

普通高等教育“十一五”  
国家级规划教材配套教辅



Power Electronics Learning Guide, Exercise and Simulation

# 电力电子技术学习指导 习题集及仿真

裴云庆 卓放 王兆安 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套教辅

# 电力电子技术学习指导 习题集及仿真

裴云庆 卓放 王兆安 编著

刘进军 主审

由于编者水平有限，书中有欠妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

机械工业出版社 (北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑：王兆安；责任编辑：王兆安

封面设计：陈沛明；责任印制：王兆安

印刷：北京印刷厂

北京印刷厂印刷

2013年11月第1版第2次印刷

184mm×260mm·8.75印张·193千字

ISBN 978-7-111-39673-7

ISBN 978-7-89433-690-3 (光盘)

定价：33.00元 (含CD)



凡购本书，即赠光盘，页码，页码，页码

机械工业出版社

机械工业出版社

社服中心：(010) 88381000 教材网：http://www.cmpedu.com

社服部：(010) 88381000 社服部：(010) 88381000

社服部：(010) 88381000 社服部：(010) 88381000

社服部：(010) 88381000 社服部：(010) 88381000



本书是与西安交通大学王兆安教授、刘进军教授主编的《电力电子技术》(第5版)配套的学习指导用书。本书对各章学习的重点、难点进行了总结和归纳,提出了学习的基本要求。内容包括主教材中各章的章节要点、学习指导,编写了大量的例题及其详细的求解过程。针对本课程实验性强的特点,在介绍 MATLAB 软件在电力电子电路分析中的应用方法基础上,采用 MATLAB 软件环境建立了主教材中 50 种典型电路的模型,可供读者调节电路参数、观察电路波形,进一步加深对电路工作原理的理解和定量分析方法的掌握。

本书可以作为“电力电子技术”课程的学习参考书,用于学生学习本课程,也可以作为电气工程专业“电力电子技术”课程的辅助教材,适用于电气工程及其自动化专业、自动化专业以及工科引导性专业目录中的电气工程与自动化专业,也可供相近专业选用或供工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电力电子技术学习指导习题集及仿真/裴云庆等编著. —北京:机械工业出版社, 2012. 10 (2013. 11 重印)

普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套教辅

ISBN 978-7-111-39672-7

I. ①电… II. ①裴… III. ①电力电子技术—高等学校—教学参考资料 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 210388 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:于苏华 责任编辑:于苏华 王 荣

版式设计:霍永明 责任校对:王 欣

封面设计:陈 沛 责任印制:张 楠

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

2013 年 11 月第 1 版第 2 次印刷

184mm×260mm·8.75 印张·193 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-39672-7

ISBN 978-7-89433-669-9 (光盘)

定价:22.00 元(含 1CD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

# 前 言

本书是与西安交通大学王兆安教授、刘进军教授主编的《电力电子技术》(第5版)配套使用的参考书,可作为“电力电子技术”课程的辅助教材。

为了便于读者学习,本书的章节次序与主教材相同。书中对各章学习的重点、难点进行了总结和归纳,提出了学习的基本要求。内容包括教材中各章的章节要点、学习指导,编写了大量的例题及其详细的求解过程。针对本课程实验性强的特点,在介绍 MATLAB 软件在电力电子电路分析中的应用方法基础上,采用 MATLAB 软件环境建立了主教材中 50 种典型电路的模型,可供读者调节电路参数、观察电路波形,以进一步加深对电路工作原理的理解和定量分析方法的掌握。

本书第 1 章由王兆安执笔,第 3 章由卓放执笔,其余各章由裴云庆编写并负责全书的统稿。全书由刘进军教授审阅。本书在解题过程中力求方法简明、概念清楚,学习指导部分对教材各章节提出了基本要求、重点、难点及应注意的问题。

由于编者水平有限,书中有欠妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者



# 目 录

## 前言

## 第一部分 电力电子技术学习指导、习题集

第1章 绪论	1
第2章 电力电子器件	3
2.1 本章要点和学习指导	3
2.2 习题和解答	4
第3章 整流电路	7
3.1 本章要点和学习指导	7
3.2 习题和解答	8
第4章 逆变电路	23
4.1 本章要点和学习指导	23
4.2 习题和解答	24
第5章 直流-直流变流电路	28
5.1 本章要点和学习指导	28
5.2 习题和解答	29
第6章 交流-交流变流电路	35
6.1 本章要点和学习指导	35
6.2 习题和解答	37
第7章 PWM控制技术	41
7.1 本章要点和学习指导	41
7.2 习题和解答	42
第8章 软开关技术	46
8.1 本章要点和学习指导	46
8.2 习题和解答	47
第9章 电力电子器件应用的共性问题	49
9.1 本章要点和学习指导	49
9.2 习题和解答	50
第10章 电力电子技术的应用	53
10.1 本章要点和学习指导	53
10.2 习题和解答	55

