

前 言

根据冶金部1986年制订的技工学校维修电工教学计划,设置电工基础、电子技术、可控硅技术、电机与电力拖动基础、电力拖动自动控制、车间供电和电工工艺学等专业课程。本书是这套教材中的一本,是依据可控硅技术教学大纲规定的84学时而编写的。

本书是技工学校三年制(初中毕业生)维修电工专业的必修课程。主要内容是基础理论和应用实例,有关可控硅技术在冶金企业的系统应用将在《电力拖动自动控制》课程中介绍。

编写本书内容的原则是,根据专业需要,强调基本原理分析,注意到:忌乱贵专——不好全博采,注重切实需要;忌浮贵精——不泛指略论,注意点题语破;忌深贵宜——避免偏深的物理数学分析,适宜学生接受。总之,内容深浅应符合培养目标。

本书由李富修同志主审。许多同仁为编写本书提出了可贵建议,尤其是鞍钢技校的汤汛、王鲁、杨柏森同志;首钢技校的冯俊生、侯元聪、周春荣同志;本钢技校的邹本泰同志;上钢五厂技校的汤元龙同志;包钢技校的林贵江同志提出的建议为编写本书提供了借鉴。在此一并致以衷心感谢。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏和错误之处,切望同仁和读者在使用过程中批评指正。

编者

1989年12月

绪 论

可控硅又称晶 闸 管，是本世纪六十年代才研制成功的新型大功率半导体器件。可控硅具有多种优点：体积小、重量轻、效率高、寿命长、使用维修方便、节省能源，并且是一个静止器件。因此，自从它问世以来，可控硅的应用技术发展异常迅速，已形成独立的学科。由于可控硅的出现，开辟了电子技术应用于强电系统的途径，可以形象地说可控硅是弱电和强电的桥梁，它的应用无疑是电气技术的新阶段，因而可控硅技术被誉为七、八十年代的新技术。

近十几年以来，我国大功率可控硅制造和应用技术发展很快，已日益遍及到生产与民用各个领域，它的应用范围按工作原理大致可分为以下四个方面：

一、可控整流

由二极管组成的整流电路，虽然能实现将交流电转换成直流电，但是，这种整流电路输出的直流电压是固定的、不可调的，不能满足负载需要获得不同直流电压的要求。由可控硅组成的整流电路的突出特点是，输出的直流电压是可调的。所谓可控整流就是能实现将交流电转换成大小可调的直流电。可控整流是本课程介绍的重点内容。

二、逆变

可控硅整流电路的工作，是将交流电整流成直流电，而由可控硅组成的逆变电路，却是完成相反的逆过程，即把直流电变换为交流电，这种逆过程称为逆变。逆变电路工作时可将直流电变为交流电送回电网，或把直流电变为某一频率的交流电供给负载。

三、交、直流无触点开关

接触器、继电器等有触点电器构成的开关电路，由于存在触点、中间传递机构和电磁部件，对输入信号反应欠灵敏、有电弧出现，容易出现故障。用可控硅可以制成用于交、直流电路的无触点可控硅开关，它能迅速可靠无电弧地接通和切断大功率的交、直流电路。这种无触点开关尤其适用于多尘埃，有腐蚀性气体和需要防爆的场所。

四、交、直流调压

可控硅整流电路输出的电压可以连续地、平滑地调节性能在生产上有多种用途，例如，可以通过可控硅整流装置改变直流电动机的电枢电压，从而实现直流电动机的无级调速。它和“发电机-电动机”组无级调速系统相比较，有体积小、无转动、无噪音、效率高、节省有色金属和静、动态特性好等一系列优点。

利用可控硅可以组成交流调压装置，交流调压广泛应用于交流电动机调速，电解电镀，灯光控制和温度控制等场合。

可控硅技术的发展，使电力、电子、控制三门学科的内容相互渗透、深化，使科学技术水平提高到一个新的阶段。纵观可控硅技术在国民经济各个领域中的应用，对于提高劳动生产率，改善工人劳动条件，节省能源等多方面起了巨大作用。显然，学习和应用可控硅技术对于加速社会主义建设具有重要意义。

①现在国际电工学会已将这种半导体器件统一定名为THY（晶闸管），本书仍沿用“可控硅”这个名称，是出于历史原因和广大电工的习惯。

《可控硅技术》这门课程在本专业中，是一门专业基础性质较强的课程，它和生产实际有着紧密联系。因此，在学习过程中，应理解物理概念和分析问题的基本方法，应重视理论联系实际。本课程的内容有它的特点：可控硅组成的控制系统中，各个重要环节的工作情况，可用波形图直观地表示出来，因而在学习中要特别重视波形图的分析，在此基础上进一步分析电路的工作原理，这样会收到事半功倍的效果。

目 录

第一章 可控硅整流元件 (1)	
第一节 可控硅的结构和工作原理..... (1)	第三节 可控硅的主要参数..... (1)
第二节 可控硅的伏安特性..... (4)	第四节 特殊可控硅简介..... (8)
第二章 可控硅整流电路 (11)	
第一节 单相半波可控整流电路..... (11)	第五节 三相桥式可控整流电路..... (31)
第二节 单相全波可控整流电路..... ()	第六节 变压器漏抗对整流电压的影响..... (36)
第三节 单相桥式可控整流电路..... (10)	第七节 各种可控硅整流电路比较..... (36)
第四节 三相半波可控整流电路..... (26)	第八节 可控硅元件的选择..... (40)
第三章 可控硅有源逆变电路和可逆电路 (48)	
第一节 逆变的概念..... (48)	第四节 逆变失败与逆变角的限制..... (54)
第二节 有源逆变工作原理..... (48)	第五节 可控硅可逆电路..... (55)
第三节 可控硅有源逆变电路..... (51)	小结..... (61)
第四章 可控硅的保护和串并联 (62)	
第一节 可控硅的过电流保护..... (62)	第三节 可控硅的串联和并联..... (72)
第二节 可控硅的过电压保护..... (64)	小结..... (73)
第五章 可控硅的触发电路 (75)	
第一节 可控硅对触发电路的要求..... (75)	第五节 同步电压为锯齿波的触发电路..... (83)
第二节 阻容移相桥触发电路..... (76)	第六节 脉冲变压器与防止误触发的措施..... (92)
第三节 单结晶体管触发电路..... (77)	小结..... (93)
第四节 同步电压为正弦波的触发电路..... (83)	
第六章 可控硅技术的应用 (94)	
第一节 直流电动机可控硅可逆自动调速系统..... (94)	第四节 可控硅逆变器简介..... (105)
第二节 可控硅开关线路..... (102)	小结..... (105)
第三节 可控硅交流调压线路..... (104)	本书主要符号说明..... (107)
	本书主要参考文献..... (110)

