

高等学校试用教材

# 电力电子器件基础

陕西机械学院 陈治明 主编

机械工业出版社



7N303  
C65

361040

高等学校试用教材

# 电力电子器件基础

陕西机械学院 陈治明 主编



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书介绍电力电子器件的基本结构、工作原理、特性参数及使用方法。内容包括电力电子电路基础、半导体器件理论基础、二极管和晶体管、晶闸管及其派生器件、GTR和GTO、功率MOS、SIT和SITH、IGBT和MCT、功率集成电路、器件散热问题以及几种常用器件的参数测试方法。

本书的主要使用对象是非半导体专业的本科和专科学生、硕士研究生。也可供工业电气自动化专业和其他相近专业的学生选用，供制造和使用电力电子器件的工程技术人员参考。

### 电力电子器件基础

陕西机械学院 陈治明 主编

\*

责任编辑：贡克勤 王小东 版式设计：胡金瑛  
封面设计：郭景云 责任校对：孙志筠  
责任印制：王国光

•

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)  
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)  
机械工业出版社京丰印刷厂印刷  
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub>·印张14<sup>1</sup>/<sub>4</sub>·字数349千字  
1992年10月北京第1版·1992年10月北京第1次印刷  
印数0 001—1 700·定价：4.10元

\*

ISBN N7-111-03283-7/TN·61(课)

2201/16  
前言

电力电子学是服务于电能的产生、输送、变换和控制的一个现代电子学分支,以工业应用为主要对象,包含了电力电子器件和电力电子电路与系统两个基本组成部分,其中器件是基础。

现代电力电子技术中使用的器件绝大多数都是半导体器件,只在频率很高的大功率高频电源中还在使用真空电子器件。由于真空器件体积大、功耗高,它在电力电子技术中的最后这块领地也即将被新型电力半导体器件所占领。电力电子器件全盘固体化已是指日可待的事情。因此,人们通常所说的电力电子器件都是指的电力半导体器件。

电力半导体器件已经走过了30余年不断概念更新、性能换代的发展历程。以硅整流器和可控硅整流器(SCR,现称晶闸管)为代表的第一代电力半导体器件,以其体积小、功耗低等优势首先在大功率整流电路中迅速取代了老式的汞弧整流器,取得了明显的节能效果,并奠定了现代电力电子学的基础。但是,这一代器件只能控制导通而不能控制关断,且工作频率较低,处在这个阶段的电力电子学领域相对说来还是比较狭窄的。自70年代中期起,随着电力晶体管(GTR)和可关断晶闸管(GTO)等通断两态双可控的双极器件以及功率MOS场效应晶体管和静电感应晶体管(SIT)等通断两态双可控的单极器件的开发和兴起,电力电子学遂日益完善而至成熟。有人将这一类具有自关断能力的器件称为第二代电力电子器件。这一代器件中还包括结合了单、双极器件双方优点于一身的、在80年代才开发出来的绝缘栅晶体管(IGBT)和MOS控制的晶闸管(MCMT)。这一代器件的一个共同特点是采用了多个全同器件单元的集成结构,是一些由几十、几百、乃至几十万具有相同功能和结构的元胞并联集成的功率集成器件。这一代器件的兴起,是高压大电流器件技术同微电子技术相结合的自然结果,可称之为功率集成。自90年代中期起,电力电子学开始朝更高的目标奋进,以更快的速度进入以智能电力半导体器件(Smart Power)为代表的功率集成电路(PIC)时代。PIC由功率开关器件和它的保护电路、控制电路以及相关的传感元器件及其电路,测试电路和逻辑电路等组成,从而在同一芯片上实现了功率开关同微电子线路和半导体传感器技术的复杂集成。这种被称之为第三代电力电子器件的高技术产品使动力和信息合一,是机和电的关键接口。因此,有人认为处在这一水平上的电力电子学将给传统工业以巨大冲击, PIC的成功是第二次电子革命即将到来的标志。

对于处在这样一个历史时期的、从事电力电子电路和系统研制的工程技术人员和即将从事这类工作的青年学生来说,了解新旧各种电力电子器件的工作原理和工作性能,从器件的物理本质上认识器件,对于更好地使用器件,乃至更经济地、更高性能地设计和制造电力电子装置,都是有所裨益并十分必要的。正是基于这种考虑,全国高等工科院校应用电子技术教学指导委员会建议在各院校的应用电子技术专业中开设“电力电子器件”课程,并在有关院校中进行了教材的征稿和评选。本教材即是经过该委员会组织专家评选后推荐出版的,正式编写时的大纲在该委员会的指导下进行了修订。

本书分为九章。根据主要对象是学习电力电子电路和系统设计的大学生这一特

点,第一章摘要介绍电力电子电路,以学生比较熟悉的电路引出不太熟悉的器件。第二章扼要介绍有关半导体的最基本知识,作为以后章节的理论基础。第三章介绍半导体二极管和晶体管,包括双极晶体管和场效应晶体管。这些器件本身是在电力电子电路和系统中必不可少的,但更重要的是,它们是最基本最典型的半导体器件,理解它们的工作原理是理解各种复杂电力电子器件的基础。第四章介绍晶闸管和四种派生器件,重点是晶闸管。第五章和第六章分别介绍电流控制型和电压控制型自关断器件,这是本书的重点。第六章中介绍的器件包括了在国内现行教材中基本未曾提及的IGBT、MCT、SIT和SITH。第七章中介绍的功率集成电路在现行同类教材中也尚未有人提及,在各种中文著作(包括译著)中也很少介绍。虽然这些器件在短期内还不大可能有成熟的国产产品供应,但在改革开放的形势下,进口器件已经开始用到了国产整机之中。了解这些器件无疑是迫切需要的。第八章介绍有关功率器件的散热问题,第九章介绍几种常用电力电子器件的主要参数和重要的关键参数的测试方法,这是完全针对使用器件的人员编写的。

本书从电力电子器件的工作参数出发探讨器件的工作原理,力图避免过多过繁的数学推导,侧重于将概念交待清楚,以适应非半导体专业本科学生的知识结构和兴趣,使他们通过较少时间的学习也能对这些器件从物理本质上获得较深刻的认识,以便将来在应用这些器件时从理论上有所遵循,能尽可能克服盲目性和经验主义。

本书由陈治明教授主编,编写第二、三、五、六、七、八章,并对全书统稿。张永生教授编写第一章,肖浦英副教授编写第四章,王益成副教授编写第九章。

本书的编写自始至终是在苏文成教授的指导下进行的,他主持了大纲的制订和修订,审阅了全部书稿,并提出了许多有价值的具体的修改意见,在此谨致衷心谢忱。

在本书的编写过程中,钟彦儒副教授为第五章和第六章提供了有用的资料和意见,黄相元副教授和林杞副教授分别对第四章和第七章的部分内容同编者进行了有益的讨论,在此一并致谢。

