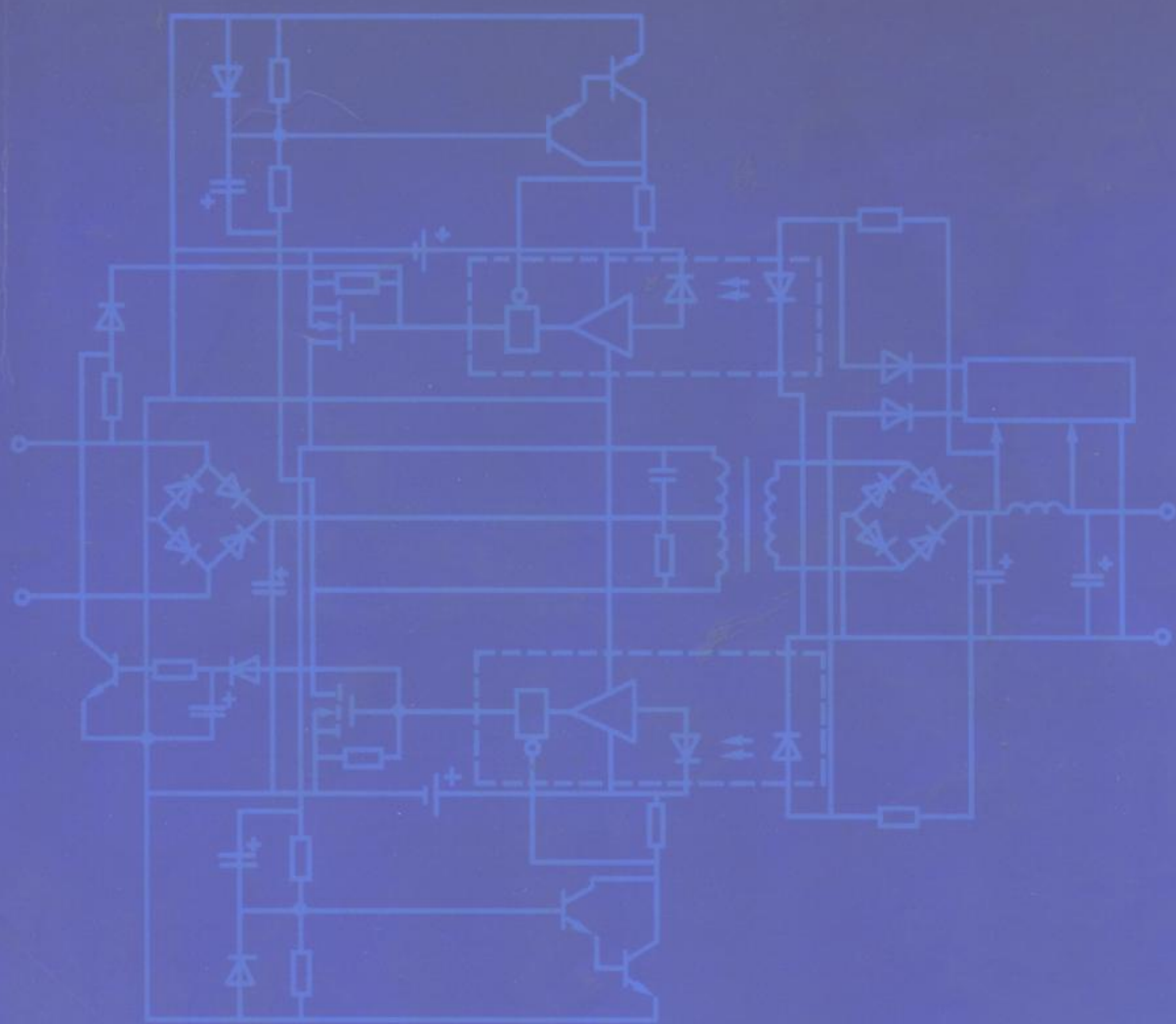


叶慧贞 杨兴洲 编著

张宗濂 审

# 新颖开关稳压电源

XINYING KAIGUAN  
WENYA DIANYUAN



国防工业出版社

T A 186

# 新颖开关稳压电源

叶慧贞 杨兴洲 编著  
张宗濂 审

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

新颖开关稳压电源/叶慧贞,杨兴洲编著. —北京:国防工业出版社,1999.1

ISBN 7-118-01901-1

I. 新… I. ①叶… ②杨… II. 开关电源:稳压电源  
IV. TM91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 08444 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

河北三河市腾飞胶印厂

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 20 $\frac{3}{4}$  479 千字

1999 年 1 月第 1 版 1999 年 1 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:28.00 元

---

(本书如有印装错误,我社负责调换)

## 前 言

本书是在《开关稳压电源》一书的基础上,参阅了国内外有关功率电子学、电源技术的大量资料而编著的。

70年代中期以来,无工频变压器开关电源技术风靡于欧、美、日等世界各国。最初开关电源中变换器的开关频率工作在20kHz,因为20kHz频率略高于人的听力最高频率,不会给人们带来讨厌的噪声。随着半导体技术的迅速发展,元器件、集成电路的大量研制,理论研究日趋完善,变换器拓扑及其对偶概念使得人们加深了对各种类型变换器拓扑之间内在关系的认识,并由此推出一系列拓扑。从脉宽调制(PWM)技术到谐振技术,推出准谐振变换器、多谐振变换器拓扑。近年来相移脉宽调制零电压谐振转换技术的出现是PWM技术和谐振技术结合的产物。这种PWM加上零电压、零电流转换的软开关技术及软开关有源缓冲器技术是当今电源发展的新潮流。它使得开关电源工作更加完美、有效,不但对数百kHz工作的功率MOSFET管,甚至对使用工作频率较低的大功率隔离栅双极型晶体管(IGBT)也能在软开关电路中工作在100kHz以上。这种电路技术和元器件的不断发展使得高功率、高密度、小型化的开关电源更富有生命力。它大大提高了开关电源的效率,降低了电磁干扰(EMI),使器件得到了有效的利用,并使得电源的工作频率提高到100~500kHz,乃至MHz量级。

