

高职高专教育“十二五”规划教材

电力电子技术及应用

王金斗 游芳 主编

DIANLI DIANZI

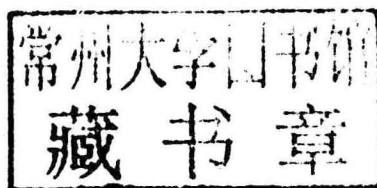
JISHU JI YINGYONG

中国建材工业出版社

高职高专教育“十二五”规划教材

电力电子技术及应用

主 审 张建国
主 编 王金斗 游 芳
副主编 刘海明 殷忠敏 邵 辉



中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子技术及应用/王金斗, 游芳主编. —北京:
中国建材工业出版社, 2012. 8
ISBN 978-7-5160-0233-9

I. ①电… II. ①王…②游… III. ①电力电子学-
高等学校-教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 162785 号

内容提要

《电力电子技术及应用》是高等院校机电类专业的一门重要技术基础课。本书在编写中紧紧围绕电力电子器件的应用, 将复杂理论分析简化, 定性说明实用化, 将器件、电路与应用有机结合。编写时在保证必需的基础理论与常规技术的同时, 充分考虑本书的应用性, 以满足高等院校职业化教学的需要。在编写内容上力求精选内容, 叙述尽量深入浅出, 每章后附有启发思路的习题, 以期符合教学要求, 达到“学”、“用”结合的效果。

本书可作为高等院校自动化、电气工程及自动化和相关专业的本科教材, 也可作为从事电力电子技术应用领域的科研工作人员的参考用书。

电力电子技术及应用

主 编: 王金斗 游 芳

封面设计: 华盛英才

出版发行: 中国建材工业出版社

地 址: 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编: 100044

经 销: 全国各地新华书店

印 刷: 北京天宇万达印刷有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

印 张: 11

字 数: 252 千字

版 次: 2013 年 1 月第 1 版

印 次: 2013 年 1 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5160-0233-9

定 价: 25.00 元

本社网址: www.jcbs.com.cn

本书如出现印装质量问题, 由我社发行部负责调换。联系电话: (010) 88386906

前言

电力电子技术是 20 世纪 70 年代发展起来的新兴技术,它在国民经济中具有十分重要的地位,可以说,凡是用电的地方都离不开电力电子技术。大到矿山、油田、航空航天、输变电、电力机车,小到电脑,电动车、手机充电器等。它还是节能、环保、低碳经济的关键技术,可再生能源(或绿色能源)、光伏发电和风力发电都与电力电子技术密不可分。

电力电子技术是介于电力、电子及控制三大电气工程技术之间的交叉学科,其应用领域涵盖电化学、电镀、电加工、直传动、直流电力牵引、交流传动、交流电力牵引、电机励磁、电磁合闸、充电、中频感应加热、高频静电除尘、直流高压输电、无功功率补偿及家用电器等方面,是目前发展最快、应用最广、表现最为活跃的技术领域之一。

随着电力电子技术在国民经济各领域的广泛应用,生产第一线使用的电力电子设备的数量在不断增长,设备的复杂程度和科技含量也在不断提高。为此,迫切需要大批具有一定理论基础和实践技能的现场技术人员,用于满足电力电子装置的现场安装、使用、调试、维护及故障处理方面的需求。根据高职高专院校电类专业的定位,其培养目标是生产一线需求的应用技术人才。为此,本教材在内容的编写上特别注重了基础知识与应用实践的结合,以便适应目前的市场形势。

本教材共分为 7 章,按照从基础知识到实践应用的顺序,分别讲述了“晶闸管及单相可控整流电路、三相可控整流电路、有源逆变电路、全控型电力电子器件、直流斩波电路、交流调压电路和变频电路”等知识,较为详细地介绍了电力电子技术所包含的相关内容。

本教材是依据电力电子技术行业职业技能鉴定规范,力图反映电力电子技术的新技术和新产品,在内容取材及安排上具有以下特点:

(1) 本教材注重产品的分析及应用,强化学生的工程意识,既让学生懂得了专业理论,又培养了学生解决实际问题的能力。

(2) 注重学生对电力电子技术的应用能力,每章中的知识目标与能力目标大多针对工程中实际遇到的问题,具有很高的工程实用性。

(3) 在教学内容上,以“必需”和“够用”为原则。对基本知识不做过于繁杂的理论讲解,重点放在现代电力电子技术的介绍和训练上;对先进的电力电子产品,重在进行器件的认识和操作上。

(4) 在实训内容的安排上,以“重基础、快上手、强能力”为原则,以实际电力电子产品为载体,进行单项技能训练,培养学生的实际工作能力。每个项目实训都是综合性的、相对完整的工作工程。

