

现代电力电子技术^①

何希才 江云霞 编著

图书在版编目(CIP)数据

现代电力电子技术/何希才,江云霞编著. —北京:国防工业出版社,1996.7

ISBN 7-118-01579-2

I. 现… II. ①何… ②江… III. 电力电子学-电子技术
IV. TN01

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第01002号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

(邮政编码 100044)

北京昌平长城印刷厂印刷

新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 11 252千字

1996年7月第1版 1996年7月北京第1次印刷

印数:1-3000册 定价:14.20元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

目 录

绪论	1	一、电阻性负载	43
第一章 电力半导体器件的性能及其控制电路	3	二、电感性负载	44
1-1 概述	3	三、电容性负载	44
1-2 二极管	3	2-2 单相桥式整流电路	45
1-3 普通晶闸管	4	一、不控桥整流电路的工作原理	45
一、普通晶闸管的结构与工作原理	4	二、全控桥整流电路的工作原理	46
二、晶闸管的伏安特性	5	三、半控桥整流电路的工作原理	47
三、晶闸管应用技术	6	2-3 三相半波可控整流电路	47
四、晶闸管的门极控制电路	7	2-4 三相全控桥整流电路	49
1-4 双向晶闸管	10	2-5 功率因数及其改善对策	49
一、双向晶闸管的结构与工作原理	10	一、功率因数、基波功率因数与失真率之间的关系	49
二、双向晶闸管的电压与电流选用	10	二、功率因数改善对策	50
三、双向晶闸管的触发电路	11	2-6 换流时电流的重叠	51
1-5 可控开关	12	第三章 直流/直流开关变换器	53
1-6 功率晶体管	14	3-1 概述	53
一、功率晶体管的结构与工作原理	14	3-2 降压型变换器	54
二、功率晶体管的应用技术	16	一、概述	54
三、功率晶体管基极驱动电路的设计	17	二、电流连续工作方式	56
1-7 功率 MOS FET	21	三、电流连续与断续之间的界限	57
一、功率 MOS FET 的结构与工作原理	21	四、电流断续工作方式	57
二、功率 MOS FET 的应用技术	22	五、输出电压的纹波	60
三、功率 MOS FET 栅极驱动电路的设计	24	3-3 升压型变换器	61
1-8 绝缘栅双极晶体管	28	一、概述	61
一、绝缘栅双极晶体管的结构与工作原理	28	二、电流连续方式	61
二、绝缘栅双极晶体管的特性与栅极控制技术	28	三、电流连续与断续的界限	62
三、绝缘栅双极晶体管的应用技术	35	四、电流断续方式	63
1-9 可关断晶闸管	39	五、输出电压的纹波	64
一、可关断晶闸管的工作原理	39	3-4 升降压型变换器	65
二、可关断晶闸管的门极控制技术	40	一、概述	65
第二章 整流电路	43	二、电流连续方式	65
2-1 单相半波整流电路	43	三、电流连续与断续的界限	66
		四、电流断续方式	67
		五、输出电压的纹波	67
		3-5 Cuk 变换器	68
		3-6 全桥式变换器	70

一、概述	70	三、电压抵消的 ZVS-CV 直流/ 直流变换器	115
二、双极性电压开关的 PWM	71	5-7 零电压开关的谐振直流环节 逆变器	117
三、单极性电压开关的 PWM	73	5-8 高频环节整数倍半波变换 器	120
第四章 直流斩波器与逆变器	76	第六章 电力电子技术应用	122
4-1 直流斩波器	76	6-1 开关稳压电源	122
一、斩波原理	76	一、概述	122
二、可逆斩波器	78	二、自激式直流/直流变换器	122
三、晶闸管直流开关中的换流电路	80	三、利用饱和变压器的直流/直流 变换器	126
4-2 逆变器	84	四、他激式开关稳压器	132
一、逆变器的基本工作原理	84	五、脉宽控制与保护电路	133
二、谐振型逆变器	84	6-2 不间断电源	139
三、矩形波逆变器	85	一、概述	139
四、PWM 逆变器	87	二、主回路变换技术	140
第五章 谐振变换器	91	三、UPS 的切换开关	149
5-1 概述	91	四、充电装置	151
5-2 谐振变换器的类型	93	6-3 直流电动机驱动控制	152
一、负载谐振变换器	93	一、控制原理	152
二、谐振开关变换器	93	二、晶闸管伦纳德方式	152
三、谐振直流环节变换器	93	三、斩波器	155
四、高频环节整数倍半波变换器	93	6-4 感应电动机的变速控制	157
5-3 基本谐振电路	93	一、控制原理	157
一、串联谐振电路	93	二、逆变器变速驱动感应电动机	160
二、并联谐振电路	95	三、循环换流器变速驱动感应 电动机	164
5-4 负载谐振变换器	97	四、晶闸管谢尔比斯方式变速驱动 感应电动机	164
一、串联负载谐振(SLR)直流/直流 变换器	97	6-5 同步电动机的变速驱动	165
二、并联负载谐振(PLR)直流/直流 变换器	101	一、控制原理	165
三、混联直流/直流变换器	104	二、自制式逆变器变速驱动同步 电动机	165
四、感应加热用的电流源, 并联谐振 直流/交流逆变器	104	三、他制式逆变器变速驱动同步 电动机	167
五、E 类变换器	106	四、循环换流器变速驱动同步 电动机	168
5-5 谐振开关变换器	108	参考文献	169
一、概述	108		
二、ZCS 谐振开关变换器	109		
三、ZVS 谐振开关变换器	112		
5-6 零电压开关(ZVS), 自动箝位 (CV)变换器	113		
一、ZVS-CV 直流/直流变换器	113		
二、ZVS-CV 直流/交流逆变器	115		

绪 论

以 60 年代普通晶闸管的出现为转折点,电子学在电子领域有了很大发展,并导致电力电子新学科的形成。它以电子学、自动控制等学科为前导,广泛应用于各种功率变换装置,包括变压、变流、变频和改善功率因数等各个方面,因而被称为电子、控制及电力之间的边缘学科。这个新学科问世以后,发展迅速。目前电力电子技术正向着自关断化、高性能化、模块化、智能化方向发展,其应用领域已发展到从航空航天到家用电器的各个经济和生活领域。

