

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANLI DIANZI JISHU XITIJI

电力电子技术 习题集

李先允 陈 刚 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANLI DIANZI JISHU XITIJI

电力电子技术 习题集

李先允 陈 刚 编
郑建勇 主审



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

本书是李先允主编的《电力电子技术》的配套学习指导性用书。本书对《电力电子技术》各章要掌握的学习内容提出了基本要求,对各章的重点难点进行了总结和归纳。本书拟通过典型题目的解答,帮助学生加深对电力电子基本理论的理解,提高计算能力和解决问题的能力,提高应试水平。全书精选了各类题目 590 多题,其中大部分为例题,留有少量习题,供读者练习用。

本书可作为电气信息类专业学生、教师的配套教材,也可供考研究生的人员及相关技术人员进修参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术习题集/李先允,陈刚编. —北京:中国电力出版社, 2007.1

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-4983-1

I. 电... II. ①李... ②陈... III. 电力电子学—高等学校—习题 IV. TM1-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 142801 号

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)
航远印刷有限公司印刷
各地新华书店经售

2007 年 1 月第一版 2007 年 1 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.5 印张 327 千字
印数 0001—3000 册 定价 26.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

电力电子技术是电气信息类各专业的一门主要技术课,其特点是理论性强、概念多,与工程实际联系密切。习题是培养学生融汇贯通所学理论,训练解决工程实际问题的重要手段之一。

本书是李先允主编的普通高等教育“十一五”规划教材《电力电子技术》配套使用的教材。为了帮助读者熟练掌握电力电子的基本原理,深入理解基本概念,改进学习这门课程的思维方法,提高解题能力和应试水平,编者根据多年教学实践的积累,从教学习题、研究生入学试题以及国内外相关教材中,精选了 590 多道习题,包括概念题和计算题,其中大部分为例题,留有少量习题,供读者练习用。

本书系统地介绍了电力电子习题的解题方法,选题包含了学生必须掌握的电力电子的全部内容。题型具有典型性,部分题目有一定的广度和深度。有的题目反映了电力电子领域的新技术和新成果。

在内容的安排上,每章的开头写有学习指导,指明该章的重点,对主要内容进行归纳和总结,再按配套教材的顺序列出题目和解答过程。考虑到读者的广泛性,对少数难度较大的题目给出了较深入的分析。因此,本书可作为高等院校《电力电子技术》课程习题课教学用书,可以帮助教师备课,学生复习,可作为报考研究生的复习指南,也可供有关工程技术人员继续学习和函授、自学者使用。

本书的编写得到南京工程学院电气学科有关教师的大力支持和帮助。陈刚老师编写了第一、二、三章,章新因老师编写了第四、五章,李先允老师编写了其他各章,并负责全书的统稿。东南大学的教授郑建勇博士审阅了全书,并提出了许多宝贵意见。本书的编写参考了许多同行及前辈编写的专著和教材,对此一并表示衷心感谢。

鉴于编者时间仓促、水平有限,书中错漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2006 年 10 月于南京

目 录

前言

第一章 绪论	1
一、学习指导	1
二、习题与解答	2
第二章 电力电子器件	4
一、学习指导	4
二、习题与解答	8
三、练习题	28
第三章 整流电路	30
一、学习指导	30
二、习题与解答	31
三、练习题	96
第四章 DC—DC 变换电路	100
一、学习指导	100
二、习题与解答	101
三、练习题	124
第五章 DC—AC 变换电路	127
一、学习指导	127
二、习题与解答	130
三、练习题	158
第六章 AC—AC 变换电路	162
一、学习指导	162
二、习题与解答	164
三、练习题	180
第七章 谐振开关技术	182
一、学习指导	182
二、习题与解答	183
三、练习题	186
附录一 自测试题与答案	188
一、自测试题	188

二、自测试题答案	197
附录二 常用数学公式与基础训练	200
一、常用数学公式	200
二、基础训练	202
三、练习题	207
参考文献	209

第一章 绪 论

一、学 习 指 导

(一) 基本要求

- (1) 掌握电力电子技术的概念。
- (2) 了解电力电子技术发展经历了哪些阶段。
- (3) 了解电力电子技术目前主要应用在哪些领域。

(二) 主要内容

1. 电力电子技术定义

电力电子技术是应用于电力领域的电子技术,是使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术,也称为变流技术。目前电力电子器件均用半导体制成,故也称电力半导体器件。电力电子技术变换的“电力”,可大到数百兆瓦甚至吉瓦,也可小到数瓦甚至 1W 以下。信息电子技术主要用于信息处理,电力电子技术主要用于电力变换。