当今电源设计的潮流还表现在对于开关电源更加准确的稳定度要求、更加优良的性能要求,如电磁兼容要求、功率因数校正、高效率、高功率密度、高水平的集成电路和高的可靠性及智能化电源等方面。对此,我们认识还很不够;书中难免有不少缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

本书编著中,得到徐功潜、黄产法等电源老友的大力帮助,特别是张宗濂研究员级高工为本书做了审校,在此表示衷心的感谢。

编著者

## 内 容 简 介

本书为 1990 年 11 月出版的《开关稳压电源》一书的续集,它力图反映 20 多年来,特别是近 10 年来,国内外开关稳压电源技术日新月异的发展,应用功率电子学中拓扑及其对偶的概念来探讨 6 种类型的基本直流变换器拓扑,并由此推出一系列的变换器拓扑。本书共分 9 章,第一章简要地说明了基本的稳压器和开关稳压器框图;第二章提出脉宽调制变换器中 6 种基本的变换器拓扑及其单端隔离型拓扑,此外介绍了双端型变换器拓扑;第三章谐振型变换器提出零电流谐振开关、零电压谐振开关和多谐振开关技术,推出一组准谐振变换器、多谐振变换器拓扑;第四章介绍相移脉宽调制零电压谐振变换器及软开关技术,第五章介绍了用于开关电源的各种类型的集成电路及其典型应用;第六章功率器件,对于双极型晶体管(BJT)、功率场效应管(MOSFET)、隔离栅双极型晶体管(IGBT)、及肖特基二极管、快恢复二极管的基本特性和开关特性等作了简要的介绍;第七章介绍组合式开关稳压电源方框图的组成;第八章讲述噪声及其抑制方法;第九章介绍电源系统及并联供电。

本书充实了新技术、新内容,考虑系统完整性,个别处保留了原书的有关内容。

本书适合于广大工程技术人员在设计、维修电源中使用,也可作为电子专业的大专院校师生的参考书。

# 目 录

|                                   |      |
|-----------------------------------|------|
| <b>第一章 基本的稳压器和开关稳压器</b> .....     | (1)  |
| § 1.1 串联调整稳压器 .....               | (1)  |
| § 1.2 开关稳压器 .....                 | (3)  |
| <b>第二章 脉宽调制变换器</b> .....          | (5)  |
| § 2.1 基本的变换器拓扑及其对偶 .....          | (5)  |
| 2.1.1 对偶 .....                    | (5)  |
| 2.1.2 基本的变换器拓扑 .....              | (9)  |
| § 2.2 buck 变换器 .....              | (10) |
| 2.2.1 buck 变换器的工作原理与设计 .....      | (10) |
| 2.2.2 Forward 正激变换器 .....         | (15) |
| 2.2.3 双晶体管正激变换器.....              | (17) |
| § 2.3 boost 变换器 .....             | (21) |
| 2.3.1 boost 变换器的工作原理与设计 .....     | (21) |
| 2.3.2 并联开关稳压器.....                | (25) |
| § 2.4 buck-boost 变换器 .....        | (27) |
| 2.4.1 buck-boost 变换器的工作原理 .....   | (28) |
| 2.4.2 Flyback 反激变换器 .....         | (30) |
| 2.4.3 Forward-Flyback 二元变换器 ..... | (36) |
| § 2.5 Cuk 变换器.....                | (37) |
| § 2.6 推挽变换器.....                  | (40) |
| § 2.7 全桥变换器.....                  | (49) |
| § 2.8 半桥变换器.....                  | (50) |
| § 2.9 PWM 变换器中常遇到的电路问题 .....      | (51) |
| § 2.10 单环和双环控制的 PWM 变换器性能比较 ..... | (56) |
| <b>第三章 谐振型变换器</b> .....           | (60) |
| § 3.1 零电流谐振开关.....                | (60) |
| § 3.2 零电压谐振开关.....                | (61) |
| § 3.3 零电流开关准谐振变换器.....            | (61) |
| 3.3.1 buck 型零电流开关准谐振变换器 .....     | (61) |
| 3.3.2 半桥零电流开关准谐振变换器.....          | (63) |
| § 3.4 零电压开关准谐振变换器.....            | (69) |

