

86

TM11
G38

电 力 电 子 技 术

主编 葛延津 刘 玮
主审 顾树生 徐荣杰

东北大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术/葛延津 刘 玮主编.
沈阳:东北大学出版社, 1996. 10

ISBN 7-81054-107-2

I. 电…

II. ①葛…②刘…

III. 电力-电子-技术

IV. TN2

©东北大学出版社出版

(沈阳·南湖 110006)

铁岭新华印刷厂印刷

1996年10月第1版

开本: 787×1092 1/16

字数: 243千字

东北大学出版社发行

1996年10月第1次印刷

印张: 9.75

印数: 2000册

定价: 14.80元

前 言

《电力电子技术》是工科电类专业的一门体现电力技术、半导体技术交叉的基础技术课程。它的任务是阐明交、直流电力变换机理方法,以及相关装置与应用技术基础。

自从1956年第一个晶闸管问世以来,以晶闸管等电力半导体器件为基础的传统电力电子技术日臻成熟,并且在电力拖动控制领域获得了广泛的应用,大大提高了交、直流调速的技术水平。随着科学技术的发展,一种全控型自关断半导体器件已经问世,并且其应用正在迅猛发展。如果说晶闸管的出现奠定了传统电力电子技术的基础,那么全控型自关断半导体器件的产生则标志着电力电子技术的一次革新和飞跃。本书的编写正是为了适应电力电子技术的这种新发展的需要。

本书编写的指导思想是在保证电力电子技术知识体系系统、完整的基础上,适当压缩晶闸管部分的内容,增加全控自关断器件内容,以体现现代科学技术最新成果。

全书共分九章。第一、二、三章主要介绍晶闸管整流电路的结构、型式、原理和特性。第四、五章主要介绍晶闸管逆变电路与可逆电路的结构、型式、原理和特性,以及相关逆变电路电动机的机械特性。第六章主要介绍晶闸管触发电路的原理和控制特性。第七章主要介绍晶闸管变频器的原理、型式和应用。第八章主要介绍全控型自关断半导体器件。第九章主要介绍脉宽调制技术。

本书是在东北大学自编教材——《可控硅直流电动机控制系统》、《电力电子电路》、《脉宽调制交流调速》基础上,吸收了沈阳建筑工程学院,东北大学等院校教学经验和研究成果编写而成的。适用于电类各专业师生和相关工程技术人员。

本书编写时,力求增强可读性和广泛适应性,因而可在有限的计划学时内,灵活安排讲授,指导阅读和自学。

本书由葛延津、刘玮主编。由顾树生、徐荣杰教授主审。参加本书编写的有沈阳建筑工程学院刘玮(第三章)、东北大学杨越(第一章)、王梅梅(第二章)、葛延津(第四、五、六、八章)、贺斌英(第七章)、潘清波(第九章),插图由王梅梅、杨越绘制。

本书编写过程中得到了沈阳建筑工程学院自动控制系、东北大学自动化教研室、东宇集团总裁庄宇洋先生,还有杨为明、徐茂阳、杨维明、尹凤杰、刘淑娟等同志的支持和帮助,编者不胜感谢。

限于编者水平,书中难免存在不妥之处,衷心欢迎使用本书的师生和其他读者批评指正。

编者

1996年8月于沈阳

目 录

第一章 晶闸管	(1)
第一节 晶闸管及其工作原理.....	(1)
第二节 晶闸管的特性与主要参数.....	(3)
思考与练习题.....	(6)
第二章 单相可控整流电路	(7)
第一节 单相半控桥式整流电路.....	(7)
第二节 单相全控桥整流电路	(11)
思考与练习题	(12)
第三章 多相可控整流电路	(13)
第一节 三相零式(半波)可控整流电路	(13)
第二节 三相全控桥式整流电路	(24)
第三节 变压器漏抗对整流电压的影响	(30)
第四节 谐波与功率因数	(32)
第五节 晶闸管的保护	(35)
第六节 多相大功率可控整流电路	(38)
思考与练习题	(43)
第四章 晶闸管电路的逆变工作状态	(45)
第一节 逆变的基本概念	(45)
第二节 晶闸管电路的逆变状态分析	(48)
第三节 逆变状态下电动机的机械特性	(56)
思考与练习题	(58)
第五章 晶闸管一直流电动机的可逆电路	(60)
第一节 改变电动机电枢电压极性的可逆电路	(60)
第二节 有环流三相零式反并联可逆电路	(62)
第三节 三相零式反并联可逆电路的环流分析及抑制措施	(66)
第四节 三相桥式反并联可逆电路	(71)
第五节 可逆电路的电动机机械特性	(74)
思考与练习题	(76)

第六章 晶闸管的触发电路	(78)
第一节 锯齿波移相的晶体管触发电路	(78)
第二节 触发电路的控制特性	(81)
第三节 晶闸管变流装置的传递函数	(82)
第四节 同步电压与晶闸管主回路的同步问题	(84)
思考与练习题	(85)
第七章 晶闸管变频器和逆变器	(86)
第一节 变频器和逆变器的基本概念及工作原理	(86)
第二节 典型的晶闸管三相逆变器	(92)
第三节 交—交 变频器	(100)
思考与练习题	(106)
第八章 自关断半导体器件	(107)
第一节 大功率晶体管(GTR)	(107)
第二节 可关断晶闸管(GTO)	(118)
第三节 绝缘栅双极晶体管(IGBT)	(127)
第四节 其他功率器件	(132)
思考与练习题	(133)
第九章 脉宽调制技术	(134)
第一节 PWM 逆变器的基本工作原理	(134)
第二节 脉宽调制技术	(138)
思考与练习题	(146)