2. 电力电子技术和其他学科的关系

电力电子器件制造技术和电子器件制造技术的理论基础是一样的,大多数工艺也相同;许多电路分析方法一致,仅应用目的不同。

电力电子技术广泛应用于电气工程中,是电气工程学科中一个最为活跃的分支,其不断进步给电气工程的现代化以巨大的推动力。

控制理论广泛用于电力电子技术,以使电力电子装置和系统的性能能满足各种需求。电力电子技术可看成是“弱电控制强电”的技术,是“弱电和强电的接口”,控制理论是实现该接口的强有力的纽带。控制理论和自动化技术密不可分,而电力电子装置是自动化技术的基础元件和重要支撑。

3. 电力电子技术的发展史(略)

4. 电力电子器件的分类

(1) 按照器件能够对被控制电路信号控制的程度,可将电力电子器件分为以下三类:

1) 半控型器件——通过控制信号可以控制其导通而不能控制其关断。包括晶闸管(Thyristor)及其大部分派生器件。器件的关断由其在主电路中承受的电压和电流决定。

2) 全控型器件——通过控制信号既可控制其导通又可控制其关断,又称自关断器件,包括绝缘栅双极晶体管(Insulated-Gate Bipolar Transistor——IGBT)、电力场效应晶体管(Power MOSFET, 简称为电力 MOSFET)、门极可关断晶闸管(Gate-Turn-Off Thyristor——GTO)。

3) 不可控器件——不能用控制信号来控制其通断,因此也就不需要驱动电路,如电力二极管(Power Diode),只有两个端子,器件的通和断是由其在主电路中承受的电压和电流决定的。

(2) 按照驱动电路加在器件控制端和公共端之间信号的性质,可将电力电子器件分为

两类:

1) 电流驱动型器件——通过从控制端注入或者抽出电流来实现导通或者关断控制的器件。

2) 电压驱动型器件——仅通过在控制端和公共端之间施加一定的电压信号就可实现导通或者关断控制的器件。

(3) 按照器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况, 可将电力电子器件分为三类:

1) 单极型器件——由一种载流子参与导电的器件。

2) 双极型器件——由电子和空穴两种载流子参与导电的器件。

3) 复合型器件——由单极型器件和双极型器件集成混合而成的器件。

5. 电力电子技术的应用 (略)

二、习题与解答

【例 1-1】 电力技术、电子技术和电力电子技术三者所涉及的技术内容和研究对象是什么? 三者的技术发展和应用主要依赖什么电气设备和器件?

答: 电力技术涉及的技术内容是发电、输电、配电及电力应用。其研究对象是发电机、变压器、电动机、输配电线路等电力设备, 以及利用电力设备来处理电力电路中电能的产生、传输、分配和应用问题。其发展依赖于发电机、变压器、电动机、输配电系统。其理论基础是电磁学 (电路、磁路、电场、磁场的基本原理), 利用电磁学基本原理处理发电、输电及电力应用的技术统称为电力技术。

电子技术, 又称为信息电子技术或信息电子学, 技术内容是电子器件以及利用电子器件来处理电子电路中电信号的产生、变换、处理、存储、发送和接收问题。其研究对象是载有信息的弱电信号的变换和处理。其发展依赖于各种电子器件 (二极管、三极管、MOS 管、集成电路、微处理器、电感器、电容器等)。

电力电子技术是一门综合了电子技术、控制技术和电力技术的新兴交叉学科。它涉及电力电子变换和控制技术, 包括电压 (电流) 的大小、频率、相位和波形的变换与控制。其研究对象是半导体电力开关器件及其组成的电力开关电路, 包括利用半导体集成电路和微处理器芯片构成信号处理和控制系统。电力电子技术的发展和应用主要依赖于半导体电力开关器件的发展和应用。

【例 1-2】 为什么三相交流发电机或公用电网产生的恒频、恒压交流电, 经电压、频率变换后再供负载使用, 有可能获得更大的技术经济效益?

