

第 3 章

电力电子技术基础知识

3.1 电力电子技术概述

电力电子技术(power electronics technology)与信息电子技术(模拟电子技术和数字电子技术)构成了电子技术的整体。国际电气和电子工程师协会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)的电力电子学会对电力电子技术的定义是: 有效地使用电力半导体器件, 应用电路和设计理论以及分析开发工具, 实现多电能的高效能变换和控制的一门技术, 它包括电压、电流、频率和波形等方面的变换。

电力电子技术包括电力电子器件、变换电路和控制电路三个部分, 其中, 电力电子器件是基础, 变流技术是电力电子技术的核心。随着科学技术的发展, 电力电子技术又与现代控制理论、材料科学、电机工程、微电子技术等许多领域密切相关。目前, 电力电子技术已逐步发展成为一门多学科互相渗透的综合性技术学科。

3.1.1 电力电子器件简介

20 世纪 50 年代, 第一个晶闸管(thyristor)诞生后, 电力电子器件如雨后春笋般问世并得到发展。以器件为核心的电力电子技术的发展大体可划分为两个阶段: 1957—1980 年称为传统电力电子技术阶段; 1980 年至今称为现代电力电子技术阶段。

1. 传统电力电子器件

晶闸管有两大突破: 一方面是功率变换能力的突破; 另一方面是实现了弱电控制强电变换的突破。晶闸管的出现使电子技术步入了功率领域, 在工业上引起一场技术革命, 晶闸管的派生器件越来越多, 功率越来越大, 性能越来越好。截至 1980 年, 由普通晶闸管衍生出了快速晶闸管(fast switching thyristor, FWT)、逆导晶闸管(reverse-conducting thyristor, RCT)、双向晶闸管(triode AC semiconductor switch, TRIAC)和不对称晶闸管(asymmetrical silicon controlled rectifier, ASCR)等, 从而形成了一个晶闸管大家族。与此同时, 各类晶闸管的电压、电流、电压变化率、电流变化率等参数均有很大提高, 开关特性也有很大改善。

传统的电力电子器件已发展到相当成熟的地步, 但在实际应用上存在着两个制约

其继续发展的重要因素。一是控制功能上的欠缺,它通过门极只能控制开通而不能控制关断,所以称之为半控制器件。要想关断这种器件必须另加用电感、电容和辅助开关器件组成的强迫换流电路,这样将使整机体积增大、重量增加、效率降低。二是因它立足于分立元器件结构,工作频率难以提高,一般情况下难以高于 400Hz,因而大大地限制了它的应用范围。由于上述两个原因,以半控制器件晶闸管为代表的传统电力电子器件的发展受到极大的影响。

以晶闸管为核心的变换电路应用在直流传动、机车牵引和电化电源等领域,由于这些电路的功率因数低、网侧及负载上的谐波严重,因此阻碍了它们的继续发展。新型电力电子器件的迅速发展,为电力电子变换电路带来新的转机。但是,晶闸管系列器件的价格相对低廉,在大电流、高电压的发展空间依然较大,尤其在特大功率应用场合,其他器件尚且不易替代。在我国,以晶闸管为核心的应用设备仍有许多在生产现场使用,晶闸管及与其相关的知识目前仍是初学者的基础。

2. 现代电力电子器件

20 世纪 80 年代以来,微电子技术与电力电子技术在各自发展的基础上相结合而产生了一代高频化、全控型的电力集成器件,从而使电力电子技术由传统的电力电子技术跨入现代电力电子技术的新时代。现代电力电子器件是指全控型的电力半导体器件,这类器件可分为三大类:双极型、单极型和混合型。

1) 双极型器件

双极型器件是指在器件内部电子和空穴两种载流子都参与导电过程的半导体器件。这类器件的通态压降低、阻断电压高、电流容量大,适合于中大容量的变流装置。常见的有门极关断晶闸管(gate turn-off thyristor, GTO)、电力晶体管(giant transistor, GTR)和静电感应晶闸管(static induction thyristor, SITH)。