电力电子技术与信息电子技术的主要不同是功效问题。对信息处理低电平电路来说,要求功效超过 15%,而电力电子技术中的功效不能容忍低于 85%。特别是 1974 年以来,世界出现能源危机之后,对于一位电路设计师必须考虑节约电能的问题,否则,设计方案再好,也不会通过。

电力电子技术主要是电力半导体器件及其应用技术,随着电子技术的不断发展,新的电力半导体器件不断涌现。例如,普通晶闸管 SCR 已有 1kA/12kV,3kA/4kV 产品;可关断晶闸管 GTO 已有 1kA/9kV,4.5kA/4.5kV 的产品;逆导晶闸管 RCT 已有 1kA/4.5kV 产品;功率晶体管 GTR 已有 200A/1kV(单管),800A/2kV 和 100A/1800V(模块)产品;功率 MOS FET 已有 38A/1000V 产品;静电感应晶闸管 SITH 已有 2.5kA/4.5kV 产品;绝缘栅双极晶体管 IGBT 已有 400A/1.2kV 产品;MOS 控制晶闸管 MCT 已有 100A/1kV 产品。目前是更充分地利用现代控制技术和微电子技术,使电力半导体器件向高频、高效、小型智能化方面发展。例如,IGBT 模块正在向智能模块方向发展,模块内主要设置的功能有连接功率器件和控制电路的接口电路、过热与过流保护电路,上下支路的信号分配电路以及电路用电源等,它在电机控制中频(50kHz 以上),开关电源及要求快速低损耗的应用领域逐步取代 MOS FET 和 GTR。MCT 是刚开发的新器件,具有十分理想的特性,其应用已逐步进入实用化。PIC 功率集成电路实现了集成电路功率化、功率器件集成化,使功率和信息相统一,成为机电一体化接口,已进入实用化。电力电子设备发展的特点是:

- (1)微机和现代控制理论的应用,使电力电子设备走出了过去仅进行将交直流变换,用作一般工业直流电源的初级阶段,开拓了更高科技领域的应用。
- (2)完善电路理论及更新设计方法,使产品性能更先进,更符合生产实际的需要。
- (3)微电子技术与电力电子技术开始相互渗透结合,使电力电子设备效率提高,速度更快,使用方便,已呈新的腾飞之势。
- (4)电路拓扑技术和结构标准化加快了新产品的开发步伐。

电力电子设备的应用领域不断扩大,主要应用领域有:

- (1)大功率直流电源。它的发展主要以增加单机容量和提高效率为目标。
- (2)电机控制。电力电子技术已用于交流调速系统中,交流调速除取代一些直流调速

外,更多的是转向节能和开拓新的直流调速不能涉及的应用领域,如高速和特殊工作环境的生产机械。

(3)高压直流输电。高压直流输电有很多优点,受到普遍重视。目前高压直流输电阀使用的元件是高压大容量的晶闸管。

(4)脉宽调制(PWM)技术。脉宽调制技术是直流/直流变流器的一种调制方法,现成功地把 PWM 技术应用到交流调速,UPS 及各种变流技术上。PWM 方案有多种,例如自然三角波采样法,规则采样 PWM 技术,跟踪采样 PWM 技术,最优 PWM 技术等。

(5)不间断电源设备和开关电源。不间断电源设备(UPS)的发展特点是:采用自关断电力半导体器件、微机控制和 PWM 技术。

开关电源分交流和直流两类:输出交流的开关电源一般来说大多数作 UPS 使用。直流开关电源包括 DC/DC 和 AC/DC 两种,是利用电力半导体器件的开关特性进行电力的变换和调节,主要用于计算机,通信设备,导弹发射系统等。

电力电子新技术表现在以下几方面:

(1)谐振变换技术。谐振变换技术是一种新型电力变换技术,它是在零电流或零电压下进行开关转换,即所谓软转换,是由谐振正弦波进行功率调制,克服了 PWM 技术的谐波和开关损耗的最主要缺点,它的应用使电力电子设备体积更小,效率更高,反应速度更快。

(2)电路拓扑技术。电路拓扑技术是一种研究和设计电路的方法,以解决复杂电路中的技术问题,实质上是利用拓扑原理,综合研究分析电源和负载的关系,从而得到电力变换的最佳电路结构。

(3)控制技术。控制技术和各种传感器技术对电力电子技术的发展是至关重要的。现已有适应性强,性能可靠,价格低廉的控制器和传感器制成标准单元出售,专用的 IC 和 ASIC 有更多的输入和可编程序,适应各种新用途的需要。总之,由于电力半导体器件制造技术的开发,主电路结构和控制技术的开发,以及设备应用技术的开发,使电力电子技术在大功率整流、直流传动、交流传动、直流输电、无功功率补偿、功率变换、晶闸管电源、电力电子开关等方面应用日益扩大。

第一章 电力半导体器件的性能及其控制电路

1-1 概 述

电力电子技术是电力半导体器件及其应用技术,电力半导体器件在电路中主要处于开关工作状态。因此,功耗小、效率高,而且随着新型电力半导体器件性能的提高,开关工作频率也随着不断地提高。这样,使电力电子装置的元器件体积减小,且使电力电子装置小型轻量化。

为简化电路分析,一般把电力半导体器件看成是理想开关器件。所谓理想开关器件应是:

- ①开关断开时,开关的漏电流为零,即电阻为无穷大。
- ②开关接通时,开关通态电压为零,即通态电阻为零。
- ③开关导通到关断是瞬时完成,即开关通断时间为零。
- ④需要的控制信号功率很小,使大功率器件安全可靠地通断工作。
- ⑤电力半导体器件具有经受长时间高速重复通断工作的能力,而器件不损坏。

电力半导体器件虽很多,但按着控制功能分有以下三类:

①二极管 用功率电路控制其通断工作。

②晶闸管 用控制信号使其导通,采用功率电路使其关断工作。

③可控开关 用控制信号使其通断工作。可控开关包括双结晶体管、MOS 场效应晶体管(MOS FET)、可关断晶闸管(GTO)和绝缘栅双极晶体管(IGBT)等。近几年来,主要开发的是这类电力半导体器件。

1-2 二 极 管

二极管的电路符号与伏安特性曲线分别如图 1-1(a)和 1-1(b)所示。正向偏置时,二

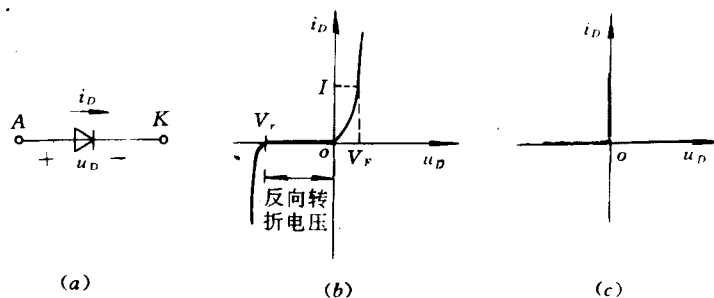


图 1-1 二极管的电路符号与伏安特性
(a)电路符号;(b)伏安特性;(c)理想伏安特性。

极管导通,但正向通态压降很小,约1V。反向偏置时,所加反向电压未超过反向转折电压时,只有很小的漏电流。实际应用时,所加反压不能超过反向转折电压,否则会损坏二极管。与工作电路中通过二极管的电流及工作电压相比,二极管的漏电流和通态压降非常小,因此可认为二极管为理想器件,其理想伏安特性如图1-1(c)所示。采用这种理想伏安特性可以对变换器拓扑结构进行理论分析,但不能用于实际设计。

二极管的导通时间很短,可以认为是瞬时完成,但关断时电流反向需要反向恢复时间,如图1-2所示。在感性负载电路中,这反向恢复电荷可能导致电路中的过电压,但一般不影响变换器的特性,因此,关断瞬间可认为二极管为理想器件。

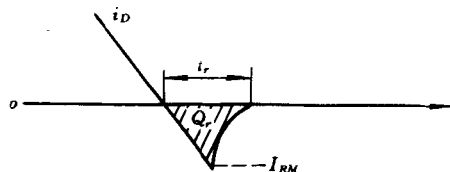


图1-2 二极管的关断波形

变换电路中常用的二极管有工频整流二极管、肖特基二极管和快速恢复二极管。整流二极管的反向电压达几千伏,电流为几千安培。肖特基二极管的通态压降很低,约0.3V,但反向电压也较低,为50V~100V,它用于低压输出电路中。快速恢复二极管的反向恢复时间短,用作高频电路中的可控开关。

1-3 普通晶闸管

一、普通晶闸管的结构与工作原理

晶闸管是一种大功率PNPN四层半导体元件,它有三个引出极,即阳极(A)、阴极(K)和门极(G),符号如图1-3(a)所示,内部原理性结构如图1-3(b)所示。它是先在N型硅基片的两面扩散铝或硼(P型杂质)形成 $P_1N_1P_2$ 结构,然后在其中一面的大部分区域,

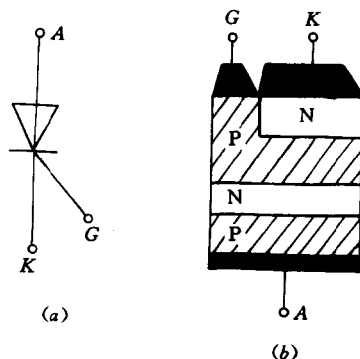


图1-3 晶闸管符号与结构

(a) 符号;(b) 结构。

扩散磷或锑(N型杂质)作阴极,在同一面的另外小区域引出作门极。在另一方面,放置铝片(P型金属片)与 P_1 型层构成欧姆接触,作阳极,这样阳极与阴极之间形成PNPN四层结构,具有三个PN结, J_1 、 J_2 、 J_3 (见图1-4(a))。当晶闸管阳极与阴极加上反向电压时, J_1 、 J_3 结处于反偏状态,如图1-4(b)所示;当加上正向电压时, J_2 结处于反向阻断状态,如图

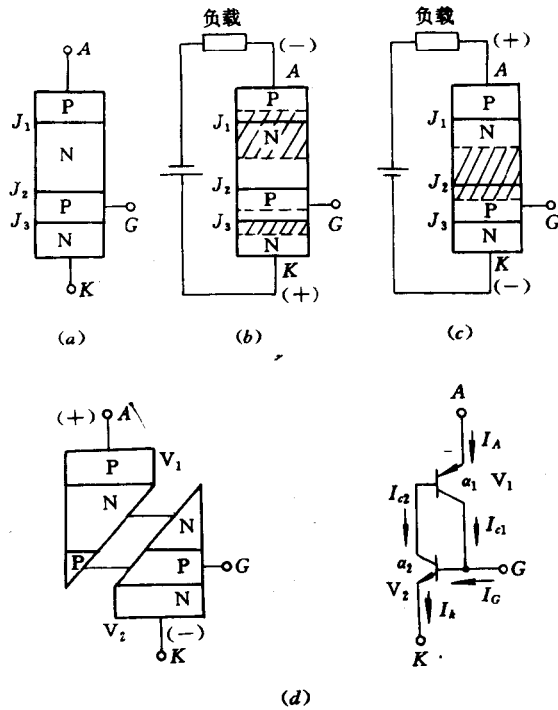


图 1-4 晶闸管工作原理

(a)PNPN 结构;(b) 反向阻断状态;(c) 正向阻断状态;(d) 等效电路。

1-4(c) 所示。若这时在门极加足够触发电流，晶闸管就变为导通状态。

晶闸管的PNPN结构可以等效为PNP与NPN两个晶体管组成，如图1-4(d)所示。若门极施加触发电流 I_G ，因 I_G 相当于 V_2 的基极电流，经 V_2 放大为电流 I_{C2} 这 I_{C2} 可看作是 V_1 的基极电流，经 V_1 放大为电流 I_{C1} 。设 V_1 、 V_2 的电流放大系数为 α_1 和 α_2 ，由图1-4(d)可知

$$\begin{aligned} I_{C2} &= \alpha_2 I_K \\ I_{C1} &= \alpha_1 I_A \\ I_G + I_A &= I_K \\ I_{C1} + I_{C2} &= I_A \end{aligned}$$

