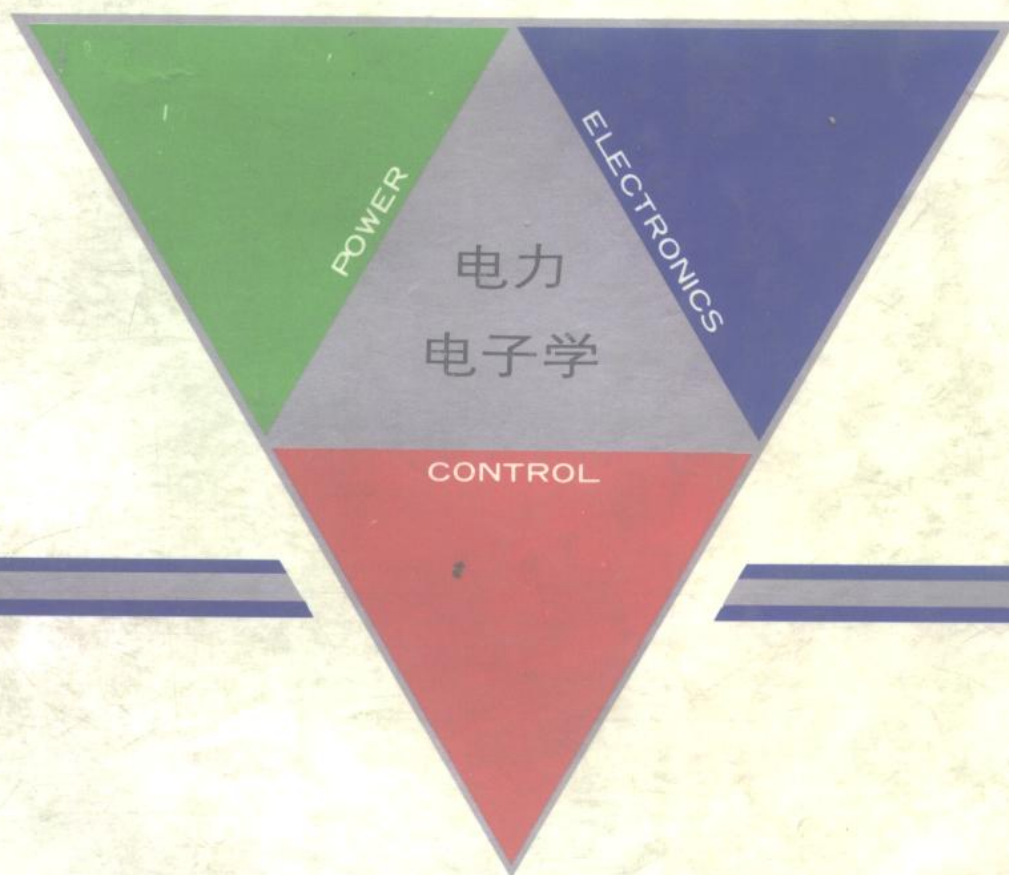


现代电力电子技术

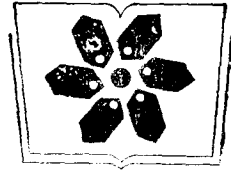
器件、电路及应用

张立 赵永健 编著



科学出版社

73.73
586



中国科学院科学出版基金资助项目

现代电力电子技术

器件、电路及应用

张 立 赵永健 编著

科学出版社
1992

(京)新登字 092 号

0007/823 12
内 容 简 介

本书是讲述电力电子全控型器件、电路及应用的一本专著。本书从应用角度出发,跟踪国内外现代电力电子技术的最新发展,比较全面地介绍了多种新型自关断器件的原理和特性,阐述了各种器件的应用技术、电路的设计方法以及在交流电机调速、开关电源和不间断供电系统中的应用。本书的特点是:叙述深入浅出,理论与实际紧密结合,在介绍电力电子器件的基础上侧重于应用技术和应用电路的分析和计算。

本书可供高等院校工业自动化、机械、电子、通讯、航天、航空等专业的本科生、研究生参考,也可供从事这方面工作的广大科技人员阅读。

现代电力电子技术

器件、电路及应用

张 立 赵永健 编著

责任编辑 鞠丽娜

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1992 年 9 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

1992 年 9 月第一次印刷 印张:22 3/4 插页:1

印数:1—7 800 字数:528 000

ISBN7-03-002912-7/TP·214

定价:14.40 元

前 言

电力电子技术是以电力为对象的电子技术,它的主要任务是对电能进行控制和变换。近 10 年来,由于微电子精细加工技术与电力电子高电压大电流技术的有机结合,诞生了多种新型电力电子自关断器件,出现了一批新型的电力电子电路和新的应用领域,从而使传统的电力电子技术跃入现代电力电子技术的新时代。

