出电压的稳定。

COMP 是欠电压比较器。本电源的欠压保护设计在 9 V 上,即控制电路的供电电压低于 9 V 时,电源停止工作,没有电压输出。

OVP 是过压保护比较器。过压保护点设计在 400 V,即交流输入电压经过整流后超过 400 V 时,比较器翻转,使电源停止工作,没有电压输出。

C/L 是电流限制比较器。过流保护是逐个脉冲限流保护方式与过流关闭保护方式并用。

比较器的动作阈值由精密参考电压 U_{ref} 和电阻 R₁₇、R₁₈ 的阻值决定。其值为 $\frac{R_{18}}{R_{17} + R_{18}} \cdot U_{ref}$ 。取样则由串联在开关功率管 VT₃ 发射极回路的电阻 R₂₅ 完成。过流信号使 6 端与 7 端间差值电压超过 0.4 V。电流限制比较器输出高电平,使整个电源停止工作,切断输出电压。过流故障排除后,电源能自动恢复正常。

VT₃ 是高反压开关管 MJE13005。它用了 R₂₆、C₁₁、VD₃ 和 R₂₇、C₁₂、VD₇ 两组保护网络来保护。VT₁ 作为加速驱动管,VT₂ 可作为加速关断管。电源有两组输出:一组为 5 V、5 A;另一组为 12 V、2 A。

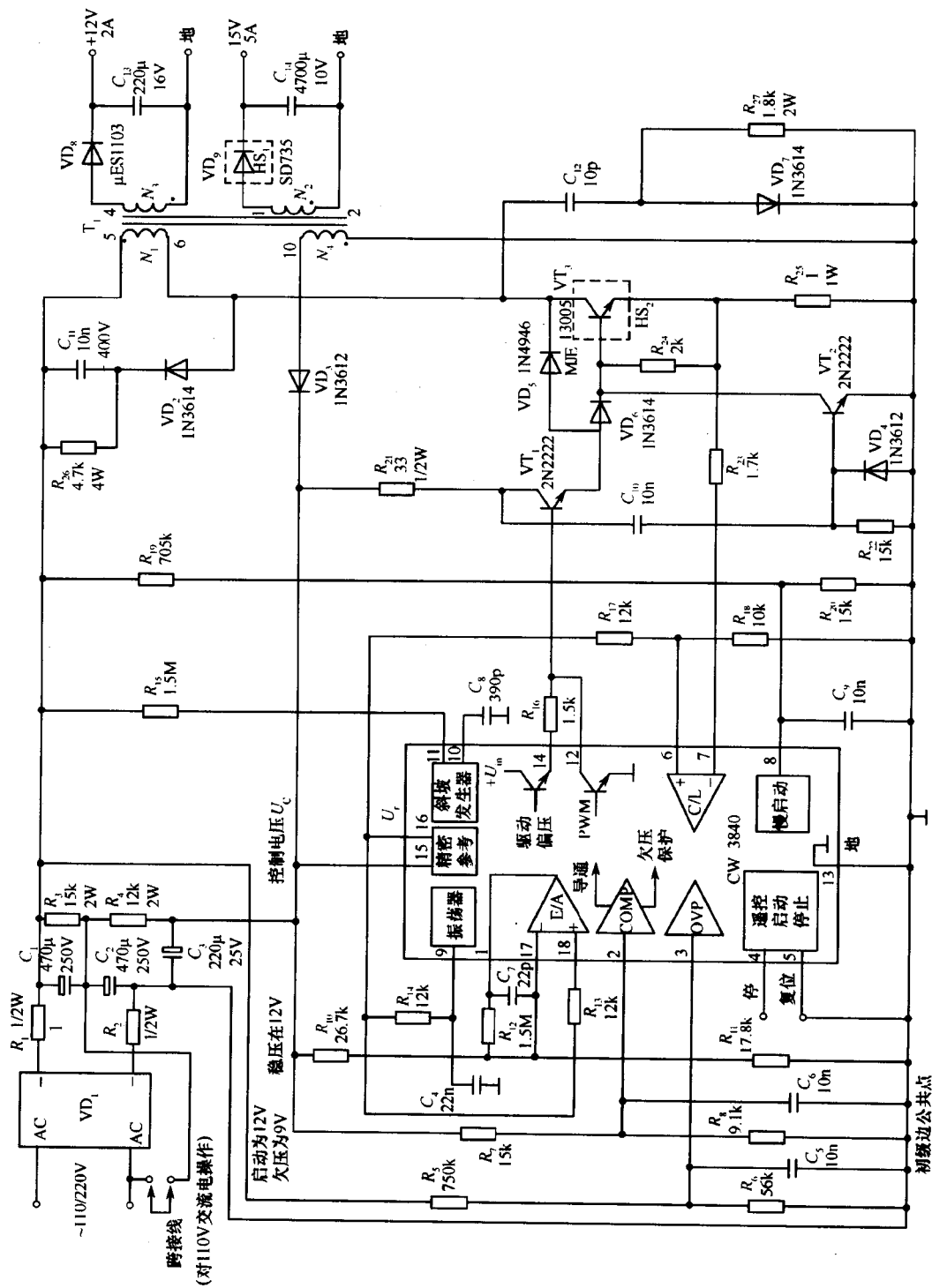
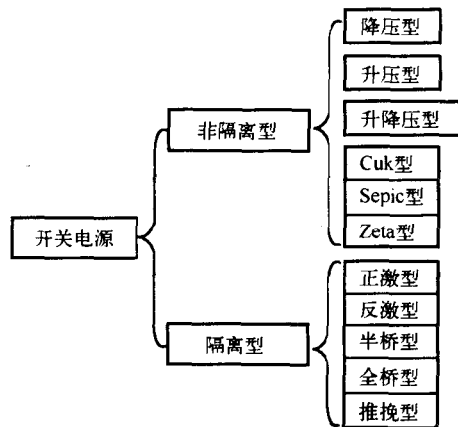