## 第二部分 电力电子电路的计算机仿真

第 11 章 基于 MATLAB 的电力电子电路仿真方法 .....	58
11.1 MATLAB 软件及仿真集成环境 Simulink 简介 .....	58
11.2 常用电气系统仿真库元件及仿真模型 .....	60
第 12 章 整流电路的计算机仿真 .....	70
第 13 章 逆变电路的计算机仿真 .....	97
第 14 章 直流-直流变流电路的计算机仿真 .....	106
第 15 章 交流-交流变流电路的计算机仿真 .....	116
第 16 章 PWM 逆变电路的计算机仿真 .....	121
第 17 章 软开关电路的计算机仿真 .....	127
参考文献 .....	131

类以及应用领域等内容,是本书学习的重要基础。

本章的主要内容及要求包括:

(1) 掌握电力电子技术的概念,了解电力电子技术和信息电子技术的相同点以及它们之间的差异。

(2) 掌握根据电能的形式不同,电力电子电路所划分的四种类型,本书的学习就是围绕这四种电路进行展开,在本章学习中应初步了解各种电路的主要应用,结合后面章节的学习,进一步掌握各种电路的工作原理和分析方法。

(3) 从研究内容来看,电力电子技术分为电力电子器件制造技术和变流技术两个分支,了解两个分支的研究内容;了解电力电子技术和与其密切相关的电力学、电子学、控制理论三门学科的关系。

(4) 掌握电力电子器件分类及发展历程,在此基础上把握电力电子技术学科的发展过程及发展趋势。

(5) 了解电力电子技术在一般工业领域、交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统以及家用电器等领域中的主要应用。

## 2. 学习指导

电力电子技术的基本概念是学科的基础,理解时重点把握其中的两个关键词:电力电子器件和电能变换,这也是电力电子技术和信息电子技术及其他学科之间的主要区别。从研究内容来看,电力电子技术分为电力电子器件制造技术和变流技术两个分支,分别着重研究电力电子器件制造技术和应用技术,作为电气工程及自动化专业的学生学习时应了解器件制造技术的基础上重点学习器件的应用技术即变流技术。

电力电子电路按照输入/输出电能形式可划分为四种类型,在本章的学习中应结合其应用初步理解电路的工作过程和应用场合,为以后章节的学习打下基础。

电力学、电子学、控制理论是在理论基础、应用领域等方面和电力电子技术密切相关的学科,学习时应了解各学科之间的关系,将其他相关课程所学到的知识与本学科的学习内容相互联系,做到融会贯通,加深理解,为后续课程的学习打下良好的基础。

# 第一部分 电力电子技术学习指导、习题集

## 第1章 绪论

### 1. 本章要点

本章的主要内容及要求包括：

#### 1. 本章要点

本章主要讲述了电力电子技术学科的定义、发展历史、研究内容、相关学科、电路分类以及应用领域等内容，是本书学习的重要基础。

本章的主要内容及要求包括：

(1) 掌握电力电子技术的概念，了解电力电子技术和信息电子技术的相同点以及它们之间的差异。

(2) 掌握根据电能的形式不同，电力电子电路所划分的四种类型，本书的学习就是围绕着这四种电路进行展开，在本章学习中应初步了解各种电路的主要应用，结合后面章节的学习，进一步掌握各种电路的工作原理和分析方法。

(3) 从研究内容来看，电力电子技术分为电力电子器件制造技术和变流技术两个分支，了解两个分支的研究内容；了解电力电子技术和与其密切相关的电力学、电子学、控制理论三门学科的关系。

(4) 掌握电力电子器件分类及发展历程，在此基础上把握电力电子技术学科的发展过程及发展趋势。

(5) 了解电力电子技术在一般工业领域、交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统以及家用电器等领域中的主要应用。

#### 2. 学习指导

电力电子技术的基本概念是学科的基础，理解时重点把握其中的两个关键词：电力电子器件和电能变换，这也是电力电子技术和信息电子技术及其他学科之间的主要区别。从研究内容来看，电力电子技术分为电力电子器件制造技术和变流技术两个分支，分别着重研究电力电子器件制造技术和应用技术，作为电气工程及自动化专业的学生学习时应在了解器件制造技术的基础上重点学习器件的应用技术即变流技术。

电力电子电路按照输入/输出电能形式可划分为四种类型，在本章的学习中应结合其应用初步理解电路的工作过程和应用场合，为以后章节的学习打下基础。

电力学、电子学、控制理论是在理论基础、应用领域等方面和电力电子技术密切相关的学科，学习时应了解各学科之间的关系，将其他相关课程所学到的知识与本学科的学习内容相互联系，以做到融会贯通，加深理解，为后续课程的学习打下良好的基础。



