

高等学校试用教材

电机的电子控制及其特性

浙江大学 许大中 贺益康 编

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

1.2

机械工业出版社

前 言

随着电力电子技术的迅速发展,电机采用电子控制的场合日益增多。在国际上电机和电子控制装置一体化的产品已大量涌现,电机、电力电子技术和自动控制理论三者的有机结合为电机工业的发展开辟了新的前景。为适应当前电子控制技术迅速发展的需要,原机械工业部电工类教材编审委员会电机专业教材编审小组决定为电机专业编写一本电机电子控制方面的选修教材,本书即按编审小组审阅通过的大纲编写的。

本书除供高等工业学校电机专业高年级学生学习外,也可作为电机专业研究生和从事电机、电力传动设计、研究、运行工作的工程技术人员阅读和参考。

电机电子控制技术涉及面很广,内容十分丰富。总的讲大体可以分为能量变换,速度调节,励磁调节和伺服控制等几方面。由于同步电机励磁系统和控制微电机方面的内容电机专业已另有专门教材出版,故本书内容以能量变换、速度调节和电力电子装置供电下的电机特性分析为主,体现了电机技术发展的新趋势。

本书是作者前几年为浙江大学电机专业编写的选修课教材“电机控制”的基础上加以适当补充和修订而成。由于考虑到各校电机专业课程设置情况不同和为了便于从事实际工作的读者了解和掌握有关的内容,本书中对于电力电子技术和控制理论方面的一些基本知识也作了一定的介绍。

本书内容共分五章。第一章电机控制中应用的电力电子技术,扼要介绍了现代常用的各种电力电子器件以及各种典型的变流器和调节器,为后几章的学习打下电力电子学方面的基础。第二章为电力电子技术在直流电机控制中的应用,介绍了并励直流电动机的电枢调压调速和串励电动机的斩波调速技术,还介绍了直流电机调速系统的构成、工作原理,并且系统地说明了如何利用控制理论的基本知识对调速系统进行优化设计的方法。这也为其它各种电机调速系统的设计奠定了基础。此外本章内还就晶闸管供电直流电机的换向问题进行了讨论。第三章为无换向器电机,讨论了无换向器电机的基本原理、基本特性与其调速系统的构成和设计特点。第四章为电力电子技术在感应电机中的应用。它系统地介绍了感应电机调压调速,串级调速,变频调速,矢量控制,运行稳定性等问题,并对非正弦电源供电下感应电机的工作特点及设计问题进行了探讨。第五章为同步电机变频调速,介绍了同步电机变频调速的基本原理、工作特性和矢量控制技术,并对其运行稳定性问题进行了分析、探讨。

本书由浙江大学许大中教授、贺益康副教授编写。其中第一、第二、第三章和第四章的§4-1~§4-5由许大中编写,第四章的§4-6~§4-8和第五章以及附录I和附录II由贺益康编写。本书在原稿分送电工类教材编委会电机专业教材编审组各编委广泛征求意见的基础上,由华中工学院陶醒世教授主审,上海交通大学李仁定副教授参加审阅。他们对编写工作提出了宝贵的意见,编者对此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不当之处,恳切希望读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 电机控制中应用的电力电子技术	1
§ 1-1 电机控制中常用的电力电子器件	1
§ 1-2 相控变流器及其在电机控制中的应用	10
§ 1-3 直流斩波调压技术	19
§ 1-4 交流调压技术	23
§ 1-5 逆变器及其在电机控制中的应用	26
§ 1-6 交-交变频器及其在电机控制中的应用	36
§ 1-7 电子调节器	43
第二章 电力电子技术在直流电机控制中的应用	47
§ 2-1 直流电动机在晶闸管供电时的机械特性	47
§ 2-2 直流电动机的晶闸管调速系统	50
§ 2-3 直流电动机的斩波调速	60
§ 2-4 直流电机调速系统的动态特性及其优化	61
§ 2-5 晶闸管供电对直流电机换向的影响	78
第三章 无换向器电机	82
§ 3-1 无换向器电机的基本原理	82
§ 3-2 无换向器电机的基本特性	89
§ 3-3 无换向器电机的控制系统	93
§ 3-4 无换向器电机的设计特点	99
§ 3-5 无换向器电机原理在大型同步电动机起动中的应用	103
第四章 电力电子技术在感应电动机控制中的应用	105
§ 4-1 非正弦波电源供电时感应电机的工作特点	105
§ 4-2 感应电动机的调压调速	113
§ 4-3 感应电动机轻载调压节能技术	117
§ 4-4 电磁滑差离合器	118
§ 4-5 感应电动机的串级调速	121
§ 4-6 感应电动机的变频调速	133
§ 4-7 感应电动机矢量变换控制	162
§ 4-8 逆变器供电感应电机的选用和设计特点	177
第五章 同步电机的变频调速	182
§ 5-1 变频调速系统中应用的同步电机	182
§ 5-2 变频运行时同步电机的工作特性	186
§ 5-3 同步电机变频调速系统及其等值电路	189
§ 5-4 同步电机变频调速运行稳定性问题	194
§ 5-5 同步电机矢量变换控制	197
附录 I 坐标变换理论	202
附录 II 感应电机基本方程式	207

第一章 电机控制中应用的电力电子技术

§ 1-1 电机控制中常用的电力电子器件

自从1957年世界上第一个晶闸管整流器问世以来，电力电子器件有了飞速的发展，新型元器件不断出现。现在用得最多的是晶闸管和二极管。但是近年来，双向晶闸管，可关断晶闸管和大功率晶体管等也在电机控制中得到了广泛的应用。下面就对这些常用的元器件作一简要的介绍。

一、晶闸管

晶闸管整流器，曾称可控硅，外部有三个电极：阳极A、阴极K和控制极（门极）G。代表它的符号如图1-1 a所示。当阳极与阴极之间加一反向电压 u_{ak} （阳极为负，阴极为正）时，其特性和二极管承受反向电压时的情况基本相同。而当阳极和阴极之间施加正向电压而又不太高时，若门极上不加控制信号（ $I_g = 0$ ），则晶闸管的正向电流 i_a 也是很小的，管子处在正向阻断状态；但是若在受正向电压的情况下，在门极上通入一定数量的触发电流（ $I_g > 0$ ），晶闸管的正向电阻会变得很小，管子就进入导通状态。一般晶闸管的阴极伏安特性如图1-1 b所示。晶闸管与晶体管不同，在触发导通后门极电流就失去控制作用，只要经过晶闸管的负载电流不小于所谓维持电流（根据管子大小不同，一般为几十到几百毫安），即使门极电流消失，管子仍能保持导通。这样晶闸管的门极电流就没有必要长时间存在，所以可以采用脉冲的形式。这可显著降低触发所需的功耗，提高晶闸管装置的功率放大倍数。但是上述的特性同时也使得一般的晶闸管不可能像晶体管那样能通过控制它的门极电流来切断负载电流，它失去了自关断能力。为了使晶闸管关断，必须从外界采取措施，让通过晶闸管的电流下降到零，通常使其承受一定时间的反向电压。常用的关断办法有下列几种：