图 1-2 单端反激式开关电源实用电路

上述电路工作原理看起来相当复杂,但比起图 1-1 的线性稳压电源来,却有几个突出的特点。首先,该电路中起调节输出电压作用的电子器件都工作在开关状态,损耗很小,使得电源的效率可达到 90% 以上。其次,电路中起隔离和电压变换作用的变压器是高频变压器,其工作频率多为 20 kHz 以上。因为高频变压器的体积可以做得很小,从而使整个电源的体积大为缩小,重量也大大减轻。当然,由于工作频率高,滤波器的体积也大为减小。由于图 1-2 的电源中的电力电子器件总是工作在开关状态,因此相对于线性稳压电源而言,称之为开关电源。

20 世纪 50 年代,美国宇航局为运载火箭开发了第一台开关电源,在近半个世纪的发展过程中,开关电源技术得到飞速发展并广泛地应用到计算机、电子、电器设备、家电等领域,逐步取代了传统的线性稳压电源。

开关电源种类和电路结构有多种多样,分类的方法更是五花八门。根据开关电源电路输出端与输入端是否电气隔离及电路结构形式两个原则,可以将开关电源分类如下:



1.2 软开关电源的特点及其种类

前一节所介绍的开关电源,开关管工作在硬开关(Hard switching)状态。图 1-3 是开关管开关时的电压和电流波形。由于开关管不是理想器件,在开通时开关管的电压不是立即下降到零,而是有一个下降时间,同时它的电流也不是立即上升到负载电流,也有一个上升时间。在这段时间里,电流和电压有一个交叠区,产生损耗,我们称之为开通损耗(Turn-on loss)。当开关管关断时,开关管的电压不是立即从零上升到电源电压,而是有一个上升时间,同时它的电流也不是立即下降到零,也有一个下降时间。在这段时间里,电流和电压也有一个交叠区,产生损耗,我们称之为关断损耗(Turn-off loss)。因此在开关管开关工作时,要产生开通损耗和关断损耗,统称为开关损耗(Switching loss)。在一定条件下,开关管在每个开关周期中的开关损耗是恒定的,变换器总的开关损耗与开关频率成正比,开关频率越高,总的开关损耗越大,变换器的效率就越低。开关损耗的存在限制了变换器开关频率的提高,从而限制了变换器的小型化和轻量化。

