

高等学校“十一五”省级规划教材

杜少武◎编

现代电源技术

XIANDAI DIANYUAN JISHU



合肥工业大学出版社
HEFEI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

现代电源技术/杜少武编. —合肥:合肥工业大学出版社,2010.12

ISBN 978-7-5650-0318-9

I. ①现… II. ①杜… III. ①电源—技术 IV. ①TM91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 226983 号

朱 姓 鄞 申 升 奥

现代电源技术

杜少武 编

责任编辑 权 怡

特约编辑 吕 杰

出 版	合肥工业大学出版社	版 次	2010年12月第1版
地 址	合肥市屯溪路193号	印 次	2011年2月第1次印刷
邮 编	230009	开 本	787毫米×1092毫米 1/16
电 话	总编室:0551-2903038 发行部:0551-2903198	印 张	16
网 址	www.hfutpress.com.cn	字 数	349千字
E-mail	press@hfutpress.com.cn	印 刷	合肥工业大学印刷厂
		发 行	全国新华书店

ISBN 978-7-5650-0318-9

定价:30.00元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换。



前 言

高速发展的计算机技术带领人类进入了信息社会,同时也促进了电源技术的迅速发展。20世纪80年代,计算机全面采用了开关电源,率先完成计算机电源换代,紧接着开关电源技术相继进入了电子、电器设备领域。

通信业的迅速发展极大地推动了通信电源的发展,高频小型化的开关电源已成为现代通信供电系统的主流。在通信领域中,通常将整流器称为一次电源,而将直流-直流(DC/DC)变换器称为二次电源。

随着工业技术的发展,对开关电源的要求越来越高,主要表现在开关电源的小型化、高效、电磁兼容性等方面。电气产品的变压器、电感和电容的体积质量与供电频率的平方根成反比。MOSFET、IGBT等新型全控型、高速电力电子器件的出现,使得开关电源的高频化成为可能。随着开关频率的提高,一方面开关管的开关损耗会成比例增加,使电路的效率大大降低,从而使变换器处理功率的能力大幅地下降;另一方面,系统会对外产生严重的电磁干扰(EMI)。为了克服DC/DC变换器在硬开关状态工作下的诸多问题,从20世纪80年代以来,软开关技术得到了深入地研究,并于近些年得到了迅速发展。所谓软开关,指通过在原来的开关电路中增加很小的电感、电容等谐振元件,构成辅助换流网络,在开关过程前后引入谐振,使开关开通前电压先降为零,或关断前电流先降为零,就可以消除开关过程中电压、电流的重叠,从而大大降低甚至消除开关损耗和开关噪声,使电力电子变换器可以具有更高的效率、功率密度和可靠性,并有效地降低功率变换装置引起的电磁污染和噪声等。

开关电源的一次电源通常是电网交流电压通过整流器得到,带来的问题就是使注入电网的电流为非正弦波,含有大量的高次谐波,输入端的功率因数较低。针对高次谐波和低功率因数产生的危害,1993年,我国国家技术监督局颁布了GB/T14549-93《电能质量公用电网谐波》;1998年,国际电工委员会(IEC)制定了IEC61000-3-2标准。这些要求迫使整流器输入端必须采取措施降低高次谐波含量,提高功率因数,从而引入功率因数校正技术。

目前,单台开关电源的输出电流可达到200A左右,这在很多场合都可以满足要求。但对于大型的直流用电设备,如针对某些需要48V/2000A直流电源供



电的大型程控交换机等通信设备,单台开关电源显然很难做到,因此就需要若干台开关电源并联运行,以满足负载功率的要求。开关电源并联运行的主要问题就是如何解决并联运行的各电源模块之间的均流。

本书主要论述了基本的 DC/DC 变换器、隔离型 DC/DC 变换器、软开关变换器的工作原理、高频开关电源中的磁元件(包括高频变压器和电感器)的设计方法、有源功率因数校正技术、高频开关电源的并联运行技术,同时介绍了几种常用 PWM 控制芯片及其应用。