答: 用电设备的类型、功能千差万别, 对电能的电压、频率、波形要求各不相同。为了满足一定的生产工艺和流程的要求, 确保产品质量、提高劳动生产率、降低能源消耗、提高经济效益, 若能将电网产生的恒频、恒压交流电变换成为用电负载的最佳工况所需要的电压、频率或波形, 有可能获得更大的技术经济效益。

例如: 若风机、水泵全部采用变频调速技术, 每年全国可以节省几千万吨以上的煤, 或者可以少兴建上千万千瓦的发电厂。若采用高频电力变换器对荧光灯供电, 不仅电—光转换

效率进一步提高、光质显著改善、灯管寿命延长 3~5 倍、可节电 50%，而且其重量仅为工频电感式镇流器的 10%。高频变压器的重量、体积比工频变压器小得多，可以大大减小钢、铜的消耗量。特别在调速领域，与古老的变流机组相比，其在钢铜材消耗量、重量、体积、维护、效率、噪声、控制精度和响应速度等方面优势明显。

【例 1-3】 电子开关型电力电子变换有哪四种基本类型？

答：四种电力变换电路或电力变换器分别为（如图 1-1 所示）：

（1）交流（AC）—直流（DC）整流电路或整流器。

（2）直流（DC）—交流（AC）逆变电路或逆变器。

（3）直流（DC）—直流（DC）电压变换电路，又叫直流斩波电路、直流斩波器。

（4）交流（AC）—交流（AC）电压和/或频率变换电路。仅改变电压的称为交流电压变换器或交流斩波器，频率、电压均改变的称为直接变频器，相应改变的称为移相器。

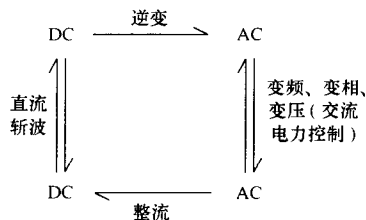


图 1-1 [例 1-3] 图

【例 1-4】 开关型电力电子变换器有哪些基本特性？

答：（1）变换器的核心是一组开关电路，开关电路输出端电压和开关电路输入端电流都不可能是理想的直流或无畸变的正弦基波交流，含有高次谐波。

（2）要改善变换电路的输出电压和输入电流的波形，可以在其输出、输入端附加 LC 滤波电路，但最有效的方法是采用高频 PWM 控制技术。

（3）电力电子变换器工作时，开关器件不断进行周期性通、断状态的依序转换，为使输出电压接近理想的直流或正弦交流，一般应对称地安排一个周期中不同的开关状态及持续时间。因此对其工作特性的常用分析方法或工具是开关周期平均值（状态空间平均法）和傅里叶级数。

【例 1-5】 开关型电力电子变换器有哪两大应用领域？

答：按功能可分为两大应用领域：

（1）开关型电力电子变换电源，简称开关电源。它由半导体开关电路将输入电源变换为另一种电源给负载供电。这一类应用现在已经十分广泛。

（2）开关型电力电子补偿控制器。它又分为电压、电流（有功功率、无功功率）补偿控制器和阻抗补偿控制器两种类型。它们或向电网输出所要求的补偿电压或电流，或改变并联接入、串联接入交流电网的等效阻抗，从而改善电力系统的运行特性和运行经济性。这类应用将导致电力系统的革命并推动电力电子技术的继续发展。

第二章 电力电子器件

一、学习指导

(一) 基本要求

- (1) 了解电力电子器件的发展、分类与应用。
- (2) 理解和掌握晶闸管(SCR)、可关断晶闸管(GTO)、电力晶体管(GTR或BJT)、电力场效应晶体管(电力MOSFET)和绝缘栅双极晶体管(IGBT)、IGCT等常用的电力电子器件的工作机理、电气特性和主要参数。最重要的是掌握其基本特性。
- (3) 掌握电力电子器件的串、并联使用。
- (4) 掌握驱动电路的基本任务与电气隔离方法。
- (5) 掌握电力电子器件的保护措施。

(二) 主要内容

编写本章的基本目的是帮助学习者尽快了解电力电子器件的特点,在学完《电力电子技术》全书之后理解、应用电力电子器件;保证内容的完整性,让学者了解器件物理结构和原理。

1. 不可控器件——功率二极管

功率二极管的基本结构和工作原理与信息电子电路中的二极管一样,以半导体PN结为基础,由一个面积较大的PN结和两端引线以及封装组成的。

功率二极管的主要参数有正向通态平均电流 $I_{F(AV)}$ 、正向压降 U_F 、反向重复峰值电压 U_{RRM} 、最高工作结温 T_{JM} 、反向恢复时间 t_{rr} 、浪涌电流 I_{sur} 。

功率二极管的主要类型有普通二极管、快恢复二极管、肖特基二极管。

2. 半控型器件——晶闸管

(1) 晶闸管的结构与工作原理:

掌握晶闸管的结构——PNPN 四层三端结构;基于双晶体管模型,掌握晶闸管的基本工作原理。

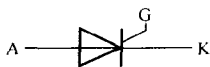


图 2-1 晶闸管图形符号

1) 结构:

外形:晶闸管的外形有螺栓型封装和平板型封装两种。对于螺栓型封装,通常螺栓是其阳极,能与散热器紧密连接且安装方便;平板型封装的晶闸管,可由两个散热器将其夹在中间。

图形符号:晶闸管是由阳极 A、阴极 K 和门极(控制端) G 组成的三端元件,如图 2-1 所示。

2) 重点掌握晶闸管导通和关断的条件(工作原理):

导通条件:晶闸管的阳极与阴极之间加正向电压时,仅在门极有触发电流的情况下晶闸管才能开通。晶闸管一旦导通,门极就失去控制作用。

截止条件:要使晶闸管关断,只能使晶闸管的电流降到接近于零的某一数值(维持电

流)以下。承受反向电压时,不论门极是否有触发电流,晶闸管都不会导通。

(2) 晶闸管的基本特性:

进一步理解晶闸管导通、关断的条件;了解晶闸管导通和关断的过程。

1) 晶闸管的伏安特性:

正向特性(第Ⅰ象限): $I_G=0$ 时,器件两端施加正向电压,正向阻断状态,只有很小的正向漏电流流过;正向电压超过临界极限即正向转折电压 U_{bo} 时,则漏电流急剧增大,器件开通。随着门极电流幅值的增大,正向转折电压降低。

导通后的晶闸管特性和二极管的正向特性相仿。晶闸管本身的压降很小,在1V左右。导通期间,如果门极电流为零,并且阳极电流降至接近于零的某一数值 I_H 以下,则晶闸管又回到正向阻断状态。 I_H 称为维持电流。

反向特性(第Ⅲ象限):晶闸管上施加反向电压时,伏安特性类似二极管的反向特性。

门极伏安特性:晶闸管的门极触发电流从门极流入晶闸管,从阴极流出。为保证可靠、安全地触发,触发电路所提供的触发电压、电流和功率应限制在可靠触发区。

2) 动态特性:重点理解关断时间的概念。

(3) 晶闸管的主要参数:掌握额定电压和额定电流的概念。

1) 额定电压:断态重复峰值电压 U_{DRM} 、反向重复峰值电压 U_{RRM} 、通态(峰值)电压 U_{TM} 。通常取晶闸管的 U_{DRM} 和 U_{RRM} 中较小的标值作为该器件的额定电压。选用时,额定电压要留有一定裕量,一般取额定电压为正常工作时晶闸管所承受峰值电压的2~3倍。

2) 额定电流:额定通态平均电流 $I_{VT(AV)}$ 。它为晶闸管在环境温度为40℃和规定的冷却状态下,稳定结温不超过额定结温时所允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值。使用时,应按实际电流与通态平均电流有效值相等的原则来选取晶闸管,应留一定的裕量,一般取1.5~2倍。还有维持电流 I_H 、擎住电流 I_L (对同一晶闸管来说,通常 I_L 约为 I_H 的2~4倍)、浪涌电流 I_{sur} 。

(4) 动态参数(略)。

(5) 晶闸管的派生器件(只需要基本的了解):快速晶闸管(FST)、双向晶闸管(TRIAC)、逆导晶闸管(RCT)、光控晶闸管(LTT)。

3. 典型全控型器件

掌握全控型器件容量等级、工作频率、驱动方式(电流驱动、电压驱动两种)的特点及特点的相互对比;了解器件的主要参数。其典型代表为门极可关断晶闸管、电力晶体管、电力场效应晶体管、绝缘栅双极晶体管。

(1) 门极可关断晶闸管(GTO)。

导通时饱和不深,接近临界饱和,有利于门极控制关断,但导通时管压降增大。多元集成结构使GTO元阴极面积很小,门、阴极间距大为缩短,使得P2基区横向电阻很小,能从门极抽出较大电流。GTO的许多参数和普通晶闸管相应的参数意义相同。

GTO电压电流容量大,适合于大功率场合,具有电导调制效应,其通流能力很强。电流关断增益很小,关断时门极负脉冲电流大,开关速度低,驱动功率大,驱动电路复杂,开关频率低。

(2) 电力晶体管(GTR,直译为巨型晶体管)。

耐高电压、大电流的双极结型晶体管(BJT),英文有时候也称为Power BJT。在电力

电子技术的范围内, GTR 与 BJT 这两个名称等效, 在中、小功率范围内取代晶闸管, 但目前又大多被 IGBT 和电力 MOSFET 取代。GTR 的结构和工作原理与普通的双极结型晶体管的结构和基本原理是一样的。