电力电子器件是电力电子技术发展的基础，学习中可以通过半控型电力电子器件——晶闸管的发明标志学科的产生以及全控型器件的出现使现代电力电子技术的应用产生了飞跃这两点来理解。初步了解常用的电力电子器件类型以及发展趋势，通过了解器件的发展，同时把握电力电子技术学科的发展过程以及发展趋势。

在电力电子技术的应用方面，了解电力电子技术在一般工业领域、交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统以及家用电器等领域中的主要应用，以增加对本学科研究内容的了解，明确学习目标。学习中可特别以生活中经常接触的电气设备、家用电器的工作原理出发，分析设备对电能变换方面的需求及其实现方法，帮助自己建立电力电子装置的基本概念。

## 第2章 电力电子器件

### 2.1 本章要点和学习指导

#### 1. 本章要点

本章的主要内容及要求包括：

(1) 掌握电力电子器件的概念和特征、电力电子器件的工作方式及损耗的分类；了解电力电子装置的基本构成；按照器件的可控性能、驱动方式以及参与载流子类型等方面掌握电力电子器件的分类。

(2) 掌握电力二极管的结构及工作原理；了解二极管的反向恢复特性、主要参数、分类及应用场合；掌握基于有效值相等原则的电力二极管额定电流的设计方法。

(3) 了解晶闸管的结构，采用双晶体管模型分析晶闸管导通及关断条件；了解二极管的静态特性、主要参数、分类及应用场合；掌握基于有效值相等原则的晶闸管额定电流的设计方法。

(4) 了解门极可关断晶闸管(GTO)的关断原理，与晶闸管结构的差异；掌握电力场效应晶体管(MOSFET)、绝缘栅双极晶体管(IGBT)的结构、工作原理及主要特性和参数；掌握上述全控型电力电子器件优缺点及应用场合的对比。

(5) 了解功率集成电路、智能功率模块的基本概念，了解电力电子器件的发展趋势。

#### 2. 学习指导

本章首先介绍了电力电子器件的特征以及基于电力电子器件所构成的电力电子装置的基本结构，首先应从功率损耗角度(包括损耗的分类)理解电力电子器件的工作方式，建立电力电子装置结构的基本概念，以便后续章节的学习时建立知识点的关联，加深理解。

在各种具体的电力电子器件方面，本章按照不可控器件、半控型器件、典型全控型器件和其他新型器件的顺序，分别介绍各种电力电子器件的工作原理、基本特性、主要参数以及选择和使用中应注意的一些问题，而电力电子器件的驱动、保护和串/并联使用等实际应用时的具体问题将在第9章集中讲述。在这样的安排下，前面各章学习过的电力电子器件和电路的基本知识将有助于在第9章中理解器件实际应用于电路时的具体问题。

这里要指出的是，和学习、选用晶体管和集成电路等信息电子电路器件时一样，我们在学习电力电子器件时，最重要的是掌握其基本特性。此外，在学习和将来选用电力电子器件时，还应该注意了解各国、各厂家对各种电力电子器件具体型号的命名方法，特别是要了解每种器件各个主要参数和特性曲线的意义，在使用时更要熟练掌握所选器件的具体参数和特性曲线，以及对这些参数和曲线进行修正的方法。掌握电力电子器件的型号命名法，以及其参数和特性曲线的使用方法，这是在实际中正确应用电力电子器件的两个基本要求。

此外,了解电力电子器件的半导体物理结构和基本工作原理对于更好地理解 and 掌握这些器件的特性和使用方法很有帮助。许多电力电子器件都有其相对应的用于处理信息的电子器件。例如,电力二极管、电力晶体管 and 电力场效应晶体管就分别与处理信息的二极管、双极型晶体管和场效应晶体管相对应。从半导体物理结构和工作原理上来讲,这些电力电子器件与其在信息电子器件中的对应者基本是相同的;但是为了能承受高电压和大电流,这些电力电子器件又具有与其对应的信息电子器件所不同之处。而不同的电力电子器件在半导体物理结构上用来形成承受高电压和大电流能力的办法也有相同之处。这些都应该在学习电力电子器件的半导体物理结构和基本工作原理时加以注意。

## 2.2 习题和解答

1. 电力二极管与信息电子电路二极管的特性有哪些差异?

答:电力二极管为了建立承受高电压和大电流的能力,首先采用垂直导电结构,大大增加了通过电流的有效面积,提高器件的通流能力。其次为承受高电压,在P区和N区之间增加了低掺杂N区,由于掺杂浓度低,其中的电场强度近似不变,在同样电压条件下,降低了PN结中的电场强度峰值,保证器件不发生击穿现象。低掺杂N区高电阻率对正向导通压降的影响由电导调制效应来解决,即当器件正向导通电流较大时,由P区注入并累积在低掺杂N区的载流子使该区域的导通电阻显著下降。

2. 二极管在恢复阻断能力时为什么会形成反向电流和反向电压过冲?这种反向电流在电路使用中会带来什么问题?