第一章 晶闸管

晶闸管(Thyristor)的全称为硅晶体闸流管,它是具有开关特性的半导体器件的总称。它的族系包括:双向晶闸管、逆导晶闸管、快速晶闸管、光控晶闸管、可关断晶闸管等。普通可控硅[Silicon Controlled Rectifier(SCR)]也是其成员之一。它出现得早,应用广,习惯上不特殊声明时,晶闸管指的就是可控硅,即普通晶闸管。它是目前工业中实现大容量功率变换和控制的主要电力电子器件之一。本章中只介绍普通晶闸管,其家族中的其它成员有的在后面的章节中介绍(如可关断晶闸管),其它的在书中不予以介绍,只要掌握了普通晶闸管原理,其它晶闸管是很容易理解、掌握和应用的。

第一节 晶闸管结构及其工作原理

晶闸管是一种电力(功率)半导体器件,它的外形有螺栓型、平板型及模块型几种。晶闸管在使用中必须装配适宜的散热器,以适应自然冷却、强迫风冷和带水套的水冷。

晶闸管的管芯是一个圆形薄片,它是由硅半导体材料做成的一个有三个PN结的三端四层结构的器件。其中两个功率引出端分别为阳极A(Anode)与阴极K(cathode),其控制引出端称为门极(Gate),或称控制极。其结构与电气符号如图1-1所示。

大家熟悉的二极管,它具有单向导电性,即当阳极电位高于阴极电位时,二极管导通,二极管一旦导通,其管芯中流过电流,如果忽略管压降,就相当于一个开关接通一样;如果阳极电位低于阴极电位,二极管一定阻断,这就相当于一个开关打开一样。晶闸管比二极管多了一个控制极,它的导通与关断受到控制极的控制。

我们可以通过图1-2的几个实验,从感性上先予以认识。

在图1-2(a)、(b)、(c)中,晶闸管的阳极电位都高于阴极电位,在控制极开路(a)和控制极相对阴极加负电压(b),灯不亮,晶闸管都不导通,只有控制极加正电压时(c),灯亮,晶闸管才导通。在(d)与(e)中晶闸管一旦导通,即使把控制极断开(d)或加负电压(e),晶体管仍然导通。导通的晶闸管如何能关断,灯不亮呢?在(f)中,把晶闸管的阴极回路断开,或把阳极电压降低到一定数值,使阳极电流小于一定数值后,灯灭,晶闸管关断。

以上实验结果,可以得出下面结论:

1. 晶闸管导通的必要条件为:①阳极电位高于阴极电位;②在控制极施加对阴极为正的

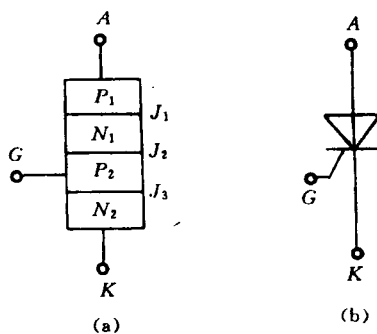


图 1-1 晶闸管的结构与电气符号

适当电压。这两个条件必须同时具备,缺一不可。当晶闸管导通后,管压降约为 $1V$ 左右,如果忽略管压降,电源电压通过导通的晶闸管都降在灯泡上。

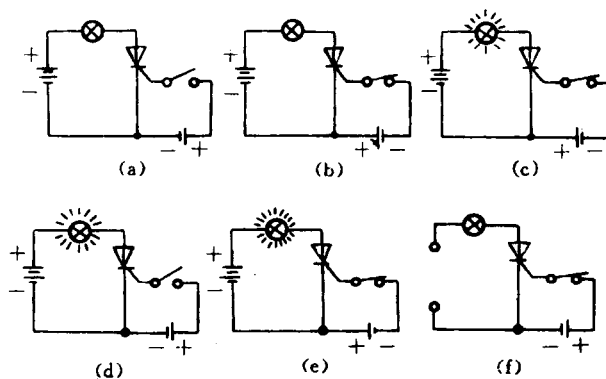


图 1-2 晶闸管导通与关断实验电路

2. 晶闸管一旦导通,控制极即失去控制作用,不管控制极施加的是正电压还是负电压;或控制极开路,晶闸管都将继续导通,也就是说控制电压只负责使晶闸管导通,而不能使晶闸管关断,这个相对阴极的控制极正电压,叫触发电压或触发脉冲。

3. 要使导通的晶闸管关断,只有在阳极主回路采取措施,要么断开阳极,要么使晶闸管的阴极电位高于阳极电位(晶闸管承受反向),要么减小阳极回路电流使其小于某值,这个维持晶闸管导通的最小电流叫维持电流。

4. 当晶闸管承受正向电压时而没有导通(控制极开路或负电压),称晶闸管具有正向阻断能力,这是普通二极管所不具有的。

晶闸管的这种外在表现是由其内部结构所决定的。

如果把图 1-1 的四层结构的中间两层切开,晶体管就被等效为二个晶体三极管的联结形式,如图 1-3 所示。

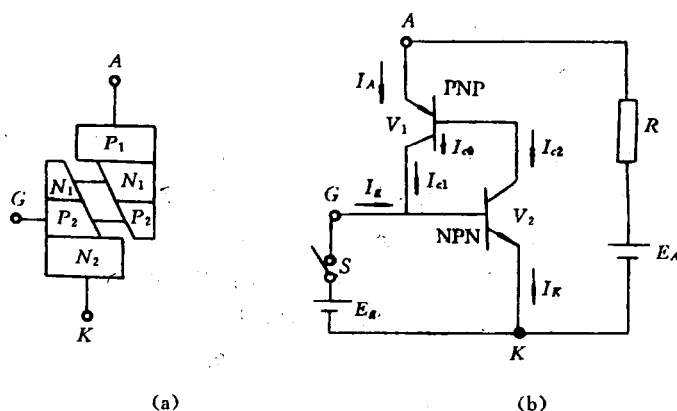


图 1-3 晶闸管的等效三极管模型

在图 1-3(b)中:

$$I_K = I_A + I_G \quad (1-1)$$

$$I_A = I_{C1} + I_{C2} + I_{CO} = \alpha_1 I_A + \alpha_2 I_K + I_{CO} \quad (1-2)$$