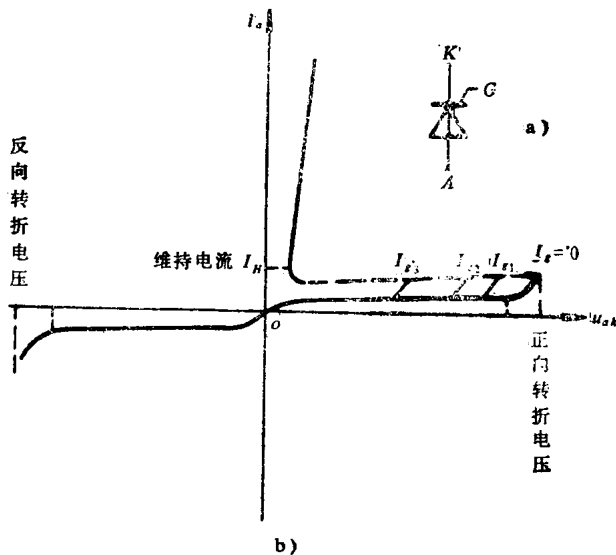


图1-1 晶闸管的符号及阳极伏安特性

(1) 让通过晶闸管的电流减小到维持电流以下，使其自然关断。这种方法一般称为电流断续法。其最简单的例子是在某些直流辅助电路中接有一个电容器，当电容器电压达到电源电压时，流经晶闸管的电流将下降到零，管子就自行关断，如图1-2 a。

(2) 利用电源电压或负载的反电势来关断晶闸管。这是一般整流电路和有源逆变电路

中常用的办法。例如图1-2 c, d中绘出了三相整流电路的接线图和电压波形图。在晶闸管 T_1 导通时,如在电势 e_b 高于 e_a 的时刻(图中画了直线条的范围内)触发晶闸管 T_2 ,则 $e_b - e_a$ 作为反向电压加于 T_1 上,使它关断。

(3) 利用电容器上充电电压进行强迫换流(关断)。这是在一般逆变器和斩波器中最常用的办法。图1-2 b绘出了一种最简单的电容强迫换流电路。在晶闸管 T 没有导通时,电源经负载电阻先对电容器 C 进行充电,其极性如图所示。而当晶闸管触发后,在电源对负载供电的同时,电容器 C 经晶闸管 T 和电感放电,产生自由振荡,经过半个周期后,电容器上电压极性变反,成为右正左负,然后又反向放电,使流过晶闸管 T 的电流减少。

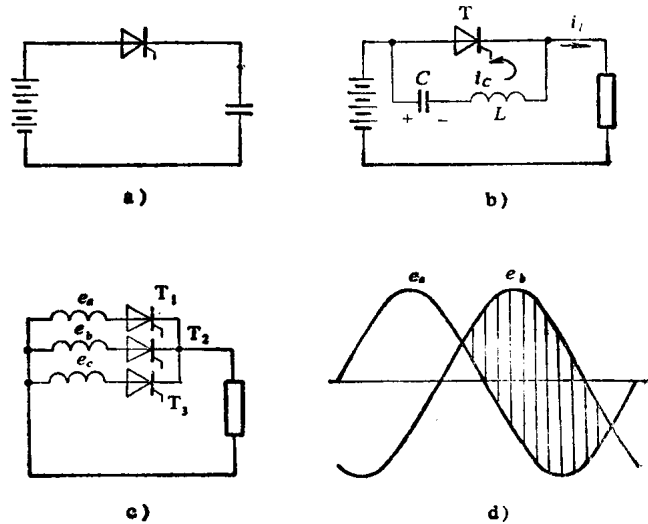


图1-2 换流方法

少。当反向放电电流 i_c 达到负载电流 i_l 时,实际流经晶闸管 T 的电流将下降到零,于是 T 就关断。利用电容器强迫关断的方案很多,在下面有关章节中将再作进一步的介绍。

为确保晶闸管的可靠关断,晶闸管元件的关断时间是一个十分重要的参数。所谓关断时间,指的是从晶闸管的负载电流下降到零时起,到管子完全恢复正向阻断能力时止所需的时间。由于晶闸管在导电时元件内部有大量的载流子存在,当电流降到零以后,这些剩余的载流子需要有一定的时间,进行扩散和重新组合才能逐渐消失,从而使管子恢复阻断能力。根据元件类型、承受的反向电压和结温的不同,关断时间少的几个微秒,多的高达400 μ s左右。现在通常把关断时间 t_c 在40 μ s以上的归属普通晶闸管,只能用于一般的工频相控整流和有源逆变电路等换流过程比较缓慢的场合。大多数的逆变器,斩波器中应用的晶闸管,要求是快速晶闸管,其关断时间都在40 μ s以下,有关快速晶闸管的问题将在下面进行讨论。

晶闸管在承受反向电压而开始关断的过程中,由于原先有载流子存在,在反向电压作用下,短时间内会有反向电流流通。但是随着原先存在的载流子很快消失,反向电流突然中止,电流的变化率 $\frac{di}{dt}$ 可能很高。由于晶闸管的接线里存在着一定的电感,可能引起相当高的电压(图1-3 a),反向施加在晶闸管上,引起元件的损坏。为此在实用上,在大功率晶闸管元件的两端都要接吸收电容加以保护。但是若电容直接并接在晶闸管上,则当晶闸管触发导

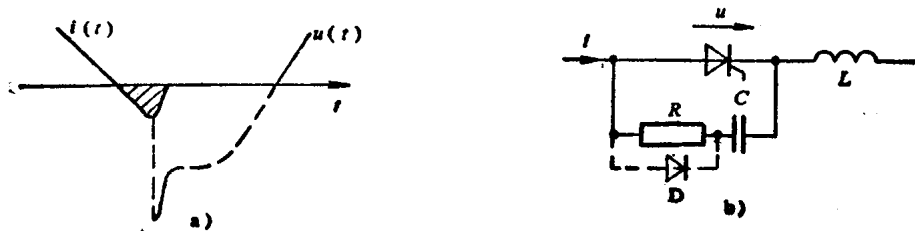


图1-3 晶闸管关断时的浪涌电压

通时，电容器将直接经晶闸管放电，其放电电流可能会很大。为此通常串一个电阻加以限制。有时为了更好地利用这个电容来限制晶闸管上可能出现的正向电压上升率 du/dt ，在电阻两端还并有二极管 D （图1-3 b）。为了充分发挥阻容吸收电路的作用，它们与晶闸管间的连接线应尽量短，使电感尽可能地小。

二、双向晶闸管

一般的晶闸管由于它的单向导电性，当应用于交流电路控制时，通常需要采用两个元件背靠地联结，即所谓反并联的办法（图1-4 a）才能保证电流能沿正反两个方向流通，这种用法比较麻烦。双向晶闸管（TRIAC）的功能和两个反并联的晶闸管十分相似。它是一个三端子的PNPN元件，其符号如图1-4 b所示，可直接工作于交流电源，允许正反两个方向的电流通过，其控制极 G 对电源正反两个半周均能起触发控制作用，它应用在交流电路的电力控制方面，比一般晶闸管简单、方便。

双向晶闸管的主要特性如下：

（1）当双向晶闸管的控制极上无信号输入时，端子 A_1 、 A_2 之间呈高阻抗，双向晶闸管处于截止状态。

（2）若端子 A_1 、 A_2 之间施加电压，不论其极性如何，只要其值在 $1.5V$ 以上，即可利用门极触发电流来控制其导通。

（3）双向晶闸管和普通晶闸管一样，一旦触发导通后，门极即失去控制作用。除去触发信号同样不会导致双向晶闸管关断。

（4）只有降低端子 A_1 、 A_2 间的外加电压，使流经双向晶闸管的电流降到维持电流以下时，方能关断双向晶闸管。由于双向晶闸管工作于交流电源，当每一半周交替之际，一般能恢复截止状态。但是在感性负载的情况下，电流相位滞后于电压，在电流过零、晶闸管关断的瞬间，反向电压的瞬时值可能已达到相当大的数值，这个反向电压的突然出现在管子的两端，可能会引起管子立即反向导通。所以双向晶闸管必须具有承受这种突然出现的反向电压的能力，为此通常在双向晶闸管两端接有 RC 吸收回路，可以在一定程度上防止这种误导通现象的出现。

