

21 世纪高职高专系列教材

现代电力电子技术及应用

王维平 主编

东南大学出版社

TM1-43
w376

内 容 提 要

本书由电力电子器件、技术应用两大部分组成。内容分7章,分别叙述电力半导体器件、AC/DC变换技术、DC/AC变换技术、DC/DC变换技术、AC/AC变换技术、谐振开关技术、典型电力电子装置,每章末都有小结和习题。本书可作为无线电技术、自动控制、电气自动化、机电一体化等专业的高职教材,也可供大专院校及中等专业学校相近专业使用。

图书在版编目(CIP)数据

.现代电力电子技术及应用/王维平编著. —南京:东南大学出版社,2000.10

ISBN 7-81050-667-6

I. 现... II. 王... III. 电力电子学-高等学校:技术学校-教材 IV. TN01

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第40149号

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼2号 邮编210096)

出版人:宋增民

江苏省新华书店经销 丹阳兴华印刷厂印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:14.75 字数:368千字

2001年11月第1版 2001年11月第1次印刷

印数:1—5000册 定价:23.00元

(凡因印装问题,可直接向发行科调换。电话:025—3792327)

目 录

0 绪论	(1)
0.1 电力电子学科的形成与发展	(1)
0.2 电力电子技术的特点及应用	(2)
0.3 课程性质、教学要求及学习方法	(4)
1 电力电子器件	(5)
1.1 概述	(5)
1.1.1 电力电子器件的分类	(5)
1.1.2 电力电子器件的比较	(6)
1.2 半导体整流二极管	(7)
1.2.1 普通硅整流管	(7)
1.2.2 快速恢复二极管	(10)
1.2.3 功率肖特基二极管	(12)
1.3 晶闸管	(14)
1.3.1 晶闸管的结构及其工作原理	(14)
1.3.2 晶闸管的静态特性及主要参数	(17)
1.3.3 晶闸管的动态特性及参数	(20)
1.3.4 晶闸管的派生器件	(23)
1.4 电力晶体管	(26)
1.4.1 电力晶体管的结构及静态输出特性	(27)
1.4.2 电力晶体管的开关特性	(28)
1.4.3 电力晶体管的二次击穿与安全工作区	(29)
1.4.4 电力晶体管的极限运行参数	(31)
1.5 功率场效应晶体管	(31)
1.5.1 MOSFET 的基本工作原理及静态输出特性	(32)
1.5.2 MOSFET 的开关特性	(35)
1.5.3 MOSFET 的安全工作区	(36)
1.5.4 MOSFET 的主要参数	(36)
1.6 绝缘栅双极晶体管	(37)

1.6.1	绝缘栅双极晶体管的结构与工作原理	(37)
1.6.2	绝缘栅双极晶体管的特性	(39)
1.6.3	绝缘栅双极晶体管的锁定效应	(40)
1.6.4	绝缘栅双极晶体管的安全工作区	(40)
1.6.5	绝缘栅双极晶体管的主要工作参数	(40)
1.7	电力电子器件的缓冲电路	(41)
1.7.1	缓冲电路的作用	(41)
1.7.2	缓冲电路的基本类型及结构	(42)
1.7.3	缓冲电路的应用	(44)
1.8	全控型电力电子器件的驱动电路	(45)
1.8.1	GTO 门极驱动电路	(45)
1.8.2	GTR 基极驱动电路	(48)
1.8.3	功率 MOSFET 栅极驱动电路	(50)
1.8.4	IGBT 栅极驱动电路	(52)
	小结	(56)
	习题 1	(56)
2	AC/DC 变换技术	(58)
2.1	概述	(58)
2.1.1	整流电路的概念及其分类	(58)
2.1.2	可控整流电路研究的内容	(59)
2.1.3	整流电路的分析方法	(59)
2.2	单相可控整流电路	(60)
2.2.1	单相半波可控整流电路	(60)
2.2.2	单相全波可控整流电路	(64)
2.3	三相整流电路	(67)
2.3.1	三相半波可控整流电路	(67)
2.3.2	三相桥式可控整流电路	(70)
2.4	晶闸管触发电路	(77)
2.4.1	晶闸管对触发电路的要求	(77)
2.4.2	分立式相控同步模拟触发电路	(78)
2.4.3	触发电路同步信号的选择	(85)
2.4.4	集成式相控同步模拟触发电路	(87)
2.4.5	数字触发电路	(90)
2.5	有源逆变电路	(91)
2.5.1	有源逆变电路的工作原理	(91)
2.5.2	实现有源逆变的条件	(93)
2.5.3	关于最小逆变角 $\beta_{\min}$ 的限制	(93)
2.6	整流变压器漏抗对整流电路的影响	(94)

2.6.1	换流过程	(94)
2.6.2	换流期间整流器参数的计算	(95)
2.7	功率因数	(97)
2.7.1	功率因数的基本概念	(97)
2.7.2	整流电路的功率因数	(98)
2.7.3	提高功率因数的途径	(100)
小结		(102)
习题 2		(103)
3	DC/AC 变换技术	(106)
3.1	概述	(106)
3.2	基本逆变电路	(107)
3.2.1	单相半桥式逆变电路	(107)
3.2.2	单相全桥式逆变电路	(108)
3.3	谐振型逆变电路	(110)
3.3.1	串联式谐振逆变器	(110)
3.3.2	并联式谐振逆变器(电流型)	(114)
3.4	三相逆变器	(116)
3.4.1	电压型逆变器	(116)
3.4.2	电流型逆变器	(118)
3.5	脉宽调制型逆变电路	(121)
3.5.1	电压型 SPWM 逆变器	(121)
3.5.2	双极性正弦波脉宽调制	(124)
3.5.3	电流型逆变器脉宽调制	(126)
3.6	CTA 逆变技术	(127)
3.6.1	CTA 技术简介	(128)
3.6.2	CTA 逆变器	(128)
小结		(131)
习题 3		(131)
4	DC/DC 变换技术	(134)
4.1	基本斩波器的工作原理及控制方式	(134)
4.1.1	基本斩波器的工作原理	(134)
4.1.2	斩波器的主要控制方式	(138)
4.2	Buck 电路	(139)
4.3	Boost 电路	(142)
4.4	Buck-Boost 电路	(143)
4.5	Cuk 变换电路	(145)
4.6	全桥 DC/DC 变换电路	(146)