式中: α_1 、 α_2 分别为 V_1 、 V_2 三极管的共基极电流放大倍数。 $I_{CO} = I_{CBO1} + I_{CBO2}$ 为 V_1 、 V_2 的基极漏电流之和。 I_A 又可写为:

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_K + I_{CO}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1-3)$$

当门极电流 $I_K = 0$ 时, $I_A = \frac{I_{CO}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$, 由于 I_{CO} 很小, $\alpha_1 + \alpha_2 \ll 1$, $I_A \approx I_{CO}$, 晶闸管处于关断状态, 当注入门极电流 I_K 时, I_K 增加, I_{C2} 增加, I_{C2} 作为 V_1 基极电流, 又引起 I_A 和 I_{C1} 的增加, I_{C1} 的增加又引起 I_K 的增加, 从而形成一个强烈的正反馈。 α_1 、 α_2 是承受 I_A 、 I_K 的变化而变化的, 见图 1-4。当电流增加时, α_1 、 α_2 也增加, 当 $\alpha_1 + \alpha_2 \approx 1$ 时, 二个晶体管饱和导通, 也即晶闸管由阻断变导通。它们导通后, 由于正反馈的存在, 使晶体管处于深饱和状态, 此时 $\alpha_1 + \alpha_2 \approx 1.15$ 。如果撤去门极电流, 由于正反馈已经形成, 晶体管仍处于深饱和导通状态。可见门极信号只能控制晶闸管的导通, 晶闸管一旦导通, 它就失去了控制作用。

当在晶闸管施加反向电压时, V_1 、 V_2 处于反向偏置状态, α_1 、 α_2 很小, 即使注入门极电流 I_K , 也不足以使其导通, 这样就可以解释上面的实验结果了。

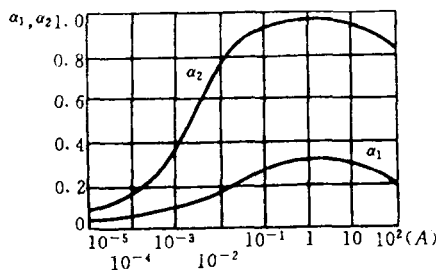


图 1-4 α_1 、 α_2 与发射极电流变化关系

第二节 晶闸管的特性与主要参数

一、晶闸管的伏安特性

晶闸管的伏安特性是指晶闸管的阳极与阴极之间的电压与其阳极电流之间的关系曲线。

实际的晶闸管伏安特性由位于第 I 象限的正向特性和位于第 III 象限的反向特性组成。如图 1-5 所示。

1. 正向特性

正向特性有断态和通态之分, 当 $I_K = 0$ 时, 晶闸管处于关断状态。只有很小的正向漏电流 (Leakage Current)。但当正向阳极电压逐渐大时, 漏电流也增大。图 1-4 中的 α_1 、 α_2 也增大, 当阳极电压增大到正向转折电压 U_{FBO} 时, $\alpha_1 + \alpha_2 \approx 1$, 晶闸管的电流激增, 由 $I_A = \frac{I_{CO}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$ 可知, 当 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 时, 晶闸管便由断态变为通态。

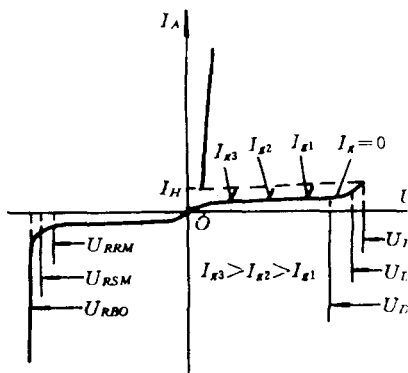


图 1-5 晶闸管伏安特性及有关电压参数

导通后的晶闸管特性与二极管正向特性相似,即阳极电流较大而管压降却很小。但通常不能靠这种方法使晶闸管触发导通,而是通过在门极(控制极)加入适当的门极电流 I_g ,使晶闸管由阻断变为导通。门极电流愈大,阳极电压转折点愈低,见图 1-5。

2. 反向特性

通常晶闸管的阳极承受反向电压时,晶闸管总是处于阻断状态,只有很小的反向漏电流。当反向电压继续增加时,反向漏电流增加较快。当反向阳极电压增大到反向击穿电压 U_{RBO} 时,就会导致晶闸管反向击穿,阳极电流迅速增大,造成晶闸管损坏。

二、晶闸管门极伏安特性

门极伏安特性是指门极与阴极电压与控制极电流之间的特性。但由于实际产品的门极伏安特性分散性大,因此用一条典型的极限高阻和一条极限低阻两条极限门极伏安特性之间的区域来代表,称为门极伏安特性区。晶闸管的门极伏安特性区见图 1-6。施加到门极信号的电压、电流及门极功率,不能超过允许的最大值,否则将损坏门极。这些值太小又触发不开晶闸管,因此触发信号的电压、电流及功率都要落在阴影范围内。另外,结温对晶闸管的触发电压与触发电流也有关系,温度高易于触发,温度低要求的触发电流大。

三、晶闸管的主要参数

1. 阳极电压、电流参数

1) 额定电压

(1) 断态峰值电压 U_{DRM}

晶闸管正向工作时有两种状态:阻断状态——断态;导通状态——通态。正向电压有:转折电压 U_{FBO} 、断态不重复峰值电压 U_{DSM} 、断态重复峰值电压 U_{DRM} ,见图 1-5,规定 $U_{DRM} = 90\%U_{DSM}$