第一章 可控硅整流元件

第一节 可控硅的结构和工作原理

一、可控硅的外形

可控硅元件的外形如图1-1所示，分为螺栓式和平板式两大类。它们都有三个电极：阳极，用拉丁字母“A”表示；阴极，用拉丁字母“K”表示；门极（又称控制极），用拉丁字母“G”表示。螺栓式可控硅的螺栓一端是阳极，另一端有两根用多股铜绞线做成的电极引线，

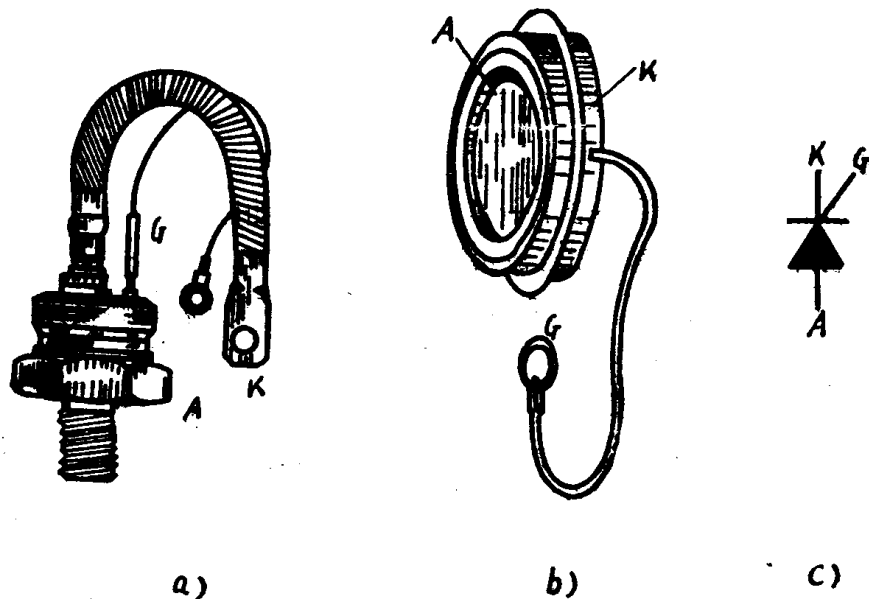


图1-1 可控硅的外形及符号

a) 螺栓式；b) 平板式；c) 图形符号

其中较粗的那根电极引线是阴极，较细的那根电极引线是门极。平板式可控硅的中间是一个金属环，从金属环上引出的细导线是门极，金属环的两面分别有阳极和阴极，阳极离金属环较远，阴极离金属环较近。螺栓式可控硅安装使用方便，平板式可控硅便于压接，以增加可控硅元件和外部连接件的接触面积，有利于散热和提高工作可靠性。目前，中小容量可控硅多采用螺栓式，大容量可控硅多采用平板式。

为了减小可控硅工作时发热对其性能的影响，5安以上的可控硅在使用时均安装有散热器。螺栓式可控硅的散热器如图1-2a)所示，采用自冷或风冷散热，可将散热器直接拧接到螺栓（阳极）上，由于螺栓式可控硅受散热方式的限制，其最大容量不超过200安。平板式可控硅采用风冷或水冷散热，图1-2b)所示的风冷散热是由两个彼此绝缘的散热器将平板式可控硅紧紧地夹在中间，这样两面散热的效果比螺栓式一面散热的效果好。图1-2c)所示的水冷散热是将冷却水套与平板式可控硅连成一体，散热效果更好，因此平板式可控硅最大容量目前可达到500~1000安。

普通的作为整流用的可控硅，文字符号一般用SCR表示，图形符号如图1-1c)所示。

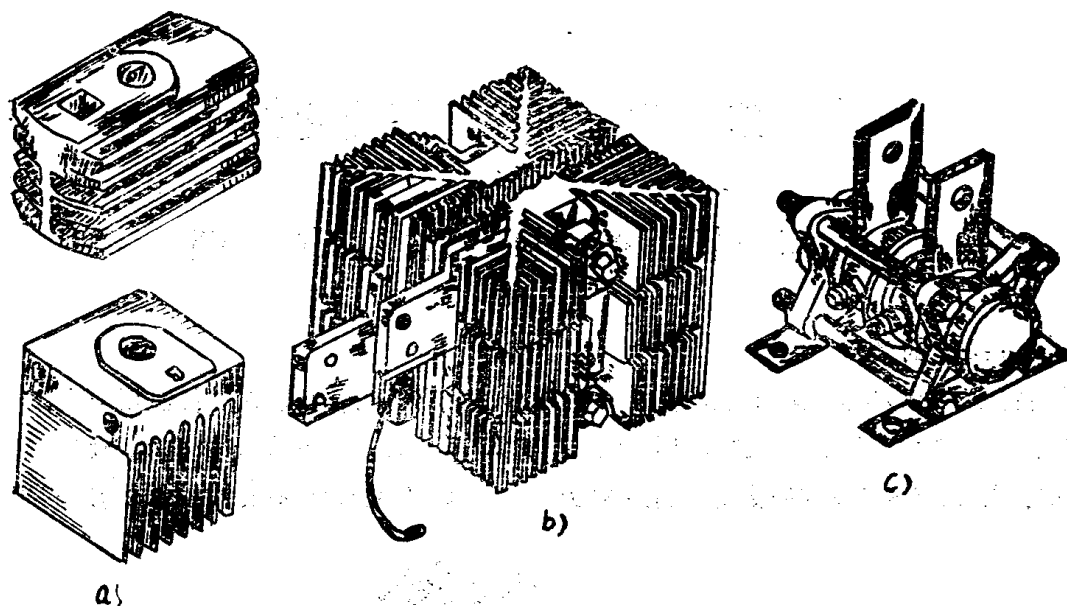


图1-2 可控硅的散热器

二、可控硅的内部结构

螺栓式和平板式可控硅虽然外形不一样，内部结构都如图1-3所示，它的核心部分是一块约0.27毫米厚的硅片，通过渗入杂质形成四层交迭的P、N区，有三个PN结，由最外层的P区和N区分别引出阳极A和阴极K，由中间的P区引出门极G(又称控制极)。可控硅是具有三个PN结的四层三端半导体元件。

