

TM 4
4410

电力电子变流技术

赵可斌 陈国雄 编

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书首先介绍近代电力电子器件(二极管、晶闸管、BJT、GTR、MOSFET、GTO、IGBT)的特性,以及当前参数及应用范围。从第3章到第7章分别阐述不控与可控整流器、直流—直流通断型变流器、通断型直流—交流逆变器,以及电力电子技术的最新电路拓扑结构——谐振式变流器的原理及其控制原则。从第8章到第11章针对在直流电动机、感应电动机、同步电动机调速领域的应用,论述了与之相关的电力电子变流器的构成、选择及变流器所带来的谐波问题。

本书除给出分析变流器的基础知识外,读者可通过本书内容了解到国际上电力电子技术的前沿信息。因此,本书既可作为有关专业本科生与研究生的教材,亦可供有关研究机构及工厂设计人员参考。

(沪)新登字 205 号

电力电子变流技术

出 版: 上海交通大学出版社
(上海市华山路1954号·200030)
发 行: 新华书店上海发行所
印 刷: 浙江上虞科技外文印刷厂
开 本: 787×1092 (毫米) 1/16
印 张: 17

字 数: 410000
版 次: 1993年12月第1版
印 次: 1993年12月第1次
印 数: 1—2700
科 目: 304—250

ISBN7-313-01252-7/T

定 价: 8.20 元

序

与信息电子学一样,电力电子学是一门已得到很大发展而且还在迅速发展的学科。新颖电力半导体器件的相继问世,新的电路拓扑结构的不断出现,微电子控制技术的日益进步,使由电力半导体器件组成的整流器、变流器、逆变器、斩波器等装置的性能得到进一步的改善,从而大大拓宽了电力电子技术的应用领域。可以展望:无论是超高功率的电能变换,或是各种计算机和重要部门的电源,或是家用电器、或是工业交通运输等等各个方面,电力电子技术都将越来越发挥重要作用。由于世界性的能源危机,节能技术成为当今世界的重要课题,低耗高效成为各种电气装置的追求目标。新的电路拓扑结构的出现,应用上的迫切需要,反过来又促进了新的电力电子器件的诞生。正如必须培养每个工科大学生熟练掌握使用计算机,同样地对电类专业学生也必须掌握电力电子技术的知识,尤其要培养专门从事电力电子技术的工程技术人员。

1987年,当时的国家水利电力部决定与上海交通大学联合办学,在上海交通大学成立电力学院。随后,国家又批准在电力学院所属的信息与控制工程系设置应用电子技术专业及电力电子学硕士点,以加速培养国家急需的电力电子技术方面的人才。

对于应用电子技术专业的学生,电力电子技术无疑是学习内容的一个重要方面。因此,学生在学习期间应该系统地掌握电力电子学的基本理论,学会分析变流器特性的基本技能,熟悉设计变流器的要领与方法,了解国际上电力电子学发展概况与前沿技术。基于这个目的,编者参照国内外有关的电力电子学教材,特别是参照了1989年出版的,由Mohan、Undeland及Robbins编写的《Power Electronics-Converters, Applications, and Design》,以及1975年出版的,由S.B.Dewan与A.Stranghen编写的《Power Semiconductor Circuits》,再结合编者的多年工作及教学科研实践,编写成本书,以作为应用电子技术专业本科生的教材及电力电子学专业研究生的参考书;也可作为相应专业如电机与控制专业、工业电气自动化专业学生的教学参考书。相信本书的出版对于在电力电子学领域中从事研究工作与实际应用的同行们,或许也能有所裨益,但同时更希望得到他们的批评与指教,以作为本书再版时的依据。

本书第1章至第7章由赵可斌教授编写,第8章至第11章由陈国雄讲师编写。上海交通大学电力学院副院长潘祖善教授对全书作了详细审阅。本书的编写得到我校信息与控制工程系系主任何绍雄教授及教务处的鼓励与支持,研究生沈宏帮助阅看了本书手稿,在此一并表示衷心的感谢。在本书出版过程中,还得到张明勋总工程师及西安西普电力电子有限公司(中外合资)陈烨总经理的关心和支持,上海交通大学出版社对本书的出版付出辛勤的劳动与极大支持,在此也深表谢意。

由于时间与水平所限,书中难免错误之处,敬请使用本书的师生和其他读者批评指正。

编 者

1993年5月

目 录

第1章 电力电子系统	1
1.1 概述	1
1.2 电力电子技术的应用范畴	1
1.3 电力电子变流器的分类	1
第2章 电力半导体开关综述	3
2.1 概述	3
2.2 二极管	3
2.3 晶闸管	4
2.4 对于可控开关的特性要求	13
2.5 双极晶体管(BJT)、达林顿管(MD)与电力晶体管(GTR)	16
2.6 金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)	17
2.7 门极可关断晶闸管(GTO)	18
2.8 绝缘栅双极晶体管(IGBT)	19
2.9 可控开关的比较	20
2.10 触发电路与吸收电路简介	20
2.11 可控开关器件的选用	21
习题	21
第3章 工频二极管整流器	22
3.1 概述	22
3.2 富里哀分析	22
3.3 二极管半波整流器	24
3.4 单相桥式整流器	29
3.5 三相桥式整流器	34
3.6 整流器运行中的其他问题	37
习题	38
第4章 工频可控整流器与逆变器	41
4.1 概述	41
4.2 工频可控整流器	42
4.3 $L_s=0$ 时三相全控桥式变流器的分析	48
4.4 $L_s \neq 0$ 时三相全控桥式变流器的分析	56
4.5 电流断续的效应	60
4.6 变流器的逆变运行	62
4.7 变流器交流侧波形问题	66