作者在编写本书的过程中参阅并引用了大量文献,书末也许未能提及,编者在此向本书所借鉴或引用参考文献的作者表示衷心地感谢。另外,作者在编写本书过程中得到了合肥工业大学万文斌副教授和博士生陈中同学的帮助,在此一并表示感谢。

由于时间紧张和作者水平有限,不当或错误之处在所难免,敬请读者指正。

杜少武

2010 年 10 月于合肥



目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 什么是开关变换器和开关电源	(1)
1.1.1 开关变换器和开关电源	(1)
1.1.2 稳压电源的概念	(2)
1.1.3 串联调整的线性稳压电源	(2)
1.1.4 开关式稳压电源	(4)
1.2 DC/DC 变换器的分类	(5)
1.3 DC/DC 变换器主回路使用的元件	(6)
1.3.1 开关器件	(6)
1.3.2 电感	(6)
1.3.3 电容	(8)
1.4 直流开关电源的特点、应用及其发展	(10)
1.4.1 开关电源的特点与应用	(10)
1.4.2 对直流开关电源的要求	(10)
1.4.3 开关电源的发展	(11)
第 2 章 基本的 DC/DC 变换器	(18)
2.1 Buck 变换器	(18)
2.1.1 Buck 变换器的工作原理	(18)
2.1.2 Buck 变换器的设计	(20)
2.2 Boost 变换器	(22)
2.2.1 Boost 变换器的工作原理	(22)
2.2.2 输出输入电压关系	(22)
2.2.3 Boost 开关变换器的设计	(23)
2.3 Buck-Boost 变换器	(24)
2.3.1 Buck-Boost 变换器的工作原理	(24)
2.3.2 输出输入电压关系	(25)
2.3.3 Buck-Boost 开关变换器的设计	(25)



2.4	Cuk 变换器	(27)
2.4.1	Cuk 变换器工作原理	(28)
2.4.2	输入输出电压关系	(28)
2.4.3	Cuk 变换器的设计	(29)
第 3 章	隔离型 DC/DC 变换器	(32)
3.1	隔离型 Buck 变换器——单端正激变换器	(32)
3.1.1	隔离型 Buck 变换器——单端正激变换器的构成	(32)
3.1.2	单端正激变换器的工作原理	(33)
3.1.3	正激变换器的设计	(34)
3.2	隔离型 Buck-Boost 变换器——单端反激变换器	(35)
3.2.1	隔离型 Buck-Boost 变换器的构成	(35)
3.2.2	单端反激变换器的工作原理	(36)
3.2.3	单端反激式开关变换器的 3 种工作状态	(36)
3.2.4	单端反激式开关变换器的设计	(39)
3.3	单端变压隔离器的磁通复位技术	(40)
3.4	带隔离的 Cuk 变换器	(42)
3.4.1	隔离型 Cuk 变换器的构成	(42)
3.4.2	隔离型 Cuk 变换器的工作原理	(43)
3.4.3	隔离型 Cuk 变换器的设计	(45)
3.5	双管正激式 DC/DC 变换器	(47)
3.6	推挽变换器	(48)
3.6.1	推挽式变换器的构成	(48)
3.6.2	推挽变换器的工作原理	(50)
3.6.3	推挽式变换器的设计	(50)
3.7	全桥变换器	(51)
3.7.1	全桥变换器的构成	(51)
3.7.2	全桥变换器的工作原理	(52)
3.7.3	缓冲器的组成及作用	(52)
3.8	半桥变换器	(53)
3.8.1	半桥变换器的构成	(53)
3.8.2	半桥变换器工作原理	(54)
3.8.3	桥式分压电容器的选择	(55)
3.8.4	偏磁现象及其防止方法	(56)
3.8.5	直通的可能性及其防止	(57)
3.9	双倍磁通效应及软启动	(58)
3.9.1	双倍磁通效应	(58)