2) 单极型器件

单极型器件是指器件内只有一种载流子(多数载流子)参与导电过程的半导体器件。这类器件的典型产品有:电力场控晶体管(power metal oxide semiconductor field effect transistor, 电力 MOSFET)和静电感应晶体管(static induction transistor, SIT)。单极型器件由多数载流子导电,无少子存储效应,因而开关时间短,一般在几十纳秒以下,故工作频率高。如电力 MOSFET 的工作频率可达 500kHz 以上, SIT 的截止频率可达 30~50MHz。此外,它们还具有输入阻抗高,控制较为方便及抗干扰能力强等特点,属于电压控制型元件。

3) 混合型器件

所谓混合型是指双极型器件与单极型器件的集成混合。它是用双极型器件(GTR、GTO 晶闸管)作为主导器件,用单极型器件(MOSFET)作为控制器件混合集成之后产生的器件。这种器件既具有双极型器件电流密度高、导通压降低的优点,又具有单极型器件输入阻抗高、响应速度快的优点。目前已开发的混合型器件有:肖特基注入 MOS 门极晶体管(Schottky injection MOS gate transistor, SINFET)、绝缘门极双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGT 或 IGBT)、MOS 晶闸管(MOS controlling thyristor, MCT 或 MCTH)等。

IGBT 被认为是最有发展前途的复合器件之一,它们的出现为工业应用领域的高频化

开辟了广阔的天地。IGBT 目前广泛应用于高精度变频调速、不间断电源(uninterruptible power supply, UPS)、开关电源、高频逆变式整流焊机、超声电源、高频 X 射线机电源、高频调制整流电源以及各种高性能、低损耗和低噪声的场合。

随着集成工艺的提高和突破,电力集成电路(power integrated circuit, PIC)智能功率模块(intelligent power module, IPM)也得到了进一步的发展。这些器件实现了电力器件与电路的总体集成,使微电子技术 with 电力电子技术相辅相成,把信息科学融入电力变换。混合型器件实现了多功能化,不但具有开关功能,还增加了保护、检测和驱动功能,使强电和弱电的结合更趋完美,应用电路更为简化,应用范围进一步拓宽。

从总体上看,现代电力电子器件的主要特点是:集成化、高频化、全控化和多功能化。

3.1.2 变换电路与控制技术简介

变换电路是以电力电子器件为核心,通过不同电路和控制方法来实现对电能的转换和控制。它的基本功能是使交流(alternating current, AC)和直流(direct current, DC)电能互相转换,有以下几种类型。

(1) 可控整流器(AC-DC)。把交流电压变换成为固定或可调的直流电压,如应用于直流电机的调压调速、电解、电镀设备等。

(2) 有源逆变器(DC-AC)。把直流电压变换成为频率固定或可调的交流电压,如应用于直流输电、牵引机车制动时的电能回馈等。

(3) 交流调压器(AC-AC)。把固定或变化的交流电压变换成为可调或固定的交流电压,如应用于灯光控制、温度控制等。

(4) 无源逆变器(AC-DC-AC)。把固定或变化频率的交流电变换成频率可调的或恒定的交流电,如应用于变频电源、UPS、变频调速等设备。

(5) 直流斩波器(DC-DC)。把固定或变化的直流电压变换成为可调或固定的直流电压,如应用于电气机车、城市电车牵引等。

(6) 无触点电力静态开关。接通或切断交流或直流电流通路,用于取代接触器、继电器。

控制技术是改进变换电路的性能和效率所不可缺少的关键技术之一。对于晶闸管而言,其控制方法是调整器件的导通角,即控制触发脉冲与主电路之间的相移角,称之为相控技术。由全控型器件组成的变换电路中,多采用脉宽调制(pulse width modulation, PWM)技术,由于 PWM 技术可以有效地抑制谐波,动态响应速度快,因而使变换电路的性能大大提高。全控型器件的问世,使得变换电路与控制技术发生了巨大的变化,除了整流电路之外,其他几种变换电路的性能指标都远远超过晶闸管变换电路。无论是相控技术还是 PWM 技术,都在应用中不断地完善、改进,并涌现出许多专用集成触发(驱动)电路,使实际应用电路具有简便、工作稳定和体积小等优点。与此同时,变换电路的控制技术正朝着数字化的方向发展。