|                                                              |              |
|--------------------------------------------------------------|--------------|
| 5 多谐振开关.....                                                 | (72)         |
| § 3.6 多谐振变换器.....                                            | (72)         |
| § 3.7 固定频率零电压开关多谐振变换器.....                                   | (75)         |
| 3.7.1 固定频率正激型零电压多谐振变换器.....                                  | (75)         |
| 3.7.2 固定频率半桥零电压开关多谐振变换器.....                                 | (79)         |
| <b>第四章 相移脉宽调制零电压谐振变换器及软开关电路 .....</b>                        | <b>(86)</b>  |
| § 4.1 相移零电压谐振的工作原理.....                                      | (86)         |
| § 4.2 相移脉宽调制变换器的工作状态.....                                    | (88)         |
| § 4.3 设计原则.....                                              | (89)         |
| § 4.4 相移零电压软开关全桥变换器.....                                     | (91)         |
| 4.4.1 工作状态及开关转换.....                                         | (91)         |
| 4.4.2 开关无损耗转换条件.....                                         | (93)         |
| 4.4.3 换向电感和钳位二极管对变换器工作的影响.....                               | (96)         |
| 4.4.4 1.5kW 零电压软开关全桥变换器 .....                                | (97)         |
| § 4.5 2kW 零电压、零电流软开关全桥变换器 .....                              | (100)        |
| 4.5.1 工作原理 .....                                             | (100)        |
| 4.5.2 工作特性 .....                                             | (102)        |
| 4.5.3 设计原则 .....                                             | (104)        |
| § 4.6 零电压转换 PWM 变换器 .....                                    | (106)        |
| 4.6.1 boost 零电压转换 PWM 变换器 .....                              | (106)        |
| 4.6.2 零电压转换 PWM 变换器的各类拓扑 .....                               | (108)        |
| 4.6.3 600W 零电压转换变换器 .....                                    | (111)        |
| § 4.7 带有软开关有源缓冲器的直流变换器 .....                                 | (112)        |
| 4.7.1 带有软开关有源缓冲器的 buck 变换器.....                              | (113)        |
| 4.7.2 带有软开关有源缓冲器的 boost 变换器 .....                            | (119)        |
| 4.7.3 带有软开关有源缓冲器的各类拓扑 .....                                  | (125)        |
| <b>第五章 开关稳压电源的控制电路.....</b>                                  | <b>(129)</b> |
| § 5.1 脉冲宽度调制控制集成电路 .....                                     | (130)        |
| 5.1.1 SL-64 开关稳压器集成控制电路 .....                                | (130)        |
| 5.1.2 X <sub>63</sub> 脉冲宽度调制开关稳压器控制电路 .....                  | (135)        |
| 5.1.3 CW1524/2524/3524 脉冲宽度调制器 .....                         | (139)        |
| 5.1.4 CW1524A/2524A/3524A 改进型脉冲宽度调制器 .....                   | (146)        |
| 5.1.5 CW1525A/27A、CW2525A/27A、CW3525A/27A 型脉冲宽度<br>调制器 ..... | (152)        |
| 5.1.6 TL494、TL495 型脉宽调制器.....                                | (157)        |
| § 5.2 电流型脉冲宽度调制器集成电路 .....                                   | (160)        |
| 5.2.1 SG1825/2825/3825 高速电流控制型脉冲宽度调制器 .....                  | (160)        |
| 5.2.2 SG1842/2842/3842、SG1843/2843/3843 电流控制型脉冲宽度            |              |

|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| 调制器 .....                              |       |
| § 5.3 高性能谐振型集成控制器 .....                | (173) |
| § 5.4 相移脉冲宽度调制器谐振控制器 .....             | (181) |
| § 5.5 UC1854/2854/3854 高功率因数预稳压器 ..... | (191) |
| § 5.6 光电耦合器 .....                      | (198) |
| 5.6.1 早期的光电耦合器 .....                   | (198) |
| 5.6.2 各种隔离光耦集成电路 .....                 | (200) |
| 5.6.3 典型应用 .....                       | (205) |
| <b>第六章 功率器件</b> .....                  | (208) |
| § 6.1 双极型晶体管 .....                     | (208) |
| 6.1.1 双极型晶体管的基本特性 .....                | (208) |
| 6.1.2 双极型晶体管的开关特性 .....                | (211) |
| 6.1.3 开关工作时的功率损耗 .....                 | (212) |
| 6.1.4 晶体管的安全工作区 .....                  | (213) |
| 6.1.5 缓冲电路 .....                       | (215) |
| 6.1.6 基极驱动电路 .....                     | (217) |
| § 6.2 功率场效应管 .....                     | (227) |
| 6.2.1 功率 MOSFET 的特点 .....              | (228) |
| 6.2.2 功率 MOSFET 的基本特性 .....            | (228) |
| 6.2.3 功率 MOSFET 的开关特性 .....            | (230) |
| 6.2.4 安全工作区 .....                      | (230) |
| 6.2.5 漏-源过压保护 .....                    | (231) |
| 6.2.6 栅极驱动电路 .....                     | (232) |
| 6.2.7 MOSFET 的并联工作 .....               | (236) |
| § 6.3 隔离栅双极型晶体管 .....                  | (237) |
| 6.3.1 IGBT 的基本特性 .....                 | (237) |
| 6.3.2 IGBT 的开关特性 .....                 | (238) |
| 6.3.3 栅极驱动电路 .....                     | (239) |
| § 6.4 功率肖特基二极管 .....                   | (245) |
| § 6.5 快恢复二极管 .....                     | (246) |
| 6.5.1 二极管的基本特性 .....                   | (246) |
| 6.5.2 二极管的开关特性 .....                   | (247) |
| 6.5.3 快恢复二极管 .....                     | (248) |
| <b>第七章 组合式开关稳压电源方框图的组成</b> .....       | (251) |
| § 7.1 稳压电源系统的分类 .....                  | (251) |
| 7.1.1 直流预稳压加上直流变换器 .....               | (252) |
| 7.1.2 从次级整流反馈预稳压加上变换器 .....            | (252) |
| 7.1.3 变换器加次级整流加后稳压 .....               | (254) |