3.9.2	软启动线路	(58)
第4章	开关电源中的高频磁元件设计	(60)
4.1	磁性材料的概述	(60)
4.1.1	磁元件在开关电源中的作用	(60)
4.1.2	磁元件设计的重要意义	(60)
4.1.3	磁性材料的磁化	(60)
4.1.4	磁性材料的基本特性	(62)
4.2	磁性材料	(64)
4.2.1	磁芯磁性能	(64)
4.2.2	磁芯的分类	(66)
4.3	高频变压器设计方法	(67)
4.3.1	变压器设计一般问题	(67)
4.3.2	变压器设计基本步骤	(92)
4.3.3	高频变压器设计	(95)
4.4	电感器和反激变压器的设计	(104)
4.4.1	应用场合	(105)
4.4.2	损耗和温升	(108)
4.4.3	磁芯	(109)
4.4.4	电感计算	(115)
4.4.5	电感设计	(115)
4.4.6	反激变压器设计	(121)
第5章	软开关变换器	(131)
5.1	概述	(131)
5.1.1	功率电路的开关过程	(131)
5.1.2	软开关的特征及分类	(133)
5.2	准谐振软开关变换器	(134)
5.2.1	零电流谐振开关	(134)
5.2.2	零电压谐振开关	(135)
5.2.3	零电流开关准谐振变换器	(135)
5.2.4	零电压开关准谐振变换器	(140)
5.2.5	多谐振开关	(143)
5.2.6	多谐振变换器	(144)
5.3	PWM 软开关变换器	(146)
5.3.1	零开关 PWM 变换器	(147)
5.3.2	零转换 PWM 变换器	(152)



5.4	移相控制 ZVS-PWM 全桥变换器	(158)
5.4.1	移相控制 ZVS-PWM 全桥变换器的工作原理	(158)
5.4.2	移相控制 ZVS-PWM 全桥变换器软开关实现条件	(161)
5.4.3	移相控制 ZVS-PWM 全桥变换器的占空比丢失	(163)
5.4.4	移相控制 ZVS-PWM 全桥变换器的优缺点分析	(163)
5.5	移相控制 ZVZCS-PWM 全桥变换器	(164)
5.5.1	变压器原边加饱和电感和隔直电容的 ZVZCS-PWM 变换器	(164)
5.5.2	滞后桥臂串堵塞二极管的 ZVZCS 全桥变换器	(170)
5.5.3	副边采用有源箝位的 ZVZCS 全桥变换器	(171)
5.5.4	副边带无源箝位电路的 ZVZCS 全桥变换器	(175)
5.5.5	与滤波电感耦合的辅助绕组构成辅助电路的 ZVZCS 全桥变换器	(182)
第 6 章	开关稳压电源的控制电路	(186)
6.1	CW3524 脉冲宽度调制器	(186)
6.1.1	CW3524 的引脚功能	(187)
6.1.2	CW3524 的应用电路	(188)
6.2	CW3525A 型脉冲宽度调制器	(188)
6.3	TL494 型脉宽调制器	(190)
6.3.1	TL494 管脚功能	(191)
6.3.2	TL494 工作原理	(191)
6.3.3	TL494 的特点	(193)
6.3.4	TL494 的应用	(193)
6.4	UC3846/3847 电流控制型脉冲宽度调制器	(194)
6.4.1	UC3846/3847 的管脚功能	(195)
6.4.2	UC3846/3847 的工作原理	(195)
6.4.3	UC3846/3847 的应用	(196)
6.5	UC3842/3843 电流控制型脉冲宽度调制器	(197)
6.5.1	UC3842/UC3843 的管脚功能	(198)
6.5.2	UC3842/3843 的工作特性	(199)
6.5.3	UC3842/3843 的应用	(200)
6.6	相移脉冲宽度调制器谐振控制器	(201)
6.6.1	UC3875 的管脚功能	(202)
6.6.2	UC3875 的工作特性	(204)
6.6.3	UC3875 的应用电路	(206)
6.7	开关电源中常用的光电耦合器	(207)
6.7.1	光电耦合器的种类	(207)
6.7.2	光电耦合器的基本特性	(208)