由电力电子器件构成的变换电路,具有以下典型优势:①体积小,重量轻,耐磨损,无噪声及维修方便;②功率增益高,控制灵活;③控制动态性能好,响应快(毫秒级或微秒级),动态时间短;④效率高,节约能源。

由于电力电子器件本身特性的不足,变换电路的缺点也不可避免,比如:①过载(过电

压、过电流)能力低;②某些工作条件下功率因数低;③对电网会有谐波“公害”。

电力电子技术的应用范围十分广泛,在交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统及家电领域均发挥了重要作用。

3.2 电力电子器件

3.2.1 电力二极管

电力二极管与普通二极管的结构、工作原理和伏安特性相似,但它的主要参数的规定、选择原则等不尽相同,使用时应当引起注意。

1. 电力二极管的结构原理与伏安特性

1) 结构原理

电力二极管的基本结构和图形符号如图 3-1 所示。

图 3-1 中,电力二极管引出两个极,分别称为阳极 A 和阴极 K,使用的符号也与普通二极管一样。由于电力二极管功耗较大,它的外形有螺旋式和平板式两种。螺旋式二极管的阳极紧拴在散热器上。平板式二极管又分为风冷式和水冷式,它的阳极和阴极分别由两个彼此绝缘的散热器紧紧夹住。

电力二极管的内部结构是一个 PN 结,结面积较大,如图 3-2 所示。

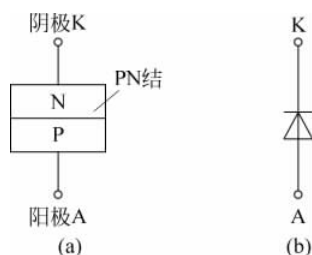


图 3-1 电力二极管的基本结构和图形符号

(a) 基本结构; (b) 图形符号

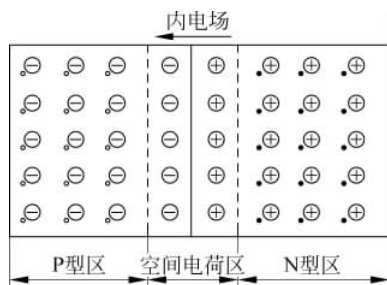


图 3-2 PN 结的形成

图 3-2 中,由于 N 区和 P 区交界处电子和空穴的浓度差异,造成了各区的多数载流子(多子)向另一区的扩散运动,到对方区内成为少数载流子(少子),从而在界面两侧分别留下了带正、负电荷但不能任意移动的杂质离子。这些不能移动的正、负电荷被称为空间电荷。空间电荷建立的电场被称为内电场或自建电场,其方向是阻止扩散运动的,另一方面又吸引对方区内的少子(对本区而言则为多子)向本区运动,这就是所谓的漂移运动。扩散运动和漂移运动既相互联系又是一对矛盾,最终达到动态平衡,正、负空间电荷量达到稳定值,形成了一个稳定的由空间电荷构成的范围,被称为空间电荷区,按所强调的角度不同也被称为耗尽层、阻挡层或势垒区。