晶闸管在使用中一定不应超过转折电压 U_{FBO} ,瞬时最大电压不能超过断态不重复峰值电压 U_{DSM} ,而应使用在小于断态重复峰值电压 U_{DRM} 范围内。

(2) 反向重复峰值电压 U_{RRM}

反向电压有:反向击穿电压 U_{RBO} ,反向不重复峰值电压 U_{RSM} ,反向重复峰值电压 U_{RRM} ,规定 $U_{RRM} = 90\%U_{RSM}$,见图 1-5。

晶闸管的额定电压是取正向(断态)重复峰值电压 U_{DRM} 和反向重复峰值电压 U_{RRM} 中最小的那个电压值。实际选择晶闸管额定电压时,应取线路中正常工作电压峰值的 2~3 倍。

2) 电流额定

(1) 通态平均电流又称额定电流,记为 I_F ,它有具体的规定条件。即:在环境温度为 40°C 和规定的冷却条件下,元件在电阻性负载的单相工频正弦半波电路中,管子全导通(导通角不小于 170°),稳定结温不超过额定结温时所允许的最大通态平均电流。按图 1-7,

$$I_F = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{\pi}$$

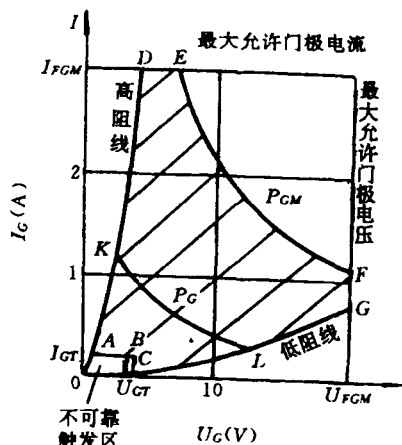


图 1-6 晶闸管的门极伏安特性

决定晶闸管电流大小的是结温,从发热角度来看,电流的热效应取决于电流波形的有效值。正弦半波电流的有效值为:

$$I = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (I_m \sin \omega t)^2 \cdot d(\omega t)} = \frac{I_m}{2}$$

因此,通态电流是正弦半波时,电流有效值和平均值的比值,即为:

$$\frac{I}{I_F} = \frac{\pi}{2} = 1.57$$

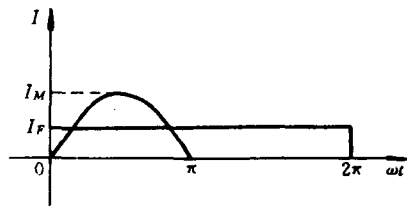


图 1-7 晶闸管的通态平均电流 I_F

实际通过晶闸管的电流有效值 I 只能小于晶闸管允许的电流有效值 $1.57I_F$ 。例如对于一只额定电流 $I_F=100\text{A}$ 的晶闸管,其允许通过的电流有效值必须小于 157A 。

我们把有效值与平均值之比称为波形系数,即 $k_F=I/I_F$ 。图 1-7 的波形系数为 1.57。

(2)维持电流 I_H 。晶闸管维持导通所必须的最小主电流,只要经过晶闸管的电流大于 I_H ,晶闸管就不会关断。

(3)擎住电流 I_L 。晶闸管刚从断态进入通态,当撤掉触发信号后,能维持继续导通所需的最小主电流,一般来说, I_L 是 I_H 的 2~4 倍。

2. 门极参数

1)门极触发电流 I_g 。使晶闸管由断态转入通态所必须的最小控制极电流。

2)门极触发电压 U_g 。产生门极触发电流所必须的最小门极电压。

3)门极不触发电压与不触发电流。门极触发电压太小(0.15V),晶闸管易误导通,故规定其不触发电压(0.15~0.3V)。同样也规定了不触发电流。

3. 动态参数

1)断态电压临界上升率 $\frac{du}{dt}$ 。门极开路 and 额定结温情况下,不使晶闸管从断态转换到通态的最大正向电压上升率。过大的 du/dt 会引起晶闸管误导通。

2)通态电流临界上升率。在规定条件下,晶闸管能承受的最大通态电流上升率。

当门极注入触发电流后,晶闸管起初只在靠近控制极的小区域内导通,导通区随时间渐渐扩大,直到全面导通。如果电流上升太快,一导通,很大电流就集中于控制极附近,会造成局部过热而损坏晶闸管。

3)开通时间 t_{on} 。晶闸管承受正向电压,在门极加上足够大的触发信号后不是立即导通,阳极电流需一定时间后才能达到要求的电流值,这个时间称为开通时间。

4)关断时间 t_{off} 。正在导通的晶闸管,当施加反向电压后,其阳极电流很快下降至维持电流 I_H 以下,直到为零,若电流为零后立即再施加正向电压,晶闸管仍可导通。可见晶闸管电流降为零后,还须一段恢复正向阻断能力的时间。这段时间即为关断时间 t_{off} ,实际上这段时间就是结区载流子复合的时间。