在电力电子电路中, GTR 工作在开关状态, 即工作在截止区或饱和区。在开关过程中, 即在截止区和饱和区之间过渡时, 要经过放大区。GTR 的开关时间在几微秒以内, 比晶闸管和 GTO 都短很多。

GTR 有二次击穿现象。一次击穿: 集电极电压升高至击穿电压时, I_c 迅速增大, 出现雪崩击穿, 只要 I_c 不超过限度, GTR 一般不会损坏, 工作特性也不变。二次击穿: 一次击穿发生时, I_c 增大到某个临界点时会突然急剧上升, 并伴随电压的陡然下降, 将导致器件的永久损坏, 或者工作特性明显衰变。所以安全工作区 (SOA) 由最高电压 U_{CEM} 、集电极最大电流 I_{CM} 、最大耗散功率 P_{CM} 、二次击穿临界线限定。

GTR 的优点是耐压高, 开关特性好, 通流能力强, 饱和压降低; 缺点是开关速度低, 为电流驱动, 所需驱动功率大, 驱动电路复杂, 存在二次击穿问题。

(3) 电力场效应晶体管。

电力场效应晶体管主要指绝缘栅型中的 MOS 型 (Metal Oxide Semiconductor FET)。

电力 MOSFET 的结构: 导通时只有一种极性的载流子 (多子) 参与导电, 是单极型晶体管。

电力 MOSFET 工作在开关状态, 即在截止区和非饱和区之间来回转换。电力 MOSFET 的通态电阻具有正温度系数, 对器件并联时的均流有利。

一般来说, 电力 MOSFET 不存在二次击穿问题, 这是它的一大优点。实际使用中仍应注意留适当的裕量。MOSFET 的优点是用栅极电压来控制漏极电流, 驱动电路简单, 需要的驱动功率小, 开关速度快, 工作频率高, 不存在二次击穿的问题; 缺点是电流容量小, 耐压低, 一般只适用于功率不超过 10kW 的电力电子装置。

(4) 绝缘栅双极晶体管 (IGBT)。

GTR 和 GTO 的特点: 双极型, 电流驱动, 有电导调制效应, 通流能力很强, 开关速度较低, 所需驱动功率大, 驱动电路复杂。

MOSFET 的优点: 单极型, 电压驱动, 开关速度快, 输入阻抗高, 热稳定性好, 所需驱动功率小而且驱动电路简单。

两类器件取长补短结合而成的复合器件 Bi-MOS 器件, 即绝缘栅双极晶体管 (Insulated-gate Bipolar Transistor——IGBT 或 IGT)。GTR 和 MOSFET 复合, 结合二者的优点, 具有很好的特性, 取代了 GTR 和一部分 MOSFET 的市场; 中小功率电力电子设备的主导器件继续提高电压和电流容量, 以期再取代 GTO 的地位。

IGBT 的特性和参数特点:

1) 开关速度高, 开关损耗小。在电压 1000V 以上时, 开关损耗只有 GTR 的 1/10, 与电力 MOSFET 相当。

2) 相同电压和电流定额时, 安全工作区比 GTR 大, 且具有耐脉冲电流冲击能力。

3) 通态压降比 VDMOSFET 低, 特别是在电流较大的区域。

4) 输入阻抗高, 输入特性与 MOSFET 类似。

5) 与 MOSFET 和 GTR 相比, 耐压和通流能力还可以进一步提高, 同时保持开关频率

高的特点。

4. 其他新型电力电子器件

只需要基本的了解,知道有哪些新器件,初步建立“模块”、“功率集成电路”的概念。

(1) MOS 控制晶闸管 MCT (已经停产,了解为主)。

(2) 静电感应晶体管 SIT。

(3) 静电感应晶闸管 SITH。

(4) 集成门极换流晶闸管 IGCT。

IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor), 也称 GCT (Gate-Commutated Thyristor), 结合了 IGBT 与 GTO 的优点,容量与 GTO 相当,但开关速度快 10 倍,且可省去 GTO 庞大而复杂的缓冲电路,只不过所需的驱动功率仍很大。目前与 IGBT 等新型器件激烈竞争,试图最终取代 GTO 在大功率场合的位置。

(5) 功率模块与功率集成电路。

20 世纪 80 年代中后期开始模块化趋势,将多个器件封装在一个模块中,称为功率模块。其可缩小装置体积,降低成本,提高可靠性。对工作频率高的电路,功率模块可大大减小线路电感,从而简化对保护和缓冲电路的要求。

将器件与逻辑、控制、保护、传感、检测、自诊断等信息电子电路制作在同一芯片上,称为功率集成电路 (Power Integrated Circuit——PIC)。功率集成电路的主要技术难点:高低压电路之间的绝缘问题以及温升和散热的处理。