三、可控硅的可控单向导电性

二极管具有单向导电性，可控硅导电有何特点呢？可通过下面的实验得出结论。

1. 如图1-4a)所示，当开关K断开，门极处于开路状态时，在可控硅的阳极、阴极之间加上正向电压，这时灯泡不亮，说明可控硅不导通。

2. 如图1-4b)所示，在可控硅的阴极至阳极之间加上正向电压，并且将开关K闭合，

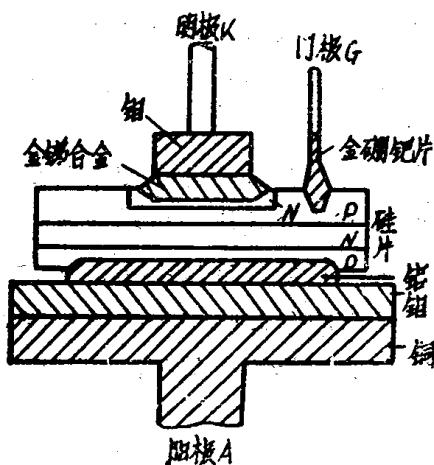


图1-3 可控硅内部结构示意图

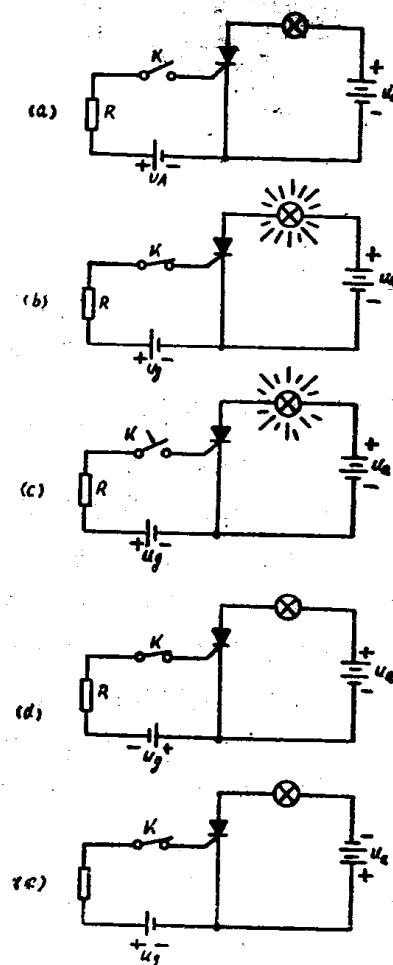


图1-4 可控硅的可控单向导电实验电路

使门极至阴极之间也加上正向电压（称触发电压），这时灯泡点亮，表示可控硅导通。

以上两步实验说明，连有可控硅的电路好象一条有闸门的河流，只有水位差，河水还不能流通，必须把起控制作用的闸门打开河水才能通过，门极就相当于闸门的控制作用，所以说可控硅导电是可控的。

3. 如图1-4c)所示，当可控硅导通后，如果断开开关K，灯泡仍然亮，表示可控硅继续导通，说明可控硅一旦触发导通后，门极就对它失去控制作用，即门极在一定条件下可触发可控硅导通，但无法使其关断。

4. 如图1-4d)所示，虽然可控硅阳极至阴极之间加正向电压，但是门极至阴极之间是加的反向电压（负电压），灯泡不亮，表示可控硅未导通，说明负电压不能触发可控硅导通。

5. 如图1-4e)所示，虽然可控硅门极至阴极之间加的正向电压，但是阳极至阴极之间是加的反向电压，灯泡不亮，表示可控硅未导通，说明可控硅具有单向导电性。联系第二步实验，可知可控硅具有可控的单向导电特性。二极管虽有单向导电性，但是只要阳极和阴极之间加上正向电压就会导通是不可控的。正因为可控硅具有可控单向导电性，它在应用上开拓了许多新的领域。

综合上述实验，可以得出结论，要使可控硅从不通（又称截止或阻断）转变为导通必须具备以下两个条件：

1. 可控硅阳极至阴极之间加上正向电压；
2. 可控硅门极至阴极之间加上适当的正向电压。

当可控硅满足了上述条件，由截止转变为导通的过程叫做触发。

可控硅导通后，门极失去了控制作用，那么如何使它又关断截止呢？实验表明，当可控硅导通电流下降到一定值时（约几十毫安），会突然关断恢复截止状态。维持可控硅导通所需的最小电流叫维持电流，显然，如果采取措施使可控硅的导通电流下降至小于维持电流，可控硅就会恢复截止状态。常用的方法有两种：一是降低阳极与阴极之间的电压；二是短暂时断开可控硅通电回路，或者在阴极、阴极之间加上反向电压。

例 如图1-5所示，可控硅阳极电源为交流电压，门极在 t_1 时刻合上开关K，在 t_4 时刻断开开关K，求电阻 R_d 上的电压波形 u_d 。

解 在 t_1 时刻，可控硅的阳极电压为正，合上开关K使门极电压也为正，满足了可控硅导通条件，所以可控硅导通。可控导通时管压降很小（约1伏），忽略不计，电源电压 u_2 全部加于负载 R_d ；到 t_2 时刻由于 u_2 过零并要反向变负，所以通过可控硅的电流小于维持电流，可控硅关断截止；在 t_3 时刻，电源电压 u_2 过零并开始反向变正，可控硅又承受正向电压而再次导通，电源电压 u_2 再次加于负载；在 t_4 时刻，虽然断开了开关K，使 $u_g=0$ ，但由于可控硅已处于导通状态，门极失去控制作用，可控硅仍然维持导通，到了 t_5 时刻，由于 u_2 等于零，可控

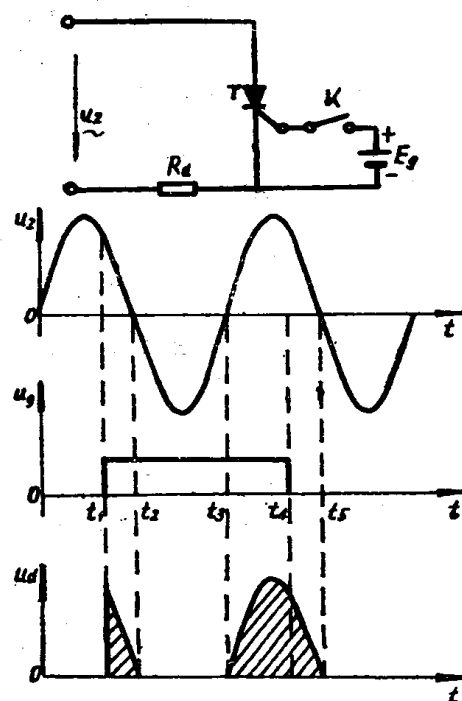


图1-5

硅再次关断截止，之后由于开关K已断开， $u_g=0$ ，可控硅不会再导通。从以上分析可画出负载 R_d 上的电压波形 u_d （如图1-5所示）。

四、可控硅的工作原理

可控硅为什么具有可控单向导电的特性呢？现从其内部结构的工作情况进行分析。

可控硅是有三个PN结（ J_1 、 J_2 、 J_3 ）的四层三端半导体元件，我们可把它看成是两个晶体三极管的互联，如图1-6所示，其中一个PNP型三极管，另一个是NPN型三极管。两个晶体三极管的基极和集电极互相连在一起，阳极A为PNP型晶体三极管 T_1 的发射极，阴极K为NPN型晶体三极管 T_2 的发射极。这样，图c就是图b和图a的等效电路。

