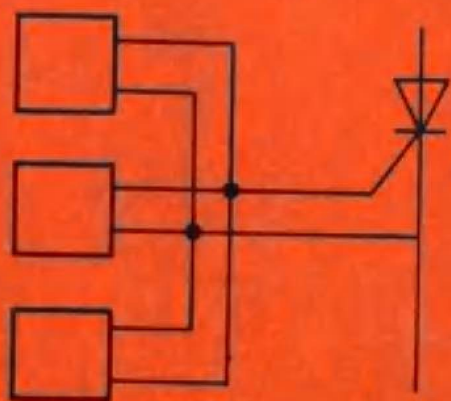


林渭勋 等编著



电力电子技术 基础

机械工业出版社

本书介绍普通晶闸管、双极型功率晶体管、门极可关断晶闸管和功率场效应晶体管的主要性能以及由这些器件组成的整流电路、逆变电路、交流变换电路和直流变换电路的工作原理。

本书可供从事变流技术工作的工程技术人员参考，也可作为高等院校有关专业师生的参考书。

电力电子技术基础

林渭勋 等编著

*

责任编辑：严蕊琪 版式设计：霍永明

封面设计：郭景云 责任校对：熊天荣

责任印制：王国光

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₁₆·印张 23¹/₂·字数 574 千字

1990 年 10 月北京第一版·1990 年 12 月北京第一次印刷

印数 0,001—3,200·定价：14.70 元

*

ISBN 7-111-01977-6/TN·40

前 言

电力电子技术是一种应用大功率半导体器件实现对工业电能的变换和控制的技术。利用这种技术制作的各种电源装置具有优越的技术经济指标，因而在各个技术领域中逐步取代了传统的旋转式变流器，是一门发展迅速、方兴未艾的技术。

电力电子技术包括器件、电路、控制和装置等内容，而器件、电路和控制是整个技术的基础。本书以反映这一技术基础为主要内容。

从控制性能的角度出发，所有的半导体电力器件可以分为半控型和全控型两大类，前者以晶闸管为代表；后者以功率晶体管、门极可关断晶闸管和功率场效应晶体管为代表。由于全控型器件具有比半控型器件更为优越的技术性能，近年来发展很快。由这些器件组装的电路和装置正逐渐在中小容量范围内取代晶闸管装置，成为新一代的变流装置。但由于技术的迅猛发展，有关这方面的资料，目前尚散见于各种会议文集和期刊，还没有较全面和系统的书籍。有鉴于此，本书将较系统地介绍上述两类器件及其电路，并以全控型电路为重点。

本书共分八章，由两个单元组成：第一单元包含第一至第四章，依次阐述电路运行条件对上述四种主要器件性能的影响，目的是为了合理选用器件，并使其在实际装置中发挥最大效能；第二单元包含第五至第八章，依次介绍直流变换电路、逆变电路、交流变换电路和整流电路的工作原理。

本书第七章交流变换电路由应建平同志编写，第八章整流电路由张仲超同志编写，其余内容由林渭勋同志编写，并负责统稿。本书初稿承浙江大学汪撝生教授审阅并提出许多宝贵意见，谨致衷心谢意；本书编写时曾参阅国内各兄弟单位和个人撰写的教材、专著和文献；邢建、潘岚、章进生和郑春龙等同志参加本书初稿的整理工作，在此顺致谢意。

由于作者水平所限，书中内容如有不当之处，请读者批评指正。

作者

目 录

绪论	1	一、基极驱动电路的分类	62
一、电力电子技术的基本内容	1	二、期望的基极电流波形	63
二、电力电子技术的现状	5	三、恒流式驱动电路	64
三、电力电子技术的发展趋势	9	四、比例式(恒饱和度)驱动电路	66
参考文献	12	参考文献	68
第一章 电路运行条件对功率晶体管性能的影响	13	第二章 电路运行条件对晶闸管性能的影响	70
第一节 运行条件对功率晶体管安全工作区的影响	13	第一节 电路运行条件对晶闸管阻断能力的影响	71
一、安全工作区的分类	13	一、主电压 U_T 对晶闸管阻断能力的影响	71
二、正偏安全工作区	14	二、结温 T_j 对晶闸管阻断能力的影响	72
三、运行条件对功率晶体管安全工作区的影响	21	三、门极电流 I_g 对晶闸管阻断能力的影响	72
四、反偏安全工作区和短路安全工作区	25	四、电压上升率 du/dt 对晶闸管阻断能力的影响	73
第二节 运行条件对功率晶体管开关过程的影响	28	第二节 电路运行条件对晶闸管开通性能的影响	73
一、纯阻负载下功率晶体管的开关过程	29	一、表征晶闸管开通性能的几项参数	73
二、纯阻负载下的开关损耗	32	二、开通性能参数的测量条件	75
三、电路运行条件对纯阻负载下开关时间的影响	33	三、电路运行条件对 t_{gt} 的影响	76
四、感性负载下功率晶体管的开关过程	34	四、电路运行条件对 di/dt 耐量的影响	76
第三节 缓冲电路	39	第三节 电路运行条件对晶闸管关断速度的影响	78
一、缓冲电路的分类	39	一、晶闸管的关断过程	78
二、有能耗缓冲电路的基本形式	40	二、关断时间 t_q 的测量条件	79
三、基本假定及功率晶体管开关模型	40	三、电路运行条件对关断时间的影响	80
四、关断期的换流过程分析	41	四、关断方式	82
五、开通期的换流过程分析	44	第四节 电路运行条件对晶闸管载流能力的影响	88
六、开关损耗计算	45	一、工频稳态下晶闸管的载流能力	88
七、基本缓冲电路的参数选择	49	二、工频稳态下额定电流 I_{TAV} 的测试条件	89
八、有能耗缓冲电路的其它形式	50	三、电路运行条件对 I_{TAV} 的影响	90
九、无损耗缓冲电路	52	四、工频瞬态下的载流能力	91
十、无缓冲技术	57	五、高频工况下的载流能力	91
第四节 电路运行条件对快速二极管性能的影响	58	六、运行条件对高频载流能力的影响	92
一、二极管在交流电路中的工作特点	58		
二、对二极管性能的要求	61		
第五节 功率晶体管基极驱动电路	61		

