

普通高等教育机电类规划教材

电力电子变流技术

(第3版)

西安交通大学 黄俊 王兆安 编

机械工业出版社

普通高等教育机电类规划教材

电力电子变流技术

(第 3 版)

西安交通大学 黄俊 王兆安 编

版次：
3号楼308

ADP/13

96电子 穆建军



机械工业出版社

¥5.40

本书是高等学校教材《半导体变流技术》(黄俊主编)的第3版,主要内容包括:晶闸管、电力晶体管、可关断晶闸管、电力场效应晶体管及其他电力电子器件;单相可控整流电路、三相可控整流电路、有源逆变电路、晶闸管的触发电路、交流调压电路与斩波电路、晶闸管的串并联和保护、无源逆变电路、交-交变频电路和脉宽调制型逆变电路等。全书论述清楚,层次分明,适合教学。

本书可作为高校工业电气自动化专业及相近专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。原采用《半导体变流技术》作为教材的院校,可改用本书作为教材。本教材配有计算机辅助教学软件PECAT-1.0。

电力电子变流技术

(第3版)

西安交通大学 黄俊 王兆安 编

责任编辑: 赖尚元 林勇 版式设计: 张世琴
责任印制: 王国光 责任校对: 肖新民

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码: 100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京市密云县印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本787×1092¹/₁₆·印张15·字数365千字

1995年10月第3版第16次印刷

印数 367 181—389 180 定价: 10.50元

ISBN 7-111-04175-5/TN·82(课)

前 言

高等学校教材《半导体变流技术》问世以来，为各高等院校普遍采用，至今已发行30余万册。本书是在《半导体变流技术》(机械工业出版社，1986年第2版)和《电力电子自关断器件及电路》(机械工业出版社，1991年)的基础上，根据1992年高校工业电气自动化专业教学指导委员会汇总的大纲编写的。电力电子技术是一门高新技术，近年发展十分迅速，可关断电力电子器件和它实现的斩波与脉宽调制逆变器日新月异，因而重新编写这本教材是十分必要的。为了与当前的学科名称相一致，本教材改用《电力电子变流技术》这一名称。

本书主要内容包括：晶闸管、电力晶体管、可关断晶闸管、电力场效应晶体管及其他电力电子器件；单相可控整流电路、三相可控整流电路、有源逆变电路、晶闸管的触发电路、交流调压电路与斩波电路、晶闸管的串并联和保护、无源逆变电路、交-交变频电路和脉宽调制型逆变电路等。

本书在编写时，力求遵循“打好基础，精选内容，逐步更新，利于教学”的原则，并吸取了兄弟院校在使用《半导体变流技术》(第2版)时的经验与意见，注意与前后课程的衔接，又更新了习题和思考题。

本书可作为高等工科院校电工类专业和自动控制类专业的教材，特别适用于工业电气自动化专业，也可供其他有关专业师生及工程技术人员参考。

本书由西安交通大学电气工程系黄俊教授和王兆安教授编写。概述、第一章至第六章由黄俊编写，第七章至第十章由王兆安编写。书中大量插图由西安秦川机械厂助工黄中宇和西安交通大学助教杨君绘制。

本书由工业电气自动化专业教学指导委员会在1991年会议上决定在全国范围内征稿，并在1992年汕头会议上确定由本书编者编写，经协商，决定请陕西机械学院万伯任教授主审。万伯任教授在审阅中提出了许多宝贵的意见，在此谨致衷心的感谢。

在编写的过程中，对书末所列参考文献作了借鉴，在本书出版之际，对参考文献的作者、提供资料的有关单位以及参与编写第2版《半导体变流技术》的其他作者致以衷心的感谢。

由于学识有限，缺点和错误之处难免，殷切期望指正，来信请寄西安交通大学电气工程系工业电气自动化教研室。

编 者
1993年9月

符 号 说 明

- A** —— 安培; 安培表; 晶闸管的阳极
a —— 调制度
b —— 晶体管基极
 BU_{cbo} —— 晶体管发射极开路时集电极和基极间反向击穿电压
 BU_{ceo} —— 晶体管基极开路时集电极和发射极间反向击穿电压
 BU_{cer} —— 晶体管发射极和基极间接电阻时集电极和发射极间击穿电压
 BU_{ces} —— 晶体管发射极和基极短路时集电极和发射极间击穿电压
 BU_{cex} —— 晶体管发射结反向偏置时集电极和发射极间击穿电压
C —— 电容器; 电容量
c —— 晶体管集电极
 C_{in} —— MOSFET输入电容
 C_{iss} —— MOSFET漏源短路时的输入电容
 C_{oss} —— MOSFET共源极输出电容
 C_{rss} —— MOSFET反向转移电容
D —— MOSFET漏极
E —— 直流电源电动势; 电动机反电动势
e —— 晶体管发射极
 e_L —— 电感的自感电动势
F —— 电容量的单位 (法)
f —— 频率
G —— 发电机; MOSFET栅极; 晶闸管门极
 G_{fs} —— MOSFET跨导
 h_{FE} —— 晶体管直流电流增益
 I —— 整流后负载电流的有效值
 I_1 —— 变压器一次线电流有效值
 i_1 —— 变压器一次线电流瞬时值
 I_2 —— 变压器二次线电流有效值
 i_2 —— 变压器二次线电流瞬时值
 I'_1 —— 变压器一次线电流基波有效值
 I_{ATO} —— GTO最大可关断阳极电流
 i_b —— 晶体管基极电流
 i_c —— 晶体管集电极电流
 I_{cM} —— 晶体管集电极最大允许电流
 I_{ceo} —— 晶体管集电极与发射极间漏电流
 I_{cs} —— 晶体管集电极饱和电流
 I_d —— 整流电路的直流输出电流平均值
 i_d —— 整流电路的直流输出电流瞬时值
 I_{dD} —— 流过整流管的平均电流
 I_{dT} —— 流过晶闸管的平均电流
 i_D —— 流过整流管电流的瞬时值
 I_D —— 流过整流管的电流有效值; MOSFET漏极电流
 I_{DR} —— 流过续流二极管的电流有效值
 i_{DR} —— 流过续流二极管的电流瞬时值
 i_e —— 晶体管发射极电流
 I_H —— 晶闸管的维持电流
 I_L —— 晶闸管的擎住电流
 I'_n —— 变压器一次线电流中的 n 次谐波有效值
 i_o —— 输出电流
 i_p —— 二组整流桥之间的环流 (平衡电流) 瞬时值
 I_R —— 整流后输出电流中谐波电流有效值
 I_T —— 流过晶闸管的电流有效值
 i_T —— 流过晶闸管的电流瞬时值
 I_{Ta} —— 晶闸管的通态平均电流 (其额定电流按此定)
 i^* —— 指令电流
K —— 晶闸管的阴极; K —— 常数
L —— 电感; 电感量; 电抗器符号
 J_P —— 平衡电抗器
 m —— 相数; 一个周期的脉波数
M —— 电动机
 n —— 电动机转速
 n_N —— 电动机额定转速
 N —— 线圈匝数; 负 (组); 三相电源中点时为正体
P —— 功率; 有功功率; 正 (组) 时用正体
 P_{cM} —— 晶体管集电极最大耗散功率
 P_d —— 整流电路输出直流功率
 P_G —— 直流发电机功率