编者

1992年1月

# 目 录

## 前言

## 第一章 电力电子电路基础..... 1

§1-1 电力电子电路..... 1

§1-2 电力电子器件概述..... 17

参考文献..... 21

## 第二章 半导体器件的理论基础 ..... 22

§2-1 半导体基础..... 22

§2-2 PN结原理 ..... 28

参考文献..... 40

## 第三章 半导体二极管与晶体管 ..... 41

§3-1 半导体二极管..... 41

§3-2 双极晶体管 (BJT) ..... 49

§3-3 场效应晶体管 (FET) ..... 58

参考文献..... 67

## 第四章 晶闸管 ..... 68

§4-1 晶闸管的工作原理与特性..... 69

§4-2 特种用途晶闸管..... 86

§4-3 晶闸管应用基础..... 95

参考文献..... 103

## 第五章 自关断双极器件 ..... 104

§5-1 电力晶体管 (GTR) ..... 105

§5-2 门极可关断晶闸管 (GTO) ..... 118

参考文献..... 130

## 第六章 功率场控器件 ..... 131

§6-1 功率MOSFET ..... 131

§6-2 IGBT和MCT..... 153

§6-3 SIT和SITH ..... 164

参考文献..... 177

## 第七章 功率集成电路 (PIC) ..... 178

§7-1 功率集成电路概述..... 178

§7-2 功率集成电路的基本构造及原理..... 181

§7-3 功率集成电路的工业应用..... 187

参考文献..... 195

## 第八章 电力电子器件的散热 ..... 196

§8-1 稳态热阻与瞬态热阻抗..... 196

§8-2 耗散功率与结温..... 200

§8-3 散热器设计..... 203

参考文献..... 207

## 第九章 电力电子器件的参数测试 ..... 208

§9-1 GTR的二次击穿测试 ..... 208

§9-2 晶闸管静态特性参数的测试  
与分析..... 210

§9-3 晶闸管动态特性参数的测试  
与分析..... 215

§9-4 快速晶闸管通态电流额定值  
的测量..... 222

§9-5 GTO关断特性的测量 ..... 223

参考文献..... 224

# 第一章 电力电子电路基础

电力电子器件是电力电子电路的核心，而电力电子电路又是电力电子装置的主体。当今电力电子装置所以得到广泛应用，其主要原因是实现各种电力电子电路功能时，电力电子器件均处于受控的通、断状态，受控弱电化，通、断电流自如，且损耗很小，是理想的无触点开关。就装置整体而言，能做到高效率化、高频率化、无噪声、高可靠性、节约能量、体积小、重量轻、维修方便、价格便宜等。

发展电力电子装置有赖于新型的电力电子电路，取决于新颖的电力电子器件。

电力电子电路要求电力电子器件具有一定的质量指标，一旦电力电子器件获得宝贵特性，在保留此特性的基础上又要求电力电子电路有所创新和改造。电力电子技术发展过程也就是电力电子电路和电力电子器件相互促进、互为补充的过程。

## §1-1 电力电子电路

### 一、常用电力电子器件的理想开关特性

已经提及各种电力电子电路在实现电能转换的功能时，均要求电力电子器件或处于导通，或处于关断状态。常用电力电子器件的理想开关特性如下：

#### (一) 功率二极管的理想开关特性

功率二极管的理想开关特性如图1-1所示。若电源电压 $u = \sqrt{2} U \sin \omega t$ ，在正半周时，二极管导通，忽略其正向压降，二极管承受电压 $u_{AK} = 0$ 。通过二极管的电流 $i = \sqrt{2} U \sin \omega t / R$ ，最大电流值为 $\sqrt{2} U / R$ ，在负半周时，二极管关断，忽略反向电流，二极管承受电源电压， $u_{AK} = \sqrt{2} U \sin \omega t$ ，反向最大电压值为 $-\sqrt{2} U$ 。

#### (二) 功率晶体管的理想开关特性

电源电压为 $+E_c$ 。图1-2a表示晶体管处于截止状态。如若基极输入负电压 $-E_b$ ，则认为晶体管立即截止。基极、发射极断路，集电极电流为零。晶体管集电极电压 $u_{CE} = +E_c$ 。图1-2b表示晶体管处于饱和导通状态。如若基极输入正电压 $+E_b$ ，则认为晶体管立即饱和导通，基极电流 $i_B = E_b / R_B$ ，集电极电流 $i_C = E_c / R_C$ ， $u_{CE} = 0$ 。功率晶体管的理想开关特性如图1-2c所示。

#### (三) 晶闸管的理想开关特性

晶闸管结构从外观上看，除了有阳极(A)和阴极(K)两个极外，还增加了一个门极(G)。它也有关断和导通两个工作状态。其基本特性如下：

① 当晶闸管承受正向电压即 $u_{AK} > 0$ 时，如有门极电压 $U_g$ （或电流 $I_g$ ），且 $U_g > 0$ ，晶闸管导通（门极电压以脉冲电压形式出现，又称为触发脉冲电压）。

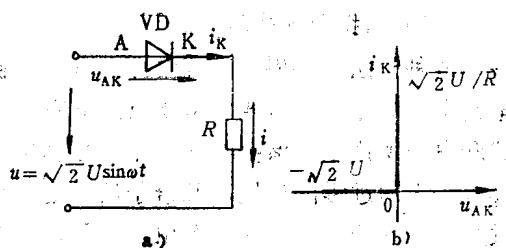


图1-1 功率二极管的理想开关特性

② 虽然  $u_{AK} > 0$ ，而  $U_G \leq 0$ ，则晶闸管仍处于关断状态。

③ 当晶闸管承受反向电压，即  $u_{AK} < 0$  时，不论有、无门极电压，晶闸管始终处于关断状态。

④ 一旦晶闸管导通，门极便失去控制作用。欲关断晶闸管，必须使通过晶闸管的电流为零或使晶闸管承受反向电压，并保持一段足够长的时间。

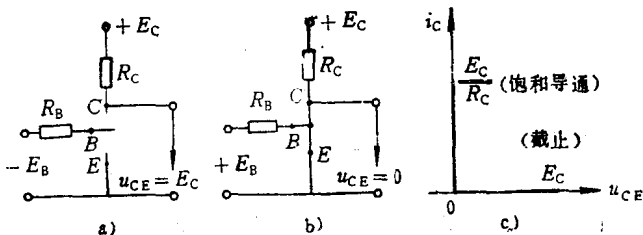


图1-2 功率晶体管的理想开关特性

晶闸管的理想开关特性，如图

1-3所示。若电源电压  $u = \sqrt{2} U \sin \omega t$ ，直线1表示晶闸管导通后，认为晶闸管压降  $u_{AK} = 0$ ，通过晶闸管的电流  $i_K = \sqrt{2} U \sin \omega t / R$ ，最大电流值为  $\sqrt{2} U / R$ 。直线2表示晶闸管关断时承受正向电压情况，正向电压最大值为  $\sqrt{2} U$ 。直线3表示晶闸管关断时承受反向电压情况，反向电压最大值为  $-\sqrt{2} U$ 。两种情况下，通过晶闸管的电流都为零。

## 二、电力电子电路的换流方法

所谓换流，是指含有电力电子器件的支路之间的电流转移。功率二极管和晶闸管等电力电子器件都不是自关断器件。把如何关断晶闸管经常归结为换流问题，例如在交流电源作用于晶闸管时，依靠电源电压由零变负，并保持一段关断时间，使通过晶闸管的电流为零来关断晶闸管，这称之为交流电网换流。而在直流电源作用于晶闸管时，关断晶闸管则必须利用负载特性，或附加强迫换流电路。

现将换流的基本方法介绍如下：

### (一) 交流电网换流

如图1-4所示，在  $\omega t < \omega t_1$  期间，晶闸管虽然承受电源正向电压，然而  $U_G = 0$ ，故不导通， $u_{AK} = u$ 。当  $\omega t = \omega t_1$  时，晶闸管承受电源正向电压，又有门极触发脉冲电压  $U_G$ ，于是晶闸管导通，有电流  $i$  流过电阻负载， $u_{AK} = 0$ ， $u_R = u$ 。直到  $\omega t = \pi$  时，电源电压  $u = 0$ ，于是  $i = 0$ ， $u_R = 0$ 。晶闸管关断之后，承受电源反向电压， $u_{AK} = u$ 。从图1-4中看出，承受反压的期间有  $180^\circ$ ，这足够晶闸管所需保持的关断时间。