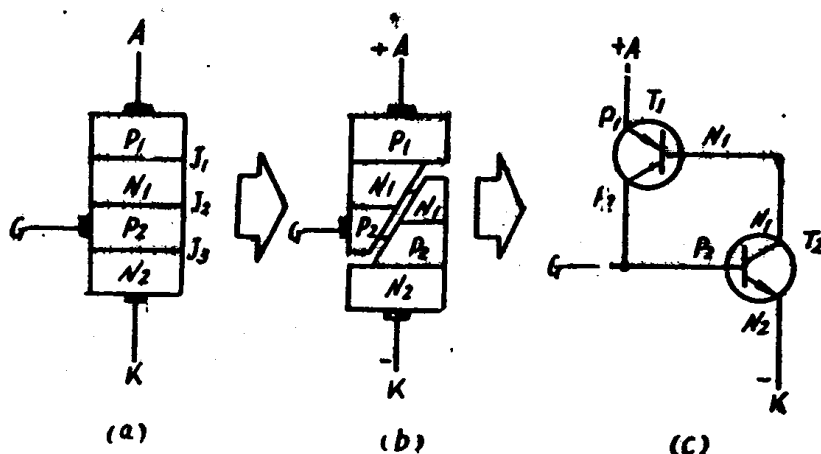


图1-6 可控硅的工作原理图

当可控硅承受正向电压后，要使可控硅导通，关键是使 J_2 这个承受反向电压的PN结失去阻挡作用，如果从门极G输入一个足够大的电流，这个电流就成为三极管 T_2 的基极电流 I_{b2} ，经 T_2 放大后，形成 T_2 的集电极电流 I_{c2} ， $I_{c2}=\beta_2 I_{b2}=\beta_2 I_g$ （ β_2 是 T_2 的共射极电流放大倍数），由于两个管子的基极和集电极互连，所以 I_{c2} 就是三极管 T_1 的基极电流 I_{b1} ，这个电流经三极管 T_1 放大，便是 T_1 的集电极电流 I_{c1} ， $I_{c1}=\beta_1 I_{b1}=\beta_1 I_{c2}=\beta_1 \beta_2 I_g$ （ β_1 是三极管 T_1 的共射极电流放大倍数），显然， I_{c1} 又是 T_2 的基极电流，这个电流是将门极输入电流 I_g 两级放大形成，如此循环下去，就出现了强烈的电流正反馈，使两个晶体三极管很快达到饱和导通状态。可控硅从门极输入电流到饱和导通所需时间非常短，一般只有几微秒。

以上可控硅触发的正反馈过程，可如下表示：

$$I_g \uparrow \rightarrow I_{b2} (=I_g) \uparrow \rightarrow I_{c2} (= \beta_2 I_{b2}) \uparrow = I_{b1} \uparrow \rightarrow I_{c1} (= \beta_1 I_{b1}) \uparrow$$

可控硅导通后，起初输入门极的电流与正反馈电流相比就显得相当小了，即是撤去门极输入电流，可控硅仍然继续保持导通状态，门极失去了控制作用。欲使可控硅关断截止，只有设法使可控硅的导通电流减小到维持电流以下，使可控硅内部正反馈无法维持。

如果可控硅阳极承受的是反向电压，两个等效的晶体三极管就处于反压状态，都不能工作，故不论有无门极电压可控硅都不能导通。如果可控硅在导通前门极电压反向，即使可控硅加上正向阳极电压，可控硅也不会导通，这是因为可控硅等效电路中（图1-6c）三极管 T_1 的基极至发射极之间加的是负电压， T_1 处于截止状态，无法使可控硅导通。

第二节 可控硅的伏安特性

可控硅门极开路时，阳极和阴极之间流过的电流（简称阳极电流）和阳极、阴极之间所

加的电压（简称阳极电压）的关系，可以用曲线在直角坐标上表示出来，称为可控硅的伏安特性曲线，简称可控硅的伏安特性。

由于可控硅阳、阴极之间所加的电压方向不同，所以有正向和反向伏安特性之分。

一、可控硅正向伏安特性

在可控硅的阳极和阴极之间加上正向电压时，可控硅内部有一个PN结是反向的（如图1-6a）所示的 J_2 结），所以在可控硅的阳、阴极间只有很小的正向漏电流流过，其特性如图1-7的QA段，可控硅呈现很大的正向电阻，处于正向截止状态（又称正向阻断状态），随着阳极电压逐渐增大，正向漏电流亦随之逐步增大，正向特性曲线向上弯曲，到达A点时正向电压已加至正向转折电压 V_{BO} ， J_2 结在很强的反向电场作用下被击穿，阳极电流突然急剧增大，可控硅由截止状态突然转化为导通状态，特性由A过渡到B，可控硅导通后，其管压降仅有1伏左右，电流随电压增大很快增大，特性沿BC方向陡峭上升。

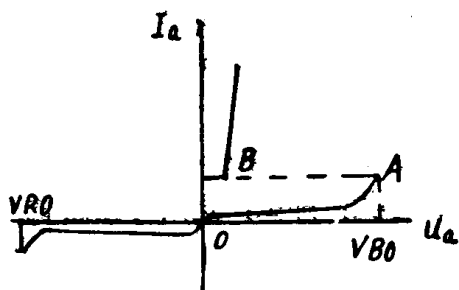


图1-7 可控硅的伏安特性

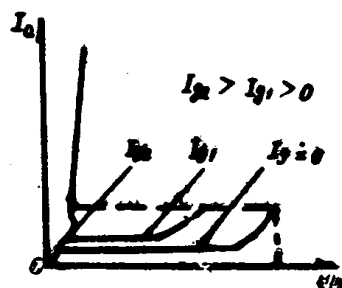


图1-8 门极电流对伏安特性的影响

应当注意，上面那种在断开门极的情况下，增大正向电压到转折电压 V_{BO} 使可控硅导通的方法，在实际工作中是不容许的，因为这样容易损坏可控硅或出现正向误导通。

在实际应用中，使可控硅导通是在门极、阴极间加正向电压的情况下进行的，只要加上正向电压，即只要输入门极电流，从实验可证明：可控硅的转折电压将会显著降低，并且同一只可控硅输入的门极电流不同，转折电压大有区别，以某一只可控硅为例：

$$I_g = 0 \rightarrow V_{BO} = 800V$$

$$I_g = 5\text{ mA} \rightarrow V_{BO} = 200V$$

$$I_g = 15\text{ mA} \rightarrow V_{BO} = 5V$$

$$I_g = 30\text{ mA} \rightarrow V_{BO} = 2V$$

上例说明门极电流 I_g 对正向转折 V_{BO} 电压有很大影响，只要门极电流足够大（如上例中 $I_g > 30\text{ mA}$ ），可控硅的正向转折电压就很小，可以看成和整流二极管一样，一加上正向电压就会导通。可控硅在实际应用时，就是利用这一特性，即先加上一定的正向电压，然后在门极与阴极之间加上足够大的触发电压，使可控硅的正向转折电压降低到很低的情况下导通。