表 1-1 列出了部分晶闸管的型号与参数。

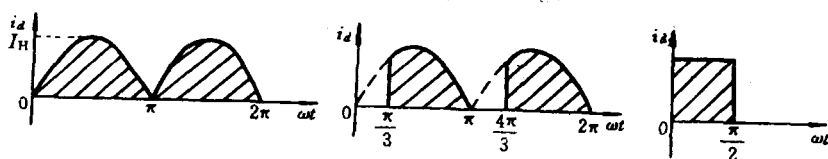
表 1-1

部分晶闸管的型号与参数

型 号	通态平均电流	断态重复峰值电压	反向重复峰值电压	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	门极不触发电流	门极不触发电压	门极正向峰值电流
	I_F (A)	U_{DRM} U_{RRM} (V)		T_{JM} (°C)	I_{GT} (mA)	V_{GT} (V)	du/dt ($\frac{V}{\mu s}$)	di/dt ($\frac{A}{\mu s}$)	I_{TSM} (A)	I_{GD} (mA)	V_{GD} (V)	I_{GFM} (A)
KP1	1	100~3000		100	3~30	<2.5	30	待定	20	0.4	0.3	/
KP5	5			100	5~70	<3.5	30		90	0.4	0.3	/
KP10	10			100	5~100	<3.5	30		190	1	0.25	/
KP20	20			100	5~100	<3.5	30		380	1	0.15	/
KP30	30			100	8~150	<3.5	30	50	560	1	0.15	/
KP50	50			100	8~150	<3.5	30		940	1	0.15	/
KP100	100			115	10~250	<4	100		1880	1	0.15	/
KP200	200			115	10~250	<4	100		3770	1	0.15	/
KP300	300			115	20~300	<5	100		5550	1	0.15	4
KP400	400			115	20~300	<5	100		7540	1	0.15	4
KP500	500			115	20~300	<5	100		9420	1	0.15	4
KP600	600			115	30~350	<5	100		11160	待定	待定	4
KP800	800			115	30~350	<5	100		14920	待定	待定	4
KP1000	1000			115	40~400	<5	100	100	18600	待定	待定	4

思考与练习题

- 1-1. 晶闸管由关断状态变为导通状态的条件,由导通状态变为关断的条件是什么?
- 1-2. 晶闸管的转折电压、额定电压、额定电流、维持电流、擎住电流是如何定义的?
- 1-3. 额定电流为 100A 的晶闸管,当导通角为 90° 、 180° 时,允许的晶闸管峰值电流为多少?若考虑到晶闸管的安全余量呢?
- 1-4. 额定电流为 100A 的晶闸管流过单相全波电流时,允许其最大平均电流是多少?
- 1-5. 下图中波形的阴影部分为晶闸管中的电流波形,其最大值为 I_m ,计算各波形电流平均值,有效值与波形系数。



习题图 1-5

第二章 单相可控整流电路

整流电路实际上就是将交流电能转变为直流(脉动)电能的电路。我们已经学习过二极管整流电路,它的输出电压是不可变的。利用晶闸管的单相导电性与可控性,就可把交流电转变为可变的直流电。

从本章开始,将要逐渐介绍波形分析的方法,掌握了波形分析方法,对各种参数的计算、维修等问题就可迎刃而解。本章将学习整流电路的工作原理、整流变压器、晶闸管元件参数选择以及带有不同性质的负载时电路的输出电压、电流的波形等问题。

第一节 单相半控桥式整流电路

一、电阻性负载

单相半控桥整流电路的电路图如图 2-1。如果将 VT_1 、 VT_2 换成两个二极管,就是我们熟悉的不可控单相桥式整流电路。它的输出电压波形如图 2-2 所示。从图中可见,整流电路将交流电转变为不可变的脉动直流电,输出电压有两个波头,其输出电压的平均值为 $U_d = 0.9 U_2$ 。

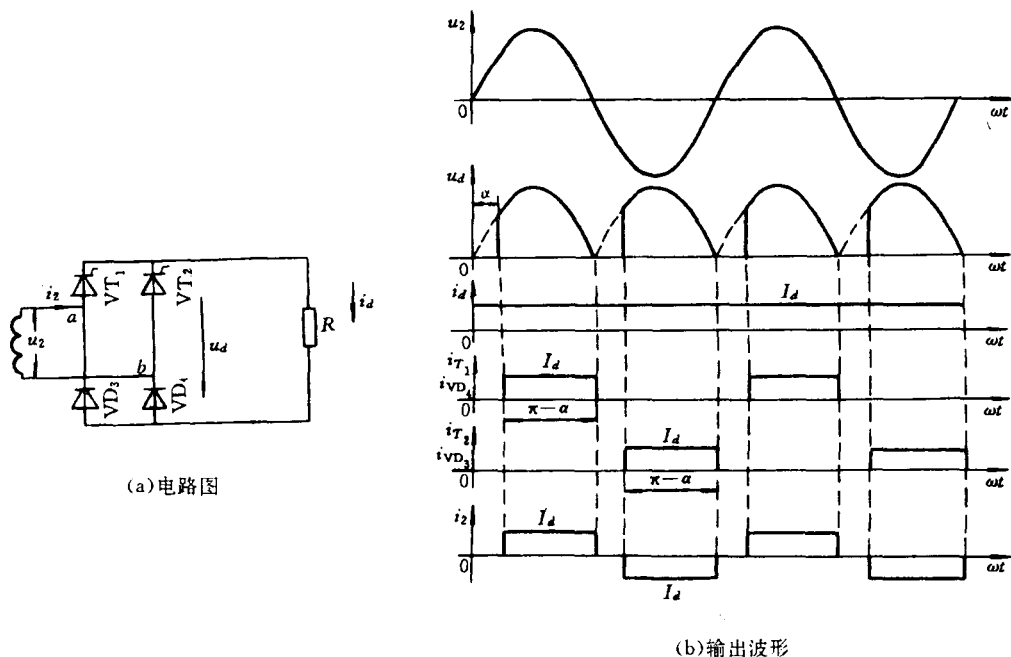


图 2-1 单相半控桥整流电路电阻负载电路图及输出波形

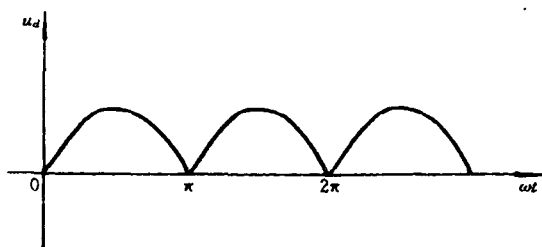


图 2-2 二极管整流电路波形

再看图 2-1(a)。并将 VT_1 、 VT_2 的脉冲加在交流电压由负过零变正过零点上,那么其输出电压的波形和数值都与不可控电路相同。如果把 VT_1 、 VT_2 的脉冲同时等距离的向右移动,其输出整流电压的波形就不是半波,其数值也要小,所以把单相半控桥式整流电路中晶闸管的触发脉冲的初始位置放在交流电压过零点,记为 $\alpha=0$, α 叫控制角或滞后角, $\alpha=60^\circ$,就是从 $\alpha=0$ 点向右移动 60° 。