现代电力电子技术已成为信息产业和传统产业之间的重要接口,弱电与被控强电之间的桥梁。它不仅是机电一体化中的一项关键技术,而且也是在广泛应用领域内支持多项高新技术发展的基础技术。电力电子技术的最终发展将为大幅度节约电能、降低材料消耗、提高生产效率提供重要的手段。目前,电力电子技术已日益引起国内外学术界和产业部门的极大重视。

在我国介绍以普通晶闸管(即可控硅)为代表的传统电力电子技术的书籍已经出版不少,但是全面系统地介绍以各种自关断器件为代表的现代电力电子技术的书籍尚未见到。本书跟踪国内外电力电子技术的现代水平,总结了 80 年代以来的最新成果,从应用的角度比较全面地叙述了各种新器件、新电路的原理、特性以及设计方法。本书的问世将填补我国在这方面的空白。本书主要包括以下四部分内容:

1. 系统地介绍了各种现代电力电子器件的原理和特性。这些器件有:电力晶体管、功率场效应晶体管、可关断晶闸管、绝缘门极晶体管、MOS 晶闸管、静电感应晶体管、静电感应晶闸管以及功率集成电路等。此外,还讲述了快速恢复整流管和新型电流传感器等配套器件的原理、特性及应用参数。

2. 详细地阐述了各种器件的驱动电路、串并联缓冲电路、过电流保护电路以及串并联运行方法、冷却散热技术等。为了便于理解和应用各种器件的参数和特性,书中还列举了具体实例和详尽的计算方法。

3. 以新型器件为龙头,介绍了各种现代电力电子新型变换电路的原理和分析计算方法,如高频 DC-DC 斩波电路、DC-AC PWM 逆变电路以及零损耗开关谐振电路等。

4. 着重反映现代交流电机调速系统、各类开关电源装置以及不间断电源等方面的最新成果。本书的最后一章还介绍了电力电子电路的微机控制技术。

本书由天津大学张立副教授和山东工业大学赵永健副教授合作编著。其中第一、四、五、六、七、八、九、十二、十四章由张立执笔;第二、三、十、十一、十三、十五章由赵永健执笔。上海工业大学自动化系胡慎敏教授对本书初稿进行了审查。

在编写此书的过程中,得到国内外许多同仁的关怀和支持。日本东芝公司的今井孝二先生、北京市电子振兴办公室的王正元高级工程师、燕山大学的邬伟扬副教授、西安电力电子技术研究所的陈守良高级工程师等提供了有关参考资料,在此一并致谢。

由于作者水平所限,书中错误或不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

作者

1990 年 10 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 电力电子技术	1
1.2 全控型器件的分类	3
1.3 全控型器件的比较	8
1.4 新型交流电路	13
1.5 电力电子技术展望	15
第二章 电力晶体管	18
2.1 单管 GTR.....	19
2.2 达林顿 GTR 与 GTR 模块	27
2.3 二次击穿与安全工作区	30
2.4 基极驱动电路	32
2.5 基极驱动电路模块	37
第三章 功率场控晶体管	39
3.1 基本工作原理	39
3.2 静态特性与参数	42
3.3 动态特性与参数	46
3.4 安全工作区	51
3.5 栅极驱动电路	54
3.6 应用中的注意事项	59
第四章 可关断晶闸管	61
4.1 概述	61
4.2 基本原理	63
4.3 基本特性	66
4.4 主要参数	71
4.5 门极控制	77
第五章 绝缘门极晶体管及其他新型器件	87
5.1 概述	87
5.2 绝缘门极晶体管	89
5.3 静电感应晶体管	101
5.4 静电感应晶闸管	103
5.5 MOS 控制晶闸管	106
5.6 功率集成电路	109
第六章 散热技术	112

6.1	散热的重要性	112
6.2	散热原理	114
6.3	散热措施	117
6.4	功率损耗的计算	120
6.5	散热器的选配	126
第七章	开通与关断缓冲电路	132
7.1	缓冲电路概述	132
7.2	常用关断缓冲电路	134
7.3	常用开通缓冲电路	138
7.4	关断缓冲电路的能量回馈	141
7.5	开通缓冲电路的能量回馈	145
7.6	复合缓冲电路	147
7.7	缓冲电路的辅助器件	148
7.8	实用缓冲电路举例	150
第八章	过电流保护	153
8.1	概述	153
8.2	状态识别过电流保护法	156
8.3	桥臂互锁保护法	162
8.4	逆变器的过流保护	164
8.5	门极电路的过流保护	169
8.6	电流信号的检测	172
第九章	串并联运行	176
9.1	串联运行	176
9.2	并联运行	183
9.3	GTO 串并联运行的特点	186
9.4	GTR 并联运行的特点	190
9.5	功率 MOSFET 并联运行的特点	192
第十章	DC-DC 变换电路	197
10.1	DC-DC 变换电路及其控制	197
10.2	降压式变换电路	198
10.3	升压式变换电路	204
10.4	升降压式变换电路	207
10.5	库克 DC-DC 变换电路	210
10.6	全桥 DC-DC 变换电路	211
10.7	各种变换电路的比较	215
第十一章	DC-AC 逆变电路	216
11.1	脉宽调制 (PWM) 技术	216
11.2	单相逆变器	223
11.3	三相逆变器	229

