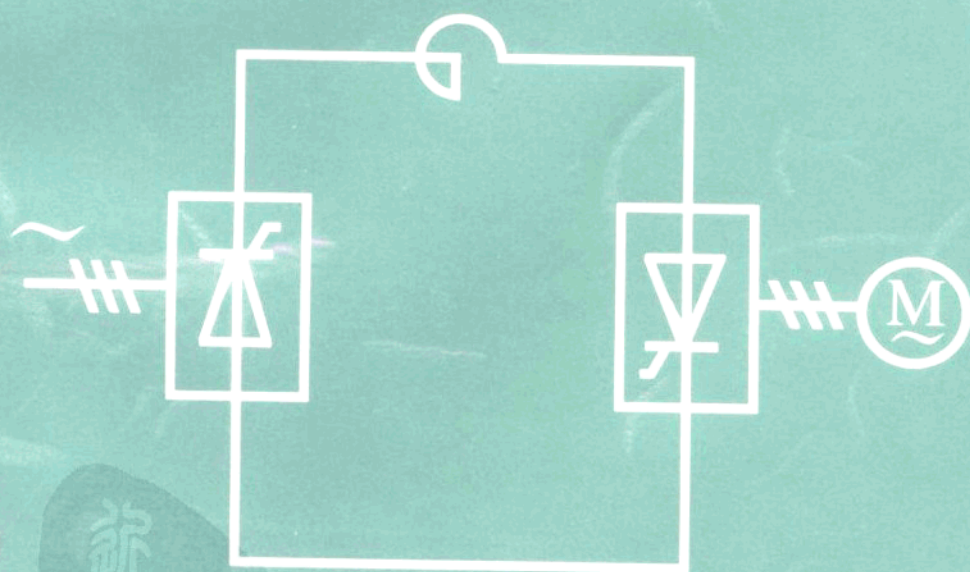


半导体变流技术

高玉奎 王建国 编著



新平知
妙學

兵器工業出版社

PDG

前 言

近年来,我国职业技术教育发展很快,不同类型的高等职业技术学院和培训中心在全国各地相继建立,一批又一批地为生产第一线输送各种各样的技术人才,对我国国民经济的发展起到了促进作用。

本书是按照高等职业技术学院工业电气自动化专业的教学大纲编写的。主要内容有:晶闸管及其他现代电力电子器件,可控整流电路,有源逆变电路,变频器、斩波器和交流调压器,主电路的计算和保护,触发电路,整流装置故障的分析及处理等。

本书简明易懂、重点突出、实用性强。各章围绕中心内容穿插例题、思考题并附有习题,以逐步加深对中心内容的理解;结合习题作业和实验,进行必要的计算和实际操作,加强理论与实际的联系;通过专用课时的综合练习,加强实践环节、巩固并进一步理解所学内容,同时培养设计计算、调试设备和分析、排除故障的能力;融理论实践为一体,从而达到既有理论知识又有实践能力的新型人才的培养目标。

本书可作为高等职业技术学院工业电气自动化、电气技术等电类专业本科学生的教材,也可作为其他院校有关专业的教材,对从事变流技术工作的工程技术人员也有一定的实用价值。

本书由高玉奎主编,王建国任副主编。绪论、第一、二、三、八章和附录由高玉奎编写;第四章由雷云涛编写;第五、六章由王建国编写;第七章由张连仲编写。全书由高玉奎统稿。河北科技大学蒋敬文教授担任主审,参加审稿的还有该校的雷友琴教授、王幸之副教授。编者对关心本书出版、热心提出建议和提供资料的单位和个人在此一并表示衷心感谢。

限于编者的学识和经验,缺点和错误在所难免,恳请广大师生和读者批评指正。

编者 1997年1月

于天津职业技术师范学院

绪 论

半导体变流技术,就是利用电力半导体器件(又叫电力电子器件)进行电能变换的技术,它包括电压、电流、波形、频率和相数等的变换。电力半导体器件包括硅整流管、晶闸管及其派生型、功率晶体管及其派生型和高效电力光电器件。目前,广泛应用的电力半导体器件还是以晶闸管为主,因此,半导体变流技术又叫做晶闸管变流技术,它属于电力电子学学科,横跨“电力”、“电子”与“控制”三个领域,它使电子技术进入强电领域,极大地发展了弱电对强电的控制。

晶闸管是一种大功率电力半导体器件。1958年美国通用电气公司制成第一个工业用的晶闸管,这种大功率电力半导体器件的诞生及其性能指标上的优越性为变流技术开辟了一条崭新的道路。近40年来,晶闸管的制造与应用技术发展相当迅速,目前已在生产与民用的各个领域得到广泛的应用。70年代以后,逐步推出全控型第二代电力电子器件——功率集成器件,进一步促进了半导体变流技术的发展与应用。特别是80年代中期出现的第三代电力电子器件——功率集成电路,使人类站在了第二次电子学革命的边缘。第二次电子学革命是电力电子技术和微电子——计算机技术在器件和应用上融合发展的结果。我国自1962年试制成晶闸管以来,以它为主的变流技术有了很大的发展,现在已经能够大规模生产各种类型的晶闸管。晶闸管变流技术在我国国民经济各部门起着极为重要的作用,我国的科技人员研制出的功率场控器件——功率MOS场效应管(VDMOS管)等器件,必将加速我国半导体变流技术的发展与应用。我国在发展国民经济第八个五年计划期间要“用足晶闸管、用好GTR和GTO、用到功率场控器件”的战略决策已经实现。今后,新型电力电子器件在变流技术中的应用,将进一步促进我国国民经济更快地发展。

半导体变流技术按其功能可分成以下几种类型:

- ①整流器——把交流电压变成固定或可调的直流电压。
- ②逆变器——把固定的直流电压变成固定或可调的交流电压。
- ③斩波器——把固定的直流电压变成可调的直流电压。
- ④交流调压器——把固定的交流电压变成可调的交流电压。
- ⑤变频器——把固定的交流频率变成可调的交流频率