- P_M ——直流电动机反电动势功率
 P_R ——电阻上消耗的功率
 P_{SB} ——晶体管二次击穿功率
 p ——极对数
 Q ——无功功率
 R ——电阻器时为正体；电阻
 R_B ——从变压器二次侧计算的变压器等效电阻
 R_M ——直流电机电枢电阻
 S ——表观功率时为斜体；MOSFET源极；功率开关器件
 s ——秒
 t ——时间
 t_d ——晶体管、GTO开通时的延迟时间
 $t_{d(on)}$ ——MOSFET开通时的延迟时间
 $t_{d(off)}$ ——MOSFET关断时的延迟时间
 t_f ——晶体管、GTO、MOSFET关断时的下降时间
 t_{gt} ——晶闸管门极控制开通时间
 t_{on} ——晶体管、GTO、MOSFET开通时间
 t_{off} ——晶体管、GTO、MOSFET关断时间
 t_r ——晶体管、GTO、MOSFET开通时的上升时间
 t_s ——晶体管、GTO关断时的储存时间
 t_t ——GTO关断时的尾部时间
 T_{JM} ——晶体管的最高工作结温
 t_s ——并联谐振逆变电路触发引前时间
 U, V, W ——三相电源或变流器输出端
 U ——整流电路负载电压有效值
 U_1 ——变压器一次相电压有效值
 u_1 ——变压器一次相电压瞬时值
 U_{1L} ——变压器一次线电压有效值
 U_2 ——变压器二次相电压有效值
 U_{2L} ——变压器二次线电压有效值
 U_1' ——变压器一次线电压基波有效值
 U_n' ——变压器一次线电压中的 n 次谐波有效值
 u_c ——载波电压
 U_{ces} ——晶体管饱和时集电极和发射极间的管压降
 u_{co} ——控制电压
 U_d ——整流电路输出电压平均值
 u_d ——整流电路输出电压瞬时值
 U_{DS} ——MOSFET漏极和源极间电压
 $U_{d\alpha}$ ——延迟角为 α 时整流电压平均值
 $U_{d\beta}$ ——逆变角为 β 时逆变电压平均值
 u_D ——整流管两端电压瞬时值
 u_g ——晶闸管门极电压瞬时值
 u_{DR} ——续流二极管两端电压瞬时值
 u_b ——整流变压器的阻抗电压
 u_L ——电抗器两端电压瞬时值
 U_n ——整流电路输出电压中的 n 次谐波有效值
 U_{nm} ——整流电路输出电压中的 n 次谐波最大值
 u_r ——信号波电压
 U_R ——整流电路输出电压中谐波电压有效值
 u_s ——同步电压
 U_T ——MOSFET的开启电压
 U_{UN} ——逆变电路负载 U 相相电压有效值
 U_{UV} ——逆变电路负载 U 相和 V 相间线电压有效值
 VD ——整流管
 VD_R ——续流二极管
 VS ——硅稳压管
 V ——晶体管
 VT ——晶闸管；GTO
 X ——电抗器的电抗值
 X_B ——从二次侧计算时的变压器漏抗
 X_p ——平衡电抗器的电抗
 Z ——复数阻抗
 Z_1 ——基波阻抗
 Z_n —— n 次谐波的阻抗
 α ——晶闸管的整流延迟角；晶体管共基极电流放大系数
 β ——晶闸管的逆变控制角；晶体管电流放大系数
 β_{off} ——GTO电流关断增益
 δ ——晶闸管的停止导电角；并联谐振逆变电路触发引前角
 γ ——换相重叠角；纹波因数；输出电压比
 η ——单结晶体管的分压比；效率
 θ ——晶闸管的导通角
 ϕ ——位移因数角
 ω ——角频率
 ω_c ——载波角频率
 ω_r ——信号波角频率
 ξ ——畸变因数；阻尼系数
 ψ ——裕量角
 e ——转速系数；电网波动系数