通过本课程学习将使学生具备电力电子技术与应用知识,掌握从事电力电子技术的基本技能,帮助学生掌握电力电子技术的现代化设备。本教材既强调基础知识,又力求体现新知识、新技术、新产品,教学内容与国家职业技能鉴定规范相结合。在编写体例上采用新的形式,简洁的文字表述,加上大量的实物图片,直观明了。书中注重理论和实践的结合,为学生提供了有实用价值的技能技巧训练,相信会对提高学生的电力电子技术和开拓学生的视野有所帮助。

目 录

项目 1 晶闸管及单相可控整流电路	1
任务 1 晶闸管	1
任务 2 单相可控整流电路	8
任务 3 晶闸管触发电路	17
技能训练 1 晶闸管的简易测试及导通关断条件实验	22
技能训练 2 单结晶体管触发电路及单相半波可控整流电路测试	24
技能训练 3 锯齿波同步移相触发电路	27
技能训练 4 单相桥式半控整流电路	28
思考练习题	31
项目 2 三相可控整流电路	33
任务 1 三相半波可控整流电路	33
任务 2 三相全控桥式整流电路	40
任务 3 集成触发电路	46
任务 4 三相可控整流电路应用实例	52
技能训练 5 三相半波可控整流电路	56
技能训练 6 三相桥式半控整流电路	57
思考练习题	60
项目 3 有源逆变电路	62
任务 1 有源逆变电路基本工作原理	62
任务 2 三相半波逆变电路	65
任务 3 三相桥式逆变电路	67
任务 4 逆变失败原因分析及逆变角的限制	69
任务 5 有源逆变电路应用实例	73
技能训练 7 单相桥式有源逆变电路	76
思考练习题	78
项目 4 全控型电力电子器件	79
任务 1 可关断晶闸管	79
任务 2 电力晶体管	84
任务 3 电力场效应晶体管	89
任务 4 绝缘栅双极型晶体管(IGBT)	93
任务 5 其他新型电力器件	102

思考练习题	105
项目 5 直流斩波电路	107
任务 1 直流斩波电路的基本工作原理	108
任务 2 普通晶闸管构成的直流斩波电路	109
任务 3 其他直流斩波器	114
技能训练 8 斩波电路	122
思考练习题	125
项目 6 交流调压电路	127
任务 1 双向晶闸管	127
任务 2 单相交流调压电路	130
任务 3 三相交流调压电路	135
任务 4 交流调压电路应用实例	137
技能训练 9 三相交流调压电路	140
思考练习题	142
项目七 变频电路	143
任务 1 变频电路的基本工作原理	143
任务 2 谐振式变频电路	146
任务 3 三相桥式变频电路	148
任务 4 交—交变频电路	155
任务 5 脉宽调制(PWM)型变频电路	159
任务 6 变频电路应用实例	166
思考练习题	170

项目 1

晶闸管及单相可控整流电路



学习目标

- 理解晶闸管(SCR)工作机理、电气特性和主要参数;
- 理解和掌握单相可控整流电路的电路结构、工作原理、电气性能、波形分析方法和参数计算;
- 掌握晶闸管的触发电路的电路结构和工作原理。



能力目标

- 能够对晶闸管电气特性和主要参数进行测试;
- 能够对单相可控整流电路进行调试、参数计算,会选择整流元件。

任务 1 晶 闸 管



任务要求

- 理解晶闸管的结构、工作原理和主要参数;
- 掌握晶闸管主要参数的测试方法。

晶闸管全称晶体闸流管,曾称可控硅(Silicon Controlled Rectifier),简称 SCR。20 世纪 50 年代末问世后逐步发展成了一个大的家族。以后晶闸管获得了迅猛发展,除了它的性能与电压、电流容量不断提高外,还派生出快速晶闸管、可关断晶闸管、逆导晶闸管、光控晶闸管和双向晶闸管等,形成晶闸管系列,已被广泛应用于相控整流、逆变、交流调压和直流变换等领域,成为大功率低频(200Hz 以下)装置中的主要器件。现在使用的多是单向晶闸管,即普通晶闸管,由于它问世早,应用极为广泛,因此,在无特别说明的情况下,本书所述的晶闸管都为普通晶闸管。

1.1.1 晶闸管的结构及工作原理

1. 晶闸管的结构

晶闸管的外形有螺栓型封装和平板型封装两种。其封装形式可分为小电流塑封式、小电流螺栓式、大电流螺栓式和大电流平板式(额定电流在 200A 以上),如图 1-1(a)、(b)、(c)所示。晶闸管有三个电极,分别是阳极 A、阴极 K 和门极(或称控制极)G,它的图形及文字符号如图 1-1(d)所示。