（5）双向晶闸管门极触发信号的极性与 A_1 、 A_2 之间的电压极性无硬性对应关系，也就是说正负极性的触发信号均能使双向晶闸管导通。但是所需触发电流的大小则依其极性的不同而有所不同。一般当门极的触发电压极性与阳极 A_1 极性相同时，所需触发电流较小，而在 A_2 为正， A_1 为负时加正向触发信号，触发灵敏度最差，导通所需时间最长。所以在实用上如同极性触发信号，一般均采用负脉冲触发。

双向晶闸管的主要用途是调节交流电压和用作交流无接点开关。它可用于对交流感应电机实行调压调速或用于降低电机的空载功率损耗。双向晶闸管的典型控制线路将在 §1-4 中加以说明。

三、快速晶闸管

普通晶闸管的关断时间比较长，一般在 $50 \sim 100\mu s$ 以上，只能用于 $50 \sim 60Hz$ 工频电源的控制。对于通常的电力逆变器和斩波器，由于一般都是采用电容强迫换流，在这些情况下，不仅晶闸管关断时间的长短直接影响着所需换流电容的大小，而且在管子开始导通时电容器

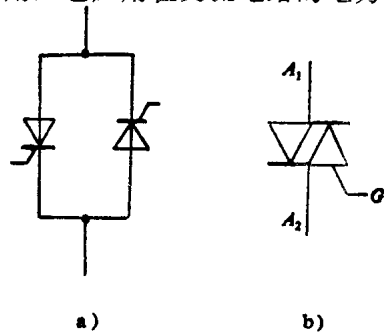


图1-4 双向晶闸管的符号

上所充的电荷将经管子而快速放电, 电流的上升率 di/dt 可能相当大。此外, 随着一个管子的导通, 某些电容器上的电压往往会通过导通的元件实加到其它处在阻断状态的管子上, 其电压上升率可能相当高。所以对采用电容强迫换流的逆变器中所用的晶闸管, 无论在关断时间或承受电流、电压上升速度方面都提出了较高的要求。在这些场合一般要求采用所谓快速晶闸管。

快速晶闸管分为两种: 一种是低频快速晶闸管, 它只适用于400Hz以下的电源。它的基本构造和普通晶闸管相同, 只是通过适当选择扩散到硅片中的杂质金属元素, 缩短少数载流子的寿命, 以减少晶闸管的关断时间, 使它一般能降到20μs左右。另外在门极布置方面也作了适当的改进, 特别是采用所谓放大门极的结构, 增加晶闸管初始导通区的面积, 显著提高管子承受 di/dt 的能力。所谓放大门极, 它的作用相当于图1-5所示的等效电路。这种晶闸管的门极结构本身相当于一个特殊的小晶闸管。当门极通入一个微小的电流时, 这个小晶闸管很快导通, 它对主晶闸管而言, 相当于一个放大的门极, 能促使主晶闸管的阴极上在较大范围内开始比较均匀地导电, 从而使管子的 di/dt 定额大幅度地提高。

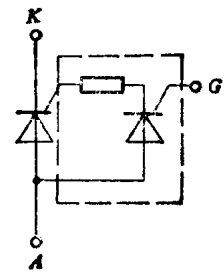


图1-5 放大门极示意图

另一种是高频快速晶闸管, 它能适用于400Hz以上的电源。它的关断时间与低频快速管相差不多, 也在20μs左右, 但是这种管子由于采用了形状比较复杂的放大门极结构, 使门极深入到了阴极的内部, 当管子触发导通时, 使电流能很快地分布到整个阴极, 降低了导通部分的电流密度, 可以大幅度减少开关损耗, 使元件能适应于较高的频率(几千赫)。

近年又出现一种叫作门极辅助关断晶闸管(GATT)元件, 这种晶闸管元件除采用一般的强迫换流措施外, 在换流时还在其门极(控制极)和阴极之间加一反偏压, 直至元件再次承受正向电压为止。这种门极辅助关断晶闸管的关断时间可以作得很短, 一般在10μs以下。可用于几千赫到几万赫的大容量设备中。

四、逆导型晶闸管

在逆变器和斩波器电路中经常用到由一个晶闸管和一个二极管反并联在一起组成的电路, 如图1-6中所示的电压型逆变器的原理线路图中, 当负载呈电感性时电流相位滞后, 有一部分无功功率将在负载与电源之间来回传送: 在一段时间内电压、电流同向, 功率送至负载; 而在另一段时间内电压和电流方向相反, 功率返回至电源。但是这个反向电流不可能通

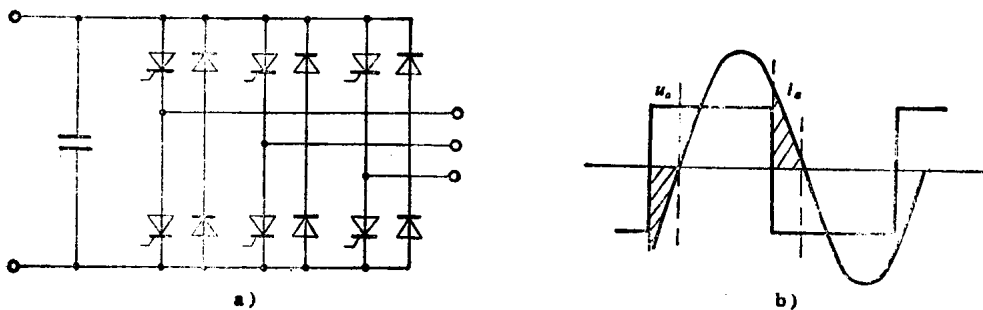


图1-6 电压型逆变器原理图

过晶闸管倒流，需要在晶闸管两端反并联一个二极管才能为这个无功电流提供通道。这个反并联在一起的二极管和晶闸管就可以用一个一体化的逆导型晶闸管来代替。

采用逆导型晶闸管，可以减少元件的数量，简化接线。而且就管子内部结构来讲，由于不需要承受反方向的耐压，同样的硅片可以制成耐更高电压和具有较短关断时间的元件。

在逆阻型晶闸管中，为了关断，需要在管子的阳极和阴极之间加反向电压；而逆导型晶闸管要使它正向关断，则需通以反向的电流。为保证晶闸管关断所需要反向通电流的最小时间称为逆导型晶闸管的关断时间。一般说来，为关断逆导型晶闸管所需的电容和电感比普通的逆阻型晶闸管小，逆导型晶闸管的耐压可以作得比较高，达2500V以上，而它的关断时间也比较小，通常在20~50μs之间，属于快速管。

五、可关断晶闸管(GTO)[⊖]

由于一般的晶闸管没有自关断能力，在通常的逆变器和斩波器中都需要采用复杂的电路来实现晶闸管的换流(关断)，这往往使这些设备的价格上升，使用和维护困难。可关断晶闸管和一般的晶闸管不同，它既可以通过在门极施加正向电流脉冲使管子导通，也可以通过施加反向的电流脉冲使它关断，这样就可使逆变器和斩波器的电路大大简化。但是与一般晶闸管相比，可关断晶闸管所需的触发电流比较大，管子的导通压降也比较高。特别是它的维持(掣住)电流比普通晶闸管大得多。这在电感性负载和负载电流变动较大的场合必须加以注意。此外，这种元件承受电压上升率的能力也比较差，常可能由于外来的干扰引起误动作。为了防止这种误动作的发生，一般在关断期间需在门极和阴极之间加一定的反偏压。

可关断晶闸管虽然通过在门极输入反向电流脉冲可以使管子关断，但是电流的关断增益比较小，一般只有5倍左右。也就是说，要关断100A的阳极电流，可关断晶闸管的门极电路中至少需要输入20A左右的负电流脉冲。当然这个负电流所要求持续的时间是很短的，因此门极功耗还是很少的，管子的功率增益往往可以达到 $10^3 \sim 10^5$ 。这里需要指出的是，由于可关断晶闸管被广泛应用于脉冲工作状态，特别是在占空比较小的场合，尽管平均电流远远小于额定值，其瞬时峰值电流却可能已超过了最大的阳极可关断电流，从而发生关断失败的现象，这也是需要注意的。

