

DESIGN OF
RESONANT HIGH FREQUENCY POWER CONVERTER

谐振式高频电源转换器 设计

姜岩峰 李宇乔 著



化学工业出版社

DESIGN OF
RESONANT HIGH FREQUENCY POWER CONVERTER

谐振式高频电源转换器 设计

姜岩峰 李宇乔 著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

谐振式高频电源转换器设计/姜岩峰, 李宇乔著.

北京: 化学工业出版社, 2010. 10

ISBN 978-7-122-08959-5

I. 谐… II. ①姜… ②李… III. 高频-电源-
变换器-设计 IV. TN624.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 121852 号

责任编辑: 宋 辉

文字编辑: 孙 科

责任校对: 战河红

装帧设计: 关 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

720mm×1000mm 1/16 印张 15¼ 字数 275 千字 2011 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 98.00 元

版权所有 违者必究

前言

根据电源发展战略规划, 2010年后所有电子类产品的效率均要达到90%以上。目前国内大多数电源设计工程师对于传统意义上的电源转换器架构的设计比较熟悉, 但高效率谐振式电源转换器的设计方法与传统的电源设计方法存在较大不同, 本书主要针对国际上提出的“白金”级电源变换器标准, 系统介绍了谐振式高频电源转换器的设计方法, 该设计方法是对传统低效率电源变换器设计方法的重要补充和突破。

本书内容主要以介绍设计谐振电源理念为主, 从设计的角度切入, 以较浅显的概念说明, 让有意设计高效率电源的工程师能快速完成设计与验证, 也期待读者能建立正确的设计观念, 利用本书的设计方法与流程来完成产品的设计。

本书共分7章, 首先在第1章全面概述了电源设计的基本概念, 并针对传统意义上的交换式电源转换器种类做了基本介绍; 在第2章中介绍了具有“高效节能”意义的电源转换器的技术发展趋势; 第3章针对高效能源中必不可少的功率因数校正电路的设计作了详细的说明; 第4章则对于谐振式转换器的设计方法进行了深入的剖析; 在第5章中, 根据业界的需要, 以300W的液晶电视上所用电源的开发设计为例, 介绍了现代高效率电源的整个设计流程, 读者借此可掌握完整的设计技巧和方法, 同时, 在第5章附有应用于个人电脑、电视机等产品中的谐振式电源电路, 所有电路均经过实际应用检验, 给有意学习和使用谐振式电源产品的工程师以参考; 第6章介绍了电源系统中常用的磁性元件的相关知识; 第7章介绍了基于整机考虑的电源电磁兼容性问题, 均是电源设计中的热点问题。

本书是由海峡两岸科研人员携手完成的, 在深圳伊顺电子公司总经理朱威先生的联络和资助下, 由北方工业大学微电子中心姜岩峰教授和台湾科技大学副教授、虹冠电子首席专家李宇乔先生合作编写, 其中第1章、第2章、第6章、第7章由姜岩峰编写, 第3章至第5章由李宇乔编写。本书适合于电源设计工程师和相关专业的科研人员参考。

在此特别感谢颜上进博士提供个人论文数据给予引用, 以及台湾虹冠电子提供相关的PFC与谐振控制IC数据, 从而丰富了本书的内容, 同时感谢北方工业大学微电子中心的范杰和侯明金所做的资料整理工作。

限于编者水平, 书中难免存在不妥之处, 敬请业内人士批评指正。

著者

目 录

第 1 章 传统开关电源变换器	1
1.1 开关电源的基本概念	1
1.2 不同拓扑结构介绍	5
1.2.1 Buck 开关型调整器拓扑结构	5
1.2.2 Boost 开关调整器拓扑结构	9
1.2.3 Buck-Boost 变换器拓扑结构	13
1.2.4 有主从输出的推挽拓扑结构	15
1.2.5 正激变换器拓扑结构	17
1.2.6 双端正激变换器拓扑结构	21
1.2.7 交错正激变换器拓扑结构	22
1.2.8 半桥变换器拓扑结构	23
1.2.9 全桥变换器拓扑结构	26
1.2.10 反激变换器	27
1.2.11 交错反激变换器	30
1.2.12 SCR 谐振拓扑结构	31
1.2.13 SCR 谐振桥式拓扑结构	33
1.2.14 Cuk 变换器拓扑结构	37
第 2 章 电源变换器的发展趋势	39
2.1 功率因数对市电的影响	39
2.2 80 PLUS 效率的要求	40
2.3 谐振式转换器的应用	42
第 3 章 功率因数修正器种类与设计	45
3.1 电源产品的设计流程	45
3.2 功率因数修正器控制模式	47
3.2.1 边界模式控制方式	49
3.2.2 平均电流控制方式	51
3.3 CRM 功率因数修正器的设计	54
3.4 CCM 功率因数修正器的设计	58