答:由于电力二极管电导调制效应的影响,使二极管正向导通时在低掺杂N区中存储了大量的载流子,在施加反压时这些载流子在电压的作用下反向移动,就会形成反向电流。当存储的载流子被抽尽后,反向电流迅速衰减至零,器件关断。在反向电流衰减过程中,在外部电路电感(包括线路寄生电感等)上产生感应电压试图维持电流不变,由于反向电流衰减速度很快,从而使二极管两端产生较高的反向电压过冲。二极管的反向电流在电路中 will 引起其他电力电子器件的过电流、额外的功率损耗以及二极管的反向电压尖峰。

3. 按照特性的不同,二极管可分为哪几种类型,它们的应用场合是什么?

答:按照反向耐压及反向恢复特性的不同,二极管可分为三种类型:

(1) 普通二极管,反向恢复时间较长,正向导通压降较低,其正向电流定额和反向电压定额却可以达到很高,多用于开关频率不高(1kHz以下)的整流电路中。

(2) 快恢复二极管,恢复过程很短(通常在 $5\mu\text{s}$ 以下),正向导通压降高于普通二极管,简称快速二极管,其反向电压定额多数在200~2000V之间,主要用于开关频率较高的电力电子装置中。

(3) 肖特基二极管,这是以金属和半导体接触形成的势垒为基础的二极管。与以PN结为基础的电力二极管相比,肖特基二极管的优点在于:反向恢复时间很短(10~40ns),正向恢复过程中也不会有明显的电压过冲;在反向耐压较低的情况下其正向压降也很小,明显低于快恢复二极管;肖特基二极管的弱点在于:反向漏电流较大且对温度敏



感,当所能承受的反向耐压提高时,其正向压降也会高得不能满足要求,因此多用于200V以下的低压场合。

4. 晶闸管导通和关断的条件是什么?

答:使晶闸管导通的条件是:晶闸管承受正向阳极电压的条件下,在晶闸管门极施加触发电流(脉冲)。即阳极与阴极间电压  $u_{AK} > 0$  且门极与阴极间电压  $u_{CK} > 0$ 。晶闸管导通后维持晶闸管导通的条件是使晶闸管的电流大于能保持晶闸管导通的最小电流,即维持电流。

晶闸管导通后,门极失去控制作用,要使晶闸管由导通变为关断,可利用外加电压和外电路的作用使流过晶闸管的电流降到接近于零的某一数值以下,即降到维持电流以下,便可使导通的晶闸管关断。

5. 图2-1中的阴影部分为晶闸管处于通态区间的电流波形,电流最大值为  $I_m$ ,试计算波形的电流平均值  $I_d$  与电流有效值  $I_1$ 。如果考虑安全裕量为2,应选择额定电流为多大的晶闸管?

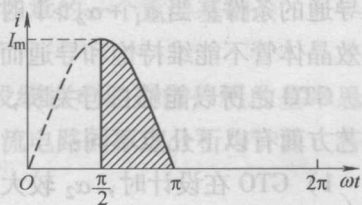


图2-1 晶闸管导电波形

解:根据平均值及有效值的定义可得:

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{2\pi}$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{2\sqrt{2}}$$

考虑安全裕量时,根据有效值相等原则选择晶闸管的额定电流为

$$I_{T(AV)} = \frac{2I_1}{1.57} = \frac{I_m}{1.57\sqrt{2}} = 0.45I_m$$

6. 图2-2为某电路中MOSFET的工作电流波形,电流最大值为10A,设MOSFET的导通电阻  $R_{dson} = 0.5\Omega$ ,该电路中每次开关能量损耗为  $E_s = 0.2\text{mJ}$ ,求当器件开关频率为100kHz时,器件的功率损耗。

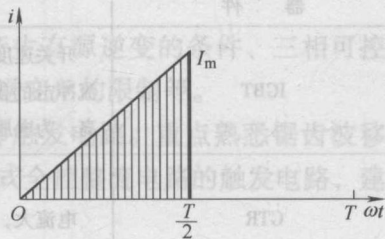


图2-2 MOSFET 电流波形

解:MOSFET流过的电流有效值为

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} \left(\frac{2I_m t}{T}\right)^2 dt} = \frac{I_m}{\sqrt{6}} = 4.08\text{A}$$

MOSFET的通态损耗为

$$P_{on} = I_1^2 R_{dson} = 4.08^2 \times 0.5\text{W} = 8.32\text{W}$$

MOSFET的开关损耗为

$$P_s = fE_s = 100 \times 10^3 \times 0.2 \times 10^{-3}\text{W} = 20\text{W}$$

MOSFET的总功率损耗为

$$P = P_{on} + P_s = (8.32 + 20)\text{W} = 28.32\text{W}$$

7. 电力 MOSFET 及 IGBT 均为电压驱动型器件, 其驱动电路是否需要提供驱动电流及驱动功率?