4.8 结束语	70
习题	70
第5章 直流—直流通断型变流器	72
5.1 概述	72
5.2 直流—直流变流器的控制	73
5.3 降压变流器	74
5.4 升压变流器	81
5.5 降压—升压变流器	86
5.6 丘克(Cuk)变流器	90
5.7 全桥式直流—直流变流器	93
5.8 直流—直流变流器的比较	99
习题	100
第6章 通断型直流—交流逆变器	101
6.1 概述	101
6.2 通断型逆变器的基本概念	102
6.3 单相逆变器	109
6.4 三相逆变器	121
6.5 脉宽调制(PWM)逆变器空载时间对输出电压的影响	130
6.6 逆变器的其他通断方案	133
6.7 整流器运行模式	135
6.8 小结	136
习题	137
第7章 谐振式变流器—零电压与/或零电流通断	139
7.1 概述	139
7.2 谐振式变流器的分类	142
7.3 基本谐振电路的概念	143
7.4 负载谐振变流器	147
7.5 谐振式开关变流器	161
7.6 零电压通断、电压钳位(ZVS—CV)拓扑结构	167
7.7 具有零电压通断的谐振式直流耦合逆变器	171
7.8 高频耦合半周合成变流器	173
7.9 小结	175
习题	175
第8章 电动机传动概论	178
8.1 概述	178
8.2 选择传动器件的准则	179
8.3 电动机传动系统稳定运行条件	184
8.4 小结	187
习题	187

第9章 直流电动机传动	189
9.1 概述	189
9.2 传动中常用的直流电动机及其等值电路	189
9.3 直流电动机的起动、调速与制动	194
9.4 电枢电流波形的影响	198
9.5 直流电动机伺服传动	198
9.6 可调速直流电动机传动	205
9.7 小结	209
习题	210
第10章 感应电动机传动	212
10.1 概述	212
10.2 感应电动机的基本原理及运行特性	213
10.3 感应电动机的起动、调速与制动	218
10.4 非正弦励磁对感应电动机的影响	225
10.5 变频变流器及其在感应电动机传动中的应用	227
10.6 采用工频控制变流器的感应电动机传动	236
10.7 小结	238
习题	239
第11章 同步电动机传动	241
11.1 概述	241
11.2 同步电动机运行理论与起动	242
11.3 同步电动机的伺服传动	243
11.4 大功率同步电动机可调速传动	249
11.5 步进电动机及其激磁方式	252
11.6 步进电动机激磁驱动电路及控制方式	257
11.7 逆变供电磁阻同步电动机及其控制	260
11.8 小结	263
习题	263
参考文献	264

第1章 电力电子系统

本章叙述电力电子学复盖的专业领域,指出电力电子技术对产业技术革命的重大影响,并简述其应用范围及分类。

1.1 概 述

电力电子学是结合电力、电子与控制技术三个领域的新兴学科。电力电子学的任务是通过电力半导体器件的作用,对电网的供电电源加以变换和控制,从而将不同形式的电源提供给各种不同的应用场合。由于电力半导体器件本身具有可控的特点,即各种电力电子器件都可通过数值仅为几毫安与几伏的输入信号来控制高达几千安、几千伏的强大的电功率输出,其功率放大倍数是昔日的任何电子器件所不能媲美的。所以,电力半导体器件作为强电与弱电的理想接口已成为现实。

近年来,微电子学有了变革性的进步,它导致了电力电子系统中作为控制器的线性集成电路、数字信号处理器、可编程序控制器以及计算技术的充分发展,这使电力电子系统的控制手段也不断革新,使控制性能日臻完善。

另一方面,传统的机械产业部门的各类设备都采用电力作为动力源,它们使用各种类型的电力电源。现今的电力电子系统可对传统的机电设备提供自动化程度高,控制性能好,具有明显节电效益的电源。于是,通过电力电子器件的功能将以往的机械产业、电力与微电子技术融为一体,这极大地推动了传统产业的技术革命,促进了机电一体化发展。为了降低电力电子系统中变流器自身的功耗,当前国际上在不断研制作为开关使用的全开通、全关断、低损耗与开关速度高的电力电子器件的同时,研究出新的变流器电路拓扑结构,这为电力电子系统开拓了潜力很大的应用市场。反过来,这又有力地促进电力电子技术的迅速发展。

1.2 电力电子技术的应用范畴

我国自实行改革开放的方针政策以来,大大加快了电力电子技术的进步速度。1989年由葛洲坝到上海南桥的 $\pm 500\text{ kV}$ 、 200 MW 直流输电线路的第一极投入运行,这标志着我国电力电子技术的先驱部份已达到国际水平。现在,我国已开始重视低压(中、小容量)、一般用途的需求量大的变频传动。在国际上,汽车电子学是电力电子应用的一个迅速成长的领域。表1.1列举了电力电子技术的各种应用,从中可以看出电力电子学的重要性。这些系统的功率范围从几瓦到几百兆瓦。随着电力半导体器件性能的改善和价格的降低,电力电子变流器必将得到更广泛的应用。

