

高等学校试用教材

电力半导体变流技术

西南交通大学 林木生
上海铁道学院 邵丙衡 主编

中国铁道出版社

内 容 简 介

电力半导体变流技术是一门介于电力、电子与自动控制之间应用广泛的边缘学科。本书在扼要介绍各种电力半导体器件的基本性能的基础上,着重分析和阐明了相控变流器、脉冲变流器、直流斩波器、交流调压器、逆变器和谐波变流器等半导体变流器的电路原理和参数设计计算方法,并对电路的保护和控制也作了必要的说明和分析。同时对半导体变流技术中的一些新技术也作介绍。

本书为高校试用教材,除适用于电力牵引、传动控制、电子技术、工业电气自动化及自动控制等电类专业,亦可供从事电力传动与变流技术(或电力电子技术)的工程技术人员参考。

高等学校试用教材

电力半导体变流技术

西南交通大学 林永生 主编

上海铁道学院 邵雨衡

西南交通大学 杜庆璜 主审

中国铁道出版社出版

责任编辑 吴桂孝 封面设计 刘登山

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

北京市华家印刷厂印

开本: 787×1092毫米 1/32 印张: 18.5 字数: 464 千

1987年11月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—3,000册 定价: 3.50元

前 言

自1957年晶闸管问世以来,以晶闸管等电力半导体器件为主体的变流器获得迅速发展。特别是电力半导体变流器与随后发展的集成电路、微处理器及微型计算机等新技术结合运用,其优越性益彰,于是越来越得到重视和推广。目前它已广泛应用于各种电源装置、直流输电、无功补偿、电力传动、电力牵引、家用电器以及冶炼、焊接、电镀与电解等工艺过程的各个生产领域。它不仅可提高产品质量和生产效率,而且在节能方面尤引人注目。

随着变流器应用技术的不断开发与发展,逐步形成了一门介于电力、电子与控制之间的边缘学科——电力半导体变流技术。它已经成为应用电子技术、工业电气自动化、电力牵引与传动控制等电类专业必不可少的一门基础技术课程。为了满足工科院校的教学需要,铁道部教材编审委员会于1983年10月的苏州会议上,决定由西南交通大学林木生副教授和上海铁道学院邵丙衡副教授共同主编这门课程的教材,由西南交通大学杜庆莹教授主审。

1984年春在主编拟定的《编写大纲》基础上,征集了各兄弟院校有关教师的意见,对原大纲进行了修改,而后分工编写。各章编写人员为:林木生(第1~4章)、邵丙衡(第5~8章)、上海铁道学院郑水应(第9章)。1985年10月在上海铁道学院召开了审稿会。会上,有关院校代表既肯定了书稿的质量,也提出了宝贵意见和建议。根据所提意见再作了补充和修改。

本书主要作为工科院校的电力牵引与传动控制、应用电子技术、工业电气自动化以及自动控制等专业的教学用书,约需80学时。同时也考虑了从事电力半导体变流技术工作的技术人员需要,因此书中内容不仅着重于电力半导体变流器的原理、变流电路的分析和主要参数的选择等方面的阐述;而且密切联系实际,并提供了许多工程设计计算方法。

本书在整个编写和审、定稿过程中,得到了杜庆莹教授的热情指导,也得到了审稿会议与会代表们的支持和帮助。谨在此致谢。

编 者

1986.10

目 录

第一章 电力半导体器件的特性	1
第一节 硅整流管.....	1
第二节 普通晶闸管.....	2
第三节 可关断晶闸管.....	5
第四节 其他常用晶闸管的特点.....	8
第二章 相控整流器	10
第一节 相控整流器的常用基本电路.....	10
第二节 各种负载类别的工作特点.....	15
第三节 电动机负载的单相整流电路分析.....	21
第四节 电动机负载的三相整流电路分析.....	33
第五节 二象限变流器的逆变运行.....	45
第六节 电力传动用可逆变流器.....	52
第七节 变流器的功率因数及其改善.....	55
第八节 变流器对电网的影响及谐波干扰.....	66
第九节 直流回路电感为有限值时整流电路的分析.....	68
第十节 相控整流器供电的电动机机械特性.....	72
第十一节 电力传动用相控变流器的控制.....	77
第三章 脉冲变流器	80
第一节 变流器电压、电流波形的谐波分析.....	80
第二节 脉冲变流器的强迫换流方法.....	84
第三节 脉冲变流器的脉宽控制原理.....	86
第四节 脉宽控制的交流-直流变流器.....	91
第五节 交流-直流-交流调速系统的电源变流器.....	95
第四章 直流斩波变流器	104
第一节 直流斩波变流器的工作原理及控制方式.....	104
第二节 可关断型斩波变流器的基本电路.....	108
第三节 可关断型斩波变流器的电路分析.....	114
第四节 多相多重斩波变流器及其分析.....	121
第五节 逆阻型斩波变流器及其换流电路.....	125
第六节 逆导型斩波变流器.....	132
第七节 直流斩波变流器的控制框图.....	133
第五章 交流调压器	135
第一节 交流调压器的基本类型、用途和电路.....	135
第二节 单相交流调压器的分析.....	137
第三节 三相交流调压器的分析及其控制.....	142