由晶闸管组成的变流装置是静止型的,具有体积小、寿命长、效率高、控制性能好等优点。它与旋转式变流机组相比,无噪音、无磨损、响应快、功耗小、可靠性高,并且占地少、投资少;与水银整流器相比,无毒、安全、可靠、使用维修方便。

任何事物都是一分为二的,晶闸管也存在着缺点,主要有:

1. 电压、电流过载能力差,因而选择晶闸管时,必须留有安全裕量,并且要有可靠的保护措施。
2. 晶闸管采用移相触发,输出的电压波形大都是缺角正弦波,因而产生高次谐波分量,影响电网质量和通讯网络,为此需要采取相应的措施抑制谐波,常用的方法有:①增加整流相数 ②增设谐波滤波器 ③减小相位控制角 α 等。
3. 在调速系统中,当输出直流电压较低,即相位控制角 α 较大时,使装置的功率因数降低,因此需要在电网侧接入补偿电容或接入电感电容谐振补偿;也可从晶闸管装置着手,例如

增加整流相数等。

“半导体变流技术”是工业电气自动化专业的一门专业性质较强且与生产实践联系紧密的课程,在学习本课程时,要着重物理概念与基本分析方法,理论联系实际,做到元件、电路、应用三结合。在学习方法上,要以变流装置中的主电路、触发电路、保护电路的工作原理等基本概念为主,抓住波形分析这个重要环节,进一步理解电路的工作情况,推导计算公式,同时,在搞清原理的基础上,重视实验,加强实践环节,从而培养设计、调试以及故障分析与排除的能力,达到发展创新的目的。

目 录

绪论	(1)
第一章 晶闸管	(1)
§ 1-1 晶闸管的结构	(1)
§ 1-2 晶闸管的工作原理	(2)
§ 1-3 晶闸管的特性	(5)
§ 1-4 晶闸管的主要参数	(7)
§ 1-5 电力电子器件简介	(14)
习题	(19)
第二章 单相可控整流电路	(21)
§ 2-1 单相半波可控整流电路	(22)
§ 2-2 单相桥式全控整流电路	(30)
§ 2-3 单相桥式半控整流电路	(41)
习题	(44)
第三章 三相可控整流电路	(47)
§ 3-1 三相半波可控整流电路	(47)
§ 3-2 三相桥式全控整流电路	(60)
§ 3-3 三相桥式半控整流电路	(69)
§ 3-4 带平衡电抗器的双反星形可控整流电路	(76)
§ 3-5 整流变压器漏抗对整流电路的影响	(80)
§ 3-6 KZ-D 系统直流电动机的机械特性	(83)
习题	(87)
第四章 晶闸管整流主电路的计算和保护	(90)
§ 4-1 整流变压器参数计算	(90)
§ 4-2 晶闸管的选择	(95)
§ 4-3 晶闸管的串、并联	(98)
§ 4-4 晶闸管的保护	(102)
§ 4-5 电抗器参数的计算	(118)
习题	(122)
第五章 晶闸管触发电路	(123)
§ 5-1 对触发电路的要求	(123)
§ 5-2 单结晶体管触发电路	(124)
§ 5-3 正弦波同步触发电路	(132)
§ 5-4 锯齿波同步触发电路	(137)
§ 5-5 触发脉冲与主回路电压的同步问题	(144)

§ 5-6 集成电路触发器与数字式触发器简介	(148)
习题	(156)
第六章 晶闸管有源逆变电路	(158)
§ 6-1 有源逆变的工作原理	(158)
§ 6-2 三相半波逆变电路	(163)
§ 6-3 三相桥式逆变电路	(167)
§ 6-4 逆变失败与逆变角的限制	(172)
§ 6-5 逆变状态下电动机的机械特性	(176)
§ 6-6 晶闸管变流系统四象限运行原理	(179)
§ 6-7 绕线式异步电动机的串级调速	(182)
§ 6-8 变流装置的功能指标	(184)
习题	(191)
第七章 变频器、斩波器与交流调压器	(192)
§ 7-1 变频器的基本概念	(192)
§ 7-2 并联谐振式逆变器	(194)
§ 7-3 电压源型逆变器	(197)
§ 7-4 电流源型逆变器	(202)
§ 7-5 交-交变频器	(205)
§ 7-6 斩波器	(208)
§ 7-7 交流调压器	(212)
习题	(216)
第八章 现代电力电子器件(GTO、GTR、P-MOSFET、IGBT)及其应用	(218)
§ 8-1 可关断晶闸管(GTO)	(218)
§ 8-2 大功率晶体管(GTR)	(225)
§ 8-3 功率场效应晶体管(P-MOSFET)	(234)
§ 8-4 绝缘门极晶体管(IGBT)	(239)
附录	(244)
参考文献	(249)

第一章 晶 闸 管

晶闸管是硅晶体闸流管的简称,它包括普通晶闸管和双向、可关断、逆导和快速等晶闸管。普通晶闸管又叫可控硅,常用 SCR (Silicon Controlled Rectifier) 表示,国际通用名称为 Thyristor,简写成 T。我们以下所研究的晶闸管,如果没有特殊说明,皆指普通晶闸管而言。

本章从实用角度出发,介绍晶闸管的结构、工作原理、伏安特性和主要特性参数,这些是分析晶闸管各种电路必备的基础知识。

§ 1-1 晶闸管的结构

晶闸管是一种四层(PNP N)三端(A、K、G)大功率半导体器件,如图 1-1(a)所示,显而易见它具有三个 PN 结: J_1 、 J_2 、 J_3 。从外形上分,主要有螺栓式和平板式(如图 1-1(b)),三个引出端分别叫做阳极 A、阴极 K 和门极 G,门极又叫控制极。晶闸管的符号如图 1-1(c)所示。