3.4.1	概述	59
3.4.2	主动式功率因数修正	60
3.4.3	输入的失真源	62
3.4.4	功能方块图	65
3.4.5	设计流程	68

第4章 谐振式转换器设计 82

4.1	串联谐振转换器	83
4.2	SRC/LLC+SR 的设计	89
4.3	Mathcad 设计工具	131
4.3.1	Mathcad 7.0 的特色	132
4.3.2	Mathcad 7.0 中的基本概念	134
4.3.3	Mathcad 7.0 的工作界面	136

第5章 设计实例 138

5.1	系统规格确认	138
5.2	输出电感与电容设计	139
5.3	电流检测电路设计	142
5.4	功率晶体管的选用	143
5.5	同步整流开关驱动电路的设计	144
5.6	电流模式控制器的设计	145
5.7	同步信号产生器的设计	147
5.8	转换器的效率评估	149
5.9	谐振电感和耦合电容的设计与选择	151
5.10	常用电路集锦	153
5.10.1	150W 适配器电路	153
5.10.2	120~350W LED 照明电路	156
5.10.3	30W/60W LED 驱动电路	159
5.10.4	175W LCD TV 电源电路	160
5.10.5	350W LCD TV 电源电路	163
5.10.6	90+服务器电源电路	167
5.10.7	90+PC 机电源电路	172
5.10.8	150~500W 90+工业用电源电路	180

第6章 开关电源中的磁性材料及设计 185

6.1	磁性材料的基本特征	185
6.2	软磁材料	190
6.3	磁芯结构	193
6.4	变压器磁芯材料、几何结构及峰值磁通密度的选择	196

6.5	功率变压器的设计	201
6.5.1	变压器设计的一般问题	201
6.5.2	磁芯尺寸	206
6.5.3	举例说明变压器的设计	210

第7章 电源转换器的电磁兼容性问题 216

7.1	电磁干扰 (EMI) 的基本概念	216
7.2	电磁兼容设计	218
7.3	EMC 标准与规范	219
7.4	电磁骚扰源和耦合途径	220
7.4.1	电磁环境	220
7.4.2	电磁骚扰的特性	220
7.4.3	自然骚扰源与人为骚扰源	221
7.4.4	电磁骚扰的耦合途径	222
7.5	考虑电磁兼容的电路主板设计	224
7.5.1	有源器件的选型和电磁骚扰发射的抑制	224
7.5.2	电源完整性设计	228
7.5.3	PCB 走线阻抗及布局布线	229
7.5.4	RF 产品设计的 PCB 布线技巧	231
7.5.5	多层板设计	232

参考文献 238

1.1 开关电源的基本概念

人们通常所接触的、所用的电源中，许多都是开关电源。那么开关电源到底是什么呢？

这要从电源的发展说起了。最开始的时候，人们利用的是化学电源，主要是各种原电池，那个时候电力系统远没有现在这么发达。电源主要是供一些物理学家研究电现象使用。

之后，随着电磁转换的深入研究，电-热、电-光、电-动等能量间的转换手段和理论逐步完善，化学电源已经无法满足应用了。于是基于发电机的动-电转换电源开始走上舞台。同今天普遍使用的交流电不同的是，起初人们是用直流发电机做电源的。爱迪生和朋友们成立了一个电力公司，就是架设的直流输电系统。但是，因为直流电不能方便的转换成各种电压，所以，输电线的电压等级不能过高，导致线路压降过大。当时最远输电不过几英里范围。由此，人们根据变压器原理提出交流输电系统，并迅速推广。有趣的是，当时爱迪生异常顽固的反对交流输电系统，认为交流输电系统非常不安全。

到今天，电已经深入生产生活的各个角落。可以说，电是人类利用最广泛的二次能源。按电力电子的习惯称法，AC 表示交流电，DC 表示直流电，AC/DC 称为整流，DC/AC 称为逆变，AC/AC 称为交流/交流直接变频，DC/DC 称为直流/直流变换。值得指出，常见的离线式开关变换器（off-line switching converter）是 AC/DC 变换，也常称为开关整流器，它不单是整流，而且整流后又作了 DC/DC 变换，所以离线并不是变换器与市电线路无关的意思，只是变换器中因有高频变压器隔离，故称离线。

由于技术原因，电网的频率通常是 50/60Hz，飞机上是 400Hz，普遍比较低。主要是因为当时的变压器主要利用铁芯制造，而当时的冶金技术还不能制造出在高频下低损耗的材料。