11.4	过调制与方波开关	232
11.5	封锁时间对输出电压的影响	234
11.6	PWM 芯片的原理分析	236
第十二章	双零开关谐振电路	242
12.1	概述	242
12.2	基本谐振电路	245
12.3	负载谐振变换电路	249
12.4	谐振开关变换电路	259
12.5	零电压开关谐振直流环逆变电路	268
12.6	高频环整半周变换电路	269
第十三章	电源变换装置	271
13.1	开关电源	271
13.2	不停电电源	275
13.3	加热电源	286
第十四章	交流电机调速	295
14.1	概述	295
14.2	变频调速的原理及特性	297
14.3	变频电源	302
14.4	变频调速系统	313
第十五章	电力电子电路的微机控制技术	324
15.1	概述	324
15.2	PWM 波形的微机实现	332
15.3	电源设备中的微机技术	339
15.4	微机控制的交流电机调速系统	343
参考文献		347
附录 生产厂家及其产品介绍		349

越来越大,性能越来越好。截至 1980 年,传统的电力电子器件已由普通晶闸管衍生出了快速晶闸管、逆导晶闸管 (RCT)、双向晶闸管 (TRIAC)、不对称晶闸管 (ASCR) 等等,从而形成了一个 SCR 大家族。与此同时,各类 SCR 的电压、电流、 dv/dt 、 di/dt 等参数定额均有很大提高,开关特性也有很大改善。传统的电力电子器件已发展到相当成熟的地步。从理论上讲,这类器件在电压、电流两个方面仍有很大的发展自由度,但是实际上却存在着两个制约其继续发展的重要因素。一是控制功能上的欠缺,因为它通过门极只能控制开通而不能控制关断,所以称之为半控型器件。要想关断这种器件必须另加用电感、电容和辅助开关器件组成的强迫换流电路,这样将使整机体积增大、重量增加,效率降低;二是因它立足于分立元件结构,工作频率难以提高,一般情况下难以高于 400Hz,因而大大地限制了它的应用范围。由于上述两个原因,以半控型器件 SCR 为代表的传

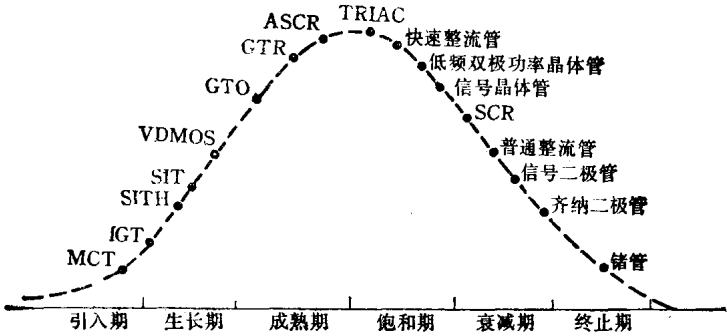


图 1.2 各器件寿命的周期曲线

统电力电子器件的发展已处于停滞状态。图 1.2 所示为各种电力电子器件在寿命周期曲线上的位置。由图可知 SCR, TRIAC, ASCR 等器件已处于成熟期、饱和期或接近衰减期的位置。与此相反,一代新型电力电子器件正在迅速发展。

以 SCR 为核心的变流电路沿用了过去水银整流器所用的相控整流电路及周波变换电路,在中大功率范围内的各种静止变流器和电动机的传动系统一直在使用这些电路。相控电路的主要功能是使交流变成直流,为此当年有整流或顺变时代之称。直流传动、机车牵引、电化电源即为当时应用方面的三大支柱。这些电路几乎使用了半个世纪,至今没有多大改进。由于这些电路的功率因数低、网侧及负载上的谐波严重,因此阻碍了它们的继续发展。

综上所述,由 SCR 及其变流电路组成的传统电力电子技术经过几十年的发展已处于停滞阶段,这就要求新的一代电力电子器件及其变换电路尽快取代旧的传统电力电子技术。

1.1.3 现代电力电子技术

80 年代以来,微电子技术 with 电力电子技术各自发展的基础上相结合而产生了一代高频化、全控型的功率集成器件,从而使电力电子技术由传统的电力电子技术跨入现代电力电子技术的新时代。

70 年代后期,可关断晶闸管 (GTO)、电力晶体管 (GTR) 及其模块相继实用化,在中大容量的变流装置中传统的 SCR 逐渐被这些新型器件取代。此后,各种高频化全控型