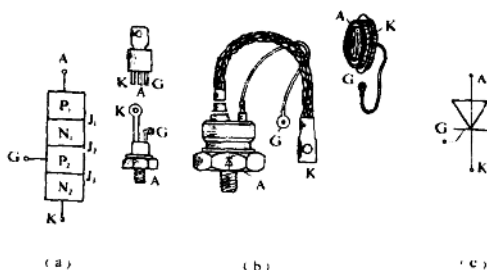


图 1-1 晶闸管的结构外形和符号

大功率晶闸管工作时产生热量较大,因此要安装散热器,防止管芯(三个 PN 结)温升过高而损坏晶闸管。螺栓式晶闸管是靠阳极(螺栓)拧紧在铝制散热器上,为自然冷却方式;而平板式则由二个相互绝缘的散热器夹紧晶闸管,靠吹风冷却,额定电流大于 200A 的晶闸管都采用平板式结构。除上述冷却方式外,还有水冷、油冷等,如图 1-2 所示。

了解了晶闸管的结构以后,我们不难用万用表欧姆档初步鉴别晶闸管的好坏。将万用表置于 $R \times 10$ 档,测量阳极-阴极之间和阳极-门极之间正反向电阻,正常时都应在几百千欧以上;门极-阴极之间正向电阻约数十欧到数百欧,反向电阻较正向电阻略大,测量时,特别是测量门极-阴极间的阻值时,绝不允许使用 $R \times 10K$ 档,以免表内高压电池击穿门极的 PN 结。测量时,如发现任何两个极短路或门极对阴极断路,说明晶闸管已经损坏。

以上测试只是初步鉴别晶闸管的好坏,但不能判断晶闸管在电路中能否投入正常工作,为此需要按图 1-3 接线进行实验。合上 S 时小灯泡不亮,再按下 SB 时,小灯泡如果发亮,说明晶闸管良好,能够投入电路正常工作。为什么会这样呢?有待于下一节研究。

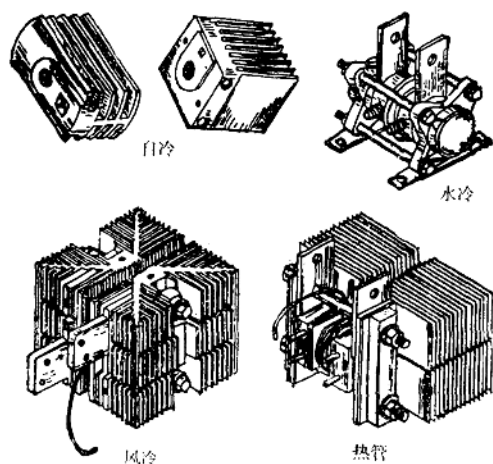


图 1-2 晶闸管的散热器

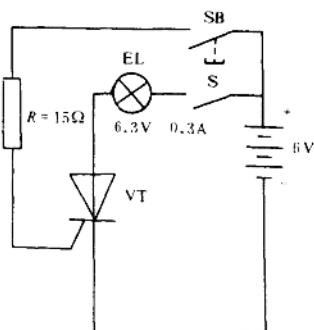


图 1-3 测试晶闸管的简易线路

§ 1-2 晶闸管的工作原理

一、晶闸管导通和关断条件

如图 1-4 所示的电路,由阳极电源 E_a → 双刀双掷开关 S_1 → 电流表(不需要测量电流时,可

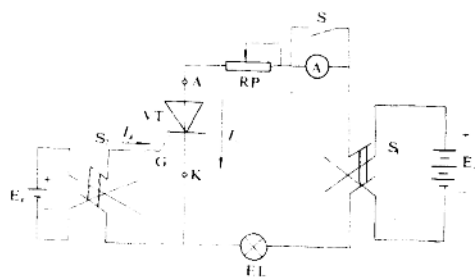


图 1-4 晶闸管导通、关断实验线路

用开关 S 短接) → 滑线电阻 RP → 晶闸管 VT → 负载(灯泡) → 阳极电源 E_a , 构成了晶闸管的主电路;由门极电源 E_g → 双刀双掷开关 S_2 → 晶闸管门极 G → 晶闸管阴极 K → 门极电源 E_g , 构成了晶闸管的触发电路(又叫门极电路)。扳动双刀双掷开关 S_1 、 S_2 , 可以改变晶闸管的阳极电压和门极电压的极性, 主电路的通、断由灯泡的亮、暗显示。

现在按下述步骤进行实验:

1. 晶闸管承受反向阳极电压时, 不论门极承受正向还是反向电压, 晶闸管都不能导通。

2. 晶闸管承受正向阳极电压时,只有门极也承受正向电压,晶闸管才能导通。
3. 晶闸管在导通情况下,只要仍承受一定的正向阳极电压,不论门极电压有无,也不管是正向还是反向,晶闸管仍然导通。
4. 晶闸管在导通情况下,当主电路的电流减小到一定程度时(通过滑线电阻 RP 达到)晶闸管就关断。

实验表明,晶闸管具有单向导电性和正向导通的可控性。单向导电性是指晶闸管导通时,电流只能从阳极流到阴极。欲使晶闸管导通,需要同时具备两个条件:①晶闸管的阳极-阴极之间加正向电压,②门极加正向电压,使足够的门极电流 I_g 流入。所谓正向导通的可控性是说门极电压对晶闸管的导通起控制作用,即在满足①的条件下,什么时候②得到满足,晶闸管就在什么时候导通。当①②同时满足,使晶闸管导通的过程叫触发,晶闸管导通后,门极就失去控制作用,所以常用正向脉冲电压作为门极电压。欲使导通的晶闸管关断,可使流过晶闸管的电流 I_a 减小到维持电流 I_H 以下即可(维持电流 I_H 是在门极上没有正向电压时,维持晶闸管导通所需要最小阳极电流 I_a)。如何做到这一点呢?降低晶闸管阳极和阴极之间的电压或增大主回路的电阻。