二、可控硅反向伏安特性

当可控硅的阳极和阴极间加上反向电压时，可控硅内部有两个PN结（ J_1 和 J_3 ）和外加电压处于反向状态⁽²⁾，使载流子很不容易通过，只有很小的反向漏电流，可控硅呈反向截止状态。其伏安特性如图1-7所示，和一般硅二极管的伏安特性相似。当反向电压增大到反向转折电压 V_{RO} 时，反向电流会突然急剧增大，使可控硅反向击穿，这种反向击穿能使可控硅在几微秒时间内造成永久性损坏，显然是不允许的。

应当指出，温度对可控硅的正、反向伏安特性是有影响的，温度升高会使转折电压降低，例如 20°C 的可控硅当其温度上升到 200°C 时，正向转折电压 V_{BO} 会降低到原来的一半左右

第三节 可控硅的主要参数

可控硅制造厂常用一些数据表示可控硅的性能,这样可以方便用户选择和使用可控硅。可控硅的参数有几十项之多,下面仅选择主要参数作介绍。

一、可控硅的重复峰值电压——额定电压

可控硅在门极开路 and 一定结温下,当正向电压逐渐升高至转折电压 V_{BO} 之前,伏安特性曲线急剧弯曲点(此时正向漏电流突然急剧增大,见图1-7)所对应的正向电压,称为断态正向不重复电压(此电压不可重复、连续施加),用 V_{DSM} 表示,我们取80%的 V_{DSM} 之值,称为断态正向重复峰值电压,用 V_{DRM} 表示(此电压可连续施加,重复频率为50Hz,每次持续时间不超过10ms)。

同样,当可控硅承受反向电压至反向转折电压 V_{RO} 之前,反向伏安特性曲线急剧弯曲点所对应的反向电压,称为反向不重复峰值电压 V_{RSM} ,取其值的80%称为反向重复峰值电压 V_{RRM} 。

可控硅的重复峰值电压是指正向、反向重复峰值电压中的较小者。例如某一只可控硅的正向重复峰值电压为1000伏,反向重复峰值电压为900伏,那么,这只可控硅的重复峰值电压就应是900伏。

可控硅的重复峰值电压,就是可控硅铭牌上标出的额定电压。在实际使用可控硅时,为了保证可控硅安全可靠运行,应考虑留有足够的裕量,即实际应用时可控硅承受的正、反向峰值电压应足够的小于其额定电压。

二、可控硅的额定通态平均电流 $I_T(AV)$ ——额定电流

额定通态平均电流是指在规定环境温度、标准散热和元件全导通条件下,阳极与阴极间可连续通过的工频正弦半波电流平均值。

理解这个参数,应注意两点:

1. 规定环境温度和标准散热条件

可控硅和其它电气设备一样,决定其允许通过电流的大小是温度,由于可控硅的热容量较小,短时的过载就能使PN结的温度急剧上升,因而在使用可控硅时对环境温度和散热状况应密切注意。该参数所指的规定环境温度是 $+40^{\circ}\text{C}$;标准散热条件是指可控硅元件应具备的规定散热条件,如散热器的大小和散热器与元件的接触状况,冷却方式(自冷、风冷和水冷等)和冷却介质的流速、温度等。

2. 可控硅元件全导通

这里是指作为整流元件的可控硅,用于工频(50Hz)正弦交流电半波整流时的全导通。一般二极管用作半波整流时导通角为 180° ,可控硅的导通角是可控的,用于半波整流的全导通角理想值是 180° ,由于多种因素影响是不能达到的,该参数要求可控硅的全导通角不小于 170° 。

可控硅元件在以上两个条件下,可连续通过的平均电流,亦即允许的最大通态平均电流称为额定通态平均电流,又称额定电流,其值标在可控硅元件的铭牌上。

由于元件发热应当用电流有效值表示,所以在使用可控硅时经常需要把平均电流值换算成有效值,经过计算:

$$\frac{\text{平均电流值}}{\text{电流有效值}} = 1.57$$

这就是说额定电流为100安的可控硅，允许通过有效值为157安的电

由于可控硅的电流过载能力比一般电机电器小得多，因而在实际应用时，其额定电流应考虑足够的裕量。

应当指出，如果可控硅元件不是用于半波整流，电流平均值和有效值均要变化，它们间的数值比亦随之不同。如用于全波整流，平均值与有效值之比为1.11。

三、门极触发电流 I_{GT} ，门极触发电压 V_{GT}

门极触发电流 I_{GT} ——在室温下，对可控硅施加6伏正向电压时，使元件从阻断到完全开通所必须的最小门极直流电流。

门极触发电压 V_{GT} ——对应于门极触发电流时的触发电压。

同一型号的可控硅元件，由于制造工艺受诸多因素的影响，其触发电流、电压相差甚大，触发电流、电压太小，易受干扰造成误触发，触发电流、电压过大，会出现触发困难、不灵敏现象。一机部标准规定，可控硅制造厂必须使元件的 I_{GT} 和 V_{GT} 限制在一定范围内。用户在使用元件时，门极电压和门极电流应适当地大于 I_{GT} 和 V_{GT} 的上限，但不应该超过其峰值 I_{GFM} 和 V_{GFM} 。

可控硅的门极触发电流 I_{GT} 和门极触发电压 V_{GT} 要受环境温度的影响，当温度升高时， I_{GT} 、 V_{GT} 均会减小，反之，则均会增大。因此，在实际应用时应考虑现场的环境温度和季节的变化。

四、通态平均电压 $V_{T(AV)}$

当可控硅通过正弦半波的额定通态平均电流和稳定的额定结温时，阳极和阴极间电压降的平均值，称为通态平均电压，一般称作管压降。其数值按表1-1分组。

可控硅的管压降越小越好，因为管压降越小，管内损耗将会减小，管子温升也会小些，所以常把这个参数作为元件质量优劣的指标之一。

表 1-1 通 态 平 均 电 压 分 组

组 别	通态平均电压 (V)	组 别	通态平均电压 (V)
A	$V_T \leq 0.4$	F	$0.8 < V_T \leq 0.9$
B	$0.4 < V_T \leq 0.5$	G	$0.9 < V_T \leq 1.0$
C	$0.5 < V_T \leq 0.6$	H	$1.0 < V_T \leq 1.1$
D	$0.6 < V_T \leq 0.7$	L	$1.1 < V_T \leq 1.2$
E	$0.7 < V_T \leq 0.8$		