第五节 晶闸管缓冲电路	95	第四章 电路运行条件对功率场效应晶	
一、开通缓冲电路	95	体管性能的影响	140
二、关断缓冲电路	95	第一节 功率场效应晶体管的主要特性	140
第六节 晶闸管的门极驱动电路	100	一、基本结构和分类	140
一、对门极触发脉冲的要求	100	二、工作原理	142
二、驱动电路的分类和基本结构	101	三、正向输出特性	142
三、驱动电路实例	102	四、饱和区的电流转移特性	144
参考文献	105	五、反向输出特性	145
第三章 电路运行条件对门极可关断晶		第二节 电路运行条件对导通电阻 R_{on} 的	
闸管性能的影响	106	影响	147
第一节 逆阻型门极可关断晶闸管的主要		一、导通电阻 R_{on} 的构成	147
性能参数	106	二、导通电阻 R_{on} 的测量条件	147
一、通态电流	106	三、电路运行条件对导通电阻 R_{on} 的	
二、阻断电压	107	影响	147
三、关断特性	107	第三节 电路运行条件对功率场效应晶体	
四、安全工作区	108	管安全工作区的影响	150
第二节 门极可关断晶闸管的缓冲电路	108	一、直流正偏安全工作区	150
一、设置缓冲电路的目的	108	二、功率场效应晶体管和功率晶闸管的	
二、缓冲电路的基本形式	109	直流正偏安全工作区的比较	152
三、基本假定和门极可关断晶闸管开关		三、电路运行条件对功率场效应晶体管	
模型	109	安全工作区的影响	152
四、关断换流过程分析	110	第四节 电路运行条件对功率场效应晶体	
五、开通换流过程分析	112	管直流跨导的影响	154
六、开关损耗计算	113	一、工作状态和跨导的分类	154
七、门极可关断晶闸管的安全工作区	115	二、跨导的测量条件	156
八、缓冲电路参数选择	117	三、电路运行条件对直流跨导 G_m 的	
第三节 门极可关断晶闸管的门极驱动		影响	156
电路	123	第五节 电路运行条件对功率场效应晶体	
一、理想门极信号	123	管开关过程的影响	158
二、驱动电路基本结构及分类	129	一、功率场效应晶体管的等效电路	158
三、驱动电路示例	129	二、纯阻负载下功率场效应晶体管的开	
第四节 电路运行条件对最大门极可关断		关过程分析	159
电流 I_{AT0} 的影响	135	三、感性负载下功率场效应晶体管的开	
一、 I_{AT0} 的测试条件	135	关过程分析	161
二、电压上升率对 I_{AT0} 的影响	136	第六节 功率场效应晶体管的并联应用	170
三、工作频率 f 对 I_{AT0} 的影响	136	一、导致功率场效应晶体管并联时电流	
四、缓冲电路参数对 I_{AT0} 的影响	136	不均的原因	170
五、反向门极电流峰值 I_{g2} 对 I_{AT0} 的		二、静态电流不均分析	171
影响	137	三、动态电流不均分析	172
六、直流控制电源电压 E_c 对 I_{AT0} 的		四、并联运用中的寄生振荡及其抑制	175
影响	137	第七节 功率场效应晶体管的栅极驱动	
参考文献	138	电路	175

一、主电路的基本组态	175	三、单极性全桥电路 (同频方式)	225
二、对栅极驱动电路的共同要求与脉冲 参数	175	四、倍频式单极性全桥电路	227
三、共源电路的驱动电路	177	第八节 四象限丘克电路	232
四、共漏电路的驱动电路	177	一、工作原理	232
五、转换开关电路的驱动电路	177	二、丘克电路的实际形式	233
参考文献	179	参考文献	233
第五章 直流变换电路	181	第六章 逆变电路	235
第一节 概述	181	第一节 概述	235
一、直流变换电路的分类	181	一、工业特殊交流电源的分类	235
二、直流电压变换电路的基本用途和 要求	182	二、逆变电路的基本用途	236
第二节 单象限降压型电路	183	三、逆变电路的基本结构和分类	237
一、理想条件下的电路工况	183	第二节 电压型单相桥式逆变电路	238
二、电流断续时的工况	186	一、基本假定	238
三、考虑电感 L_0 的直流内阻 r_L 时的 工况	187	二、半桥逆变电路	238
四、考虑开关器件损耗时的工况	188	三、全桥逆变电路	243
五、考虑输出滤波电容 C_0 为有限值时的 工况	188	第三节 电压型单相桥式电路输出电压的 调节	249
六、考虑电源内阻 r_1 时的工作情况	188	一、逆变电路输出端调压方式分类	249
七、降压型电路的应用示例	189	二、相控整流调压方式	249
第三节 单象限升压型直流变换电路	195	三、直流斩波调压方式	249
一、理想条件下的电路工况	195	四、桥间移相调压方式	251
二、电流断续时的工况	196	五、桥内移相调压方式	253
三、考虑电感内阻 r_L 时的工况	197	六、双极性正弦波脉宽调制调压方式	255
第四节 单象限升/降压型直流变换电路	198	七、单极性正弦波脉宽调制调压方式	262
一、理想条件下的工况	198	八、脉宽调制调压性能分析	265
二、电流断续时的工况	200	九、单相脉宽调制桥式逆变电路应用 实例	266
三、考虑电感内阻 r_L 时的情况分析	201	第四节 电压型三相桥式逆变电路	269
第五节 单象限丘克电路	202	一、控制极脉宽 $\theta_g = \pi$, 纯阻负载时工 作情况分析	269
一、级联式升/降压变换电路	202	二、 $\theta_g = \pi$, $\phi < \pi/3$ 感性负载时电路 工作情况分析	273
二、丘克电路	202	三、 $\theta_g = \pi$, $\phi > \pi/3$ 感性负载时电路 工作情况分析	277
第六节 双象限直流电压变换电路	209	四、 $\theta_g = \pi$ 电动机负载时的工作情况	277
一、双象限电路的分类	209	五、 $\theta_g = 2\pi/3$ 纯阻负载时的工作情况	282
二、输出平均电流极性为可变的直流 变换电路	210	六、 $\theta_g = 2\pi/3$ 感性负载时的工作情况	285
三、输出平均电压极性为可变的直流变 换电路	218	七、 $\theta_g = 2\pi/3$ 电动机负载下的工作 情况	286
第七节 四象限桥式直流变换电路	221	第五节 三相电压型逆变电路输出电压的 调节	286
一、四象限桥式直流变换电路的分类	221	一、采用正弦波脉宽调制调压方式的三	
二、双极性全桥电路	223		

相半桥逆变电路	287
二、正弦波调制信号的产生	289
三、采用三相全桥结构的调压方式	292
第六节 逆变输出电压波形的改善	293
一、输出电压谐波含量对电源性能的影响	293
二、改善输出电压波形的主要技术措施	295
三、采用附加输出滤波器以改善输出电压波形	296
四、逆变电路采用多重化结构	299
五、采用脉宽调制控制方式	301
六、采用新的主电路结构	315
第七节 三相电压型逆变电路应用实例	316
一、270kVA 门极可关断晶闸管交流调速电源	316
二、采用大规模专用集成电路以实现正弦波脉宽调制控制	318
参考文献	321
第七章 交流变换电路	323
第一节 概述	323
第二节 理想条件下斩控式单相交流调压电路的工作情况	324
一、输出电压谐波含量及电压增益	324
二、输入电流 i_s 和输出电流 i_o	325
三、RL 负载下 i_s 和 i_o 的频谱	326
四、电源功率因数 λ_o	327
第二节 有关单相交流调压器几个具体问题的讨论	329
一、双向功率开关及其缓冲电路	329
二、载波频率的选择和滤波后的输出电流	331
三、交流调压电路的非互补控制方式	332
第三节 斩控式三相交流调压电路	333
一、互补控制式三相调压电路	333
二、非互补控制式三相调压电路	334
第四节 调压调相和直接变频电路	336
一、调压调相电路	336
二、直接变频电路	337
参考文献	339
第八章 整流电路	340
第一节 概述	340
一、整流电路的分类	340
二、传统相控式低频整流电路的优缺点	341
三、整流电路的理想状态	345
第二节 电压型单相斩控式整流电路	345
一、理想模型	345
二、模型电路分析	346
三、电压型单相斩控式整流电路	349
第三节 电流型单相斩控式整流电路	359
一、理想模型	359
二、模型电路分析	360
三、电流型单相斩控式整流电路	362
四、由晶闸管组成的电流型斩控式整流电路	362
第四节 斩控式三相整流电路	366
参考文献	366