第四节 交流斩波调压及扇形控制	147
第六章 无源逆变器	151
第一节 无源逆变器的原理、基本电路及分类	151
第二节 无源逆变器的换流和负载换流逆变器	160
第三节 具有辅助晶闸管单独关断的并联逆变器及其参数计算	164
第四节 串联电感式三相并联逆变器及其参数计算	174
第五节 串联二极管式电流型(源)逆变器及其参数计算	181
第六节 逆变器的调压、脉宽调制和谐波分析	191
第七节 逆变器的控制	198
第八节 逆变器的计算机辅助设计	202
第七章 相控交流-交流变频器	210
第一节 交流-交流变频器的原理、波形和特点	210
第二节 倍频器	214
第三节 无环流单相-单相周波变流器及其控制	215
第四节 三相周波变流器的有环流运行和参数计算	218
第五节 方波型单相-三相变频器	221
第八章 主电路元件的选择与保护	223
第一节 电力半导体元件的容量选择	223
第二节 电力半导体元件的串并联连接和参数计算	226
第三节 电力半导体元件及其变流装置的过电压保护和参数计算	230
第四节 变流器的短路电流计算和过电流保护	239
第五节 电力半导体元件的电压上升率 du/dt 和电流上升率 di/dt 的限制	247
第六节 整流变压器额定参数的计算	250
第九章 变流装置的触发电路	254
第一节 变流装置主电路对触发电路的要求	254
第二节 单结晶体管移相触发电路	255
第三节 晶体管移相触发电路	258
第四节 集成化晶闸管移相触发电路	266
第五节 触发电路同步电源的选择	269
第六节 晶闸管变频装置的触发电路	271
第七节 可关断晶闸管的触发电路	277
第八节 双向晶闸管的触发电路	283
主要符号说明	287
主要参考文献	289

第一章 电力半导体器件的特性

变流技术是将电源供出的电能形式变换成为负载所需电能形式的一门技术，在变换过程中，它保证了电压与电流的平滑调节，这一功能的实现是靠电力半导体开关器件、变压器和储能元件电抗器与电容器的协同工作而完成的。至于半导体开关器件的分类，门类繁多。但从变流技术与传动控制的角度来看，应按其控制程度的差别分为：

- (一) 不可控的整流管——它的导通与否与控制信号无关。
- (二) 晶闸管——在一定条件下，施以控制信号则导通，但控制信号对它的关断不起作用。
- (三) 可关断晶闸管和功率晶体管——在一定条件下，施以正极性的控制信号便导通，施以负极性的控制信号则关断。

除电压或电流控制的晶闸管外，还有光控、温控和场控晶闸管等等。

本章将从使用观点出发来介绍硅整流管、普通晶闸管（简称SCR）和可关断晶闸管（如门极可关断晶闸管，简称GTO）的特性和主要参数，以及逆导晶闸管、双向晶闸管等的特点。至于功率晶体管、变压器、电抗器和电容器，在有关课程中已有阐明，这里不再赘述。

第一节 硅整流管

硅整流管是由半导体PN结加上正负电极引线构成。它的主要特点是单向导电性。图1-1(a)示出它的阳极伏安特性，从图看到，它的正向特性不是直线。在小电流范围，压降增加得较快。以后随着电流增大、压降增加得很慢，正向管压降大约1V左右。当加反压时，反向漏电流不大，且基本上不变，一般在几十至几百微安左右。但反向电压增大至某一数值时（击穿电压），反向电流突然迅速增大，过大时将造成器件的损坏，这种现象叫击穿。反向电流与温度有关，温度越高，反向电流越大，所以使用时要考虑到温升的影响，同时必须注意反向电压的允许值。

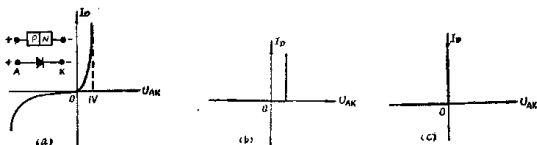


图 1-1 硅整流管的伏安特性

由于硅整流管的平均正向压降和反向漏电流均很小，所以分析与计算时可用图1-1(b)或(c)的理想化特性。其中图(c)说明：

硅整流管关断状态 $I_D = 0$ $U_{AK} < 0$

硅整流管导通状态 $I_D > 0$ $U_{AK} = 0$

(1-1)

式中 I_D ——流经硅整流管的电流；

U_{AK} ——阳极与阴极间的电压。

额定电流和最大反向工作电压是硅整流管常用的主要参数。

(一) 额定电流 系指硅整流管长期通过的最大正弦半波电流的平均值，此时PN结温度不应超过 140°C 。使用大、中功率硅整流管时，必须加装散热片和采用规定的冷却方式，否则，要降低定额使用。

(二) 最大反向工作电压 系指硅整流管在正常情况下允许的反向峰值电压（反向重复峰值电压），通常是击穿电压的80%。

第二节 普通晶闸管

普通晶闸管SCR自1957年美国通用电气公司发明后，由于它的效率高、无噪音、耐冲击、好安装、尺寸小等优点，很快就成为变流技术领域中的主体，取代了落后的发电机组和水银整流器。以后又发展了许多派生器件，常见的有双向晶闸管、快速晶闸管、逆导晶闸管、和可关断晶闸管等，国际电工委员会把它们统称为晶闸管。

一、SCR的静态特性与主要参数

SCR是一种PNPN四层三端器件，它有三个结 J_1 、 J_2 和 J_3 ，和三个外接端子，它们分别从阳极A、阴极K和门极G引出。它的结构示意图和代表符号如图1-2(a)和(b)所示。而图中(c)则是阳-阴极电压 U_{AK} 与阳极电流 I_A 的伏安特性。