6.7.3 光电耦合器在开关电源中的应用	(208)
第7章 有源功率因数校正技术	(213)
7.1 概述	(213)
7.1.1 功率因数校正概述	(213)
7.1.2 单相有源功率因数校正的分类	(213)
7.2 有源功率因数校正的基本原理及其控制方法	(214)
7.2.1 有源功率因数校正的工作原理	(214)
7.2.2 有源功率因数校正的控制方法	(214)
7.3 有源功率因数校正的集成控制芯片	(216)
7.4 基于 UC3854 的有源功率因数校正电路	(219)
7.5 软开关有源功率因数校正电路	(222)
7.6 单级功率因数校正电路	(226)
7.6.1 典型的单级 PFC 变换器	(226)
7.6.2 单级功率因数校正变换器的工作原理	(226)
7.6.3 常见的单级 PFC 变换器电路拓扑	(230)
第8章 开关电源的并联运行	(234)
8.1 概述	(234)
8.2 开关电源并联系统的均流方法	(235)
8.2.1 外特性调节法	(236)
8.2.2 主从控制均流法	(237)
8.2.3 外部控制均流法	(238)
8.2.4 平均电流自动均流法	(238)
8.2.5 最大电流自动均流法	(239)
8.2.6 热应力自动均流法	(239)
8.3 基于 UC3907 的可并联运行的开关电源	(240)
8.3.1 负载均衡控制器 UC3907	(240)
8.3.2 基于 UC3907 的可并联运行开关电源的应用电路	(242)
参考文献	(244)



第1章 概述

1.1 什么是开关变换器和开关电源

电源有如人体的心脏,是所有电设备的动力。但电源却不像心脏那样形式单一,因为标志电源特性的参数有功率、电压、频率、噪声及带负载时参数的变化等;在同一参数要求下,又有体积、质量、形态、效率、可靠性等指标,人们可以按此去“塑造”和完美电源,因此电源的形式是多种多样的。

一般电力(如市电)要经过转换才能符合使用需要,主要表现为:交流转换成直流,高压变成低电压,大功率中取小功率等。这一过程有人形象地说成是粗电炼为精电。粗电只有炼为精电后才好使用。

1.1.1 开关变换器和开关电源

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。一般情况下,开关电源专指直流开关电源,开关电源的核心是电力电子变换器(开关变换器)。

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,按转换电能的种类或按电力电子的习惯称谓,可分为四种类型:

(1)AC-DC(AC表示交流电,DC表示直流电,下同)称为整流,AC-DC变换器是将交流电转换为直流电的电能变换器;

(2)DC-AC称为逆变,DC-AC变换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)AC-AC称为交流-交流变频(同时也变压),AC-AC变换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,或是将恒频交流电直接转换为变频交流电的电能变换器;

(4)DC-DC称为直流-直流变换,DC-DC变换器是将一种直流电转换成另一种或多种直流电的电能变换器,是直流开关电源的主要部件。

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,经变换后从另一个方向输出;双向电能变换器可实现电能的双向流动。广



义地说,凡用半导体功率器件作为开关,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,转换时用自动控制闭环稳定输出并有保护环节则称开关电源(Switching Power Supply)。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,目前 DC-DC 变换技术中提高开关频率是热点内容之一,它在提高频率中碰到的开关过程损失机制,为提高效率而采用的方法,也可为其他转换方式提供参考。

1.1.2 稳压电源的概念

电源设备担负着把交流电转换为电子设备所需的各种类别直流电的任务,当电网或负载变化时,能保持稳定的输出电压,并具有较低的纹波,通常称这种直流电源为稳压电源。

稳压电源分为线性稳压电源和开关稳压电源。

过去的稳压电源为串联调整线性稳压电源,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。

开关稳压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。由于功率管工作在开关状态,功率损耗小,效率高,可达 80%~95%,因此开关稳压电源体积小、质量轻。但电路复杂,使用高频元器件价格高,因此成本较高,且输出电压纹波、噪声较高,动态响应较差。

20 世纪 70 年代以来,随着各种功率开关元件、各种类型专用集成电路、磁性元件、高频电容研制、应用,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,各种电子、电器设备 90% 以上采用开关稳压电源。