绪 论

一、电力电子技术的基本内容

电力电子学是 Power Electronics 的中译名，在工程应用中常称之为电力电子技术，关于这一学科的定义，曾有过一些提法，但不很一致。作者认为：电力电子学是应用于电力技术领域中的电子学；它以利用大功率电子器件对能量进行变换和控制为主要内容；它是一门与电子、控制和电力紧密相关的边缘学科。这一定义的第一部分强调电力电子学是应用电子学的一门分支；第二部分则表明电力电子学的主要内容是能量（目前阶段是电能）的变换和控制，因而属于强电范围；最后一部分强调它是一门边缘学科，与上述三门学科紧密相关。

随着技术的进步，应用电子学已发展为内容十分丰富的学科。但从处理电能功率等级高低的角度出发，可以分为信息电子学和电力电子学两大分支。从发展历史看，前者进入生产和生活领域的时间较早，因而已广为人知；后者则相对晚一些，是一门更为年青的学科。

必须指出，上述应用电子学的两大分支既有区别，又有联系。例如为了对工业电能进行控制，电力电子装置自然要采用微电子技术作为控制手段，但由于它是对大功率电能进行变换，装置效率是一项重要的力能指标，提高效率是电力电子学的研究内容之一，而这显然又有别于信息电子学等等。

对工业电能进行变换和控制的传统形式是利用旋转式变流器，图 0-1 a 所示的直流调速系统就是一个典型例子。它通过直流发电机组实现由交流电能到直流电能的变换（包括电-机和机-电两次转换），而改变发电机磁场便可调节直流电机 M_D 的电枢电压，从而实现其转速 n_d 的连续调节，也即实现对直流电能的控制。这种变流器存在效率低、噪声高、投资大和维护困难等缺点。

图 0-1 b 是一种静止式变流器，它与图 0-1 a 的区别仅在于用可控整流器 U 取代发电机组。它是一种由电力电子器件组成的变流器，同样具有由交流电能到直

流电能变换和控制的功能。它是一种静止式的单次变换，并采用电子控制，因而能克服旋转式变流器的上述缺点，其技术经济指标更为优越（图 0-2 示出两种变流器的效率曲线），因

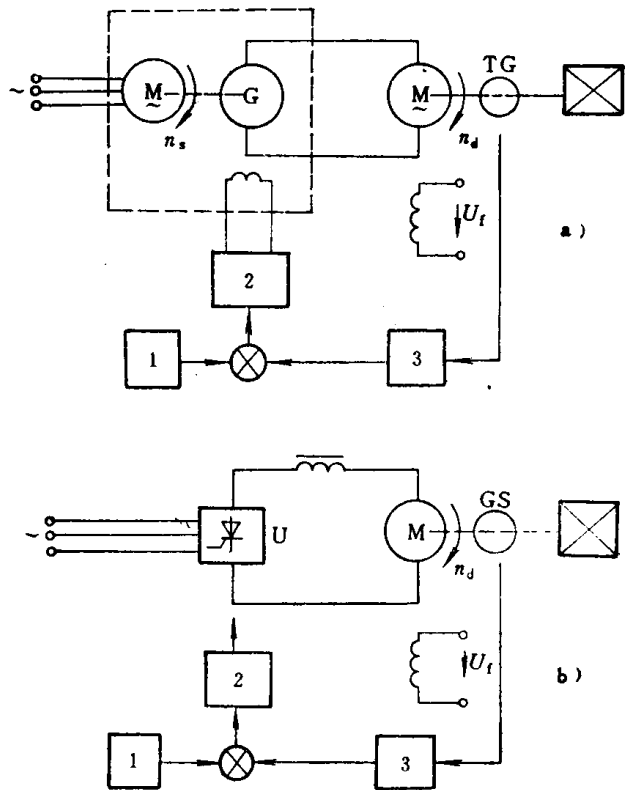


图0-1 变流器结构
a) 旋转式变流器 b) 静止式变流器
1—给定信号 2—控制电路 3—反馈电路
GS—调速发电机

而得到更为广泛的应用。

作为一门学科应有明确的内容，电力电子学包含以下几个部分，即电力电子器件、电力电子电路和电力电子装置及系统。

(一) 电力电子器件

即使在旋转式变流器中也有电子器件存在，不过当时由于这些器件的功率等级低，只能在电路中用于信息的变换和处理。可以说，电力电子技术正是由于电力电子器件的出现和发展而诞生的。从50年代迄今电力电子器件已经历了几代发展，其种类繁多，但根据器件功能可分为一次能量变换器件和二次能量变换器件两大类。前者实现由自然能到电能间的变换，如太阳能电池等；后者则仅实现电能间的变换，但它是目前电力电子器件的主流。根据这些器件的开关控制特性可划分为以下三类：

1. 不控型器件：指无控制端口的二端器件，如电力二极管。由于无控制端口，不具备可控开关性能；

2. 半控型器件：指有控制端口的三端器件，但其控制端在器件导通后即失去控制作用，故无自关断能力，为了关断这类器件必须借助外部条件。晶闸管（商用名称为SCR）及其大部分派生器件属这一类；

3. 全控型器件：指有控制端口的三端器件，但其控制端同时具有控制器件开关的能力，故称自关断器件。显然这是一种性能更为优越的器件，目前主要的有可关断晶闸管(GTO)、双极型功率晶体管(GTR)和大功率场效应晶体管(MOSFET)等。

大功率光电子器件能实现太阳能到电能间的变换，是当今一次能量变换器件的代表。它的出现意味着一种新型能源的诞生，并将使电力电子器件的作用从电能的变换延伸到自然能到电能间的变换，使电力电子学的领域更进一步扩大。

(二) 电力电子电路

对千变万化的各种电力电子电路，如果从实现电能变换功能的角度出发就只有以下四种：

1. 整流电路：由交流电能到直流电能的变换称为整流（或称AC/DC变换），凡能实现这一变换的电路泛称为整流电路；

2. 逆变电路：由直流到交流电的变换称为逆变（或称DC/AC变换），凡能实现这一变换的电路称为逆变电路；

3. 直流变换电路：能将一种直流电压（电流）幅值和极性加以改变的电路（或称DC/DC变换）；

4. 交流变换电路：能将一种交流电的电压（电流）和频率加以改变的电路（或称AC/AC变换）。前者称交流调压电路，后者称变频电路。

凡仅具有一种电的变换功能的电路称为基本变换电路（简称基本电路）；出于技术或经济的原因，当使用多个基本电路以完成一种电的变换功能时，称为组合变换电路（简称组合

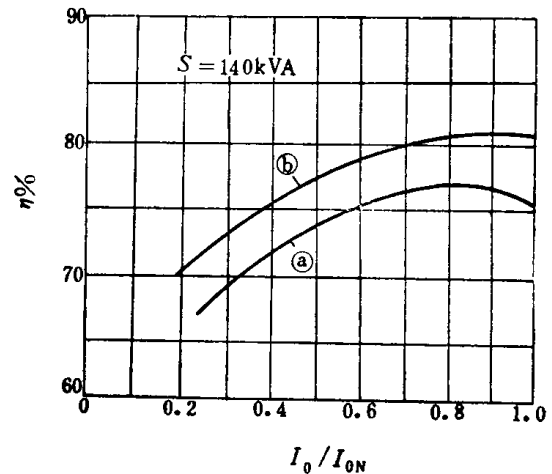


图0-2 静止式和旋转式变流器的效率比较

Ⓐ—旋转式变流器 Ⓑ—静止式变流器

S—变流器表观功率 I_0 —负载电流 I_{0N} —额定电流

电路)。图 0-3 是一种可控整流电路的各种可能方式,由图可见,就入端和出端的电能形式而言,图示各种方式均相同,即均为 AC/DC 变换,但所经历的变换形式和次数则各不相同。