4.6.1	双极性电压开关 PWM 法	(148)
4.6.2	单极性电压开关 PWM 法	(149)
4.7	脉宽控制电路	(151)
4.7.1	集成 PWM 控制器的组成和原理	(152)
4.7.2	SG1525/SG1527 系列集成 PWM 控制器	(154)
4.7.3	电流控制器 PWM 电路	(157)
小结		(164)
习题 4		(164)
5	AC/AC 变换技术	(166)
5.1	概述	(166)
5.2	交流调压	(166)
5.2.1	单相交流调压	(166)
5.2.2	三相交流调压	(171)
5.2.3	交流斩波调压电路	(174)
5.3	交—交变频器	(176)
5.3.1	交—交变频器的基本原理	(176)
5.3.2	交—交变频器的运行控制方式	(178)
5.3.3	交—交变频器常用的电路型式	(180)
小结		(181)
习题 5		(182)
6	谐振开关技术	(183)
6.1	概述	(183)
6.2	器件的损耗	(184)
6.3	谐振开关式 DC/DC 变换器	(185)
6.3.1	谐振开关技术	(185)
6.3.2	零电流准谐振开关电路(ZCS—QRC)	(186)
6.3.3	零电压准谐振开关电路(ZVS—QRC)	(187)
6.3.4	零电压多谐振开关电路(ZVS—MRC)	(188)
6.4	准谐振式 PWM 变换器	(190)
6.4.1	零电流开关 ZCS—PWM 变换器	(191)
6.4.2	零电压开关 ZVS—PWM 变换器	(195)
6.5	零转换 PWM 变换器(ZCT—PWM)	(200)
6.5.1	基本零电流转换 ZCT—PWM 变换器	(200)
6.5.2	基本零电压转换 ZVT—PWM 变换器	(202)
6.5.3	特点分析	(202)
小结		(203)
习题 6		(204)

7 典型电力电子装置	(205)
7.1 大功率开关稳压电源	(205)
7.1.1 概述	(205)
7.1.2 开关电源主电路工作原理	(205)
7.1.3 IGBT 管的驱动与控制电路	(208)
7.2 不间断电源(UPS)	(210)
7.2.1 概述	(210)
7.2.2 单相在线式 UPS 典型实例	(212)
7.2.3 三相 UPS 典型实例	(215)
7.3 有源功率因数校正电路	(217)
7.3.1 功率因数的定义及问题的提出	(217)
7.3.2 功率因数校正的基本方式和方法	(218)
7.3.3 Boost ZCT—PFC 电路设计与实现	(220)
小结	(223)
习题 7	(224)
参考文献	(225)

0 绪 论

0.1 电力电子学科的形成与发展

以电力为处理对象的电子技术称作电力电子技术(Power Electronics),它是一种电力变换技术,它使用功率半导体器件对电能进行控制和变换——包括电压、电流、频率和波形等方面的变换,以达到使电能更好地符合各种不同用电设备的要求并获得良好的节能效果。因此,电力电子技术也是最佳电能使用技术。目前,发达国家的电能已有 80%以上经过电力电子技术处理,节能效果达 15%~40%。不久的将来,经过处理再应用的电能将达到 95%或者更多。今天,电力电子技术已发展成为一门新兴学科。

电力电子技术包括电力电子器件、变流电路和控制技术 3 个部分,其中以电力电子器件的制造和应用技术为核心。随着电力器件的发展,电力电子技术的发展大体经历了 3 个阶段。

1958 年,第一只晶闸管的问世开始了电力电子学的雏形期。随着其性能参数水平的不断提升和改进,开创了“晶闸管及其应用”的电力电子技术发展的第一阶段。在此期间,晶闸管的派生器件,如光控晶闸管、逆导晶闸管、双向晶闸管、快速晶闸管、高频晶闸管等,也有了很大发展。这类晶闸管由于只能由门极控制导通,而不能控制其关断,故称为半控型器件。

20 世纪 70 年代中期,自身兼有开通和关断功能的全控型器件的制造技术得到了很快的发展,其种类有:可关断晶闸管(GTO)、大功率晶体管(GTR)、功率场效应晶体管(Power MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)、MOS 控制晶闸管(MCT)等。它们的发展与广泛应用,使电力电子技术进入了“全控型器件”的第二阶段。

进入 20 世纪 80 年代,MOS 型绝缘栅双极型晶体管和功率场效应晶体管以及功率集成电路(PIC)和智能模块(IPM)的相继出现,使电力电子进入全新的“高频电力电子”的第三阶段。这些器件的共同特点是开关频率高、输入阻抗高、用电压控制,因此控制简单、功率小,可采用集成驱动电路,简化了控制电路,缩小了装置的体积重量,提高了系统的效率和可靠性。

将功率开关与控制逻辑、监测与保护集成在同一芯片上的设计思想,产生了新一代的功率集成电路(Power IC 或 Smart Power)。IPM 则是单指应用 IGBT 为功率开关的智能化模块,它是将 IGBT 芯片、驱动电路、保护电路等封装在一个模块内的新型电力电子器件。近年来,PIC 和 IPM 的发展也特别迅速。目前,日用电器、汽车电子、开关电源、电机控制以及手提电器等领域已广泛采用 PIC。

以开关方式工作的电力半导体器件是现代电力电子技术的基础与核心。器件特性的每一步新发展都带动变换电路技术的相应突破。20 世纪 70 年代后,各种高速、全控型开关器件的先后问世,使许多早期的变流器拓扑再次焕发活力,也使新的性能更高的电路拓扑以及以往难以实现的控制方式得以实现。由于有性能优良的电力半导体开关器件,性能大为改善的磁性和绝缘材料,计算机超大规模集成电路技术、频率高达兆赫级的电能处理方法,新