### (二) 谐振负载换流

这种方法主要用于直流电源供电的负载电路中。它是利用负载电路具有的电阻、电感和电容所产生的谐振特性，尤其是利用振荡电流自动过零的特性，又给予反向电压而关断晶闸管的。要形成振荡电流，必须要求由  $R$ 、 $L$ 、 $C$  组成的负载具有欠阻尼的特征。图1-5a表示了谐振负载换流的一种电

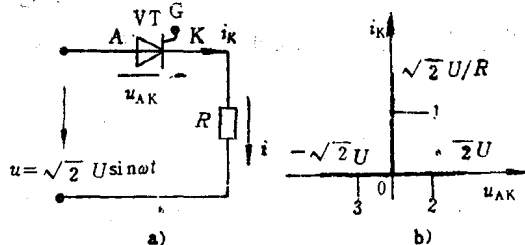


图1-3 晶闸管的理想开关特性

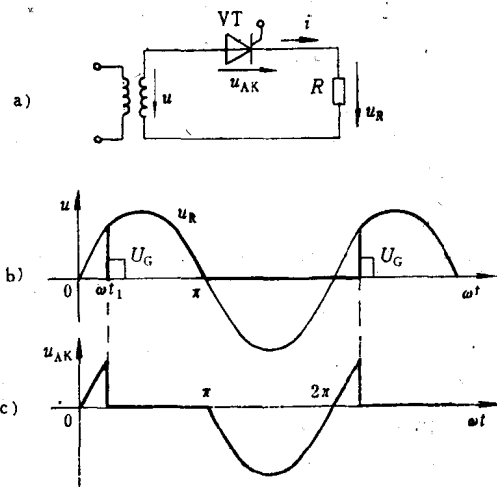


图1-4 交流电网换流及其波形

路。其工作原理如下：负载通过晶闸管与直流电源连接，当  $t = 0$  时，给予触发脉冲使晶闸管导通（若已加有正向电压  $U$ ），如果各器件的参数选择得恰当，符合欠阻尼特征，那么可以使电流  $i$  成为振荡电流，如图1-5c所示。

在  $0 \sim t_1$  期间，电流  $i$  增加，电容器  $C$  被充电， $u_c = u_R$  逐渐增高。到达  $t_1$  时， $i$  最大， $u_L = L di/dt = 0$ ，而在  $t_1 \sim t_2$  期间， $i$  下降，然而电感要阻止电流减少，其极性则呈现上负下正，与电源  $U$  顺极性串联，继续对电容器  $C$  充电，直到  $t_2$  时  $i = 0$  为止，此时  $u_c$  被充电到某最大值，且大于直流电源电压  $U$ 。

$t_2$  时刻以后，晶闸管承受反向电压，振荡电流  $i$  欲反方向流过晶闸管，但由于晶闸管具有单向导电特性，故晶闸管被迅速关断。一旦被关断，电容  $C$  向电阻  $R$  放电， $u_c = u_R$  按指数规律下降，直到零为止，如图1-5d所示。

晶闸管承受的电压  $u_{AK}$ ，如图1-5e所示。在  $t_2$  时刻以前，其值为零， $t_2$  时刻以后，由于电流  $i = 0$ ，故立即承受反向电压， $u_{AK}$  的数值则随着  $u_c$  向电阻  $R$  放电而逐渐上升，先变到零，再变到正值，直到  $u_c = 0$ ， $u_{AK} = U$  值为止。电路向晶闸管提供的关断时间，即  $u_{AK}$  由负变到零值所经历的时间为  $t_d$ ，此值应该大于晶闸管自身关断所需时间  $t_q$ ，晶闸管才能可靠关断。在  $t_3$  时刻，再触发晶闸管，重复上述过程。

### （三）强迫换流

谐振负载换流要求负载本身必须是欠阻尼谐振电路的一部分，因此它的应用范围受到限制。一般电路换流则是利用较小容量的  $L$  和  $C$  组成的强迫换流电路来达到关断晶闸管的目的，如图1-6所示。

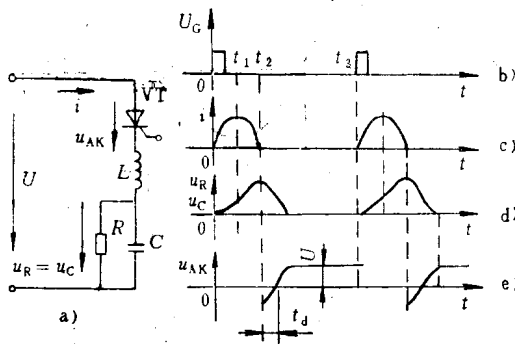


图1-5 谐振负载换流及其波形

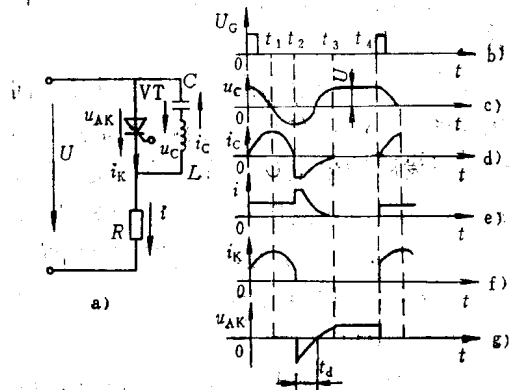


图1-6 强迫换流电路及其波形

晶闸管未触发导通之前，电容器  $C$  已被充电到最大值  $U$ ，各支路电流皆为零。

当  $i = 0$  时，给予触发脉冲电压  $U_G$ ，此时晶闸管因承受正向电压  $U$ ，故立即导通，于是有电流  $i$  流过负载  $R$ 。晶闸管一旦导通，与  $LC$  支路构成通路，已被充电的电容器  $C$  开始放电，并有电流  $i_c$  流过晶闸管。

在  $0 \sim t_1$  期间，由于  $C$  放电，故  $u_c$  逐渐下降，而放电电流却逐渐增加，此时，流过晶闸管的电流  $i_K = i_c + i$ 。在  $t_1$  时刻， $u_c$  下降到零， $i_c$  达到最大值。

在  $t_1$  时刻以后，电容器  $C$  被反向充电，仍有如前述方向的电流  $i_c$  流过晶闸管，不过  $i_c$  在逐渐减小。此时，电容器增加的电场能量是由电感  $L$  中所存贮的磁能转换而来的。对于换流而

言, 其关键开始于 $t_2$ 时刻, 此时电容器 $C$ 已被充到反向电压的最大值, 而 $i_c$ 又下降到零。在 $t_2$ 时刻之后,  $C$ 又要放电, 该放电电流的方向却与晶闸管导通方向相反, 故晶闸管迅速被关断,  $i_K = 0$ 。晶闸管一旦被关断, 电容器 $C$ 则通过 $L$ 、 $R$ 、直流电源放电,  $i_c = i$ 。因两者规定的正方向不同, 所以在图1-6d、e中呈现的波形相反。 $t_2 \sim t_3$ 期间, 是电流 $i_c = i$ 从某值逐渐减小到零的过程, 又是电容器 $C$ 从反方向放电到正方向充电的过程。在 $t_3$ 时刻,  $i_c = i = 0$ ,  $u_c = U$ , 为下一次换流做好准备。晶闸管承受电压 $u_{AK}$ 的波形和电路提供的承受反压时间 $t_d$ 均表示在图1-6g中。

### 三、相控整流电路

晶闸管相控整流电路是应用最广泛的电力电子电路。了解该电路的基本原理对于分析后续的其他电路均有帮助。整流电路是将交流输入电压变换为直流输出电压的电路。相控的含义是指利用相位可控的触发脉冲加于晶闸管的门极上, 以改变晶闸管的工作状态, 从而得到可调的直流输出电压。应用于直流电源的电镀、电解、直流调速系统等。