例:如图 1-5 所示的电路和电压波形 u_2 ,门极开关 S 在 t_1 时合上、 t_4 时断开。求电阻 R_d 上电压波形 u_d 。

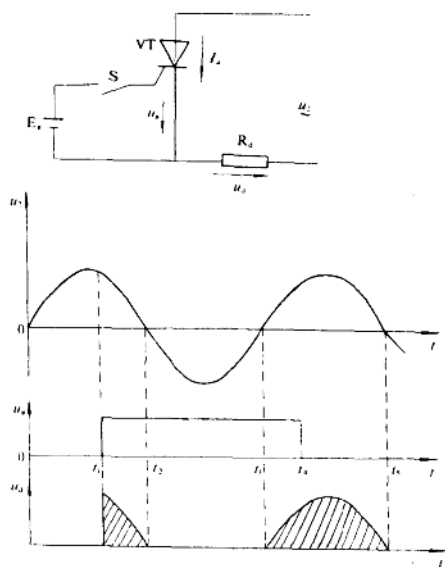


图 1-5 例题电路和波形

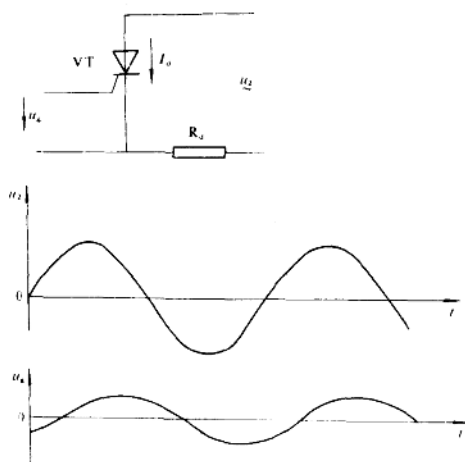


图 1-6 练习题电路和波形

解:用晶闸管导通和关断的条件求 u_d 。在 t_1 之前,晶闸管的阳极-阴极间承受正向电压,但由于门极上没有加正向电压,所以晶闸管不能导通,输出电压为零。 t_1 时刻,晶闸管导通的两个条件都具备,能够导通,有输出电压。 t_2 时刻,由于阳极电流 I_a 降到维持电流 I_H 以下(u_2 下降所致),使晶闸管关断。 $t_2 \sim t_3$ 期间,虽有正向门极电压,但此时晶闸管的阳极-阴极间承受反向电

压,晶闸管不能导通,输出电压为零。 t_3 时刻,晶闸管导通的两个条件又都满足,能够导通,有输出电压, t_4 时刻虽然 $I_g=0$ 但由于晶闸管已导通,门极失去控制作用,所以晶闸管继续导通,直到 t_5 时刻, $I_a < I_H$ 晶闸管才关断。忽略晶闸管导通时的管压降,则 R_d 上电压波形 u_d 如图 1-5 所示。

〔练习题〕如图 1-6 所示的电路和 u_2 、 u_R 波形,试画出负载 R_d 上的电压波形。(不计晶闸管导通压降)

二、晶闸管触发导通原理

前面我们只是从外部条件分析了晶闸管的导通与关断,那末从晶闸管内部进行分析,它的工作过程又是怎样的呢?

晶闸管是四层三端器件,具有三个 PN 结,可将它等效成两个晶体管 $V_1(P_1-N_1-P_2)$ 和 $V_2(N_1-P_2-N_2)$ 如图 1-7 所示。图中 V_1 管和 V_2 管的集电极电流分别为 $I_{C1}=\alpha_1 I_a$ 、 $I_{C2}=\alpha_2 I_K$,发射极电流分别为 I_a 、 I_K ,电流放大系数相应为 $\alpha_1=\frac{I_{C1}}{I_a}$ 、 $\alpha_2=\frac{I_{C2}}{I_K}$,流过 J_2 结的反向漏电流为 I_{c0} 。

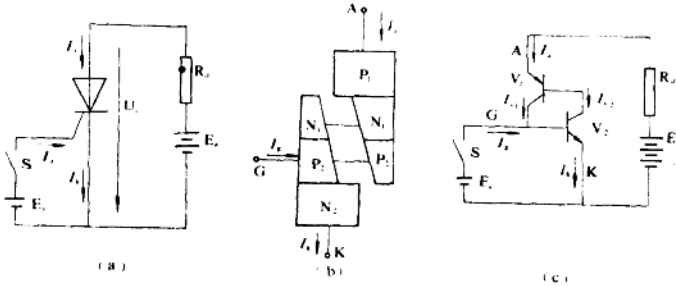


图 1-7 晶闸管工作原理说明图

当晶闸管承受正向阳极电压时,欲使晶闸管导通,必须使承受反向电压的 J_2 结失去阻挡作用,从图 1-7(c)可以看出,每个晶体管的集电极电流同时就是另一个晶体管的基极电流。因此,两个相互复合的晶体管电路,一旦门极流入足够的电流,就会形成强烈的正反馈,即:

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

在很短的时间内,使两个晶体管饱和导通,即晶闸管导通。

因为
$$I_a = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0}$$

即
$$I_a = \alpha_1 I_a + \alpha_2 I_K + I_{c0}$$

式中
$$I_K = I_a + I_g$$

所以
$$I_a = \frac{I_{c0} + I_g \alpha_2}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-1)$$

PNP、NPN 两个晶体管的电流放大系数 α_1 、 α_2 和发射极电流的关系如图 1-8 所示。

当晶闸管加上正向阳极电压时,门极还未加电压($I_g=0$)、 $(\alpha_1+\alpha_2)$ 值很小,所以 $I_a \approx I_{c0}$, 晶

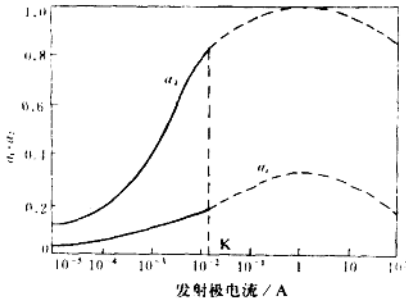


图 1-8 α_1 、 α_2 与发射极电流的关系

闸管处于正向阻断状态,如果门极加上正向门极电压,使有足够大的 I_g 流入门极,经 V_2 的发射结,则 $\alpha_2 \uparrow \rightarrow I_{c2} \uparrow$, I_{c2} 流经 V_1 的发射结则 $\alpha_1 \uparrow \rightarrow I_{c1} \uparrow$, I_{c1} 又流经 V_2 的发射结,由于正反馈的作用,使发射极电流增大, α_1 、 α_2 也增大,当 $(\alpha_1 + \alpha_2) \approx 1$ 时,即图 1-8 中的临界点 K,则阳极电流 I_a 迅速增大,此时 I_a 不再由 (1-1) 式决定,而由主电路电源电压 E_s 和回路负载电阻 R_d 决定,晶闸管处于正向导通状态。即使此时 $I_g = 0$,阳极电流 I_a 也不受影响,晶闸管也不关断,说明门极已经失去作用。如果欲使晶闸管关断,可以不断地减小主电路电源电压或增大回路电阻,使阳极电流 $I_a \downarrow$,发射极电流也随之下降,当减小到维持电流 I_H (约几十毫安) 以下时,此时 α_1 、 α_2 也相应减到一定值 $(\alpha_1 + \alpha_2) \approx 0$, V_1 、 V_2 两管的内部正反馈无法维持,晶闸管恢复阻断状态。