当 PN 结外加正向电压时(正向偏置),即外加电压的正端接 P 区、负端接 N 区时,外加

电场与 PN 结自建电场方向相反,使得多子的扩散运动大于少子的漂移运动,原来的动态平衡遭到破坏,多子的扩散运动占优势,形成扩散电流,在内部造成空间电荷区变窄,而在外电路上则形成自 P 区流入而从 N 区流出的电流,称为正向电流 I_F 。当外加电压升高时,自建电场将进一步被削弱,扩散电流进一步增加。这就是 PN 结的正向导通状态。当 PN 结上流过的正向电流较小时,二极管的电阻主要取决于基片的低掺杂 N 区的欧姆电阻,其阻值较高且为常量,因而管压降随正向电流的上升而增加;当 PN 结上流过的正向电流较大时,注入并积累在低掺杂 N 区的少子空穴浓度将很大,远远超过原始 N 型基片的多子浓度,为了维持半导体电中性条件,其多子浓度也相应地大幅度增加,使得其电阻率明显下降,也就是电导率大大增加,这就是电导调制效应。换言之,PN 结在正向电流较大时,通过正向 PN 结两侧载流子存储量或电导率的自动调节作用,使 PN 结压降随着正向电流的增大而增加很少,基本维持在 1V 左右,所以正向偏置的 PN 结表现为低阻态,通态压降很低。在 GTR、SCR、IGBT、SITH 和 MCT 等器件中,都存在着这种电导调制效应,故它们的通态压降都很低,都是利用了正向 PN 结的电导调制效应的优点。

当 PN 结外加反向电压时(反向偏置),外加电场与 PN 结自建电场方向相同,使得少子的漂移运动大于多子的扩散运动,原来的动态平衡遭到破坏,少子的漂移运动占优势,形成漂移电流,在内部造成空间电荷区变宽,而在外电路上则形成自 N 区流入而从 P 区流出的电流,称为反向电流 I_R 。但是少子的浓度很小,在温度一定时漂移电流的数值趋于恒定,被称为反向饱和电流 I_s ,一般仅为微安数量级,因此反向偏置的 PN 结表现为高阻态,几乎没有电流流过,被称为反向截止状态。这就是 PN 结的单向导电性,二极管的基本原理就在于 PN 结的单向导电性这个主要特征。

PN 结具有一定的反向耐压能力,但当施加的反向电压过大时,反向电流将会急剧增大,破坏 PN 结反向偏置为截止的工作状态,这就叫反向击穿。按照机理不同,反向击穿有雪崩击穿和齐纳击穿两种形式。反向击穿发生时,只要外电路中采取了措施,将反向电流限制在一定范围内,则当反向电压降低后 PN 结仍可恢复原来的状态。但如果反向电流未被限制住,使得反向电流和反向电压的乘积超过了 PN 结容许的耗散功率,就会因热量散发不出去而导致 PN 结温度上升,直至过热而烧毁,这就是热击穿。

PN 结中的电荷量随外加电压而变化,呈现电容效应,称为结电容 C_j ,又称为微分电容。结电容按其产生机制和作用的差别分为势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D 。势垒电容只在外加电压变化时才起作用(空间电荷区的宽度变化,具有充放电效应),外加电压频率越高,势垒电容作用越明显。势垒电容的大小与 PN 结截面积成正比,与阻挡层厚度成反比;扩散电容仅在正向偏置时存在。总之,在反偏和正偏低压时,以势垒电容为主;正向电压较高时,扩散电容为结电容的主要成分。结电容影响 PN 结的工作频率,特别是在高速开关的状态下,可能使其单向导电性变差,甚至不能工作,应用时应加以注意。

由于电力二极管正向导通时要流过很大的电流,其电流密度较大,因而额外载流子的注入水平较高,电导调制效应有一定限度,而且对其引线和焊接电阻的压降都有明显的影响;再加上其承受的电流变化率 $\Delta i/\Delta t$ 较大,因而对其引线和器件自身的电感效应也会有较大影响;此外,为了提高反向耐压,其掺杂浓度低也造成正向压降较大。这些都使得电力二极管与信息电子电路中的普通二极管有所区别。

2) 伏安特性

电力二极管的阳极和阴极间的电压和流过管子的电流之间的关系称为伏安特性,如图 3-3 所示。

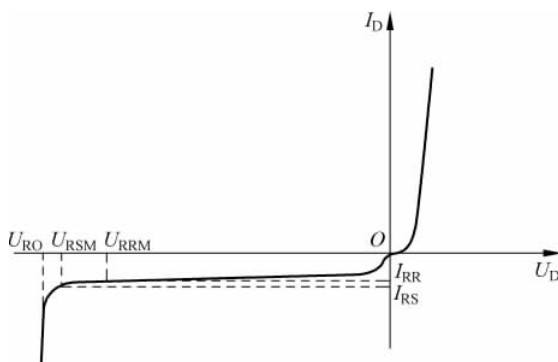


图 3-3 电力二极管的伏安特性

图 3-3 中,当从零逐渐增大二极管的正向电压时,开始阳极电流很小,这一段特性曲线很靠近横坐标轴。当正向电压大于 0.5V 时,正向阳极电流急剧上升,管子正向导通。如果电路中不接限流元件,二极管将被烧毁。