把上式进行整理，则有

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G}{[1 - (\alpha_1 + \alpha_2)]}$$

若 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ，由上式可知， I_A 为无限大，则晶闸管变为导通状态，实际上 I_A 数值由负载大小决定。

二、晶闸管的伏安特性

晶闸管阳极与阴极之间的电压 V_A 与阳极电流 I_A 的关系称为元件的伏安特性。晶闸管的基本应用电路如图1-5所示，伏安特性如图1-6所示。门极断开 $I_G = 0$ 时，逐渐增大阳极电压 V_A ，由于 J_2 结受反压阻挡，元件中只有很小的正向漏电流。当 V_A 升高到 V_{BO} ，漏电

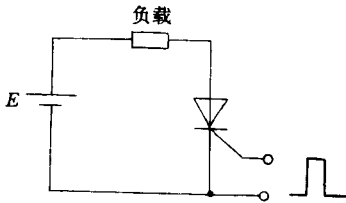


图 1-5 晶闸管基本应用电路

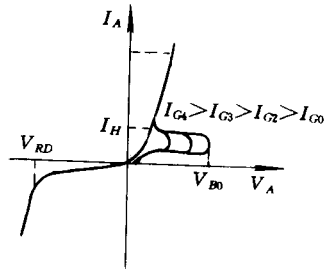


图 1-6 晶闸管伏安特性

流也相应增大一定数值, J_1 、 J_3 结内电场削弱较多, α_1 、 α_2 也相应增大, 使得电子扩散电流 $\alpha_2 I_K$ 与空穴电流 $\alpha_1 I_A$ 分别与 J_2 中的空穴与电子相复合, 导致 J_2 内电场消失, 因此, 晶闸管由阻断突然变为导通。 V_{BO} 称为元件的正向转折电压。当加上门极电压, 使门极电流 $I_G > 0$ 时, 元件的正向转折电压就降低。当 I_G 足够大时, 晶闸管正向转折电压很小, 可看成与二极管一样, 一加上正向阳极电压, 管子就导通了。在使用晶闸管时, 通常都是利用这一特性, 即先加上一定的正向阳极电压, 然后在门极与阴极加上足够大的触发电压, 使晶闸管的正向转折电压下降到很小而导通的。当阳极电流 $I_A < I_H$ (维持电流) 时, 元件又从正向导通返回正向阻断状态。

晶闸管加反向阳极电压时, J_1 、 J_3 结为反向偏置, 因此, 元件只流过很小的反向漏电流, 当反压升高到 V_{RD} 时, 元件反向击穿。

三、晶闸管应用技术

1. 晶闸管额定电流的选定

晶闸管额定电流是指最大通态平均电流, 即在环境温度为 40°C 和规定的冷却条件下, 管子全导通允许通过的工频正弦半波, 当结温稳定且不超过额定结温时, 所允许的最大通态平均电流。这电流受到环境温度, 元件的导通角, 元件的每个周期导电次数等因素的影响。

由于晶闸管的电流过载能力弱, 因而选用晶闸管额定电流时, 根据实际最大电流计算后还至少要乘以 $1.5 \sim 2$ 倍, 使其有一定的电流裕量。

当负载为加热器、螺线管等阻性负载时, 按负载电流值乘以 1.5 倍而选用晶闸管。例如, 负载电流为 1A , 选用 $(1\text{A} \times 1.5 \text{倍} = 1.5\text{A}) 2\text{A}$ 的晶闸管。当负载为电感器、电动机等电感性负载时, 按负载电流值乘以 2 倍来选用晶闸管。当负载的脉冲状态使用时, 如电容放电、漏电断路器等短时间通电时, 要规定有元件承受脉冲的能力, 请参考厂家规定。

2. 晶闸管耐压的选定

晶闸管有不重复峰值电压与重复峰值电压, 不重复峰值电压就是晶闸管的转折电压, 取不重复峰值电压的 80% 为重复峰值电压, 把正向与反向重复峰值电压中较小的那个数值定为该元件的额定电压。选用晶闸管时, 应考虑留有一定余量, 常选额定电压为实际工作电压的 $1.5 \sim 2$ 倍以上。例如, 实际交流工作电压峰值为 311V , 应选额定电压 500V 以上的元件。

3. 防止晶闸管误导通的措施

当晶闸管上加的电压上升率 dV/dt 较大, 或者晶闸管的门极有干扰脉冲信号时, 常使晶闸管误导通。为此, 要在晶闸管的阳极与阴极之间接入 RC 吸收电路, 降低加在元件上的 dV/dt , 另外, 在门极与阴极间接入电容 C_{GK} , 防止门极干扰脉冲使其晶闸管误导通, 如图 1-7 所示。

四、晶闸管的门极控制电路

1. 晶闸管门极控制电路的设计

设计晶闸管门极控制电路时, 要考虑到元件特性分散性与使用条件的变化, 安全可靠地触发晶闸管。现以图 1-8 所示电路为例说明门极控制电路的设计方法。

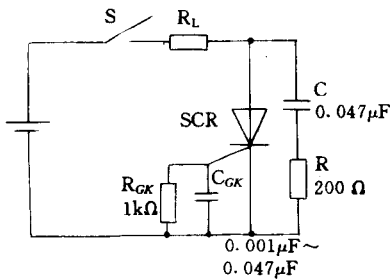


图 1-7 防止晶闸管误导通措施

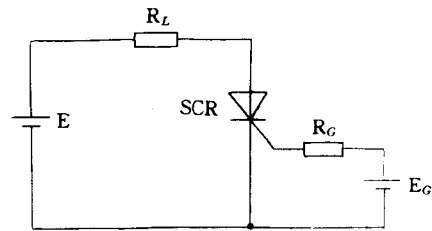


图 1-8 晶闸管应用电路

由晶闸管原理可知, 门极与阴极之间可近似看成一个 PN 结, 其典型伏安特性曲线如图 1-9 所示。由于同一型号元件的门极伏安特性分散性很大, 规定元件门极阻值在某高阻 (曲线 OD) 和低阻 (曲线 OG) 之间, 才能算合格产品。