随着半导体业的发展,对电源的要求也越来越高。电压朝着低的方向发展,而体积、重量要求也越来越苛刻。

最早采用开关电源的是美国的阿波罗登月计划,由此而开启关于开关电源的研究与生产序幕。

在最初电子管时代,就有一些利用气体击穿效应制造的稳压管,属于现代稳压电源的鼻祖。然后也产生了利用电子三极管稳压的一些稳压装置。当时主要是给一些要求严格的电子管电路供电,如飞机的航电系统、雷达系统等。

随着晶体管时代的到来,电子管电路走向没落。齐纳击穿二极管代替了电子稳压管,晶体三极管代替了电子管。大量线性稳压电路涌现出来,有简单的齐纳二极管稳压电路、射极跟随器、带负反馈调整的稳压电路等。

但是由于调整管处于线性放大区域,管子两端的压降不能过小,否则电源波动会超出稳压能力。而对于晶体管来说,其功耗等于导通压降与导通电流的乘积,是很可观的能量损失,该功耗又会产生热,所以线性电源需要很大的散热器。

另外,不同系统对电源的要求不一样,有些场合,需要高效率电源,有些场合需要高稳定性电源,有些场合又有体积要求(散热器受限制)或是密封要求等,由此,提出了开关电源电路。当时,开关电源电路或多或少的受到一些数字电路的启发。因为在传统的电源里,体积、重量最大的往往是变压器,而减小变压器的直接有效的手段就是提高电源频率,于是各种拓扑结构纷纷被提出。许多电路在今天依然在大量应用。

开关电源是利用半导体器件将直流电源调制成可以通过变压器传递的各种脉冲波形,并且频率远远高于电网频率,这种高频电流可以通过体积重量都小很多的高频变压器进行传递,然后再重新整流滤波作为输出。

由于功率半导体只工作在开通(过饱和)和关断两种状态,故此称为开关电源,国内早期译做斩波电源。所以,广义地说,凡用功率器件作为开关,将一种电源形态转变成为另一形态的主电路都叫做开关变换器电路;转变时用自动控制闭环稳定输出并有保护单元的则称为开关电源(switching power supply)。

当功率器件工作在开通和关断状态时,其两端的 UI 乘积远远小于通常线性状态,所以损失的功率非常小。并且变压器的体积重量也很小,所用材料成本也小很多。体积小,重量轻,输入电压范围大,效率高是其主要特点。

开关电源主要组成部分是 DC/DC 变换器,因为它是转换的核心。

DC/DC 转换中, 用一个半导体功率器件作为开关, 使带有滤波器 (电感和/或电容) 的负载线路与直流电压一会相接, 一会断开, 则负载上也得到另一个直流电压, 这就是 DC/DC 变换的基本手段, 类似于“斩波”作用。

通过改变直流脉冲的频率、相位、宽度, 出现了三种工作模式 PFM (Pulse Frequency Modulation)、PPM (Pulse Phase Modulation)、PWM (Pulse-Width Modulation)。

PFM 模式应用的比较早, 主要特点是工作频率比较高, 所以功率密度大, 开关工作于“软开关”状态。所谓软开关是指在半导体开关器件开通或关断前开关器件两端电压或电流处于 0 状态, 则由于只有电压或电流, 故其乘积——开关损耗为零, 实际是一个很小的值。所以器件工作时, 并无多少热量产生, 器件寿命得以延长。但是因为开关频率随负载变动, 且范围比较大, 故后级滤波器比较难设计, 部分抵消了它的优势, 并且器件的应力也比较大。

PPM 模式是通过改变脉冲的相位来工作的。典型电路是各种移相全桥软开关电路。其特点是拓扑结构适合大功率变换, 并且容易实现软开关特性。频率固定, 控制相对容易。主要应用于各种高功率变换场合。

PWM 模式是通过改变脉冲宽度实现稳压功能的, 是目前应用最多、最广泛的一种模式。其特点是控制容易, 拓扑选择多, 控制电路多, 频率固定, 在几瓦到几千瓦的范围内都有应用, 并且通过适当的辅助电路也可以实现 ZC (V) T 软开关。