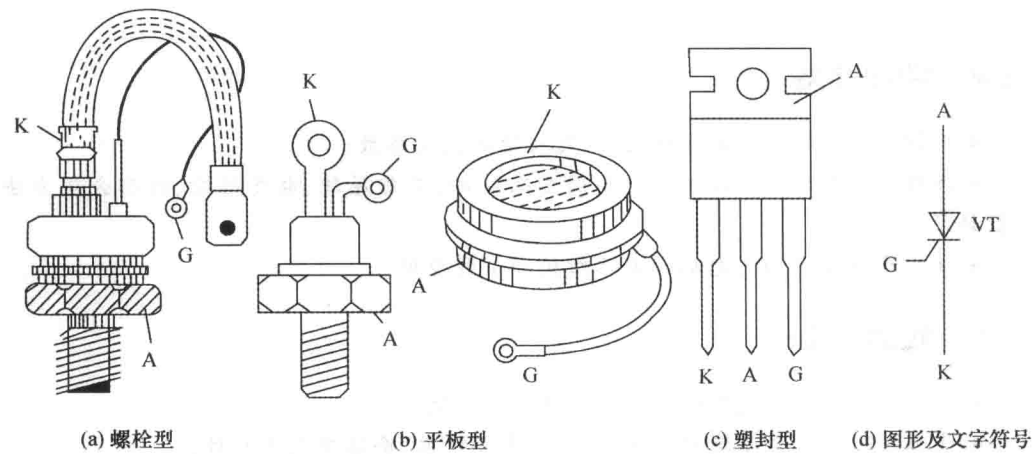


图 1-1 晶闸管的外形及符号

晶闸管是大功率器件,工作时发热大,必须安装散热器。如图 1-2 所示为晶闸管散热器。

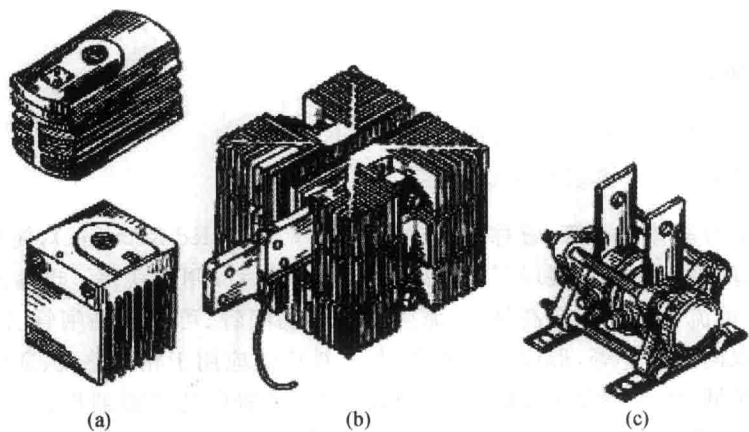


图 1-2 晶闸管散热器

2. 晶闸管的工作原理

我们通过如图 1-3 所示的电路来说明晶闸管的工作原理。在该电路中,由电源 U_{AA} 、白炽灯、晶闸管的阳极和阴极组成晶闸管主电路;由电源 U_{GG} 、开关 S、晶闸管的门极和阴

极组成控制电路,也称触发电路。

(1) 如图 1-3(a)所示,晶闸管阳极经负载(白炽灯)接电源 U_{AA} 正极,阴极接电源负极,此时晶闸管承受正向电压。在触发电路中与控制极串联的开关 S 断开,灯不亮,说明晶闸管不导通。

(2) 如图 1-3(b)所示,晶闸管的阳极和阴极间加正向电压, S 闭合,但控制极相对于阴极加反向电压,这时灯不亮,说明晶闸管也不导通。

(3) 如图 1-3(c)所示,晶闸管的阳极和阴极间加正向电压, S 闭合,此时控制极相对于阴极加正向电压,这时灯亮,说明晶闸管导通,这一过程称为触发导通。晶闸管导通后去掉控制极上的电压,如图 1-3(d)所示,即开关 S 断开,灯仍然亮,表明晶闸管继续导通。这说明:晶闸管一旦导通,控制极就失去了控制作用。

(4) 如图 1-3(e)所示,电路中灯原本是亮的,如果不断地减小阳极电流,当阳极电流小于某一数值之后,灯即灭,说明晶闸管重新关断,这一维持导通的最小电流称为维持电流 I_H ,此时晶闸管处于正向阻断状态。