〔思考题〕 在晶闸管门极通入毫安级电流可以控制阳极几十、几百安大电流的导通,它和晶体管用较小的基极电流控制较大的集电极电流有什么不同?

§ 1-3 晶闸管的特性

从上节可知,晶闸管相当于一个可以控制的单向开关,那么,它在关断时能够承受多大的电压? 导通时能够通过多大的电流、本身能有多大的压降? 门极需要多大的电压、电流,才能使晶闸管由阻断状态变为导通状态? 这些都是我们在应用晶闸管组成交流电路时首先关心的问题。

一、晶闸管的伏安特性

晶闸管阳极与阴极间的电压 U_a 和阳极电流 I_a 的关系,叫晶闸管的伏安特性。

图 1-9 所示为一个最简单的晶闸管主电路,电路中,晶闸管做为一个可以控制的单向导电开关。理想的开关应该是,当晶闸管关断时,阳极-阴极间的电阻为无穷大,漏电流 I_{c0} 为零;晶

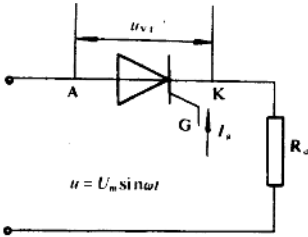


图 1-9 简单的晶闸管主电路

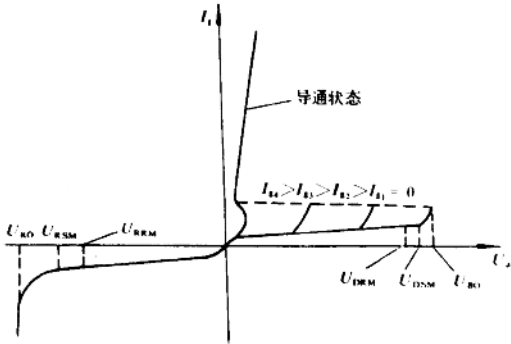


图 1-10 晶闸管的伏安特性

闸管导通时,阳极-阴极之间的电压降为零。实际上,晶闸管的伏安特性如图 1-10 所示,位于第 I 象限为正向特性,位于第 III 象限为反向特性,正向特性又有阻断状态和导通状态之分。门极信号断开 $I_g = 0$ 时,逐渐升高晶闸管的正向阳极电压,由于 J_2 结为反向偏置,晶闸管处于阻断状态,只有很小的漏电流通过晶闸管,当正向阳极电压上升到转折电压 U_{BO} 时,漏电流突然剧

增,特性从高阻区(阻断状态)经负阻区(虚线)到达低阻区(导通状态),这种情况叫“硬开通”,多次“硬开通”会损坏晶闸管,一般不允许这样工作。导通状态的晶闸管伏安特性和二极管正向特性相似,即通过较大的电流而本身压降却不大,一般仅1V左右。门极信号接通 $I_g > 0$ 时,则转折电压 U_{BO} 下降(图 1-10 中 $I_{R3} > I_{R2} > I_{R1}$),实际使用晶闸管时,都在门极-阴极间加上足够大的 I_g 使晶闸管正向转折电压 U_{DM} 很小,此时可以将晶闸管看作是整流二极管,一旦承受正向电压,管子就能导通。

当晶闸管承受反向阳极电压时, J_1 、 J_3 结为反向偏置,晶闸管总是处于阻断状态,直到反向电压增加到反向击穿电压 U_{RO} 时,管子反向击穿,反向漏电流变化较大。由此可知,晶闸管的反向特性和二极管的反向特性相似。

二、晶闸管门极伏安特性

晶闸管门极电压 U_g 和门极电流 I_g 的关系,叫晶闸管门极伏安特性。实际上晶闸管的门极和阴极间为一个 PN 结 J_2 ,门极伏安特性就是 J_2 结的特性,其典型伏安特性如图 1-11 曲线 I 。而实际产品,即使是同一型号晶闸管,其门极伏安特性也不可能完全一样,因此就规定出一个范围,凡在此范围内的,皆为合格产品,如图 1-11 所示为 500A 晶闸管的门极伏安特性范围。图中各符号的名称和数值见表 1-2。

作用在门极-阴极间触发信号,需要有足够的功率(电压与电流)才能使晶闸管触发导通,但是作用于 $G-K$ 间的电压、电流、功率都有一个限度,超过会将门极损坏。

为清楚起见,将图 1-11(a)接近坐标原点处的门极伏安特性区域放大,如图 1-11(b)所示。各曲线含义如下: $0D$ 为低阻极限伏安特性, $0G$ 为高阻极限伏安特性, DE 为门极正向电流极限, EF 为门极瞬时功率极限, FG 为门极正向电压极限, KL 为门极平均功率线。 $ADEFGCBA$ 包围的区域为可靠触发区,由触发电路加到晶闸管 $G-K$ 间的触发电压、电流和功率都应限制在这个范围内,才能保证晶闸管可靠地工作,同时门极的平均功率也不应超过规定的平均功率线 P_{g0} (图 1-11(a)中的曲线 KL)。图中 $ABCJHA$ 包括的范围为不可靠触发区,在室温下,加到门极上的电压和电流处在这个范围内时,对于触发电流或电压较高的晶闸管,触发将是不可靠的。图中 $0HJO$ 范围为不触发区,任何合格的晶闸管在额定结温时,其门极所承受的电压在此范围内都不会被触发。