五、维持电流 I_H

在门极开路 and 规定的环境温度时，维持元件继续导通的最小电流称为维持电流，用 I_H 表示。如果通过可控硅的正向电流小于维持电流，可控硅就会自行关断截止。

维持电流的大小与结温高低有关，结温越高，维持电流就越小。

六、断态电压临界上升率 $\frac{dv}{dt}$

在门极开路 and 额定结温条件下，使元件从断态转入通态的最低电压上升率称为断态电压

临界上升率。就是说，可控硅保持断态所允许的最大电压上升率应小于此值。

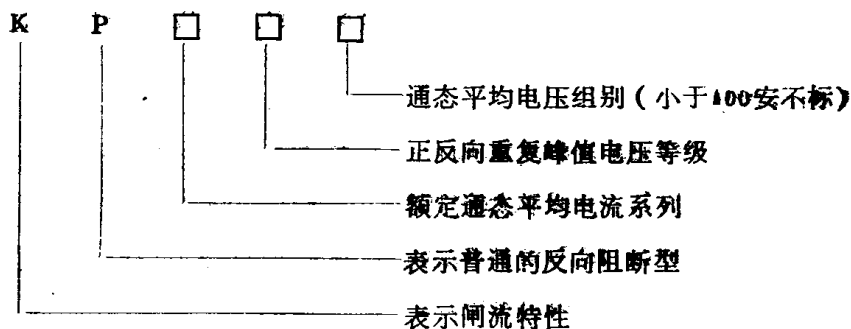
即使可控硅处于正向阻断状态，过大的电压上升率也会引起可控硅误导通。如果在可控硅上突然加上正向电压，由于阻断状态下的 J_2 结的结面相当于一个电容，此时便会有充电电流通过。这个电流流经 J_3 结时，起了相当于触发电流的作用，如果 $\frac{dv}{dt}$ 太大，则充电电流足够大，就会使可控硅误导通。所以在使用可控硅时对电压上升率有一定的限制，如使用50安以下的可控硅时，电压上升率不应大于30伏/微秒。

七、通态电流临界上升率 $\frac{di}{dt}$

在规定条件下，由门极触发可控硅使其导通时，可控硅能够承受而不会导致损坏的通态电流的最大上升率称为通态电流临界上升率。可控硅所允许的最大电流上升率应小于此值。

当可控硅门极流入触发电流后，起初只在靠近门极附近的小区域内导通，随着时间增长导通区域才逐渐扩大，直到全部结面导通为止。如果回路电流上升太快，则刚一导通就有很大的电流集中于小区域内通过，会造成局部过热而使元件损坏。所以在实际使用可控硅时应采取措施限制电流上升率，常用的方法是在主电路中与可控硅串一个不太大的电感，使通过可控硅的电流不能突变。

按机械工业部标准JB1144-75规定，可控硅的型号及其含义如下：



其中，额定通态平均电流系列分为1.5、10、20、30、50、100、200、300、400、500、600、800、1000安共14个系列；

正反向重复峰值电压分级，在1000伏以下的每100伏为一级；1000伏以上到3000伏是每200伏为一级；

通态平均电压分为9组。电压在0.4伏至.2伏之间。

例如，一只可控硅的型号是KP500-12D，它表示额定（通态平均）电流为500安，额定（正反向重复峰值）电压为1200伏，管压降（通态平均电压）为0.7伏的普通型可控硅。

第四节 特殊可控硅简介

可控硅是具有四层三端的半导体元件，它的主体结构是PNPN四层半导体，在此基础上，根据应用的特殊需要，派生出多种具有特殊功能的可控硅，称为特殊可控硅。

常见的特殊可控硅有可关断可控硅、双向可控硅、快速可控硅、光控可控硅、温控可控硅、场控可控硅等四十种。特殊可控硅有单向和双向之分；有两个极（阳极和阴极）、三个极（阳极、阴极和门极）和四个极之别。下面简要介绍几种。

一、可关断可控硅

普通的KP型可控硅导通后，门极就失去了控制作用，要使它关断就要设置专门的换流电路，使可控硅承受反向电压而关断，或者让通过可控硅的电流小于维持电流使其自然关断。前一种关断方式会增加整流装置的体积和重量，后一种关断方式将使效率降低。可关断可控硅的独具优点是，门极加正向电压时就能使之触发导通，门极加反向电压时就能使其关断。这种性能有重要用途，如可采用可关断可控硅组成比较理想的直流开关。它还用于高压脉冲发生器、发动机点火装置、电视机行输出、环形计数器和过流保护装置等多方面。

可关断可控硅具有普通KP型可控硅的全部特点，如耐压高、允许通过的电流大、承受浪涌能力强和价格较便宜等，它是一种比较先进的可控硅派生元件，近年来有很大的发展。

可关断可控硅的主要缺点是，不易制成大容量元件。但随着可控硅制造工艺水平不断提高，其容量等级也在不断提高，如日本东芝公司已可生产600安以上的可关断可控硅，我国200安的元件也已问世。

可关断可控硅的型号和图形符号如图1-9所示

二、快速可控硅

普通的KP型可控硅开通和关断的时间较长，电流允许上升率较小，因而工作频率较低。快速可控硅是一种适用于较高频率（400赫以上，目前已突破几十千赫）工作的可控硅。近年来快速可控硅发展很快，开通时间已降到几微秒，关断时间可小于20微秒，电流允许上升率已达几百安/微秒。

快速可控硅主要用于中频感应电热电源（熔化热处理金属）、激光电源、超声波电源、电脉冲加工电源、雷达调节器和直流电动车辆调速等多方面。

快速可控硅的型号和图形符号如图1-10所示。

三、双向可控硅

普通的KP型可控硅，只能单向导电。双向可控硅的结构相当于两只普通可控硅反并联而成，用一个门极控制，当门极加正脉冲时双向可控硅正向导通，相反，当门极加负脉冲时双向可控硅就反向导通。这样，一只双向可控硅在交流电路中承受交流电压时，两个方向都可以可控导通，起到“以一当二”的作用，所以在交流回路中，使用双向可控硅可以使主电路简化，并增加了设计触发电路的灵活性。

双向可控硅主要用于无触点交流开关、交流调压、调光、控温和可逆直流调速系统。

双向可控硅的主要缺点是电压允许上升率较低，原因是双向可控硅在一个方向导通结束时，各层硅片中的载流子尚未恢复到截止状态时的位置，若立即承受反向电压，就可能出现误导通。所以使用双向可控硅应采取必要的保护措施。