当二极管加上反向电压时,起始段的反向漏电流也很小,而且随着反向电压增加,反向漏电流只略有增大,但当反向电压增加到反向不重复峰值电压 (U_{RSM}) 时,反向漏电流开始急剧增加。同样,如果反向电压不加限制的话,二极管将被击穿而损坏。

2. 电力二极管的主要参数

1) 额定电流(正向平均值电流) I_F

额定电流是指在规定的环境温度为 40℃ 和标准散热条件下,器件 PN 结温度稳定且不超过 140℃ 时,所允许长时间连续流过 50Hz 正弦半波的电流平均值。将此电流值取规定系列的电流等级,即为器件的额定电流 I_F 。

2) 反向重复峰值电压 U_{RRM}

在额定结温条件下,取器件反向伏安特性不重复峰值电压值 U_{RSM} (图 3-3) 的 80% 称为反向重复峰值电压 U_{RRM} 。将 U_{RRM} 值取规定的电压等级就是该器件的额定电压。

3) 正向平均电压 U_F

在规定的环境温度为 40℃ 和标准散热条件下,器件通过 50Hz 正弦半波额定正向平均值电流时,器件阳极和阴极之间的电压的平均值,取规定系列组别称为正向平均电压 U_F ,简称管压降,一般在 0.45~1V 范围内。

4) 最高工作结温 T_{JM}

结温是指管芯 PN 结的平均温度。最高工作结温是指在 PN 结不致损坏的前提下所能承受的最高平均温度,用 T_{JM} 表示。 T_{JM} 通常在 125~175℃ 范围之内。

3. 电力二极管的参数选择

1) 额定正向平均电流 I_F 的选择原则

在规定的室温和冷却条件下,额定正向平均电流 I_F 可按下式计算后取相应标准系

列值:

$$I_F = (1.5 \sim 2) \times \frac{I_{DM}}{1.57} \quad (3-1)$$

式中, I_{DM} 表示流过二极管的最大电流有效值。考虑到器件的过载能力较小, 因此选择时要加上 1.5~2 倍的安全余量。

2) 额定电压 U_{RRM} 的选择原则

选择电力二极管的反向重复峰值电压 U_{RRM} 的原则是, 将其取为管子所工作的电路中可能承受的最大反向瞬时值电压 U_{DM} 的 2~3 倍, 即

$$U_{RRM} = (2 \sim 3)U_{DM} \quad (3-2)$$

4. 电力二极管的主要类型

由于半导体物理结构和工艺上的差别, 不同类型电力二极管的正向压降、反向耐压、反向漏电流及反向恢复特性等性能都各有差异。

1) 普通二极管

普通二极管又称整流二极管, 多用于开关频率不高(1kHz 以下)的整流电路中。其反向恢复时间较长, 一般在 5ms 以上, 这在开关频率不高时并不重要, 在参数表中甚至不列出这一参数。但其正向电流定额和反向电压定额却可以很高, 分别可达数千安和数千伏以上。

2) 快恢复二极管

恢复过程很短, 特别是反向恢复过程很短(一般在 $5\mu s$ 以下)的二极管被称为快恢复二极管, 简称快速二极管。工艺上多采用掺金措施, 结构上有的采用 PN 结构, 也有的采用改进的 PiN 结构。特别是采用外延型 PiN 结构的所谓快恢复外延二极管, 其反向恢复时间更短(可低于 50ns), 正向压降也很低(0.9V 左右), 但其反向耐压多在 400V 以下。不管是什么结构, 快恢复二极管从性能上可分为快速恢复和超快速恢复两个等级。前者的反向恢复时间为数百纳秒或更长, 后者则在 100ns 以下, 甚至达到 20~30ns。