开关管工作在硬开关时还会产生高的 di/dt 和 du/dt ,从而产生大的电磁干扰(Electromagnetic Interference, EMI)。图 1-4 给出了接感性负载时,开关管工作在硬开关条件下的开关管的开关轨迹,图中虚线为双极性晶体管的安全工作区(Safety Operation Area, SOA),如果不改善开关管的开关条件,其开关轨迹很可能会超出安全工作区,导致开关管的损坏。

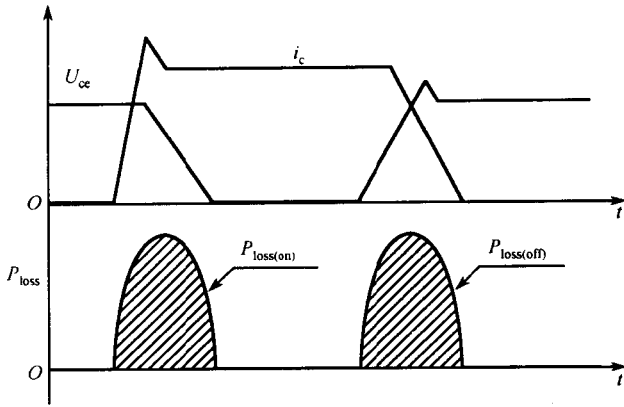


图 1-3 开关管开关时的电压和电流波形

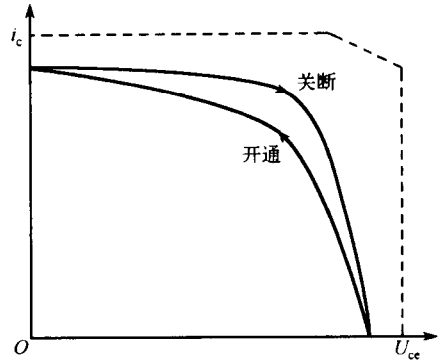


图 1-4 开关管工作在硬开关条件下的开关轨迹

减小开关损耗的途径就是实现开关管的软开关(Soft switching),因此软开关技术应运而生。图 1-5 给出了开关管实现软开关的波形图。

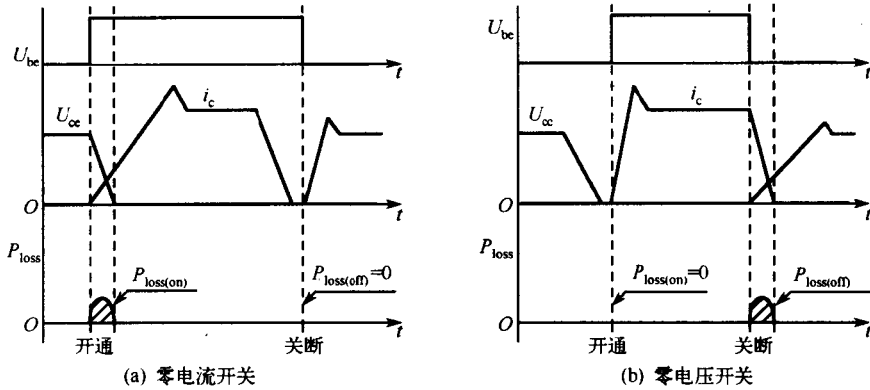


图 1-5 开关管实现软开关的波形图

从前面的讨论可以知道,开关损耗包括开通损耗和关断损耗。减小开通损耗有以下几种方法:

(1) 在开关管开通时,使其电流保持在零,或者限制电流的上升率,从而减小电流与电压的交叠区,这就是所谓的零电流开通。从图 1-5(a)可以看出,开通损耗大大减小。

(2) 在开关管开通前,使其电压下降到零,这就是所谓的零电压开通。从图 1-5(b)可以看出,开通损耗基本减小到零。

(3) 同时做到(1)和(2),在这种情况下,开关损耗为零。

从图中可以看出减小关断损耗有以下几种方法:

(1) 在开关管关断前,使其电流减小到零,这就是所谓的零电流关断。从图 1-5(a)可以看出,关断损耗基本减小到零。

(2) 在开关管关断时,使其电压保持在零,或者限制电压的上升率,从而减小电流与电压的交叠区,这就是所谓的零电压关断。从图 1-5(b)可以看出,关断损耗大大减小。

(3) 同时做到(1)和(2),在这种情况下,关断损耗为零。

图 1-6 给出了开关管工作在软开关条件下的开关轨迹,从图中可以看出,此时开关管的工作条件很好,不会超出安全工作区。

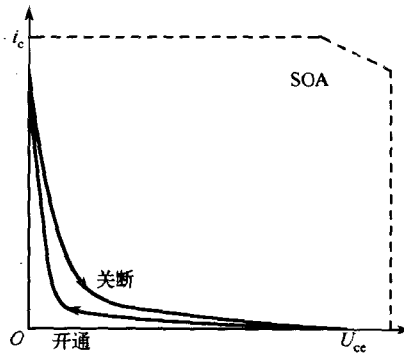


图 1-6 开关管工作在软开关条件下的开关轨迹

几十年来,已研发并得到应用的各种软开关电源见表 1-1。

表 1-1 软开关技术发展过程

提出时间	软开关技术	开关电源中应用
20 世纪 70 年代	串联或并联谐振	半桥或全桥
20 世纪 80 年代初	有源钳位 ZVS	主要是单端
20 世纪 80 年代中	准谐振或多谐振	单端或桥式
20 世纪 80 年代末	ZVS/ZCS-PWM ^①	单端或桥式
20 世纪 80 年代末	移相全桥 ZVS-PWM	全桥
20 世纪 90 年代初	ZVT/ZCT-PWM ^② 移相全桥混合 ZVS/ZCS-PWM	全桥

① ZVS/ZCS-PWM 变换技术是 PWM 变换技术和 ZVS/ZCS 准谐振变换技术的综合。

② ZVT/ZCT-PWM 变换技术是另一种形式的零电压/零电流开关技术。

软开关电源的变换技术一般可分为以下几类:

(1) 全谐振型变换器,一般称之为谐振变换器(Resonant converters)。该类变换器实际上是负载谐振型变换器,按照谐振元件的谐振方式,分为串联谐振变换器(Series resonant converters, SRCs)和并联谐振变换器(Parallel resonant converters, PRCs)两类。按负载与谐振电路的连接关系,谐振变换器可分为两类:一类是负载与谐振回路相串联,称为串联负载(或串联输出)谐振变换器(Series load resonant converters, SLRCs);另一类是负载与谐振回路相并联,称为并联负载(或并联输出)谐振变换器(Parallel load resonant converters, PLRCs)。在谐振变换器中,谐振元件一直谐振工作,参与能量变换的全过程。该变换器与负载关系密切,对负载的变化很敏感,一般采用频率调制方法。

(2) 准谐振变换器(Quasi-resonant converters, QRCs)和多谐振变换器(Multi-resonant converters, MRCs)。这类变换器的特点是谐振元器件参与能量变换的某一个阶段,不是全程参与。准谐振变换器分为零电流开关准谐振变换器(Zero-current-switching Quasi-resonant converters, ZCS QRCs)和零电压开关准谐振变换器(Zero-voltage-switching Quasi-resonant converters, ZVS QRCs)。多谐振变换器一般实现开关管的零电压开关。这类变换器需要采用频率调制控制方法。