以前功率集成电路的开发和研究主要在中小功率应用场合。智能功率模块在一定程度上回避了上述两个难点,最近几年获得了迅速发展。功率集成电路实现了电能和信息的集成,成为机电一体化的理想接口。

5. 电力电子器件的驱动

(1) 理解驱动电路的概念:

驱动电路:主电路与控制电路之间的接口。驱动电路的基本任务:将信息电子电路传来的信号按控制目标的要求,转换为加在电力电子器件控制端和公共端之间,可以使其开通或关断的信号。对半控型器件只需提供开通控制信号,对全控型器件则既要提供开通控制信号,又要提供关断控制信号。

(2) 掌握隔离的概念:

了解两类基本的隔离方式:光隔离——光耦、光纤;磁隔离——脉冲变压器。

驱动型式:有电流驱动型和电压驱动型。

(3) 了解各类器件驱动电路的主要特点:

1) 晶闸管的触发电路:

作用:产生符合要求的门极触发脉冲,保证晶闸管在需要的时刻由阻断转为导通。广义上讲,该电路还包括对其触发时刻进行控制的相位控制电路。

晶闸管触发电路应满足下列要求:触发脉冲的宽度应保证晶闸管可靠导通(结合擎住电流的概念);触发脉冲应有足够的幅度;不超过门极电压、电流和功率定额,且在可靠触发区域之内;应有良好的抗干扰性能、温度稳定性及与主电路的电气隔离。

2) 电流驱动型器件的驱动电路:

GTO、GTR 的驱动电路属电流型驱动电路。其开通控制与普通晶闸管相似,但对脉冲

前沿的幅值和陡度要求高,且一般需在整个导通期间施加正门极电流。其关断需施加负门极电流,对电流幅值和陡度的要求更高,关断后还应在门阴极施加约 5V 的负偏压以提高抗干扰能力。

3) 电压驱动型器件的驱动电路:

MOSFET、IGBT 的驱动电路属电压型驱动电路。MOSFET、IGBT 栅源间、栅射间有数千皮法的电容,为快速建立驱动电压,要求驱动电路输出电阻小。使 MOSFET 开通的驱动电压一般 10~15V,使 IGBT 开通的驱动电压一般 15~20V。MOSFET、IGBT 关断时施加一定幅值的负驱动电压(一般取 $-5 \sim -15\text{V}$),有利于减小关断时间和关断损耗。

6. 电力电子器件的保护

(1) 了解保护的目。

(2) 掌握保护的种:过电压保护、过电流保护、缓冲电路。

(3) 掌握保护的方法及其基本原理:RC、RCD,快速熔断器。

7. 电力电子器件的串联和并联使用

(1) 目的:

串联——提高总体耐压能力;

并联——提高总体通流能力。

(2) 问题:

串联——电压分配不均;

并联——电流分配不均。

(3) 解决的措施:

串联均压——静态均压、动态均压;

并联均流——静态均流、动态均流;

最基本的措施——选择特性尽可能接近的器件。

(4) 了解电力 MOSFET 和 IGBT 并联运行的特点。

二、习题与解答

【例 2-1】晶闸管导通的条件是什么?怎样使晶闸管由导通变为关断?

答:晶闸管导通的条件是:阳极承受正向电压,处于阻断状态的晶闸管,只有在门极加正向触发电压,才能使其导通。门极所加正向触发脉冲的最小宽度,应能使阳极电流达到维持通态所需要的最小阳极电流即擎住电流 I_L 以上。导通后的晶闸管管压降很小。

使导通了的晶闸管关断的条件是:使流过晶闸管的电流减小至某个小的数值即维持电流 I_H 以下。其方法有两种:

(1) 减小正向阳极电压至某一最小值以下,或加反向阳极电压;

(2) 增加负载回路中的电阻。

【例 2-2】晶闸管导通后,移去门极电压,晶闸管是否还能继续导通?为什么?

答:能。这是因为晶闸管可看作一个 PNP 型与一个 NPN 型晶体管互连的器件,如图 2-2 所示。晶闸管一旦导通,即使除去门极电压,使 $I_G=0$,但复合管中的 V2 仍保持着远

大于触发电路的基极电流,使晶闸管继续导通。

【例 2-3】 在晶闸管的门极通入几十毫安的小电流,可以控制阳极几十安培、几百安培的大电流的导通,它与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?晶闸管能不能像晶体管一样构成放大器?