当电源电压 u_2 过零进入正半周,如图 2-1(b)当 $\omega t=\alpha$ 时给 VT_1 施加触发脉冲, VT_1 和 VD_4 承受正向电压,晶闸管 VT_1 因承受正向电压并且有脉冲而导通,这时整流电流从 a 点经晶闸管 VT_1 , 负载 R , 二极管 VD_4 到 b 点和变压器副侧绕组构成通路,忽略管压降,整流电压值 $U_d=U_2$, 整流电流 $i_d=U_d/R$ 。另一个晶闸管 VT_2 承受反压,处于截止状态,当电源电压过零变负, VT_1 与 VD_4 承受反向电压而关断,这时整流电压 $u_d=0$ 。

当电源电压进入负半周时,晶闸管 VT_2 与二极管 VD_3 承受正向电压,在 $\omega t=\pi+\alpha$ 时刻给 VT_2 一个脉冲,则晶闸管 VT_2 承受正向电压并且有脉冲而导通,整流电流从 a 点,经 VD_3 , R , VT_2 到 b 点和变压器副侧绕组构成通路, $U_d=U_2$ 。当电源电压由负半周进入正半周时, VT_2 与 VD_4 承受反压而关断,这时 $U_d=0$ 。

图 2-1(b)是输出电压、电流的波形。由波形分析可见,在电源的一个周期内, VT_1 、 VT_2 各导通一次, U_d 有两个波头。

通过上面分析,可以得出电路中各个量的数值关系式:

1. 整流电压平均值:

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

当 $\alpha=0^\circ$ 时, U_d 最大, $U_{d\max}=0.9U_2$; 当 $\alpha=180^\circ$ 时, U_d 最小, $U_{d\min}=0$, 故脉冲移相范围为 $180^\circ-0^\circ$ 。

2. 整流电流平均值:

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

3. 流过每个晶闸管的电流平均值:

$$I_T = \frac{I_d}{2} = 0.45 \frac{U_2}{R} \frac{1 + \cos \alpha}{2} \quad (2-3)$$

4. 流过变压器副侧电流有效值:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left(\frac{\sqrt{2} U_2}{R} \sin \omega t \right)^2 d(\omega t)}$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin^2 \alpha \, d(\omega t)} = \frac{I_2}{\sqrt{2}} \quad (2-4)$$

流过负载的电流有效值与 I_2 相等。

5. 流过晶闸管的电流有效值:

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{\sqrt{2} U_2}{R} \sin \omega t \right)^2 d(\omega t)} = \frac{I_2}{\sqrt{2}} \quad (2-5)$$