|            |                               |              |
|------------|-------------------------------|--------------|
| 7.1.4      | 预稳压变换器加后稳压 .....              | (255)        |
| 7.1.5      | 从次级整流反馈的脉宽调制变换器 .....         | (257)        |
| 7.1.6      | 脉宽调制变换器加上后稳压 .....            | (257)        |
| § 7.2      | 直流预稳压加上直流变换器的方框图的实现 .....     | (258)        |
| 7.2.1      | 串联调整预稳压 .....                 | (258)        |
| 7.2.2      | 串联开关预稳压 .....                 | (261)        |
| 7.2.3      | 并联开关预稳压 .....                 | (263)        |
| 7.2.4      | 脉宽调制变换器预稳压 .....              | (264)        |
| § 7.3      | 从次级整流反馈预稳压加上变换器的方框组成 .....    | (264)        |
| § 7.4      | 变换器加上后稳压的方框组成 .....           | (265)        |
| 7.4.1      | 串联开关后稳压 .....                 | (265)        |
| 7.4.2      | 串联调整后稳压 .....                 | (266)        |
| § 7.5      | 预稳变换器加上后稳压的方框组成 .....         | (266)        |
| 7.5.1      | 串联开关预稳压加上串联调整后稳压 .....        | (267)        |
| 7.5.2      | 串联开关预稳压加上串联开关后稳压 .....        | (267)        |
| § 7.6      | 脉宽调制变换器的框图组成 .....            | (268)        |
| § 7.7      | 脉宽调制变换器加上后稳压的方框组成方案 .....     | (268)        |
| 7.7.1      | 串联调整后稳压 .....                 | (268)        |
| 7.7.2      | 串联开关后稳压 .....                 | (268)        |
| § 7.8      | 直流主电源系统 .....                 | (269)        |
| § 7.9      | 用 400Hz 主电源系统 .....           | (270)        |
| 7.9.1      | 变压器隔离串联开关下降型稳压器 .....         | (270)        |
| 7.9.2      | 电源变压器整流器串联调整预稳压器加上直流变换器 ..... | (270)        |
| <b>第八章</b> | <b>噪声及其抑制 .....</b>           | <b>(272)</b> |
| § 8.1      | 滤波 .....                      | (273)        |
| 8.1.1      | 一般整流电路的滤波 .....               | (273)        |
| 8.1.2      | 有源滤波器 .....                   | (274)        |
| 8.1.3      | 高频滤波电容器 .....                 | (275)        |
| 8.1.4      | 噪声滤波的方法 .....                 | (275)        |
| § 8.2      | 噪声及其抑制 .....                  | (281)        |
| 8.2.1      | 噪声的来源 .....                   | (281)        |
| 8.2.2      | 抑制噪声的方法 .....                 | (281)        |
| 8.2.3      | 屏蔽 .....                      | (289)        |
| <b>第九章</b> | <b>电源系统及并联供电 .....</b>        | <b>(295)</b> |
| § 9.1      | 电源系统的并联供电 .....               | (295)        |
| § 9.2      | 并联均流供电的方法 .....               | (296)        |
| 9.2.1      | 简单的并联供电 .....                 | (296)        |
| 9.2.2      | 主从并联供电 .....                  | (296)        |

## 第一章 基本的稳压器和开关稳压器

所有的电子设备都需要良好稳定的供电,而外部提供的能源大多为交流,通常由火力发电、水力发电、核子发电及风力发电获得交流电源。电源设备担负着把交流电源转换为电子设备所需的各种类别直流电源的任务。转换后的直流电源应具有良好的稳定度。当电网或负载变化时,它能保持稳定的输出电压,并具有较低的纹波。我们通常称这种直流电源为稳压电源或简称为稳压器。但有时所供的直流电压不符合设备需要,仍需变换,称为DC/CD变换。常规的稳压器为串联调整线性稳压器,它通常由50Hz工频变压器、整流器、滤波器、串联调整稳压器组成。调整元件工作在线性放大区内,流过电流是连续的,调整管上损耗较大的功率,需要体积较大的散热器,因此体积较大,而且效率低,通常仅为35%~60%。同时承受过载能力较差,但是它具有优良的纹波及动态响应特性。1970年以来随着各种功率开关元件的研制、应用;随着各种类型专用集成电路、磁性元件、高频电容研制、应用;随着功率电子学领域中技术的日新月异的发展,理论研究不断深化,功率变换器拓扑及其对偶理论的日趋完善,开关电源技术以其强大的生命力,适应当今高效率、小型轻量化的要求。目前的微型机及其输入、输出设备有90%以上采用开关电源。

开关电源去除了笨重的工频变压器,代之以几十kHz、几百kHz甚至数MHz的高频变压器。由于调整管工作在开关状态,功率损耗小,效率高,可达80%~95%,因此开关稳压器体积小、重量轻。但由于电路复杂,使用高频元器件价格高,因此成本较高,且输出纹波噪声电压较高,动态响应较差。

### § 1.1 串联调整稳压器

在功率开关晶体管未问世以前,串联调整稳压器一直是最简单、最常用的稳压技术,其功率量级可达数百W到1kW,对于更高的功率量级,如数kW以上,常常采用可控硅相位控制稳压器,但是,其动态响应慢,稳压性能较差。这里,我们简要地介绍一下基本的串联稳压器电路,如图1-1所示。

输入直流电压通常由交流50Hz电网供电,经变压器、整流、滤波得到一个具有较大纹波的直流电压 $V_i$ ,经过串联调整稳压器,得到满足要求的稳定的直流输出电压 $V_o$ ,输出电压稳定度取决于基准源的稳定度、差分放大器的漂移以及反馈回路的增益。

串联调整元件通常由一个、多个晶体管并联或复合组成,它像一个可变电阻,当输入电压上升或减小时,晶体管的有效电阻增加或减小,通过取样、比较放大负反馈电路来控制串联调整管的管压降(电阻),保持输出电压稳定。