在晶闸管产品合格证上,一般都标明该元件的最小触发电压和电流,为了使触发电路通用于同型号的晶闸管,设计电路时,应使门极的工作点在可靠触发区内。

晶闸管的结温升高时,所需要的触发电压、电流值均降低,反之则增大,这在设计触发电路时应予考虑。另外,晶闸管本身的触发电压如果太低或其它原因,使之受干扰易造成误触发,因此常在门极上加负电压,最大值不能超过 5V,否则会造成门极 PN 结反向击穿或因反向漏电流过大、引起门极功耗增加,导致晶闸管过热而损坏。另外,过大的负电压会降低晶闸管的触

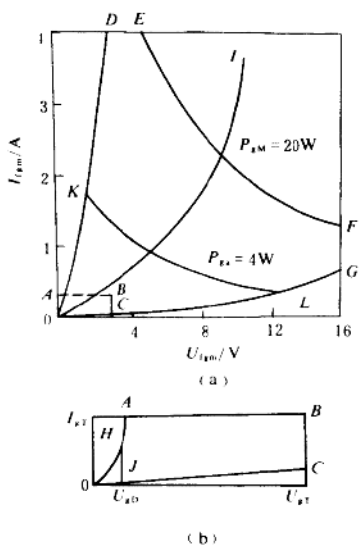


图 1-11 晶闸管门极伏安特性

发灵敏度。

例:查表 1-3 知,200A 晶闸管 $I_{GT} \leq 250\text{mA}$, $U_{GI} \leq 3.5\text{V}$, $U_{GD} \geq 0.2\text{V}$, $I_{IGM} = 3\text{A}$, $U_{IGM} = 10\text{V}$, $P_{gs} = 3\text{W}$, $P_{gm} = 15\text{W}$, 触发电路加到门板上的电压、电流分别为:① $U_g = 4\text{V}$, $I_g = 200\text{mA}$; ② $U_g = 3\text{V}$, $I_g = 300\text{mA}$; ③ $U_g = 3\text{V}$, $I_g = 200\text{mA}$, 是否合理?

解:①②皆在可靠触发区,且没有超过 I_{IGM} 、 U_{IGM} 、 P_{gs} 和 P_{gm} 诸值,所以是合理的。

③在不可靠触发区,能否触发不一定,所以不合理。

〔思考题〕在夏天工作正常的晶闸管装置到冬天变得不可靠了,可能是什么原因?

§ 1-4 晶闸管的主要参数

为了正确地使用晶闸管,除需要定性地了解晶闸管的伏安特性之外,还要定量地掌握晶闸管的主要参数,下面介绍一些主要参数及其含义。

一、晶闸管的电压定额

1. 断态重复峰值电压 U_{DRM} :在图 1-10 中,当门极断开、元件处于额定结温时,晶闸管的阳极电压 U_a 升到正向转折电压 U_{BO} 之前,漏电流开始急剧增大,即特性曲线急剧转弯处,此时对应的阳极电压叫断态不重复峰值电压,用 U_{DSM} 表示。注意,此电压不可重复施加,否则会损坏晶闸管。我们取 $90\%U_{DSM}$ 值为断态重复峰值电压,用 U_{DRM} 表示,此电压可连续施加,其重复频率为 50Hz ,每次持续时间不大于 10ms 。

2. 反向重复峰值电压 U_{RRM} :在图 1-10 中,当门极断开、元件处于额定结温时,晶闸管的反向电压增到一定值时,反向漏电流开始急剧增加,此时所加的反向电压叫反向不重复峰值电压,用 U_{RSM} 表示,使用中决不允许外加电压峰值瞬时超过此电压值,其值的 90% 叫反向重复峰值电压 U_{RRM} 。

3. 额定电压 U_{TN} :通常用实测的 U_{DRM} 、 U_{RRM} 中较小值,按规定的标准电压等级就低取整数,即为该晶闸管的额定电压。规定的标准电压等级:在 1000V 以下,每隔 100V 为一级; 1000V 到 3000V ,每隔 200V 为一级,用百位数或千位和百位数表示级数。

例:实测某晶闸管得出 $U_{DSM} = 1240\text{V}$, $U_{RSM} = 1400\text{V}$ 按规定

$$U_{DRM} = 90\%U_{DSM} = 1116\text{V}$$

$$U_{RRM} = 90\%U_{RSM} = 1260\text{V}$$

取较小值,按标准电压等级就低取整数,晶闸管的额定电压 U_{TN} 应为 1000V ,即 10 级。

实际应用时,由于温度升高及其它因素的影响,为保证晶闸管完全可靠地运行,选用晶闸管的额定电压常常是实际工作时可能承受的最大电压的 $2 \sim 3$ 倍。

例:图 1-12 电路中,晶闸管承受的最大电压值为 $\sqrt{2} \cdot 220 = 311\text{V}$,考虑 $2 \sim 3$ 倍的裕量则为: $(2 \sim 3) \times 311\text{V} = 622 \sim 933\text{V}$,因此应选额定电压为 700V (或 800V 、 900V) 的晶闸管。如果不考虑安全裕量,则选 400V 的管子就可以了。

4. 通态平均电压 U_T :在规定的环境温度和标准散热条

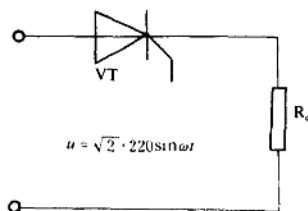


图 1-12 晶闸管主电路

件下,晶闸管通过正弦半波的额定通态平均电流时,阳极-阴极间电压降的平均值叫通态平均电压,也叫管压降,其数值为 $0.4 \sim 1.2\text{V}$,从减小元件发热和功率损耗的角度考虑,应选择 U_T 较小的晶闸管。

二、晶闸管电流定额

1. 通态平均电流 I_{Ta} :工频正弦半波(不小于 170°)的通态电流在一个周期内的平均值叫通态平均电流。

晶闸管允许通过的电流大小,决定于三个 PN 结的温度,即结温。结温的高低由发热和冷却两方面的条件决定,条件不同,晶闸管允许的通态平均电流 I_{Ta} 也不一样。