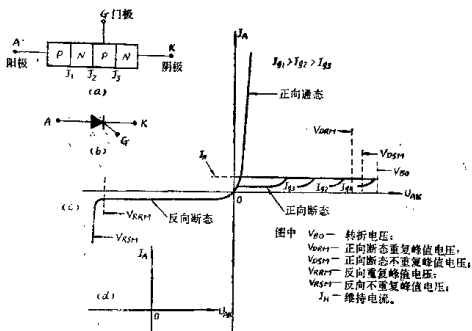


图 1-2 SCR的静态特性

(a) SCR的结构示意图；(b) 代表符号；

(c) 静态伏安特性曲线；(d) SCR的理想化特性。

如果在器件的阳-阴极间加上反向电压,于是 J_1 和 J_3 受反向偏置,只有 J_2 受正向偏置,因而只有很微小的漏电流,器件呈高阻抗状态,实际上可认为是断开的,称反向阻断状态。若继续提高反向电压到 V_{BSM} (反向不重复峰值电压), J_1 和 J_3 就会发生雪崩,反向电流急剧增大,以致损坏器件。

当门极无信号,控制电流 I_g 为零时,在阳-阴极间加上正向电压,于是 J_1 和 J_3 受正向偏置,但 J_2 处于反向偏置,因而只有很弱的正向漏电流,器件呈高阻抗状态,称正向阻断状态。若增大电压 U_{AK} ,当上升到某一 V_{BO} 值,SCR由阻断状态突然转化为导通状态,这个 V_{BO} 值称正向转折电压。这种导通属非正常导通(因其会减短器件的寿命)。若所施加的 U_{AK} 比 V_{BO} 低,但其上升速度相当大,也会使SCR转化为导通状态。在实际使用上,因常引起SCR之误动作,应尽量避免。

若给门极施加 I_g ,SCR就可在比 V_{BO} 低的电压下由阻断转化为导通。 I_g 越大,使器件导通所需的正向阳极电压 U_{AK} 就越低,这相当于转折点向左移。如在足够大的 I_g 作用下,可在 U_{AK} 基本上为零情况下,器件就能从阻断变导通。

当给门极施加脉冲控制电流时,SCR被触发导通,若阳极电流 I_A 尚未达到擎住电流 I_L 值时,触发电流脉冲一旦消失,SCR便又恢复到阻断状态,若 $I_A > I_L$,虽去掉门极控制信号,仍能维持SCR的导通。此 I_L 值对于电感性负载尤应注意。如图1-3所示,电感性负载电流增长得快时,在触发脉冲尚未消失前,负载电流(亦即SCR的阳极电流 I_A)已大于 I_L ,以后触发脉冲消失并不影响 I_A 的流通。若负载电流增长得慢,当脉冲消失时, $I_A < I_L$,以致SCR恢复到原来阻断状态,使 I_A 突然下降至零。

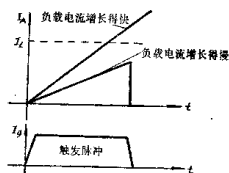


图1-3 门极触发脉冲宽度与擎住电流的关系

SCR导通以后,如果减小 U_{AK} 或增大负载电阻,则 I_A 减小,当 I_A 减小到低于维持电流 I_H 后,SCR就从导通转为阻断。实际使用的维持电流 I_H 基本上接近于零。

由于SCR的正向断态漏电流、反向断态漏电流和正向通态电压降均很小,与负载电流、电压比起来可忽略不计,因而分析和计算时可用图1-2(d)的理想化特性:

$$\begin{aligned} \text{反向断态 } I_A &= 0, & U_{AK} &\leq 0 \\ \text{正向断态 } I_A &= 0, & U_{AK} &> 0 \text{ 及 } I_g > 0 \\ \text{正向通态 } I_A &> 0, & U_{AK} &= 0 \end{aligned} \quad (1-2)$$

在正常情况下,SCR由阻断转为导通,必需同时具备两个条件:一是有正向阳极电压;二是有正向门极触发电压。SCR一旦导通以后,门极即失去控制作用。如要SCR由导通转化为阻断,应使 I_A 下降到小于 I_H ,或是施加反向电压。

当选择用于变频器的晶闸管时,晶闸管的额定电压应为其正常工作峰值电压的2~3倍,通常把 V_{DRM} 和 V_{RRM} 中较小的那个数值标作器件型号上的额定电压。正向断态重复峰值电压 V_{DRM} 系指门极断路,在额定结温时,允许每秒50次,每次持续时间不大于 $10\mu s$ 重复加于器件上的正向峰值电压。此电压规定为正向断态不重复峰值电压 V_{DSM} 的80%。而 V_{DSM} 应不超过转折电压 V_{BO} ,至于 V_{DSM} 与 V_{BO} 的差值该是多大,由制造厂家自定。因晶闸管在变频器中工作时,必须能够以电源频率重复地经受一定的过电压而不影响其工作,故晶闸管有承受“重复峰值电压”的要求。在特殊情况下,过电压数值可较大,但并不要求重复承受电压;

这就是“不重复峰值电压”。

还应选用晶闸管的额定电流为其正常电流平均值的1.5~2.0倍。晶闸管的额定电流用一定条件下的最大通态平均电流 I_T 来标定。即在环境温度为+40°C和规定冷却条件下,器件在电阻性负载的单相工频正弦半波、导通角不小于170°的电路中,当稳定的额定结温时所允许的最大通态平均电流。但从晶闸管管芯发热的角度来看,如认为管芯在通态下的电阻不变,其热效应仅和电流的有效值有关。因此实际上流过晶闸管电流的有效值等于额定电流 I_T 时的有效值,管芯的发热就是等效的和允许的。