型电路拓扑结构及分析方法等方面的不断突破,从而使今天的电力电子技术具有全新面貌。随之而来的是应用领域日益广泛,对国民经济产生的效益日益显著,令人瞩目。

0.2 电力电子技术的特点及应用

电力电子技术的基本特点之一是能以小信号输入控制很大的功率输出,功率放大倍数极大,这就使电力电子设备成为强弱电之间接口的基础。微电子和计算机技术的新成就,可以通过这一接口移植到传统工业产品,可以促使传统产品的更新换代。当今机电产品技术上的突破主要方向在于电子化。电力电子器件的另一基本特点是工作于开关状态,正向压降低而反向漏电流小,从而在理论上保证了各类电力电子设备所共有的节能性能。我国总体上说缺电严重,但另一方面却用电浪费严重,矛盾十分尖锐。电力电子技术的应用正是解决这一矛盾的有力措施。国家科技部已将电力电子技术列为我国重点发展的高技术领域之一。

应用电力电子技术构成的变流装置,按其功能可分为如下几种基本类型:

- (1) 可控整流器把交流电压变换成固定或可调的直流电压;
- (2) 逆变器把直流电变换成频率固定或可调的交流电;
- (3) 交流调压器把固定或变化的交流电压变换成可调或固定的交流电压;
- (4) 斩波器把固定或变化的直流电压变换成可调或恒定的直流电压。

电力电子技术应用非常广泛,军事国防、工业交通、农业、商业和文体、医药等,以致家用电器无不渗透着电力电子技术的新成就,这里仅举几个方面的应用为例。

1) 电机的调速技术

过去的研究仅限于直流电机的控制与调速,与其相配套的是晶闸管可控整流。全控功率器件的发展,推动了交流电动机变频调速技术的发展。交流电动机——异步机或同步机采用变频调速,带来巨大的节能效益。

交流电动机的拖动负荷用电,在世界各国的总用电中均占 50% 以上,我国也不例外。在各行各业中,风机、水泵多用异步电动机来拖动,其用电量在我国占工业用电的 50% 以上,占全国用电量的 31%。

控制风量或水流量,过去是靠控制风门或节流阀的转角,而电机的转速是不变的。由于风门或节流阀转角的减小,增大了流体的阻力,结果造成在小风量或小水流时电能的浪费。

由于全控器件的发展,采用脉宽调制(PWM)技术,可以很方便地获得“VVVF”(变压变频)电源,维持 V/F 的值为一常数供电给交流异步机,就可以获得与直流电机相似的良好调速特性。用电效率明显增大,使节电达到 30% 以上。我国所拥有的风机、水泵,若全面采用变频调速后,每年节电将达到百亿度电的数量级。家用电器中的空调,新近推出采用变频调速技术,可节电 30% 以上,其原理也是一样的。

先进的三相变频调速控制器,全部器件包括功率半导体器件等,采用表面贴装技术,功率达 10kW 而体积只有信用卡的大小。这给变频调速在各个领域的应用提供了方便。变频调速技术的发展,一是功率容量的增大,二是性能的不断提。由于数字控制的引入,可以使电机具有我们所要求的各种拖动特性,如电梯、吊车、自动门等所要求的 S 形加减速特性;还可以使电机转速或旋转位置达到很高的精度,满足一些场合如化纤或造纸行业的特殊

要求。

2) 照明

照明用电,是一个用电大户。美国照明用电占总发电量的 24%,我国则只占 12%。由于白炽灯发光效率低、热损耗大而广泛采用了日光灯。但是日光灯必须要有扼流圈(电感),起辉后,全部电流要流过扼流圈,无功电流较大,不能达到有效节能。近年来,电子镇流器的出现,较好地解决了这个问题。电子镇流器就是一个 AC/DC/AC 变换器。如用于 20~80W(双管)的日光灯,其体积要比相应功率的扼流圈小 $1/3 \sim 1/2$,其功率因数高达 0.99 以上,大大减少了无功电流和有功损耗。

3) 通信用高频开关电源

通信领域用高频开关电源是极具有代表性的一种 DC/DC 方式的开关电源。近年来,通信事业的发展极大地推动了通信用电源的发展。1992 年,全国电信部门全年用电达到 25 亿度。到了 1995 年底,全国电话交换机总容量是 1992 年的 4.5 倍,用电量也成倍增长。可见电信部门一年的耗电是很可观的。

通信电源有一次电源和二次电源之分:

一次电源是将电网市电变换成标称值为 48V 的直流电。传统方式是采用可控硅整流器,优点是承受功率大,缺点是体积庞大、笨重,热损耗仍较大,输出电压纹波较大,对电网有严重的谐波污染。

新型的通信用一次电源,是将市电直接整流,然后经过高频开关功率变换,再经过整流、滤波,最后得到 48V 的直流电源。如用功率 MOSFET 管,开关工作频率可达 100kHz。与传统的一次电源相比,其体积、重量大大减小,效率显著提高。国内已先后推出 48V 系列电源产品,输出电流从 20~400A 甚至更大,以满足不同容量的需求。

二次电源是电信设备内部集成电路所需用的电源,要求体积小,规格齐全,有 65V、12V,等等。将一次电源(48V)经过 DC/DC 高频功率变换,获得不同规格的直流电压输出,即是二次电源。开关工作频率在几十千赫或 100kHz 以上,已有 500kHz 的产品,功率密度达到 $0.3 \sim 1.2 \text{ W/cm}^3$ 。开关频率的提高使功率器件动态损耗增加,为了减小开关损耗,因而又推动了“软开关”技术的研究与发展。目前采用软开关技术的高频开关电源其规格已达 48V/400A,并已走向商品化。如何改善开关电源的输入功率因数也是通信电源的研究热点。