晶闸管发热的原因是损耗,主要是导通时的管压降 U_T 引起的损耗,还有断态重复峰值电流 I_{DRM} 和反向重复峰值电流 I_{RRM} 引起的损耗,门极损耗和开关频率引起的损耗。

晶闸管冷却的条件包括:晶闸管与散热器接触情况和散热器的大小,冷却方式(自冷、风冷、水冷或油冷)和冷却介质的流速,环境温度和冷却介质的温度。

由于整流设备的输出端所接负载常用平均电流来衡量其性能,所以标定晶闸管的额定电

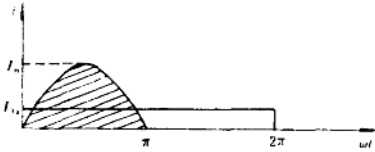


图 1-13 晶闸管的通态平均电流 I_{Ta}

流时和其它电气设备不一样,它不用有效值标定,而用在一定条件下的最大通态平均电流按电流标准等级就低取整数来标定。电流标准等级见表 1-2,然而从晶闸管管芯发热角度考虑(假定管芯电阻值不变)则发热多少和通过晶闸管的电流有效值有关,因此不论通过晶闸管的电流波形如何,导通角有多大,只要流过晶闸管的实际电流有效值等于

(小于更好)晶闸管的额定电流有效值 I_{TN} ,晶闸管的发热就被限制在允许的范围之内。

在图 1-13 中,当电流按正弦变化时, $i = I_m \sin \omega t$,根据通态平均电流的定义,则有:

$$I_{Ta} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{\pi} \quad (1-2)$$

额定电流有效值为:

$$I_{TN} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{2} \quad (1-3)$$

因此在额定情况下,电流有效值与平均值之比为:

$$\frac{I_{TN}}{I_{Ta}} = \frac{\pi}{2} = 1.57 \quad (1-4)$$

所以, $I_{TN} = 1.57 I_{Ta}$ 。此式说明: $I_{Ta} = 100\text{A}$ 的晶闸管,可以通过的电流有效值为 157A ,其余以此类推。

任何含有直流分量的电流波形,都可以求出平均电流 I_d 和有效值 I ,我们定义电流的波形系数为:

$$K_f = \frac{I}{I_d}$$

所以

$$I = K_f \cdot I_d \quad (1-5)$$

由前面所述,任意一个晶闸管允许通过的额定电流有效值 $I_{TN} = 1.57 I_{Ta}$,如果实际流过的电流有效值为 $I = K_f \cdot I_d$,按电流有效值相等的原则,有:

$$1.57I_{Ta} = K_f \cdot I_d$$

所以

$$I_{Ta} = \frac{K_f \cdot I_d}{1.57} \quad (1-6)$$

例:某负载要求通过的电流平均值 $I_d = 140\text{A}$, 电路图如图 1-12, 电流波形如图 1-14 所示, 试计算应选用额定电流为多少的晶闸管?

解:求出电流平均值 I_d 与最大值 I_m 的关系:

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) \\ &= \frac{I_m}{2\pi} \end{aligned}$$

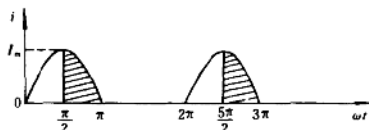


图 1-14 例题电流波形

求出电流有效值与最大值的关系:

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{2\sqrt{2}}$$

波形系数

$$K_f = \frac{I}{I_d} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} = 2.22$$

流过负载的电流有效值 $I = K_f \cdot I_d = 2.22 \times 140 \approx 310\text{A}$ (根据题意此电流也流过晶闸管) 按电流有效值相等原则:

$$1.57I_{Ta} = K_f \cdot I_d$$

所以

$$I_{Ta} = \frac{K_f \cdot I_d}{1.57} = \frac{310}{1.57} = 200\text{A}$$

应选择额定电流为 200A 的晶闸管。

由于晶闸管电流过载能力差,因而在选择晶闸管额定电流时,应取实际需要值的 (1.5~2) 倍,使之有一定的安全裕量,保证管子可靠运行,这样,式(1-6)就应修正为:

$$I_{Ta} = (1.5 \sim 2) \frac{K_f \cdot I_d}{1.57} \quad (1-7)$$

上例中应选择晶闸管的额定电流 $I_{Ta} = (1.5 \sim 2) \cdot \frac{310}{1.57} = (300 \sim 400)\text{A}$

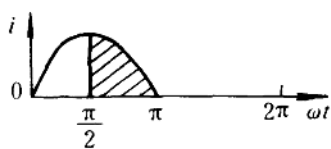
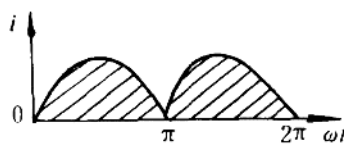
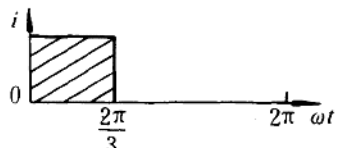
按标准电流等级取整数,选 300A 或 400A 的晶闸管。

不同的电流波形,其平均值、有效值和波形系数 K_f 也不同。表 1-1 列出五种电流波形、周期皆为 2π 、最大值皆为 I_m , 分别通过晶闸管时,其波形系数 K_f 和在相应的波形下,额定电流 $I_{Ta} = 100\text{A}$ 的晶闸管允许通过的电流平均值 I_{dT} 。

表 1-1 不同电流波形下的 I_d 、 I 与 I_m 的关系

波 形	平均值 I_d 、有效值 I 与最大值 I_m 关系	波形系数 $K_f = I/I_d$	允许电流平均值 $I_{dT} = I_{Te}/K_f$
	$I_d = \frac{I_m}{\pi}$ $I = \frac{I_m}{2}$	1.57	$I_{dT} = \frac{1.57 \times 100}{1.57} = 100\text{A}$