总的说来，对可关断晶闸管的门极信号要求是比较严格的。为加快导通过程，与普通的晶闸管一样，门极触发信号应该有较大的幅值和较陡的脉冲前沿，以实现强触发。至于触发脉冲的宽度，需要特别考虑到维持电流比较大的问题，即触发脉冲必须加宽到足以使主回路电流达到或超过维持电流的数值，否则元件就不能维持大面积导通。这一点在负载为电感性的情况下尤须注意。在某些特殊运行状态下，如果主电流可能有较大的变化，甚至会瞬时降低到维持电流以下，为防止管子自行关断，在可关断晶闸管的门极上还需要继续保持有门极电流流通。

至于门极关断信号，则要求更高。因为在采用门极关断的过程中，在管子内部存在着一个二维的导通区收缩过程，此时可能在阴极的局部地区出现电流密度骤增的现象。如果负门极信号不是足够大，将引起元件局部烧毁。这一现象和普通晶闸管导通时电流密集在门极附近的某一地区很相似，但现在局部烧毁是发生在关断的过程中，烧毁点发生在远离门极周界的地方。为此对门极关断信号要求前沿陡，幅值高，能形成一个“强关断”过程。关断增益应按2~5考虑，而脉冲的宽度一般可取可关断晶闸管关断时间的2~3倍，以保证元件内过剩载流子能彻底清除。由于可关断晶闸管的关断时间比普通晶闸管小得多，一般都在25μs以下，

[⊖] 图中代号为T_g。

有的只有几个微秒，所以尽管脉冲电流的幅度很大，但是实际功耗还是很小的。

门极负脉冲的后沿要求尽量平缓，否则由此引起的位移电流有可能使可关断晶闸管再次导通，或降低管子的正向耐压。

由于可关断晶闸管具有比普通晶闸管大得多的门极面积，因此能承受比普通晶闸管大得多的平均和脉冲功率。在瞬时的情况下甚至可以通过与阳极主电流相同的电流幅值，使电流增益接近于1。在此情况可获得很短的关断时间（1~2 μ s）。

可关断晶闸管的门极触发电路分为单电源和双电源两种，典型的线路如图1-7 a、b所示。单电源方式只要一个电源，当晶体管 T_1 导通时，一方面可关断晶闸管 T_G 触发导通，同时也对电容器 C 进行充电。而当晶体管 T_2 导通时，利用电容器 C 中贮存的电量，在其放电的过程中将 T_G 关断。由于电容器 C 的充电电压根据不同的晶闸管可以选择得比较高，常达几十伏，所以关断脉冲信号的前沿可以有一定的陡度，这有利于快速关断。并且电容器上的电压和放电电流是随着关断进程而逐渐下降的，能基本上符合门极供电的要求。但是单电源方式与两电源方式相比，电路比较复杂，对电源电压的波动比较敏感，而且电路损耗较大，不适宜于高频工作。一般多用于容量不大的GTO触发线路。对于大容量装置常用两电源方式。用两个门极电源，虽然电源数增加了，但是电路简单，工作特性较好。

由于可关断晶闸管门极触发电流较大，一般在小容量设备中尽量采用脉冲发生电路与GTO门极电路直接连接的办法，不用脉冲变压器。这样各门极电路及其电源都得相互绝缘。但是大电流的可关断晶闸管的触发电流，特别是门极关断电流很大，而门极电源的电压从门极安全考虑不能太高。由于门极回路中总有一定的电感，这样就难以保证门极电流有足够的电流上升率（前沿），因此在这种情况下就不得不采用脉冲变压器，通过提高变压器一次电压的办法来保证门极脉冲电流的上升率。

对于可关断晶闸管，接在阳极和阴极之间的阻容吸收电路尤其重要。因为在晶闸管关断的过程中，阳极电流要转移到阻容吸收电路中去，对电容进行充电（图1-8），由此限制了可

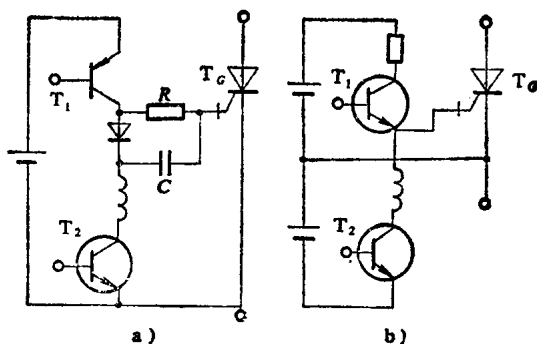


图1-7 GTO的门极电路

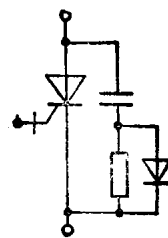


图1-8 GTO阻容吸收电路

关断晶闸管两端的过电压，这对防止GTO关断以后因电压上升率 du/dt 过大而误导通有很大的作用。阻容吸收回路电容量的大小直接影响到可关断晶闸管能关断阳极电流的能力（图1-9）。一般地说，电容量大，关断电流的能力也会有所增强。但是由于电容器在充电以后当GTO再次导通时，它所贮存的电荷将经电阻 R 而释放，要消耗能量。电容愈大，损耗就相应地增加，这是不利的。特别是对于工作在高频的GTO，例如脉宽调制型（PWM型）逆变器

中采用的GTO, 这一点特别需要加以注意。

吸收电路除了电容量的大小对GTO的关断能力有相当影响以外, 另一个尤为重要的因素是吸收电路中所具有的电感量。因为在电流关断过程中晶闸管上出现的尖峰电压正是主要决定于阳极电流的减少率 di/dt 和吸收电路中电感量 L_a 的乘积。为了抑制电流关断时的尖峰电压, 吸收电路中的电感量应尽量地小, 引线应尽量地短。

六、双极型大功率晶体管(GTR)[⊖]

近年来随着电子工业生产水平的不断提高, 大功率晶体管开始在中小型电机的调速、控制方面起着愈来愈重要的作用。大功率晶体管由于它本身具有关断能力, 不需要换流电路, 线路简单, 体积小, 且其开关速度快, 开关损耗小, 工作频率可以比晶闸管和可关断晶闸管提高一个数量级。非常适用像脉宽调制(FWM)型逆变器这一类需要高频切换的场合。现在国际上高压大电流的双极型大功率晶体管已达到1000V、400~600A的水平。而且近年来由于提高了对晶体管并联使用时电流分担机理的认识, 在晶体管并联技术方面有了长足的进步。这样, 大功率晶体管电路所允许承受的负载电流实际上已可达1000~1500A的水平, 由大功率晶体管所构成的逆变器容量可达300kVA以上。

目前大功率晶体管逆变器的不足之处是它的驱动功率比较大, 功率放大倍数小, 承受过电压和过电流的能力低, 且价格比较贵。但是上述的问题随着生产水平的提高将逐渐得到解决。