1.1.3 串联调整的线性稳压电源

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瓦到 1kW,对于更高的功率量级,如数千瓦以上,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。串联线性调整稳压电源电路拓扑,如图 1-1 所示。

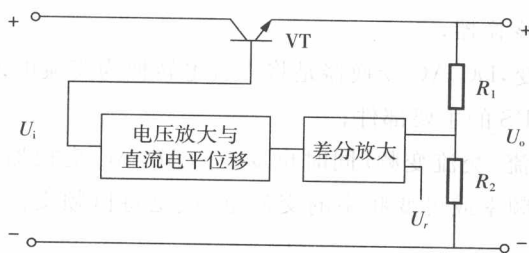


图 1-1 基本的串联调整稳压电源拓扑

输出电压为:

$$U_o = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_r$$



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 U_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 U_o ,其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,它犹如一个串在主电路中的可变电阻,当输入电压上升或减小时,晶体管的等效电阻增加或减小,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。

晶体管 VT 工作在线性区,管压降一般大于 2V,否则工作在饱和区,不能反映电压的变化,也就不能进行有效地调整。因此,最小的输入电压应高于 $U_o + 2$,假设输入电网电压波动为 $\pm T\%$,则最小、最大的输入直流电压分别为 $(1 - 0.01T)U_i$ 和 $(1 + 0.01T)U_i$ 。

当输入电压为最小时,有

$$U_o + 2 = (1 - 0.01T)U_i$$

则最大输入电压为:

$$U_{imax} = \frac{(U_o + 2)(1 + 0.01T)}{1 - 0.01T}$$

串联调整稳压电源的效率为:

$$\eta = \frac{U_o}{U_{imax}} = \frac{1 - 0.01T}{1 + 0.01T} \times \frac{U_o}{U_o + 2}$$

若考虑变压器、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,基本的线性稳压电源电路如图 1-2 所示。

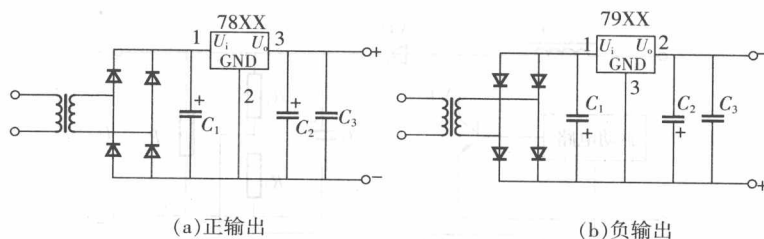


图 1-2 基本的线性稳压电源

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~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。

1.1.4 开关式稳压电源

把直流电压变换为另一种直流电压最简单办法是串一个电阻进行分压,电路结构很简单,但是效率低。用一个半导体功率器件作为开关,使带有滤波器的负载与直流电压一会儿接通,一会儿断开,则负载上也得到另一个直流电压。这就是 DC-DC 的基本手段,类似于“斩波”(Chop)作用。

在一个周期 T_s 内,电子开关接通时间 t_{on} 所占整个周期 T_s 的比例,称为占空比 D , $D = t_{on}/T_s$;很明显,占空比越大,负载上电压越高; $f_s = 1/T_s$ 称开关频率, f_s 固定, t_{on} 越大,负载上电压就越高。这种 DC-DC 变换器中的开关都在某一固定频率下(如几百千赫兹)工作,这种保持开关频率固定但改变接通时间长短(即脉冲的宽度),从而可以调节输出电压的方法,称脉冲宽度调制法(Pulse Width Modulation, 简称为 PWM)。