#### (一) 单相半波相控整流电路

1. 电阻性负载 图1-7a为具有电阻性负载的单相半波相控整流电路。晶闸管VT起着电路的开关作用。在分析时, 忽略晶闸管开通所需的时间, 即认为晶闸管处于电压正半波时, 在门极上加正向触发脉冲电压 $U_G$ 的瞬间, 晶闸管就导通。导通后认为管压降为零。在晶闸管处于零电压时, 因为是电阻性负载, 故此时电流也为零, 认为晶闸管立即自行关断。

在电压 $u_2$ 的正半周内, 晶闸管承受正向电压(图1-7b), 在 $\omega t_1$ 之前, 因尚未给晶闸管送触发脉冲电压 $U_G$ , 故晶闸管处于阻断状态, 此时流过变压器的二次电流 $i_2$ 即为流过晶闸管的电流 $i_K$ , 它也是流过负载的电流 $i_d$ , 皆为零, 即 $i_2 = i_K = i_d = 0$ 。因而, 输出电压 $u_d = i_d R$ 也为零。

在 $\omega t_1$ 时刻, 给晶闸管门极送以触发脉冲电压 $U_G$ , 因此时晶闸管仍承受正向电压, 具备了导通的两个必要条件, 于是立即开通, 有电流流过负载 $R$ , 其值随输出电压 $u_d$ 的变化而变化, 即 $i_d = u_d / R$ 。它们的波形如图1-7d、e所示。当 $\omega t = \pi$ 时,  $u_2$ 变为零, 则 $i_K = i_2 = i_d = 0$ , 晶闸管自行关断,  $u_d$ 亦为零。研究晶闸管所承受的两端电压 $u_{AK}$ : 在 $\theta \sim \omega t_1$ 期间, 因晶闸管处于阻断状态, 所以电压 $u_2$ 全部加在它上面, 即 $u_{AK} = u_2$ ; 在 $\omega t_1 \sim \pi$ 期间, 因晶闸管导通, 故 $u_{AK} = 0$ ,

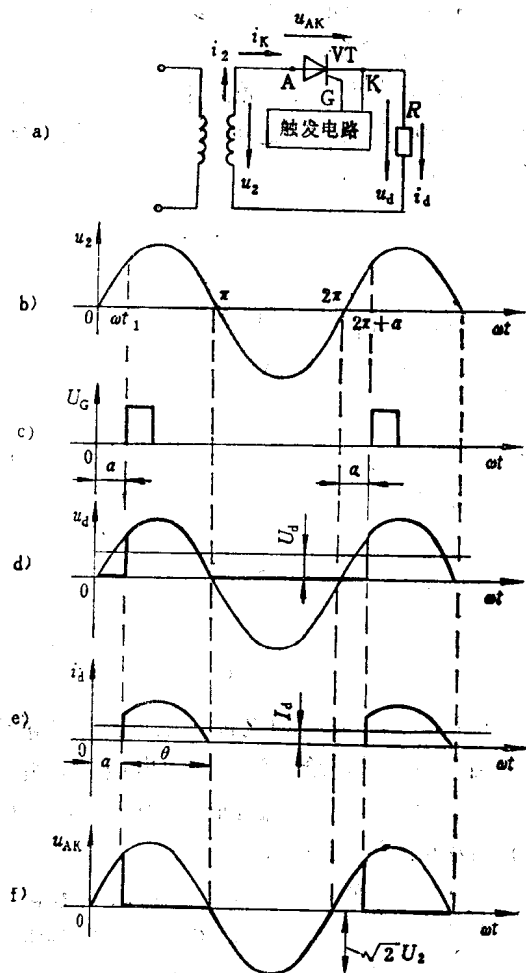


图1-7 电阻性负载时单相半波相控整流电路及其电压电流波形

如图1-7f所示。若延迟角  $\alpha > \pi/2$ , 则晶闸管所承受的最大正向电压为  $\sqrt{2}U_2$ 。

在  $u_2$  负半周内, 晶闸管始终承受着反向电压, 即使门极上加有触发脉冲  $U_G$ , 它也将始终处于阻断状态。在此期间  $i_d = 0$ ,  $u_d = 0$ ,  $u_{AK} = u_2$  为负值。晶闸管所承受的最大反向电压为  $-\sqrt{2}U_2$ 。

直到第二个周期  $\omega t = 2\pi + \alpha$  时, 晶闸管又承受正向电压, 若获得  $U_G$ , 则再次开通。如此不断重复循环。

通过晶闸管的通断作用, 单相交流输入电压变换为直流脉动输出电压  $u_d$ , 它的波形如图1-7d所示。改变触发脉冲电压  $U_G$  的相位, 即改变延迟角  $\alpha$  (触发时刻) 的大小, 就能得到可调的直流脉动输出电压。因为电路只在交流电压的正半周内实现单相整流, 所以称为单相半波相控整流电路。

由触发电路控制, 在不同相位给出触发脉冲电压  $U_G$ , 从而改变延迟角  $\alpha$  的大小, 这种控制方式称为相位控制或简称为相控。单相半波相控整流电路在电阻性负载时,  $\alpha$  的最大移相范围为  $180^\circ$ 。晶闸管导通角  $\theta$  的变化范围亦为  $180^\circ$ ,  $\alpha$  与  $\theta$  两者的关系是  $\alpha + \theta = \pi$ , 即  $\theta = \pi - \alpha$ 。

2. 电感性负载 图1-8a为具有电阻  $R$ 、电感  $L$  的电感性负载的单相半波相控整流电路。在分析此电路时, 要注意流过电感中的电流不能跃变。在  $L$  中产生的感应电动势 (电感上的电压  $u_L$ ), 其极性方向始终是阻止电流变化的。

在  $u_2$  的正半周内, 晶闸管承受正向电压, 当  $\alpha = \omega t_1$  时, 若触发脉冲电压  $U_G$  加于晶闸管门极上, 于是VT导通, 整流电压  $u_d$  与整流电流  $i_d$  以及  $u_R$  与  $u_L$  的波形如图1-8d、e所示。这里要讨论的有三点:

① 由于电感的存在, 在  $i_d = 0$  的初始条件下,  $i_d$  只能从零开始增长, 在增长过程中, 电感  $L$  存贮能量。如规定此时  $u_L$  为正值, 则  $L$  的极性为上正下负,  $u_d = u_R$ 。到  $\omega t_2$  时,  $i_d$  达到最大值, 这是因为此时  $u_L = L di_d/dt = 0$ , 也就是说电流  $i_d$  的变化率为零的缘故。往后  $i_d$  减小,  $u_L$  变负,  $L$  的极性为上负下正, 电感  $L$  释放能量。在  $\omega t = \pi$ , 输入电压  $u_2$  为零时, 晶闸管不能自行关断, 仍然会导通, 这是由于电感  $L$  维持着电路中电流的缘故。此时, 虽然  $u_2 = 0$ , 可是  $L$  要继续释放能量, 其极性为上负下正, 见图1-8a, 使得晶闸管仍然承受正向电压而导通。若忽略管压降, 则此时  $u_R = i_d R = u_L$ 。