续表

波 形	平均值 I_d 、有效值 I 与 最大值 I_m 关系	波形系数 $K_I = I/I_d$	允许电流平均值 $I_{dT} = I_{T\sigma}/K_I$
	$I_d = \frac{I_m}{2\pi}$ $I = \frac{I_m}{\sqrt{2} \cdot 2}$	2.22	$I_{dT} = \frac{1.57 \times 100}{2.22}$ $= 70.7 \text{ A}$
	$I_d = \frac{2I_m}{\pi}$ $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$	1.11	$I_{dT} = \frac{1.57 \times 100}{1.11}$ $= 141.4 \text{ A}$
	$I_d = \frac{I_m}{3}$ $I = \frac{I_m}{\sqrt{3}}$	1.73	$I_{dT} = \frac{1.57 \times 100}{1.73}$ $= 90.7 \text{ A}$
	$I_d = \frac{I_m}{6}$ $I = \frac{I_m}{\sqrt{6}}$	2.45	$I_{dT} = \frac{1.57 \times 100}{2.45}$ $= 64.1 \text{ A}$

上列数据表明:同一电流波形的面积越大(说明晶闸管导通的时间越长), K_I 越小,允许通过的平均电流越大,反之亦然。当 $K_I > 1.57$ 时,允许通过的平均电流 I_{dT} 小于晶闸管的通态平均电流 $I_{T\sigma}$; $K_I < 1.57$ 时,则大于 $I_{T\sigma}$ 。从而可知:变化规律相同的电流波形,由于导通时间不同,电流波形的面积不同,其平均值、有效值和波形系数也不同。

在一个周期内,当波形重复出现、使波形面积成倍增加时,其平均值、有效值和波形系数将遵从下列关系:

$$\left. \begin{aligned} I_{dn} &= \frac{1}{2\pi} \cdot n \int_a^b i d(\omega t) = n \cdot I_{d1} \\ I_n &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot n \int_a^b i^2 d(\omega t)} = \sqrt{n} I_1 \\ K_{In} &= \frac{I_n}{I_{dn}} = \frac{\sqrt{n} \cdot I_1}{n \cdot I_{d1}} = \frac{1}{\sqrt{n}} K_{I1} \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

式中 I_{d1}, I_1, K_{I1} ——单个波形在一个周期内的平均值、有效值和波形系数;

I_{dn}, I_n, K_{In} ——在一个周期内,单个波形重复出现 n 次的平均值、有效值和波形系数。

显然,当波形重复出现使面积增到二倍时,则电流平均值增到二倍,电流有效值只增到 $\sqrt{2}$ 倍,波形系数 K_I 却减到 $1/\sqrt{2}$ 倍。反之亦然。式(1-8)的关系,也适用于电压波形。

2. 维持电流 I_H :晶闸管在导通状态下,无门极信号。令阳极电流 I_a 下降,降到刚刚能维持

管子导通的最小阳极电流,就叫维持电流。换言之,如果阳极电流 I_a 降到某个数值以下时,晶闸管就关断,则此电流值就是维持电流值。

3. 擎住电流 I_L : 当晶闸管的阳极-阴极间加正向电压,门极上加正向电压时,晶闸管被触发导通,即由阻断状态转到导通状态,此后阳极电流逐渐上升,当升到某个数值时,去掉门极电压,如果仍能维持管子导通,所需要的最小阳极电流叫擎住电流。换言之,如果阳极电流还没有升到擎住电流值就去掉门极电压,则晶闸管不能维持导通而返回到阻断状态。对于同一晶闸管来说,擎住电流 I_L 通常为维持电流 I_H 的 2~4 倍。

例:某晶闸管维持电流 $I_H = 20\text{mA}$,门极上加正向脉冲电压,使用在图 1-15 电路中,晶闸管 VT 是否能够导通,请说明理由。

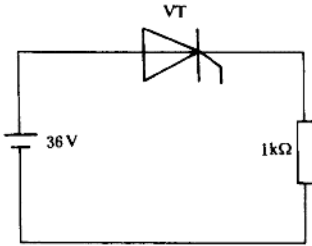


图 1-15 例题电路图

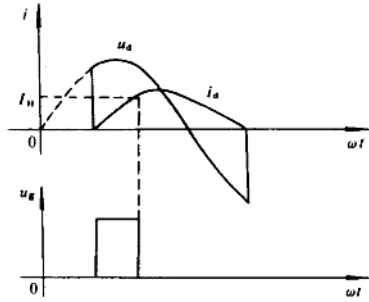


图 1-16 思考题波形图

解:擎住电流 $I_L = (2 \sim 4)I_H$
 $= 40 \sim 80\text{mA}$

图中所给数据表明:即使管子导通,阳极电流 $I_a = 36\text{V}/1\text{k}\Omega = 36\text{mA} < I_L$,脉冲电压消失后管子不能继续导通而关断。所以晶闸管 VT 不能导通。

〔思考题〕 某晶闸管正常工作时,输出电压 u_d ,输出电流 i_d 波形如图 1-16 所示,如果脉冲电压 u_g 如图所示,晶闸管能否正常工作,为什么?

4. 断态重复峰值电流 I_{DRM} 和反向重复峰值电流 I_{RRM} : 分别对应于晶闸管承受断态重复峰值电压 U_{DRM} 和反向重复峰值电压 U_{RRM} 时的电流值,见表 1-1 所示。

5. 浪涌电流 I_{TSM} : 由于电路异常,并使结温超过额定值的不重复性最大通态过载电流。用峰值表示于表 1-2 中。

三、晶闸管的门极定额

1. 门极触发电流 I_{GT} : 使晶闸管由断态转入通态所必须的最小门极电流。

2. 门极触发电压 U_{GT} : 产生门极触发电流所必须的最小门极电压。

生产晶闸管的工厂必须使产品的 I_{GT} 和 U_{GT} 符合标准所规定的数值,见表 1-3。对于晶闸管的使用者,应使触发电路输送到门极上的电压和电流大于晶闸管合格证上所列的数值,以使工作可靠,但不能超过其峰值 U_{gsm} 和 I_{gsm} 。门极平均功率 P_{gs} 和瞬时功率 P_{gm} 也不能超过规定值,见表 1-3。