自然,晶体管 $V_1$ 应工作在线性区,应工作在大于2V的管压降上,否则工作在饱和区,不能反映电压的变化,也就不能进行有效的调整。因此,最小的输入电压应高于 $(V_o +$

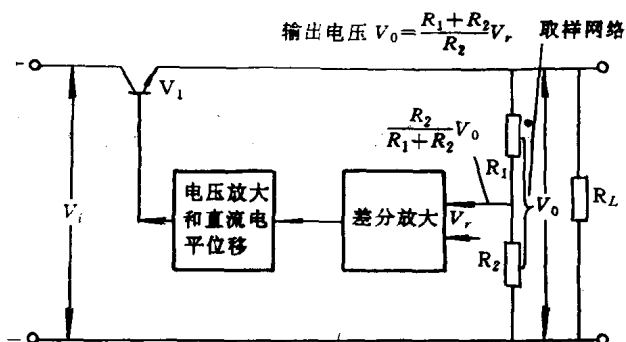


图 1-1 基本的串联调整稳压器

2)V, 假设输入电网波动为  $\pm T\%$ , 则最小、最大的输入直流电压分别为  $(1-0.01T)V_i$  和  $(1+0.01T)V_i$ 。

由于最小输入直流电压应等于或略高于  $(V_0+2)V$ , 故有  $(1-0.01T)V_i = V_0+2$ 。因此, 最大输入直流电压  $V_{i\max}$  为

$$V_{i\max} = (1+0.01T)V_i = (V_0+2)(1+0.01T)/(1-0.01T)$$

由于全部负载电流均流过串联调整管, 其上的直流压降为输入、输出电压的差值, 差值愈大, 损耗愈大, 尤其在最大输入电压下, 串联调整管上承受压降最大, 故效率较低。

$$\text{最小效率 } \eta = \frac{V_0}{V_{i\max}} = \frac{1-0.01T}{1+0.01T} \frac{V_0}{V_0+2}$$

由此计算的效率仅适用于无纹波的输入直流以及输入电压仅高于输出电压 2V 的情况, 当输入直流有纹波时, 纹波三角波的底部应高于输出电压 2V, 这时输入直流电压  $V_i$  必须增高, 因此, 效率  $\eta = V_0/V_i$  就会下降, 再考虑变压器、整流器的损耗, 在低压、大电流应用时, 串联调整稳压器的效率仅有 35%~60%。

此外, 串联调整稳压器承受过载能力较差, 负载长期短路, 容易造成调整管损坏, 必须加入相应的保护电路。

目前国产集成稳压器输出电压有 5V、6V、9V、12V、15V、18V、24V、36V, 输出电流有 0.1A、0.5A、1.5A、2A、3A、5A 等系列, 集成稳压器内部包括调整管、基准、取样、比较放大、保护电路等环节, 使用时, 只需外接少量元件, 十分方便。其电压稳定度、输出纹波及动态响应等指标都较好。

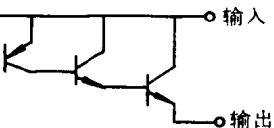
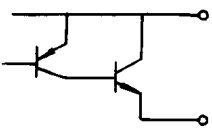
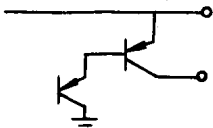
常用的集成稳压器有固定正压稳压器 W78XX 系列、固定负压稳压器 W79XX 系列, 还有可调正稳压器 W117、W217、W317 系列, 可调负稳压器 W137、W237、W337 系列, 从 2.3V 到 35V 输出电压, 电流为 1.5A。还有大电流系列 W396、W496 等, 可调稳压器外加晶体管及逻辑控制, 具有开机、关机或系统复位等功能, 便于控制及保护。

上述的集成稳压器其输出级调整管采用老形式多级达林顿连接, 输入、输出之间的压差约为 2V 到 2.5V。

决定输入、输出之间的压差与输出级调整管的饱和压降大小有关。近年来, 厂家研制的集成稳压器产品从老形式的 1.7V 到中间式的 1.0V, 而低饱和式为 0.3V。表 1-1 表示集成三端稳压器的饱和电压和输出级电路的关系, 低饱和式中, 输出级采用 PNP 功率晶体管。此外, 还开发了用 CMOS 管作功率管输出级的大功率电路, 1993 年 UNITRODE 公

司研制从 BICMOS 生产的高电流、低压降的线性稳压器,这些,对于降低输入、输出之间压差,提高串联稳压器的效率起了很好的作用。

表 1-1 集成三端稳压器输出级的饱和电压和输出级电路的关系

| 类型    | 老形式                                                                               | 中间式                                                                               | 低饱和和压降式                                                                             |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 输出级电路 |  |  |  |
| 饱和电压降 | 1.7V<br>$V = 2 \times V_{BE} + V_{CE(sat)}$                                       | 1.0V<br>$V = V_{BE} + V_{CE(sat)}$                                                | 0.3V<br>$V = V_{CE(sat)}$                                                           |

## § 1.2 开关稳压器

在开关稳压器中,直流变换器中的功率管工作在开关状态(导通或截止状态),而不像串联调整电源,功率调整管工作在线性状态。目前开关电源的工作频率从 20kHz、50kHz 增高到 100~500kHz,实验室中 MHz 量级的开关电源也已研制成功。