器件如雨后春笋般地不断问世,并得到迅速发展。这些器件有:功率场控晶体管(功率 MOSFET)、绝缘门极晶体管(IGT 或 IGBT)、静电感应晶体管(SIT)、静电感应晶闸管(SITH)、MOS 晶闸管(MCT)以及 MOS 晶体管(MGT)等,这些器件的产生和发展已形成了一个新型的全控型电力电子器件的大家族。由图 1.2 可以看出,在寿命周期曲线上这些器件正处于引入期或生长期,发展前景十分乐观。

新一代器件的问世,使得电力电子变换电路及其控制系统不断革新。例如,各种各样的脉宽调制(PWM)电路、零电流零电压开关谐振电路以及高频斩波电路等已成为现代电力电子技术的重要组成部分。这些新型电路的主要作用是使零频率的直流逆变成各种工作频率的交流,因此电力电子技术已由当年的顺变时代进入今天的逆变时代。与新型电路相适应的新一代交流电机调速装置、不间断电源以及其他电力电子装置随之相继出现。这些运行可靠的电力电子装置在机电一体化的载体上开始进入各个应用领域,电力电子技术已成为世界范围内的一项重要产业。

现代电力电子技术在器件、电路及其控制技术方面与传统电力电子技术相比有如下特点:

1) 集成化。几乎所有全控型器件都由许多单元胞管子并联而成,也即一个器件是由许多子器件所集成。例如一个 1000A 的 GTO 含有近千个单元 GTO,一个 40A 的功率 MOSFET 由上万个单元并联而成,一个 300A 的 SITH 含有 5 万个子器件。

2) 高频化。从高电压大电流的 GTO 到高频率多功能的 SIT,其工作频率已从数千赫到兆赫,这标志着电力电子技术已进入高频化时代。目前 GTO 的工作频率可达 1—2kHz,电力晶体管可达 2—5kHz,功率 MOSFET 可达数百千赫, SIT 则可达 10MHz 以上。

3) 全控化。电力电子器件实现全控化,也即自关断化是现代电力电子器件在功能上的重大突破。无论是双极型器件的 GTO, GTR, SITH 或单极型器件的功率 MOSFET, SIT 以及混合型器件 IGT, MGT, MCT 等都实现了全控化,从而避免了传统电力电子器件关断时所需要的强迫换流电路。

4) 电路弱电化、控制技术数字化。全控型器件的高频化促进了电力电子电路的弱电化。PWM 电路、谐振变换电路以及高频斩波电路这些本来用于弱电领域的电路而今又成为电力电子电路的主要形式。控制这些电路的技术也逐步数字化。

5) 多功能化。传统电力电子器件只有开关功能,多数用于整流运行。而现代电力电子器件的品种增多、功能扩大、使用范围拓宽,不但具有开关功能,有的器件还具有放大、调制、振荡及逻辑运算的功能,因而使电力电子器件多功能化。

1.2 全控型器件的分类

图 1.3 所示为电力半导体器件的“树”。可以看出,电力半导体器件可分为三大类型:双极型、单极型和混合型。除了晶闸管、RCT、ASCR 和 TRIAC 等器件之外,其余均为全控型器件。各种全控型器件的符号及等效电路见表 1.1。

表 1.1 各种全控型器件的符号及等效电路

类型 结构	双 极 型 器 件		单 极 型 器 件	
	晶体管	达林顿管	可关断晶闸管	静电感应晶闸管
名称	晶体管	Darlington	GTO	SITH
代号	GTR			功率 MOSFET
等效电路				

类型 结构	复 合 器 件 (BI-MOS)			
	绝缘门极晶体管	MOS晶闸管	达林顿式	MOS晶体管 (MGT)
名称	IGT	MCT	达林顿式	串联式
代号				混合式
等效电路				

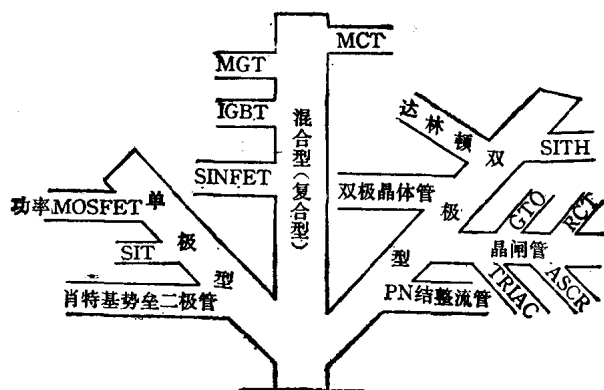


图 1.3 电力半导体器件“树”

1.2.1 双极型器件

所谓双极型器件是指器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的半导体器件。常见的如 GTO, GTR 和 SITH。这类器件通态压降低、阻断电压高、电流容量大,其中 GTO, GTR 频率较低, SITH 频率较高。这些器件适用于中大容量的变流设备。以上三种双极型器件分别简介如下:

1. 可关断晶闸管 (Gate Turn-Off Thyristor, 简称 GTO)

GTO 是高电压大电流双极型全控型器件。早在 1961 年美国就已开始研制 GTO, 经过 20 年的发展, 在 80 年代初日本又将大容量 GTO 推向实用化阶段。目前 GTO 的最大容量为 5000V/4500A, 9000V/1000A, 工作频率一般为 1—2kHz。

与传统的晶闸管相比, GTO 的工作频率较高且具有自关断能力, 省去了强迫换流电路, 所以整机体积减小, 重量减轻, 效率提高, 可靠性增加。在 200kW 以上的大容量变流设备中 GTO 发挥了其高电压大电流的优势, 在机车牵引传动、交流电机调速、不停电电源和直流斩波调速等领域被广泛应用。

GTO 的主要缺点有两个: 一是关断增益较小, 门极反向关断电流较大; 二是为限制 dv/dt 及关断损耗需设置专门的缓冲电路, 这部分电路消耗一定能量, 而且需要快速恢复二极管、无感电阻、无感电容等器件。为了改进器件性能又研制了多种型式的 GTO。目前已有如下品种: 逆阻 GTO、逆导 GTO、无反压 GTO (阳极短路结构)、掩埋门极 GTO、放大门极 GTO、MOS-GTO 等。GTO 是四层器件, 在电压和电流两个方面都有充分发展的余地, 所以在高电压大电流领域 GTO 将取代传统的晶闸管。

2. 电力晶体管 (也称巨型晶体管, Giant Transistor, 简称 GTR)

GTR 是三层结构的双极型全控型器件, 它具有控制方便, 开关时间短, 高频特性好, 通态压降较低等优点, 近十几年来已得到迅速的发展。目前 GTR 的容量已达 400A/1200V, 工作频率可达 5kHz。在 500kW 以下的变流装置中 GTR 的竞争力极强, 甚至有 GTR 化的趋向。

GTR 经历了双极晶体管 (BJT)、达林顿管和 GTR 模块等发展阶段。GTR 模块是将 GTR 管芯、续流二极管管芯以及辅助元件组装成一个功能单元, 然后根据不同用途将几个单元组装在塑料树脂外壳内。目前生产的 GTR 已基本模块化。

由于 GTR 的结构所限, 因此电压难以超过 1500V, 在更高电压下运行难以与 GTO 匹敌, 此外, 由于存在二次击穿问题, 因此 GTR 的进一步发展受到了限制。

3. 静电感应晶闸管 (Static Induction Thyristor, 简称 SITH)

SITH 也称作场控晶闸管, 它属于双极型半控型器件, 是近几年逐步趋向成熟的器件。它是一种在栅极上加反向偏压即成为阻断状态, 除去反向偏压即成为导通状态的常开器件, 其阻断特性取决于栅极电压与阳极电压的静电感应作用。

这种用栅极控制开通和关断的器件, 在导通期间不发生载流子再生作用, 因而可使工作温度高、动态特性均匀、导通电阻小、正向压降低、开关速度快、开关损耗低、 di/dt 及 dv/dt 耐量大。这种器件还具有晶闸管的电流浪涌能力和耐压水平。SITH 是目前开发的开关速度最快的晶闸管, 它的应用范围很宽, 在交直流调速系统、高频加热装置和开关电源等领域均会有广泛的应用。SITH 的工艺比较复杂, 因此更广泛的实用化仍需要一段时间。

1.2.2 单极型器件

所谓单极型器件是指器件内只有一种载流子, 即只有多数载流子参与导电的半导体功率器件。目前成为商品的有功率场控晶体管和静电感应晶体管两种器件。

1. 功率场控晶体管 (Power MOSFET)

功率场控晶体管也称为功率 MOSFET。近年来功率 MOSFET 发展很快, 已成为电力电子器件的后起之秀。它由多数载流子导电, 无少子存储效应, 因而开关时间短, 一般为纳秒数量级, 典型值为 20ns, 工作频率可达 500kHz 以上。功率 MOSFET 的栅源之间被一层 SiO_2 所隔离, 其输入阻抗大于 40M Ω 。功率 MOSFET 属于电压控制型元件, 控制较为方便。这种器件的电流具有负的温度系数, 因而使器件有良好的电流自动调节能力, 不易产生局部热点, 所以二次击穿的可能性极小。这一点与双极型 GTR 有根本不同。此外, 功率 MOSFET 还有热稳定性好、抗干扰能力强等优点。

略为不足的是功率 MOSFET 导通压降高, 而且随着器件电压和温度的升高导通压降也增加。功率 MOSFET 适用于高频工作, 因为它开关损耗极小, 故可补偿导通压降高的缺点。

目前功率 MOSFET 大致有 N 沟道和 P 沟道两大类产品, 耐压可达 1000V, 电流为 200A, 开关时间仅为 1.3ns。在小容量的机器人传动装置、荧光灯镇流器及各类开关电路中应用极为广泛。

2. 静电感应晶体管 (Static Induction Transistor, 简称 SIT)

SIT 从 70 年代开始研制, 近几年发展很快, 目前已形成一个小家族。

SIT 也是一种多子器件, 它为三层结构, 不仅可工作在开关状态, 也可工作在放大状

态.这是一种非饱和输出特性的器件,具有输出功率大、失真小、输入阻抗高、开关特性好、抗辐射能力强等优点. 现已商品化的 SIT 截止频率可达 30—50MHz, 耗散功率可达几千瓦,电流达 200A, 电压达 1500V.