(1) 串联式开关稳压电源

串联开关变换器再加上电压取样电阻、基准电源、差分放大器以及 PWM 控制电路,即可构成串联开关稳压器,如图 1-3 所示。

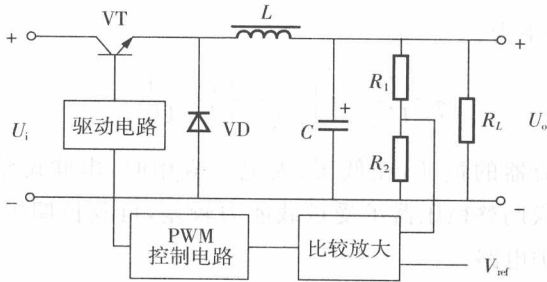


图 1-3 串联式开关电源的基本组成

(2) 并联式开关稳压电源

并联开关变换器再加上电压取样电阻、基准电源、差分放大器以及 PWM 控制电路,即可构成并联开关稳压器,如图 1-4 所示。

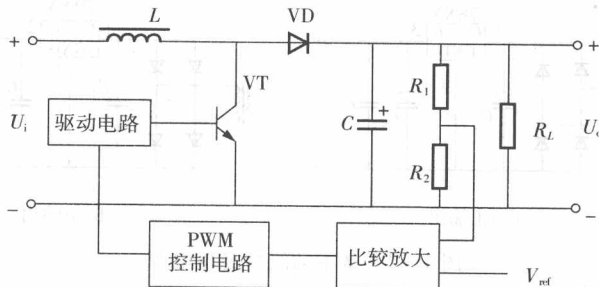


图 1-4 并联式开关稳压电源组成

当输入电压变化时,自动调整占空比 D ,可以保持输出电压稳定,当 U_i 增大时,使 $D = t_{on}/T$ 减小,输出电压就能保持稳定。其物理意义可以这样理解,假如 T 不变,由于电感



中的电流以 di/dt 的速率线性上升,在 U_1 增大时,如 t_{on} 保持不变,则 L 中储存的能量增大。而在同样的 t_{off} 时间内释放能量是固定的,这就使得输出电压上升,所以必须减小导通时间 t_{on} ,以便减小 L 中储存的能量,这样才能保持输出电压不变。

改变占空比的方法,可以是频率和周期不变,改变导通脉宽 t_{on} ,也可以保持导通时间 t_{on} 不变,改变工作频率或周期,二者都能进行调整,保持输出电压不变。

1.2 DC/DC 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非隔离型直流变换器;有电气隔离的称为隔离型直流变换器。

非隔离型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 6 种,即降压式(Buck)变换器、升压式(Boost)变换器、升降压式(Boost/Buck)变换器、Cuk 变换器、Zeta 变换器和 Sepic 变换器。在这 6 种单管变换器中,降压式和升压式变换器是最基础的,另外 4 种是从中派生的。双管直流变换器主要有电流可逆的不可逆变换器。全桥直流变换器(Full-Bridge Converter)是常用的四管直流变换器。

隔离型直流变换器也可按所用有源功率器件数量来分类。单管隔离直流变换器有正激变换器(Forward Converter)和反激变换器(Flyback Converter)2 种;双管隔离直流变换器有双管正激变换器(Double Transistor Forward Converter)、双管反激变换器(Double Transistor Flyback Converter)、推挽(Push-pull Converter)和半桥(Half bridge Converter)等 4 种;四管隔离直流变换器主要是指全桥变换器(Full-Bridge Converter)。

隔离型变换器通常采用变压器实现输入与输出间的电气隔离。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。

按能量传递来分,直流变换器有单向和双向 2 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。直流电动机控制用变换器也是双向的,电动机电动时将电能从电源传递到电动机,制动时将电机电能回馈到电源。

直流变换器分为自激式和他控式。借助变换器本身的正反馈信号实现开关管自持周期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 Switch)和软开关(Soft Switch)2 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功耗,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(Power MOSFET)是单极性器件,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些电荷放掉,则将消耗在器件内部,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。软开关直流变换器主要分为谐振变换器(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。

1.3 DC/DC 变换器主回路使用的元件

1.3.1 开关器件

无论哪一种 DC-DC 变换器,主回路使用的元件只是开关器件、电感和电容。开关器件只是开通、关断这 2 种状态,并且快速地进行转换。因此,只有力求快速,使开关快速地渡过线性放大工作区,状态转换引起的损耗才小。目前在直流变换器中使用的电子开关大多是功率场效应管(Power MOSFET)、绝缘栅双极性晶体管 IGBT 等,这些元件的基本特性在《电力电子技术》课程中已经介绍。