答: 电力 MOSFET 及 IGBT 均为电压驱动型器件, 在静态条件下栅极输入阻抗很高, 因此驱动电路几乎不需要提供驱动电流及驱动功率。但由于电力 MOSFET、IGBT 存在输入电容  $C_{in}$ , 当需要器件开通或关断时需要驱动电路对输入电容充电或放电, 以建立和消除驱动电压, 因此当器件开通和关断瞬间, 驱动电路需要提供驱动电流, 当需要器件开关速度很快时, 驱动电路需要提供的脉冲驱动电流峰值也很高。

8. GTO 和普通晶闸管结构有什么不同, 为什么 GTO 能够具有自关断能力?

答: GTO 和普通晶闸管同为 PNP 结构, 由  $P_1N_1P_2$  和  $N_1P_2N_2$  构成两个晶体管  $V_1$ 、 $V_2$ , 分别具有共基极电流增益  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ , 由普通晶闸管的分析可得,  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$  是器件临界导通的条件; 当  $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$  时, 两个等效晶体管过饱和而导通; 当  $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$  时, 两个等效晶体管不能维持饱和导通而关断。

GTO 之所以能够自行关断, 而普通晶闸管不能, 是因为 GTO 与普通晶闸管在设计和工艺方面有以下几点不同:

- 1) GTO 在设计时,  $\alpha_2$  较大, 这样晶体管  $V_2$  控制灵敏, 使 GTO 易于关断;
- 2) GTO 导通时的  $\alpha_1 + \alpha_2$  更接近于 1, 普通晶闸管  $\alpha_1 + \alpha_2 \geq 1.15$ , 而 GTO 则为  $\alpha_1 + \alpha_2 \approx 1.05$ , GTO 的饱和程度不深, 接近于临界饱和, 这样为门极控制关断提供了有利条件;
- 3) 多元集成结构使每个 GTO 元阴极面积很小, 门极和阴极间的距离大为缩短, 使得  $P_2$  极区所谓的横向电阻很小, 从而使从门极抽出较大的电流成为可能。

9. 试说明 IGBT、GTR、GTO 和电力 MOSFET 各自的优缺点。

解: 对 IGBT、GTR、GTO 和电力 MOSFET 的优缺点的比较见表 2-1 所示。

表 2-1 IGBT、GTR、GTO 和电力 MOSFET 的优缺点的比较

器 件	优 点	缺 点
IGBT	开关速度较高, 开关损耗小, 具有耐脉冲电流冲击的能力, 通态电压降较低, 输入阻抗高, 为电压驱动, 驱动功率小	开关速度低于电力 MOSFET, 电压、电流容量不及 GTO
GTR	电流大, 通流能力强, 饱和电压降低	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
GTO	电压、电流容量大, 适用于大功率场合, 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
电 力 MOSFET	开关速度快, 输入阻抗高, 热稳定性好, 所需驱动功率小且驱动电路简单, 工作频率高, 不存在二次击穿问题	电流容量小, 耐压低, 一般只适用于功率较小的电力电子装置

## 第3章 整流电路

### 3.1 本章要点和学习指导

#### 1. 本章要点

整流电路是电力电子电路中出现和应用最早的形式之一，本章讲述了整流电路及其相关的一些问题，是本书的一个重要组成部分，也是学习后面各章的一个重要基础。

本章的主要内容及要求包括：

(1) 可控整流电路，重点掌握：电力电子电路作为分段线性电路进行分析的基本思想、单相全控桥式整流电路的原理与计算、三相全控桥式整流电路的原理分析与计算、各种负载对整流电路工作情况的影响。

(2) 电容滤波的不可控整流电路的工作情况，重点了解其工作特点。

(3) 与整流电路相关的一些问题，包括：

1) 变压器漏抗对整流电路的影响。重点建立换相电压降、重叠角等概念，并掌握相关的计算，熟悉漏抗对整流电路工作情况的影响。

2) 整流电路的谐波和功率因数分析。重点掌握谐波的概念、各种整流电路产生谐波情况的定性分析、功率因数分析的特点、各种整流电路的功率因数分析。

(4) 大功率可控整流电路的接线形式及特点。熟悉双反星形可控整流电路的工作情况，建立整流电路多重化的概念。

(5) 可控整流电路的有源逆变工作状态。重点掌握产生有源逆变的条件、三相可控整流电路有源逆变工作状态的分析计算、逆变失败及最小逆变角的限制等。

(6) 晶闸管可控整流电路等相控电路的相位控制，即触发电路。重点熟悉锯齿波移相触发电路的原理，了解集成触发芯片及其组成的三相桥式全控整流电路的触发电路，建立同步的概念，掌握同步电压信号的选取方法。