SIT 适用于高音质音频放大器、大功率中频广播发射机、长波电台、电视发射机、差转机以及空间技术等领域.

1.2.3 混合型器件

混合型器件也可称作复合型器件或双极-MOS 器件 (BI-MOS).

所谓混合型器件是指双极型和单极型器件的集成混合. 它是用 GTR, GTO 以及 SCR 作为主导元件, 用 MOSFET 作为控制元件混合集成之后产生的 BI-MOS 器件. 这种器件既具有 GTR, GTO, SCR 等双极型器件电流密度高、导通压降低的优点, 又具有 MOSFET 等单极型器件输入阻抗高、响应速度快的优点. 因此, 这种新型混合器件已引起人们的高度重视. 目前已开发的混合型器件有: 肖特基注入 MOS 门极晶体管 (SINFET)、绝缘门极双极晶体管 (IGT 或 IGBT)、MOS 门极晶体管 (MGT)、MOS 晶闸管 (MCT 或 MCTH) 以及功率集成电路 (PIC), 具体如图 1.3 电力电子器件树所示. 现就其中发展较快的器件简介如下:

1. MOS 门极晶体管 (MOS Gate Transistor, 简称 MGT)

MOSFET 技术与 GTR 技术的结合产生了 MOS 门极晶体管. 目前人们所研究的等效结构形式有多种多样, 就其基本形式可分为四种: 达林顿式、并联式、串联式及串并联混合式. 具体如表 1.1 所示.

图 1.4 所示为各种 BI-MOS 晶体管最大电流密度与工作频率的特性曲线. 由图可知, 并联 BI-MOS 的电流密度较高, 串联 BI-MOS 的开关频率较高, 串并联 BI-MOS 兼有两者优点, 因此具有最佳性能.

2. 绝缘门极晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, 简称 IGBT 或 IGT)

IGBT 是发展最快而且很有前途的一种混合型器件, 1982 年开始研制, 1986 年投产. 因为它的等效结构具有晶体管的模式, 所以称为绝缘门极晶体管; 又因为类似的产品还具有寄生晶闸管结构, 所以也有人称为绝缘门极晶闸管, 就其实质这类器件会日趋融合, 名称会统一命名.

目前, 在美国、日本等国家 IGBT 的产品已系列化, 电流容量为 10—400A, 电压等级为 500—1400V, 其最大电流容量为 1000A, 最高电压等级为 1200V, 工作频率在声频以上. 据美国预测, 在电机控制、50kHz 以上的中频电源、各种开关电源以及其他要求高速度、低损耗的领域, IGBT 有取代 GTR 和 MOSFET 的趋向.

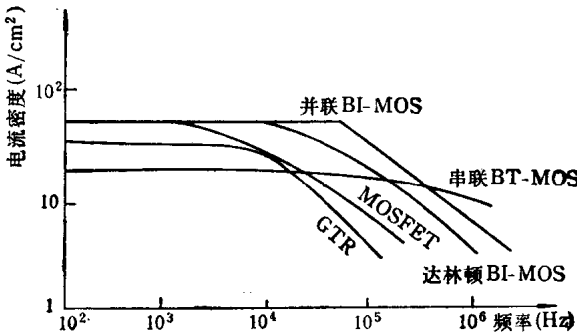


图 1.4 各种 BI-MOS 晶体管的特性比较

3. MOS 晶闸管 (MOS-Controlled Thyristor 简称 MCT 或 MCTH)

MCT 是晶闸管和 MOSFET 相结合的产物,它的主导元件是 SCR, 而控制元件为 MOSFET. MCT 具有高电压、大电流、低通态压降、高电流密度、高输入阻抗、低驱动功率和高开关速度等优点.它是一种很理想的电力电子开关器件.它的出现虽不及当年微处理器那么重要,但是对大功率开关器件来说是一项重要突破.有人预测,和 30 年前 SCR 诞生后迅速取代汞弧整流器和闸流管一样, MCT 的发展可能使 GTR、SCR 及其派生器件被淘汰,并使 IGBT 和 MOSFET 限制在 200V 以下和要求极高速开关的领域.由此可见,在当前电力半导体器件中 MCT 是被评价最高的一种混合器件.