目 录

前言	
符号说明	
概述	1
第一章 晶闸管	6
第一节 晶闸管及其工作原理	6
第二节 晶闸管的特性	8
第三节 晶闸管的主要参数	12
第四节 其他一些电力电子器件	17
习题及思考题	20
第二章 单相可控整流电路	21
第一节 单相半波可控整流电路	21
第二节 单相桥式全控整流电路	24
第三节 单相桥式半控整流电路	29
第四节 晶闸管的简易触发电路	31
习题及思考题	35
第三章 三相可控整流电路	37
第一节 三相半波可控整流电路	37
第二节 三相桥式全控整流电路	42
第三节 整流电压的谐波分析	48
第四节 变压器漏抗对整流电路的影响	54
第五节 可控整流电路带反电动势负载时的工作情况	57
第六节 大功率可控整流主电路接线形式及其特点	61
习题及思考题	67
第四章 有源逆变电路	69
第一节 逆变的概念	69
第二节 三相有源逆变电路	71
第三节 逆变失败与最小逆变角的限制	74
第四节 逆变工作状态时的直流电动机机械特性	75
第五节 有源逆变电路应用举例	77
第六节 变流装置的功能指标	82
第七节 变流装置的触发电路	87
习题及思考题	97
第五章 交流调压电路与斩波电路	98
第一节 单相交流调压电路	98
第二节 三相交流调压电路	106
第三节 斩波电路	110
习题及思考题	122
第六章 晶闸管的串并联和保护	123
第一节 晶闸管的串联与并联	123
第二节 晶闸管的保护	126
习题及思考题	132
第七章 自关断器件	133
第一节 电力晶体管	133
第二节 可关断晶闸管	139
第三节 电力场效应晶体管	144
第四节 驱动电路	147
第五节 缓冲和保护电路	156
第六节 其他新型电力电子器件	160
第七节 小结	162
习题及思考题	163
第八章 无源逆变电路	164
第一节 换相方式	165
第二节 电压型和电流型逆变电路	167
第三节 负载换相式逆变电路	175
第四节 电容换相电压型逆变电路	182
第五节 电容换相电流型逆变电路	188
第六节 逆变电路的多重化	192
习题及思考题	196
第九章 交-交变频电路	197
第一节 单相交-交变频电路	197
第二节 三相交-交变频电路	202
第三节 其他类型交-交变频电路简介	205
习题及思考题	206
第十章 脉宽调制(PWM)型逆变电路	207
第一节 PWM控制的基本原理	208
第二节 PWM型逆变电路的控制方式	211
第三节 SPWM波形的生成方法	213
第四节 PWM型逆变电路的谐波分析	217
第五节 PWM型逆变器和变频器的 主电路	221
第六节 PWM型逆变电路控制方法 的改进	226
第七节 跟踪型PWM逆变电路	230
习题及思考题	233
参考文献	233

概 述

电力电子技术(Power Electronics Technology)是电工技术的分支之一。应用电力电子器件和以计算机为代表的控制技术,对电能特别是大的电功率进行处理和变换,是电力电子技术的主要内容。可以认为,电力电子技术包括下面三大部分:

- ① 元器件(电力电子器件、磁元件及电容器等)。
- ② 电力电子(功率)变流(换)技术(Power Conversion),包括改变频率、电压、电流(量值与类型变换)及变换相数等。
- ③ 控制技术、微电子与电力电子两种技术结合,实现智能控制(Intelligent Control)。

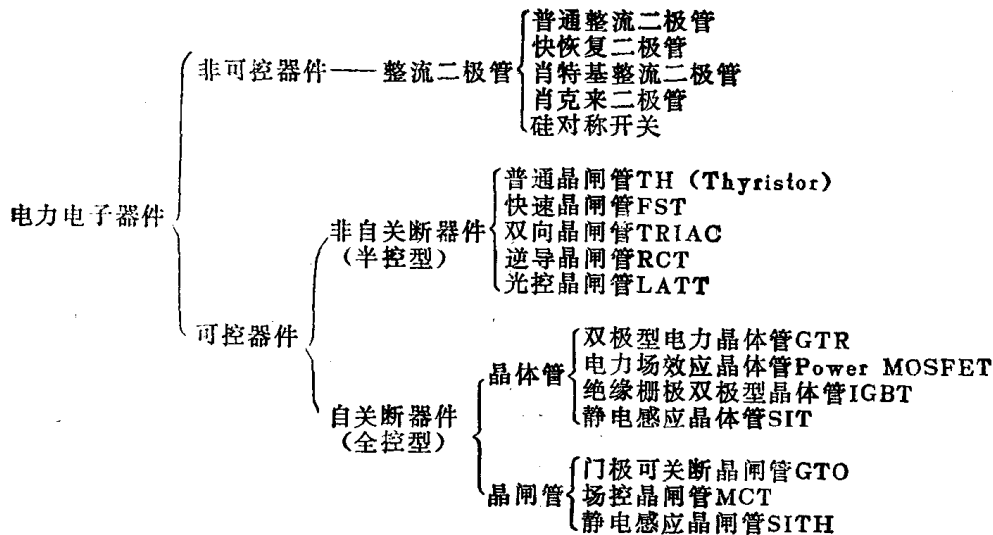
电力电子技术的应用已深入到工业生产和社会生活的各方面,典型的用途类别如:电化学、直流牵引、直流传动、交流传动、电机励磁、电镀及电加工、电磁合闸、充电、中频感应加热、交流不间断电源、稳定电源、电子开关、高压静电除尘、直流输电和无功补偿等,成为传统产业和高新技术领域不可缺少的关键技术,可以有效地节约能源,并成为新能源(燃料电池、太阳能和风力发电等)与电网的中间接口。

一、电力电子器件及其发展概况

1948年普通晶体管的发明引起了电子工业革命。半导体器件首先应用于小功率领域,如通信、信息处理的计算机。1958年,从美国通用电气公司研制成功第一个工业用的普通晶闸管开始,大大扩展了半导体器件功率控制的范围。电能的变换和控制从旋转的变流机组、静止的离子变流器进入以电力半导体器件组成的变流器时代,这标志着电力电子技术的诞生,晶闸管为电力电子学科的建立立下汗马功劳。由于晶闸管不能自关断,属半控型,可算作第一代电力电子器件。至今晶闸管及其派生器件仍广泛应用于各种变流器,并且还在发展中。由于包括晶闸管在内的电力电子器件具有体积小、重量轻、功耗小、效率高、响应快等特点,用它构成的变流装置具有可靠性高、寿命长、容易维护等优点,特别是它可节约能源,所以得到飞速的发展。可以认为电力电子学就是应用在电力技术领域中的电子学,它是电气工程三大主要领域:电力、电子和控制之间的边缘学科。