1.3 电力电子变流器的分类

电力电子系统是由一个或多个电力电子变流器组成。这些变流器大多采用集成电路控制

的电力半导体器件。变流器是电力电子系统的基本组件。通常,一个电力电子变流器将一个幅值为 u_i ,频率为 f_i ,相数为 m_i 的电输入加以控制与变换,形成一个幅值为 u_o ,频率为 f_o ,相数为 m_o 的电输出。流经这些变流器的功率可以是可逆的。直流一直流变流器是将一种等级的直流电压变换到另一等级电压,亦称为斩波器。在交流一直流变换中,如果功率从交流侧流向直流侧,则此变流器称为整流器。反之,则称为逆变器。

电力电子变流器的分类方法很多,但每一种分类方法都不是完美的。在此,结合本书的内容,仅根据电力半导体器件在变流器中的通断性质分成以下两类:

(1) 工频变流器 这里,电力半导体器件的开通与关断都由变流器网侧电压波形的相位来控制。因此,器件是在工频50或60Hz上开通与关断。

(2) 通断变流器 这里,变流器中的可控开关是在高于工频的频率上实现开通与关断的。尽管变流器内部的通断频率较高,其最终输出仍可以是直流或者是与工频相比较的某一交流频率。

根据变流器作用的类别(斩波、整流、逆变等),可将上述两类变流器再进一步列出细目。在本书有关变流器的几章里,就是按这些细目来介绍其内容的。

表 1.1 电力电子技术的应用范畴

1. 工业应用

各类风机,泵类,压缩机,机床与机器人控制,电弧炉、感应炉与感应加热,电解,电镀、电焊,工业荣塞。

2. 交通运输

铁道干线与矿山电力运输机械的牵引控制,电力运输机械的电池充电机,电力机车,无轨与有轨电车,地铁,汽车电子学(包括发动机控制)。

3. 电网系统

高压直流输电(HVDC),静态无功功率发生器(SVG),辅助能源系统(风能与太阳能),能量储存系统。

4. 公共民用

中央制冷设备,计算机电源与办公设备,不停电电源,电梯,照明。

5. 空间技术

空间穿梭机电源系统,卫星动力系统,飞机动力系统。

6. 通讯

各类通讯电源与不停电电源,电池充电机。

7. 家庭应用

冷藏与冷冻,取暖与空调,烹饪,照明,电子器具与文娱设备。

第2章 电力半导体开关综述

本章提供各种现代的电力半导体器件的特性与参数范围,以及器件特性可以理想化的理由。鉴于目前国内在变流器系统中仍多采用晶闸管,所以本章对晶闸管的特性与参数作了一定的介绍。

2.1 概 述

随着电网容量的增长,控制手段与微电子技术的进步,以及新型电力半导体器件的研制成功与其成本的降低,使变流器的应用范围日益拓广,因而出现了许多新的变流器电路拓扑结构。为了解这些新的电路拓扑结构和应用,先熟悉所采用的功率器件的特性是十分必要的。为此本章概括地介绍近年来国内外应用的功率器件的外特性及其电压、电流、开关速度的等级。

在本书中为使分析简便,将电力半导体器件看作理想开关,这并不影响电路的基本工作状态,但可对变流器特性理解得更为清晰。

近来,对所采用的电力半导体器件根据其控制的方式可以分成下面三类:

- (1) 不控型——由主电路控制其开通和关断,如二极管。
- (2) 半控型——由控制信号开通,但必须由主电路来关断,如晶闸管。
- (3) 全控型——由控制信号控制其开通和关断,如各种可控开关。

可控开关包括下述型式的器件:双极晶体管(BJT)、电力晶体管(GTR)金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)、门极可关断晶闸管(GTO)与绝缘栅双极晶体管(IGBT)。近年来,这些器件有了重大的进展。

2.2 二极管

图2.1(a)与图2.1(b)给出了二极管的电路符号与它的稳态伏—安特性。当二极管正向偏置时,它开始导通,二极管两端只有很小的正向压降,其数量级为1V。当二极管反向偏置时,在达到反向击穿电压之前流过二极管的仅是可被忽略的很小的漏电流。在正常工作时,反偏电压不允许达到击穿值。

与二极管运行时所在电路的工作电压和电流相比较,由于阻断(反偏)状态时漏电流很小,导通状态时(正偏)压降很小,所以可将二极管的特性予以理想化,如图2.1(c)所示。此理想特性可用来分析变流器的电路拓扑结构,但不能用于实际设计。例如,对器件的散热器进行估算时就不能利用理想化特性。

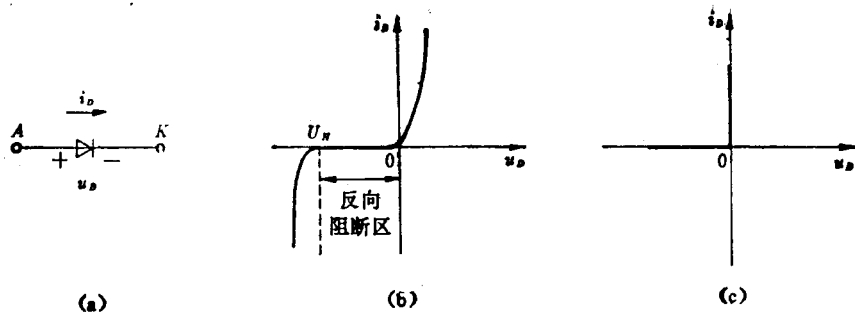


图 2.1 二极管

(a) 符号, (b) 伏—安特性, (c) 理想特性

在开通时刻, 与主电路的过渡过程比较, 因为二极管的快速开通, 可将二极管看成是一个瞬时开通的理想开关。然而, 在关断时刻, 二极管内电流要反向, 在电流回零之前存在一段反向恢复时间 t_{rr} (见图 2.2)。在许多电路内, 此反向电流不影响变流器的特性, 于是在关断过程中二极管仍可看作是理想的。