4) 高频逆变整流焊机电源

随着国民经济高速发展,弧焊电源需求量迅速增加。1996 年国务院 8 个部委联合发文强制淘汰 AX 系列旋转直流电机供电的弧焊机,而以节能、节材效果明显的 ZX5 系列可控硅整流式直流弧焊机所取代之。与此同时,国外在高频逆变整流焊机的研制方面,取得了实质性进展,以功率 MOSFET 和 IGBT 为主开关元件的逆变焊机已占主流。对于我国,面对的形势是在淘汰了旋转直流弧焊机之后,如何赶超国际先进水平。逆变焊机电源的工作原理模式与高频开关通信电源一样,只是焊机电源是低压大电流输出。由于采用高频(20kHz 以上)逆变,体积重量有明显减小,因而便于携带,适用于各种场合,如高空作业。

5) 电源电网净化技术

近 20 年来,随着电弧炉、电力电子变流器等非线性用电设备逐年增多,电网波形畸变日趋严重,它的高次谐波、低功率因数等不仅影响邻近其他用电设备的工作,而且也使输电线上损耗增加。为此,国际上已制定了与此相关的标准,如 IEC555.2。它对用电装置的输入

功率因数和输入电流谐波含量都作了具体限制。应用电力电子技术,对于交流电网单相输入的中小功率开关电源输入功率因数校正技术,现在已经比较成熟,可以达到不低于 0.99。三相交流电网输入功率因数校正技术,目前仍是各国关注和研究的热点。

对于大功率三相交流电网输入的非线性用电设备,仍难以避免对电网的污染。随着电力电子技术的发展,目前认为比较有效的办法是采用一套可控的无功电流源向电网注入一个畸变电流,用来抵消非线性负载所产生的谐波。这种电网波形畸变的有源补偿系统已被认为是治理谐波的最有前途的方法。

电力电子技术还应用于不间断电源(UPS)、高压直流输电(HVDC)等,应用极为广泛。可以肯定,大力推广电力电子技术,具有广泛的现实意义和潜在而又巨大的经济和社会意义。

0.3 课程性质、教学要求与学习方法

电力电子技术是一门专业基础性质较强且与生产实际紧密结合的课程,在高职高专的电气工程类专业、电子技术应用类专业中被确定为一门主干课。课程内容包括器件、电路、应用三大方面。三者中,应以电路为主,讲解器件和应用的目的是为了应用器件组成电路,故应注意掌握器件外部特性及极限额定参数。本课程的主要篇幅在于研究不同电力半导体器件所构成的各种典型功率变换电路。学生应掌握功率变换主电路的构成和工作原理、不同负载对电路工作特性的影响以及主电路的元件参数计算与选择;同时学生应熟悉、了解各种典型触发、控制、驱动以及必要的辅助电路的工作原理和特点。

学习本课程时,应着重物理概念与基本分析方法,突出“管为路用”的基本原则,重点放在电路上,并在电路学习与分析中处理好器件、电路、应用三者关系。在学习方法上要特别注意电路的波形与相位的分析,注意各种电力电子器件在不同变换电路中截止、导通的变化过程,从波形的变化中分析电路的工作状态、性能指标。同时也要注意培养学生的读图能力、工程估算能力、分析问题和解决问题的能力。

高职高专教育不同于本科教育,要在教学实践中大力倡导学生的技术实现能力和工程现场能力。故而在本课程的教学中也应突出理论与实践的结合,充分利用各种教学手段包括 Pspice、Workbench 的仿真和虚拟实验,使学生能够身临其境地体会与实践电力电子技术中器件、电路中的各种电量波形及在不同外部工作条件下,各种电量的变化过程。

按大纲要求,本课程拟安排 60 学时,建议分配如表 0-1 所示。

表 0-1 课时安排

章 节	学 时	章 节	学 时
绪论	2	第 4 章	12
第 1 章	10	第 5 章*	4
第 2 章	14	第 6 章	8
第 3 章	10	第 7 章*	4

注:打*号的内容为选学内容,根据各专业不同要求灵活选用,其学时数应适当增加。

1 电力电子器件

1.1 概述

1.1.1 电力电子器件的分类

1) 根据开关特性分类

电力电子器件又称电力半导体器件,是电力电子技术的组成核心之一。在电力电子电路中,电力电子器件工作于受控的通断状态,具有较理想的开关特性。根据不同的开关特性,它们可分为如下三大类型:

(1) 不可控器件 这种器件通常为两端器件,它具有整流的作用而无可控的功能,如PN结整流管,肖特基势垒二极管等。

(2) 半控型器件 这种器件通常为三端器件,通过控制信号可使其开通但不能被控关断,故而称为半控型器件。普通晶闸管(SCR)及其大部分派生器件皆属于此类。

(3) 全控型器件 该类器件也为三端器件。通过控制信号,既可使其开通,又可使其关断,因而称之为全控型器件。目前,主要有可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR)、功率场效应管(Power MOSFET)及各种三端场控器件等。

根据器件内部参与导电的载流子性质,我们又可将器件分为单极型、双极型和混合型三种。对于单极性器件和双极性器件的定义,我们在模拟电子线路中已经学过,这里不再赘述,而混合型器件即是由单极型与双极型器件复合而成的一种新型器件,如绝缘栅双极晶体管(IGBT)和MOS控制晶闸管(MCT)等。这类器件充分利用了不同极型器件的各自优点,取长补短,使其在电流容量上、反向电压耐量上、工作效率以及电流上升率(di/dt)、电压上升率(du/dt)等耐量上都有了很大的提高。

2) 根据控制信号的性质分类

根据控制信号的性质不同,还可将电力电子器件分为电流控制型和电压控制型两种。

(1) 电流控制型电力电子器件 为了使器件开通或关断,必须给器件注入或从其中抽取电流的这一类电力电子器件都称为电流控制型器件,如晶体管、晶闸管及可关断晶闸管等。电流型控制器件的共同特点是:

① 在器件体内存在两种载流子导电,由导通转向阻断时,两种载流子在复合过程中产生热量,使器件结温升高。而过高的结温限制了器件工作频率的提高,因此电流控制型器件的工作频率要低于电压控制型器件。

