

第二批国家级一流本科课程申报书

(线下课程)

课程名称：电力电子技术

专业类代码：0806

课程负责人：薛荣辉

联系电话：18049278995

申报学校：西安航空学院

填表日期：2021年5月13日

推荐单位：陕西省教育厅

中华人民共和国教育部制
二〇二一年四月



填报说明

1.专业类代码指《普通高等学校本科专业目录（2020）》中的专业类代码（四位数字）。

2.以课程团队名义申报的，课程负责人为课程团队牵头人；以个人名义申报的，课程负责人为该课程主讲教师。团队主要成员一般为近5年内讲授该课程教师。

3.申报课程名称、所有团队主要成员须与教务系统中已完成的学期一致，并须截图上传教务系统中课程开设信息。


4.文中○为单选；□可多选。

5.文本中的中外文名词第一次出现时，要写清全称和缩写，再次出现时可以使用缩写。

6.具有防伪标识的申报书及申报材料由推荐单位打印留存备查，国家级评审以网络提交的电子版为准。

7.涉密课程或不能公开个人信息的涉密人员不得参与申报。

一、课程基本信息

课程名称	电力电子技术	是否曾被推荐	○是 √否
课程负责人	薛荣辉		
负责人所在单位	西安航空学院		
课程编码+选课编码 (教务系统中的编码)	B0311980 B1103T350801		
课程分类	○通识课 ○公共基础课 √专业课		
	□思想政治理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 创新创业教育课 □教师教育课 □实验课		
课程性质	√必修 ○选修		
开课年级	三年级		
面向专业	电气工程及其自动化		
学时	56		
学分	3.5		
先修(前序)课程名称	电路分析 模拟电子技术 单片机 自动控制原理		
后续课程名称	电力拖动自动控制系统		
主要教材	<p>《电力电子技术》第五版, ISBN78-7-111-26806-2, 王兆安, 刘进军, 机械工业出版社, 2009.5</p>  <p>图书在版编目(CIP)数据 电力电子技术/王兆安, 刘进军主编. —5版. —北京: 机械工业出版社, 2009.5 (2013.1重印) 普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 普通高等教育电气工程及其自动化系列教材 ISBN 978-7-111-26806-2 I. ①电… II. ①王…②刘… III. 电力电子技术—高等学校—教材 IV. TM1 中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第063767号 机械工业出版社(北京东长安街22号 邮政编码100007) 责任编辑: 于苏华 王雅新 版式设计: 张永明 责任校对: 郭晓芳 封面设计: 王洪波 北京机械工业出版社印刷厂 2009年1月第5版第36次印刷 184mm×260mm 17.75印张 438千字 标准书号: ISBN 978-7-111-26806-2 定价: 39.00元 电话服务: 010-88361066 机工官网: www.cmpbook.com 010-88379833 机工官博: weibo.com/cmp1952 010-88362629 企 业 邮 箱: www.gdbook.com 群发邮箱: cmp@vip.sina.com 机工教育服务网: www.cmpedu.com</p>		

2020年2月24日—2020年6月12日

教师: 薛采萍 [200307002]的课表
2019-2020学年度2学期

节次/周次	星期一	星期二	星期三	星期四
第一节		电力电子技术B (电气工程195A) (1-12, 课程D1320 B1103T350801.02)		电力电子技术B (电气工程194A) (1-12, 课程D1330 B1103T350801.01)
第二节		电力电子技术B (电气工程195A) (13-14, 电力电子与调速实验室 B1103T350801.02)		电力电子技术B (电气工程194A) (13-14, 电力电子与调速实验室 B1103T350801.01)
第三节		电力电子技术B (电气工程194A) (1-12, 课程D1234 B1103T350801.01)		电力电子技术B (电气工程195A) (1-12, 课程D1320 B1103T350801.02)
第四节		电力电子技术B (电气工程194A) (13-14, 电力电子与调速实验室 B1103T350801.01)		电力电子技术B (电气工程195A) (13-14, 电力电子与调速实验室 B1103T350801.02)
第五节				
第六节				
第七节				
第八节				
第九节				
第十节				
第十一节				

课程表(1个)

教师: 范晓涛 [201003011]的课表
2019-2020学年度2学期

节次/周次	星期一	星期二	星期三	星期四
第一节	电气工程创新方法训练 (电气工程194A 电气工程195A) (1-8, 课程D1320 B1103T010782.01)		电力电子技术B (电气工程2116) (13-14, 电力电子与调速实验室 B0311980.02)	电力电子技术B (电气工程2116) (13-14, 电力电子与调速实验室 B0311980.02)
第二节			电力电子技术B (电气工程2116) (1-5, 10-12, 15-17, 课程D1322 B0311980.02)	电力电子技术B (电气工程2116) (9, 课程D1316 B0311980.02)
第三节	电力电子技术B (电气工程2116) (13-14, 电力电子与调速实验室 B0311980.02)		电力电子技术B (电气工程2117) (15-17, 课程D1336 B0311980.01)	电力电子技术B (电气工程2117) (13-14, 电力电子与调速实验室 B0311980.01)
第四节	电力电子技术B (电气工程2116) (1-5, 10-12, 15-17, 课程D1322 B0311980.02)		电力电子技术B (电气工程2117) (1-5, 9-12, 课程D1306 B0311980.01)	电力电子技术B (电气工程2117) (1-5, 9-12, 课程D1306 B0311980.01)
第五节	电力电子技术B (电气工程2117) (15-17, 课程D1336 B0311980.01)			电子产品创新方法训练 (电子信息2106 电子信息2105)
第六节	电力电子技术B (电气工程2117) (13-14, 电力电子与调速实验室 B0311980.01)			
第七节	电力电子技术B (电气工程2117) (1-5, 9-12, 课程D1306 B0311980.01)			