图 1-2(a)表示从输入交流电源直接整流滤波且有隔离高频变压器的开关稳压电源的基本框图。

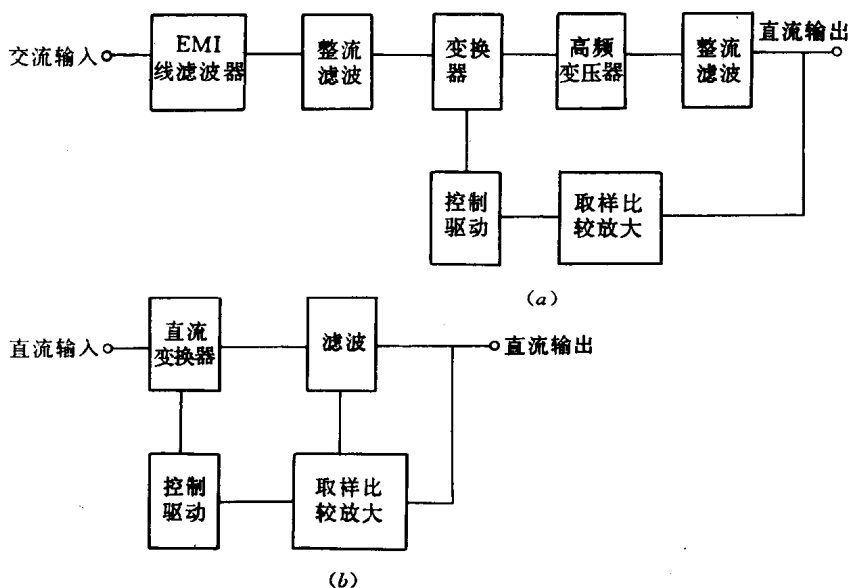


图 1-2 开关稳压电源的基本框图

(a)交流输入;(b)直流输入。

从交流电网(50Hz, 220V(AC)或 60Hz, 115V(AC))经 EMI 防电磁干扰电源线滤波器,直接整流、滤波、经变换器将直流电压(275V 或 172V)变换为数十或数百 kHz 的高频方波或准方波电压,经高频变压器隔离、降压(或升压),再经高频整流滤波输出直流电压,经取样、比较、放大及控制、驱动电路,控制变换器中功率开关管的占空比,得到稳定的输

出电压。

对于输入电源为直流电压的开关稳压电源框图如图 1-2(b)所示,经变换器变换为单极性脉冲电压,再经输出滤波电路,可得到另外所需的直流电压。同样,也需将输出电压(或电流)经取样、比较、放大及控制、驱动来调整直流变换器中开关管的占空比,以便得到稳定的输出电压(或电流)。

开关稳压电源的分类方法多种多样。按激励方式分,有自激式和他激式。一般说来,自激式工作状态不够稳定,开关管承受较高的峰值饱和电流,仅适用于小功率应用。本书以介绍他激式为主,用外加控制驱动集成电路来控制开关管工作。若按脉冲调制方式分,有脉冲宽度调制 PWM,通常保持开关工作频率不变,控制脉冲导通宽度,也有保持开关导通时间不变(或开关关断时间不变),改变工作频率,称为频率调制 PFM,还有脉冲宽度和频率均改变的,称为混合调制型。如果按开关管工作方式分,有方波型、准谐振型、多谐振型和软开关等。当今电源变换技术的潮流是 PWM 技术加上谐振转换软开关技术。

按开关管的类型分,有双极型晶体管 BJT、功率场效应管 MOSFET、隔离栅双极型晶体管 IGBT、功率晶体管模块 GTR 及可控硅管 SCR 等。

无论开关电源如何分类,有关各类变换器拓扑、控制、驱动及功率器件的特性是我们首先要了解的问题,在下面几章中将分别介绍。

## 第二章 脉宽调制变换器

脉宽调制(PWM)变换器技术具有优良的调整特性,因而在开关电源、不间断电源、高功率马达驱动、调速系统等领域得到了广泛的应用。在当今功率电子变换技术中,PWM技术仍占有相当的优势,对其基本的变换器电路研究是十分必要的。

在直流变换器中存在 4 种基本的变换器拓扑,它们是 buck 型、boost 型、buck-boost 型、cuk 型,此外还有 sepic 型和 zeta 型变换器,共有 6 种变换器拓扑。

在电路理论中,引用“拓扑”这个术语,“topologic”是泛指电路的结构或连接特性而言的。所谓拓扑是说明电路的连接关系,即拓扑的性质,而与组成电路元件的性质无关。应用网络图论(即网络拓扑学)和矩阵代数可对结构复杂的电路求解,并可使用计算机求解,因此,在现代电路理论中,网络图论是一种重要的工具。

### § 2.1 基本的变换器拓扑及其对偶

#### 2.1.1 对偶

对于直流变换器拓扑的研究有助于加深对变换器电路、结构、特性的理解,探索拓扑之间的对偶关系,能进一步推出一系列拓扑。实践证明,对偶变换在功率电子学领域是一个重要而有效的工具。应用对偶(Duality)概念能产生新的变换器拓扑,并进一步理解各种变换器电路之间的内在关系。

所谓“对偶变换”是指用电路或二端网络来产生具有同样数目元件的另一个网络,它们二者的特性在许多方面是很接近的,具有可以类比的特性,如将电压与电流变换,也有将波形的时间轴反向变换的,这就称初始电路和变换电路是互相对偶的。

事实上,对偶不仅应用于电气网络,而且也应用于其它学科,如电波传播、磁性电路等,我们在这里仅讨论电参数电路。

首先,我们定义:“元件”为具有确定电压 $v$ 和电流 $i$ 的二端器件,并作以下规定和约束。

1. 每个元件必须具有指定的方向,在图 2-1 中用箭头表示方向,箭头方向为正向电流流动方向 $i \downarrow$ ,对电压而言,规定箭头尾部为正, $\downarrow \pm v$ 。