元件出厂时给出的触发电流 I_{GT} 与 V_{GT} 是指该型号的所有元件都能被触发的最小门极电流电压值, 因此在接近坐标原点以 I_{GT} 、 V_{GT} 划出的 $OABCO$ 区域, 在此区域内为不可靠触发区。在元件门极极限电流、电压和功率曲线包围下, 面积 $OABCDEG$ 为允许可靠触发区, 所有合格的元件, 其触发电流与电压均应落在这个区域, 在正常使用时, 触发电路送至门极的触发电流与电压都应在这个区域。但推荐的安全可靠触发区为 $ABCFH$, 即图中斜线部分的区域。

若设门极电源电压为 E_G , 则从 a 点 (E_G) 通过 B 点与平均功率曲线相切点引两条负载线, 分别与电流轴 (I_G) 相交于 c 和 b , 那么为保证安全可靠触发晶闸管, 门极串联电阻 R_G 应大于 R_1 而小于 R_2 之值, 尽量接近 R_1 值。但实际应用时门极常加的是触发脉冲信号, 只要触发功率不超过规定, 电压、电流的幅值短时间内可大大超过额定值。

但负载为电感性时, 即使脉冲触发电流已满足要求, 但阳极电流未上升到擎住电流 I_L , 若触发脉冲消失, 晶闸管往往不能开通。为此, 采取相应措施, 例如, 与感性负载并联假电阻或者与晶闸管并联 RC 吸收电路, 如图 1-10 所示。

2. 晶闸管的触发电路

简单的晶闸管触发电路如图 1-11 所示, 它是在阳极与门极间接入电阻 R , 按照门极电流不超过门极额定电流的原则选用 R 。当开关 S 接通, 通过电源提供门极电流, 使晶闸管导通。图 1-11(b) 是交流开关应用实例。

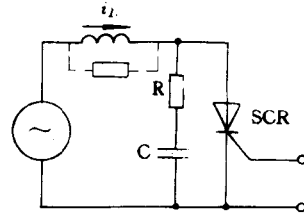
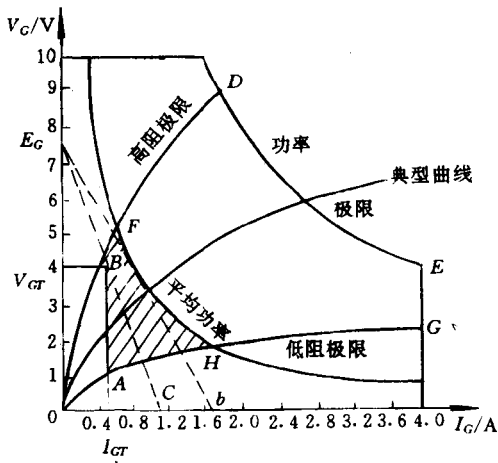


图 1-9 晶闸管门极伏安特性与可靠触发区 图 1-10 电感性负载时保证晶闸管导通采取的措施

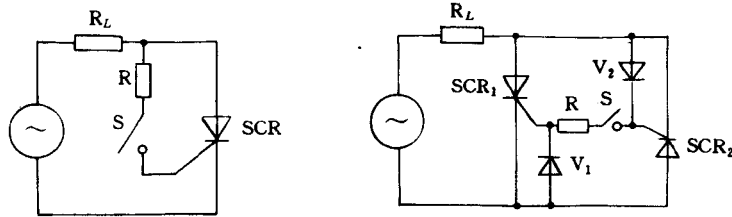


图 1-11 简单的晶闸管触发电路
(a) 直流开关电路; (b) 交流开关电路。

采用PUT的相位控制电路如图1-12所示,交流输入电压经二极管桥式整流电路进行整流,再经稳压管稳压,变成半波梯形电压,通过电阻 R_2 与电位器 V_R 对触发电容 C_1 充电,当 C_1 充电电压高于PUT门极电位,即高于 R_3 与 R_1 对稳压管稳定电压的分压值,则PUT有触发电流从阳极流向门极,PUT迅速导通。 C_1 电荷通过变压器 T_1 的初级侧放电,则在变压器 T_1 的次级侧形成触发脉冲,触发晶闸管。触发脉冲的相位随电容 C_1 的充电电阻 V_R 值增减而变化。

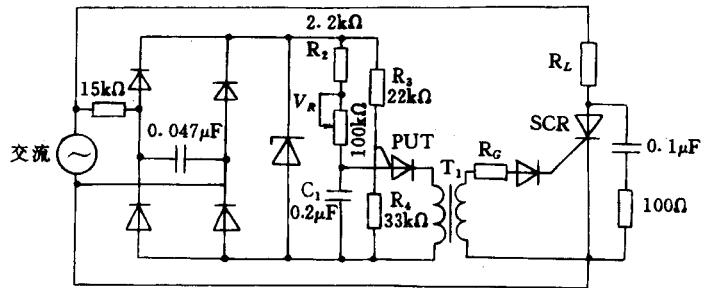


图 1-12 采用PUT的相位控制电路

图 1-13 是采用阻容移相的触发电路。它是在晶闸管的阳极与门极间接有电容, 流经晶闸管门极超前的相位电流, 在电源零电压附近晶闸管导通, 因此它是一种无开关噪声的零电压处晶闸管导通的触发电路。图 1-13 是一种温度控制电路, 电阻 R 采用 NTC 热敏电阻, 用 VR 电位器设定温度。如果实际温度低于设定温度时, $V_{mf} > V_{ZD}$, PUT 截止, 晶闸管门极为图中所示梯形电压, 晶闸管半波导通; 反之, 实际温度高于设定温度时, $V_{mf} < V_{ZD}$, PUT 导通, 晶闸管关断。从而对温度进行控制。