答:晶体管在共发射极接法时,基极电流 I_B 可以控制较大的集电极电流 I_C 变化,起到了电流放大的作用;而晶闸管在电路中只能由门极控制信号控制其导通,在电路中只起到一个开关作用,要关断还需采取措施(如阳极加反向电压)。因此,晶闸管不能构成放大器。

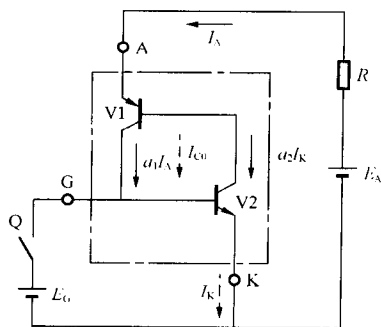


图 2-2 晶闸管等效电路

【例 2-4】 晶闸管的额定电流是怎样定义的?有效值和平均值之间有何关系?

答:晶闸管的额定电流即指其额定通态平均电流 $I_{VT(AV)}$,它是在规定的条件下,晶闸管允许连续通过最大工频正弦半波电流的平均值。

这些条件是:环境温度 $+40^{\circ}\text{C}$,冷却条件按规定,单相半波整流电路为电阻负载,导通角不小于 170°C ,晶闸管结温不超过额定值。

额定通态平均电流 $I_{VT(AV)}$ 的电流等级。通常 50A 以下的管子分为 1 、 5 、 10 、 20 、 30 、 50A 等级, $100\sim 1000\text{A}$ 的管子分为 100 、 200 、 300 、 400 、 500 、 600 、 800 、 1000A 等级。

额定通态平均电流 $I_{VT(AV)}$ 与在同一定义条件下的有效值 I_{VT} 具有如下关系:

$$I_{VT} = K_f I_{VT(AV)}$$

式中: $K_f = \frac{I_{VT}}{I_{VT(AV)}} = \frac{\pi}{2} \approx 1.57$ 为定义条件下的波形系数。

【例 2-5】 导通角 θ 不同,电流的波形不一样,如何来选择晶闸管的电流容量?

答:导通角 θ 不同,电流的波形不一样,因而波形系数亦不相同。 θ 角愈小,波形系数愈大。晶闸管电流的有效值 I_{VT} 、平均值 $I_{VT(AV)}$ 与波形系数 K_f 具有如下关系:

$$I_{VT} = K_f I_{VT(AV)}$$

具有相同平均值而波形不同的电流,因波形不同,其有效值是不相同的,流经同一晶闸管的发热情况也不相同,因为决定发热的因素是电流的有效值,管芯发热效应和电流的有效值大小有关。

因此,选择晶闸管额定电流参数的原则是:使电路各种实际运行情况(特别是最不利的情况)下管芯的结温小于或等于额定结温。这样,就能保证晶闸管在实际运行工作时,不致因电流过载而损坏。

上述这一原则可归结为:使实际运行管子电流波形的有效值,等于定义管子额定通态平均电流 $I_{VT(AV)}$ 时的电流有效值 I_{VT} ,即

$$I_{VT} = K_f I_d = 1.57 I_{VT(AV)}$$

则晶闸管额定电流为

$$I_{VT(AV)} = \frac{K_f I_d}{1.57} = \frac{I_{VT}}{1.57}$$

【例 2-6】 额定电流为 10A 的晶闸管能否承受长期通过 15A 的直流负载电流而不过热？

答：额定电流为 10A 的晶闸管能够承受长期通过 15A 的直流负载电流而不过热。因为晶闸管的额定电流 I_R 定义为：在环境温度为 40℃ 和规定的散热冷却条件下，晶闸管在电阻性负载的单相、工频正弦半波导电，结温稳定在额定值 125℃ 时，所对应的通态平均电流值。这就意味着晶闸管通过任意波形、有效值为 $1.57I_R$ 的电流时，其发热温升正好是允许值，而恒定直流电的平均值与有效值相等，故额定电流为 10A 的晶闸管通过 15.7A 的直流负载电流，其发热温升正好是允许值。

【例 2-7】 晶闸管导通后，门极改加适当大小的反向电压，会发生什么情况？

答：晶闸管承受正向阳极电压，并已导通的情况下，门极就失去了控制作用。因此，晶闸管导通后，门极改加适当大小的反向电压，晶闸管将保持导通状态不变。

【例 2-8】 门极断路时，晶闸管承受正向阳极电压，它会导通吗？若真的导通，是什么情况？

答：门极断路时，晶闸管承受正向阳极电压，有两种情况可造成晶闸管的非正常导通。一是阳极电压 U_A 过高，达到或超过 $I_G = 0$ 时的转折电压 U_{B0} 时，使漏电流急剧增加；二是 U_A 的电压上升率 du_A/dt 太快。