由于大功率晶体管在电力电子线路中主要是起开关作用, 管子的导通与关断直接由基极电流加以控制。为了加快导通速度, 减少开通损耗, 需要增加基极电流。但是基极电流过大, 管子过于饱和, 又会导至关断时间延长, 关断损耗增加。理想的情况是要限制基极电流的大小, 而且它的电流波形最好如图1-10所示。在使晶体管导通的最初时刻电流 I_{B1} 有一尖峰, 以加快管子的导通过程。而当要求关断晶体管时, 在基极与发射极间应加一反偏压, 使在基极上通过一个反向电流 I_{B2} , 以加快关断的过程。为了防止晶体管过分饱和, 可在晶体管基极和集电极之间加一个基极电流限制二极管 D_1 (图1-11a)。当基极电流超过一定大小后, 二极管起分流作用, 限制了管子的饱和程度。根据以上的要求设计的一种能获得反向基极电流 I_{B2} 的电路如图1-11a所示。驱动信号加在s点上。当s为正时 T_1 导通、 T_2 关断, 大功率晶体管T的基极电流经 T_1-RC-R_b 而流通。因为电容C上原先充有右正、左负的起始电压, 它经T放电, 然后反向充电, 基极电流具有如图1-10所示 I_{B1} 的理想波形, 使T很快导通, 并进入饱和, 随之它的集电极电压 u_c 将降低, 二极管 D_1 将起阻止管子饱和度的作用, 于是T就一直保持在接近于临界饱和状态。若s点信号电压变负, T_1 关断、 T_2 导通。这时由于电容C的两端具有左正右负的初始电压, 它和电源电压 E_2 串联起来经过T的e-b结和 R_b 而放电, 形成

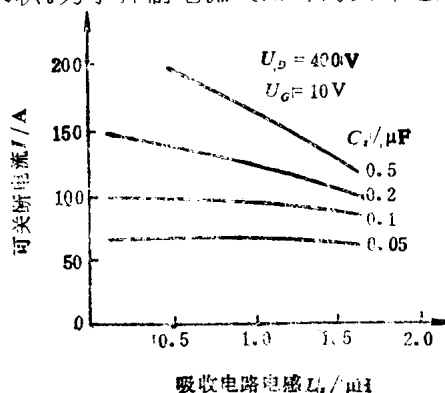


图1-9 吸收电容对关断能力的影响

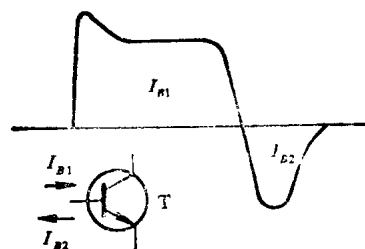


图1-10 基极电流的理想波形

[⊖] 图中代号为T。

I_{B2} ，以加速管子的关断。在一些频率不太高的逆变器中关断时间不是主要问题，当然可以采用比较简单的驱动电路如图1-11 b、c所示。

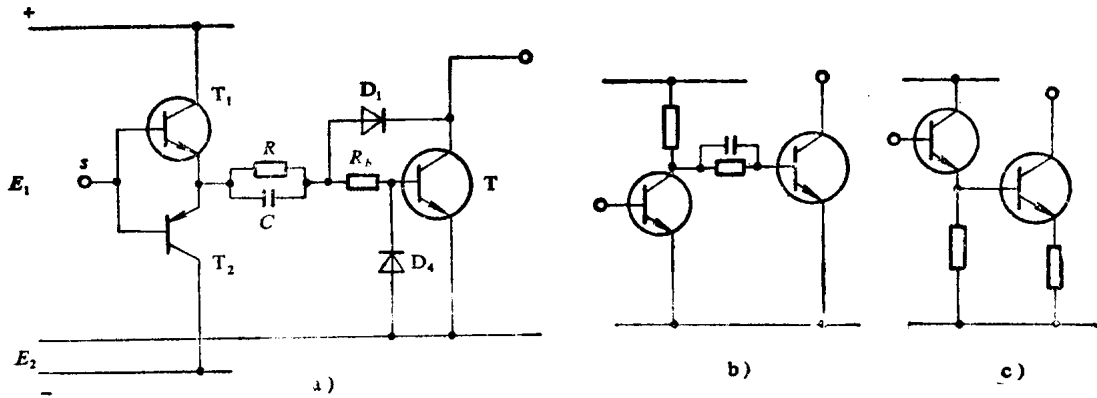


图1-11 GTR的驱动电路

由于大功率晶体管耐浪涌的能力低，特别是在大功率晶体管中有一种所谓二次击穿的现象：当集电极电压高到某一数值时，集电极电流会突然急剧增长，使管芯局部受热而熔融，造成永久性破坏。为此大功率晶体管的保护问题显得十分突出。

大功率晶体管用于开关电路，控制对象多数具有电感性。所以必须设置续流二极管，以便为负载电感中的能量提供释放的通路。此外为了防止在开关过程中线路上的杂散电感上可能出现的过电压，通常在大功率晶体的两端都需要接阻容吸收电路加以抑制。阻容吸收电路同时还有限止管子上电压变化率 du/dt 的作用。

大功率晶体管的过流保护尤须注意。由于工作在开关状态的大功率晶体管，一般基极电流都控制在一定范围，使管子接近临界饱和状态，不致过分饱和。如一旦线路发生故障，突然产生过大电流，则晶体管就有可能退出饱和区，使管子的功耗大幅度增加，有可能危及管子的安全。为此必须在过载时能很快切断基极电流，以保护大功率晶体管。

七、功率场效应管(Power MOSFET)

近年来国际上在大功率的金属—氧化物—半导体场效应管（简称MOSFET）方面有很大的发展，场效应管和一般的双极型晶体管不同，它是一种电压控制器件，并且是只依靠半导体材料中的多数载流子来实现导电的，所以它具有许多突出的优点。通常MOSFET分耗尽型和增强型两种，其转移特性如图1-12所示。耗尽型场效应管的特点是在栅极控制电压 $U_{GS}=0$ 的情况下，管子已能导电，只有在栅极—源极之间加了负电压以后才能使管子关断。与此相反，增强型场效应管，当它的栅极—源极间不加正向电压，管子是不通的，只有在栅—源之间加了一定的电压 U_{GS} 后管子才能导电。这种管比较适宜于作为开关管，所以大功率的MOSFET主要是采用增强型，其符号如图1-13 a所示。增强型MOSFET的漏极特

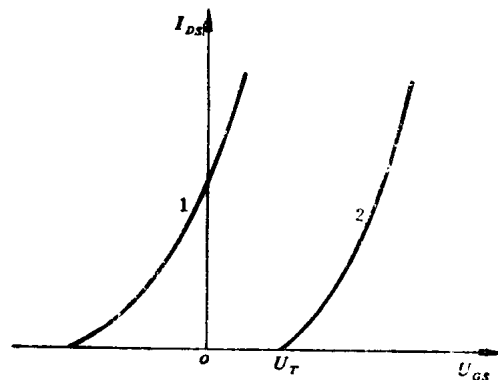


图1-12 MOSFET的转移特性

1—耗尽型 2—增强型

性如图1-13 b。

大功率MOSFET的主要优点在于：一方面因为它是电压控制器件，它的输入阻抗很大，吸取的电流很小，驱动功率也比较小，另一方面，特别是由于它只是依靠多数载流子导电的，它的性能比较稳定，不容易受温度、辐射等外界环境因素的影响，而且具有负的温度特性，即当温度升高时管子中通过的电流会自动减少，其不同温度时的转移特性如图1-14所示。由于这个特性，MOSFET内部就不会出现在双极型晶体管中经常发生的二次击穿现象，而且在实际使用上它变得非常适合于多个元件并联使用。并联的各个元件即使特性稍有不一致，各个管子分担的电流总是会自动趋于均衡。所以用大功率MOSFET组装的设备可以作到有较大后备容量，以提高系统的可靠性。此外，在场效应管里面由于靠多数载流子导电，没有所谓少数载流子的积蓄效应，动作比较快速。它的不足之处是它导通时的内阻比较大，正向压降比较高。为了降低导通时的内阻，改善管子的特性，MOSFET采用了种种不同的结构，如V—MOS，D—MOS，T—MOS等。但是一般说来场效应管单个管子的电流定额不大，通常只有几安到几十安。需要输出大电流时往往采用多个元件并联的办法。