本书从工业电气自动化专业的培养目标出发,在对电力电子器件进行必要介绍的基础上,主要论述各种类型的电力电子变流电路及其控制方法。

30多年来,随着半导体制造技术和变流技术的发展,一代一代的电力电子器件相继问世,使它的应用领域迅猛扩大,如交流电动机变频调速技术蓬勃发展起来,日益迫切需要可控制关断的、即自关断的电力电子器件(全控型器件),因此相继出现了电力晶体管(GTR)、可关断晶闸管(GTO)、电力场效应晶体管(MOSFET)等,这些可称为第二代电力电子器件。下面分类列出主要的电力电子器件。



新型电力电子器件花样繁多，各国正设法扬长避短，构思新的复合器件。IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 便是在 GTR 和 MOSFET 之间取其长、避其短而出现的新器件。它实际上是用 MOSFET 驱动双极型晶体管，兼有 MOSFET 的高输入阻抗和 GTR 的低导通压降两方面的优点。与此相仿，MCT(MOSControlled Thyristor) 是 MOSFET 驱动晶闸管的复合器件，集场效应晶体管与晶闸管的优点于一身，被认为是性能最好，最有发展前途的一种新器件。

可以说，70年代评价电力电子器件的品质因素的主要标准是大容量，即电流×电压。到80年代，器件发展的主要目标是高频化，所以评价器件品质因素的标准是功率×频率。当今90年代，电力电子器件发展的主要目标是高性能化，即大容量，高频率，易驱动，低损耗。因此评价器件品质因素的主要标准是容量、开关速度、驱动功率、通态压降、芯片利用率。为了实现这一高性能化，将出现许多重要的工艺：如平面工艺、大规模集成工艺、多层金属化、厚膜技术和高能量技术。

目前各类电力电子器件所达到的水平为：

普通晶闸管：12kV、1kA；4kV、3kA

可关断晶闸管：9kV、1kA；4.5kV、4.5kA

逆导晶闸管：4.5kV、1kA

光触晶闸管：6kV、2.5kA；4kV、5kA

电力晶体管：单管1kV、200A；模块1.2kV、800A；1.8kV、100A

场效应管：1kV、38A

绝缘栅极双极型晶体管：1.2kV、400A；1.8kV、100A

静电感应晶闸管(SITH)：4.5kV、2.5kA

场控晶闸管：1kV、100A

图0-1中示出主要电力电子器件的控制容量和开关频率的应用范围。

在发展器件复合化的同时，还值得提出的是器件的模块化，把许多零散拼装的器件组合在一起，构成变流器的双臂、半桥乃至全桥，不仅缩小了装置的体积，降低了成本，而且提高了可靠性，大大方便了用户。

在模块化和复合化思路的基础上,很自然的发展便是功率集成电路 PIC(Power Integrated Circuit)。PIC 是电力电子技术与微电子技术结合的产物。它是指功率在1W以上,功能上具有逻辑、控制、保护、传感、检测、自诊断的集成电路。

PIC 分两类:高压集成电路(HVIC)和智能集成电路(Smart Power IC)。前者是横向高压器件与逻辑或模拟控制电路的单片集成,后者是纵向功率器件与逻辑或模拟控制电路的单片集成。无论是哪一种,其采用的功率器件都有双极型器件(如晶体管、晶闸管)和单极型器件(如场效应晶体管),也有复合器件,控制电路大部分采用 MOS 技术。

当前 PIC 的开发和研究主要着重于中小功率应用,如电视机、音响等家用电器,计算机、复印机等办公设备,汽车、飞机等交通工具,大面积荧光屏显示和机器人中的电力变换和控制。PIC 的工作电压目前在50~1200V之间,工作电流在1~100A之间,有用于长途通信电话的500V、600mA的 HVIC,用于平板荧光显示驱动装置的80V、200kHz的 HVIC,用于异步电动机驱动的110V、13A和550V、0.5A的智能集成电路。

PIC 实现了集成电路功率化、功率器件集成化,使功率和信息集成在一起,形成一个整体,成为机电一体化的接口,它为运动控制系统和过程控制系统开辟了广阔的前景,必将获得重大发展。PIC 的主要技术障碍是高低压电路之间的绝缘问题以及温升和散热的有效处理问题。

二、电力电子变流技术

包括晶闸管在内的电力电子器件是电力电子技术的核心,因为任何新器件的出现都会给电力电子变流技术和控制技术的发展创造突破口。变流技术现按其功能可分成下列几种类型:

整流器——把交流电变为固定的或可调的直流电。

逆变器——把固定直流电变成固定或可调的交流电。

斩波器——把固定的直流电压变成可调的直流电压。

交流调压器——把固定交流电压变成可调的交流电压。

周波变流器——把固定的交流电压和频率变成可调的交流电压和频率。

晶闸管是静止型的电子元件,又是大功率的开关器件。它一问世即具备完成上述五大类型任务的能力,迅速淘汰了当时盛行的旋转变流机组和离子变流器,并把应用范围扩大到整个电力技术领域。目前它在整流器、有源逆变器、交流调压器和周波变流器中占有明显的优势。