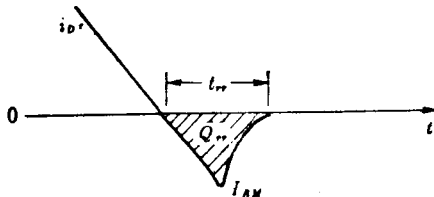


图 2.2 二极管关断时的反向电流

根据各种应用的要求, 可以采用以下不同类型的二极管:

(1) 肖特基 (Schottky) 二极管 这种二极管应用在低输出电压的电路中, 这里要求二极管具有很小的正向压降 (典型的是 0.3V), 这种二极管的阻断电压值在 $50\sim 100\text{V}$ 之内。

(2) 快速恢复二极管 设计这种二极管是为了与可控开关一起应用于高频电路中。这里要求二极管具有一个很小的反向恢复时间。在几百伏与几百安培的功率电平时, 要求这种二极管具有小于几微秒的反向恢复时间 t_{rr} 值。

(3) 工频二极管 由于要求这种二极管的通态压降尽可能设计得低一些, 因而具有较大的反向恢复时间 t_{rr} , 但是这对于工频应用仍是可以被接受的。这种二极管的阻断电压值可达到几千伏, 电流值可达到几千安培, 而且还可以串联与并联起来使用, 以满足任何电压和电流值的需要。

2.3 晶 闸 管

2.3.1 晶闸管及其伏—安特性

晶闸管是一种如图 2.3(a) 所示的具有三个 PN 结的 PNPN 四层结构的器件, 对外引出阳极、阴极和门极三个端子, 其电路符号如图 2.3(b) 所示, 主电流从阳极 A 流向阴极 K。晶闸管的伏—安特性如图 2.3(c) 所示。

如果在图 2.3 中, 将晶闸管的门极断开, 即门极上没有触发脉冲, 则晶闸管在断态时能够阻断正向电压而不使其导通, 这就是图 2.3(c) 上的断态部分的伏—安特性。如果晶闸管处于正向阻断状态时在其门极上施加一个持续时间很短的正脉冲电流, 晶闸管就被触发到导通状态, 这时的伏—安特性由图 2.3(c) 中的通态部分所表示。晶闸管通态时的正向压降仅为几伏 (典型的数值为 $1\sim 3\text{V}$, 它与器件的阻断电压值有关)。

一旦器件开始导通, 即使将门极电流移去, 管子将继续保持导通。晶闸管不能通过门极来

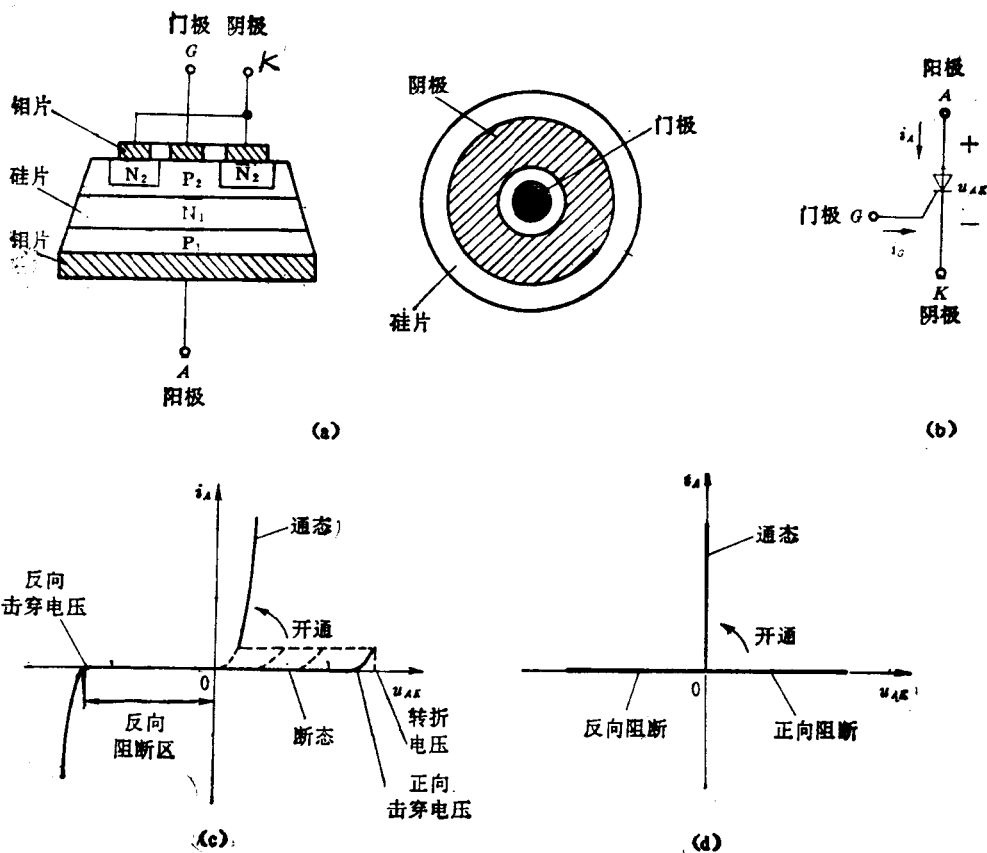


图 2.3 晶闸管
 (a) 结构, (b) 符号, (c) 伏-安特性, (d) 理想特性

关断, 所以这时晶闸管就象二极管那样导电。只有当晶闸管所在电路中的阳极电流趋负或趋零时, 这时晶闸管才会被关断。此后晶闸管必须承受一定时间的反向电压, 以使其恢复反向和正向阻断能力。然后, 某一时刻在门极上重新施加正向脉冲电流以控制晶闸管再次开通。