所以, 开关电源是指通过改变脉冲的频率、相位、宽度等参数实现稳压输出的一种电源。

一个周期 T_s 内, 电子开关接通时间 T_{on} 所占整个周期 T_s 的比例, 称导通占空比 D , 表示为:

$$D = \frac{T_{on}}{T_s}$$

断开时间 T_{off} 所占 T_s 的比例, 称为断开占空比。

显然, 导通占空比 D 越大, 负载上电压越高。

f_s 称为开关频率, 开关频率越高, 负载上电压也越高。这种 DC/DC 变换器中的开关都在某一固定频率下工作, 这种保持开关频率恒定但改变接通时间长短的方法, 称为脉宽调制法, 即 PWM 方法, 该方法的主要特点在于, 负载变化的情况下, 其电压变化幅度不明显。在 PWM 开关控制中, 电子开关响应外加控制脉冲信号, 与电源本身通过的电流和电压无关, 这种电子开关称为“硬开关”。很明显, 由于硬开关开通和关断时, 开关上同时存在电压和电流, 所以所对应的开关损耗是比较大的。

另一类称为软开关,凡用控制方法使电子开关在其两端电压为零的时刻正好导通,使流过电子开关的电流为零的时刻正好关断,这样的开关就称为“软开关”。软开关的开关损耗理想值为零,所以开关频率可提高到兆赫级,使得开关电源的体积、重量进一步显著减小。

为了满足电子开关上电压或电流为零的条件,可用谐振的方法。所谓谐振,按电路理论可知,当正弦电压加在理想的电感和电容串联电路上的时候,在某一对应的正弦频率上,容抗与感抗相等,则电路的阻抗为零,电路电流达无穷大;而如果正弦电压加在电感和电容的并联电路上,在某一正弦电压频率下,电路的总导纳为零,则此时电感和电容元件上的电压为无穷大。前者称为串联谐振,后者称为并联谐振。

在开关电源电路中,用直流电压加在串联的 LC 上时,电路中电流按正弦规律无阻尼振荡,其频率即电路的谐振频率,或称振荡频率。利用谐振现象,电子开关器件两端电压按正弦规律振荡,当振荡到零时,使电子开关导通,电流流过开关,这种方法称为“零电压开通”(ZVS, Zero Voltage Switching)。同理,当流过电子开关的电流振荡到零时,电子开关断开,这种控制方法称为“零电流关断”(ZCS, Zero Current Switching)。

利用谐振现象,使电子开关器件上的电压或电流按正弦规律变化,以创造零电压开通或零电流关断的条件,以这种技术为主导的变换器称为谐振变换器。它有串联和并联谐振变换器两种,如果在桥式变换器(用谐振式方法控制)的输出端为串联 LC 网络,再接变压器原边绕组(包括带副边整流电路),称为串联谐振变换器。在桥式变换器串联 LC 网络的电容两端并联变压器原边绕组,称为并联谐振变换器。

由于正向和反向 LC 回路值不一样,即振荡频率不同,电流幅值也不同,所以振荡不对称。一般正向正弦半波大过负向正弦半波,所以称为准谐振。无论是串联 LC ,或并联的 LC ,都会产生准谐振。

利用准谐振现象,使电子开关上的电压或电流按正弦规律变化,从而创造出零电压或零电流的条件,以这种技术为主导的变换器称为准谐振变换器。在单端、半桥或全桥变换器中,利用寄生电感和电容(如变压器漏感、半导体功率管或整流管的结电容)或外加谐振电感和电容,可得到相应的准谐振变换器。

谐振回路的参数可以超过两个,称为多谐振变换器。

为保持输出电压不随输入电压变化而变化,不随负载变化而变化,谐振、准谐振和多谐振变换器主要依靠调整开关频率的方法,所以是调频系统。

调频系统不如 PWM 开关那样易控,加上谐振、准谐振、多谐振电路

的谐振电压或电流峰值高,开关受的应力大,因此,有的电源系统应用 ZVS-PWM 变换器或 ZCS-PWM 变换器的控制方法。

ZVS-PWM 变换器是指在准谐振变换器中,增加一个辅助开关控制的电路,使变换器在一周期内,一部分时间按 ZVS 准谐振变换器工作,另一部分时间按 PWM 变换器工作,这样,变换器既有软开关的控制特点,又有 PWM 恒频调宽的特点,这时谐振网络中的电感与主开关是串联的。

从上面所述,DC/DC 变换器可分成 PWM 式、谐振式和它们的结合式。每一种方式中考虑输入和输出之间是否有变压器隔离,可以分成有隔离、无隔离两类;按激励形式的不同,可分为自激式和他激式。

自激式包括单管式变换器和推挽式变换器两种;他激式包括调频、调宽、调幅、谐振等几种,目前应用较广的是 PWM 方式,它包括正激式、反激式、半桥式和全桥式。若按控制信号的隔离方法,则可分为直接式、光电耦合式、变压器式、磁放大器式等。

以上可以看出,按各种分类方法的组合,开关电源中可能存在的基本电路数不胜数,部分电路具有典型应用价值,但也有电路无应用价值。目前常用的基本拓扑约有 14 种,每种拓扑都有其自身的特点和适用场合。