静止式变流电路实质上是一种开关电路,因为采用这种电路的目的是为了减少电路内耗以提高电路效率。据此用来组成电路的器件必须工作于开关状态,即按设定的时序,在控制信号的作用下轮番导通以实现电能的变换和控制。在器件的开关过程中必然伴随着各个支路间电流的转移,简称换流。

对于以半控型器件组成的电路,由于器件自身无关断能力,因而换流过程中包含借助外部条件(即换流电压)关断已处于通态器件的过程。成功的换流是各种半控型电路(指由半控型元件组成的电路)正常工作的必要条件,因而换流过程分析是这类变流电路分析的主要内容,换流技术是这类变流技术的核心。

根据换流电压的来源,所有半控型电路可以采用以下三种换流方式:

1. 电源换流方式:即换流电压取自交流电源端,如整流电路等;
2. 负载换流方式:指换流电压取自负载端,如具有容性负载的逆变电路;
3. 辅助换流方式:对负载为非容性而电源为直流的电路,换流电压既不能利用电源电压,也不能利用负载电压,因而便需要在电路中设置独立的换流电路以关断器件。因此,与全控型器件相比,半控型电路便显得复杂、昂贵和耗能。

(三) 控制方式

为了提高系统的性能,电力电子装置广泛应用自动控制技术和理论(如反馈控制),因此可以沿用控制理论中各种控制方式对变流电路进行分类。但为了突出电力电子技术的特点,本书采用从电力电子器件开关状态与控制信号的关系这一角度出发对控制方式加以分类:

1. 相控方式:指控制信号幅度的变化表现为变流器件控制脉冲相位的变化,是工作于交流电源的变流器常用的控制方式;
2. 频控方式:指控制信号幅度的变化表现为变流器控制脉冲频率的变化,是工作于直流电源的逆变器常用的控制方式;
3. 斩控方式:指控制信号幅度的变化表现为变流器件导通比的变化,是直流变换电路常用的控制方式。

上述控制方式都各有所长,也各有所短。例如简单相控方式并不能改变输出的频率,而简单的频控又不能改变输出的幅值。当输出量的幅值和频率需要同步调节时便不能利用上述控制方式经过一次变换来实现(传统的方式是采用两次变换并分别通过相控和频控方式),但是可以利用新的控制方式在一次变换中实现,而已有的新的控制方式可看成是上述基本方式的组合。例如:

1. 相频控制方式:是相控和频控方式的组合。传统的直接变频电路便采用这种方式,如图 0-4 a 所示。

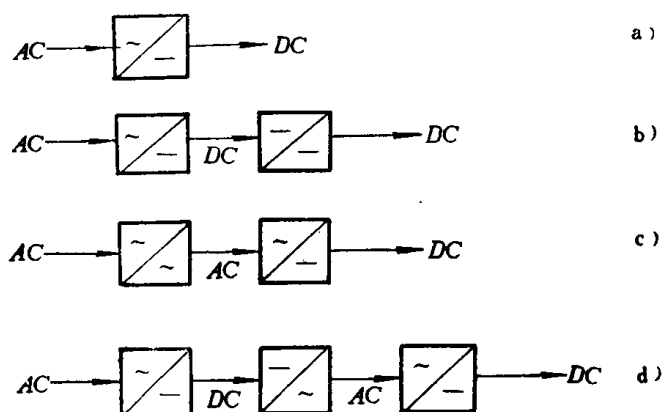
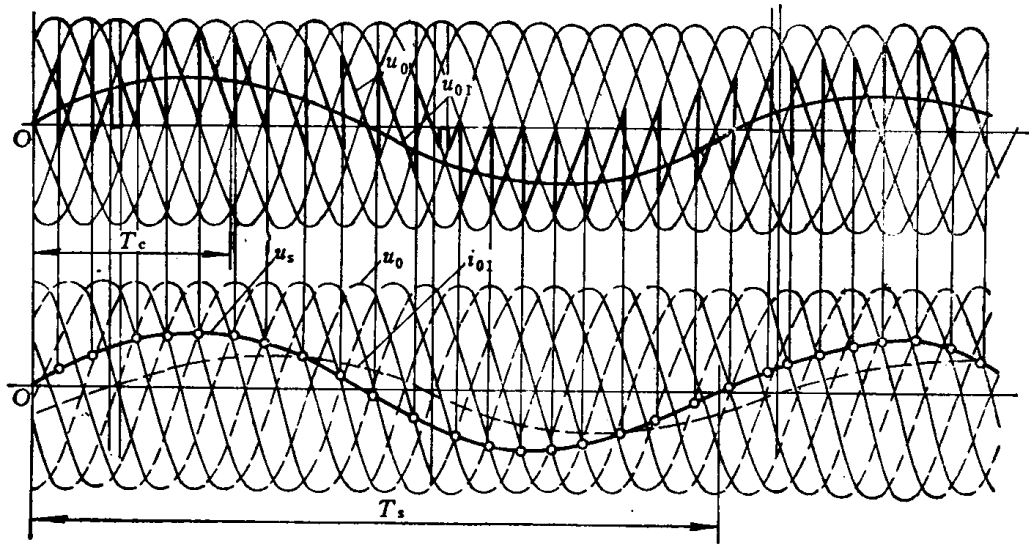
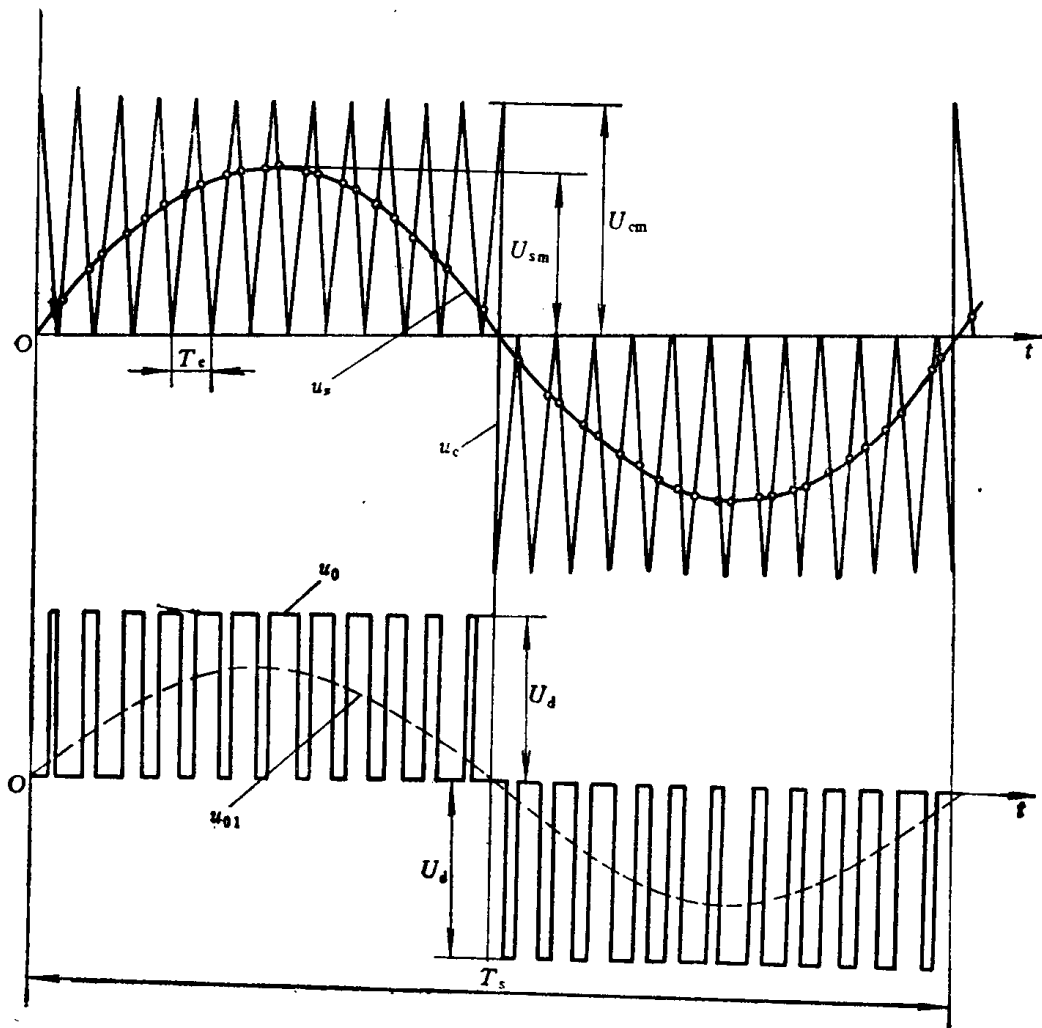