应当指出, 在晶闸管门极上施加正向脉冲电流使其从正向阻断转变为正向导通这是正常控制的开通。其他如由于温度升高, 以及晶闸管门极虽未受有正向脉冲电流, 却由于晶闸管的外加正向电压达到转折电压值, 或者遇上过大的正向电压上升率 du/dt , 均会使晶闸管导通。但这都属于不正常导通, 在实际应用中应予避免。

在反向偏置电压低于反向击穿电压时, 流经晶闸管的电流仅仅是可被忽略的数值很小的漏电流, 这可见图2-3(c)上所表示的反向伏-安特性。通常晶闸管正向与反向阻断电压值是相等的。流经晶闸管的漏电流使结温升高而影响其阻断反向电压的能力, 甚至造成器件损耗。晶闸管在反向阻断时, 往往要承受较高的电压, 在实际应用中应避免器件在反向阻断时有任何门极脉冲电流的注入, 因为这时的门极正脉冲电流会助长反向漏电流的增大。

在分析变流器电路拓扑结构时,对于晶闸管可同二极管一样予以理想化。晶闸管的理想特性如图2.3(d)所示。现在将二极管与晶闸管的理想化条件归纳如下:晶闸管正向或反向阻断状态时其内阻为无穷大,即漏电流为零;器件导通时其内阻为零,即管压降为零;器件的开通与关断都是瞬时完成的;器件承受 du/dt 、 di/dt 的能力为无穷大。

2.3.2 晶闸管的动态特性

为了正确使用晶闸管与设计晶闸管电路,进一步了解晶闸管的动态特性是十分必要的。在此要介绍的动态特性包括:开通时间 t_K , 关断时间 t_{off} , 电流上升率 di/dt , 正向阻断电压上升率 du/dt 及功率损耗。