3) 肖特基二极管

以金属和半导体接触形成的势垒为基础的二极管称为肖特基势垒二极管, 简称为肖特基二极管。肖特基二极管在信息电子电路中早就得到了应用, 但直到 20 世纪 80 年代以来, 由于工艺的发展才得以在电力电子电路中广泛应用。与以 PN 结为基础的电力二极管相比, 肖特基二极管的优点在于: 反向恢复时间很短(10~40ns), 正向恢复过程中也不会有明显的电压过冲; 在反向耐压较低的情况下其正向压降也很小, 明显低于快恢复二极管。因此, 其开关损耗和正向导通损耗都比快速二极管还要小, 效率高。肖特基二极管的弱点在于: 正向耐压和反向耐压都较低, 因此多用于 200V 以下的低压场合; 反向漏电流较大且对温度敏感, 因此反向稳态损耗不能忽略, 而且必须更严格地限制其工作温度。

3.2.2 晶闸管

1. 晶闸管的结构

晶闸管的外形及图形符号如图 3-4 所示。

晶闸管的外形大致有三种: 塑封形、螺栓形和平板形。图 3-4(a)所示为塑封形(额定电

流 10A 以下); 图 3-4(b)和(c)所示为螺栓形(额定电流 10~200A); 图 3-4(d)所示为平板形(额定电流 200A 以上)。晶闸管工作时,由于器件损耗而产生热量,需要通过散热器降低管芯温度,器件外形是为便于安装散热器而设计的。

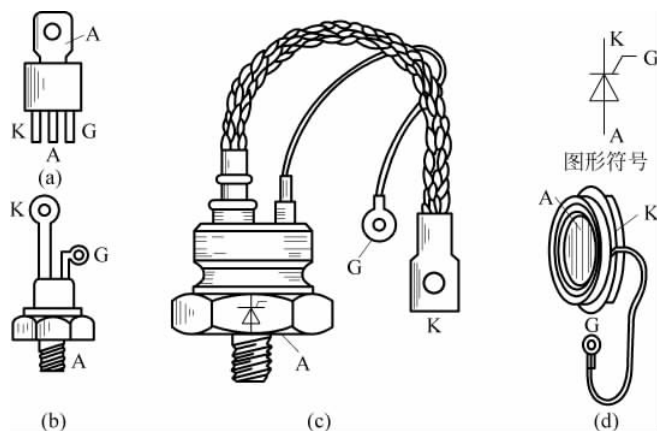


图 3-4 晶闸管的外形及图形符号

晶闸管是四层($P_1N_1P_2N_2$)三端(阳极 A、阴极 K、门极 G)器件,其内部结构和等效电路如图 3-5 所示。

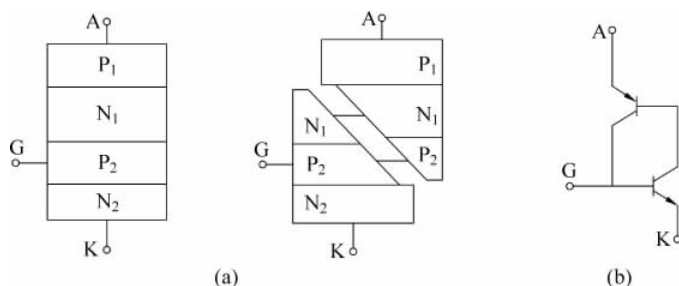


图 3-5 晶闸管的内部结构及等效电路

(a) 芯片内部结构; (b) 互补三极管等效电路

2. 晶闸管的工作原理

晶闸管的 $P_1N_1P_2N_2$ 结构又可以等效为两个互补连接的三极管,其中 N_1 和 P_2 区既是一个三极管的集电极,同时又是另一个管子的基极,如图 3-6 所示。晶闸管的工作原理可依此解释。