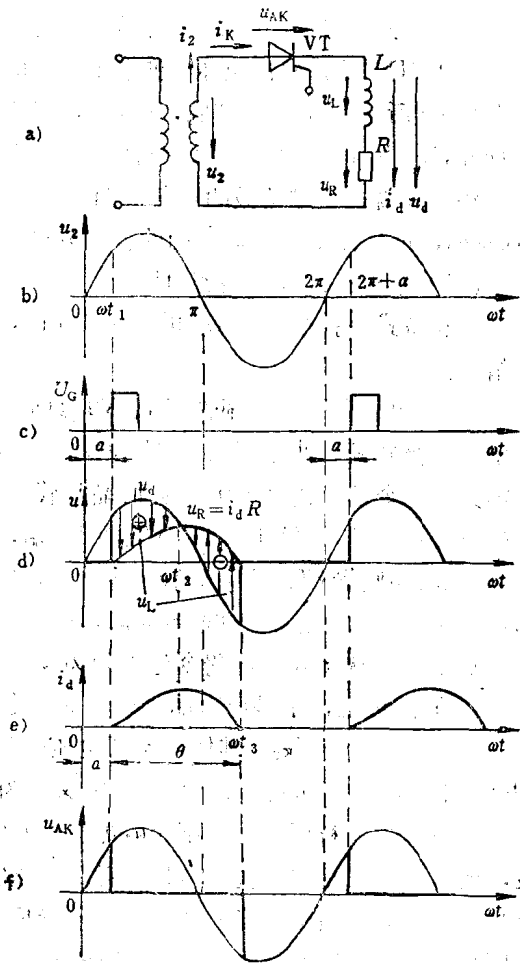


图1-8 电感性负载时单相半波相控整流电路及其电压电流波形

当 $\omega t > \pi$ , 只要有电流存在, 晶闸管导通, 就有 $u_d (=u_L + u_R) = u_2$ 。只能等到电感 $L$ 将能量放完, 即在 $\omega t_3 = \alpha + \theta$ 处, 才出现 $i_d = 0$ ,  $u_R = i_d R = 0$ ,  $u_d = u_L = u_2$ 。由于晶闸管没有电流流过, 所以在 $\omega t_3$ 处才开始关断。

②  $\omega t > \alpha + \theta$ , 即晶闸管关断之后, 显然 $i_d = 0$ , 则 $u_R = 0$ ,  $u_L = 0$ , 此时输入电压 $u_2$ 为负, 它加到晶闸管两端, 继续维持其阻断状态, 得 $u_{AK} = u_2$ , 如图1-8f所示。

③ 由于晶闸管在 $u_2$ 的负半周的一段时间内还处于导通状态, 故整流电压 $u_d$ 出现了负值, 这样平均电压 $U_d$ 就要减小了, 这是我们所不希望的。还可从图1-8d看出: 如果 $R$ 很小,  $L$ 很大, 就有可能出现平均电压 $U_d = 0$ 的情况, 为避免上述情况的产生, 通常采用电感性负载并接续流二极管的方法来解决。

电感性负载并接续流二极管VD, 其方向由以下原则来决定, 就是 $L$ 释放能量时, 能让通过负载的电流 $i_d$ 经二极管构成回路, 如图1-9a所示。当输入电压 $u_2$ 为正半周时, 若晶闸管导通, 则二极管处于反向截止状态,  $i_D = 0$ 。当输入电压 $u_2$ 为负半周时, 电感 $L$ 要释放能量, 为维持原有电流的方向, 使电流 $i_d$ 不再流过晶闸管而经VD继续流通, 故称二极管VD为续流二极管。VD导通后, 如忽略其管压降, 得输出电压 $u_d = 0$ , 这样就避免了 $u_d$ 出现负值。另外,  $u_2$ 处于负半周时, 由于VD导通, 使 $u_2$ 直接加到晶闸管两端上, 迫使它承受反压而关断。

有了VD以后, 输出电压 $u_d$ 波形如图1-9d所示, 同电阻负载时一样。负载电流 $i_d$ 的波形如图1-9e所示,  $\omega t_1 \sim \pi$ 期间,  $i_d = i_K$ , 即流过负载的电流就是流过晶闸管的电流。 $\pi \sim \alpha + \theta$ 期间,  $i_d = i_D$ , 即由电感 $L$ 释放能量所产生的电流就是流过VD的电流。显然, 通过VT、VD的电流之和就是通过负载的电流。图1-9f表示晶闸管两端电压 $u_{AK}$ 的波形。任何瞬间 $u_2 = u_{AK} + u_d$ , 可依此检查我们所画的各部分电压波形是否正确。

## (二) 单相桥式全控整流电路

单相桥式全控整流电路如图1-10a所示。下面分别讨论电阻性负载和电感性负载时的工作情况。

1. 电阻性负载 晶闸管 $VT_1$ 、 $VT_4$ 组成一对桥臂,  $VT_2$ 、 $VT_3$ 组成另一对桥臂。它们双双分别由门极触发脉冲电压 $U_{G1}$ 、 $U_{G4}$ 或 $U_{G2}$ 、 $U_{G3}$ 触发, 见图1-10b。若输入电压 $u_2$ 处于正半周, 从零开始, 令延迟角 $\alpha = \omega t_1$ , 此时晶闸管 $VT_1$ 、 $VT_4$ 因门极上加有 $U_{G1}$ 、 $U_{G4}$ 而触发导通。电流的路径从 $a$ 端, 经 $VT_1$ 、 $R$ 、 $VT_4$ 回到 $b$ 端, 这时 $i_2 = i_{K1} = i_d = i_{K4}$ , 其值随电压 $u_2$ 的变化而变化。若忽略晶闸管 $VT_1$ 、 $VT_4$ 的管压降, 则此时 $u_2 = u_d$ ,  $i_d = u_d/R$ 。 $u_d$ 与 $i_d$ 的波形如图1-10c所示。待到 $u_2$ 正半周结束, 即 $\omega t = \pi$ 时,  $u_d = 0$ ,  $i_d = 0$ , 此对晶闸管自行关断。若输入电压 $u_2$ 处于负半周, 从 $\pi$ 开始, 仍令延迟角为 $\alpha$ ,  $\pi + \alpha$ 时将触发脉冲电压 $U_{G2}$ 、 $U_{G3}$ 加于晶闸管 $VT_2$ 、 $VT_3$ 门极上, 于是此对晶闸管导通。电流的路径则从 $b$ 端, 经 $VT_3$ 、 $R$ 、 $VT_2$ 回到 $a$ 端。同样,  $i_2 = i_{K3} = i_d = i_{K2}$ , 其值还是随电压 $u_2$ 而变化, 忽略管压降, 仍得 $u_2 = u_d$ ,  $i_d = u_d/R$ 。待到 $u_2$ 负半周结束, 即 $\omega t = 2\pi$ 时,  $u_d$ 与 $i_d$ 又均为零, 这对晶闸管也自行关断。往后不断重复循环。通过以上分析可看出, 不论 $u_2$ 处于正半周还是负半周都有电流 $i_d$ 通过负载, 而且方向不变, 所以是全波相控整流。另外, 对两组触发脉冲电压的相位应该有一定的要求, 即相互相差 $180^\circ$ 。否则随着延迟角 $\alpha$ 的不同, 不能反映出有规律的变化。再有, 以晶闸管 $VT_1$ 为例, 见图1-10d, 研究它承受电压 $u_{AK1}$ 的情况。当所有晶闸管都不导通时, 没有电流通过电阻 $R$ ,  $u_R = u_d = 0$ 。电阻 $R$ 两端没有电压差, 即电位相同。此时若 $u_2$ 处于正半周, 则 $VT_1$ 承受着正向电压 $u_2$ 的一半, 另一半由 $VT_4$ 承受, 若 $u_2$ 处于负半周, 则 $VT_1$ 承受着反向电压 $u_2$ 的一半, 另