目前在美国 MCT 的产品正开始系列化,其电压等级为 500—1000V, 电流容量为 50—100A.

与 MOS 晶闸管相类似的混合器件还有 MOS-GTO, 它是以 GTO 作为主导元件, MOSFET 作为控制元件的混合集成器件. MOS-GTO 比传统 GTO 具有更好的控制性能和工作特性,因而也是倍受关注的一种混合器件.未来发展的结果, MOS 晶闸管和 MOS-GTO 可能统称为 MCT 器件.

4. 功率集成电路 (Power Integrated Circuit, 简称 PIC)

近几年功率集成电路的发展使电力电子技术迈向更高的层次.所谓功率集成电路是指功率器件与驱动电路、控制电路以及保护电路的集成,它包含着至少一个功率器件和一个独立功能电路的单片集成,这与 GTR、GTO 等单元器件集成有根本的区别.目前 PIC 被分为两大类:一类是高压集成电路 (HVIC),它是横向高耐压器件与控制电路的单片集成;另一类是所谓智能功率集成电路 (SPIC),它是纵向功率集成器件与控制电路、保护电路以及传感电路的多功能集成.就其本质来说, PIC 由两部分组成,一是功率器件,二是控制电路.功率器件有的是双极晶体管,有的是 MOSFET,还有的是 Bi-MOS 晶体管;控制电路多数采用 MOSFET.由此可知,功率集成电路实质上也是 Bi-MOS 混合集成器件.目前主要着眼于中小功率的应用,工作电压和工作电流分别在 50—1000V, 1—100A 之间,实际传送功率可达数千瓦.

功率集成电路使器件与电路集成,强电与弱电相结合,动力与信息统一,使其成为机和电的关键接口和机电一体化的基础部件.因此有人预料, PIC 的发展和应用将使电力电子技术进入智能化时代并实现第二次电子革命.

1.3 全控型器件的比较

全控型器件虽然品种繁多,但目前已产业化的器件则只有 GTO、GTR、功率 MOSFET 和 IGBT. 为此本节着重对以上几种器件的特性和应用范围作一简略比较.

1.3.1 参数与特性的比较

全控型器件的主要性能指标为 电压、电流和工作频率三个参数.通过对这三项参

数的比较即可明白每种器件的应用范围。实践证明各种器件以自己的某种优势占领一定范围的应用领域，但与其他器件会有竞争，因此用户可有更多的选择，但是各自发展的结果，每种器件都有自己的局限性，所以应用范围受到限制。最终各种器件在竞争的基础上形成互相补充的局面。

1. 单管的输出功率

图 1.5 所示为逆变器每臂用一个器件的输出功率与工作频率的关系曲线。由图可知，传统的 SCR 输出功率最大，但工作频率最低。GTO 目前输出功率稍低于 SCR，可是工作频率远高于 SCR，在大容量高电压领域 GTO 是 SCR 的有力对手，其他自关断器件也难以与 GTO 匹敌。在目前开发的高电压大容量新产品中，几乎没有使用 SCR 逆变器的。

GTR 的容量范围介于 GTO 和功率 MOSFET 之间，GTR 的控制比 GTO 更方便，加之 GTR 的工作频率较高，因而凡是能用 GTR 解决问题的领域尽量避免使用 GTO。GTR 适用于 380V 电网、500kW 的容量范围内，如果电网电压达 600V 以上，则由于 GTR 耐压所限而难以发挥作用。但是对 GTO 来说，它的电压和容量在上述使用范围内则有很大余地。

由于功率 MOSFET 可工作在甚高频下，用其高频化的逆变器、斩波器，其体积重量大大减少，变流性能大大提高。目前在 10kW 以下的逆变器中功率 MOSFET 受到青睐。IGBT 的目前容量介于 GTR 和功率 MOSFET 之间，它的应用范围正在逐步扩展。至于 MCT, SITH 以及 SIT 等器件虽已有试制产品，但尚未进入工业实用化阶段，在这里不作详细比较。

2. 电流与电压的等级

几种全控型器件的电压与电流等级的比较曲线如图 1.6 所示。由图可知，四层结构的 GTO, SITH 属于高电压大电流器件，三层结构的 GTR, IGT 和功率 MOSFET 的电压、电流容量不及四层结构。GTO, SITH 在电压和电流两个方面仍有发展余地，至少在理论上是有发展自由度的。GTR 的电流仍可增大，但电压难以高出 1500V。由于功率 MOSFET 的导通电阻随着电压的升高而增大，因此其耐压的提高也是有困难的。从发展前途来看，IGT 的电压电流容量可高于 GTR 的容量，因此它是很有前途的一种新型器件。