图 3-6 中,当晶闸管加正向阳极电压,门极也加上足够的门极电压时,则有电流 I_G 从门极流入 NPN 管的基极,即 I_{B2} ,经 NPN 管放大后的集电极电流 I_{C2} 流入 PNP 管的基极,再经 PNP 管的放大,其集电极电流 I_{C1} 又流入 NPN 管的基极,如此循环,产生强烈的增强式正反馈过程,使两个晶体管很快饱和导通,从而使晶闸管

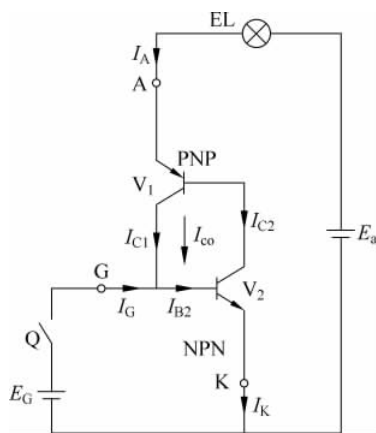


图 3-6 晶闸管工作原理示意图

由阻断迅速地变为导通。流过晶闸管的电流将取决于外加电源电压和主回路的阻抗的大小。

晶闸管一旦导通,即使 $I_G=0$,但因 I_{C1} 的电流在内部直接流入 NPN 管的基极,晶闸管仍将继续保持导通状态。若要晶闸管关断,只有降低阳极电压到零或对晶闸管加上反向阳极电压,使 I_{C1} 的电流减少至 NPN 管接近截止状态,即流过晶闸管的阳极电流小于维持电流。

关于晶闸管的导通与关断条件,可总结如下:

(1) 晶闸管的导通条件。在晶闸管的阳极和阴极间加正向电压,同时在它的门极和阴极间也加正向电压,两者缺一不可。

(2) 晶闸管一旦导通,门极即失去控制作用,因此门极所加的触发电压一般为脉冲电压。晶闸管从阻断变为导通的过程称为触发导通。门极触发电流一般只有几十毫安到几百毫安,而晶闸管导通后,可以通过几百安、几千安的电流。

(3) 晶闸管的关断条件。使流过晶闸管的阳极电流小于维持电流。所谓维持电流就是保持晶闸管导通的最小电流。

3. 晶闸管的伏安特性

1) 阳极伏安特性

晶闸管的阳极与阴极间的电压和阳极电流之间的关系,称为阳极伏安特性。晶闸管的阳极伏安特性曲线如图 3-7 所示。

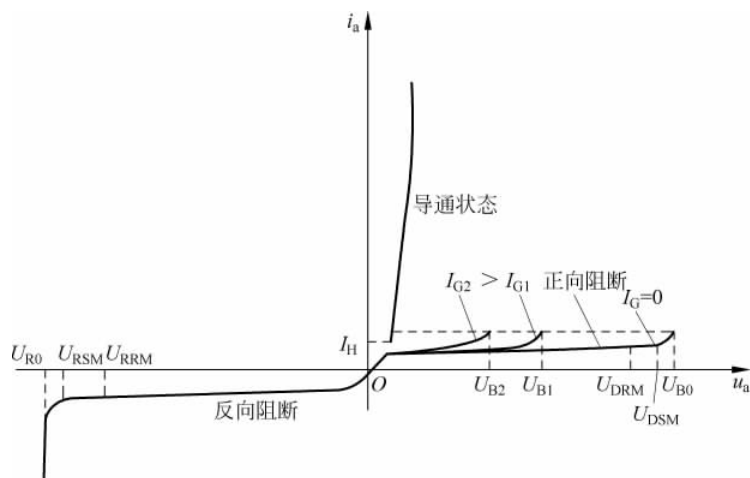


图 3-7 晶闸管的阳极伏安特性

图 3-7 中,第 I 象限为正向特性,当 $I_G=0$ 时,如果在晶闸管两端所加正向电压 u_a 未增到正向转折电压 U_{B0} 时,器件都处于正向阻断状态,只有很小的正向漏电流。当 u_a 增到 U_{B0} 时,则漏电流急剧增大,器件导通,正向电压降低,其特性和二极管的正向伏安特性相仿。通常不允许采用这种方法使晶闸管导通,因为这样的多次导通会造成晶闸管损坏。一般采用对晶闸管的门极加足够大的触发电流的方法使其导通,门极触发电流越大,正向转折电压越低。晶闸管的反向伏安特性曲线如图 3-7 中第 III 象限所示,它与整流二极管的反向伏安特