一些拓扑适用于离线式(电网供电)AC/DC 变换器,其中有些适合小功率输出($<200\text{W}$),有些适合大功率输出;有些适合高压输入,有些适合 120V 的交流或更低输入电压的场合;有些在高压直流输出或者多组输出场合有较大的优势;有些在相同输出功率下使用元器件数目较少;也有的结构对应的输入/输出纹波和噪声较小。

在设计电路中,所选择的拓扑要看是实现大功率还是小功率,高压输出还是低压输出等,因此,要恰当选择拓扑,熟悉各种不同拓扑结构的优缺点及适用范围是非常重要的。

1.2 不同拓扑结构介绍

1.2.1 Buck 开关型调整器拓扑结构

Buck 结构开关型调整器是最早应用的开关拓扑,它将快速通断的晶体管置于输入与输出之间,通过调节通断比例(占空比)来控制输出直流电压的平均值。该平均电压由可调宽度的方波脉冲构成,方波脉冲的平均值就是直流输出电压。使用合适的 LC 滤波器可将方波脉冲平滑成无纹波直流输出,其值等于方波脉冲的平均值。整个电路采用输出负反馈,通过检测输出电压并结合负反馈控制占空比,稳定输出电压不受输入网压和负

载变化的影响。

该拓扑结构如图 1-1 所示, 其中开关器件 V 作为单刀单掷开关与直流输入电压 V_{dc} 串联, 开关周期为 T , 其中 V 导通时间为 T_{on} 。假设理想情况下 V 导通时, 管压降为零, 则 V_1 点电压为 V_{dc} , 当 V 关断时, V_1 点电压迅速下降到零。下降过程中, 因为有寄生效应, V_1 点电压会出现过冲负电压, 从而导致 V 击穿损坏, 为此, V_1 与地之间接有一个钳位二极管 VD_1 , 起到保护 V 的作用。图 1-1 中的 L_o 、 C_o 组成一个滤波器, 接在 V_1 和输出电压 V_o 之间, 它使输出点的电压与 V_1 相等, 同时经过滤波后成为无尖峰无纹波的直流电压。

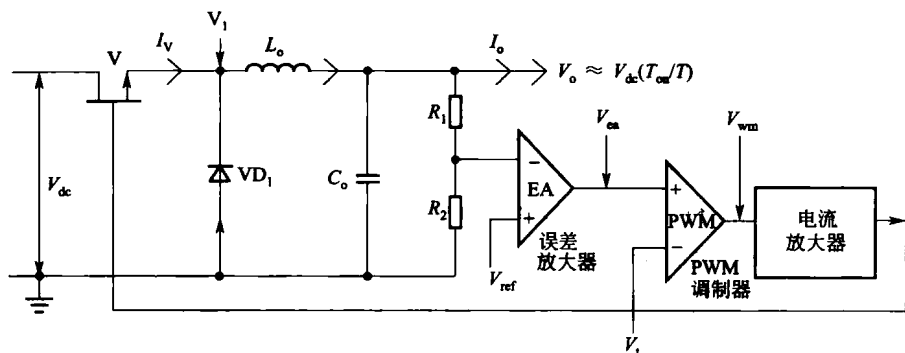


图 1-1 Buck 结构示意图

图 1-2 所示为对应图 1-1 的各关键点处的波形, 其中图 1-2(a) 对应图 1-1 中 PWM 调制器负端输入 V_1 , 是一个锯齿信号, 由外部的斜波发生器提供; 而 PWM 调制器的正端接入的信号是误差放大器的输出, 是一个模拟电平信号 V_{ea} 。所以锯齿波信号和 V_{ea} 通过 PWM 调制器进行比较。此时二极管 VD_1 压降也为零, 则 V_1 点电压波形为矩形波, 如图 1-2(b) 所示, T_{on} 时段电压为 V_{dc} , 其余时段电压为零, 则该电压的平均值为 $V_{dc} T_{on}/T$ 。

采样电阻 R_1 和 R_2 检测输出电压 V_o , 并将其输入误差放大器 EA 中, 与标准参考电压 V_{ref} 进行比较, 被放大的误差电压 V_{ea} 被输入到脉宽调整器 PWM, 而 PWM 的另一个输入是周期为 T 的锯齿波, 如图 1-2(a) 所示, 锯齿波电压与 V_{ea} 进行比较后产生矩形波脉冲, 如图 1-2(c) 中所示的 V_{wm} , 它从锯齿波起点开始到锯齿波与误差放大器输出电压交点结束, 因此, PWM 输出的脉冲宽度 T_{on} 与误差放大器输出电压成比例。