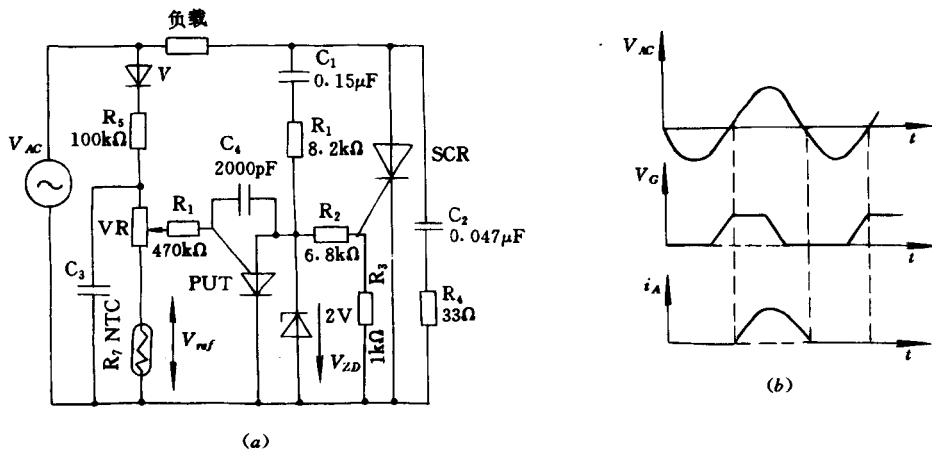


图 1-13 采用阻容移相的触发电路

(a) 触发电路; (b) 工作波形。

上述触发电路虽然简单, 但触发功率较小, 触发较大功率晶闸管, 这种电路不能胜任。为此, 可以采用小晶闸管的触发电路, 它能获得较大的触发功率与触发脉冲宽度, 而且线路比较简单可靠。图 1-14 所示电路是其中一例, 它是把与电源同步的输入脉冲进行放大的电路。如果 SCR 门极输入脉冲, SCR 导通, 电容 C_1 经过变压器 T 初级侧放电, 则变压器次级产生较大功率脉冲, 可用这脉冲触发大功率晶闸管。这里小晶闸管 SCR 起功率放大、加宽触发脉冲宽度作用, 也解决了电感性负载时需要的宽触发脉冲的问题。

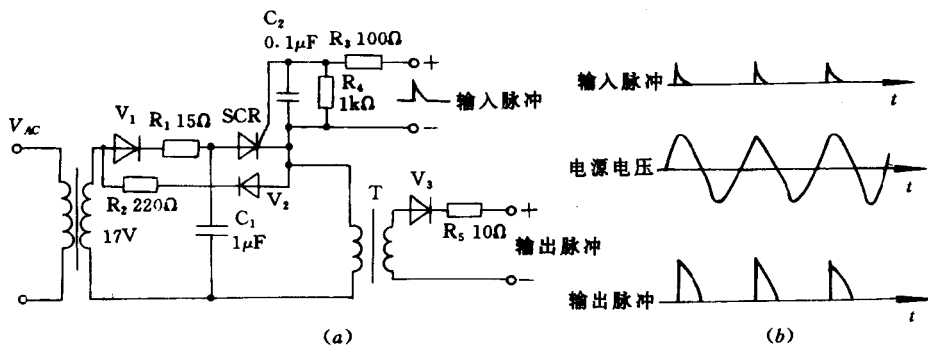


图 1-14 用小晶闸管放大的触发电路

(a) 电路; (b) 工作波形。

1-4 双向晶闸管

一、双向晶闸管的结构与工作原理

双向晶闸管的符号与等效电路如图 1-15 所示,它相当于两个晶闸管反向并联,但只有一个门极,因此,触发电路简单。

双向晶闸管的结构如图 1-16 所示,它是 NPNPN 五层结构,由左边为 T_2 作为阳极的 PNP 结构的晶闸管与右边 T_1 作为阳极的 PNP 结构的晶闸管构成的。这三个电极称为第一电极 T_1 ,第二电极 T_2 与门极 G ,但基准端子 T_1 是相当于普通晶闸管的阴极。

图 1-17 是双向晶闸管的电流 / 电压静态特性, I、III 象限相当于普通晶闸管特性,具有截止与导通两种稳定状态,以及由截止到导通和由导通到截止的开关状态。双向晶闸管特别适用于交流调压设备中。

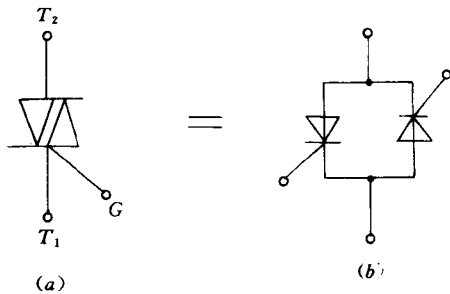


图 1-15 双向晶闸管符号与等效电路
(a) 符号; (b) 等效电路。

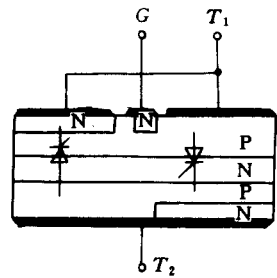


图 1-16 双向晶闸管的结构

双向晶闸管有四种触发方式,即相对于 T_1 端来讲, T_2 端加正电压, G 端加正电压的方式 I ($T_2 +, G +$); T_2 端加正电压, G 端加负电压的方式 II ($T_2 +, G -$); T_2 端加负电压, G 端加负电压的方式 III ($T_2 -, G -$); T_2 端加负电压, G 端加正电压的方式 IV ($T_2 -, G +$)。其中方式 I 和方式 III 两种灵敏度最高,方式 II 和方式 IV 灵敏度低,而方式 IV 的灵敏度最低,不宜采用。