#### 2. 学习指导

整流电路的学习可从各种电路的基本分类开始，注意目前主要的分类方法：按组成的器件可分为不可控、半控、全控三种电路；按电路结构可分为桥式电路和零式电路；按交流输入相数分为单相电路和多相电路；按变压器二次电流的方向是单向或双向，可分为单拍电路和双拍电路。

首先应该注意最基本最常用的几种可控整流电路，分析和研究其工作原理、基本关系，以及负载性质对整流电路的影响，然后集中分析变压器漏抗对整流电路的影响，对目前应用极其广泛的电容滤波的二极管整流电路，注重其特性分析和输入、输出的主要物理量波形分析并对其波形特点进行总结。在上述分析讨论的基础上，对整流电路的谐波和功



率因数进行分析, 主要注意其与普通线性电路之间的区别。对于应用于大功率场合的整流电路要注重其要求, 根据要求不同, 组成的大功率电路也有其不同的特点。最后重点学习模拟电路组成的整流电路相位控制实现。

学习整流电路的工作原理时, 要根据电路中的开关器件通、断状态及交流电源电压波形和负载的性质, 分析其输出直流电压, 电路中各元器件的电压和电流波形。在重点掌握各种整流电路中的波形分析方法的基础上, 得到整流输出电压与移相触发延迟角之间的关系。

## 3.2 习题和解答

1. 带续流二极管的单相半波可控整流电路如图3-1所示,  $R=5\Omega$ ,  $L$  足够大,  $U_2=220\text{V}$ , 求触发延迟角  $\alpha=30^\circ$  时输出电压和电流的平均值  $U_d$ 、 $I_d$ , 并画出  $u_d$ 、 $i_d$ 、 $u_{VT}$ 、 $i_{VT}$  和  $i_{VD}$  的波形。

$$\text{解: (1) } U_d = \frac{\sqrt{2}U_2}{2\pi}(1 + \cos\alpha) = 92.4\text{V}$$

$$I_d = \frac{U_d}{R} = 18.5\text{A}$$

(2)  $u_d$ 、 $i_d$ 、 $u_{VT}$ 、 $i_{VT}$  和  $i_{VD}$  的波形如图3-2所示。

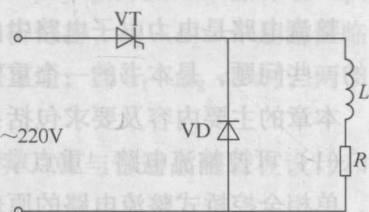


图3-1 带续流二极管的单相半波可控整流电路

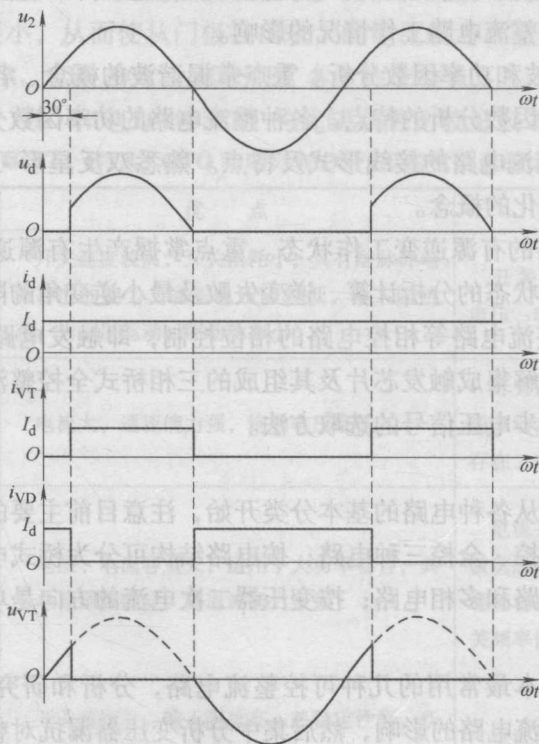


图3-2 习题1波形图

2. 带续流二极管的单相桥式全控整流电路如图3-3所示,  $U_2 = 100V$ ,  $R = 10\Omega$ , 假设  $L$  足够大,  $\alpha = 60^\circ$ , 求:

(1) 输出电压平均值  $U_d$ 、输出电流平均值  $I_d$ 、变压器二次电流有效值及其二次侧容量;

(2) 考虑安全裕量, 计算晶闸管的额定电压和额定电流;