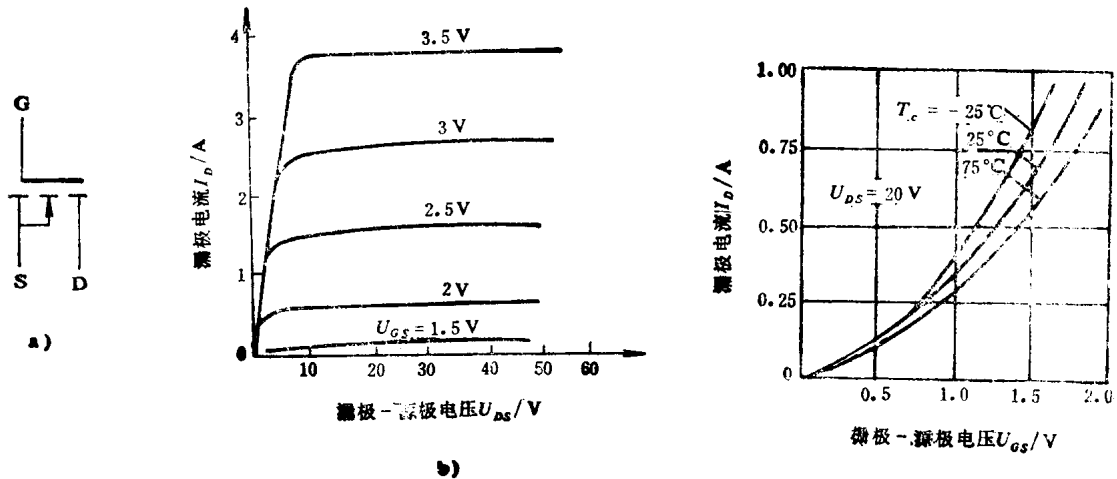


图1-13 MOSFET输出特性

图1-14 温度对功率MOSFET的转移特性的影响

功率MOSFET的栅极驱动电路比较简单。但为了发挥它的快速开关作用，驱动电路也要求有快速性，特别是要求能把场效应管绝缘栅上的电荷迅速释放。由于场效应管的驱动电流很小，所以驱动电路可以采用直接联结的办法，也可以通过脉冲变压器进行传输，其代表性的驱动线路如图1-15所示。图1-15 a为最简单的驱动方式，图b为带正反馈的驱动线路。当有信号输入时，驱动场效应管 T_1 ，使其导通，在变压器线圈 n_1 、 n_3 上电压的极性如图中所示。 n_3 上电压经电阻 R 对 T_1 栅极加正反馈，加速对栅极输入电容充电。而当要求关断时， T_3 导通， T_1 因栅极接地而关断。图c为经脉冲变压器驱动的线路，在 T_3 关断时依靠变压器中回扫电压（其极性如图所示）使 T_2 导通，把 T_1 栅极接地，以保证它的输入电容上的电荷迅速放电。

电力电子器件的种类很多。以上介绍的只是一些主要的、比较常用的元件，它们各有长处。在电机控制方面普通晶闸管是最主要的电力电子器件，它广泛应用于相控整流、直流电机调速系统，以及各种容量的交流传动装置中。特别是在大容量的交流传动系统，目前多采用无换向器电机和串级调速，使用的电力电子器件主要就是高压的普通晶闸管。高速晶闸管

主要用于中等容量的感应电机变频调速系统，因为作为变频电源的逆变器通常采用电容强迫换流，对晶闸管的快速性要求较高，普通晶闸管难以胜任，必须采用快速晶闸管元件。可关断晶闸管具有良好的快速性和自关断能力，目前已开始广泛应用于中等容量感应电机的脉宽调制式变频调速系统，而在小型电机调速方面，现在国外几乎都已采用大功率晶体管和大功率MOSFET，但是目前国内在高速、自关断元件的供应方面还受到限制。在中小型电机的控制中还一直采用晶闸管元件。

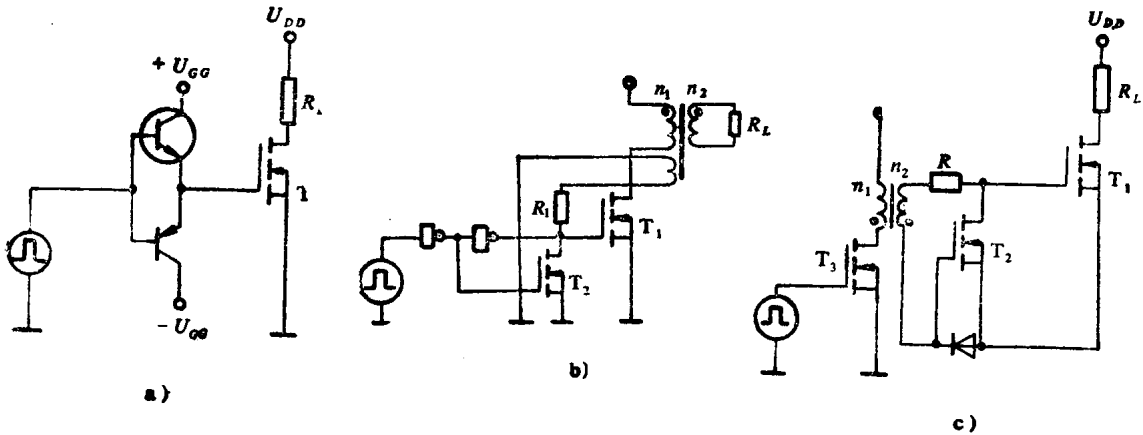


图1-15 功率MOSFET栅极驱动电路

§1-2 相控变流器及其在电机控制中的应用

利用半导体整流器的单向导电性构成的最简单变流器电路是单相半波整流电路，如图1-16 a所示。在电源电势 u 的正半周，通过调节晶闸管的触发相位——移相角 α ，可以改变施加到负载 R 上的电压波形。若负载为纯电阻，单相半波整流桥的输出电压波形如图中波形所示(图1-16 d)，电流与电压的波形相同。当电压瞬时值过零点时，负载上的电流也为零。而当电源电压反向时，由于晶闸管的单相导电性，反向电流不能流通，于是晶闸管关断，负载上的电压为零。电源的电压全部作为反向阻断电压施加于整流器的两端。所以在单相半波整流时负载上的电压平均值 U_d 为

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U \sin \omega t d\omega t = 0.45U \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) \quad (1-1)$$

从图1-16显然可见：在纯电阻负载的情况下，作为整流电路，晶闸管移相角 α 的调节范围为 $0 \leq \alpha \leq \pi$ 。当 $\alpha > \pi$ 时，由于晶闸管处在承受反向电压的条件下不可能被触发导通，所以输出电压为零。

如采用全波整流(图1-16 b)或桥式整流(图1-16 c)，则在电阻负载的情况下输出电压和电流的波形如图1-16 e所示。电流仍是不连续的，而输出电压的平均值将为单相半波整流时的两倍，即

$$U_d = 0.9U \frac{(1 + \cos \alpha)}{2} \quad (1-2)$$

全波整流和桥式整流相比，前者所用晶闸管元件的数量比较少，但在同样输出电压的条

件下它所承受的反向阻断电压却高一倍。因为在全波整流电路中，变压器有两个电压为 u 的绕组相串联，它们一起把反向电压加在关断的晶闸管上。此外变压器绕组要中间抽头，利用率也比较差，所以目前实际上用得比较多的是桥式整流(图1-16 c)。

在全波和桥式整流的情况下，晶闸管承受电压的情况和半波整流时相类似，也是在承受正向电压时触发导通，而在不通电时，大部分承受的是反向电压。

当整流桥用来对直流电动机供电时，负载中除了含有电阻以外，还有反电势 E (图1-17a)。在这种情况下，只有当电源电压瞬时值大于反电势 E 时晶闸管才有可能触发导通。在其余时间里晶闸管承受的是反向电压，电流不能流通。这样电流导通的时间就缩短了。电流不连续的情况将变得更严重。由于反电势的存在，即使在晶闸管关断的时间里，整流器的输出电压并不是零，而是等于负载的反电势。这样，在反电势负载的情况下，尽管晶闸管导通的时间短了，但是整流器的输出电压却反而提高了(图1-17 b)。