PWM 输出信号接入电流放大器, 并以负反馈方式控制开关管 V 的通断, 其逻辑关系是: 若输入电压 V_{dc} 升高, 则误差放大器输出电压 V_{ea} 将降低, 则锯齿波与 V_{ea} 交点提前, V 导通时间缩短, T_{on} 变小, 使 $V_o =$

$V_{dc} T_{on}/T$ 保持不变；同理，若 V_{dc} 下降，则导通时间 T_{on} 延长，使 V_o 保持不变。

V 导通时，加在 L_o 上的电压为 $V_{dc} - V_o$ ，由于电感上的电压恒定，所以流过电感的电流线性上升，其上升斜率为 $dI/dT = (V_{dc} - V_o)/L_o$ ，这使电感电流为有阶梯的斜波，如图 1-2(d) 所示。由于电感上的电流不能突变，所以 V 关断时电感两端电压极性迅速颠倒以保持电感中电流 I_2 不变，这种电压极性颠倒的现象称为“电感反冲”，若未接二极管 VD_1 ，则为了保持 L_o 上的电流方向不变， V_1 点电压会变得很负，从而会损坏 V，此时有了 VD_1 ，则 VD_1 导通将电感 L_o 前端电压钳位，使其处于比地低一个二极管导通压降（约 1V）。

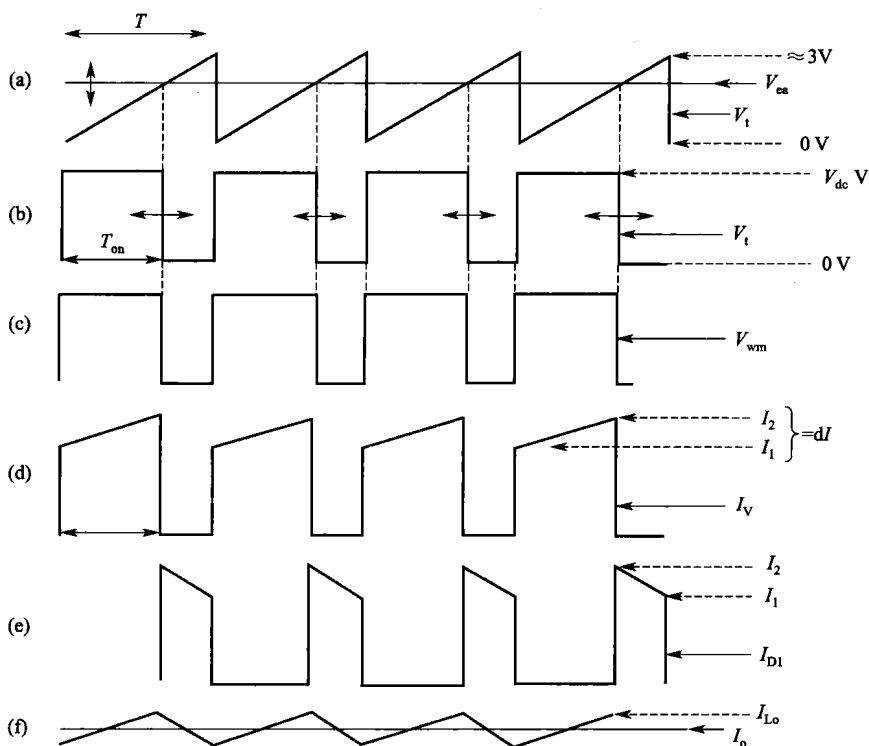


图 1-2 对应图 1-1 Buck 结构拓扑结构各关键点的波形

- (a) PWM 调制器的输入波形；(b) V_1 点的电压波形；(c) PWM 调制器的输出波形 V_{wm} ；
(d) 流经 V 的电流波形；(e) 流经 VD_1 的电流波形；(f) 输出电流波形

此时，先前流过 V 的电流 I_2 现在转移流向二极管 VD_1 ，如图 1-2(e) 所示，但这种电感 L_o 上的电压极性反相，幅值为 $V_o + 1$ ，电感中的电流线性下降，其斜率为 $dI/dT = (V_o + 1)/L_o$ ，波形是下降的阶梯斜波，如图 1-2(e) 所示，V 关断时间结束时，流过 VD_1 的电感电流下降到 I_1 。此

时 V 重新导通, 它的电流逐渐取代二极管 VD_1 的正向电流, 当 V 上的电流上升到 I_1 时, 二极管 VD_1 的电流降到零并关断, V_1 点的电压上升到 $V_{dc}-1$, 使 VD_1 反偏。