② 具有电导调制效应,从而使器件导通压降很低,导通损耗较小。

③ 电流控制型器件的控制极输入阻抗低,控制电流和控制功率较大,因此,驱动电路复杂。

(2) 电压控制型电力电子器件 一切用场控原理进行控制的电力电子器件统称为电压

控制型电力电子器件,也称为场效应电力电子器件。如功率 MOSFET、IGBT、静电感应晶体管(SIT)、静电感应晶闸管(SITH)等。电压控制型器件的共同特点是:

① 输入阻抗很高,故而控制功率小,驱动电路简单。

② 对于单极型器件来说,因为只有一种载流子参与导电,没有少数载流子的注入和存储,开关过程不存在双极型器件中的两种载流子复合,因而工作频率很高,可达几百千赫,甚至更高。就是混合型器件,如 IGBT 的工作频率也远高于双极型器件,可达 20kHz 以上。

③ 工作温度高,抗辐射能力强。

1.1.2 电力电子器件的比较

电力电子器件品种繁多,这里仅就我们最常见与常用的 SCR、GTO、GTR、功率 MOSFET、IGBT 等作一简单的比较,并只对器件的主要性能指标,如电压、电流和工作频率作比较。

1) 输出功率

图 1.1 所示为单个电力电子器件的输出功率与工作频率的关系曲线。由图可知,SCR 的输出功率最大,但工作频率最低。GTO 次之,但工作频率却大大超过 SCR,不仅如此,GTO 是属于全控型器件,可自关断,故而在大功率的产品中几乎没有其他器件可与之相比。

GTR 的容量范围在 GTO 与功率 MOSFET 之间。控制 GTR 要比控制 GTO 容易,加之 GTR 的工作频率高于 GTO,因而凡是在 GTR 容量范围内能解决问题的就尽量避免使用 GTO。但 GTR 的耐压不够高,如果电网电压超过 600V,则使用 GTR 将很难发挥其作用。

由图 1.1 还可看出,功率 MOSFET 的工作频率最高,故而在用于高频化的逆变器、斩波器时,其体积重量将大大减少,变流性能却大大提高。目前,在 10kW 以下的逆变器中,功率 MOSFET 使用较多。IGBT 的容量目前已超过 GTR 与功率 MOSFET,它的应用范围正在逐步扩展,在高频整流、逆变、调压调速等方面使用较为广泛,是一种趋于完善的新型器件。

2) 电流与电压的等级

图 1.2 显示了几种全控型器件的电压电流等级的比较情况。由图可知,GTO、SITH 属于高压大电流器件,GTR、IGBT 和功率 MOSFET 的电压、

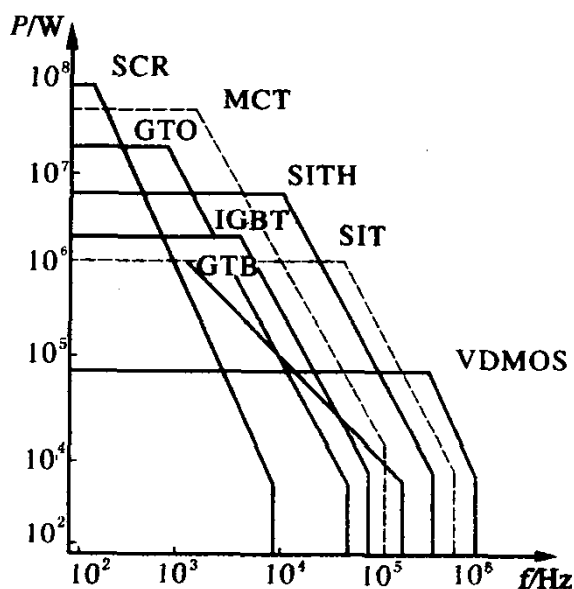


图 1.1 单个器件输出功率与工作频率的关系

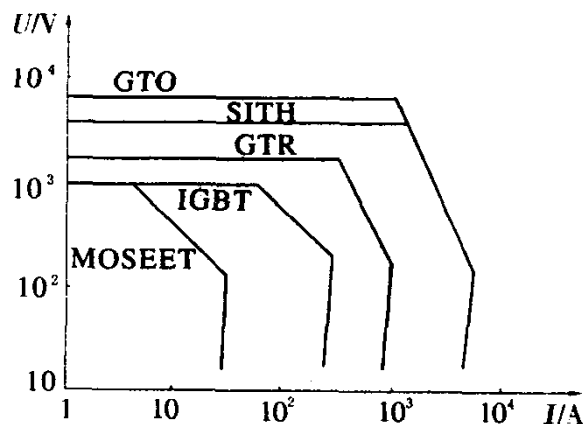


图 1.2 各种全控型器件电压与电流的比较

电流容量次之。由于 GTO、SITH 是属于 P-N-P-N 的四层结构器件,故而在电压电流两个方面仍有发展的余地。GTR 的电流容量仍可增大,但电压耐量却难以高于 1 500V。由于功率 MOSFET 的导通电阻随着电压的升高而增大,因此,耐压的继续提高就显得困难较多。从目前的发展看,IGBT 是一种很有前途的新型器件,它的电压、电流容量都高于 GTR,随着半导体制造技术及工艺水平的不断发展与提高,IGBT 的电压、电流容量还将有进一步的提高。

3) 功率损耗

图 1.3 为 1 000V 级耐压的器件功率损耗与工作频率的关系曲线。我们知道,在现代电力电子电路中,各种功率变换器中的功率器件大都工作在开关状态,随着工作频率的升高,其动态损耗将占器件总功耗的 95% 以上,因此随着工作频率的提高,各种自关断器件的动态损耗是不一样的。由图可知,功率 MOSFET 的功耗最大,这是由于其导通电阻大的缘故。但它的功耗随工作频率的增加幅度变化很小,这说明功率 MOSFET 的开关损耗小,故而更适用于高频场合。GTO、GTR 和 IGBT 虽然低频时管压降低,功耗小,但随着工作频率的增加,开关损耗急剧上升,这就局限了它们的工作频率不可能高于功率 MOSFET。