最近两期开课时间

2019年2月24日—2019年7月1日

教师: 范晓涛 [201003011]的课表
2018-2019学年度2学期

节次/周次	星期一	星期二	星期三	星期四
第一节				电力电子技术B (电气工程2105) (17-18, 电力电子与调速实验室 B0311980.02)
第二节				电力电子技术B (电气工程2105) (1-11, 19, 课程D1303 B0311980.02)
第三节		电气工程创新方法训练 (电气工程2013 电气工程183A) (1-8, 课程D1320 B0311400.02)		电力电子技术B (电气工程2014) (17-18, 电力电子与调速实验室 B0311980.03)
第四节		电力电子技术B (电气工程2014) (1-11, 19, 课程D1303 B0311980.03)		电力电子技术B (电气工程2014) (1-11, 19, 课程D1303 B0311980.03)
第五节		电力电子技术B (电气工程2015) (1-11, 19, 课程D1303 B0311980.03)		电力电子技术B (电气工程2015) (1-8, 课程D1320 B0311400.01)
第六节		电力电子技术B (电气工程2015) (17-18, 电力电子与调速实验室 B0311980.02)		电力电子技术B (电气工程2014) (18, 电力电子与调速实验室 B0311980.03)
第七节		电力电子技术B (电气工程2015) (1-11, 19, 课程D1303 B0311980.02)		
第八节		电力电子技术B (电气工程2014) (17, 电力电子与调速实验室 B0311980.03)		
第九节				
第十节				
第十一节				

教师: 肖海峰 [200704005]的课表
2018-2019学年度2学期

节次/周次	星期一	星期二	星期三	星期四
第一节				
第二节				
第三节				
第四节				
第五节		电气工程导论B (电气工程184) (1-8, 课程1311 B0211410.03)		电力电子技术B (电气工程2013 电气工程183A) (1-11, 16-18, 课程D1328 B0311980.01)
第六节		电力电子技术B (电气工程2013 电气工程183A) (1-11, 16-18, 课程D1328 B0311980.01)		电力电子技术B (电气工程181 电气工程182) (1-8, 课程D1336 B0311410.01)
第七节				
第八节				
第九节				
第十节				
第十一节				

最近两期学生人数

313

二、授课教师（教学团队）

课程团队主要成员（序号 1 为课程负责人，总人数限 5 人之内）								
序号	姓名	出生年月	单位	职务	职称	手机号码	电子邮箱	授课任务
1	薛荣辉	1978.11	电子工程学院	无	副教授	18049278995	371794914@qq.com	课程大纲制定及修订
2	肖海峰	1977.08	电子工程学院	副院长	教授	13669266358	564898936@qq.com	课程改革
3	琚晓涛	1986.09	电子工程学院	无	工程师	15902923045	394758138@qq.com	课程建设
4	马昭	1990.05	电子工程学院	无	讲师	13709218103	576772378@qq.com	课程建设
5	宁大龙	1984.11	电子工程学院	无	工程师	13572936350	970769362@qq.com	课程建设
课程负责人和团队其他主要成员教学情况（500 字以内）								
<p>课程团队有五位老师，其中三位老师博士学位，两位老师硕士学位，本课程建设得到刘雨棣教授的指导。</p> <p>项目负责人薛荣辉，多次承担专科《电力电子技术》课程教学任务，近 5 年承担五次本课程的本科教学任务，采用多种教学手段，促进学生掌握本课程的知识点，激发学习兴趣，2016 年度获得校级教学质量优秀。参与校级项目应用型本科院校电子大类人才培养探索与实践，发表教学改革论文《电力电子技术课程打造金课教学模式》一篇。</p> <p>参与人肖海峰，近 5 年来承担本科《电力电子技术》课程四次，有丰富的实践经验，将电力电子技术实际应用引到课堂教学。</p> <p>参与人琚晓涛，近 3 年来承担本科《电力电子技术》课程三次，结合实际工作经验，将电力电子技术实际应用引到课堂教学。</p> <p>参与人马昭，近 5 年来承担专科《电力电子技术》课程五次，指导学生参加电子设计竞赛累计获得省级奖项 6 项，2019 年度获得校级教学质量优秀和青年教师教学质量优秀奖，2017 年和 2019 年陕西高校中青年教师电子类实验技能竞赛分别获得省级三等奖各 1 次，将参赛题目引入课堂教学，教学效果好。</p> <p>参与人宁大龙，博士学位，2020 年入校，承担本科《电力电子技术》课程一次，结合实际工作经验，将电力电子技术实际应用引到课堂教学，教学效果好。</p>								