双向可控硅的型号和图形符号如图1-11所示。其型号含意如下：

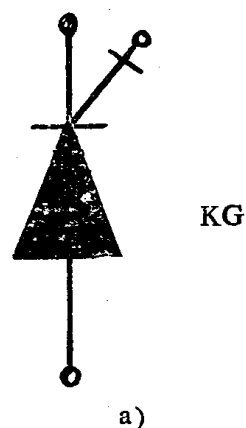
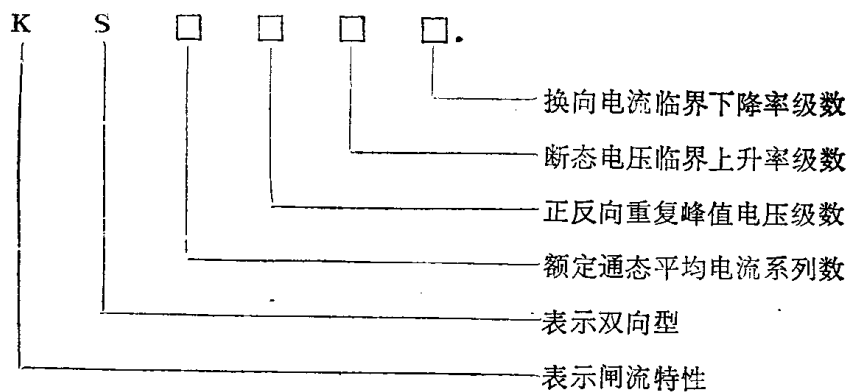


图1-9 可关断可控硅
a)符号，b)型号



图1-10 快速可控硅
a)符号，b)型号



小 结

本章介绍了可控硅的基本结构、工作原理、导通条件、关断条件及主要参数。

可控硅元件是一种具有三个PN结的半导体器件。

可控硅比二极管多了一个门极（控制极），它不仅象二极管一样具有单向导电的性能，还可以通过门极控制导电的时间。它和二极管的重要区别是，它具有正向阻断能力，即它承受正向电压后，还不会导通，必须同时在门极与阴极之间加上适当的正向电压，才能像二极管一样正向导通。门极像一扇闸门一样起着控制导通的作用，可控硅一旦导通之后，门极就失去作用，就和二极管一样了。要使已经导通的可控硅关断，必须使可控硅阳极电流小于管子的维持电流。

可控硅也有三个电极，但它不同于三极管。可控硅的门极只起控制导通的作用，不像三极管那样，集电极电流是随基极电流的变化而变化的。

可控硅最重要的特性参数是额定电压和额定电流，是正确选择和使用可控硅元件的根据。应特别注意，可控硅的额定电流是额定通态平均电流，即正弦半波平均电流，这与电器元件用有效值来定义额定值不一样。

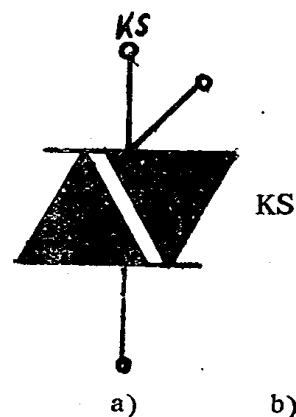


图1-11 双向可控硅
a)符号, b)型号

第二章 可控硅整流电路

可控硅是一个可控的整流元件，由于可控硅具有体积小、重量轻、功率大、效率高、维护简单，并且是静止元件等优点，所以自从它问世以来，就被迅速采用组成各种性能优良的可控硅整流电路。

可控硅整流电路，由于没有机械触头的分合过程，又由于可控硅的触发过程仅需要几微秒就可完成，所以反应灵敏、动作很迅速；可控硅的导通角是可控的，从而使整流电路输出的电压可以任意调节，这样对负载就能实现渐变的、连续的控制；一只大功率可控硅元件，只需要输入很小的门极电流，就能够使可控硅导通，让很大的电流通过整流电路供给负载，这种以小控制大、以弱控制强的性能在实际应用中是很宝贵的。由于可控硅整流电路具备多种优点，因而在冶金工业中应用广泛，如轧钢用直流电动机自动调速系统、电弧炼钢炉电极自动调节系统、车床无级调速系统等都应用了可控硅整流电路。

为了适应不同的需要，可控硅整流电路有不同的结构形式、其整流原理各不相同，输入量与输出量的关系也随之改变，形象表示整流情况的波形图也有变化。本章内容根据冶金工业的需要介绍基本的，常用的可控硅整流电路。

实践证明，学习可控硅整流电路必须重视波形图分析，这样极利于可控硅装置的安装、调试、故障分析和排除。还应重视每种整流电路的结构、整流原理分析和几个基本量之间的关系。

第一节 单相半波可控整流电路

这是接线最简单的可控整流电路，下面分别讨论电阻性负载和电感性负载的情况。

一、电阻性负载

在生产实际中，有一些负载基本上是属于电阻性质的，例如电阻加热炉、照明用白炽灯、电解、电镀等。电路中这种负载的特点是，无论流过负载的电流变化与否，负载两端的电压和通过它的电流总是成一定比例关系，并且电压和电流的波形形状相同。

1. 整流电路图

图2-1为给电阻性负载供电的单相波可控整流电路。图中ZB是单相整流变压器，它的作用是将电网电压变换成合适的交流电压然后再进行整流，其次级电压瞬时值为 u_2 ；T为把交流电整流为直流电的可控硅元件；R为电阻性负载，与可控硅元件串联于电路中。整个电路所用元件较少，电路结构简单。

2. 整流原理

可控硅是一个可控的单向导电元件，在电路中相当于一个可控的单向导电开关。要使可控硅导通必须满足两个条件：阳极至阴极加上正向电压和门极至阴极加上适当的正向触发电压。当整流变压器ZB次级绕组处于正弦交流电压正半周，即电压 u_2 是上正下负时，可控硅元件T承受正向电压，此时如果门极加上触发脉冲即触发电压，T就

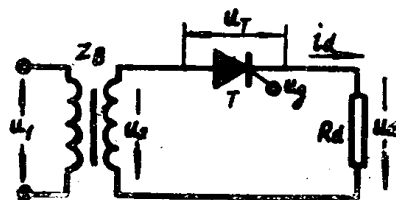


图2-1 单相半波电阻性负载可控整流电路

立即从截止转化为导通，负载电阻上便会有电流流过。当 u_2 下降至零时，流过可控硅的电流随着下降到零，小于管子的维持电流，从而使可控硅关断。在 u_2 的负半周即 u_2 下正上负时，因T承受反向电压而截止，不会有电流流过负载电阻。一直到下一个正半波再去触发脉冲时，可控硅再重新导通。这样循环下去，电阻负载上就有脉动直流电流流过。

显然，触发脉冲于 u_2 正半周去得越早，可控硅导通的时间就越长，经可控硅整流输出的直流电压平均值就越大。控制触发脉冲去的时间就可控制整流输出电压的大小，所以图2-1所示的电路是可控的单相半波整流电路。

3. 波形分析

分析可控硅整流电路有一重要手段，就是利用形象的波形图去分析电压、电流的变化规律。这些波形可用显示波形的专门仪器——示波器进行观察。可控硅整流装置在安装、调试和检修中使用示波器进行波形分析，既简便又直观，因此应用甚广。

图2-2是电阻性负载单相半波可控整流电路中电流、电压波形图。其中a图是变压器次级电压 u_2 的正弦波形，频率是50Hz，横坐标以电角度 ωt 为单位，正弦波变化一周为 2π 弧度或 360° 电角度，横坐标还可使用时间 t 表示，变化一周为20ms。纵坐标表示 u_2 瞬时值，单位是伏特。