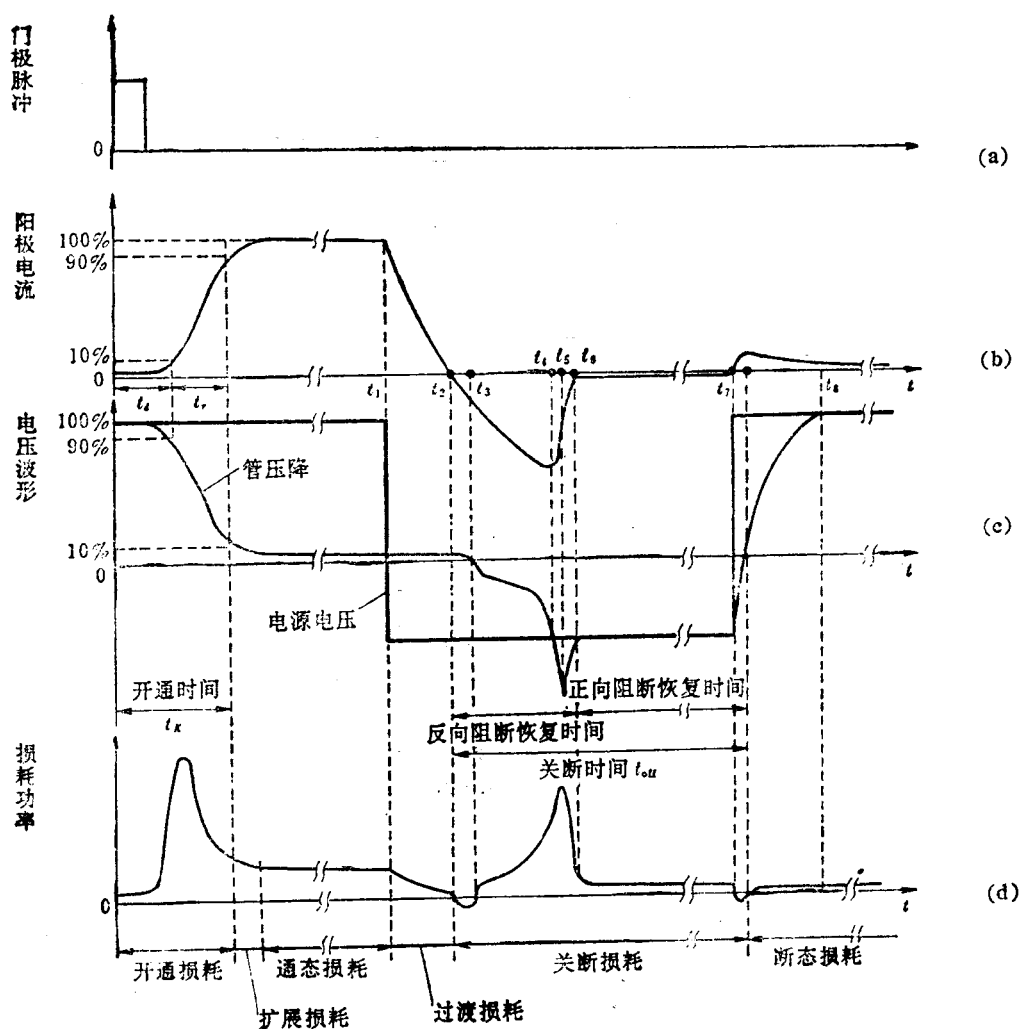


图 2.4 晶闸管的开通、关断过程及瞬时损耗

(a) 门极脉冲信号, (b) 阳极电流波形, (c) 管压降及电源电压波形, (d) 功率损耗曲线

(1) 开通时间 t_K 当晶闸管受到正向电压作用时,即使向其门极施加如图2.4(a)所示的理想阶跃脉冲电流,由于晶闸管内部载流子的正反馈过程需要时间,阳极电流的增长不可能是瞬时完成的。从门极电流的阶跃时刻开始到阳极电流上升到稳态值的10%的这段时间称为延迟时间 t_d ,如图2.4(b)所示。由于晶闸管在逐渐开通,此时阳极 A 与阴极 K 之间的压降开始下降。阳极电流从10%上升到稳态值的90%所需的时间称为上升时间 t_r , t_r 与器件自身特性及外电路性质有关。开通时间为

$$t_K = t_d + t_r \quad (2.1)$$

对于普通晶闸管 $t_d = 0.5 \sim 1.5 \mu s$, $t_r = 0.5 \sim 0.3 \mu s$ 。这类晶闸管的延迟时间 t_d 随门极电流 i_g 的增大而减小。若门极电流持续时间太短(即触发脉冲宽度太窄),则延迟时间 t_d 会增加。门极脉冲前沿差,也会使 t_d 增大。因此,在某些应用频率较高的电力电子系统中为减小 t_d ,必须采用前沿小于 $1 \mu s$ 、宽度大于 t_K 、幅度为4~6倍于门极触发电流上限值的强脉冲进行触发。

延迟时间 t_d 及上升时间 t_r 还与晶闸管所受的阳极电压的大小有关,提高阳极电压可加速器件内部的正反馈过程,使 t_d 与 t_r 均可明显缩短。

(2) 关断时间 t_{off} 在 $t = t_1$ 时刻,晶闸管上电源电压向负方向转变,如图2.4(c)所示。晶闸管要从导通状态过渡到阻断状态,其全过程可分阶段说明如下:

$t_1 < t < t_2$ 自 t_1 时刻起,电源电压反向,阳极电流要衰减。由于电路总含有电感性元件,所以衰减有一过程,于 t_2 时刻阳极电流衰减到零。而在 t_1 到 t_2 之间,器件仍呈正向导电状态,管压降维持不变。

$t_2 < t < t_3$ 在 t_2 时刻,虽然外电流为零,但器件内部的过剩载流子在外电场作用下形成反向的恢复电流。在过剩载流子未排尽之前压降维持与正向导电时一样。

$t_3 < t < t_4$ 自 t_3 时刻起,器件开始恢复反向阻断能力,所以器件上的反向电压在增长。由于此阶段器件的反向耐压较低未能承受全部外加电压,其内部出现雪崩击穿,所以恢复电流继续上升。到 t_4 时刻器件承受的反电压等于外施电压稳态值,恢复电流达到最大值。

$t_4 < t < t_5$ 自 t_4 时刻起,恢复电流开始衰减,衰减时的 di/dt 极高,最高可达每微秒上千安培,这时外电路中任何一点电感(包括导线分布电感)都不免要产生感应电势,并与外施反电压相迭加,使晶闸管两端出现过电压。 t_5 是恢复电流衰减速率达到最高的时刻,也就是反向过电压达到峰值的时刻。

$t_5 < t < t_6$ 在 t_5 时刻,恢复电流衰减到静态反向漏电流值。同时反向电压恢复到外施反向电压稳态值。自 t_2 到 t_6 的这段时间称为反向阻断恢复时间。

$t_6 < t < t_7$ 这段时间是器件内部储存载流子复合以恢复正向阻断能力所需要的时间。若在器件的正向阻断能力尚未完全恢复之前就给晶闸管施加正向电压,则晶闸管立即转为导通,这实际上是失控,在应用中应予避免。

$t_7 < t < t_8$ 自 t_7 时刻起,晶闸管允许再次承受正向电压。在这段时间内,外施电压有正的 du/dt 变化,器件内流过结电容电流,这形成一个很小的阳极电流。自 t_8 时刻以后,阳极电流过渡到正向静态漏电流值。在此过程中,由于阳极回路中电感的作用使晶闸管两端的电压只能逐渐过渡到等于外施电压值。自 t_6 到 t_7 的这段时间构成正向阻断恢复时间的主要组成部分。反向和正向阻断恢复时间之和称为晶闸管的关断时间 t_{off} 。普通晶闸管的关断时间 t_{off} 约几百微秒,某些用于高频逆变电路的快速晶闸管的关断时间为几到几十微秒。在实际使用中变流器

电路必须给晶闸管提供足够长时间的反向电压，以保证在此期间使晶闸管充分恢复正、反向阻断能力，这样才能使晶闸管可靠地工作。

(3) 电流上升率 di/dt 由于晶闸管是通过在门极上施加正脉冲后，由邻近门极的阴极发射大量的电子使器件开通。阴极发射的大量电子开始总是集中在靠近门极的阴极表面很小的区域内，由它形成的阳极电流再扩展到整个阳极表面。如果开始时阳极电流上升率 di/dt 过大，则局部性的过大的电流密度很容易先在阴极边缘形成热点而将三个 PN 结烧穿。这就是过高的 di/dt 损坏晶闸管的原因。