三、课程目标（300 字以内）

我校是一所应用型本科院校，电力电子技术是电气工程及其自动化专业的一门专业必修课，是理论与应用相结合，实践性强的课程。

1) 知识目标：拓宽电力电子技术的知识面，包括电力电子器件的工作原理及应用，四种电力变换拓扑结构的分析，参数计算以及电力电子技术的发展趋势；提高电力电子技术的应用能力。

2) 技能目标：通过本课程的学习，掌握四种电力变换的基本知识体系，具备电力电子电路的分析设计的初步能力，为解决复杂电力电子技术问题打下基础。

3) 素质目标：新能源的发展，电子设备，电动汽车等都离不开将“粗电”转换为“精电”的电力电子设备为其提供所需电源，需要我们巩固专业思想，为国家的发展贡献自己的一份力量。

四、课程建设及应用情况（2000 字以内）

1、课程建设发展历程

自学校 1956 年建校，开设《电力电子技术》课程，经历学校从中专院校升格到大专院校，2004 年由我校陕西省教学名师刘雨棣教授和杨亚萍教授建设专科《电力电子技术》课程获批省级精品课程，在此基础上，课程建设一直在进行，2012 年学校升格为本科院校，《电力电子技术》经历二十多年的建设。

2、课程与教学改革要解决的重点问题

一流课程的核心理念是以学生为主体，让学生参与是一流课程实施的核心。如何实施，应尊重学生，还学生学习的自由，提高学生的学习兴趣和；优化教学环境，加强交流与合作；给每位学生以期望和激励，让学生有成就感。虽然教学过程中团队教师采用多种形式授课方式，但是总体还是课堂以教师为主，学生被动接受，在学习上依赖性强，厌学情绪明显，学习效率低下等。

本门课程存在电力电子变换电路拓扑结构多，比如整流部分基本上有五个主电路，对应的负载情况有五种情况，对应不同的触发角，电路的波形变化，参数计算不同，学生在学习这部分内容时，电路情况多，容易搞混。基于这种情况团队老师采用的对策是：1) 采用动画演示对比不同电路不同负载不同触发角波形的变化情况，使学生直观看到不同情况各波形的变化，理解各区间电路的工作情况；2) 手把手教学生利用 Matlab/Simulink 搭建仿真模型，模拟具体电路分析不同情况的波形变化；3) 推荐学生看录播视频；4) 倡导学生在安全的前提条件下，动手制作电力电子电路。通过这一系列举措学生掌握知识点情况提高。

3、课程内容与资源建设及应用情况

1) 课程内容：本课程是电力学、电子学、控制理论三门学科交叉形成，主要包括电力电子器件，电力电子变流技术和 PWM 控制技术三大组成部分。本课程的目的和任务是：学生熟悉各种电力电子器件的特性和使用方法；掌握各种电力电子电路的结构、工作原理、控制方法、设计计算方法及实验技能；熟悉各种电力电子装置的应用范围及计算经济指标，培养学生的分析问题和解决问题的能力。

力，为《电力拖动自动控制系统》等后续课程以及从事与电气工程及其自动化相关技术工作和应用研究奠定一定的基础。

2) 资源建设: Flash 动画; 录制完整的课程视频; 课程 PPT, 教案及习题集不断更新; 全套 Matlab/Simulink 仿真模型; 全国大学生电子竞赛电源类题目库。

3) 应用: 本课程团队基于资源共享, 在授课过程中动画视频, PPT, 教案, 习题集, 仿真不断更新, 2020 年受疫情影响, 各任课教师采用线上教学, 学习通, 腾讯课堂等网络软件应用, 教学效果良好。

4、课程教学内容及组织实施情况

1) 课程教学内容

电力电子器件, 整流电路, 逆变电路, 直流-直流变流电路, 交流-交流变流电路, PWM 控制技术, 软开关技术, 电力电子技术的应用。

2) 组织实施情况

教学过程中逐步以教为中心向以学为中心转变, 以提升教学效果为目的, 因材施教, 利用多种形式有效开展线下课堂教学活动。逐渐打破传统课堂“满堂灌”和沉默状态的方式方法, 训练学生问题解决能力和审辩式思维能力。学生学习方式有显著变化。

课程成绩评定方式

本课程最终成绩由平时成绩+实验成绩+卷面成绩构成。成绩评定方面从 90% 卷面成绩+10%平时成绩, 以卷面为主, 现在 70%卷面成绩+30%平时成绩, 降低了卷面成绩的比例, 平时成绩比例提高, 平时成绩增加了实验成绩, 能更全面地反映学生对这门课的整体掌握情况。

平时成绩占 18%, 其中作业完成情况 12%, 分五个等级, 课堂测验 6%。

实验成绩占 12%, 实验操作 6%, 实验报告 6%。

卷面成绩占 70%。

6、课程评价及改革成效

1) 课程评价

学生评价

薛老师《电力电子技术》课程课前准备充分, 有 PPT、教案、动画、仿真、相关习题, 课堂互动好, 通过采用提前布置预习内容, 我们带着问题预习, 每节课都收获满满, 课程难度中等, 老师的态度和蔼, 课后有习题有总结, 薛老师属于理智型教学风格, 我们受益匪浅。

督导评价

薛老师《电力电子技术》准备充分, 条理清晰, 上课采用提前布置任务, 老师讲解, 学生问答多种形式, 帮助学生理解知识点, 通过动画, 仿真使学生能够直观的理解电路的工作原理, 本门课程将课程思政融入其中, 课堂氛围好, 学生能够积极的跟着老师的思路, 通过课堂小结和习题, 学生加深课程知识点的掌握。