当器件承受正向电压时,在需要的时刻给门极施以脉冲电流去触发SCR,就能使之转为通态。门极脉冲电流应适当地大于器件合格证上标出的门极触发电流值。

二、SCR的动态特性与主要参数

(一) 开通特性

在晶闸管门极施加控制信号,使它由阻断变成导通是需经历一段时间的,这段时间称开通时间 t_{on} 。它是由延迟时间 t_d 和上升时间 t_r 组成,如图1—4所示。 t_d 是从门极电流脉冲前沿的某一规定点起

(比如门极电流上升到终值的90%时起),到通态阳极

电流 I_A 达其终值的10%那瞬间为止的时间间隔。 t_r 是阳极电流 I_A 从其终值的10%上升到90%所经历的时间。可见 t_{on} 与门极电流脉冲的前沿陡度和门极电流的大小、器件结温、开通前阳极电压、开通后阳极电流的大小等因素有关。快速晶闸管的 t_{on} 大约1 μ s,普通晶闸管(SCR)

在10 μ s以下。此值在晶闸管作串、并联使用时十分重要。串联或并联使用的晶闸管的开通时间应选得尽可能相接近。否则,串联使用时将引起正向阻断电压无法平均分配,使 t_{on} 较长的管子受损;并联使用时较早开通的器件将分担更多电流。此外,开通时间 t_{on} 还与外电路的时间常数 L/R 有关,当回路电感 L 较大时,其 t_{on} 可达几十乃至几百微秒以上。

在图1—4所示的上升时间 t_r 内,SCR通过较大的正向电流和承受较高的正向电压,因而产生较大的开通损耗。但开通损耗发生的时间非常短暂,故在工频下使用时,耗能不致于很可观,但若在中、高频下使用时,开通损耗将相当大,应予以注意。

当门极加入触发脉冲后,SCR首先在门极附近的一个很小区域内导通,然后逐渐扩大,直至全部结面都导通。因此,刚一导通时,若阳极电路上升率 $\frac{di}{dt}$ 太快,则可能使PN结局部过热而烧坏。所以,刚一导通时的 $\frac{di}{dt}$ 必须要限制,不应超过技术规定中的给定值。此外,当晶闸管开通后直接接通大容量电容器回路时,很可能发生因 $\frac{di}{dt}$ 太大而损坏器件,设计时必须予以考虑,并应采取相应的预防措施来限制电路上升率 $\frac{di}{dt}$,使它不超过器件的允

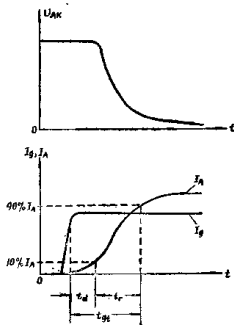


图1—4 电阻性负载下, SCR开通过程中的波形

许真。

(二) 关断特性

晶闸管在阳极电流减小为零之后, 如果马上就加上正向阳极电压, 即使没有门极脉冲, 它也会再次导通。假如在再次加上正向阳极电压以前, 使器件承受一定时间的反向偏置, 那么在再次加正向阳极电压时也不会导通。这种现象说明, 晶闸管关断后需要有一定的时间以恢复它的阻断能力, 才能阻断再次施加的正向电压。这样就从阳极电流过零瞬间到器件能阻断重加正向电压的瞬间为止的最小时间间隔, 叫做晶闸管的关断时间 t_q 。它分成反向恢复时间 t_{rr} 和门极恢复时间 t_{gr} , 如图1—5所示。

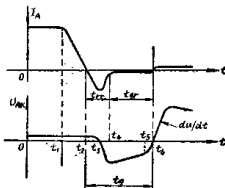


图1—5 SCR关断过程的波形

设在 $t=0$ 到 t_1 这段时间, 晶闸管正在导通, 阳极流有电流 I_A , 阳-阴极电压 U_{AK} 为正向压降。在 $t=t_1$ 时, 对导通的晶闸管施加一反向电压或反向电流使它关断。于是阳极电流 I_A 下降, 至 $t=t_2$ 时, $I_A=0$ 。从这时起, 晶闸管内部的载流子被外接电路所带走, 形成反向流通的恢复电流, 晶闸管仍维持在低阻抗的导通状态, 并继续保持较小的正向压降。到 $t=t_3$ 时, 反向恢复电流达最大值, 随后又逐渐减小, 到 $t=t_4$ 时达正常反向漏电流的数值。而 U_{AK} 在 t_2 时则过零变负。由 t_2 至 t_4 这段时间称为反向恢复时间 t_{rr} 。但远离阳极和阴极而靠近门极的 J_2 结附近的载流子较难由外电路所带走, 它们必须靠再复合的作用而自然消失, 以致最终恢复正常阻断能力。到 $t=t_5$ 时再次施加正向电压, 按照规定的电压上升率 $\frac{du}{dt}$ 进行, 于是 U_{AK} 上升, 在 t_6 时刻过零变正。门极附近的载流子的再复合作用是靠反向偏置电压来保证的, 所以由 t_4 至 t_6 这段时间称为门极恢复时间 t_{gr} , 如果在 $t=t_6$ 时 U_{AK} 由负变正后, 晶闸管不导通, 对正向电压具有阻断能力。这样, 根据试验测定, 重加正向电压而恰好不导通的这段最小时间间隔定义为 t_q 。为了保证SCR的可靠关断, 在实际应用中, 由电路提供给晶闸管的反向偏置时间必须大于晶闸管的关断时间 t_q , 并应留有足够的余量。一般, 快速晶闸管的 t_q 为 $10\sim 50\mu s$, 而普通晶闸管的 t_q 则大约是 $150\sim 200\mu s$ 。