这两种情况造成的最终结果，都是使从 N1 区通过反向偏置的 J2 结向 P2 区（门极区）注入足够数量的漏电流（空穴流），充当了二等效三极管电路中的基极电流 I_{B2} ，它相当于从门极提供的 I_G 的作用，使其二等效三极管的 α_1 、 α_2 极快地上升至 $\alpha_1 + \alpha_2 \approx 1$ ，即 $1 - (\alpha_1 + \alpha_2) \approx 0$ ，进而使阳极电流 I_A 大大增加，并只受外电路电阻的限制，晶闸管进入导通状态。

这两种不加门极触发控制信号使晶闸管从阻断状态转入导通状态的情况是非正常工作状态，在实际使用中是不允许的，因为发生此类情况常造成器件的损坏。

【例 2-9】 温度升高时，晶闸管的触发电流、正反向漏电电流、维持电流以及正向转折电压和反向击穿电压各如何变化？

答：当温度升高时，晶闸管的触发电流 I_G 下降；正反向漏电电流上升；维持电流 I_H 下降；正向转折电压与反向击穿电压都减小。

【例 2-10】 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？冬天工作正常，夏天工作不正常，又可能是什么原因？

答：夏天工作正常，冬天工作不正常的原因可能是电路提供的触发电流 I_G 偏小，夏天勉强能触发，而冬天则不能满足对触发电流的要求了。冬天正常，夏天不正常的原因可能是晶闸管的维持电流小，冬天勉强能关断，到了夏天不容易关断；或者是，选用的晶闸管电压

偏低,到了夏天,管子的转折电压与击穿电压值下降,造成“硬开通”或击穿。

【例 2-11】 图 2-3 为调试晶闸管电路,在断开 R_d 测量输出电压 U_d 是否正确可调时,发现电压表读数不正常,接上 R_d 后一切正常,为什么?

答:当 Q 未合上时,因电压表内阻很大,即使晶闸管门极加触发脉冲,此时流过晶闸管的阳极电流仍小于擎住电流,晶闸管没有导通,电压表上显示的读数只是管子漏电流形成的电阻与电压表内阻的分压值,所以这个读数是不正确的。当 Q 合上后, R_d 接入电路,晶闸管能正常导通,电压表的读数才能正确显示。

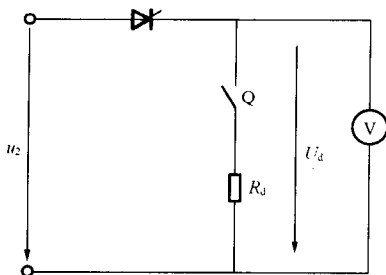


图 2-3 [例 2-11] 图

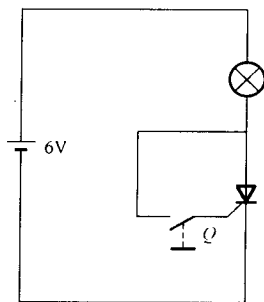


图 2-4 [例 2-12] 图

【例 2-12】 用万用表怎样区分晶闸管阳极 (A)、阴极 (K) 与门极 (G)? 判断晶闸管的好坏有哪些简便实用的方法?

答:可用万用表测量晶闸管三个极间的电阻来区分晶闸管阳极、阴极与门极。管子阳、阴极间的正反向电阻接近无穷大,门极与阴极间的电阻值约为几百欧,并且 G—K 间的阻值略小于 K—G 间的阻值。

判断晶闸管好坏的方法有:

- (1) 用万用表可以初步判断好坏,如上面讲的各极间的阻值状况。
- (2) 用 6V 电源 (干电池或直流稳压电源) 作为阳极电源,接成如图 2-4 所示的线路,如果按下开关 Q 后,灯亮,说明管子是好的。
- (3) 用晶体管图示仪测量管子正反向伏安特性。

【例 2-13】 在环境温度较低时,或是加强通风冷却时,晶闸管与整流二极管是否可以超过额定电流运行?

答:按规定不可以超过额定电流运行,但实际上只要保证结温不超过允许值 100°C ,可以在一定范围内超过额定电流运行。

【例 2-14】 结温与管壳 (底座) 温度大概相差多少? 50A 以上器件不用风冷时,额定电流要打多少折扣?

答:结温与管壳温度的差别和环境温度、通过电流的大小、散热器大小、通风条件等有关。结温已达到 100°C 时,管壳温度因上述条件不同,可以相差 $20\sim 50^{\circ}\text{C}$,所以不能以管壳