2) 改革成效

针对本课程及学生的特点, 结合多年的教学经验, 团队成员采用丰富的动画演示, 仿真模拟, 使学生能够更好地掌握知识;

通过丰富的实例, 新能源发电, 电动汽车, 各种电子设备开关电源等内容的

加入，使学生能够清楚电力电子装置无处不在，增加了他们学习的动力，在生活中发掘电力电子技术的踪迹。

近几年多名学生参与全国大学生电子竞赛，其中电源类题目获奖情况为：2017年二等奖2项；2018年一等奖1项、二等奖4项、三等奖2项；2019年二等奖1项，三等奖7项；2020年二等奖3项。

五、课程特色与创新（500字以内）

（概述本课程的特色及教学改革创新点）

1、本课程的特色

2004年获批专科省级精品课程，本课程作为电气工程及其自动化专业的专业基础课程，经历多年的课程教学，有一定的积累。

1) 课程特点

随着科技的进步，电力电子技术应用广泛，电力电子技术就是将电网或蓄电池等产生的“粗电”转化为电子设备需要的“精电”的技术。有电的地方基本上都有电力电子装置，新能源发电，开关电源，交通运输，家用电器等都用到电力电子技术。

2) 教学特色

打破传统课堂教学，采用现代化教育手段，利用动画演示和搭建仿真模型实现具体电路直观化，易于学生理解各电路的工作原理，对比各电路不同负载情况下参数的计算和波形的分析。

实验教学采用实验台操作与搭建仿真模型相结合，实验台操作采用说明电路拓扑结构，学生分组根据电路拓扑结构接线，老师检查线路无误，再接通电源观察波形，通过这种方式学生能更好地理解电路的构成；仿真模型的搭建老师提出要求，学生自己查阅资料搭建电路运行后，对运行结果需要分析。

2、创新

- 1) 以学生为主体，改变授课方式；
- 2) 采用多种教学手段引导学生学习课程；
- 3) 结合电力电子技术的应用，激发学生学习本课程的兴趣；
- 4) 鼓励学生在安全前提下，制作电力电子电路，提高动手能力。

六、课程建设计划（500字以内）

（今后五年课程的持续建设计划、需要进一步解决的问题，改革方向和改进措施等）

1. 促进教学内容和教学方法的改进

改革教学内容；采用翻转课堂教学，全方位调动学生学习的积极性和主动性，促使学生对电力电子技术知识的掌握。借助现代网络和多媒体技术，为学生提供丰富的学习辅助材料，拓宽学生的知识面。

团队成员利用自身参与项目竞赛情况，将实际的应用引用到课堂教学，以保证学生能接触到最前沿的电力电子技术实际案例。

考试成绩方面，增加了实验操作和课堂情况分数，客观地反映学生整个学期本门课程的学习情况。

2、编写教材

本专业一直选用王兆安主编的《电力电子技术》（第五版）作为教材，经过这几年的教学，团队成员结合本校学生特色，2025年之前编写适合本校学生的教材。

3、完善授课的网络课件

2020年由于疫情，团队成员采用学习通，腾讯课堂等方式完成授课，本课程计划将团队成员线上教学视频整理，补充新授课视频，使学生能够充分利用网络资源进行学习，提高学习效率。

3、探索双语教学

在现有网络资源的基础上进一步完善电力电子技术双语教学网站，为学生学习电力电子技术提供丰富的教学资源。

《电力电子技术》是实用性强的一门课程，课程建设一直在继续，争取2015年建成省级一流课程，2025年建成国家级一流课程，任重道远。

附件目录

1. 教学设计样例	11-22
2. 2019-2020-2 学期教学日历	23-24
3. 2019-2020-2 学期考试试卷及答案	25-38
4. 2019-2020-2 及 2018-2019-2 两学期学生成绩分布统计	39-42
5. 2019-2020-2 课程教案	43-264
6. 2019-2020-2 学期学生评教结果统计	265-266
7. 2020-2021-2 学期学校对课堂教学评价	267-268
8. 课程团队成员和课程内容政治审查意见	269
10. 课程内容学术性评价意见	270

5.1 基本斩波电路

一、教学目标

1. 掌握直流-直流变流电路的基本概念, 分类。
2. 掌握降压斩波电路, 升压斩波电路构成。
3. 掌握降压斩波电路电流连续, 电流断续情况工作原理, 波形分析。掌握降压斩波电路电流连续时参数计算。
4. 掌握升压斩波电路电流连续, 电流断续情况工作原理, 波形分析。掌握升压斩波电路电流连续时参数计算。
5. 总结降压斩波电路和升压斩波电路的特点。
6. 构建升降压斩波电路, 引导学生分析电路工作原理, 波形, 参数计算。
7. 构建 Cuk 斩波电路, 引导学生分析电路工作原理, 波形, 参数计算。
8. 了解基本斩波电路的应用。