(3) 画出  $u_d$ 、 $i_d$ 、 $i_2$ 、 $i_{VT1}$  和  $u_{VT1}$  的波形。

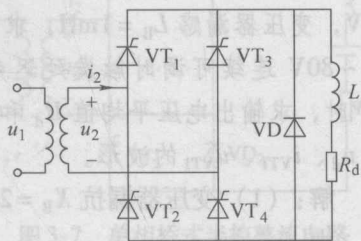


图 3-3 带续流二极管的单相桥式全控整流电路

解: (1)  $U_d = 0.9U_2 \frac{1 + \cos\alpha}{2} = 67.5V$

$$I_d = \frac{U_d}{R} = 6.75A$$

变压器二次电流有效值为  $I_2 = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}} I_d = 5.5A$

变压器二次侧容量  $S = U_2 I_2 = 550V \cdot A$

(2) 晶闸管承受的最大反向电压为  $\sqrt{2}U_2 = 141.4V$

流过每个晶闸管的电流的有效值为  $\sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi}} I_d = 3.9A$

故晶闸管的额定电压为  $U_N = (2 \sim 3) \times 141.4V = (283 \sim 424)V$

晶闸管的额定电流为  $I_N = \frac{(1.5 \sim 2) \times 3.9}{1.57} A = (3.73 \sim 5) A$

(3)  $u_d$ 、 $i_d$ 、 $i_2$ 、 $i_{VT1}$  和  $u_{VT1}$  的波形如图 3-4 所示。

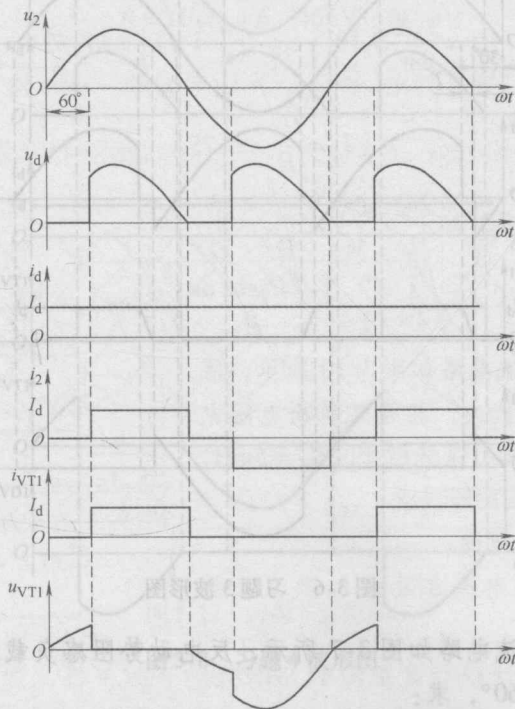


图 3-4 习题 2 波形图

3. 单相全波可控整流电路如图 3-5 所示, 反电动势阻感负载,  $R = 2\Omega$ ,  $L$  足够大,  $U_2 = 100V$ ,  $E = 40V$ , 变压器漏感  $L_B = 1mH$ , 求当输出电压平均值为  $50 \sim 80V$  连续可调时触发延迟角  $\alpha$  的范围; 当  $\alpha = 30^\circ$  时, 求输出电压平均值  $U_d$  和换相重叠角  $\gamma$ , 并画出  $u_d$ 、 $i_{VT1}$ 、 $u_{VT1}$  的波形。

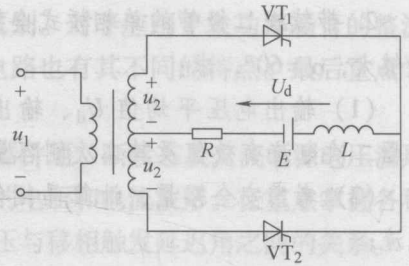


图 3-5 单相全波可控整流电路

解: (1) 变压器漏抗  $X_B = 2\pi f L_B = 0.1\pi\Omega$

$$\left. \begin{aligned} U_d &= \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos\alpha - \frac{X_B I_d}{\pi} \\ I_d &= \frac{U_d - E}{R} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

可得, 当  $U_d = 50V$  时,  $\alpha$  取最大值,  $\alpha_{max} \approx 55.9^\circ$ ; 当  $U_d = 80V$  时,  $\alpha$  取最小值,  $\alpha_{min} \approx 24.4^\circ$ , 因此  $\alpha$  的取值范围为  $24.4^\circ \sim 55.9^\circ$ 。

当  $\alpha = 30^\circ$  时, 由式 (1) 得  $U_d = 76.2V$ ,  $I_d = 18.1A$ ;

由  $\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{I_d X_B}{\sqrt{2} U_2}$  得,  $\gamma = 4.3^\circ$ 。