一半仍由 $VT_1$ 承受, 在 $u_2$ 处于正半周时, 一旦 $VT_1$ 、 $VT_4$ 导通, 它们的管压降可以忽略, 近似为零; 当 $VT_2$ 、 $VT_3$ 导通, 即 $u_2$ 处于负半周时,  $u_2$ 电压通过导通的 $VT_3$ 直接加到 $VT_1$ 上, 得 $u_{AK1} = u_2$ 。图1-10 d 表示晶闸管 $VT_1$ 在上述各种情况下所承受的电压 $u_{AK1}$ 的波形。承受正向电压时的最大值因由 $VT_1$ 与 $VT_4$ 分担, 故为 $\sqrt{2}U_2/2$ , 承受反向电压时的最大值为 $\sqrt{2}U_2$ 。

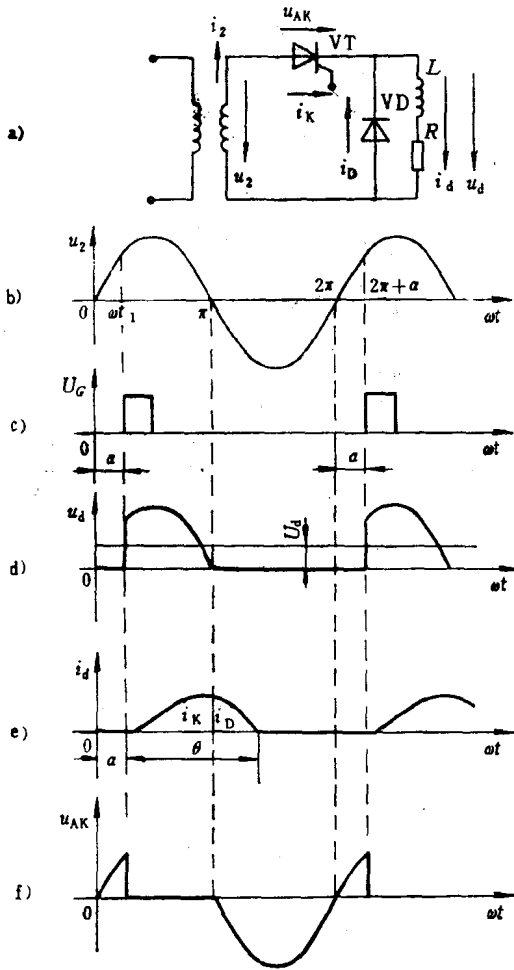


图1-9 有续流二极管的单相半波相控整流电路及其电压电流波形

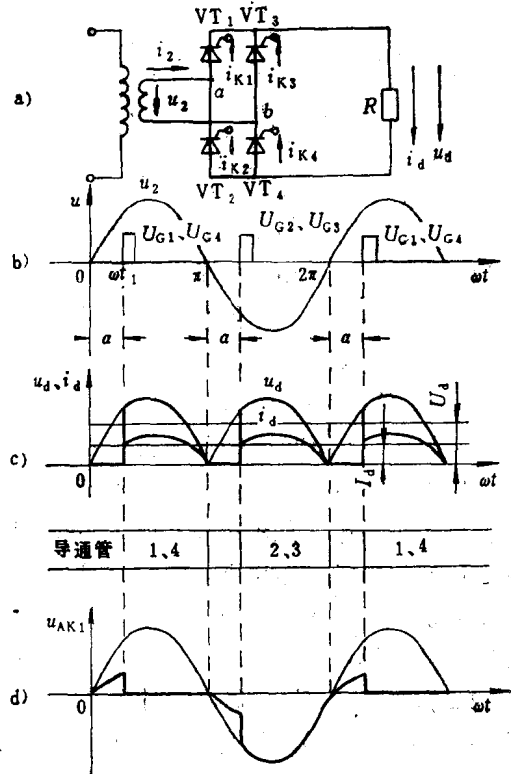


图1-10 电阻性负载时单相桥式全控整流电路及其电压、电流波形

2. 电感性负载 为了分析方便, 假定为大电感负载, 于是可以认为负载电流基本上是连续不变的, 其波形近似为水平直线。

图1-11 a、b 中, 当输入电压 $u_2$ 处于正半周时, 如在延迟角 $\alpha = \omega t_1$ 时,  $VT_1$ 、 $VT_4$ 由于门极上分别加有 $U_{G1}$ 、 $U_{G4}$ 而触发导通。此时, 有电流 $i_d$ 流过负载, 如图1-11 d 所示, 波形为近似水平直线。当 $\omega t = \pi$ , 即 $u_2$ 由零变负时, 由于电感 $L$ 很大, 电流不能跃变, 故仍维持 $VT_1$ 、 $VT_4$ 继续导通, 直到 $\omega t = \pi + \alpha$ ,  $VT_2$ 、 $VT_3$ 由于门极上加有 $U_{G2}$ 、 $U_{G3}$ 而开始触发导通时为止。在 $u_2$ 为负半周时, 由于 $VT_1$ 、 $VT_4$ 继续导通, 使 $VT_2$ 、 $VT_3$ 承受正向电压, 所以一旦获得了触发, 便会立即导通, 电流 $i_d$ 流过负载。 $VT_3$ 、 $VT_2$ 导通后, 就把电压 $u_2$ 反向加到 $VT_1$ 、 $VT_4$ 上, 同时使这两个晶闸管关断。那么什么时候 $VT_2$ 、 $VT_3$ 又被关断,  $VT_1$ 、 $VT_4$ 又重新导

通,即在什么时候换流(换相)呢?从图1-11b、c、d可看出,是在 $\omega t=2\pi+\alpha$ 时,即又产生 $U_{G1}$ 、 $U_{G4}$ 的时刻。显然,两组触发脉冲要相互间隔 $180^\circ$ 才能符合要求。以后不断重复循环。从图1-11c中还可以看出,触发脉冲电压 $U_G$ 的移相范围只能是 $90^\circ$ ,因为当 $\alpha=90^\circ$ 时, $U_d=0$ 。图1-11f虽以 $VT_1$ 为例表示 $u_{AK1}$ ,但可得到各晶闸管承受正、反向电压的最大值都是 $\sqrt{2}U_2$ 。

#### 四、无源逆变电路

无源逆变电路(直流—交流变换电路),就是将直流电变成不同电压和频率的交流电。无源逆变电路的器件在大容量时当前一般采用晶闸管,它存在着在直流电压下的换流问题。在中小容量时通常采用功率晶体管,由于它是自关断器件,换流问题即关断问题相对简单了。无源逆变电路可分成单相、三相逆变电路,应用于交流调速系统、中频电源、不间断电源(不停电电源)等。

下面分析采用功率晶体管的逆变电路。

##### (一) 单相桥式无源逆变电路

根据图1-12a所示的单相桥式逆变电路来说明无源逆变的原理。令 $V_1$ 、 $V_4$ 导通,同时使 $V_2$ 、 $V_3$ 关断,如图1-12b所示,在电压为 $U$ 的直流电源的作用下,流过负载 $R$ 的电流 $i$ 是从 $a$ 点流向 $b$ 点的,如忽略 $V_1$ 和 $V_4$ 的正向压降,得电压 $u_R=U$ 。当到达 $t_1$ 时刻(图1-12d),使 $V_2$ 、 $V_3$ 导通,同时又迫使 $V_1$ 、 $V_4$ 关断(图1-12c),于是电流 $i$ 从 $b$ 点流向 $a$ 点,得 $u_R=-U$ 。这样不断地控制成对的晶体管轮流转换,则可实现从直流到交流的变换,即完成逆变任务,其输出电压波形如图1-12d所示。交流电的频率即晶体管轮换的频率。

我们知道:晶体管的导通与关断,在集电极接到直流电源正极且此电路是共发射极电路的条件下,是依靠控制基极电压的正与负来实现的。

##### (二) 三相桥式并联逆变电路

通常情况下,负载是三相的,因而要求有三相逆变电路。在直—交系统中,较多采用三相桥式并联逆变电路,它是在单相并联逆变电路的基础上演变而成的。

三相交流电压是指三个在相位上彼此相差 $120^\circ$ 、频率相同、且幅值相等的电压。而线电压应超前于相应的相电压 $30^\circ$ ,其幅值为相电压幅值的 $\sqrt{3}$ 倍。