二、教学内容

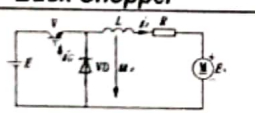
1. 以问题为引导, 介绍 DC-DC 变流技术基本知识。〈10 分钟〉
2. 引导学生构建降压斩波电路, 分析电流连续和电流断续两种情况电路工作原理波形分析, 推导电流连续时输出电压与输入电压之间的关系。〈25 分钟〉
3. 在降压斩波电路基础上引导学生构建升压斩波电路(降流), 分析电流连续和电流断续两种情况电路工作原理波形分析, 推导电流连续时输出电压与输入电压之间的关系。〈20 分钟〉
4. 在降压斩波电路和升压斩波电路基础上构建升降压斩波电路, Cuk 斩波电路, 找学生分析电路工作原理和波形, 推导输出电压与输入电压之间的关系。〈30 分钟〉
5. 对比这四种斩波电路, 小结, 通过习题检测学生掌握斩波电路的情况。〈5 分钟〉
6. 提出问题: 什么是电流连续状态和电流断续状态? 什么是间接直流直流变流电路?

三、教学手段

教学 PPT, Flash 动画演示, Matlab/Simulink 仿真, 板书, 以学生为主体引导学生思考

四、Flash 动画

Buck Chopper

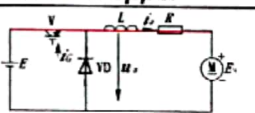


电流连续
电流断续

结论:
输出到负载的电压平均值
 U_o 最大为 E , 若减小占空比, 则 U_o 随之减小。因此
该电路称作降压斩波电路

Stop Play

Buck Chopper



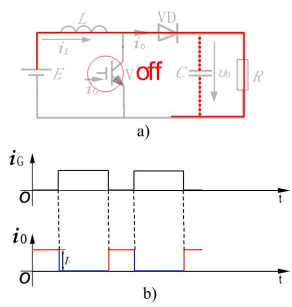
电流连续
电流断续

分析:
V 导通;
 $U_o = E$;
 i_o 按指数曲线上升;

Stop Play



Boost Chopper



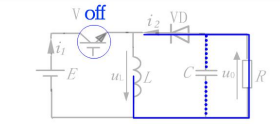
升压斩波电路及其工作波形
a) 电路图 b) 波形图

分析: L, C 很大

1. V 关断
2. E & L → C 充电
3. 向 R 提供能量



Buck-Boost Chopper



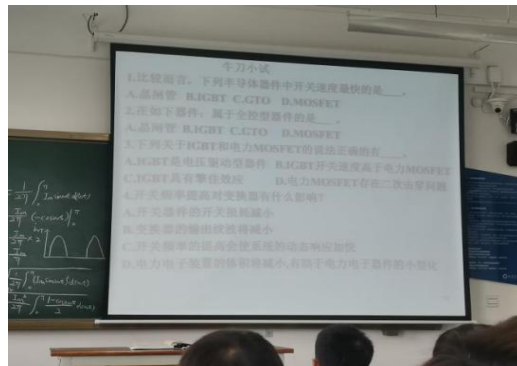
升降压斩波电路及其工作波形
a) 电路图 b) 波形图

分析: L, C 很大

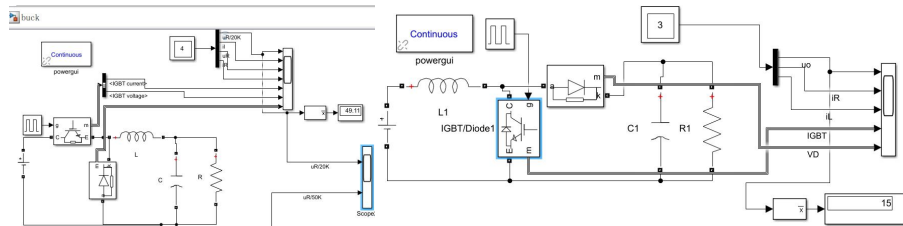
1. V 关断
2. L → R 提供能量
3. L → C 充电



五、教学活动



六、Matlab 仿真模型



课程教案

第 5 章 直流直流变流电路

一、问题引入

如果现有 12V 的直流电源，负载需要 5V 的直流电压，怎么设计实现？

如果现有 5V 的直流电源，负载需要 12V 的直流电源，怎么设计实现？

直交到直流变流技术

二、分类

DC-DC 直接变换---斩波 （降压，升压，升降压，Cuk）

DC-AC-DC 间接变换 逆变-变压器-整流(正激，反激，推挽)

三、基本知识

① 理想变换器条件

- 1) 开关管、二极管瞬间通断，无损耗；
- 2) 电容电感均无损耗理想器件；
- 3) 线路阻抗为 0。

① 开关周期 T_s ，开关频率 $f_s=1/T_s$

① 开关器件电容、电感基本特性

- 1) 电容电流安秒平衡

$$\frac{1}{C} \int_0^{T_s} i_c dt = \frac{1}{C} \int_0^{t_{on}} i_c dt + \frac{1}{C} \int_{t_{on}}^{T_s} i_c dt = 0$$

$$\Rightarrow i_{Cton} t_{on} + i_{Ctoff} t_{off} = 0$$

- 2) 电感电压伏秒平衡

$$\frac{1}{L} \int_0^{T_s} u_L dt = \frac{1}{L} \int_0^{t_{on}} u_L dt + \frac{1}{L} \int_{t_{on}}^{T_s} u_L dt = 0$$