2. 规定用  $*$  表示对偶电路参量。常用的对偶为电压-电流对偶,如将具有电压为 $v$ 、电流为 $i$ 的元件 $E$ 变换为具有电压为 $v^*$ 、电流为 $i^*$ 的元件 $E^*$ 。

3. 利用双箭头表示对偶变换,这表明电路的对偶是互为对偶的,如果对初始电路进

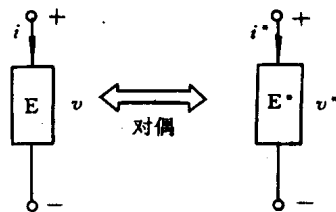


图 2-1 元件的对偶

行两次对偶变换,又回到了初始电路。

进行对偶变换有两个步骤,第一步将每个电路元件的电压和电流波形变换,即加在初始元件上的电压 $v$ 变为电流 $i^*$ ,而加在对偶元件上的电压 $v^*$ 数值上等于电流 $i$ (当然,量纲不同)。第二步进行拓扑变换,重新排列元件间的连接。由于变换电压和电流会违背克希霍夫基本定律,我们通过变换网络的拓扑结构,改变网格和节点,使得新构成的对偶网络符合克希霍夫电压、电流定律。常用的对偶是串联变为并联。图 2-2 表示几种常用电路元件的对偶,从图 2-2 中可以看出,电阻和电导、电容和电感、电压源和电流源、开路和短路互为对偶。

我们以电容元件对偶为实例进行推导,容量为 $C$ 的线性电容具有 $i = C \frac{dv}{dt}$ 的基本关系,变换电压和电流,给出对偶元件的关系式为 $v^* = C \frac{di^*}{dt}$ ,这与电感的基本关系相同,其中电感量为 $C$ ,因此,我们得出容量为 $C$ 的电容的对偶是电感量为 $C$ 的电感。

在线性电容中,电荷 $q = Cv$ ,在对偶电感中,磁通匝链数(耦合磁通乘绕组的匝数) $n^*\phi^* = L^*i^* = Cv = q$ ,可见, $q$ 和 $n^*\phi^*$ 在数值上是相同的,电荷和磁通匝链数是对偶的。

假如电容为非线性元件,电容不是恒定值,而是电压的函数,例如整流二极管的反偏结电容,如图 2-3(b) 所示, $i = C(v) \frac{dv}{dt}$ ,则 $q = \int C(v)dv$ ,如图 2-3(c) 所示,经过对偶变换,产生如图 2-3(e) 和图 2-3(f) 的曲线,分别为电感和磁通匝链数曲线,可以看出非线性电容的对偶为饱和电抗器。

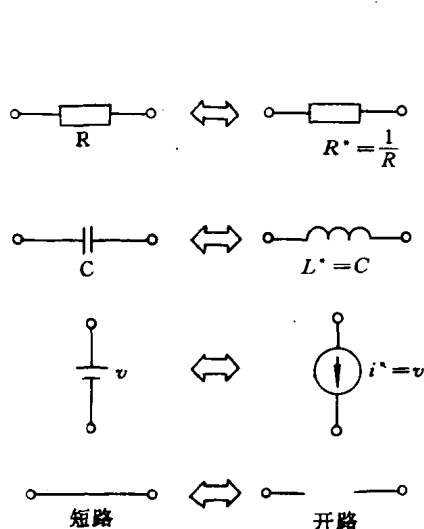


图 2-2 常用电路元件的对偶

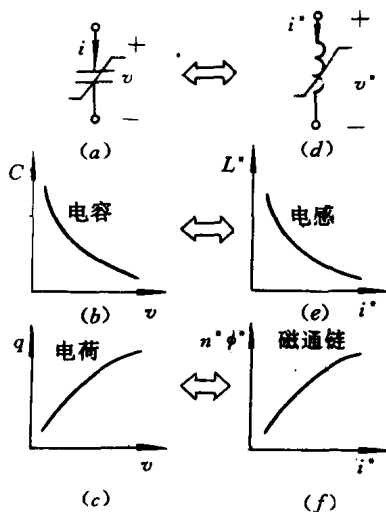


图 2-3 非线性电容的对偶

(a) 非线性电容;(b) 电容与电压关系;

(c) 电荷与电压关系;(d) 饱和电抗器;

(e) 电感与电流关系;(f) 磁通匝链数与电流关系。

### 一、开关的对偶

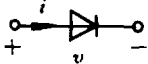
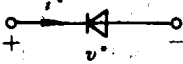
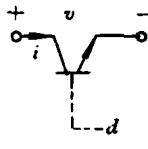
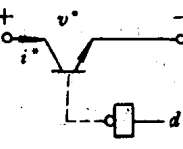
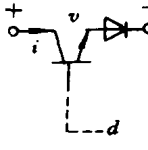
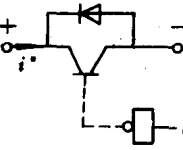
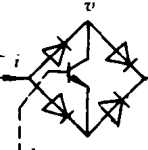
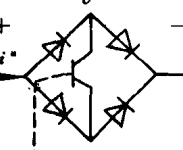
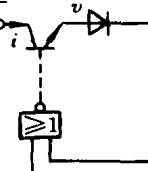
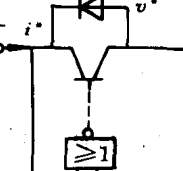
最初人们对于开关的对偶是回避的,美国加州的 Steve Freeland 经过了探索,找出了开关对偶元件。表 2-1 是各种理想开关及其对偶,其中第一列为各种理想的开关电路;第二列为开关器件的方程,它用控制输入信号参数定义器件的电压、电流关系;第三列进行