如在负载回路中除了反电势以外还串有电感，例如在直流电机的电枢回路中往往接有一个相当大的平波电抗器，这时则由于电感中贮存的能量的释放，它有可能延长电流持续的时间，使晶闸管在 $U_a < E$ 的区间继续维持导通，甚至使电流连续不断。

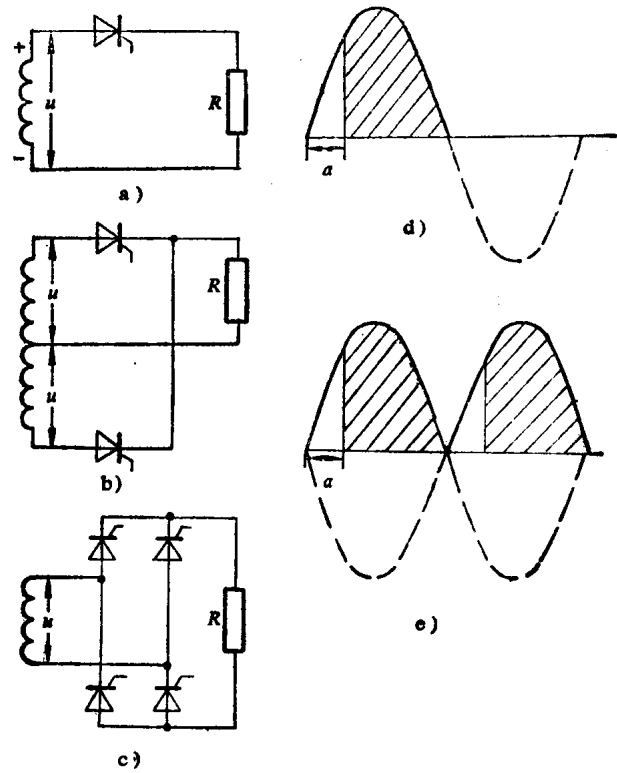


图1-16 相控整流器

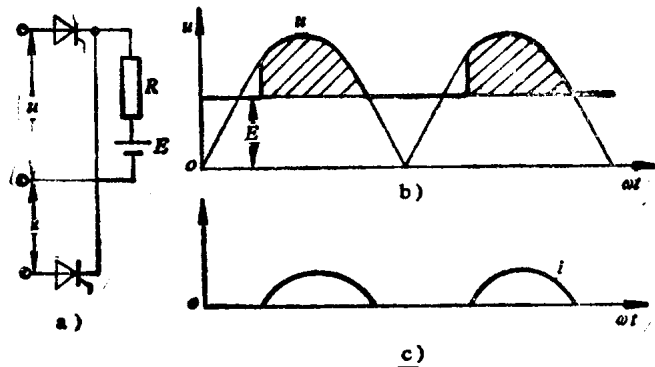


图1-17 反电势负载时整流器的工作情况

下面分析负载电路里有电感和反电势同时存在的情况。假如晶闸管触发瞬间电源电压大于反电势，即 $\sqrt{2} U \sin \alpha > E$ ，则晶闸管可以触发导通(图1-18)，于是可以写出电路方程

式如下：

$$L_D \frac{di_d}{dt} + R_D i_d = \sqrt{2} U \sin \omega t - E \quad (1-3)$$

设若开始导通瞬间 $i_d(\alpha_1) = 0$ ，则根据这个边界条件可以求得 (1-3) 式的解为

$$i_d(\omega t) = \frac{\sqrt{2} U}{R_D} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega T_D)^2}} \times \{ \sin(\omega t - \tan^{-1} \omega T_D) - e^{-(\omega t - \alpha_1) / \omega T_D} \times \sin(\alpha_1 - \tan^{-1} \omega T_D) \} - \frac{E}{R_D} (1 - e^{-(\omega t - \alpha_1) / \omega T_D}) \quad (1-4)$$

式中 $T_D = L_D / R_D$ 。

如在某一 $\omega t = \beta_1$ 的瞬间电流 $i_d(\beta_1) = 0$ ，而 $\beta_1 < (\alpha_1 + \pi)$ ，则晶闸管又将关断，且电流一直保持为零，直到 $\omega t = \alpha_1 + \pi$ ，另一个晶闸管触发导通为止。在这种情况下通过负载的直流电流是不连续的，是一个一个的脉冲，而电流的平均值 I_d 与一系列参数有关：

$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha_1}^{\beta_1} i_d(\omega t) d\omega t = f(\alpha, U, \omega T_D, R_D, E) \quad (1-5)$$

在有足够大的电感情况下，若把移相角 α 逐渐减少，电流脉冲的幅值和持续时间将会逐渐增大，断流时间缩短。当 $\alpha = \alpha_2$ 时 (图1-18) 一个臂上的晶闸管的电流断掉，另一个臂上的晶闸管正好开始导电，电流就趋于连续。若 α 进一步减少，那么电流就连续不断了。

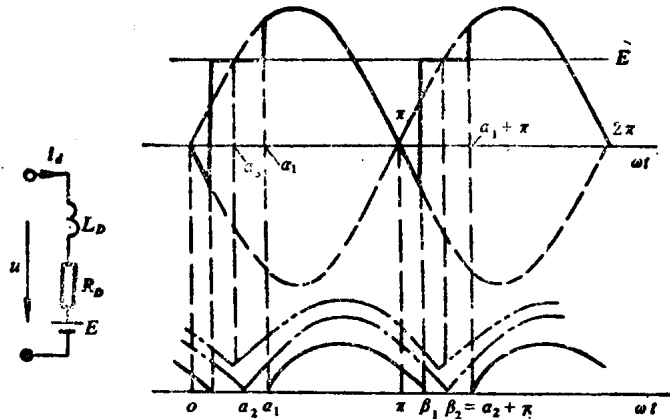


图1-13 负载电路包含电感和反电势时工作情况

整流器的输出电压与电流连续与否有很大关系。如果忽略电源的内阻，在晶闸管导通的情况下，整

流器输出电压等于电源电压；而当晶闸管关断时，输出电压就等于反电势。如果负载回路里有足够大的电感，以使电流连续，那么在一个管子连续导通的过程中，可以把电源电压的整段波形，包括电压为负的部分传送到负载上 (图1-19 a)。这时虽然电源电压为负，但由于电感在释放能量，电感上的感应电势大于电源的负电压，由它可以维持晶闸管的导通。

随着电源负半波的出现，负载上的电压平均值将下降。不难证明，在电流连续的情况下，单相全波整流电压的平均值将为

$$U_d = 0.9 U \cos \alpha \quad (1-6)$$

与纯电阻负载时整流器只输出正的电压波 (图1-19 b) 的情况下， $U_d = 0.9 U \frac{1 + \cos \alpha}{2}$ 相比，

电压要低得多，而且它的移相范围也变了，只有在 $0 < \alpha < 90^\circ$ 时整流桥输出正电压，而当 α 超过 90° 时，输出电压为负，整流器将进入逆变状态。

如果负载回路中电感量不够大，不足以使电流连续，则电流将是断续的。在断流阶段，晶闸管关断，负载上电压等于反电势 (图1-19c)。在这种情况下整流器的输出电压波形比较

复杂，且与负载有关。一般说来整流器的输出电压与负载有关，特别是与电流的连续否有很大关系。在电流断续的情况下，电流、电压与 α 角之间的关系复杂，具有明显非线性特性，这将为控制系统的设计和运行带来许多问题。所以在实用上往往在直流电机电枢回路里串入一定的平波电抗器，以使电流保持连续。但在单相整流的情况下，由于电流脉动频率比较低，要保持电流连续所需电感量比较大。所以实用上常用多相整流电路。