晶闸管关断时阳极电流的突然变化, 可能在阳极回路的电感中产生一个幅值相当大的瞬态电压, 而危及晶闸管。因此必须引入一个适宜的吸收电路来保护它。

当器件在阻断状态时, 如在它的两端加一正向电压, 即使所加电压数值没有超过转折电压 V_{BO} , 只要电压上升率 $\frac{du}{dt}$ 超过一定值, 器件就会转化为导通, 这种导通属误导通, 是不希望的。这是由于PN结面形成的电容所引起的充电电流, 起到了触发电流的作用。此电流一超过门极可触发电流值时, 器件就误导通了。为避免误导通, 在器件参数中, 不同等级的晶闸管规定了不同的 $\frac{du}{dt}$, 使用时应注意。

第三节 可关断晶闸管

普通晶闸管需要设置专门的换流电路才能使它关断, 这就使得变流装置的体积和重量增加、以及效率降低。工业应用上极需要有这样一种晶闸管, 它的门极信号既可控制其导通又可控制其关断。终于1964年出现了 $10A/500V$ 的门极可关断晶闸管GTO。大功率GTO在变

流技术领域的应用,使得变流装置的电路简单,控制方便,体积和重量得到显著的减小。

GTO与SCR类似,也是PNPN四层三端器件,但GTO的阴极由多个小单元分离并联组成,在结构上保证GTO导通时处于临近饱和状态,为用门极负信号关断阳极电流创造有利条件。而不像SCR那样饱和程度较深,以致于很难用门极负信号使它关断。

一、GTO的工作特性

GTO的阳极伏安特性与SCR相似,门极伏安特性的正向区域部分亦相似。因GTO是用门极负信号控制其关断,故有门极反向电压区域的伏安特性,如图1—6(c)所示。其中(a)是GTO的表示符号;(b)是原理测试电路及门极电路外加信号波形;(d)是关断过程中各参数的变化规律。

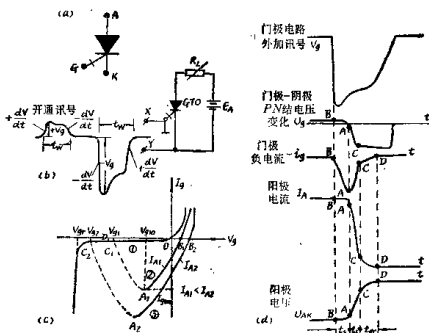


图1—6 GTO的工作特性

在图1—6(b)中,测试电路的X、Y端输入如图所示的门极触发信号,当阳极加正向电压、门极加正触发信号时,GTO就导通。当门极加负触发信号时,GTO就关断。图1—6(c)示出门极伏安特性。其中曲线①表示阳极电流 $I_a=0$ 时的门极伏安特性, V_{g1} 为门极反向雪崩电压。而曲线②和③分别表示阳极电流为 I_{A1} 和 I_{A2} 时的特性。现以曲线②为例说明,当负信号加在导通的GTO门极时,首先克服门-阴极PN结上的正向压降 OB_1 ,而后,门极负电压逐渐增加,门极负电流随之不断增加,伏安特性由第一象限经第四象限转入第三象限。曲线②上的 A_1 点相当于GTO的临界导通状态,该点是GTO由导通转化到关断的转折点。 A_1 点的门极负电流和电压分别为 I_{A1m} 和 V_{g10} 。此后,门极负电压继续增加,而门极负电流的绝对值反而逐渐减小,到达点 C_1 后便与 $I_a=0$ 时的特性曲线①重合。曲线 A_1C_1 段由门极负载回路决定。 C_1 点所对应的电压 V_{g1} 称门极关断电压,门极所加负电压 $-V_g$ 在绝对值上要比 V_{g1} 高,但又比门极雪崩电压 V_{g10} 要小,国产GTO的 V_{g1} 大约是10~15V。

图1—6(d)表示GTO在关断过程中各参数的变化规律。门极电路外加电压信号与门极-阴极PN结上的电压不同,当加入门极电压信号后,由于结电容、门极回路引线电感和接触电阻的影响,门-阴极PN结上的电压有不同的变化过程。门极一旦加上负偏置电压,就

形成门极负电流,该电流的绝对值从B点起逐渐增大,至A点达最大。此时阳极电流和阳极电压基本不变,这段时间称贮存时间 t_s 。自A点后门极负电流绝对值逐渐减小,而阳极电流下降,阳极电压上升。图中A、B、C点与图1—6(c)中的 A_1 、 B_1 (或 B_2)、C、 C_2 相互对应。AC段所经历的时延称下降时间 t_f 。CD段所对应的时延称尾部时间 t_{RC} 。这是残存载流子复合所需的时间。在实际应用中,贮存时间 t_s 是指从门极加入负讯号起到阳极电流减小到导通电流的90%为止所需的时间。下降时间 t_f 是指阳极电流从90%降到10%所需的时间。尾部时间 t_{RC} 是指阳极电流从10%到GTO彻底关断所需的时间。