(5) 如图 1-3(f)所示,控制极与阴极之间加正向电压,阳极加反向电压,此时灯不亮,晶闸管不导通,处于反向阻断状态。

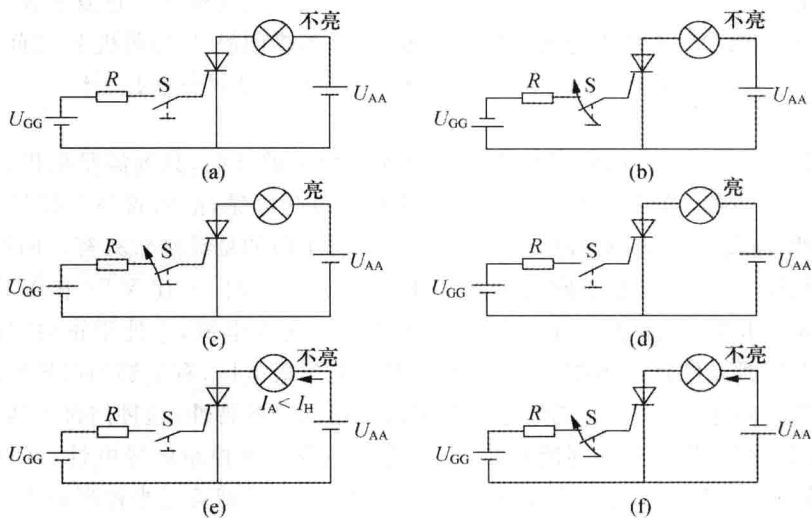


图 1-3 晶闸管工作情况的实验

通过上述实验可知,晶闸管导通必须同时具备两个条件:

- (1) 晶闸管主电路加正向电压。
- (2) 晶闸管控制电路加合适的正向电压。

普通晶闸管由四层半导体(P1、N1、P2、N2)组成,形成三个结 J1(P1N1)、J2(N1P2)、J3(P2N2)。并分别从 P1、P2、N2 引出 A、G、K 3 个电极,它和二极管一样,是一种单方向导电的器件,关键是多了一个控制极 G,这就使它具有与二极管完全不同的工作特性。

由于采用扩散工艺,具有三结四层结构的普通晶闸管可以等效成如图 1-4 所示的由两个晶体管 VT1(P1-N1-P2)和 VT2(N1-P2-N2)组成的等效电路。

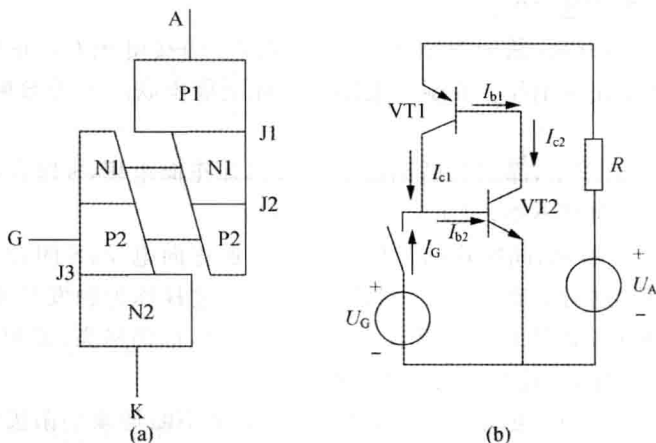


图 1-4 晶闸管的等效电路

当晶闸管阳极和阴极之间施加正向电压时,若给门极 G 也加正向电压 U_G ,门极电流 I_G 经晶体管 $VT2$ 放大后成为集电极电流 I_{c2} , I_{c2} 又是晶体管 $VT1$ 的基极电流,放大后的集电极电流 I_{c1} 进一步使 I_G 增大且又作为 $VT2$ 的基极电流流入。重复上述正反馈过程,两个晶体管 $VT1$ 、 $VT2$ 都快速进入饱和状态,使晶闸管阳极 A 与阴极 K 之间导通。

$$I_G \uparrow \rightarrow I_{b2} \rightarrow I_{c2} (= \beta_2 I_{b2}) \uparrow = I_{b1} \uparrow \rightarrow I_{c1} (= \beta_1 I_{b1}) \uparrow$$

此时若撤除 U_G , $VT1$ 、 $VT2$ 内部电流仍维持原来的方向,只要满足阳极正偏的条件,晶闸管就一直导通。就像二极管一样正向导通。由此可见,晶闸管与二极管一样具有单向导电特性,电流只能从阳极流向阴极。与二极管不同的是晶闸管具有正向阻断特性。

当晶闸管 A 、 K 间承受正向电压,而门极电流 $I_G = 0$ 时,上述 $VT1$ 和 $VT2$ 之间的正反馈不能建立起来,晶闸管 A 、 K 之间只有很小的正向漏电流,它处于正向阻断状态。当加上正向电压时晶闸管还不能导通,必须同时加上门极电压,有足够的门极电流流入后才能使晶闸管正向导通。因此,晶闸管具有正向导通的可控特性,这种门极电压对晶闸管正向导通所起的控制作用称为闸流特性,也称为晶闸管的可控单向导电性。门极电压只能触发晶闸管开通,不能控制它的关断,从这个意义上讲,晶闸管是半控型电力器件。

综上所述,我们可知如下结论。

(1) 在晶闸管阳极和阴极之间外加正向电压,但控制极不加触发电压时,晶闸管一般不导通。

(2) 晶闸管导通需要同时满足两个条件:

- 1) 阳极和阴极外加正向电压;
- 2) 控制极外加一定幅度的正触发电压。

(3) 普通的晶闸管一旦导通,触发信号则失去控制作用,只要阳极、阴极间的正向电压存在,即使控制电压减小到零或反向,晶闸管仍导通。

(4) 要使晶闸管从导通变为阻断,必须减小阳极电流或切断正向电压或加反向电压才可以。

1.1.2 晶闸管的主要参数

1. 晶闸管的重复峰值电压——额定电压 U_{Te}

门极断开($I_G=0$),元件处在额定结温时,正向阳极电压为正向阻断不重复峰值电压 U_{DSM} (此电压不可连续施加)的80%所对应的电压,称为正向重复峰值电压 U_{DRM} (此电压可重复施加,其重复频率为50Hz,每次持续时间不大于10ms)。元件承受反向电压时,阳极电压为反向不重复峰值电压 U_{RSM} 的80%所对应的电压,称为反向重复峰值电压 U_{RRM} 。

由于晶闸管工作时,外加电压峰值瞬时超过反向不重复峰值电压即可造成永久损坏,且环境温度升高或散热不良均可能使晶闸管正、反向转折电压下降,特别是在使用中会出现各种过电压,因此,选用元件的额定电压值时,应比实际正常工作时的最大电压大2~3倍。

2. 晶闸管的额定通态平均电流——额定电流 $I_{T(AV)}$

在环境温度为40℃和规定的冷却条件下,晶闸管工作在电阻性负载且导通角不小于170°的单相工频正弦半波电路中,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,称为额定通态平均电流,用 $I_{T(AV)}$ 表示,称为元件的额定电流。

实际应用中应按照流过晶闸管实际波形电流与工频正弦半波平均电流热效应相等(即有效值相等)的原则来选取晶闸管的额定电流,然后根据管子的额定电流(通态平均值)求出元件允许流过的最大有效电流。不论流过晶闸管的电流波形如何,只要流过元件的实际电流最大有效值小于或等于管子的额定有效值,且散热、冷却在规定的条件下,管芯的发热就能限制在允许范围内。

由于晶闸管的电流过载能力比一般电机、电器要小得多,因此,在选用晶闸管额定电流时,根据实际最大的电流计算后至少还要乘以1.5~2的安全系数,使其有一定的电流裕量。

3. 门极触发电流 I_{GT} 和门极触发电压 U_{GT}

在室温下,晶闸管加6V正向阳极电压时,使元件完全导通所必需的最小门极电流称为门极触发电流 I_{GT} 。对应于门极触发电流的门极电压称为门极触发电压 U_{GT} 。门极触发电流、电压的大小必须有一定的范围限制。元件所需的触发电流、电压太小,容易受干扰而造成误触发;元件所需的触发电流、电压太大又会造成触发困难,但即使同一工厂生产的同一型号的晶闸管,由于门极特性的差异,其触发电流、触发电压也相差很大,所以,对不同系列的元件只规定了触发电流、电压的上、下限值。例如100A的晶闸管,其触发电流、电压分别不应超过250mA/4V,也不应小于1mA/0.15V。

通常每一个晶闸管的铭牌上都标明了其触发电流和电压在常温下的实测值,但触发电流、电压受温度的影响很大。温度升高, I_{GT} 和 U_{GT} 值会显著降低;温度降低, I_{GT} 和 U_{GT} 值又会增大。为了保证晶闸管的可靠触发,在实际应用中,外加门极电压的幅值应比 U_{GT} 大几倍。