由于普通晶闸管是只具备控制接通、无自关断能力的半控型器件,因此在直流回路里,如要求将它关断,需增设含电抗器和电容器或辅助晶闸管的换相回路。另外,普通晶闸管的

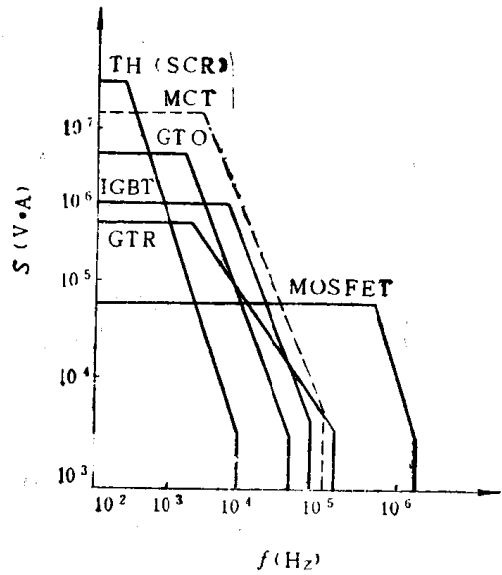


图0-1 器件容量与开关频率的关系

开关频率较低，故对于开关频率要求较高的无源逆变器和斩波器，就无法胜任，应让位给开关频率较高的全控型的自关断器件了。例如将电力晶体管替代普通晶闸管用在变频装置的逆变器中，其体积可减少2/3，而开关频率可提高6倍，还相应地降低了换相损耗，提高了装置效率。近年来，不间断电源和交流变频调速装置广泛采用电力电子自关断器件。

可以说，以普通晶闸管加换相电路控制直流电路的通断来取代机械式的换向器，后来又以全控型的开关器件来取代线路复杂，体积庞大，功能指标较低的普通晶闸管和换相电路，这是变流技术发展的规律。当前新型的全控型器件的发展方兴未艾，在日本，这类器件组成的变频装置已覆盖了整个大、中、小容量范围，在西欧、美国也是日新月异。同时由于全控型器件开关频率的提高，变流器可采用脉宽调制（PWM）型的控制，既可降低谐波和转矩脉动，又提高了快速性，还改善了功率因数。目前国外的中小容量和较大容量的变频装置已大部分采用了由自关断器件构成的PWM控制电路，大功率的电动机传动以及电力机车用PWM逆变器的功率达兆瓦级，开关频率为1~20kHz。

变流技术的发展还表现在利用谐振现象，使开关器件在零电压或零电流时换相，这种谐振逆变器用于感应加热，可提高效率。

在斩波器的直流-直流变换中，采用PWM技术亦有多年历史，其开关频率为20kHz~1MHz。应用场效应晶体管及谐振原理，采用软开关技术以构成直流-直流变流器，其开关损耗及电磁干扰均可显著减少，可使小功率变流器的开关频率达几兆赫，这时滤波用的电感和电容的体积显著减小，充分显示其优越性。

三、控制技术

以往电力电子变流装置采用PID模拟控制，其主要缺点是温漂大，调整不方便。现在已引入16位和32位微机或专用的数字集成电路，使得控制性和精度大大提高。

自适应控制、多变量控制和分布控制是变流系统控制发展的方向，其优点是可将多种控制功能集成在一个系统中或者把系统简化。智能控制和模糊控制也是变流装置控制发展的趋势。

四、本课程的任务与要求

电力电子变流技术是工业电气自动化专业的专业基础课，主要研究有关各类变流装置中发生的电磁过程、基本原理、控制方法、设计计算及其技术经济指标。

电力电子变流技术课程的基本要求是：

① 熟悉和掌握普通晶闸管、电力晶体管、可关断晶闸管和电力场效应晶体管等电力电子器件的工作机理，开关特性和电气参数。

② 熟练掌握单相、三相整流电路和有源逆变电路的基本原理、波形分析和各种负载对电路工作的影响，并能对上述电路（含触发器与保护环节）进行初步设计计算。

③ 掌握无源逆变电路、交流调压电路、斩波电路的工作原理、电路结构、换相方法、波形分析和参数计算。

④ 掌握PWM型逆变电路的工作原理、控制方法、波形分析及交流PWM技术的改进波形。

⑤ 了解电力电子学科的发展动向。

⑥ 掌握基本变流装置的调试试验方法。

电力电子变流技术是电子技术基础的后续课，在学习本课程前，要求学生或读者已能比

较熟练地掌握常用晶体管电路的原理及其参数计算。电力电子变流技术作为专业基础课，主要是基础理论的内容，有关应用部分由后续课程《电力拖动自动控制系统》来解决。

学习这门课程时，要着重基本概念和基本训练，也要加强计算和调试能力，做到器件、电路、应用三个方面相结合。由于电力电子变流技术近年来的迅速发展，各种电力电子电路的类型愈来愈多，在教材中仅对一些典型的基本的电路进行介绍和分析，为学习后续课程打下基础。

第一章 晶 闸 管

晶闸管就是硅晶体闸流管的简称，是目前工业中实现大容量功率变换和控制的主要电力电子器件。晶闸管有各种不同的类型，晶闸管这一名称既代表其族系的总称，亦代表大量和广泛使用的普通晶闸管。本章先介绍普通型晶闸管，然后再介绍族系中其他类型的晶闸管。

第一节 晶闸管及其工作原理

一、晶闸管的结构

晶闸管从外形上来分，有螺栓形和平板形两种结构，示于图1-1。额定电流小于200 A的晶闸管采用螺栓形，大于200 A的采用平板形。对于螺栓形晶闸管，螺栓是晶闸管的阳极A，它与散热器紧密联接。粗辫子线是晶闸管的阴极K，细辫子线是门极G。对于平板形晶闸管，它的两个平面分别是阳极和阴极，而细辫子线则是门极。使用时两个互相绝缘的散热器把晶闸管紧紧地夹在一起。