图0-3 实现AC/DC变换的不同方式



a)



b)

图0-4 组合控制方式
a) 相频控制方式 b) 斩频控制方式

2. 斩频控制方式：是斩控和频控方式的组合。例如脉冲宽度调制方式（PWM），含直流环节（不控整流）的间接变频电路常采用这种控制方式，如图 0-4 b 所示。

相频控制方式因载波频率较低（采用电网频率， $f_c = 50\text{Hz}$ ），故输出频率 f 的上限值受限制（ $f_c = \frac{1}{3}f$ 左右）。相反，斩频控制方式的载波频率较高，故可在更宽范围内调节输出频率，也即更适用于宽调频的场合。

（四）电力电子装置

按照生产的要求和负载的特点，选用合适的电路和控制方式以组成实用的电力电子装置。这些装置目前已广泛应用于电力、机械、冶金、交通、矿山、航空和化工等行业。但就其功能划分，则不外是电源和开关两大类，而每种电源和开关又都可以分为交流和直流，如直流电源和交流电源等。

对所有电力电子装置都应重视以下问题：

1. 提高可靠性：和电磁器件相比较，电子器件的过载能力较低，而大容量装置包含电子器件数量较多。提高装置的可靠性要贯穿于器件制作和选用、电路设计、工艺设计、安装调试和现场维护等方面。从技术角度出发，提高器件的集成度，采用 CAD 进行电路设计，用 CAT 进行仿真调试，以及采用计算机进行控制、监视和故障诊断等，都是提高装置可靠性的重要措施；

2. 减低噪声：电力电子器件工作于开关状态，电路中包含高次谐波，它不仅会污染电网，造成环境和对本机的干扰；而且会产生畸变损耗，降低装置效率。因此设计新型电路、采用合理的控制方式以降低装置噪声对提高电力电子装置的技术经济指标是十分重要的。

综上所述，可以得出，电力电子技术是将三类电力电子器件组成四种基本电路，采用几种控制方式以实现电能变换控制的技术。

二、电力电子技术的现状

电力电子技术在世界范围内也只有近 30 年的历史，但由于它对生产的明显作用（如优化性能和节能等），世界各国都很重视这一技术，因而进展速度很快。图 0-5 a 是国外各种器件的生产和研制水平，由图可见，它们的开关容量按 SCR、GTO、GTR 和 MOSFET 的次序递减。这一方面是由于各种器件问世的年代早晚；另一方面是由于各种器件的机理不同，使它们的容许电流密度受器件耐压的约束程度也不同。图 0-6 示出上述器件的容许电流密度随电压变化的情况。由图可见，各种器件的电流密度均随电压的增高而降低，但 MOSFET 的容许电流密度最低，对电压的下降率也最大，因而导致其开关容量最小。图 0-5 b 是国内目前各种器件的生产和研制水平，由图可见，和国外相比，有着明显的差距，尤其是全控型器件。由于器件水平低，直接约束了装置的水平。导致的原因可能很多，其中主要是受微电子技术的限制，当前电力电子器件的若干结构设计和工艺均与大规模和超大规模集成技术有关。

图 0-7 示出国外八种主要电力电子装置（由半控型器件组成）的容量分布情况。该图按装置的换流方式分成电源换流、负载换流和辅助换流三大类。由图可见，这三类装置的表现功率按上述次序递减。图中，④——电解用直流低压电源，最高容量在 100MVA 以上；①——充电用直流低压电源，最高容量在 1MVA 以上；③——调速用直流电源，最高容量在 10MVA 以上；②——直流输电用变频电源，是高压型装置，最高容量在 100MVA 以上；