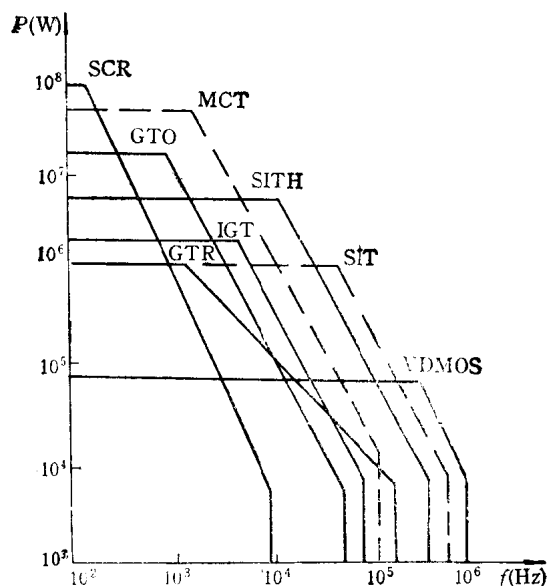


图 1.5 单个器件输出功率与工作频率的关系曲线

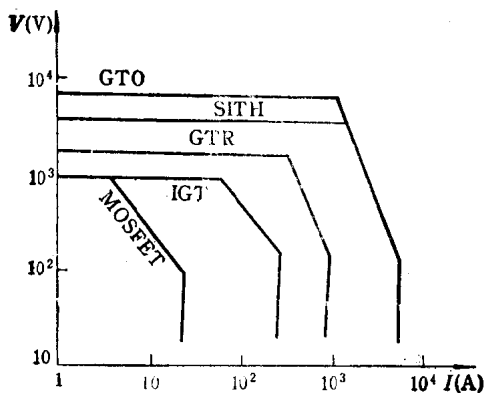


图 1.6 各器件电压电流的比较

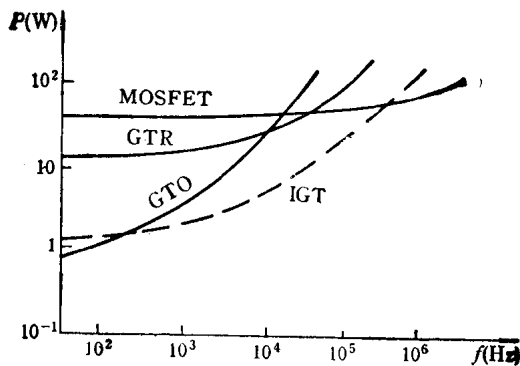


图 1.7 器件功率损耗与工作频率的关系曲线

3. 功率损耗

图 1.7 给出 1000V 级器件功率损耗与工作频率的关系曲线。由图可知，功率 MOSFET 的功率损耗最大，这是由于导通电阻大所导致的，但是它的功耗随着频率的增加其幅度变化很小，说明功率 MOSFET 的开关损耗很小。可见功率 MOSFET 最适用于高频领域工作。GTO、GTR 和 IGT 虽然低频时管压降低、功耗小，但是随着工作频率的增加其开关损耗急速上升，于是，由于功耗的局限，GTO、GTR 和 IGT 的工作频率不可能超过功率 MOSFET。

根据上述各特性的比较，有人对几种器件的未来发展给以预测。图 1.8 为千伏级器件的预测结果，图中显示了随着年代的推移，各器件电流容量增加的速度。由图可知这几种器件今后都会有所发展，但增长速度不同，近期内达到的电流容量也不同。图中 IGT 是未来发展最快的一种混合型自关断器件。各种全控型电力电子器件的性能比较见表 1.2。

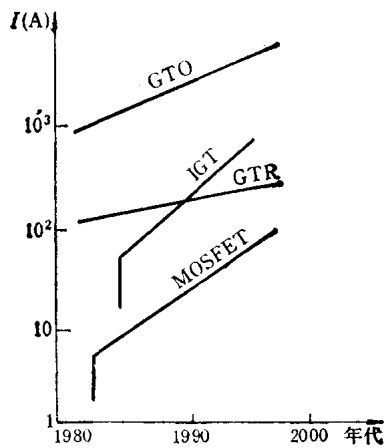


图 1.8 千伏级器件预测曲线

1.3.2 应用范围的比较

电力电子技术应用于从发电厂设备至家用电器中的所有电气工程领域。例如，发电厂的储能发电设备、直流输电系统、动态无功补偿、机车牵引、各类电机传动、不停电电源、汽车电子化、开关电源、中高频感应加热设备以及电视、通讯、办公自动化设备等等。在这些应用中，容量最大者可达 1GW，而最小者只有数瓦；工作频率最低者为 50Hz，最高者可达 100MHz。电力电子技术在各个应用领域中功率和频率的覆盖曲线如图 1.9 所示。由图可知，应用领域不同所需的功率容量和工作频率也不同，与此相应所需的电力电子器件也不同。除了直流输电、特大容量电机的传动装置外，其他各个应用领域都被全控型器件所占领，而各种全控型器件又有自己的不同适用范围。

全控型器件的应用领域大体可以划分为两种类型：一是用量很大的各类电动机的传