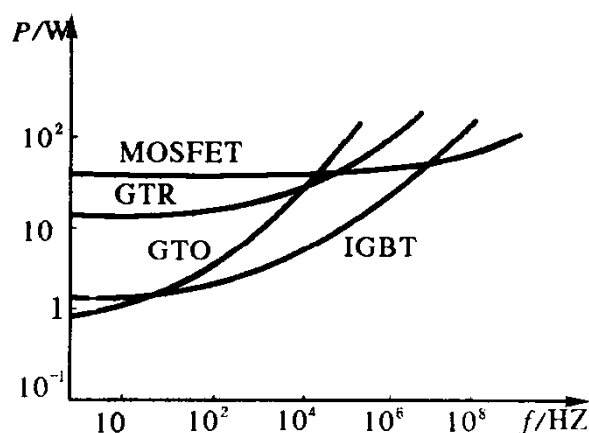


图 1.3 功率损耗与工作频率的关系

1.2 半导体整流二极管(Rectifier Diode)

整流二极管是电力电子电路中最常用的一种器件,它的种类很多,有大功率的、小功率的,有高频的、也有低频的,当然根据不同的分类法还有很多。本节就功率级应用较多的普通硅整流管和高频应用的快恢复硅整流管及肖特基整流管作一介绍,并突出其高频、大功率应用时的外特性。

1.2.1 普通硅整流管

1) 基本原理

硅整流管由一 PN 结组成,它是一个结构最简单的电力电子器件。它的基本结构及电路符号如图 1.4 所示。由图可知,整流管是 P 型和 N 型半导体结合而成的,特性与 PN 结的特性一样。PN 结的工作可以分为零偏置、正偏置和反偏置三种状态。

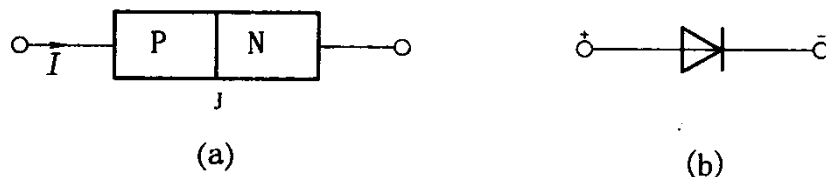


图 1.4 整流管的结构及电路符号
(a)结构; (b)符号

(1) PN 结零偏置

在 PN 结不加电压(零偏置)时,交界面处两边的多子浓度差引起了两边的多子各自向对方区扩散,形成了一个空间电荷区,建立了一个自建电场,方向如图 1.5(a)所示。该电场方向恰好起着阻碍多子扩散的作用,同时却使少子产生漂移运动,直到建立动态平衡为止,空间电荷区也就展宽到一定的宽度。这时通过空间电荷区的多子扩散电流同在自建电场推动下也通过空间电荷区的少子漂移电流相等,因此从整体上看,没有电流通过 PN 结。