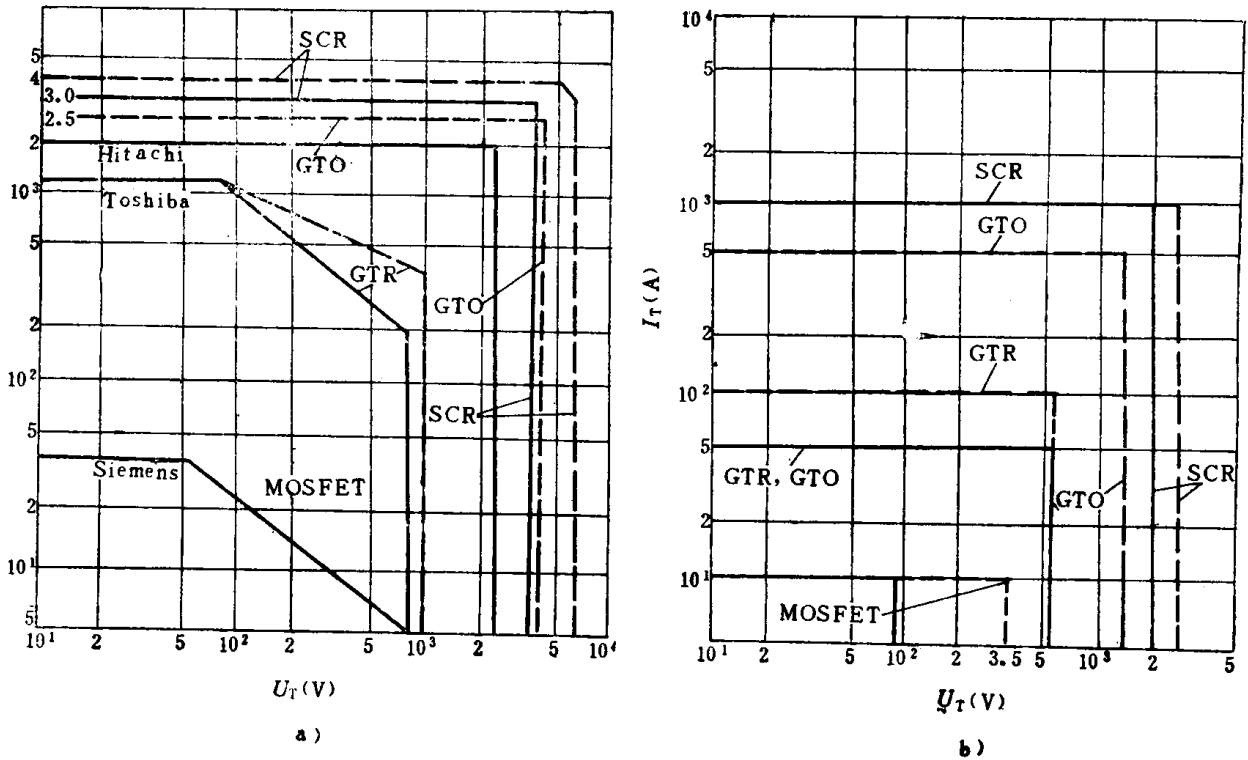


图0-5 电力电子器件的容量比较

a) 国外水平 b) 国内水平
 ——生产水平 ----研制水平

- Ⓔ——加热用中频电源, 最高容量为 10MVA; Ⓕ——无换向器电动机, 最高容量为 50MVA;
- Ⓖ——调速用斩控式直流电源, 最高容量在 1 MVA 以上; Ⓖ——调速用变频电源 (VVVF) 和工业用恒频恒压电源 (CVCF), 最高容量在 5 MVA 以上。

表 0-1 列出我国同类型装置的最高容量。比较国内外情况可见, 除加热用中频电源外, 大多数装置与国外存在较大差距。

表 0-2 是国内外几种以 GTR 组成的电力电子装置的容量情况, 由表可见:

1. 国外由 GTR 组装的电力电子装置容量远低于由 SCR 组装的同类型装置;
2. 国内外 GTR 装置的差距比 SCR 装置更为显著。

图 0-8 是西欧和美国历年来各类器件的市场销售情况。图 0-9 示出日本东芝公司近年来 GTO 的生产量发展情况。由图可见:

1. 生产和销售的情况表明, 全控型器件的增长速度均十分显著, 其中, 以 MOSFET 的增长速度最为注目; 相反, 半控型器件却几乎没有什么增长;

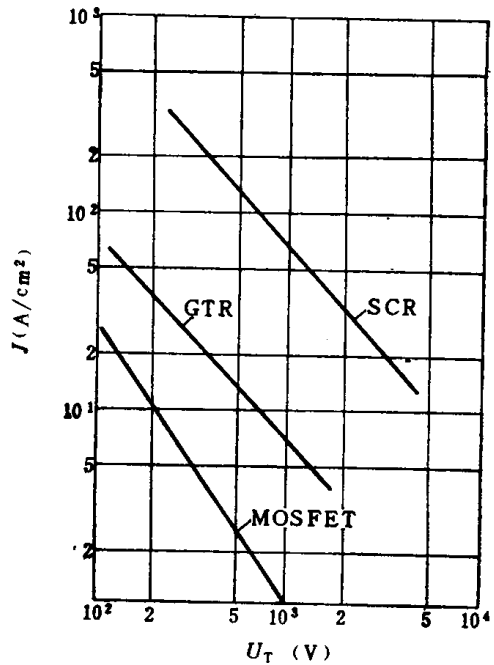


图0-6 各种器件的容许电流密度 J 与耐压 U_T 的关系曲线

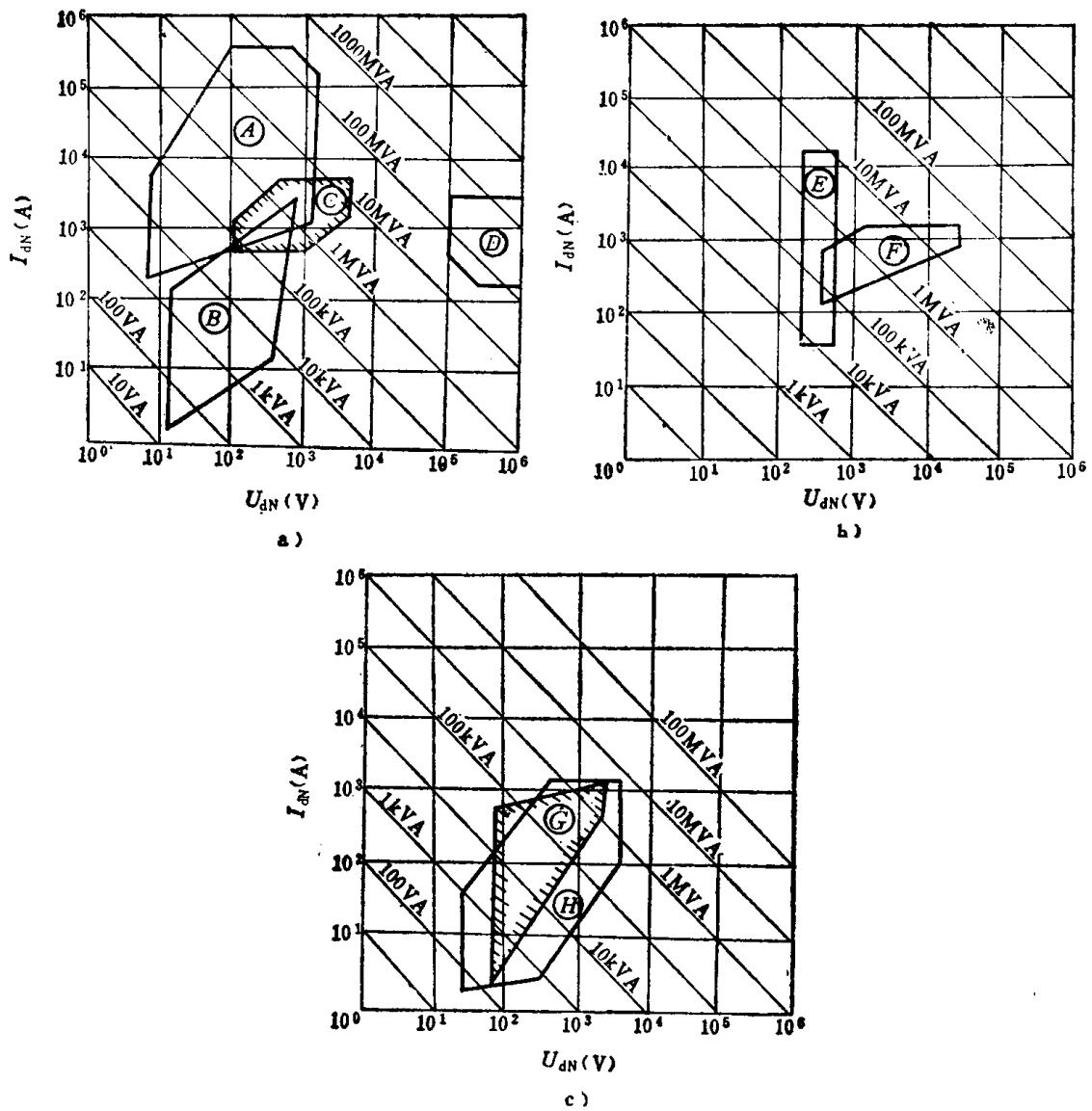


图0-7 国外主要电力电子装置的容量分布

a) 电源换流式装置 b) 负载换流式装置 c) 辅助换流式装置

表 0-1

装置	A	B	C	D	E	F	G	H
最高容量	7.5MVA		280kVA		2 MVA	320kW	50kW	50kW

表 0-2

国别	装置	PWM 直流调速电源	PWM 交流调速电源	PWM 不停电电源	太阳能用逆变器
日本		50 kVA	200 kVA	300 kVA	50 kVA
美国		150 kVA	100 kVA	200 kVA	100 kVA
中国		3 kVA	3 kVA	5 kVA	—