4. 通态平均电压 $U_{T(AV)}$

在规定环境温度、标准散热条件下,元件通以正弦半波额定电流时,阳极与阴极间电

压降的平均值称为通态平均电压(又称管压降)。在实际使用中,从减小损耗和元件发热的角度出发,应选择 $U_{T(AV)}$ 小的晶闸管。

1.1.3 晶闸管的型号及简单测试方法

1. 晶闸管的型号

如图 1-5 所示。如 KP5-7E 表示额定电流为 5A、额定电压为 700V 的普通晶闸管。

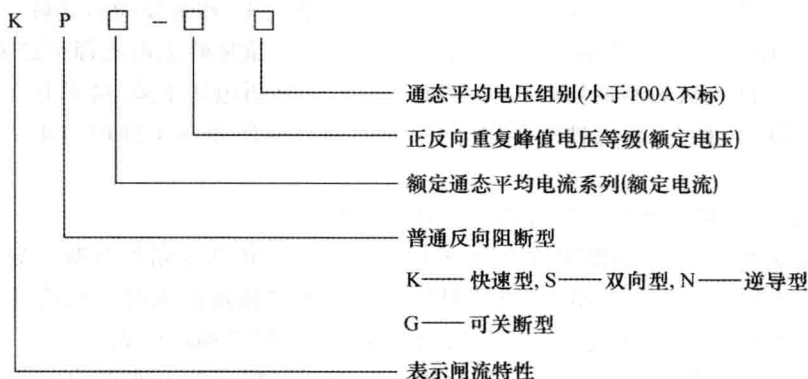


图 1-5 晶闸管的型号

2. 晶闸管的简单测试方法

对于晶闸管的 3 个电极,可以用万用表粗测其好坏。依据 PN 结单向导电原理,用万用表欧姆挡测试元件的 3 个电极之间的阻值,可初步判断管子是否完好。如用万用表 $R \times 1k$ 档测量阳极 A 和阴极 K 之间的正、反向电阻都很大,在几百千欧以上,且正、反向电阻相差很小;用 $R \times 10$ 或 $R \times 100$ 档测量控制极 G 和阴极 K 之间的阻值,其正向电阻应小于或接近于反向电阻,这样的晶闸管是好的。如果阳极与阴极或阳极与控制极间有短路,阴极与控制极间为短路或断路,则晶闸管是坏的。

【例 1.1】 某晶闸管接在 220V 交流回路中,通过器件的电流有效值为 100A,问选择什么型号的晶闸管?

解:晶闸管额定电压

$$U_{Tn} = (2 \sim 3)U_{TM} = (2 \sim 3)\sqrt{2} \times 220V = 622 \sim 933V$$

按晶闸管参数系列取 800V,即 8 级。

晶闸管的额定电流

$$I_{T(AV)} = (1.5 \sim 2) \frac{I_T}{1.57} = (1.5 \sim 2) \times \frac{100}{1.57} A = 96 \sim 127A$$

按晶闸管参数系列取 100A,所以选取晶闸管型号 KP100-8E。

【例 1.2】 现有晶闸管型号为 KP50-7,用于某电路中时,流过的电流波形如图 1-6 所示,试求 I_m 允许多大?

解:KP50-7 晶闸管允许流过的电流有效值为

$$I_T = 1.57 \times I_{T(AV)} = 1.57 \times 50(\text{A}) = 78.5(\text{A})$$

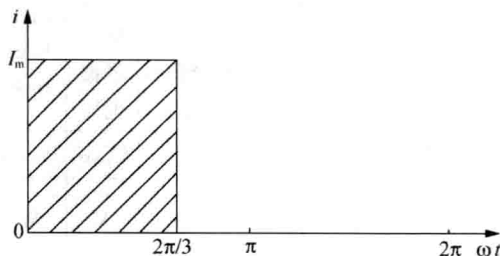


图 1-6 流过晶闸管的电流波形

实际流过该管的电流有效值可由下式计算求得

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{3}}$$

当考虑 2 倍的安全余量时, I_m 的允许值为

$$I_m = \frac{\sqrt{3} \times 78.5}{2} \text{A} \approx 68 \text{A}$$

表 1-1 KP 型晶闸管元件主要额定值

参数 单位 系列	通态 平均 电流	正向重复峰 值电压、反 向重复峰值 电压	正向不重复 平均电流、 反向不重复 平均电流	额定 结温	门极触 发电流	门极 触发 电压	断态电 压临界 上升率	通态电 流临界 上升率	浪涌 电流
	$I_{T(AV)}$	U_{DRM} U_{RRM}	$I_{DS(AV)}$ $I_{RS(A)}$	t_{JM}	I_{GT}	U_{GT}	du/dt	di/dt	I_{TSM}
	A	V	mA	°C	mA	V	V/ μ s	A/ μ s	A
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
KP1	1	100~3000	≤ 1	100	3~30	≤ 2.5	25~1000	25~500	20
KP5	5	100~3000	≤ 1	100	5~70	≤ 3.5			90
KP10	10	100~3000	≤ 1	100	5~100	≤ 3.5			190
KP20	20	100~3000	≤ 1	100	5~100	≤ 3.5			380
KP30	30	100~3000	≤ 2	100	8~150	≤ 3.5			560
KP50	50	100~3000	≤ 2	100	8~150	≤ 3.5			940
KP100	100	100~3000	≤ 4	115	10~250	≤ 4			1880
KP200	200	100~3000	≤ 4	115	10~250	≤ 4			3770
KP300	300	100~3000	≤ 8	115	20~300	≤ 5			5650
KP400	400	100~3000	≤ 8	115	20~300	≤ 5			7540
KP500	500	100~3000	≤ 8	115	20~300	≤ 5			9420
KP600	600	100~3000	≤ 9	115	30~350	≤ 5			11160
KP800	800	100~3000	≤ 9	115	30~350	≤ 5			14920
KP1000	1000	100~3000	≤ 10	115	40~400	≤ 5			18600