1.  $120^\circ$ 导电型三相逆变电路 如图1-13a所示,按照在正常工作时,任何瞬间均有两个晶体管同时导通的规律(图1-13d),使相应的晶体管轮流导通与截止,从而实现由直流到交流的逆变。

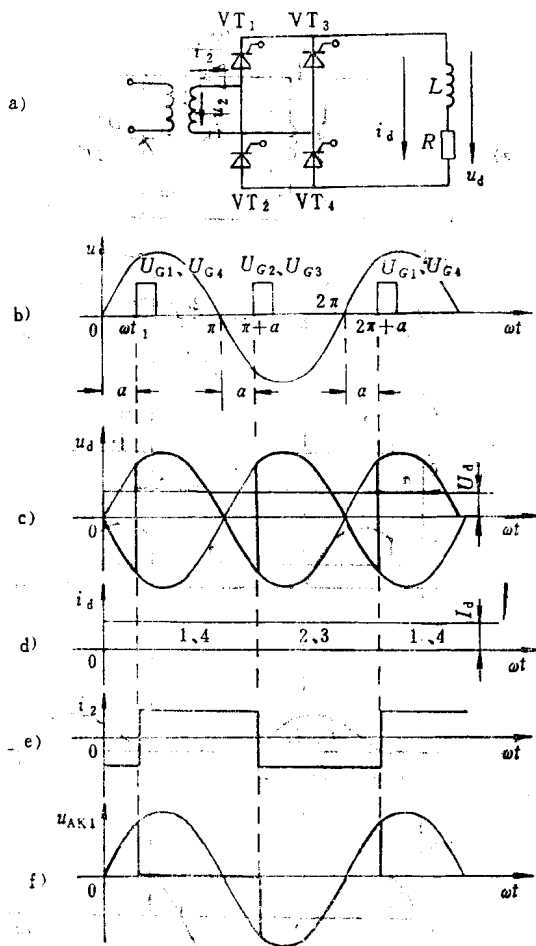


图1-11 电感性负载时单相桥式全控整流电路及其电压、电流波形

在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 期间(图1-13b),  $V_1$ 、 $V_2$ 导通, 直流电源向U、W两相负载供电。若以N点为参考点, 它们各得 $u_{UN} = U_d/2$ ,  $u_{VN} = 0$ ,  $u_{WN} = -U_d/2$ 。在 $60^\circ \sim 120^\circ$ 期间,  $V_3$ 、 $V_4$ 导通, 直流电源向V、W两相负载供电, 得 $u_{UN} = 0$ ,  $u_{VN} = U_d/2$ ,  $u_{WN} = -U_d/2$ , ..., 到达 $300^\circ \sim 360^\circ$ 期间(图1-13c), 得 $u_{UN} = U_d/2$ ,  $u_{VN} = -U_d/2$ ,  $u_{WN} = 0$ 。

根据图1-13d所给出的各晶体管导通顺序, 可以画出各相电压 $u_{UN}$ 、 $u_{VN}$ 、 $u_{WN}$

的波形, 如图1-13e所示。如果把这三个相电压波形等效成三相正弦波, 则如图1-13e中虚线所示, 它们的相位互差 $120^\circ$ 但频率相同, 幅值相等, 符合我们通常所说的三相交流的定义。下面分析各线电压的情况。从图1-13e可以直接看出: 在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 期间,  $u_{UV} = u_{UN} - u_{VN} = U_d/2$ ,  $u_{VW} = u_{VN} - u_{WN} = U_d/2$ ,  $u_{WU} = u_{WN} - u_{UN} = -U_d$ 。根据上述方法可以求出其他期间的各线电压值。它们的波形也画在图1-13e中, 如把它们等效成正弦波也可以得到如虚线所示的波形。

各相、线电压有效值是多少? 彼此是否符合 $\sqrt{3}$ 倍的关系? 根据图1-13e所示的波形, 相电压用 $u_{UN}$ 、线电压用 $u_{UV}$ 来计算, 可求出线电压有效值是相电压有效值的 $\sqrt{3}$ 倍。

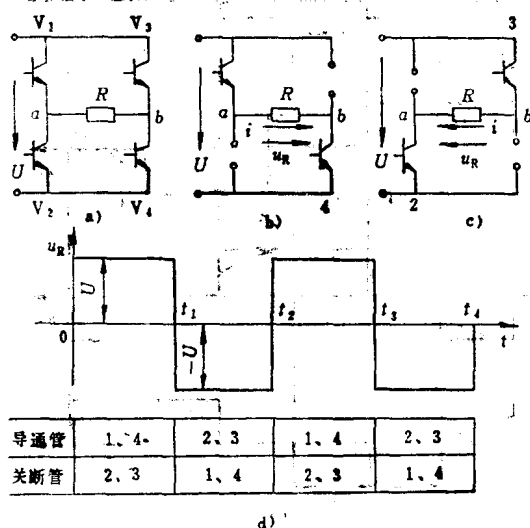


图1-12 无源逆变的原理

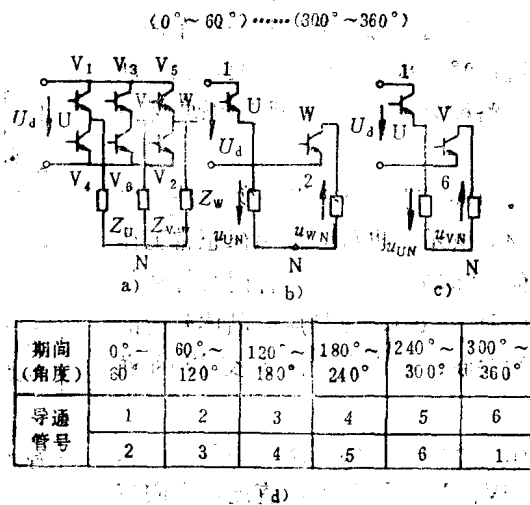


图1-13 120°导电型三相逆变电路晶体管导通的情况及输出电压波形

综上所述, 还可得出以下结论:

① 交流电压的幅值和频率决定于直流电源电压值 $U_d$ 以及使得各晶体管轮流导通的频率。

② 每隔 $60^\circ$ 有一个晶体管换流, 每个晶体管导通 $120^\circ$ 后才换流的。

③ 根据图1-13 a 的原理电路, 按照图1-13 d 各晶体管的导通顺序, 每一瞬间有两个晶体管同时导通, 每个晶体管在一个周期内导通 $120^\circ$ , 从而实现直—交逆变, 所以此电路称为 $120^\circ$ 导电型三相逆变电路。

2.  $180^\circ$ 导电型三相逆变电路 如图1-14 a 所示, 也可以按照在正常工作任何瞬间均有三个晶体管同时导通的规律(图1-14 d), 使相应的晶体管轮流导通与关断, 实现由直流到交流的逆变。

在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 期间(图1-14 b), 使晶体管 $V_5$ 、 $V_6$ 、 $V_1$ 导通, 直流电源向三相对称负载供电, 此时U、W两相负载并联, 再与V相负载串联。若以N点为参考点, U、W相电压为 $u_{UN}=u_{WN}=U_d/3$ , 而V相电压为 $u_{VN}=-2U_d/3$ , …… , 到达 $300^\circ \sim 360^\circ$ 期间(图1-14 c), 使晶体管 $V_4$ 、 $V_5$ 、 $V_6$ 导通, 直流电源向三相负载供电, 此时W相负载与U相和V相的并联负载串联, 于是得到 $u_{UN}=u_{VN}=-U_d/3$ ,  $u_{WN}=2U_d/3$ , 根据图1-14 d 所给出的各晶体管导通顺序, 可以画出各相电压 $u_{UN}$ 、 $u_{VN}$ 、 $u_{WN}$ 的波形, 如图1-14 e 所示。