(2)  $u_d$ 、 $i_{VT1}$ 、 $u_{VT1}$  的波形如图 3-6 所示。

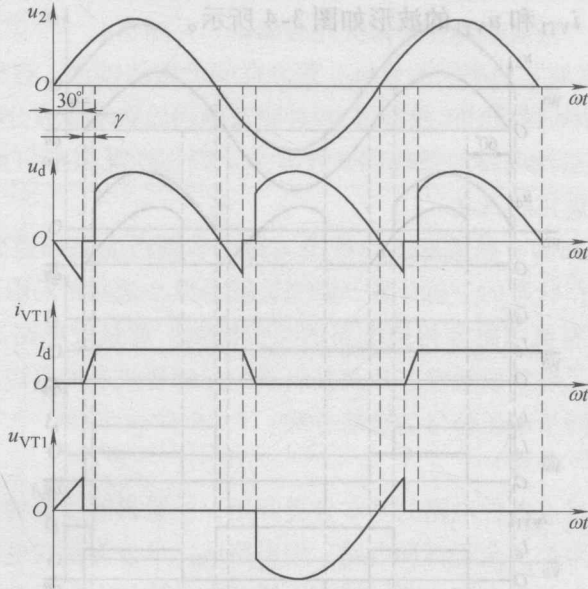


图 3-6 习题 3 波形图

4. 单相桥式半控整流电路如图 3-7 所示, 反电动势阻感负载,  $U_2 = 110V$ ,  $E = 60V$ ,  $R = 2\Omega$ ,  $L$  足够大,  $\alpha = 60^\circ$ , 求:

(1) 输出电压和输出电流的平均值  $U_d$ 、 $I_d$ ;



(2) 考虑裕量, 确定开关器件的额定电压和额定电流;

(3) 画出  $u_d$ 、 $i_d$ 、 $i_{VT1}$ 、 $u_{VT1}$ 、 $u_{VD1}$  的波形。

解: (1)  $U_d = 0.9U_2 \frac{1 + \cos\alpha}{2} = 74.25V$

$$I_d = \frac{U_d - E}{R} = 7.125A$$

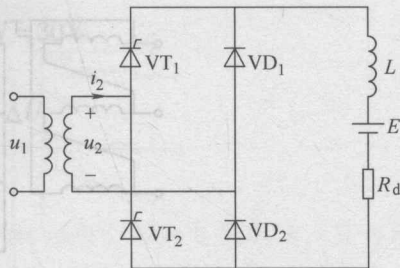


图 3-7 单相桥式半控整流电路

(2) 晶闸管承受的最大反向电压为  $\sqrt{2}U_2 = 110\sqrt{2}V$

流过晶闸管的电流的有效值为  $I_{VT} = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi}} I_d \approx 4.11A$

故晶闸管的额定电压为

$$U_N = (2 \sim 3) \times 110\sqrt{2}V = (311 \sim 466.69)V$$

晶闸管的额定电流为

$$I_N = (1.5 \sim 2) \times 4.11A / 1.57 = (3.93 \sim 5.24)A$$

(3)  $u_d$ 、 $i_d$ 、 $i_{VT1}$  和  $u_{VD1}$  的波形如图 3-8 所示。

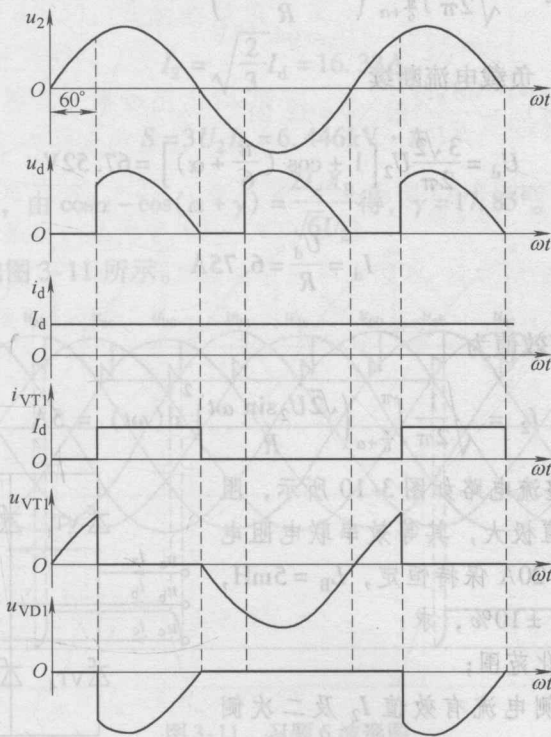


图 3-8 习题 4 波形图

5. 三相半波可控整流电路如图 3-9 所示, 阻性负载,  $U_2 = 100V$ ,  $R = 10\Omega$ , 当  $\alpha = 30^\circ$  和  $\alpha = 60^\circ$  时, 求取负载电压和电流的平均值  $U_d$ 、 $I_d$  及变压器二次电流有效值。