晶闸管的内部有一个由硅半导体材料做成的管芯。管芯是一个圆形薄片，它是四层(P、N、P、N)三端(A、K、G)器件，它决定晶闸管的性能。

二、晶闸管的工作原理

为了弄清晶闸管工作的条件，按图1-2做几个实验。主电源 E_A (可为3~6 V) 和门极电源 E_G (一般1.5~3 V) 通过双掷双刀开关 S_1 和 S_2 正向或反向作用于晶闸管的有关电极，主电路的通断由灯泡显示，可得晶闸管通和断的规律如下：

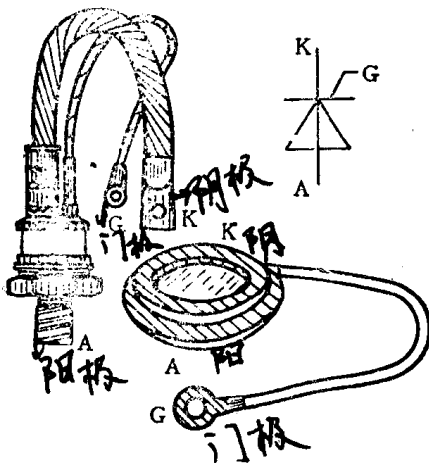


图1-1 晶闸管的外形及符号

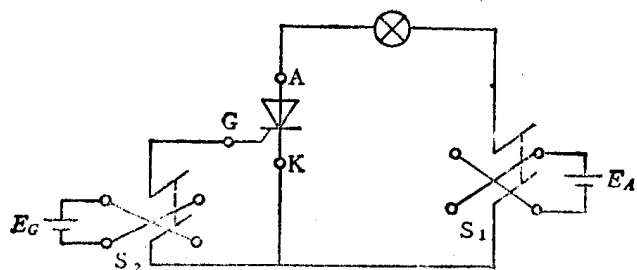


图1-2 晶闸管工作条件的实验电路

- ① 当晶闸管承受反向阳极电压时，不论门极承受何种电压，晶闸管都处于关断状态。
- ② 当晶闸管承受正向阳极电压时，仅在门极承受正向电压的情况下晶闸管才能导通，

正向阳极电压和正向门极电压两者缺一不可。晶闸管导通后的管压降为1V左右,电源电压几乎全加到灯泡上,灯泡燃亮。

③ 晶闸管一旦导通,门极就失去控制作用,不论门极电压是正还是负,晶闸管保持导通,故导通的控制信号只须正向脉冲电压称之为触发脉冲即可。

④ 要使晶闸管关断,必须去掉阳极正向电压,或者给阳极加反压,或者降低正向阳极电压,使通过晶闸管的电流降低到一定数值以下。能保持晶闸管导通的最小电流,称为维持电流。

⑤ 当门极未加触发电压时,晶闸管具有正向阻断能力,它是一般二极管不具备的。

上述现象的解释须从图1-3晶闸管内部的四层结构来分析。它有 J_1 、 J_2 和 J_3 三个PN结,是用扩散工艺制造的。 P_1 区引出阳极A, N_2 区引出阴极K, P_2 区引出门极G。如果正向电压加到器件上,中间结 J_2 便成反偏,PNPN结构处于阻断状态,只能通过很小的正向漏电流。当器件上加反向电压时, J_1 和 J_3 结成反偏,PNPN结构也呈阻断状态,只能通过极小的反向漏电流,与一般二极管的反向特性相似。

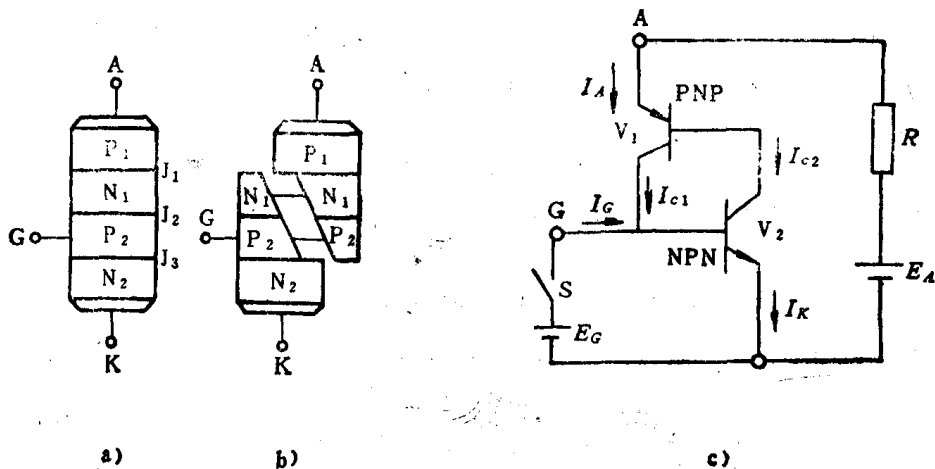


图1-3 晶闸管的双晶体管模型

晶闸管的工作原理通常是用串级的双晶体管模型来解释的,如图1-3 c所示。如在器件上取倾斜的截面,晶闸管可用PNP和NPN晶体管的组合来表述,如果门极电流 I_G 注入晶体管 V_2 的基极,即产生集电极电流 I_{c2} ,它构成晶体管 V_1 的基极电流,放大成集电极电流 I_{c1} ,又进一步增大 V_2 的基极电流,如此形成强烈正反馈,最后 V_1 和 V_2 进入完全饱和状态,即晶闸管饱和导通。

在阻断状态可以写出下列方程:

$$I_{c1} = \alpha_1 I_A + I_{CB01} \quad (1-1)$$

$$I_{c2} = \alpha_2 I_K + I_{CB02} \quad (1-2)$$

$$I_K = I_A + I_G \quad (1-3)$$

式中, α_1 和 α_2 分别是 V_1 和 V_2 晶体管的共基极电流增益; I_{CB01} 和 I_{CB02} 分别是 V_1 和 V_2 的共基极漏电流。