2. 预测最近几年美国市场 GTR 的增长势头有被 MOSFET 取代的趋势。

上述情况说明，尽管全控型器件目前的容量等级不及半控型，但是它的发展速度和市场

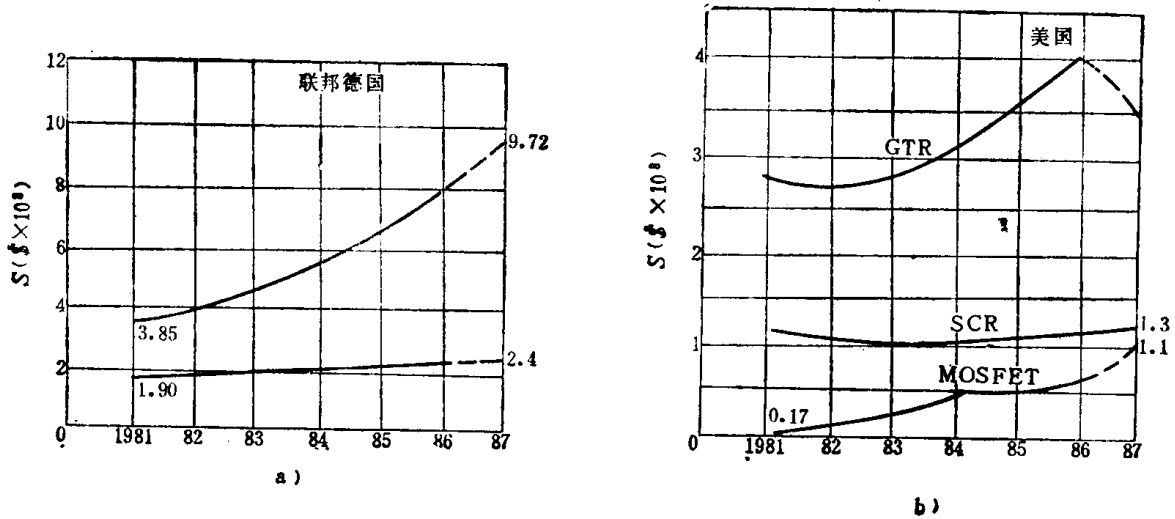


图0-8 国外器件市场销售情况

a) 联邦德国市场 b) 美国市场

销量却非常引人注目。其原因是全控型器件比半控型器件具有更为优越的性能。

(一) 取消换流电路

由于全控型器件具有自关断能力，因而可取消原来对半控型元件不可缺少的换流电路，这将带来一系列良好的结果：

1. 简化电路，提高可靠性：图 0-10 示出电压型三相逆变电路主电路的比较，两者均为三相半桥结构，但由于采用了全控型器件，故使其主电路简单得多；
2. 提高效率：由于没有换流电路损耗，全控型装置的效率将高于半控型，如图 0-11 所示。
3. 减低成本：据分析，用 GTR 组成的逆变器，在相同容量下，其造价是普通晶闸管逆变器的 1/3。

(二) 提高工作频率

图 0-12 是各种器件功耗随工作频率变化的情况。它表明各种全控型器件的工作频率在不同程度上高于普通晶闸管，因而容许电力电子装置以更高频率工作。这又导致以下好结果：

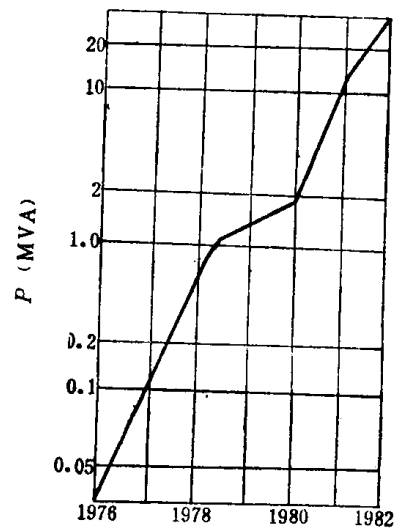


图0-9 日本东芝公司 GTO生产情况

1. 充分发挥新型控制技术的作用以提高装置性能：例如 PWM 技术是一种性能优越的控制方式，其特点是载波频率越高，则输出波形质量越佳。但由于容许的频率上限的约束，普通晶闸管电路最高载波频率约为 0.5kHz；而 GTR 电路为 5kHz；MOSFET 电路为 20kHz。由此可见，全控型器件组成的电路更能发挥 PWM 技术的效能，使装置具有更好的性能；

2. 降低噪声：当载波频率提高到音频以上时，装置的噪声水平将大为减低，这将使装置得以更靠近其负载而无需另建专门的机房，这对某些用户是很有意义的。如向计算机供电的不停电电源装置；

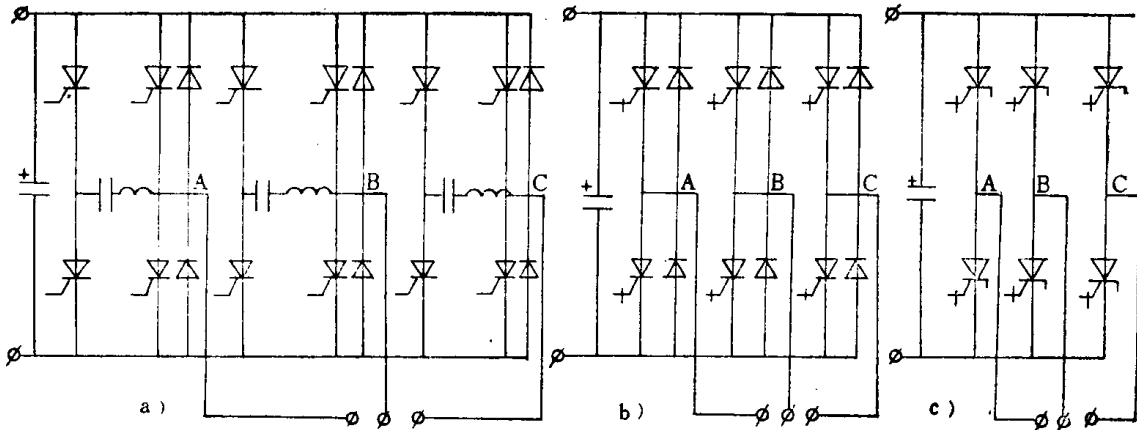


图0-10 电压型三相半桥式逆变电路

a) 由普通晶闸管组成的主电路 b) 由逆阻GTO组成的主电路 c) 由逆导GTO (RCGTO) 组成的主电路

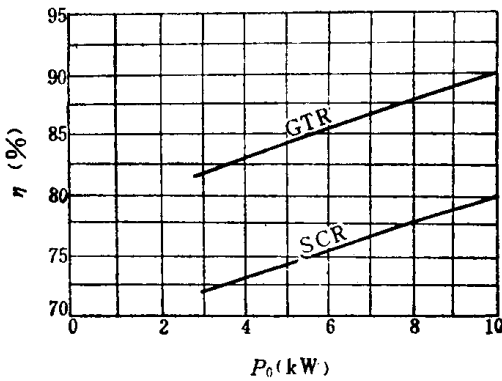


图0-11 逆变器效率比较

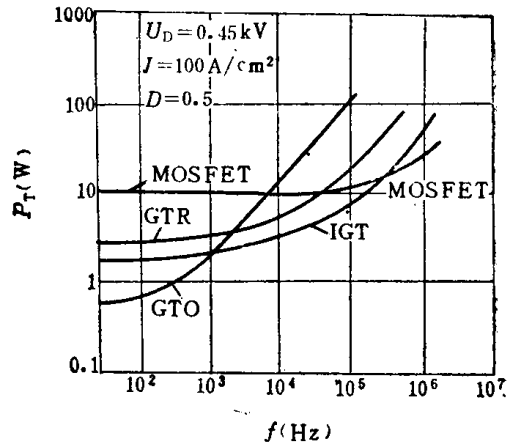


图0-12 器件功耗 P_T 与工作频率 f 的关系

3. 降低成本，缩小体积：由于输出电压中低次谐波含量减小，可以使滤波电路小型化，从而缩小装置体积重量和造价。

由于全控型器件具有上述优点，才受到世界各国的重视，因而使电力电子装置由第一代以普通晶闸管组装发展到第二代以全控型器件组装。图 0-13 示出国外各种装置的容量-频率分布。