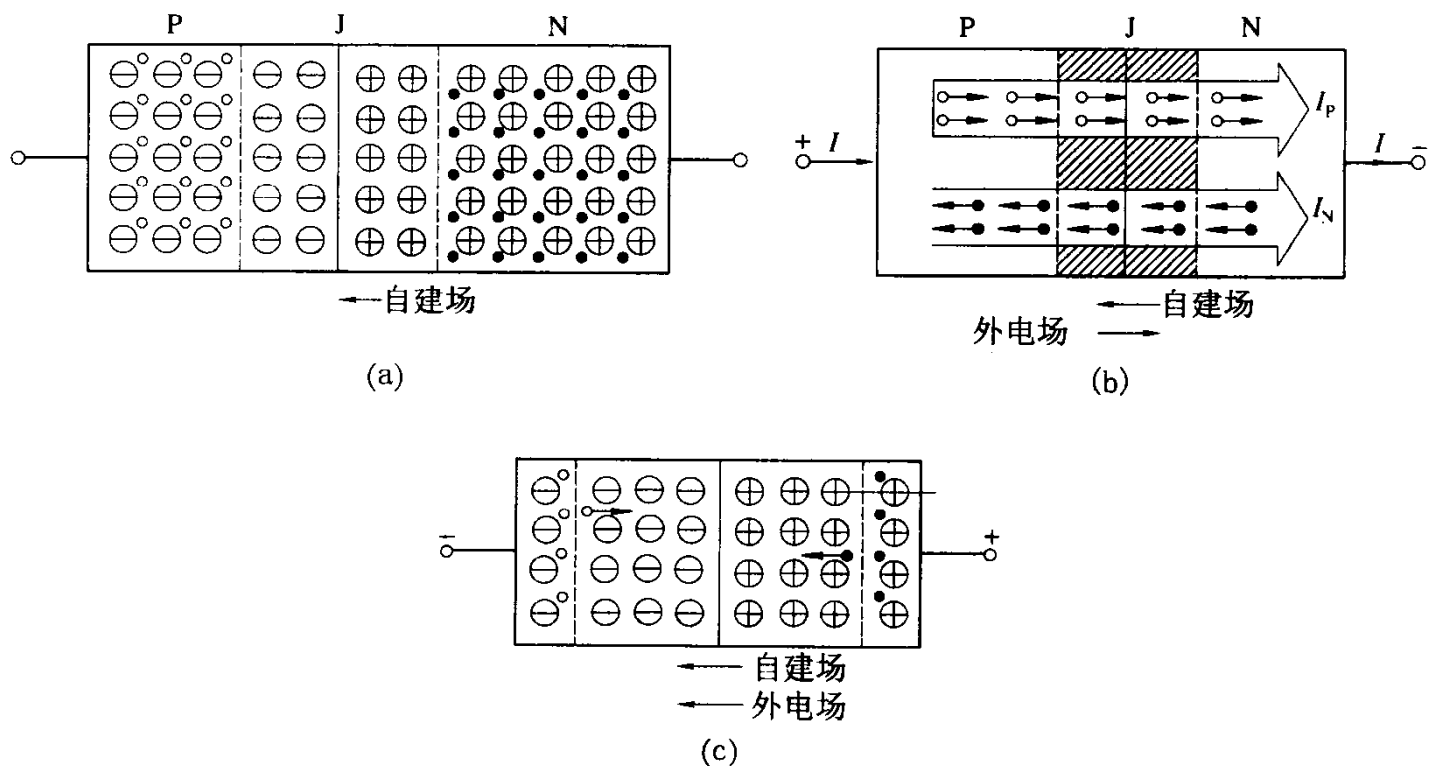


图 1.5 不同偏置下的 PN 结
(a)零偏置; (b)正偏置; (c)反偏置

(2) PN 结正向偏置

PN 结外加正电压(正偏置)下,如图 1.5(b)所示,外加电压削弱了内部电场,空间电荷区变窄了,因而也就削弱了自建电场对多子扩散的阻碍作用,原先的动态平衡被破坏。这时 P 区的空穴不断地涌入 N 区,而 N 区的电子也会不断涌入 P 区,各自成为对方区中的少数载流子。这样,PN 结中也就通过了一个正向电流。随着外加电压的增加,正向电流基本按指数规律增长,因此 PN 结的正向伏安特性如图 1.6 第一象限所示。

当 PN 结通过正向大电流时,压降只有 1V 左右。这是因为在通过正向大电流时注入基区(通常是 N 型材料)的空穴浓度大大超过原始 N 型基片的多子浓度。为了维持半导体中电中性条件,多子浓度也要相应大幅度地增加。这意味着在大注入条件下原始基片的电阻率实际上大大地下降了,也就是电导率大大地增加了,这种现象称为基区电导调制效应。这样一来,P 和 N 区两端的电压就维持在很低水平,即 1V 左右,所以正偏置的 PN 结相当于“低阻态”。在 GTR、SCR、IGBT、SITH 和 MCT 器件中都存在着这种电导调制效应,因此它们导通后的压降都很低。

(3) PN 结反向偏置

在 PN 结外加反向电压(反偏置)时,如图 1.5(c)所示,外加电压加强了内部电场,从而强烈地阻止 PN 结两边多子的扩散,对 PN 结两边的少子以漂移电流形式通过空间电荷区,

形成了 PN 结反偏置下的漏电流。而且随外加电压增大(雪崩击穿电压以内)变化很小。当外加电压增加到空间电荷区内场强达到雪崩击穿强度时,反向漏电流急剧增加,其 PN 结反向偏置时的伏安特性曲线如图 1.6 第三象限所示。雪崩击穿时,PN 结会因其内部的损耗急剧增加而损坏,所以 PN 结上所加的反向电压大小受雪崩击穿电压的限制。

由上面分析可知:

① 在具有 PN 结结构的器件中,参与导电的有两种相反类型的载流子(空穴和电子)。有两种载流子参与导电的器件称为双极型器件,而只有一种载流子参与导电的器件称为单极型器件。

② PN 结通过正向大电流时,在基区存在着强烈的电导调制效应,因此双极型器件通态压降比较小。

③ 反偏置的 PN 结存在着少子漂移现象,空间电荷区内的雪崩击穿电场强度决定了 PN 结承受外加电压的大小,雪崩击穿前,反向漏电流很小,一旦出现雪崩击穿,反向漏电流急剧增加。

PN 结的静态伏安特性曲线如图 1.6 所示。PN 结正偏置时呈现“低阻态”,反偏置时呈现“高阻态”,即通常人们所说的 PN 结具有单向导电的整流特性。这就是把二极管称为整流管的原因。整流管的主要电参数有正向电流、正向压降、反向漏电流、反向电压。正向电流和反向电压是整流管的功能参数,正向压降和反向漏电流是整流管能正常可靠工作的参数。鉴于在模拟电子线路的课程里我们已经详细介绍了这些参数的定义,故此处不再赘述。大功率整流管的质量优劣主要由正向压降和反向漏电流来标志。普通硅整流管的电流可达数千安以上,反向耐压可达数千伏以上。

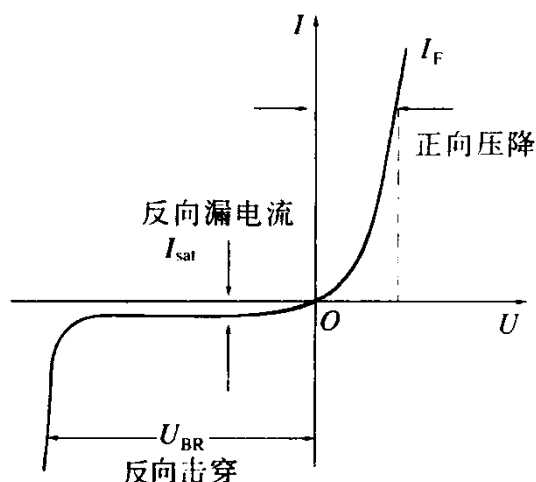


图 1.6 PN 结静态伏安特性

2) 动态特性

整流二极管在电力电子电路中常作为一个开关器件。它在正向偏置时呈低阻状态,正向管压降很低,近似于短路;在反向偏置时,二极管呈高阻状态,反向电流很小,近似于开路。二极管的上述特性,是它作为开关器件的基础。但是,二极管从低阻转变成高阻或从高阻转变成低阻并不是瞬时完成的,这些转变都要经历一定的过程。二极管从高阻的反向阻断转变为低阻的正向导通称为正向恢复,从正向导通转变为反向阻断称为反向恢复。这两种恢复过程限制了二极管的工作频率。

整流二极管在低频或静态工作时可以不考虑正向和反向恢复时间,可用 PN 结的静态特性描述整流管的工作特性。但是,在前后沿变化较陡的脉冲状态或高频切换的电路中,整流管的动态特性成为极其重要的特性。此时,整流二极管的等效电路如图 1.7 所示。