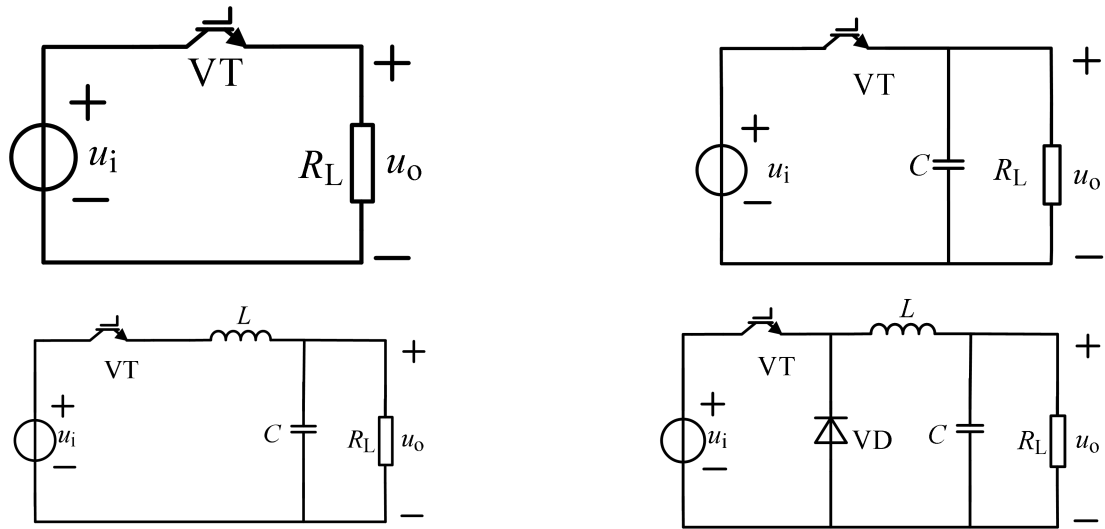
$$\Rightarrow u_{Lton} t_{on} + u_{Ltoff} t_{off} = 0$$