表 1-2 KP 型晶闸管元件的其他特性参数

参数 单位 系列	正向重复平均电流、反向重复平均电流	通态平均电压	维持电流	门极不触发电流	门极不触发电压	门极正向峰极电流	门极反向峰值电压	门极平均功率	门极峰值功率	门极控制开通时间	电路换向关断时间
	$I_{DR(AV)}$	$U_{T(AV)}$	I_H	I_{GD}	U_{GD}	I_{GFM}	U_{GRM}	$P_{G(AV)}$	P_{GM}	t_{gt}	t_g
	mA	V	mA	mA	V	A	V	W	W	μs	μs
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
KP1	<1	①	实 测 值	0.4	0.3	—	5			②典型值	②典型值
KP5	<1			0.4	0.3	—	5	0.5	—		
KP10	<1			1	0.25	—	5	0.5	—		
KP20	<1			1	0.25	—	5	1	—		
KP30	<2			1	0.15	—	5	1	—		
KP50	<2			1	0.15	—	5	1	—		
KP100	<4			1	0.15	—	5	1	—		
KP200	<4			1	0.15	—	5	2	—		
KP300	<8			1	0.15	4	5	2	15		
KP400	<8			1	0.15	4	5	4	15		
KP500	<9			1	0.15	4	5	4	15		
KP600	<9			—	—	4	5	4	15		
KP800	<9			—	—	4	5	4	15		
KP1000	<10			—	—	4	5				

① 元件出厂上限值由各厂根据合格的产品度验自定。

② 同类产品中最有代表的数值。

任务 2 单相可控整流电路

任务要求

- 理解单相可控整流电路的电路结构、工作原理、电气性能；
- 掌握单相可控整流电路波形分析方法和参数计算方法。

单相可控整流电路主要分为单相半波可控整流电路、单相全波可控整流电路和单相全控桥式整流电路。但由于单相半波可控整流电路的性能较差，单相全波可控整流电路中晶闸管承受的反向电压较高，因此，这两种电路在实际中很少采用，在中、小功率场合更多采用的是单相全控桥式整流电路。

1.2.1 单相全控桥式整流电路

1. 电阻性负载

单相全控桥式整流带电阻性负载的电路如图 1-7(a) 所示。VT1、VT4、VT3、VT2 组成 a、b 两个桥臂，变压器二次电压 u_2 接在 a、b 两点， $u_2 = U_{2m} \sin \omega t = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t$ ，4 只晶闸管组成整流桥。负载电阻是纯电阻 R_d 。

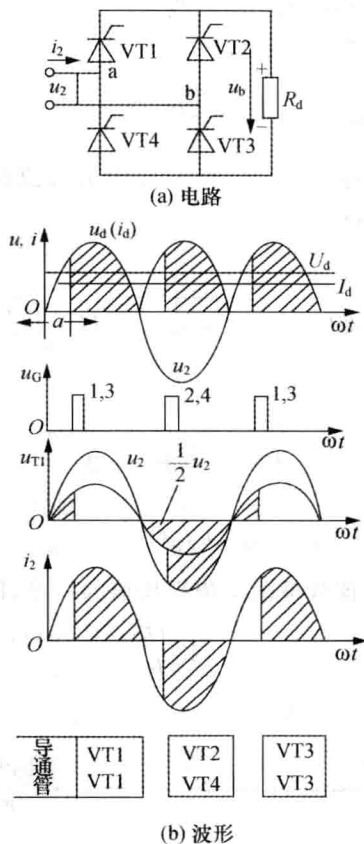


图 1-7 单相全控桥式电阻性负载

当交流电源电压 u_2 进入正半周时，a 端电位高于 b 端电位，两个晶闸管 VT1、VT3 同时承受正向电压，如果此时门极无触发信号 u_G ，则两个晶闸管仍处于正向截止状态，电源电压 u_2 将全部加在 VT1 和 VT3 上， $u_{T1} \approx u_{T3} = \frac{1}{2} u_2$ ，负载上电压 $u_d = 0$ 。

在 $\omega t = \alpha$ 时，给 VT1 和 VT3 同时加触发脉冲，则两晶闸管立即触发导通，电源电压 u_2 将通过 VT1 和 VT3 加在负载电阻 R_d 上。在 u_2 正半周，VT2 和 VT4 均承受反向电压而处于截止状态。由于晶闸管导通时管压降可视为零，则负载 R_d 两端的整流电压 $u_d = u_2$ 。当电源电压 u_2 降到零时，电流 i_d 也降为零，VT1 和 VT3 截止。

电源电压 u_2 进入负半周时，b 端电位高于 a 端电位，两个晶闸管 VT2、VT4 同时承

受正向电压,在 $\omega t = \pi + \alpha$ 时,同时给 VT2、VT4 加触发脉冲使其导通,电流从 b 经 VT2,负载电阻 R_d 、VT4 回到电源 a 端。在负载 R_d 两端获得与 u_2 正半周相同波形的整流电压和电流,这期间 VT1 和 VT3 均承受反向电压而处于截止状态。

当 u_2 由负半周电压过零变正时,VT2、VT4 关断, u_d 、 i_d 又降为零。此后 VT1、VT3 又承受正向电压,并在相应时刻 $\omega t = 2\pi + \alpha$ 又被触发导通,依此循环工作。