6. 晶闸管所承受的最大正、反向电压为 $\frac{\sqrt{2}}{2} U_2$ 。

二、阻感性负载

磁场绕组可认为是阻感性负载,一般 $WL \gg R$, 当电流变化时,电感对电流的阻碍作用要比电阻大得多,此时把电流看成是连续且是直流电流。

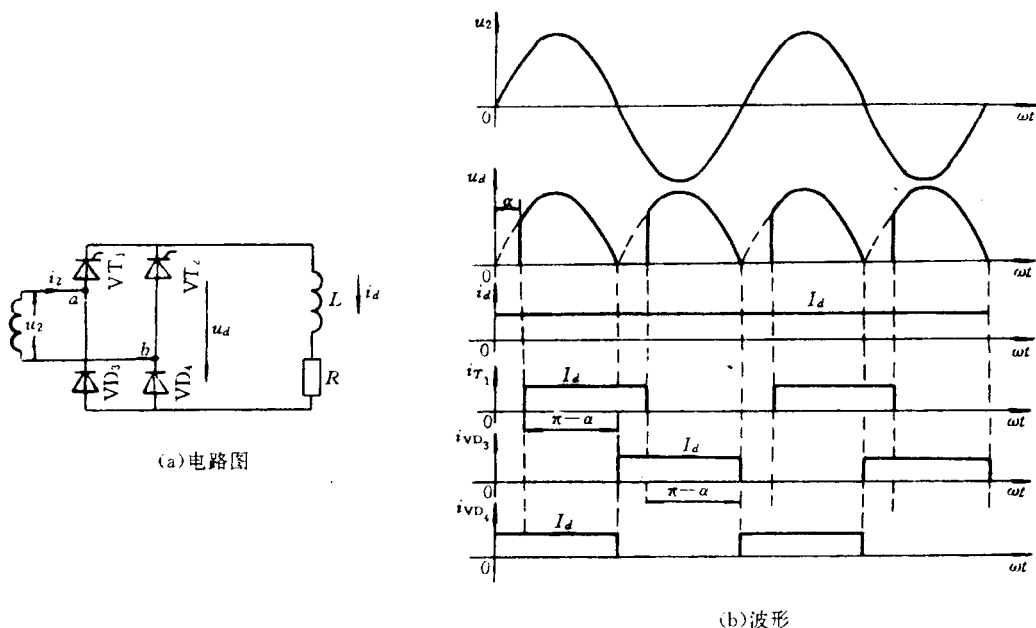


图 2-3 单相半控桥式电感负载整流电路图及波形

单相半控桥式阻感性负载电路图见图 2-3。在电源电压正半周时, VT_1 与 VD_4 承受正向电压, 在 $\omega t = \alpha$ 位置触发 VT_1 , 则 VT_1 和 VD_4 导通, 忽略管压降, $U_d = U_2$, 这时电路的电压平衡方程式为: $U_d = L \frac{di_d}{dt} + i_d R$, 整流电流 I_d 有上升趋势, 此时整流电流从电感正极注入, 电感在吸收能量, 我们知道, 电感足够大时电感起到平波作用, 保持 I_d 不变。当电源电压过零变负, 在 $\omega t = \pi$ 到 $\omega t = \pi + \alpha$ 期间, I_d 有下降趋势, 但这时电感释放能量, $L \frac{di_d}{dt}$ 改变极性, 维持电路中的整流电流存在并保持不变, VT_1 将承受正向电压继续导通, 但此时 a 点电位低于 b 点电位, VD_4 截止, 电感上的电压 $L \frac{di_d}{dt}$ 施加在 VT_1 与 VD_3 上, 使 VD_3 导通, 这时电流经过 VT_1 、 L 、 R 、 VD_3 形成回路, 而不过变压器。

在 $\omega t = \pi + \alpha$ 到 $\omega t = 2\pi$ 期间,晶闸管 VT_2 承受正向电压,在 α 位置将其触发, VT_2 导通,迫使 VT_1 承受反向电压而关断,此时电流经 VT_2 、 L 、 R 、 VD_3 返回变压器。 $U_d = L \frac{di_d}{dt} + i_d R$, 电感在充电。当 U_2 过零变正,由于电感的作用, VT_2 继续导通,但 VD_3 承受反压关断,而 VD_4 导通。电感放电通过 VT_2 、 VD_4 、 L 、 R 形成回路,直到下一晶闸管得到脉冲触发导通为止,并重复上述过程。

上述这种电路似乎能正常工作,但是如果突然把控制角增大到 180° 或某个触发脉冲突然丢失,就会出现原来导通的晶闸管一直导通而两个二极管轮流与其形成通路的情况,输出电压在一个周期只有一个半波,这种现象称为失控。

为避免失控,在电源电压过零变负时把储存在电感中的能量不通过 VT_1 、 VD_3 放掉,而寻找另一条通路,办法就是在负载两端并一个续流二极管,电路如图 2-4a。在电源电压的正半周, VT_1 、 VD_4 导通,当电源电压过零变负时,续流管导通,电感通过 L 、 R 、 VD_R 回路放电, VT_1 可靠关断。同样,电源电压负半周, VT_2 、 VD_3 导通,过零变正后,电感经续流二极管回路放电, VT_2 可靠关断。从上述分析可看到,并入续流二极管后,电感放电不经过晶闸管回路,从而避免了失控,并入续流二极管后,各量波形如图 2-4(b)。

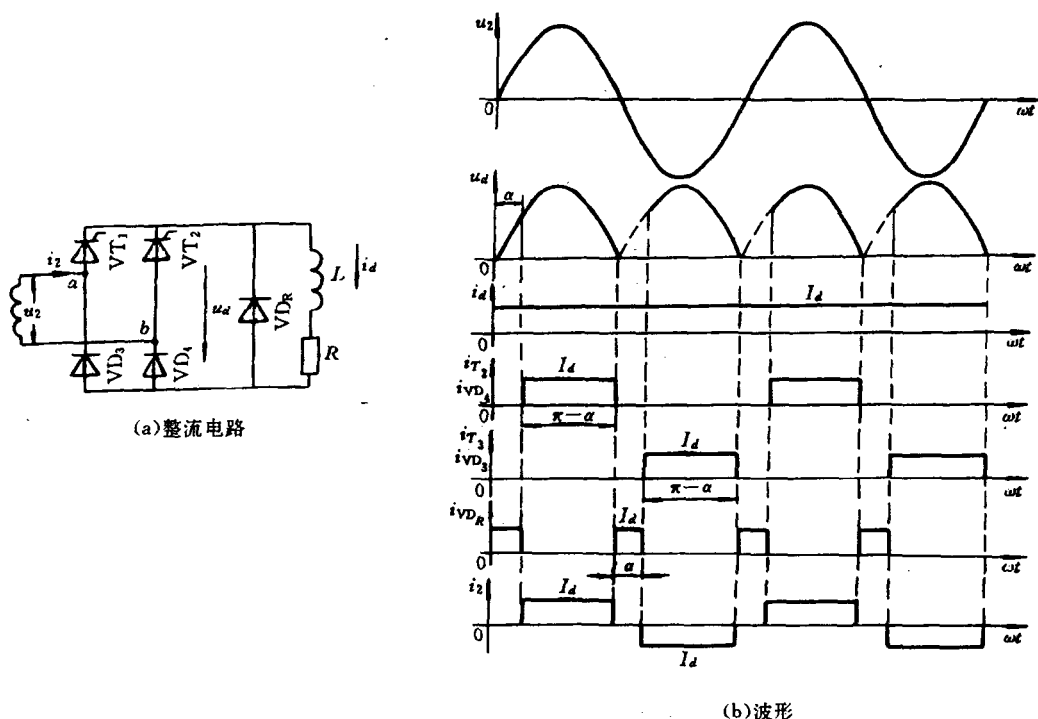


图 2-4 带有续流二极管的单相半波整流电路及波形

带续流二极管电路的整流电压平均值与电阻负载时相同。

流过晶闸管与二极管的电流平均值:

$$I_s = \frac{\pi - \alpha}{2\pi} I_d$$

流过晶闸管与二极管的电流有效值:

$$I_d = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi}} I_a$$

流过续流二极管的电流平均值与有效值分别为：

$$I_{dFR} = \frac{2\alpha}{2\pi} I_a = \frac{\alpha}{\pi} I_a$$

$$I_{dFR} = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} I_a$$

第二节 单相全控桥整流电路

单相全控桥整流电路阻感负载电路图如图 2-5 所示。将半控桥中的 VD_3 、 VD_4 换成晶闸管，这样电路中四个整流元件都是可控的。

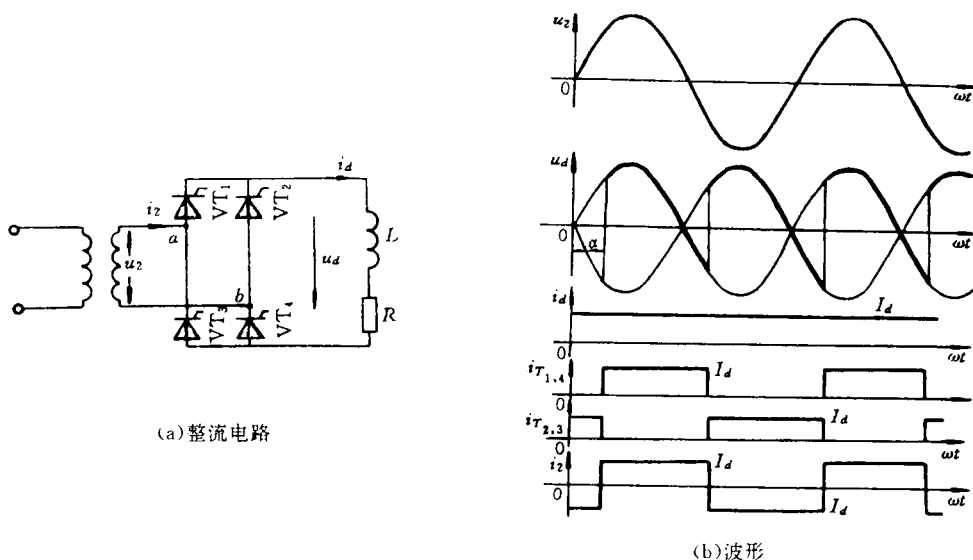


图 2-5 单相全控桥阻感负载整流电路及波形

假设电感很大，电流连续且为一水平线，当 U_2 在正半周时，晶闸管 VT_1 和 VT_4 承受正向电压，在 $\omega t = \alpha$ 时同时触发这两个晶闸管，则 VT_1 、 VT_4 导通， $u_d = U_2$ ， VT_2 、 VT_3 承受反压处于截止状态。当 U_2 过零变负时，由于电感作用，维持回路中电流继续存在，只要 L 足够大， $L \frac{di_d}{dt}$ 足以抵消 U_2 ，使 VT_1 与 VT_4 仍然承受正向电压， VT_1 和 VT_4 继续导通， u_d 波形出现负值部分。此时虽然 VT_2 和 VT_3 承受了正向电压，但没有脉冲，还不能导通。在 $\omega t = \pi + \alpha$ 时，晶闸管 VT_2 、 VT_3 触发导通，它们导通后立即使 VT_1 和 VT_4 承受反向电压，迫使其关断，这时电流从 $U_2 \rightarrow VT_2 \rightarrow L, R \rightarrow VT_3 \rightarrow U_2$ 流过，直到下一周期，重复上述过程，波形见图 2-5(b)。

整流电压平均值：

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d\omega t = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha = 0.9 U_2 \cos \alpha \quad (2-6)$$

$\alpha = 0$ 时， $U_d = 0.9 U_2$ ， $\alpha = 90^\circ$ ， $U_d = 0$ ，故移相范围 90° 。

$$\text{整流电流平均值: } I_d = \frac{U_d}{R} \quad (2-7)$$

$$\text{晶闸管电流平均值: } I_{dt} = \frac{1}{2} I_d \quad (2-8)$$

$$\text{晶闸管电流有效值: } I_t = \frac{1}{\sqrt{2}} I_d \quad (2-9)$$

$$\text{电源电流有效值: } I_s = I_d \quad (2-10)$$

思考与练习题

2-1. 单相半控桥式整流电路, 电阻负载, $R=25\pi$, 要求 $U_d=0\sim 250\text{V}$, 计算晶闸管的额定电压, 额定电流和变压器的容量(α 角画有 20° 余量)。

2-2. 单相半控桥与单相全控桥式整流电路, 阻感负载, 电感足够大, 画图说明其输出电压 U_d , 晶闸管电流 I_t 与变压器的副级电流 i_2 波形的差别(半控桥要加续流二极管)。

2-3. 带续流二极管的单相半控桥式整流电路, 阻感负载, L 足够大, $U_2=100\text{V}$, $R=2.8\Omega$, 测得电阻两端电压 $U_d=84\text{V}$, 求:

- 1) 负载电流 I_d ;
- 2) 续流二极管中流过的平均电流 I_{dDR} ;
- 3) 晶闸管中流过的平均电流 I_{dT} ;
- 4) 晶闸管中流过的电流有效值 I_T ;
- 5) 续流二极管中流过的电流有效值 I_{DR} ;
- 6) 变压器中流过的电流有效值 I_2 ;
- 7) 画出输出电压波形 U_d , 晶闸管中流过的电流波形 i_T , 续流二极管与变压器中流过的电流波形 i_{DR} 和 i_2 。

2-4. 试分析单相全控桥式整流电路电阻负载时输出电压、电流波形, 将它与半控桥式电路电阻负载的输出电压、电流波形比较, 有何区别。

2-5. 单相全控桥式整流电路 $\alpha=0^\circ$, 当负载为电阻, $R=10\Omega$, 阻感负载 L 足够大, $R=10\Omega$ 时, 输出电压 U_d 、负载电流 I_d , 二极管的平均电流 I_{dD} 及二极管变压器副级绕组 I_D 与 I_2 , 画出 U_d 、 i_d 、 i_D 、 i_2 的波形。