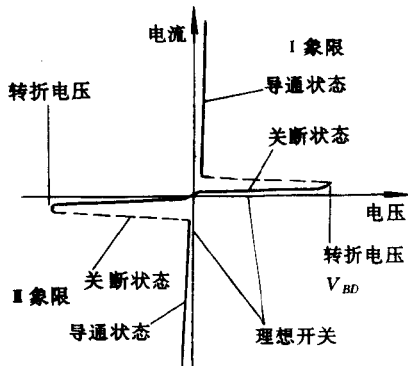


图 1-17 双向晶闸管的电流 / 电压特性

二、双向晶闸管的电压与电流选用

双向晶闸管的允许电流由有效值表示,允许电流大小不仅与晶闸管的额定电流有关,而且也与温度有关,为提高可靠性,一般降额使用,即使用额定值的 70%。因为双向晶闸管是正反向都可控,所以没有反向耐压问题。当外加电压瞬时超过阻断电压时,元件变成导通工作状态,经过半个周期后,元件恢复正常工作,所以一般不必考虑过电压保护问题,但需加过流保护措施。

当元件两个电极 T_1, T_2 间所加电压为 $12V$ 时,使它由阻断变为导通所需门极与第一电极 T_1 之间的最小电压及电流称为门极触发电压与电流,对于四种触发方式,这数值是不一样的。

三、双向晶闸管的触发电路

双向晶闸管的触发电路设计与普通晶闸管一样考虑,但与普通晶闸管不同是它有四种触发方式,而常用为 I、III 和 II、III 触发方式的组合。方式 IV 不太使用。双向晶闸管触发电路实例如图 1-18 ~ 图 1-20 所示。其中图 1-18 为 I、II 组合触发方式;图 1-19 为 II、III 组合的触发电路

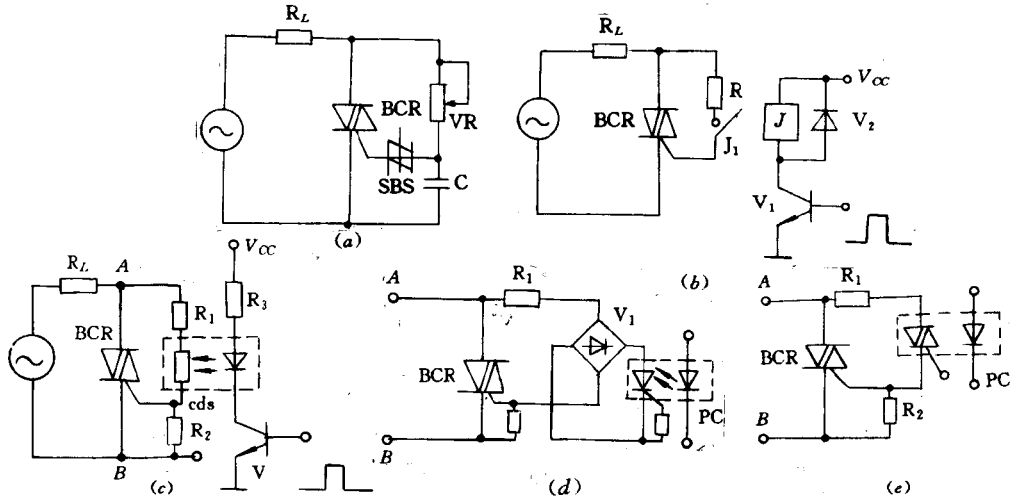


图 1-18 I、II 方式组合的触发电路

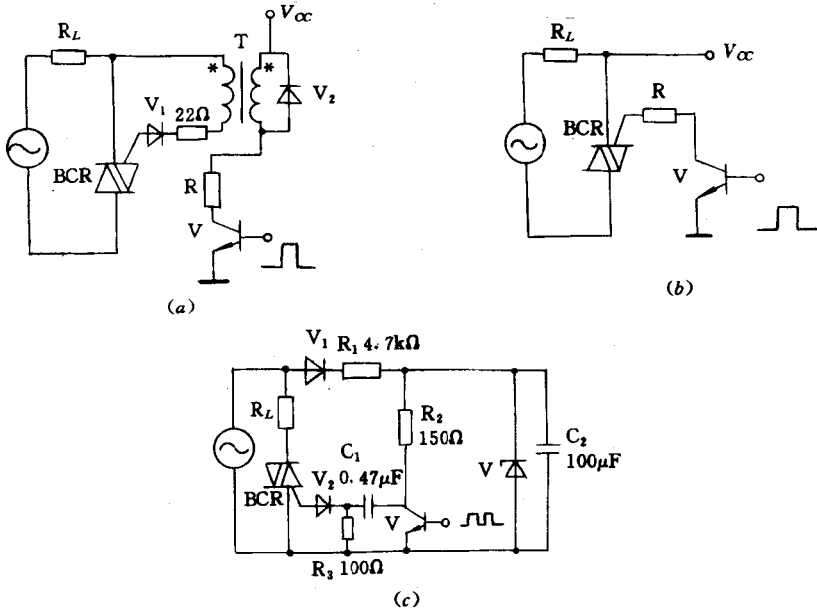


图 1-19 II、III 方式组合的触发电路

(a) 采用脉冲变压器的触发电路;(b) 采用晶体管的触发电路;(c) 采用晶体管振荡器的触发电路。

Ⅲ 组合触发方式;图 1-20 为 I、N 组合触发方式,但这电路中双向晶闸管必须采用高灵敏度的元件。

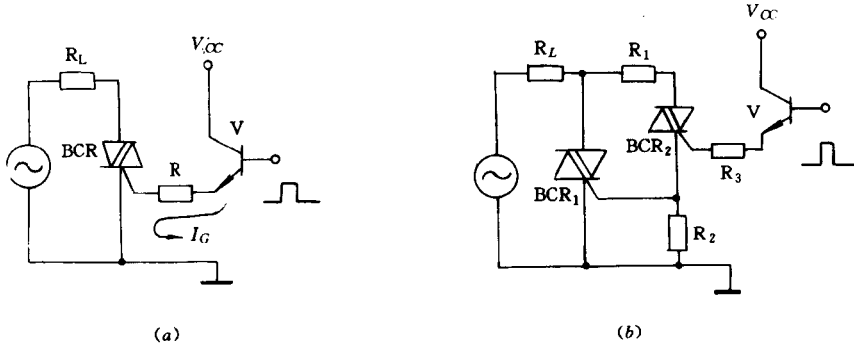


图 1-20 I、N 方式组合的触发电路
(a) 采用晶体管触发电路; (b) 采用高灵敏度双向晶闸管的辅助触发电路。

1-5 可控开关

MOS FET、GTO、IGBT 等称为可控开关,其理想开关的等效电路如图 1-21 所示,开关断开时电流为零,开关接通时,电流为 i_T 。

实际上,可控开关不是理想器件,它有功耗。因此,电路设计时,必须想办法减少可控开关器件的功耗。研究电力半导体器件功耗的电路与波形如图 1-22 所示,假设电路中二极管 V 为理想器件。当开关 S 接通时,电流 I_0 经开关流通,二极管为反偏置。当开关断开时,电流 I_0 经二极管 V 流通,因 V 为理想器件压降为 0,则开关两端电压等于 V_d 。图 1-22(b) 示出开关电流与电压