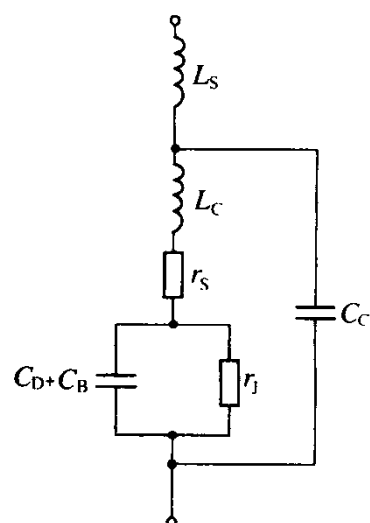


图 1.7 整流二极管的高频等效电路

图 1.7 中 C_D 和 C_B 为 PN 结所具有的扩散电容和势垒电容; r_j 为 PN 结的结电阻,是非

线性电阻; r_s 为 PN 结以外半导体区的体电阻; L_c 为芯片电感; L_s 为引线电感; C_c 为管壳电容。由图可知,在高频工作状态时,整流二极管具有复杂而重要的动态开关特性,这时不能再用 PN 结的静态特性来描述整流管的工作特性。普通功率二极管的反向恢复时间长,不能适应高频开关电路的应用,为此专门研究和制造了具有快速恢复性能的二极管。

1.2.2 快速恢复二极管(Fast Recovery Diode)

恢复过程很短的二极管,特别是反向恢复过程很短的二极管称为快速恢复二极管(FRD)。高频化电力电子电路要求快速恢复整流二极管的正向恢复特性良好,即正向瞬态压降小,恢复时间短;反向恢复特性也良好,即反向恢复时间短,反向恢复电荷少,并具有软恢复特性。

1) 开通特性

整流二极管的开通也有一个过程,开通初期出现较高的瞬态管压降,经过一定时间后才能处于稳定状态,并具有很小的管压降。这就是说,二极管开通初期呈现出明显的“电感效应”,不能立即响应正向电流的变化。图 1.8 中给出二极管开通特性的曲线。图 1.8(a)所示为管压降随时间变化的曲线,其中 U_{FP} 为正向峰值电压, t_{FR} 为正向恢复时间;图 1.8(b)所示为二极管开通电流的波形,电流上升率用 di_F/dt 表示。由图可知,在正向恢复时间内,正向开通的二极管具有比稳态大得多的峰值电压 U_{FP} 。实验表明,当正向电流上升率超过 $50A/\mu s$ 时,在某些高压二极管中可以测得几十伏的电压值。一般电压高于 600V、电流大于 100A 的快速恢复二极管中具有较高的瞬态压降。这一概念在普通整流二极管中是不曾出现的,但是在诸如缓冲电路中的快速应用时,这一概念非常重要。

开通时二极管呈现的电感效应,除了器件内部机理的原因之外,这与引线长度、器件封装采用的磁性材料等因素有关。电感效应对电流的变化率最敏感,因此开通时二极管电流的上升率 di_F/dt 越大,峰值电压 U_{FP} 就越高,正向恢复时间也越长。

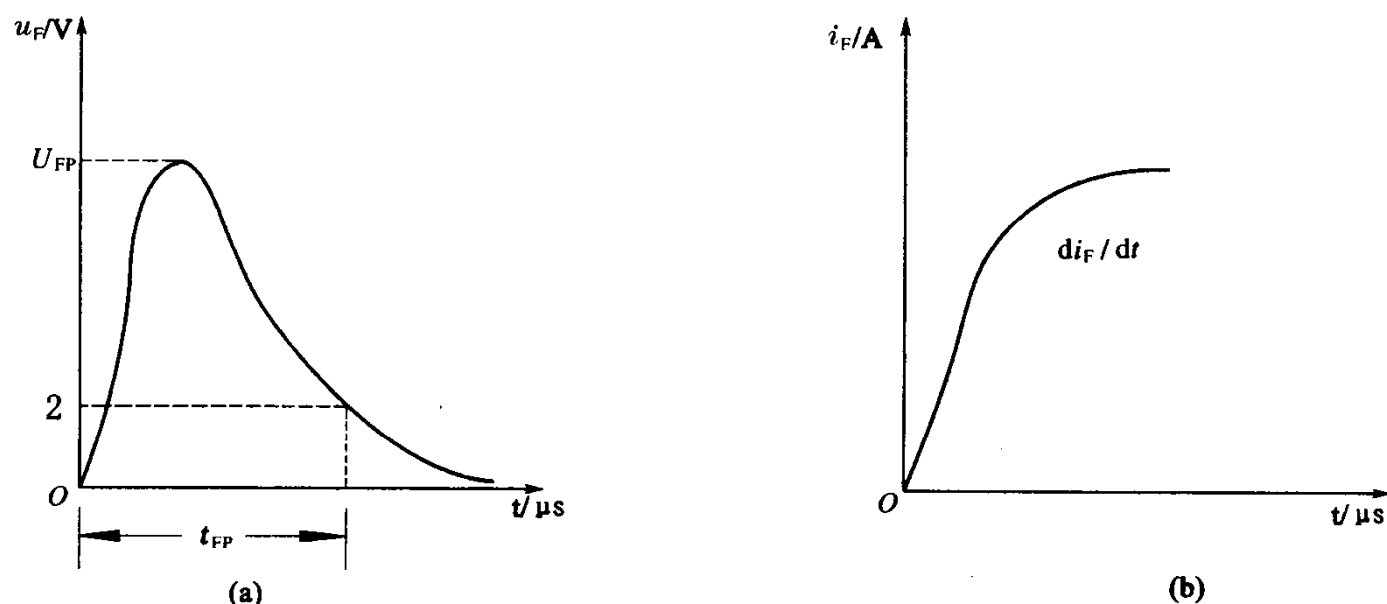


图 1.8 快速整流二极管的正向恢复特性
(a)管压降随时间变化的曲线; (b)二极管导通电流波形

2) 关断特性

正在导通的二极管突然加一反向电压时,反向阻断能力的恢复需要经过一段时间。在