值得指出,主回路也不是绝对不出现电阻元件。出现的前提是有利于控制性能而又不引起较大的损耗,而且限于几十瓦以下的小功率变换器中应用。一般其阻值在毫欧($m\Omega$)级,其上得到的毫伏(mV)电压可用作当前工作周期进行电流控制或保护的信号。

1.3.2 电感

电感是开关电源中常用的元件,其两端电压超前其电流相位 90° ,理论损耗为零。常为储能元件,也常与电容共用在输入滤波器和输出滤波器上,用于平滑电流,也称它为扼流圈。



其特点是流过其上的电流有“很大的惯性”。换句话说,由于“磁通连续”性,电感上的电流必须是连续的,否则将会产生很大的电压尖峰。

在分析电感在线路中工作或绘制波形图时,考虑下面几个特点:

(1)在电感 L 中有电流 I 流过时,储存有 $LI^2/2$ 的能量。

(2)假设电感为理想电感,当电感 L 两端的电压 $u=U$ 为不变时,依 $u=Ldi/dt$ 公式可知,电感电流变化率 $di/dt=U/L$,表明电感电流线性增加。

(3)正在储能的电感器,因为能量不能瞬时突变,若切断电感在变压器原边回路时,能量绝大部分经变压器副边出现的电流输送至负载,原、副边耦合中保持相同的安匝数,维持磁场不变,或每匝伏·秒值不变。

(4)电感中的电流与其两端电压的积分(称为伏·秒值)成正比,电感的充放电过程如图 1-5 所示。只要电感器电压变化,其电流变化率 di/dt 也变化;对正向电压,电流从初始值线性上升;对反向电压,电流线性下降,根据能量守恒原理在电感器伏·秒值面积相等的某一时间点上,线性变化的电流重新降到初始值。

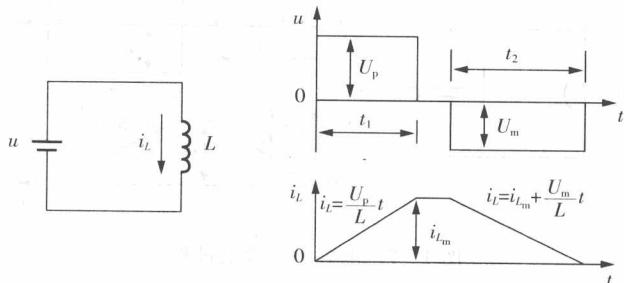


图 1-5 电感的充放电过程

电感为磁性元件,自然有磁饱和的问题。应用中有允许其饱和的,有允许其从一定电流值起开始进入饱和的,也有不允许其出现饱和的,在具体线路中要注意区分。在多数情况下,电感工作在“线性区”,此时电感值为一常数,不随端电压与流过电流而变化。但是,在开关电源中,电感有一个不可忽视的问题,就是电感的绕线所引起两个分布参数(或称寄生参数)的现象。其一是绕线电阻,这是不可避免的。其二是分布式杂散电容,随绕制工艺、材料而定,杂散电容在低频时影响不大,随着频率的提高而渐显出来,到某一频率以上时,电感也许变成了电容的特性。如果将杂散电容“集成”为一个,其等效电路如图 1-6 所示。

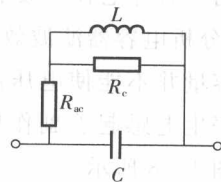


图 1-6 高频电感等效电路模型

其等效阻抗为:

$$Z = \frac{(R_c^2 R_{ac} + \omega^2 L^2 R_{ac} + \omega^2 L^2 R_c) + j\omega [LR_c^2 - \omega^2 L^2 C (R_c + R_{ac})^2 - CR_c^2 R_{ac}]}{[R_c - \omega^2 LC(R_c + R_{ac})]^2 + \omega^2 (L + CR_c R_{ac})^2}$$

由上式可以看出,当角频率大于某一值后电感将呈现容性。