为避免初始开通时器件内局部过大的电流密度，可从以下两方面来设法解决：

① 改进晶闸管内部结构，加长门极周界，以加快导电面的扩展速度，为此可设计一个在阴极表面广泛分布而周界很长的复杂图案作为门极，如图 2.5(a) 所示。这样，一旦晶闸管被触发，邻近门极的阴极表面可以有許多点同时开始导电，并且同时由这些点扩展导电面积，因而就可避免局部过大的电流密度。为达到避免局部过大的电流密度，现在都在晶闸管内部采用放大门极结构，即在晶闸管内部再制作一个小的辅助晶闸管，它与主晶闸管的内部连接如图 2.5(b) 所示。门极电流首先触发辅助晶闸管，再利用辅助晶闸管的阳极电流作为主晶闸管的门极电流，所以主晶闸管的门极电流是已被辅助晶闸管放大的了。当然为提高辅助晶闸管本身的电流扩展速度和缩短整个晶闸管的开通时间，门极仍需施加强触发脉冲。普通晶闸管的 di/dt 约为 $20 \sim 30 \text{ A}/\mu\text{s}$ ，有放大门极结构的晶闸管其 di/dt 则可提高到 $100 \text{ A}/\mu\text{s}$ 以上。

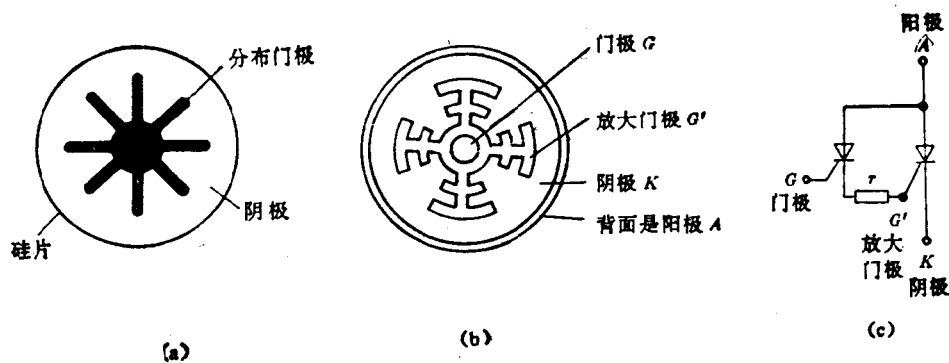


图 2.5 晶闸管的复杂门极结构
(a) 分布门极， (b) 放大门极， (c) 放大门极等效电路

② 在晶闸管的外部电路中串接电感，利用电感电流不能突变的性质以限制 di/dt 。串联电感数值不能过大，一般为微亨数量级。

(4) 正向阻断电压上升率 du/dt 上面已经提到过当晶闸管处于正向阻断状态时，过大的正向电压上升率 du/dt 会造成晶闸管的误导通，为避免这种误导通可采用两种办法解决：① 改进晶闸管内部结构。在 PN 结面上制作一定数量的短路点，由于这些短路点对 PN 结面有局部旁路作用，可将由于过大的 du/dt 引起的结电容电流通过这些短路点分流掉，从而避免晶

闸管的误导通。这种晶闸管的 du/dt 可超过 $200V/\mu s$ 。② 在晶闸管的外部电路中解决。即在晶闸管阳极与阴极两端跨接一个由电阻与电容串联组成的阻容吸收电路,利用电容电压不能突变的性质来抑制 du/dt ,串接电阻的作用是阻尼可能产生的振荡。

(5) 功率损耗 在图 2.4(b)和(c)中将每一瞬时晶闸管的电流值与电压值相乘可得到晶闸管从开通到关断整个过程的瞬时损耗曲线,如图2.4(d)所示。下面概要说明一下损耗曲线各部分的性质。① 通态损耗。这是晶闸管在稳定导电期间的功率损耗。② 断态损耗。这是晶闸管在稳定阻断期间的功率损耗。以上两部分损耗都属于静态损耗,在相位控制的工频应用中,在一个工作周期中通态时间与断态时间所占的总的时间远比开通时间与关断时间为长。由于这两部分的损耗功率对时间的积分(即损耗的能量)相对较大,成为晶闸管发热的主要原因,所以在工频与低频的应用中,晶闸管的通态损耗与断态损耗是器件的主要功率损耗。③ 开通损耗。由图2.4(d)可见,开通损耗曲线呈现明显的尖峰形状,这说明虽然开通时间较短,但在此期间会出现相当大的瞬时功率损耗。④ 关断损耗。它主要是晶闸管在反向阻断的关断过程中的损耗,曲线也出现明显的尖峰形状,这也说明虽然反向阻断恢复时间较短,但在此期间亦会出现相当大的瞬时功率损耗(见图2.4(d))。

开通、关断损耗都属于动态损耗,它们的瞬时值虽大,但由于持续时间很短,所以在工频与低频应用中,这两部分功率的时间积分(即损耗的能量)在一个工作周期的全部能量损耗中所占的比例很小。在高频应用中,工作周期缩短,动态损耗所占比例相对增大,从而转化为晶闸管发热的主要矛盾。

此外,还存在着如图 2.4(d)曲线上所表示的扩展损耗与过渡损耗。这两部分损耗也属于动态损耗,由于它们存在的时间很短,故在一个工作周期中所占能量损耗的比例是很小的。