门极外加信号的波形对GTO的开通与关断都有影响。开通信号的脉冲前沿陡度越陡、导通越快,后沿坡度越缓越好,坡度大时易产生负的尖峰电流,该电流有可能导致器件的误关断。脉冲幅度 $\div V_g$ 越大、导通时间越短。为实现强触发,门极正脉冲电流一般应为额定触发电流的3~5倍,比如50A的国产GTO的额定触发电流为50mA,实际应用时可到250mA。脉冲宽度 t_w 必须加宽到主回路电流已超过擎住电流 I_L 的时刻,以保证管子大面积导通。例如50A的国产GTO的 t_w 可取30~100 μs 。门极负信号的前沿陡、幅值高,对GTO的可靠关断有利。但过陡过高时,使得门极负电流的绝对值过大、下降速率过大,造成门极瞬时功耗过大,致使PN结局部过热而损坏器件。 $-i_g$ 的幅值一般应在被关断的阳极电流的 $\frac{2}{3}$ 以内。负信号的脉冲宽度 t_{w-} 应能保证残存载流子的复合有足够的时间。对于50A国产GTO, t_{w-} 一般取为30 μs 左右。关断脉冲的后沿坡度越缓越好,以免门极产生的正尖峰电流之增加,以致可能使GTO再次导通。

二、GTO的主要参数

(一) 电流关断增益 β_{off}

GTO是用门极负信号去关断阳极电流的,最理想的是用较小的门极负电流可以去关断较大的阳极电流。被关断的最大阳极电流 I_{ATO} 与门极负电流的幅值 I_{gm} 的比值称为电流关断增益,即

$$\beta_{off} = \frac{I_{ATO}}{I_{gm}}$$

一般GTO的 β_{off} 大约是5左右。

(二) 最大可关断阳极电流 I_{ATO}

GTO的电流限制有二:一是发热限制,即管子的额定工作结温所决定的平均电流额定值,这一点和SCR相同;二是由于临界饱和导通条件所决定的最大阳极电流,因为阳极电流过大,管子便处于较深的饱和导通状态,临界导通条件便被破坏,导致门极关断失败。这种由门极可靠关断为决定条件的最大阳极电流称为最大可关断阳极电流。

对于SCR来说,一般给出的额定电流是平均电流,而GTO则一般给出最大可关断阳极电流。比如50A/600V的国产GTO,即指最大可关断阳极电流为50A,额定电压为600V(额定电压的含义和SCR同)。但使用时应注意,国产管子中有的能承受反压,有的则不能承受,如必须承受反压时,使用中应串入一个二极管。

由于GTO被应用于脉冲工作状态,其受发热限制的平均电流可根据阳极电流脉冲占空比来计算。比如阳极电流脉冲占空比为 α (小于1的百分数),那么阳极平均电流 I_A 可用下式确定

$$I_A \approx \alpha I_{AT0}$$

使用中应根据平均电流设计散热器和冷却装置。

第四节 其他常用晶闸管的特点

从工业应用上来看,晶闸管可有相控与逆变两种用途,后者要求关断时间短、工作频率高,普通晶闸管一般用于相控、不能满足逆变的需要,从而促使快速晶闸管的诞生。又如交流电路需要一对反并联的晶闸管,斩波装置需要晶闸管与二极管反并联使用,有必要把更多的功能组合于一个器件内,从而发展了双向晶闸管和逆导晶闸管等。

一、快速晶闸管

快速晶闸管是一个总称,它包括所有专为快速应用而设计的晶闸管,如可关断晶闸管、逆导晶闸管等等。这里所指是在结构上和伏安特性上都与SCR基本相同的KK型快速晶闸管。它主要为了满足中频感应装置和电力机车车辆调速的应用,不仅要有快的开断速率,而且还要有大的功率。既要保持SCR所具有的大功率的特点;又要缩短关断时间、提高耐 $\frac{di}{dt}$ 和 $\frac{du}{dt}$ 的能力,而在这些方面的动态性能指标要比SCR有显著的改进。

二、双向晶闸管

双向晶闸管是把两个反并联的晶闸管组合在一块硅片上的功率集成块。它有三个电极,

其中两个主极和一个门极。它的表示符号如图1—7 (a)所示。定靠近门极G的那个主极为 T_1 (习惯上也称阴极,以K标记,另一个主极为 T_2 (也称阳极,以A标记)。双向晶闸管的伏安特性是对称的,如图中(b)所示。通常把 T_2 为正极性、 T_1 为负极性时的伏安特性画在第一象限,简称为I。反之, T_2 相对于 T_1 为负极性时的伏安特性画在第三象限,简称为III。双向晶闸管是一种交流器件,因而它的门极极性相对于 T_1 来说可为正亦可为负,不象SCR那样,门极只能用相对于阴极为正的信号。双向晶闸管不仅在第一、三象限都能导通,而且门极又可为正或为负,因此,可有四种触发方式:

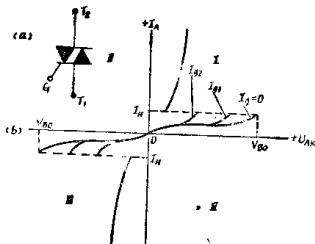


图1—7 双向晶闸管的静特性

- (a) 双向晶闸管的符号;
(b) 双向晶闸管的伏安特性。

方式1: 相对于 T_1 来说, T_2 和G的极性为正, 称I₊。

方式2: 相对 T_1 来说, T_2 极性为正、而G的极性为负, 称I₋。

方式3: T_2 极性相对 T_1 为负, 而G的极性为正, 称III₊。

方式4: T_2 和G的极性相对 T_1 均为负, 称III₋。

方式1、3对应于伏安特性处在第一、三象限, 而脚注符号“+”与“-”表示G的极

性相对于 T_1 为正与为负。四种方式的灵敏度各不相同，使用中应根据情况予以选择。

使用中应注意双向晶闸管存在换流能力问题。就是说，在某一方向导通以后，当立即转换到相反方向导通时，有可能失去反向保持阻断的能力。

双向晶闸管通常在交流电路中使用，因而不能用平均值表示其额定电流，而用有效值来表示。由于市电一般都在交流380V以下，所以双向晶闸管的额定电压较低。

三、逆导晶闸管

在逆变电路、斩波电路中，常将晶闸管和整流管反并联使用，根据这一应用上的要求，大约在1970年出现了逆导晶闸管。它是将晶闸管和整流管制作在同一硅片上的功率集成器件，它的等值电路、表示符号和伏安特性分别示于图1—8中的(a)、(b)和(c)。当阳极A为正极性、阴极K为负极性、门极G施加正信号时，其伏安特性与SCR相似，画于图1—8(c)中的第一象限。当阳极相对于阴极的电压为负时，它的伏安特性与整流管的正向特性相似，画于第三象限内。

逆导晶闸管有三大优点：

1. 由于结构上改进，使它能耐高压、耐高温，而且关断时间短。

2. 在逆变和斩波电路中，可用一个逆导器件代替反并联的晶闸管和整流管、缩小了体积。

3. 把晶闸管和整流管做在一块硅片上，因而消除了原来晶闸管与整流管反并联时的接线电感，从而使换流电路可做到小型化、轻量化。

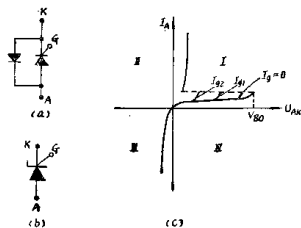


图1—8 逆导晶闸管的静特性
(a) 等值电路；(b) 代表符号；(c) 伏安特性。

因此，在使用时，使元件数目减少，装置的体积缩小、重量减轻、价格降低，经济技术指标得到提高。但与双向晶闸管一样，同样存在着换流能力问题。

逆导晶闸管的额定电流分别以晶闸管电流和整流管电流来标示，一般前者列于分子，后者列于分母，例如300/150A。通常，流过整流管部分的电流为流过晶闸管电流的1/3~1倍。

第二章 相控整流器

相控变流器的基本功能是通过晶闸管门极触发脉冲的相位控制,把交流输入电压变换成大小可调的直流输出电压。这种把交流电转变成直流电的过程称为整流。实现这种整流过程的变换装置称为整流器(或整流装置),或称一象限变流器。这是由于功率 P_d 的流向是从交流电网流向直流负载、变流器输出端的平均电压 U_d 和平均电流 I_d 均在第一象限内的缘故。但因工业应用上需要,要把直流电转变成交流电,这种对应于整流的逆向过程称为逆变。例如,采用晶闸管变流器的交-直流电力机车,当下坡道行驶时,使直流牵引电动机作为发电机运行,实现再生制动,把势能转变成电能,并把电能反馈到交流电网中去。这样,功率流向与整流运行时相逆,故称逆变运行。为了区别起见,把变流器的交流侧接到交流电网上的这种逆变叫做有源逆变;而把变流器的交流侧不与电网连接、直接接到负载上的逆变器,则叫做无源逆变。如果同一套晶闸管变流器既可整流、又能逆变,则叫做二象限变流器。它的电压极性可逆,而其电流因晶闸管的单方向导电性,仍然是单方向的,因此,该变流器可在第一、第四象限工作。若将两套二象限变流器反并联工作,便可组成能在 U_d - I_d 直角坐标系的四个象限工作的双重变流器,如图2-1所示。

在相控变流器中,晶闸管的关断是通过电网电压过零点这一特征来实现的,因而不需要专门用于关断晶闸管的附加电路,而且可以采用廉价的普通晶闸管。因此,相控变流器既简单又经济,在工业上得到广泛应用。

第一节 相控整流器的常用基本电路

变流器的电路型式繁多,常用电路示于图2-2,图中同时示出电阻负载下各主要参量的波形。

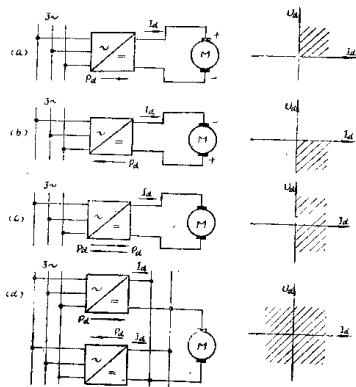


图2-1 变流器结构
(a) 整流运行变流器; (b) 逆变运行变流器; (c) 二象限变流器; (d) 四象限变流器。

一、整流电路的分类

(一) 以供电压的相数分, 有单相与三相电路。图 2—2 中的 (a)、(b) 与 (c) 属单相电路; 而 (d) 与 (e) 则属三相电路。

(二) 以整流变压器 TR 与半导体器件的联接方式分, 有 midpoint 引出电路 (亦称零式电路) 与桥式电路。图 2—2 中的 (b) 与 (d) 属零式电路; 而 (c) 与 (e) 则属桥式电路。