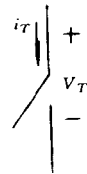


图 1-21 可控开关的等效电路

波形,工作周期为 T_s ,即开关频率为 $f_s = 1/T_s$ 。为简化分析,认为开关波形为理想的线性波形。当开关断开时,如果在可控开关的控制极加正向控制信号使其导通,则电流建立需要一段时间,即迟后时间 $t_{d(ON)}$ 与上升时间 t_{r1} 。电流上升到 I_0 经开关 S 流通,二极管 V 为反向偏置,电压 V_d 经时间 t_{fv} 后降到通态电压 V_{ON} 。图 1-22(b) 所示波形表明在 $t_{c(ON)}$ (t_{r1} 与 t_{fv} 交叉处) 期间出现开关电压与电流最大值,导通瞬间开关功耗可表示为

$$W_{c(ON)} = (1/2)V_d I_0 t_{c(ON)} \tag{1-1}$$

因为 $I_0 = 0$,而导通延迟 $t_{d(ON)}$ 期间不消耗功率。开关一旦完全导通,则通态压降很低,为几伏左右,而电流为 I_0 。开关通态时间 t_{om} 一般比开关关断与开通时间大得多,因此,导通期间开关功耗为

$$W_{ON} = V_{ON} I_0 t_{ON} \tag{1-2}$$

式中

$$t_{ON} \gg t_{c(ON)}, t_{c(OFF)}$$

为使可控开关断开,可在可控开关的控制极加负控制信号。在关断瞬间,电压建立需要一段时间,即延迟时间 $t_{d(OFF)}$ 与电压上升时间 t_{rv} 。一旦电压上升到 V_d ,二极管正向偏置

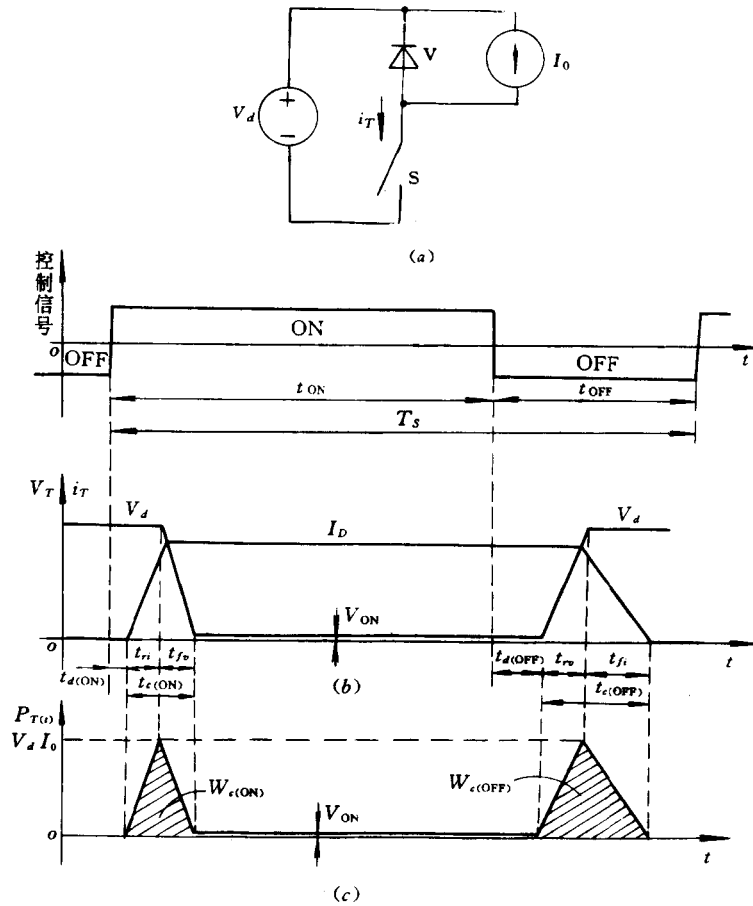


图 1-22 可控开关等效电路及其开关工作波形

而导通,经 t_{fi} 后流经开关电流下降到零,电流 I_0 经二极管 V 流通。在 $t_{c(ON)}$ (t_r 与 t_{fi} 交叉处) 期间出现电压与电流最大值,关断瞬间开关功耗为

$$W_{c(OFF)} = (1/2)V_d I_0 t_{c(OFF)} \quad (1-3)$$

因 $t_{d(OFF)}$ 期间功耗很少,可以忽略不计。

功耗与时间关系如图 1-22(c) 所示,由图中可见,最大功耗出现在开关的通断瞬间,平均功耗为

$$P_s = \frac{1}{2} V_d I_0 \frac{t_{c(ON)} + t_{c(OFF)}}{T_s} = \frac{1}{2} V_d I_0 f_s (t_{c(ON)} + t_{c(OFF)}) \quad (1-4)$$

式 (1-4) 表明开关器件的功耗随开关频率线性增加,即开关频率提高,则功耗增加。开关器件的通态功耗为

$$P_{ON} = V_{ON} I_0 \frac{t_{ON}}{T_s} \quad (1-5)$$

由式 (1-5) 可见,通态功耗与开关器件的通态压降成正比,为减少功耗,应尽可能地选用低通态压降的器件。