对偶变换,给出对偶器件的关系式;第四列为对偶开关电路。

这里将开关器件看成二端器件,它的通、断状态由控制信号  $d(t)$  决定,当  $d = 1$  时,开关导通,当  $d = 0$  时,开关关断。

理想整流器及其的对偶 理想整流器不承受正向电压 ( $v \leq 0$ ), 没有反向电流 ( $i \geq 0$ )

表 2-1 理想开关及对偶

| 初始开关                                                                                                   |                                                                                                                      | 对偶开关                                                                                                                             |                                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 符号和名称                                                                                                  | 定义关系                                                                                                                 | 定义关系                                                                                                                             | 符号和名称                                                                                                    |
| <br>理想整流器             | $i \geq 0$<br>$v \leq 0$<br>$iv = 0$                                                                                 | $v^* \geq 0$<br>$i^* \leq 0$<br>$i^*v^* = 0$                                                                                     | <br>整流器(反向)           |
| <br>1象限开关             | $d=1$ 时 $\begin{cases} v=0 \\ i \geq 0 \end{cases}$<br>$d=0$ 时 $\begin{cases} v \geq 0 \\ i=0 \end{cases}$<br>$iv=0$ | $d=1$ 时 $\begin{cases} i^*=0 \\ v^* \geq 0 \end{cases}$<br>$d=0$ 时 $\begin{cases} i^* \geq 0 \\ v^*=0 \end{cases}$<br>$i^*v^*=0$ | <br>1象限开关<br>(控制反向)   |
| <br>2象限开关<br>(双向电压) | $d=1$ 时 $\begin{cases} i \geq 0 \\ v \leq 0 \end{cases}$<br>$d=0$ 时 $i=0$<br>$iv=0$                                  | $d=1$ 时 $\begin{cases} v^* \geq 0 \\ i^* \leq 0 \end{cases}$<br>$d=0$ 时 $v^*=0$<br>$i^*v^*=0$                                    | <br>2象限开关<br>(双向电流) |
| <br>4象限开关           | $d=1$ 时 $v=0$<br>$d=0$ 时 $i < 0$<br>$iv=0$                                                                           | $d=1$ 时 $v^*=0$<br>$d=0$ 时 $v^*=0$<br>$i^*v^*=0$                                                                                 | <br>4象限开关           |
| <br>控制<br>SCR       |                                                                                                                      |                                                                                                                                  | <br>控制<br>SCR 对偶    |



0), 并且不吸收或产生任何瞬态功率( $iv = 0$ ), 因此整流器的对偶为不容许任何正向电流( $i^* \leq 0$ ), 不承受反向电压( $v^* \geq 0$ ), 同时 $i^* v^* = 0$ , 即任何时间不是零电压, 就是零电流。很明显, 具有这种特性的器件为另一种理想的整流器, 与初始器件相比, 只是方向颠倒而已。

## 二、理想的晶体管

理想的晶体管为一象限可控制开关, 像双极型晶体管, 这种器件不承受反向电压, 也没有反向电流, 开关的通断由控制信号 $d(t)$ 决定。从表 2-1 可以看出, 理想晶体管的对偶变换仅仅是控制信号反相后驱动晶体管。这样, 当初始晶体管导通时, 对偶管是关断的, 反之, 当初始晶体管关断时, 对偶管是导通的。在脉宽调制变换器中, 假如初始电路占空比为 $D$ , 则对偶电路占空比为 $D' = 1 - D$ 。假如初始的变换器电路工作在具有固定的导通时间, 则其对偶电路工作在具有固定的关断时间。

表 2-1 中的第三类开关是二象限开关, 它能承受双向电压, 实现这种开关可用晶体管与二极管串联来实现, 当关断时, 没有电流流动, 这在一象限开关相似。但是它能承受反向电压, 当反向电压作用时, 无论控制信号 $d$ 为 0 或 1, 均没有电流流动。这种器件的对偶能双向传送电流, 同时控制信号反相。用晶体管与反向并联的二极管组成。功率 MOSFET 及组装在内的本体二极管便属于这类器件。

理想的四象限开关, 当导通时, 每个方向都传送电流, 当关断时, 能承受双向电压, 可以用 4 个理想的二极管和 1 个一象限开关(晶体管)组成。这种开关的对偶是其本身, 不过控制信号反向。

## 三、理想的变压器及其对偶

根据对偶原则, 将图 2-4(a) 的理想变压器变换为另一种如图 2-4(b) 所示的变压器,

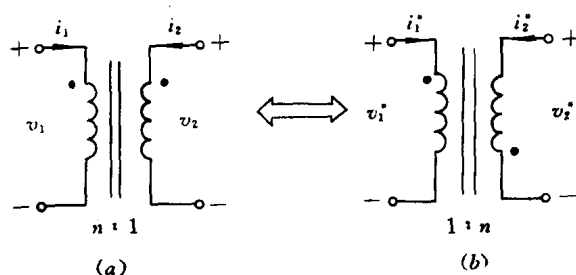


图 2-4 变压器及其对偶

(a) 理想的变压器; (b) 对偶。

次级的对应端极性相反, 匝比由 $n/1$ 变为 $1/n$ , 初始的变压器具有下面的关系式:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n}{1}$$

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{n}{1}$$

变换后, 对偶具有下面的关系

$$\frac{i_1^*}{i_2^*} = \frac{n}{1}$$

$$\frac{v_2^*}{v_1^*} = \frac{n}{1}$$