性相似。处于反向阻断状态时,只有很小的反向漏电流,当反向电压超过反向击穿电压 U_{R0} 后,反向漏电流急剧增大,造成晶闸管反向击穿而损坏。

2) 门极伏安特性

晶闸管的门极伏安特性是指晶闸管门极电压与电流的关系。晶闸管的门极和阴极之间只有一个 PN 结,所以门极伏安特性曲线和普通二极管相似,如图 3-8 所示。

同一型号的晶闸管门极伏安特性呈现较大的离散性,通常以高阻和低阻两条特性曲线为边界,划定一个区域,其他的门极伏安特性曲线都处于这个区域内。

现将门极几个主要参数的标准说明如下:

(1) 门极不触发电压 U_{GD} 和门极不触发电流 I_{GD} 。不能使晶闸管从断态转入通态的最大门极电压称为门极不触发电压 U_{GD} ,相应的最大电流称为门极不触发电流 I_{GD} 。显然小于该数值时,处于阻断状态的晶闸管不可能被触发导通,当然干扰信号应限制在该数值以下。

(2) 门极触发电压 U_{GT} 和门极触发电流 I_{GT} 。在室温下,对晶闸管加上 6V 正向阳极电压时,使器件由断态转入通态所必需的最小门极电流称为门极触发电流 I_{GT} ,相应的门极电压称为门极触发电压 U_{GT} 。

(3) 门极正向峰值电压 U_{GM} 、门极正向峰值电流 I_{GM} 和门极峰值功率 P_{GM} 。在晶闸管触发过程中,不至造成门极损坏的最大门极电压、最大门极电流和最大瞬时功率分别称为门极正向峰值电压 U_{GM} 、门极正向峰值电流 I_{GM} 和门极峰值功率 P_{GM} 。使用时晶闸管的门极触发脉冲应不超过以上数值。

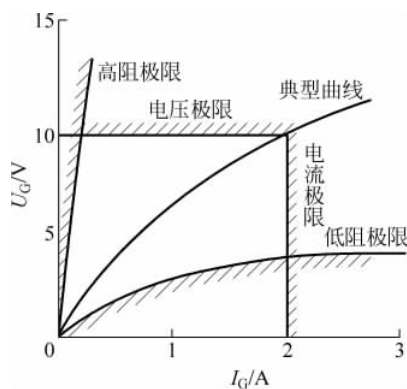


图 3-8 晶闸管的门极伏安特性

4. 晶闸管的主要参数

1) 额定电压 U_{TN}

由图 3-7 所示晶闸管的阳极伏安特性曲线可见,当门极开路,器件处于额定结温时,根据所测定的正向转折电压 U_{B0} 和反向击穿电压 U_{R0} ,由制造厂家规定减去某一数值(通常为 100V),分别得到正向不可重复峰值电压 U_{DSM} 和反向不可重复峰值电压 U_{RSM} ,再各乘以 0.9,即得正向断态重复峰值电压 U_{DRM} 和反向阻断重复峰值电压 U_{RRM} 。将 U_{DRM} 和 U_{RRM} 中较小的那个值按百位取整后作为该晶闸管的额定电压值。例如,一晶闸管实测 $U_{DRM} = 840V$, $U_{RRM} = 720V$,将二者较小的 720V 取整得 700V,该晶闸管的额定电压为 700V 即 7 级。表 3-1 所列晶闸管额定电压的等级与额定电压范围的关系。

表 3-1 晶闸管正反向重复峰值电压的等级

级 别	额定电压/V	说 明
1,2,3,⋯,10	100,200,300,⋯,1 000	额定电压 1 000V 以下,每增加 100V 级别数加 1
12,14,16,⋯	1 200,1 400,1 600,⋯	额定电压 1 200V 以上,每增加 200V 级别数加 2