2.3.3 晶闸管的主要参数

表 2.1 列举了国产品闸管的部分主要参数,现对表中所用的名词解释如下:

(1) 通态平均电流 I_T 这是指环境温度为 $+40^\circ C$ 和规定冷却条件下,元件在电阻性负载、导电角不小于 170° 的单相、工频正弦半波整流电路中,当稳定的额定结温时所允许的最大通态平均电流。

(2) 断态重复峰值电压 V_{DRM} 其值等于断态不重复峰值电压(即正向转折电压)的80%。

(3) 反向重复峰值电压 V_{RRM} 其值等于反向不重复峰值电压(即反向击穿电压)的80%。

(4) 断态重复平均电流 I_{DR} 与反向重复平均电流 I_{RR} 额定结温时,施加50Hz断态或反向重复峰值电压时的平均漏电流。

(5) 通态平均电压 V_T 晶闸管通以额定通态平均电流,结温稳定时,阳极与阴极间的电压平均值。

(6) 额定结温 T_{JM} 元件在正常工作条件下所允许的最高PN结温度。

(7) 断态电压临界上升率 du/dt 在额定结温和门极断路条件下,使元件从断态转入通态的最低电压上升率。

(8) 通态电流临界上升率 di/dt 晶闸管用门极触发开通时,不致使元件损坏的通态电流

表 2.1 国产晶闸管的主要参数

系	列	通态平均电流 I_T (A)	断态重复峰值电压 反向重复峰值电压 V_{DRM}, V_{RRM} (V)	断态重复平均电流 反向重复平均电流 I_{DR}, I_{RR} (mA)	通态平均电压 V_T (V)	额定结温 T_{JM} (°C)	断态电压 临界上升率 dU/dt (V/μs)	通态电流 临界上升率 dI/dt (A/μs)	液涌电流 I_{es1} (A)	维持电流 I_H (mA)	电路换相 关断时间 t_{off} (μs)
KP	1	1	100~3000	≤1	—	100	30	—	20	—	—
KP	5	5	100~3000	≤1	出厂上	199	30	—	90	—	—
KP	10	10	100~3000	≤1	限值由	100	30	—	190	—	—
KP	20	20	100~3000	≤1	各厂按	100	30	—	380	—	—
KP	30	30	100~3000	≤2	合格的	100	30	—	560	—	—
KP	50	50	100~3000	≤2	型式试	100	30	30	940	—	—
KP	100	100	100~3000	≤3	验自订	115	50	50	1880	—	—
KP	200	200	100~3000	≤4	—	115	80	80	3770	—	—
KP	300	300	100~3000	≤5	—	115	80	80	5550	—	—
KP	400	400	100~3000	≤6	—	115	80	80	7540	—	—
KP	500	500	100~3000	≤7	—	115	80	80	9420	—	—
KP	600	600	100~3000	≤9	—	115	100	100	11160	—	—
KP	800	800	100~3000	≤9	—	115	100	100	14920	—	—
KP	1000	1000	100~3000	≤10	—	115	100	100	18500	—	—
KK	100	100	100~2000	≤5	上限值	风冷	≥100	≥100	1900	—	≤30
KK	200	200	100~2000	≤5	由各厂	115	≥100	≥100	3800	—	≤40
KK	300	300	100~2000	≤8	型式试	水冷	≥100	≥100	5600	—	≤60
KK	400	400	100~2000	≤10	验自订	100	≥100	≥100	6300	—	≤80

注: T表示通态, D表示断态, R表示反向(第一位)或重复的(第二位) S表示不重复的, M表示最大值。

续表 2.1 晶闸管门极参数

系 列	门 极 触发电流 I_{GT} (mA)	门 极 触发电压 V_{GT} (V)	门极正向 峰值电流 I_{GFM} (A)	门极反向 峰值电压 V_{GRM} (V)	门极正向 峰值电压 V_{GFM} (V)	门 极 平均功率 P_G (W)	门 极 峰值功率 P_{GM} (W)	门极控制 开通时间 t_{gt} (μ s)
KP 1	5~30	≤ 2.5	—	5	10	0.5	—	—
KP 5	5~70	≤ 3.5	—	5	10	0.5	—	—
KP 10	5~100	≤ 3.5	—	5	10	1	—	—
KP 20	5~100	≤ 3.5	—	5	10	1	—	—
KP 30	8~150	≤ 3.5	—	5	10	1	—	—
KP 50	8~150	≤ 3.5	—	5	10	1	—	—
KP 100	10~250	≤ 4	—	5	10	2	—	—
KP 200	10~250	≤ 4	—	5	10	2	—	—
KP 300	20~300	≤ 5	4	5	10	4	15	—
KP 400	20~300	≤ 5	4	5	10	4	15	—
KP 500	20~300	≤ 5	4	5	10	4	15	—
KP 600	30~350	≤ 5	4	5	10	4	15	—
KP 800	30~350	≤ 5	4	5	10	4	15	—
KP 1000	40~400	≤ 5	4	5	10	4	15	—
KK 100	10~250	≤ 4	4	5	10	3	16	≤ 6
KK 200	10~250	≤ 4	4	5	10	3	16	≤ 6
KK 300	20~300	≤ 5	4	5	10	4	20	≤ 8
KK 400	20~300	≤ 5	4	5	10	4	20	≤ 8

注：G表示门极，T表示触发，D表示不触发，F表示正向，R表示反向，M表示最大值。