联立方程式(1-1)~式(1-3)得

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_C + I_{CBO1} + I_{CBO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-4)$$

硅晶体管的共同特性是：在低发射极电流下 α 是很小的，而当发射极电流建立起来后， α 迅速增大。在正常阻断情况下， $I_C = 0$ ，而 $\alpha_1 + \alpha_2$ 是很小的。因此漏电流稍大于两个单管漏电流之和。如用触发手段使各个晶体管的发射极电流增大以致 $\alpha_1 + \alpha_2$ 趋近于 1 的话， I_A 将趋近无穷大，实现器件饱和导通，实际上由外接负载 R 限制阳极电流。

使晶闸管触发导通可能有下列几种情况：

- ① 门极触发：如上述，由两个晶体管之间强烈的正反馈使复合晶体管的 $\alpha_1 + \alpha_2 \approx 1$ ，器件进入饱和导通状态。
- ② 阳极电压作用：如正向阳极电压升至相当高的数值，在中间结的少数载流子漏电流（集电极结电流）会由雪崩效应而增大，而正反馈又导致漏电流的放大，最终使器件导通。
- ③ du/dt 作用：如阳极电压以某高速率上升，则在中间结电容 C 中产生位移电流 $i = Cdu/dt$ ，将导致晶体管的发射极电流增大，并最后引起导通。
- ④ 温度作用：在较高结温下，晶体管的漏电流增大，最后引起晶闸管导通。
- ⑤ 光触发：用光直接照射在硅片上，产生电子空穴对，在电场的作用下，产生触发晶闸管的电流。

上述多数作用是综合起来影响器件导通的，从控制角度看，门极触发是最通用的方法，可在精确限定的瞬间触发晶闸管。升高阳极电压使之开通，这不但会引起器件的局部过热、易击穿，也不便控制。 du/dt 更难控制，过大的 du/dt 会使晶闸管损坏，且要用保护措施来限制 du/dt 。光触发晶闸管是一种专门设计的晶闸管，常用在高压直流输电中，因把器件用串并联方法连接起来，故用光触发可保证控制电路与主电路之间有良好的绝缘。

第二节 晶闸管的特性

晶闸管相当于一个可以控制接通的导电开关。从使用的角度来说，首先关心的问题是它的特性。

一、晶闸管的伏安特性

晶闸管阳极与阴极间的电压和它的阳极电流间的关系，称为晶闸管的伏安特性，如图 1-4 所示。位于第 I 象限的是正向特性，第 III 象限的是反向特性。当 $I_C = 0$ 时，如果在器件两端施加正向电压，则如前述， J_2 结处于反偏，晶闸管处于正向阻断状态，只流过很小的正向漏电流。如果正向电压超过临界极限即正向转折电压 U_{bo} ，则漏电流急剧增大，器件导通（由高阻区经虚线负阻区到低阻区）。随着门极电流幅值的增大，正向转折电压降低。导通后晶闸管特性和二极管的正向特性相仿。即使通过较大的阳极电流，晶闸管本身的压降却很小。导通期间，如果门极电流为零，并且阳极电流降到维持电流 I_H 以下，则晶闸管又回到正向阻断状态。当在晶闸管上施加反向电压时，器件的 J_1 、 J_2 结呈反偏，这时伏安特性类似二极管的反向特性。晶闸管处于反向阻断状态时，只有极小的反向漏电流通过，当反向电压超过一定限度，到反向击穿电压后，反向漏电流便急剧增大，导致晶闸管反向击穿而损坏。

二、门极伏安特性

当给晶闸管施加正向阳极电压的情况下，再在门极加入适当的信号，可使晶闸管由断变通。

晶闸管的门极和阴极间是一个PN结 J_2 ，见图1-3，它的伏安特性称为门极伏安特性。实际产品的门极伏安特性分散性很大，为了应用方便，常以一条典型的极限高阻门极伏安特性和一条极限低阻门极伏安特性之间的区域来代表，称为门极伏安特性区域，图1-5示出500A晶闸管门极伏安特性区域，图中各符号的名称和数值见表1-4。

图1-5中，曲线0D和0G分别为极限低阻和高阻伏安特性。图右边的放大图中0HIJ0的范围称为不触发区，

任何合格器件在额定结温时，其门极信号在此区域中都不会被触发。0ABC0的范围称为不可靠触发区，在室温下，此区域内有些器件能被触发，而对于触发电流或电压较高的器件来说，触发是不可靠的。图中ADEFGCBA称为可靠触发区，对于正常使用的器件，其门极触发电流和电压都应该处在这个区域内。当给门极加上一定的功率后，会引起门极附近发热，当加入过大功率时，会使晶闸管整个结温上升，直接影响到晶闸管的正常工作，甚至会使门极烧坏。所以施加于门极的电压、电流和功率是有一定限制的（见下一节的表1-4）。