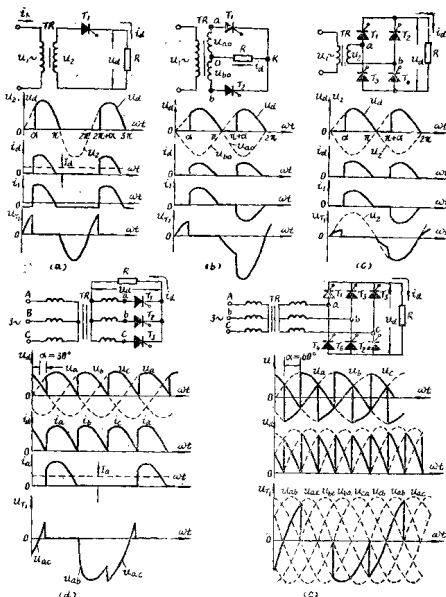


图 2—2 常用的基本电路及其波形

(a) 单相半波电路; (b) 单相零式全波电路; (c) 单相桥式电路; (d) 三相半波电路;
(e) 三相桥式电路。

(三) 以控制程度的差别分, 有不可控与可控电路。可控电路中又分全控与半控电路。如果图 2—2 中各电路的晶闸管都代以整流管, 就成为不可控电路。图 2—2 中半导体器件全部采用晶闸管, 则各电路均称全控电路。桥式电路中的晶闸管分成两组, 晶闸管的阴极连接

在一起的称共阴极组；而阳极连接在一起的称共阳极组，如果其中的一组晶闸管代以整流管，就成为半控电路。共阳极接法因螺旋式晶闸管的阳极接散热器，可将散热器联成一体，有使结构简化的优点，但三个晶闸管的触发器的输出线圈必须彼此绝缘。而共阴极接法因其门极可有公共地线，因此比较方便。所以，一般情况下共阴极组采用晶闸管，而共阳极组代以整流管来组成半控电路。对于单相桥式电路，也有把其中一臂的晶闸管代以整流管的情况，称为不对称半控电路。相对于该种电路来说，前者一组晶闸管代以整流管的电路，则称为对称半控电路。

(四) 按整流变压器 TR 次边每相绕组流通电流的方向分，有单拍与双拍电路。只有一个方向流通电流的，称单拍电路，如图2-2中(a)，(b)与(d)所示的电路。若正、反两个方向都可流通电流的，称双拍电路，如图2-2中(c)与(e)所示的电路。

(五) 如按负载获得电压的情况分，有半波与全波电路。只在整流变压器 TR 次边绕组每相电压的正半周时，负载才可得到电压的，称半波电路，图2-2中(a)与(d)的电路属之。若正、负两个半周负载都能得到电压的，称全波电路，图2-2中(b)、(c)与(e)的电路属之。

(六) 从变流器输出电压 U_d 波形的脉动次数来看，有单脉波、二脉波、三脉波与六脉波之分。由图2-2所示各电路的 $U_d=f(\omega t)$ 的波形看到，在电源电压一个周期内，变流器输出电压 U_d 的波形脉波次数、各电路有所不同。图2-2(a)的电路只出现一次脉波，故称单脉波电路。出现二次脉波的图2-2(b)与(c)的电路则称二脉波电路。以此类推，图2-2(d)称三脉波电路，图2-2(e)称六脉波电路。

除以上分类外，还有其他分类方法。此外尚有由上述基本电路组合而成的复合电路，如多段单相桥式电路、双反星形电路及十二脉波电路等等。

二、主要参量的波形

图2-2所示各电路的主要参量的波形图是基于下列假设而得出的：

1. 电源功率为无限大；供电电压是正弦而无畸变的，且三相电压是对称而平衡的。
2. 不计变压器的激磁电流；亦不考虑它的损耗，即认为它的漏抗和电阻均为零。
3. 电流只能在晶闸管的导通方向流通，此时不产生电压降，即正向电阻为零；在阻断方向不流通电流，即反向电阻为无穷大；在触发脉冲电压 u_g 未加到门极时，晶闸管在导通方向是阻断的，当 u_g 一到便立即正向导通，电流从一个晶闸管回路转换到另一晶闸管回路的换流过程是瞬刻完成的。

图2-2中晶闸管门极脉冲电压 u_g 的控制角 α 是从自然换流点算起的。所谓换流，是指电流从以前流有电流的回路过渡到原来没有电流的回路的过程。所谓自然换流点，是指晶闸管用不可控整流管代换后，整流管投入换流时的相角。对于单相电路而言，则是变压器 TR 次边电压过零的点；对于三相电路，则是次边各相电压的交点。

现以图2-2(c)所示的电路为例来说明各主要参量的波形。在这一电路中，要使负载上得到电压，必须在电源电压（亦即整流变压器输出电压 u_2 ）的上半周时晶闸管 T_1 与 T_2 同时导通，下半周时 T_2 与 T_3 同时导通。在 $0 \sim \pi$ 的范围内， u_2 正半周时， a 端为正、 b 端为负， T_1 与 T_4 受正向阳极电压作用，如果在 $\omega t = \alpha$ 时给 T_1 、 T_4 施加触发电压 u_g ，则两个晶闸管串联导通，直到正向阳极电压过零为止，与此同时 T_2 与 T_3 承受反向电压而处于截止状态。在