在稳态电流连续的情况下，由于 $i_a(\alpha) = i_a(\alpha + \pi)$ ，则平均电流可由下式求得：

$$I_a(\alpha) = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha + \pi} \frac{1}{R_b} (\sqrt{2}U \sin \omega t - E) \times d(\omega t) = \frac{1}{R_b} (0.9U \cos \alpha - E) \quad (1-7)$$

在电流连续的情况下有一个所谓换流重叠角的问题值得注意。由于电源电路中往往存在着一定的电感 L_A （例如变压器的漏电感等），电流从一个晶闸管到另一个晶闸管的转移不能瞬时完成，例如如图1-20中原先是晶闸管 T_2 、 T_2' 导通，在 $\omega t = \alpha$ 时 T_1 、 T_1' 触发，在电源电压的作用下晶闸管 T_2 、 T_2' 承受反压而趋于关断， T_1 、 T_1' 开始导通，电流应该由 T_2 、 T_2' 转移到 T_1 、 T_1' 中去。但由于电感 L_A 的影响， T_2 、 T_2' 中电流不会瞬时下降， T_1 、 T_1' 中电流也不能突然上升，而是要有一个逐渐过渡的过程如图1-20 c 所示。这样其中就有一段时

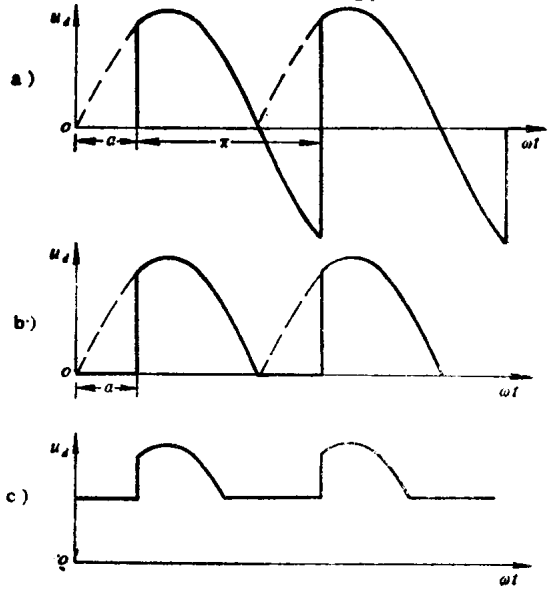


图1-19 单相整流输出电压波形

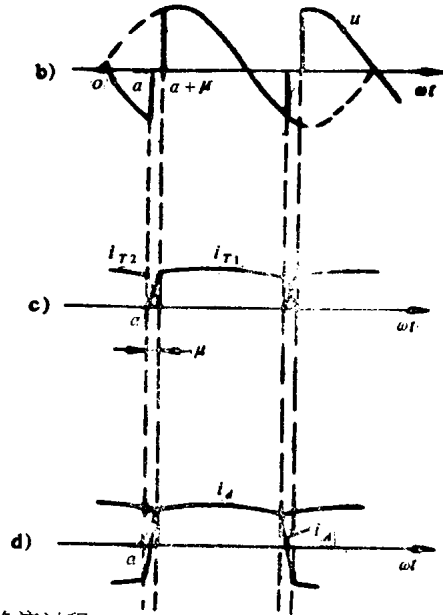
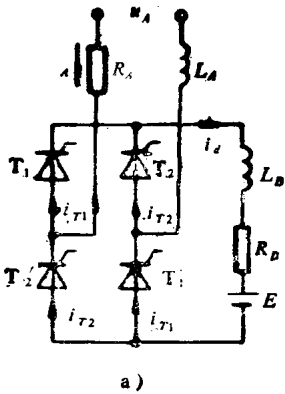


图1-20 单相变流器的换流过程

间管 T_1 、 T_1' 和 T_2 、 T_2' 同时处于导通的状态，而电源暂时就被这几个晶闸管所短路。这时根据基尔荷夫定律可得电路方程式如下：

$$\left. \begin{aligned} i_{T_1} + i_{T_2} &= i_d \\ i_{T_1} - i_{T_2} &= i_A \\ L_A \frac{di_A}{dt} + R_A i_A &= u \\ L_D \frac{di_d}{dt} + R_D i_d &= -E \end{aligned} \right\} (1-8)$$

i_{T_1} 和 i_{T_2} 分别为晶闸管 T_1 和 T_2 中的电流, i_A 为交流输入电流, i_d 为直流输出电流。考虑到其初值条件为 $i_{T_1}(\alpha) = 0$ 和 $i_{T_2}(\alpha) = -i_A(\alpha) = i_d(\alpha)$, 而且由于通常 L_A 比较小, 电流从一路晶闸管转移到另一路晶闸管的换流时间比较短, 如在短时间内认为负载电流不变, 即 $i_d = \text{常数}$, 则在换流期间即 $\alpha < \omega t < \alpha + \mu$ 时

$$i_A(t) = \frac{\sqrt{2}E}{Z} \sin(\omega t - \varphi) - \left[i_d + \frac{\sqrt{2}E}{Z} \sin(\alpha - \varphi) e^{-(\omega t - \alpha)/\omega T_A} \right] \quad (1-9)$$

式中 $T_A = L_A/R_A$ ——换流回路时间常数;

E ——电源电压(有效值);

$Z = \sqrt{R_A^2 + (L_A \omega)^2}$ ——电源交流阻抗。

$\varphi = \tan^{-1} \omega L_A/R_A$

流经晶闸管的电流为

$$\begin{aligned} i_{T_1}(\omega t) &= \frac{1}{2} [i_d(\alpha) + i_A(\omega t)] \\ i_{T_2}(\omega t) &= \frac{1}{2} [i_d(\alpha) - i_A(\omega t)] \end{aligned} \quad (1-10)$$

在 $\omega t = \alpha + \mu$ 时 $i_{T_2}(\alpha + \mu) = 0$; $i_{T_1}(\alpha + \mu) = i_d(\alpha)$ 换流结束。

由于在换流过程中四个晶闸管同时导通, 把电源暂时短路, 输出电压为零。它将使输出电压的平均值降低, 其值为

$$\begin{aligned} \Delta u &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha + \mu} u(\omega t) d(\omega t) = \frac{1}{\pi} \omega L_A i_A(\omega t) \Big|_{\alpha}^{\alpha + \mu} \\ &= \frac{1}{\pi} \omega L_A [i_A(\alpha + \mu) - i_A(\alpha)] = \frac{2}{\pi} \omega L_A i_d \end{aligned} \quad (1-11)$$

式(1-11)说明换流重叠现象所造成的输出电压下降与负载电流成正比, 它相当于整流器内部有一个电阻 $R_s = \frac{2}{\pi} \omega L_A$ 。但是这个假想电阻是不消耗能量的, 这点必须注意。

在通常工频电源整流电路中换流重叠角不是太大, 一般只有几度, 它没有多大的影响。但是在逆变器里这个换流重叠角却是一个十分值得重视的问题。因为逆变器里往往由于重叠角过大而造成换流失败, 逆变颠覆。下面就来研究一下晶闸管在逆变状态下工作的过程。图1-21 a所示为最简单的单相有源逆变电路: 一个直流电源经过晶闸管接到一个变压器上。当变压器电势下正上负时将晶闸管 T_1 触发, 电能就由直流电源输向变压器, 然后经变压器输入电网。而当变压器电势反向时(上正下负), 把晶闸管关断, 以防止变压器电势和直流电源电压经晶闸管而短路。但这时直流电压和变压器电势是相加的, 它们都将作为正向电压加到晶闸管上。所以对于工作在逆变状态下的半导体元件, 要求它具有正向阻断的能力。这说明在