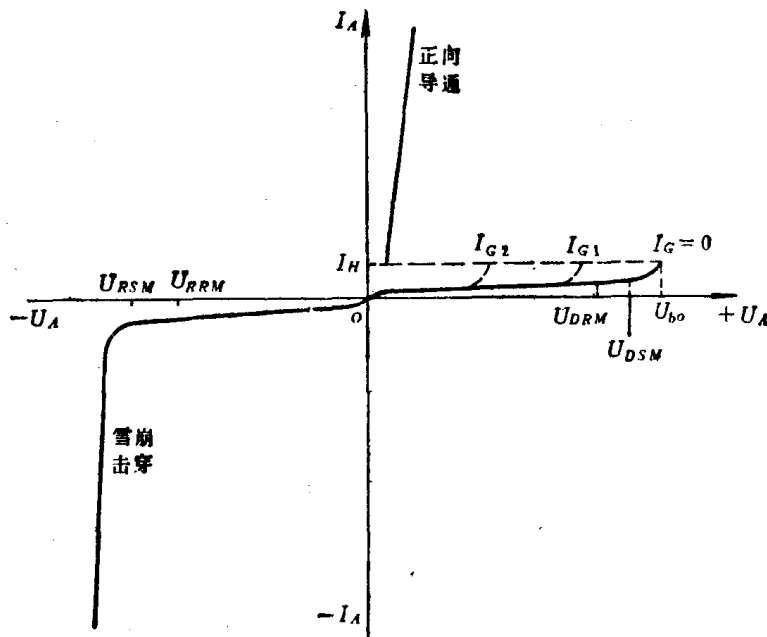
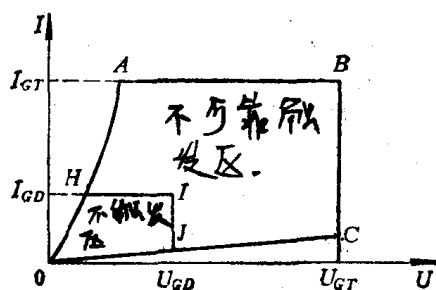
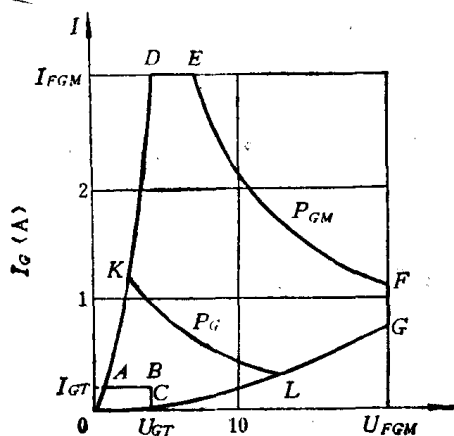


图1-4 晶闸管伏安特性

$$I_{G2} > I_{G1} > I_G$$



I_{GT} 门极触发电流

U_{GT} 门极触发电压

图1-5 500A晶闸管的门极伏安特性

可靠触发区就是由门极正向峰值电流 I_{FCM} 、允许的瞬时最大功率 P_{CM} 和正向峰值电压 U_{FCM} 划定的区域。此外，门极的平均功率损耗不应超过规定的平均功率 $P_{C(av)}$ ，见图1-5中的曲线 KL 。

因此设计触发电路时，触发电路产生的触发脉冲，其电压和电流必须大于相应晶闸管的门极触发电压和电流，才能保证任何一个合格的晶闸管都能正常工作。

器件不该触发时，触发电路输出的漏电压应低于晶闸管规定的门极不触发电压 $0.2V$ ，为了提高抗干扰能力，避免误触发，必要时可在晶闸管门极上加不大于 $5V$ 的负偏压，一般加 $1\sim 3V$ 即可。门极加负偏压不仅可以提高器件抗干扰能力，还可提高器件的正向阻断性能。但过大的负压，会使器件的触发灵敏度降低，不利于器件快速导通，也增加了门极的功耗。

触发脉冲的幅值和前沿陡度影响晶闸管的导通时间。幅值增大、陡度提高时，器件的开通时间就缩短。缩短开通时间就能减小器件在电路中的开通损耗，对器件的安全运行是有利的，在器件串并联的电路中，这一点尤其重要。

三、晶闸管的动态特性

晶闸管和其他电力电子器件一样，都在电路中起开关作用。由于器件的开通和关断的时间很短，当开关频率低时（如 $50Hz$ 的工频），可假定晶闸管是瞬时开通和关断的，不需计其动态特性和损耗。但当工作频率较高时，因工作周期缩短，晶闸管的开通和关断的时间就不能忽略，动态损耗所占比例相对增大，并逐渐转化成晶闸管发热的主要原因，这就必须考虑其动态特性和动态损耗。

（一）开通时间

晶闸管的开通和关断过程的物理机理是很复杂的，从图1-6上就可看出。现简述如下：

使门极在坐标原点开始受到理想阶跃电流的触发，由于晶闸管内部的正反馈过程需要时间，阳极电流增长不可能是瞬时的。从门极电流阶跃时刻开始，到阳极电流上升到稳态值的 10% ，这段时间称延迟时间 t_d ，与此同时阳极与阴极间的压降也在减小。阳极电流从 10% 上升到稳态值的 90% 所需的时间称为上升时间 t_r ，开通时间 t_{ei} 定义为两者之和，即

$$t_{ei} = t_d + t_r \quad (1-5)$$

普通晶闸管，其 $t_d = 0.5\sim 1.5\mu s$ ， $t_r = 0.5\sim 3\mu s$ 。这类晶闸管的延迟时间随门极电流的增大而减小。

上升时间 t_r 表示晶闸管本身的特性，但是外部电路也会影响 t_r 。

延迟时间和上升时间受阳极电压的影响甚大，提高阳极电压， J_2 结（见图1-3）自建电场增强， J_2 结的表面上电荷层厚度增加，使 P_2 区的有效厚度减小，因而 α_2 增大，可使内部正反馈过程加速，延迟时间和上升时间都可显著缩短。

（二）关断时间

原来导通的晶闸管，当电源电压突然改变方向，如图1-6中点划线所示波形，晶闸管过渡到阻断状态的全过程可分阶段说明。

由于晶闸管电路中总带有电感性元件，阳极电流在衰减过程中必有过渡过程，从导通时的电流逐步衰减到零，然后以由电路漏感决定的换向斜率 di/dt 在反方向建立恢复电流，经过最大值 I_{RM} 后，再反方向衰减至接近于零。在恢复电流快速衰减时，由于漏感的作用，引起晶闸管两端出现尖峰电压 U_{RRM} ，零电流时，中间 J_2 结继续保持正向偏置，最终中间结恢复其电压阻断能力，并且可以成功地施加正向电压。