下面分析线电压的情况, 在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 期间,  $u_{UV}=u_{UN}-u_{VN}=U_d$ ,  $u_{VW}=u_{VN}-u_{WN}=-U_d/3-2U_d/3=-U_d$ , 而 $u_{WU}$ 因U、W两相互连成一点, 故为零。在 $300^\circ \sim 360^\circ$ 期间, 因U、V两相并联,  $u_{UV}=0$ , 于是得 $u_{VW}=-U_d$ ,  $u_{WU}=U_d$ 。根据上述方法可求出其他期间线电压的值, 线电压的波形也画在图1-14 e 之中。如把线、相电压等效成正弦波, 同样得到虚线所示的三相电压波

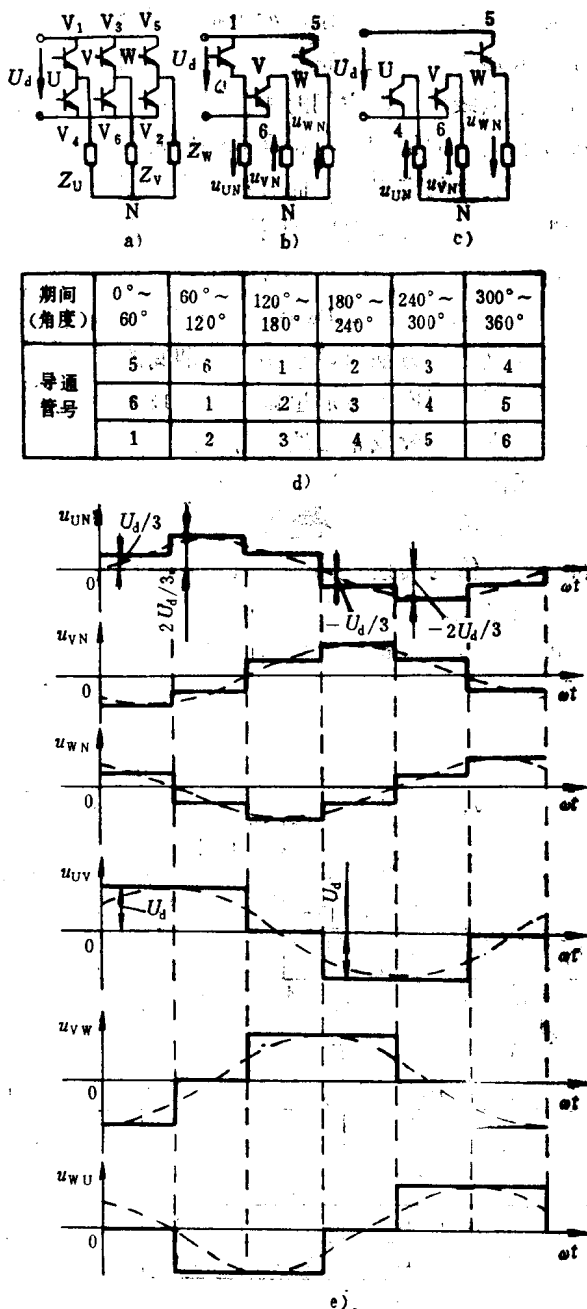


图1-14  $180^\circ$ 导电型三相逆变电路晶体管导通的情况及其输出电压波形

形。

根据相、线电压波形,相电压用电压 $u_{UN}$ 、线电压用电压 $u_{UV}$ 来计算,也可求出线电压是相电压的 $\sqrt{3}$ 倍,且超前相电压 $30^\circ$ 。

综上所述,可得:交流电压的幅值和频率决定于 $U_d$ 的大小和使各晶体管轮换导通的频率,每隔 $60^\circ$ 有一个晶体管换流,使每个晶体管导通 $180^\circ$ ,故称此电路为 $180^\circ$ 导电型三相逆变电路。

为了使逆变电路获得输出交流电压更接近于正弦,还有多种多样的控制方法和电路型式。

## 五、直流斩波电路

斩波电路的作用是:利用一个或几个晶闸管或晶体管等作为无触点开关,接于直流电源与负载之间,使输出波形是电源电压波形的一部分,从而能得到可调的加到负载上的直流平均电压。具有此种功能的电路,称为直流斩波电路,或称为直流断续电路,它是直流一直流变换电路。直流斩波电路应用于铁道电气机车、城市电车、工矿电机车等。分析上述电路中晶闸管的换流情况是其主要问题之一,解决的办法,一般要采用强迫换流电路。

直流斩波电路的原理如图1-15 a 所示,开关S(由电力半导体器件组成)起着接通、关断电源的作用。若按改变负载两端的直流平均电压 $U$ 的不同调制方法,斩波电路可以分为三类:

1. 脉冲宽度调制斩波电路(图1-15 b) 电路开关S的通断频率(周期 $T$ )是固定的,但接通时间(即脉冲宽度) $T_s$ 是可变的,反映出直流平均电压 $U$ 可调。

2. 脉冲频率调制斩波电路(图1-15 c) 电路的脉冲宽度,即接通时间 $T_s$ 是恒值,而脉冲的频率(周期 $T$ )是变化的,这样也可以改变直流平均电压 $U$ 。

3. 混合调制斩波电路(图1-15 d) 电路的脉冲宽度与脉冲频率都可改变,这样直流平均电压 $U$ 的调节范围较宽,但控制线路比较复杂。

也可以按直流电源与负载进行能量交换的型式分成两类:

1. A型直流斩波电路(图1-16) 只有直流电源向负载输送能量,而没有负载向电源反馈能量的斩波电路,称为A型直流斩波电路,如图1-16 a 所示。此电路反映出负载的电压与电流的方向相同都为正值的特点。图1-16 a 中,虚线框内通常采用普通晶闸管,必要时采用可关断晶闸管,这样就可省去关断用的换流电路。VD为续流二极管。电路工作原理如下:

图1-16 b 表示负载电流断续时的情况。 $0 \sim t_k$ 期间,晶闸管VT导通, $u=U_d$ 。在 $t_k$ 时刻,VT被关断。因为是感性负载,所以负载将通过续流二极管VD续流,释放能量,此时 $u=0$ 。在 $t_2$ 以后,因能量释放完毕, $i=0$ , $u=E$ ,直到下一个周期 $T$ 开始时为止。

图1-16 c 表示负载电流连续时的情况。与图1-16 b 不同,由于图1-16 c 时电路中增大了

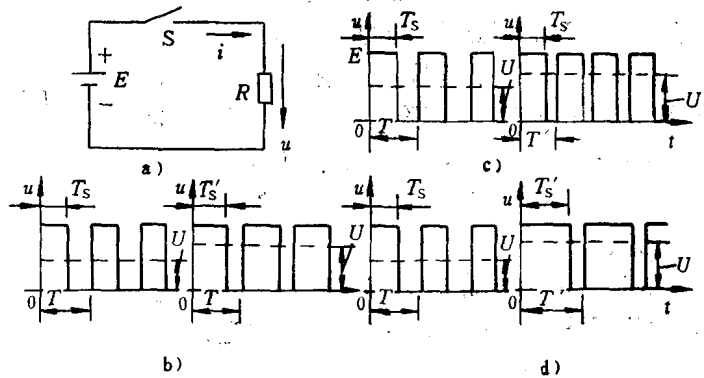


图1-15 直流斩波调制的类型