这样, 电感 L_o 上的电流是 V 导通时的电流 [见图 1-2(d)] 和 V 关断时 VD_1 的电流 [见图 1-2(e)] 之和, 如图 1-2(f) 所示。可见, 输出电流 I_o 有斜波纹波波动 (I_2-I_1)。由此可推断图 1-2(d) 和图 1-2(e) 中波形斜波的中点的电流值就是直流输出电流 I_o , 随着输出电流 I_o 的改变, 图 1-1 中电流斜波中点的位置也会发生变化, 但斜波的斜率不变。 V 导通时, L_o 的斜波斜率始终为 $(V_{dc}-V_o)/L_o$; V 关断时, 其斜率始终为 $(V_o+1)/L_o$, 但若 I_o 减小到使图 1-2 中的 I_1 达到了零, 则电感将进入不连续工作模式, 电压和电流的波形将发生很大变化。

图 1-3(a) 和 (b) 示出几个周期内电流的波形示意图, 图中可以看出, 当处于导通状态的时候, 在电感中建立起磁场, 电流快速上升; 而当关断后, 电感磁场快速下降, 根据洛伦兹定律, 在电感中建立起反向电动势, 在这种情况下, 电流为了保持其电流连续性, 必须找到其相应通路, 并且电流开始减小, 例如, 在拓扑结构为 FLYBACK 的情况下, 可以通过输出网络维持其电流, 而在 Buck 拓扑结构下, 则通过续流二极管维持其电流。

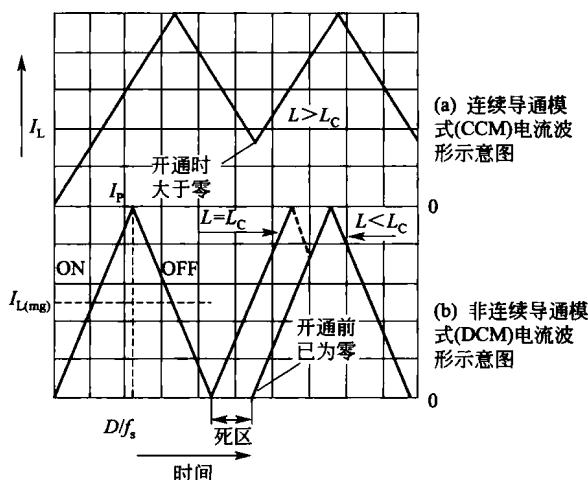


图 1-3 开关过程电流示意图

如果在电流下降的周期内, 在电流减至零之前, 电路再次导通的话, 如图 1-3(a) 所示, 就称为“连续导通模式”(CCM)。而如果当关断时期内, 由于线圈储能比较有限, 导致再次开通之前电流已经降为零, 如图 1-3(b) 所示, 出现了一段“死区时间”, 则对应的工作状态称为“非连续导通模式”(DCM)。死区时间有长有短, 而如果将电路设置成这样的工

作状态，就是当在关断期间，电流一降到零，系统立即开启，则对应的死区时间为零，对应的这种工作状态称为“临界导通模式”。

目前，系统中的开关电源具有两种不同的工作模式，当电源处于导通状态时，可以用不同的模式来描述环绕在电源扼流圈中的电流。按照其工作原理，可能工作在两种不同的模式，但这两种模式具有相同的功率容量，则对应这两种不同的导通模式，在直流和交流情况下会有非常大的差别，而且组成电源的元器件会受不同程度的影响。根据众多实验结果的分析，可以看出众多的离线式电源系统，为了提高系统的可靠性，降低对元器件等级的要求，一般都工作在非连续区域。

在非连续模式下，因为电感储能在每个开关周期总是为零，所以通过修正由较大阶跃的线电压及负载电流引起的扰动，很容易得到较快的响应速度。这使得从空载到满载情况下，控制电路有可能在单周期内控制任何需要的能量（并提供给输出）。在小信号闭环特性分析中，电感可以忽略，则只有电容引起的 90° 滞后相位。而由此引起的单极点具有稳定的固有特性，并且通过闭环很容易处理。工作于连续模式的升压和反激电路，会存在右半平面零点严重制约了闭环响应速度的问题，但非连续模式拓扑结构不存在此问题。

1.2.2 Boost 开关调整器拓扑结构

Buck 调整器是从高压输入得到低压输出，而 Boost 调整器是从低压输入得到高压输出，所以该结构也称为“升压变换器”，其工作电路如图 1-4 所示，在 V_{dc} 和开关管 V 之间串接电感 L_1 ，电感的下端通过整流二极管 VD_1 给输出电容 C_o 及负载供电。