由以上电路工作原理可知,在交流电源 u_2 的正、负半周里,VT1、VT3 和 VT2、VT4 两组晶闸管轮流触发导通,将交流电变成脉动的直流电。改变触发脉冲出现的时刻,即改变 α 的大小, u_d 、 i_d 的波形和平均值大小随之改变。

整流输出电压的平均值可按式计算

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 (1 + \cos \alpha) = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (1-1)$$

由式(1-1)可知, U_d 为最小值时, $\alpha = 180^\circ$; U_d 为最大值时, $\alpha = 0^\circ$,所以单相全控桥式整流电路带电阻性负载时, α 的移相范围是 $0 \sim 180^\circ$ 。

整流输出电压的有效值为

$$U = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi (\sqrt{2} U_2 \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = U_2 \sqrt{\frac{\sin 2\alpha}{2\pi} + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (1-2)$$

输出电流的平均值和有效值分别为

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = 0.9 \frac{U_2}{R_d} \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (1-3)$$

$$I = \frac{U}{R_d} = \frac{U_2}{R_d} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (1-4)$$

流过每个晶闸管的平均电流为输出电流平均值的一半,即

$$I_{dT} = \frac{1}{2} I_d = 0.45 \frac{U_2}{R_d} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (1-5)$$

流过每个晶闸管的电流有效值为

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left(\frac{\sqrt{2} U_2}{R_d} \sin \omega t \right)^2 d(\omega t)} = \frac{U_2}{\sqrt{2} R_d} \sqrt{\frac{\sin 2\alpha}{2\pi} + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} = \frac{I}{\sqrt{2}} \quad (1-6)$$

分析可得晶闸管承受的最大电压为 $\pm \sqrt{2} U_2$ 。

电路的功率因数可以按下式计算

$$\cos \varphi = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (1-7)$$

采用同样的方法,读者可对单相半波可控整流电路进行分析。

通过分析可知,对单相全控桥式整流电路与单相半波可控整流电路可作如下比较:

- (1) α 的移相范围相等,均为 $0 \sim 180^\circ$ 。
- (2) 桥式整流电路输出电压平均值 U_d 是半波整流电路的二倍。
- (3) 在相同的负载功率下,桥式整流电路流过晶闸管的平均电流减小一半。
- (4) 桥式整流电路功率因数提高了 $\sqrt{2}$ 倍。

【例 1.3】 如图 1-8 所示的单相全控桥式整流电路, $R_d = 4\Omega$, 要求 I_d 在 $0 \sim 25\text{A}$ 之间变化, 负载电流有效值 $I = 1.11I_d$ 求:

- (1) 整流变压器 T 的变比(不考虑裕量);
- (2) 选择晶闸管的型号(考虑 2 倍裕量);
- (3) 在不考虑损耗的情况下, 选择整流变压器的容量;
- (4) 计算负载电阻的功率;
- (5) 计算电路的最大功率因数。

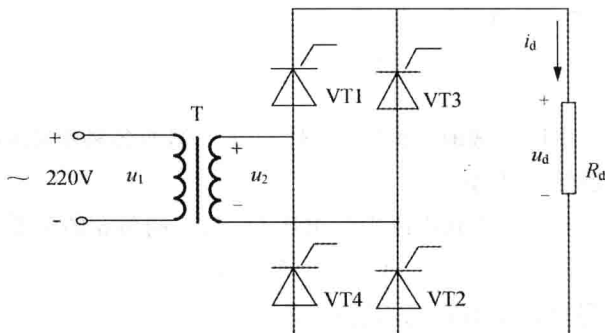


图 1-8 单相全控桥式整流电路

解: (1) 负载上的最大平均电压为

$$U_{d\max} = R_d I_{d\max} = 25 \times 4 = 100\text{V}$$

又因为

$$U_d = 0.9U_2 \frac{1 + \cos\alpha}{2}$$

当 $\alpha = 0$ 时, U_d 最大, 即 $U_{d\max} = 0.9U_2$, 则

$$U_2 = \frac{U_{d\max}}{0.9} = \frac{100}{0.9} = 111\text{V}$$

所以变压器的变化为

$$k \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{220}{111} \approx 2$$

(2) 因为 $\alpha = 0$ 时 i_d 的波形系数为

$$K_f = \frac{\sqrt{\pi \sin 2\alpha + 2\pi(\pi - \alpha)}}{2(1 + \cos\alpha)} = \frac{\sqrt{2\pi^2}}{4} \approx 1.11$$

所以负载电流有效值为

$$I = K_f I_d = 1.11 \times 25 = 27.75\text{A}$$

(3) 因 $I_T = \frac{1}{\sqrt{2}}$

$$I_{\text{TN(AV)}} \geq \frac{I_T}{1.57} = \frac{27.75}{\sqrt{2} \times 1.57} \approx 12.5\text{A}$$

考虑 2 位裕量, 取 30A。