5.1 基本斩波电路

一、Buck 斩波电路

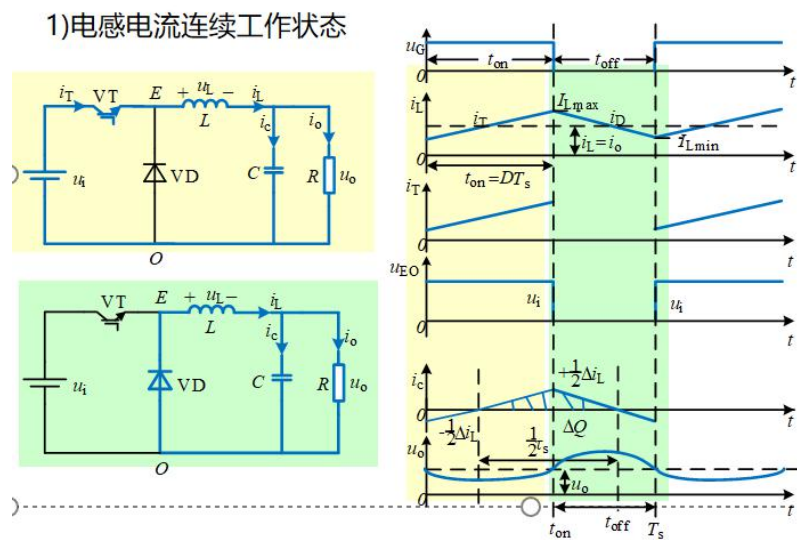
1. 电路构成





2、换流状态

1)电感电流连续工作状态



稳态电压增益

$$(U_i - U_o)t_{\text{on}} + (-U_o)t_{\text{off}} = 0$$

$$\Rightarrow U_o = \frac{t_{\text{on}}}{T} U_i = \alpha U_i$$

$$\Rightarrow \frac{U_o}{U_i} = \alpha$$

稳态电感电流脉动量

稳态电流增益

$$U_i I_i = U_o I_o$$

$$\Rightarrow I_o = \frac{U_i}{U_o} I_i = \frac{1}{\alpha} I_i$$

$$\Rightarrow \frac{I_o}{I_i} = \frac{1}{\alpha}$$

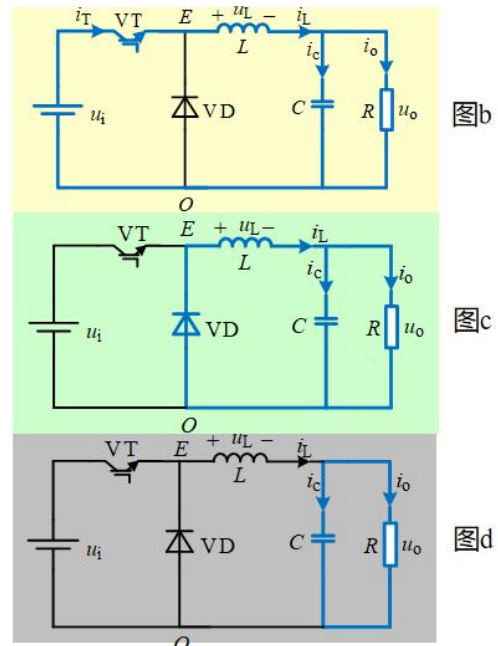
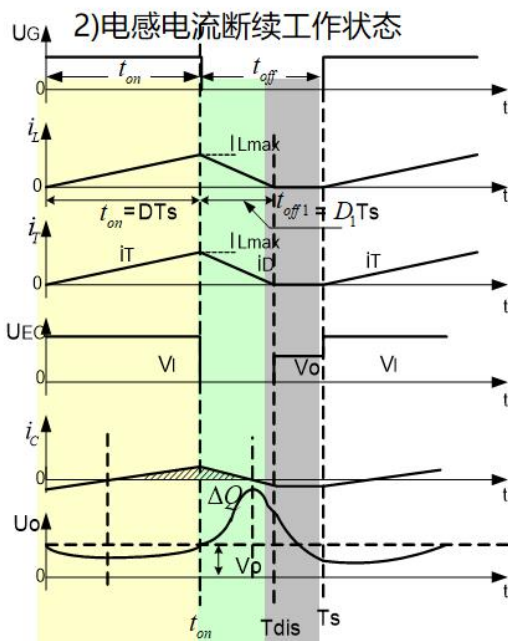
$$\Delta i_{L+} = \frac{U_i - U_o}{L} t_{on} = \frac{U_i - U_o}{L} \alpha T$$

$$\Delta i_{L-} = \frac{U_o}{L} (T - t_{on}) = \frac{U_o (1 - \alpha) T}{L}$$

$$I_{Lmax} = I_o + \frac{1}{2} \Delta i_L = \frac{U_o}{R} \left[1 + \frac{R}{2L} (1 - \alpha) T \right]$$

$$I_{Lmin} = I_o - \frac{1}{2} \Delta i_L = \frac{U_o}{R} \left[1 - \frac{R}{2L} (1 - \alpha) T \right]$$

2) 电感电流断续工作状态



例题 1

设计一个降压斩波电路，输入电源电压 200V，输出电压 50V，纹波电压为输出电压的 0.2%，负载电阻为 20Ω，开关工作频率为 20kHz。分别仿真将工作频率改为 50kHz，电感改为临界电感值的一半对比分析。

1) 参数设计

纹波电压：流经电容的电流对电容充电产生的电压 ΔU_o

$$C = \frac{U_o (1 - \alpha)}{8L \Delta U_o} T_s^2$$

电感电流临界连续电感临界值

$$L_c = \frac{(1 - \alpha)}{2} R T_s = \frac{(1 - \alpha)}{2 I_o} U_o T_s$$

稳态电压增益

$$\alpha = \frac{U_o}{U_i} = \frac{50}{200} = 25\%$$

临界电感值

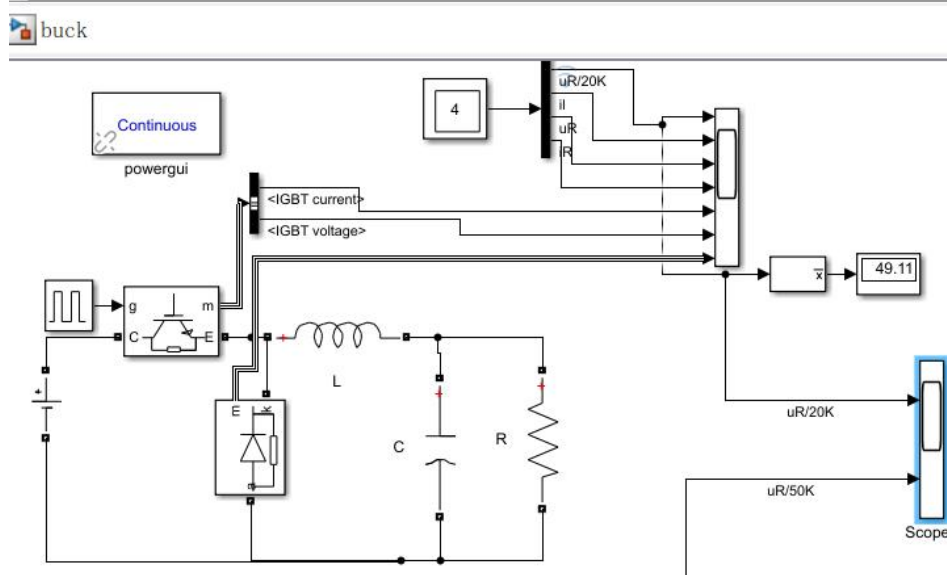
$$L_c = \frac{(1-\alpha)}{2} RT_s = \frac{(1-25\%)}{2} 20 \times (1/20 \times 1000) = 3.75 \times 10^{-4} H$$

L 取 1.2 倍的裕量

$$L = 4.5 \times 10^{-4} H$$

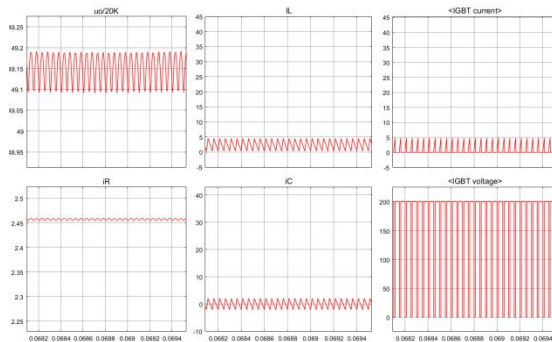
根据纹波要求

$$C = \frac{U_o(1-\alpha)}{8L\Delta U_o} T_s^2 = \frac{(1-25\%)}{8 \times 4.5 \times 10^{-4} \times 0.2\%} (1/20000)^2 = 2.6 \times 10^{-4} F$$