下面定量分析其输出电压 V_o 。比直流输入电压 V_{dc} 高的原因。当 V 在

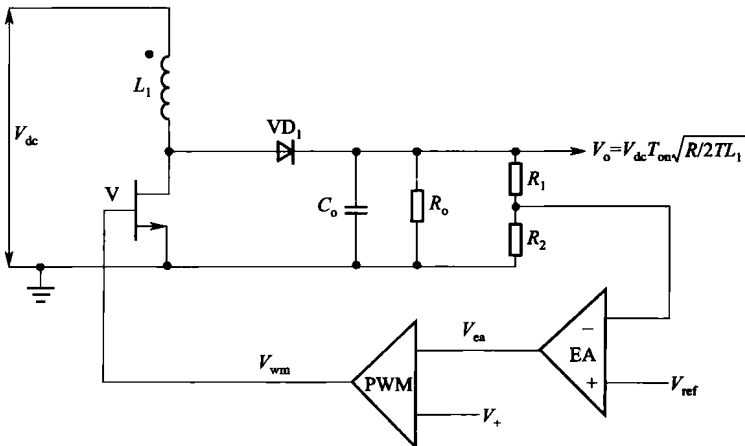


图 1-4 Boost 结构升压变换器电路结构

T_{on} 时段导通时,输出电压高于输入电压,所以 VD_1 反偏, L_1 的电流线性上升直到 $I_P = V_{dc} t_{dc} / L_1$, 这表示存储了能量

$$E = \frac{1}{2} L_1 I_P^2$$

式中, E 的单位为焦耳 (J); L_1 的单位为亨 (H); I_P 的单位为安培 (A)。

由于在 V 导通时段输出电流完全由 C_o 提供, 所以 C_o 应选的足够大, 以使在 T_{on} 时段向负载供电时能满足要求。

V 关断时, 由于电感电流不能突变, L_1 的电压极性颠倒, L_1 异名端电压相对同名端为正, L_1 同名端为 V_{dc} , 且 L_1 经 VD_1 向 C_o 充电, 使 C_o 两端电压高于 V_{dc} 。此时电感储能给负载提供电流并补充 C_o 向负载供电时的损失。与 Buck 电路不同的是, 在关断期间, V_{dc} 仍向负载提供能量。

输出电压的调整是通过负反馈环控制 V 导通时间实现的, 若直流负载电流上升, 则导通时间会相应增加, 从而为负载提供更多能量, 若 V_{dc} 下降而 T_{on} 不变, 则峰值电流即 L_1 的储能会下降, 导致输出电压下降, 但负反馈环会检测到电压的下降, 并通过增大 T_{on} 来维持输出电压恒定。

图 1-5 所示为对应 Boost 结构关键点的电压或电流波形。

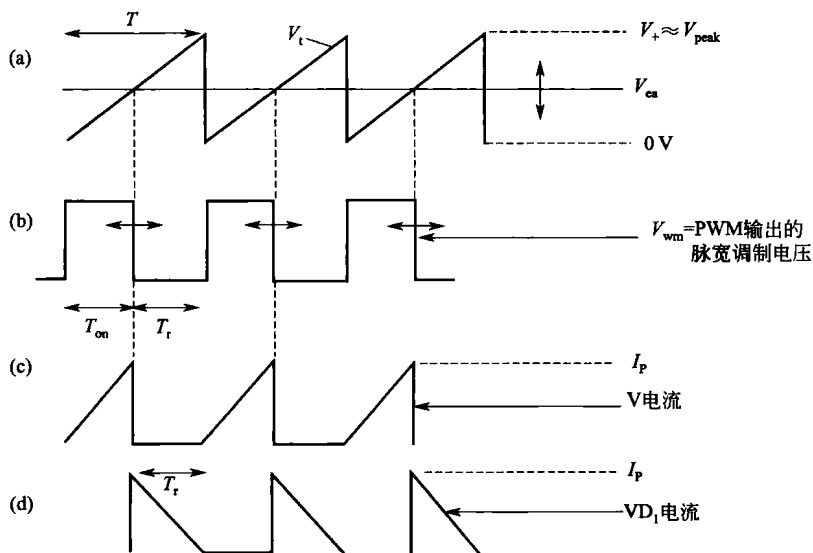


图 1-5 Boost 结构关键点的电压或电流波形

- (a) PWM 调制器的输入信号 (V_{ca} 是误差放大器的输出信号, V_t 为锯齿波信号);
 (b) PWM 输出的脉宽调制电压波形; (c) 流经 V 的电流波形; (d) 流经 VD_1 的电流波形

对于 Boost 结构的 PWM 调制器的工作原理, 和 Buck 结构相同, 不同的是, 在 V 导通期间, V 的电流并不向负载提供电流, 而是由储能电