(3) 零开关 PWM 变换器(Zero switching PWM converters)。它可分为零电压开关 PWM 变换器(Zero-voltage-switching PWM converters)和零电流开关 PWM 变换器(Zero-current-switching PWM converters)。该类变换器是在 QRCs 的基础上,加入一个辅助开关管,来控制谐振元件的谐振过程,实现恒定频率控制,即实现 PWM 控制。与 QRCs 不同的是,谐振元件的谐振工作时间与开关周期相比很短,一般为开关周期的 $1/10 \sim 1/5$ 。

(4) 零转换 PWM 变换器。它的特点是辅助谐振电路只是在主开关管开关时工作一段时间,实现开关管的软开关,其他时间停止工作。

(5) 有源钳位软开关变换器。在开关电源的开关管上并联钳位电路,可以抑制开关管上的电压应力。有源钳位软开关电源变换器,在开关管关断时可以吸收浪涌能量,在开关管导通时,能将吸收的能量馈入电网。有源钳位 ZVS 变换器可应用于正激和反激等多种开关电源中。

(6) 广义软开关 PWM 变换器。它利用吸收网络以减小开关损耗,“软化”开关过程,降低 du/dt 或 di/dt 的功能,使开关管电压和电流在开关过程中交叠的面积减小,大幅度降低开关损耗,有人称之为广义软开关技术。

1.3 开关电源不可忽略的几个技术参数及其测试方法

通常所谈论的电源技术参数或性能指标,无非是输出功率、输出调节范围和电压调整率、负载调整率、精度、稳定度及转换效率。但对于开关电源,尤其是软开关电源,除此之外,不可忽略的还有电磁干扰、寿命、故障率方面一些技术参数。因为它属于高频电源设备的范畴,对于电磁辐射比较敏感,容易干扰别的电磁设备或供电电网,同时也容易受其他电磁设备的干扰,为此重点介绍如下。

1.3.1 动态响应

动态响应是评定开关电源稳定性的重要指标。当负载出现突变时,所有电源都会有一个相应的响应时间。此刻,电源的输出电压会出现瞬间的过冲,然后回到正常输出状态。动态响应是通过对过冲幅度的大小、响应时间的长短来测量的,图 1-7 是开关电源动态响应的波形。

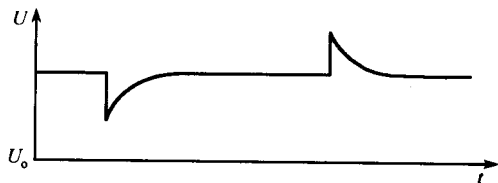


图 1-7 开关电源动态响应的波形

具体测量的方法是用电子负载来模拟电源负载的突变,即负载电流为额定值的 $25\% \sim 50\% \sim 25\%$, $50\% \sim 75\% \sim 50\%$ 阶跃变化,用示波器测量其输出电压的最大偏差和响应时间。另外,因为电流阶跃不是理想的,总存在一定的斜率,如果没有电流变化率的参照标准,测量结果就缺乏可比性。在美国的工业标准中,一般取电流变化率为 $2 \text{ A}/\mu\text{s}$ 或 $5 \text{ A}/\mu\text{s}$ 。另外为了避免手动开关带来的误差和测试结构不准确,应采用可控制电流变化率的电子开关来通断负载。

1.3.2 输出纹波和噪声

纹波和噪声是叠加在输出直流电压的交流成分,对其进行测量应在额定负载和常温下进行。对于开关电源的变换器来说,输出纹波电压是带有高频分量小脉冲,因此通常测量峰-峰值,用毫伏(mV)峰-峰值表示。