在 u_2 的正半周内，可控硅承受正向电压，具备导通条件之一，如果未去触发脉冲可控硅仍然截止，负载电阻没有电流流过，可控硅T承受全部 u_2 电压。当 $\omega t = \alpha$ 时，可控硅门极加上触发脉冲 u_g （如b图所示），T立即导通，如果忽略可控硅元件的管压降，电源电压 u_2 就全部加在负载电阻 R_d 上。当可控硅导通到 $\omega t = \pi$ 时， u_2 下降至零，可控硅关断截止。由波形可以看出，在负半周可控硅承受反向电压，迫使它继续处于截止状态。要使负载电阻获得电压通过电流，必须在每个正半周送去触发脉冲，图c为负载 R_d 上瞬时电压 u_d 、瞬时电流 i_d 的波形图， U_d 为整流后加于 R_d 上的直流平均电压，其值等于一个周期内 u_d 的平均值。

可控硅元件T本身承受的电压 u_T 如d图所示，在导通期间，由于忽略了管压降，所以 $u_T = 0$ ，在其余不导通期间它承受了全部电源电压。

u_d 和 u_T 两个波形很重要，在可控硅控制系统的调试和检修中，经常用它们来判断线路中各个元件工作是否正常和分析、查找事故点。

为了表示可控硅触发导通的时刻，我们引入了控制角 α ，它是可控硅开始承受正向电压起到触发导通之间的电角度。控制角又叫移相角，改变 α 的大小，即改变触发脉冲出现的时刻，称为移相。脉冲移相后，可控硅的导通情况就要变化，我们把可控硅在一个周期内导通的电角度叫做导通角（又称导电角），用 θ 表示。由a图可知，控制角 α 的移相范围为 $0 \sim \pi$ （ $0^\circ \sim 180^\circ$ ），对应的导通角 θ 在 $\pi \sim 0$ （ $180^\circ \sim 0^\circ$ ）范围内变化，不论 α 、 θ 如何变化，任何时候下式成立：

$$\alpha + \theta = \pi$$

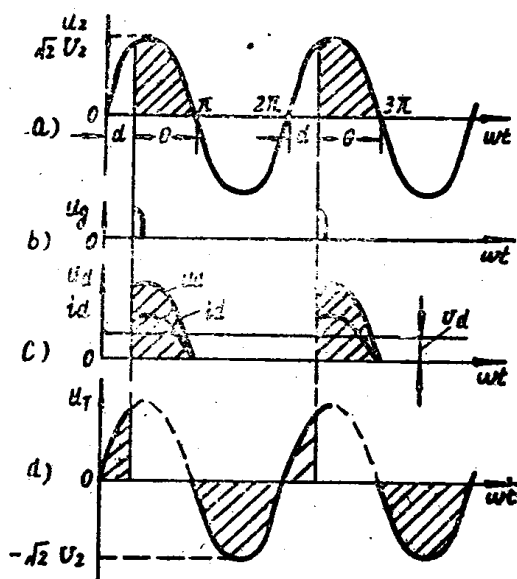


图2-2 单相半波电阻性负载电压电流波形图

不难得出, 当控制角 α 增大时, 导通角 θ 就会减小, 经整流输出给负载电阻 R_d 的直流平均电压 U_d 就会减小, 反之就会增大, 所以整流电路是通过改变 α 来实现可控的。

4. 数量关系

1) 整流输出电压平均值 U_d 和有效值 U_2

变压器次级绕组电压的有效值为 U_2 , 其瞬时值表达式为

$$u_2 = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t$$

设在 $\omega t = \alpha$ 时给可控硅去触发脉冲, 则整流输出平均电压 U_d 为

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t \, d(\omega t) = \frac{\sqrt{2} U_2}{2\pi} (1 + \cos \alpha) \\ &= 0.45 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} \end{aligned} \quad (2-1)$$

根据上式可以看出, α 越小 U_d 就越大, 当 $\alpha = 0^\circ$ 时, $\theta = 180^\circ$, 可控硅全导通, 相当于一般二极管整流, 整流输出平均电压最大, 即 $U_d = 0.45 U_2$ 。当 $\alpha = 180^\circ$ 时, $U_d = 0$, 说明整流输出平均电压最小。

在实用中为了使用方便, 往往把输出平均电压 U_d 和次级电压有效值 U_2 之比 U_d/U_2 , 随控制角 α 变化的关系画成曲线来表示, 如图2-3所示, 这样当给定 α 值后, 可以方便地从曲线上找到对应的 U_d/U_2 之值, 若已知 U_2 , 便可求出 U_d , 反过来, 可由所需的 U_d 之值求出 U_2 应具有的大小。

整流输出电压有效值 U 经数学推导得:

$$U = U_2 \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{2\pi}}$$

2) 整流输出电流平均值 I_d 和有效值 I 整流输出电流平均值 I_d 可由欧姆定律计算:

$$I_d = \frac{U_d}{R} = 0.45 \frac{U_2}{R} \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (2-3)$$

在选择可控硅、熔断器、导线截面积和计算电阻负载的有功功率时必须按电流的有效值计算。输出电压有效值 U 可由式(2-2)求出, 根据欧姆定律, 输出电流有效值 I 应是:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_2}{R} \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{2\pi}} \quad (2-4)$$

为了使用方便, 将整流输出电流有效值和平均值之比 I/I_d 与控制角 α 的关系, 用曲线表示于图2-3中。 $K_f = \frac{I}{I_d}$ 又称为电流的波形系数。

U_d/U_2 、 I/I_d 与控制角 α 的关系也可用表格表示出来 (见表2-1), 在实用中同样是方便的。

3) 可控硅承受的电压和通过的电流

了解可控硅承受的电压和通过的电流对选择、使用可控硅都有重要意义。

可控硅导通时管压降很小, 可以忽略, 截止时承受的正反电压为次级电压 u_2 , 显然, 可

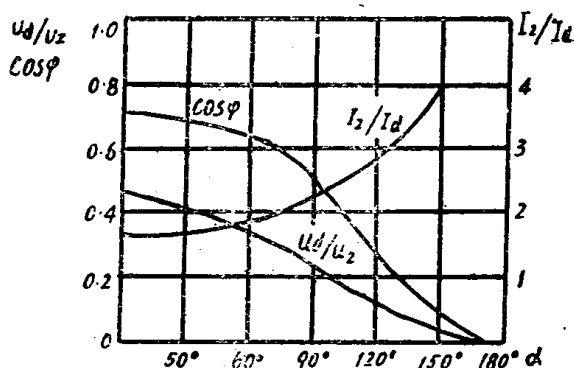


图2-3 单相半波可控整流的电流、电压及功率因数与控制角 α 的关系