三、电力电子技术的发展趋势

(一) 电力电子器件的发展趋势

器件和电路存在相辅相成的关系，但是器件的发展却对整个技术领域产生更为深远的影响，因此电力电子技术的发展首先是电力电子器件的发展。其趋势可以归纳为：

1. 继续提高已有各种器件的开关容量及其动态性能。

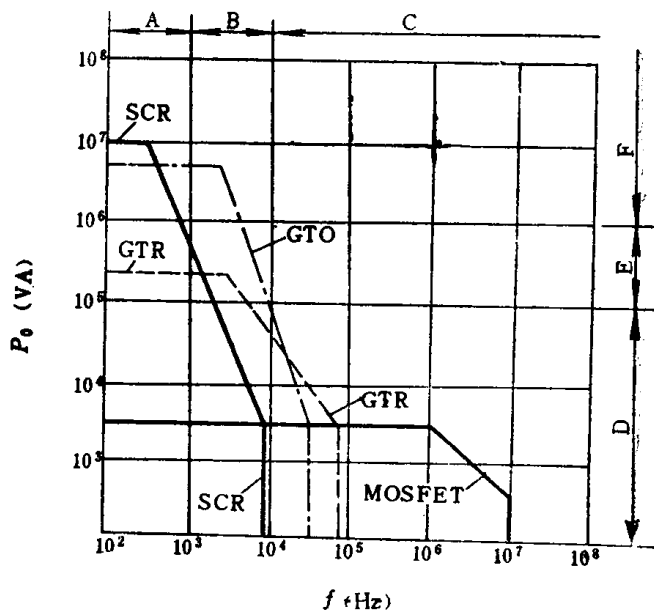


图0-13 各种装置的容重-频率范围

A—工频段 B—中频段 C—高频段 D—小容量 E—中容量 F—大容量

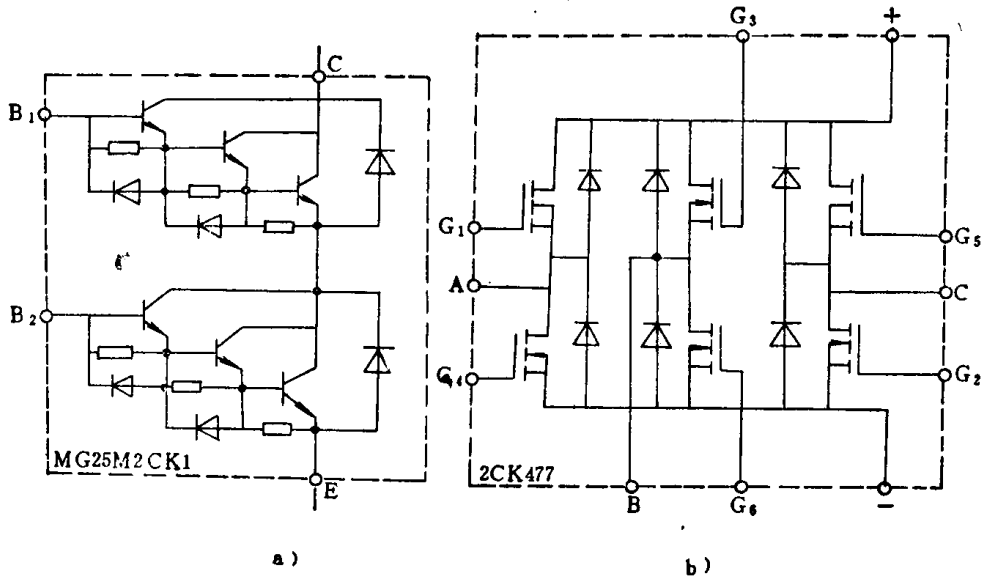


图0-14 模块式器件示例

2. 发展模块式器件。微电子技术中的集成方法正在强烈地影响电力电子器件。模块式器件是一种集成功率器件，它可以减少电路的连线和体积，图 0-14 a 是日本东芝生产的 GTR 模块(MG25M2CK1)900 V 25 A；图 0-14 b 是该公司生产的 MOSFET 模块 (2CK477)，250 V 15 A。

3. 发展组合式器件，将多种器件按照一定方式组合起来可获得更高性能。图 0-15 a 是一种双极型晶体管与 MOSFET 的组合件，称为 BIMOS-HD。它集中了 GTR 和 MOSFET 的优势，扬长避短。MOSFET 具有输入阻抗高和工作频率高的优点，但大电流下耐压低；GTR 相对耐压高，但有二次击穿耐量低、开关速度慢和驱动功率大等缺点，两者组合在一起的 BIMOS-HD 则能保持 GTR 与 MOSFET 的各自优点，并克服其缺点。

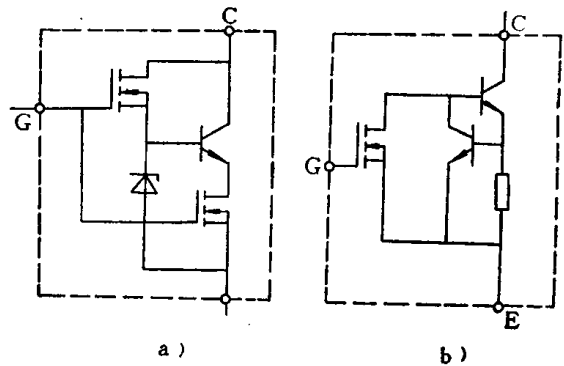


图0-15 组合式器件示例

4. 发展新型器件。图 0-15 b 示出将双极型晶体管与 MOSFET 集成起来的新型器件 IGT (隔离栅晶体管) 的等效电路。它具有高输入阻抗和高电流密度(是 MOSFET 的 10 倍，GTR 的 2 倍)，是一种足以与 GTR 和 MOSFET 相抗衡的有发展前途的新型器件。

图 0-16 是美国 GE 公司 1984 年所作的各种器件容量发展趋势预测。

(二) 电力电子电路的发展趋势

1. 采用全控型器件和 PWM 控制方式以提高电路性能。例如普通的相控式整流电路是一种应用广泛的 AC/DC 变换电路，但存在深控下网侧功率因数降低和网侧谐波电流造成电网干扰等缺点。新型的整流电路将采用全控型器件和 PWM 方式，一方面能做到网侧电流为正弦波；另一方面网侧功率因数与调压深度无关，从而克服了传统相控式整流电路的缺点，提高了电路的性能。