Buck $T_s=1/20000s$, $L=4.5e-4H$, $C=2.6e-4F$

$T_s=1/20000s$, $L=4.5e-4H$, $C=2.6e-4F$

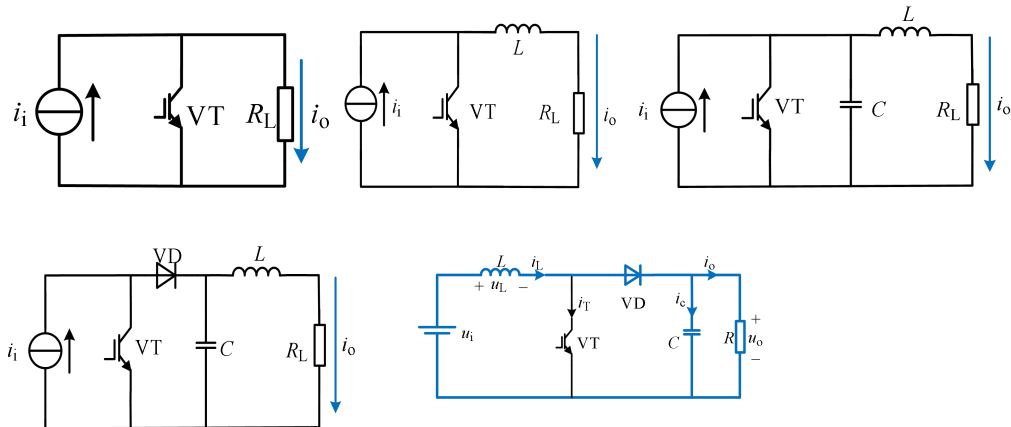


4.特点

- 1) 降压斩波电路降压变换，增流变换。
- 2) 稳态电压增益（占空比）可以通过变频，PWM 控制，混合控制三种策略
- 3) 电感电流断续时占空比难确定，实验前先进行仿真确定占空比的范围，缩短开发周期。

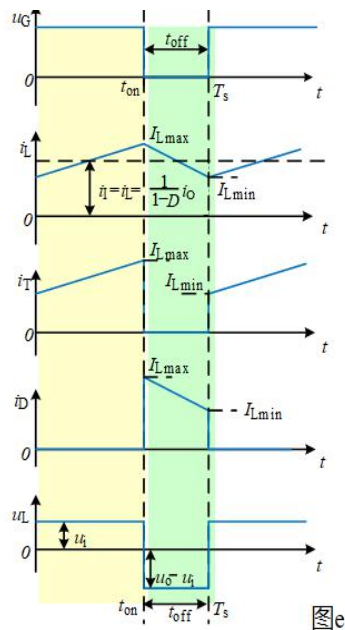
二、Boost 斩波电路

1. 电路构成



2. 换流状态

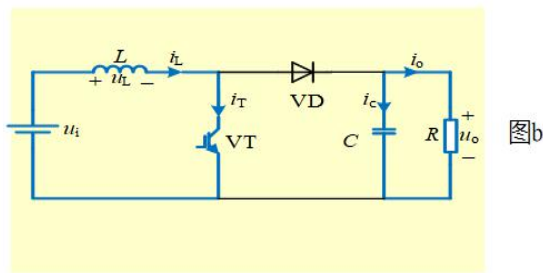
1) 电感电流连续工作状态



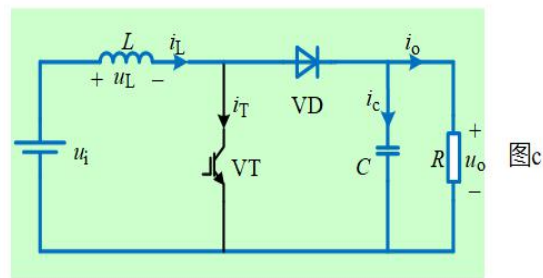
稳态电压增益

益

$$\begin{aligned} U_i I_i &= U_o I_o \\ \Rightarrow I_o &= \frac{U_i}{U_o} I_i = (1-\alpha) I_i \\ \Rightarrow \frac{I_o}{I_i} &= 1-\alpha \end{aligned}$$



图b



图c

$$U_i t_{on} = (U_o - U_i)(T_s - t_{on}) \quad \text{稳态电流增}$$

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-\alpha}$$

例题 2

将一个输入电压在 3-6V 的不稳定电源升到稳定的 15V 电压，纹波电压低于 0.2%，负载电阻 10Ω，开关工作频率为 40kHz，要求电感电流连续，设计仿真参数，搭建仿真模型，分析仿真结果。将电感值降为临界电感的一半，仿真分析结果对比分析。

解：1) 参数设计

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{T_s}{t_{off}} = \frac{1}{1-\alpha}$$

得：

$$\alpha_1 = 0.6$$

$$\alpha_2 = 0.8$$

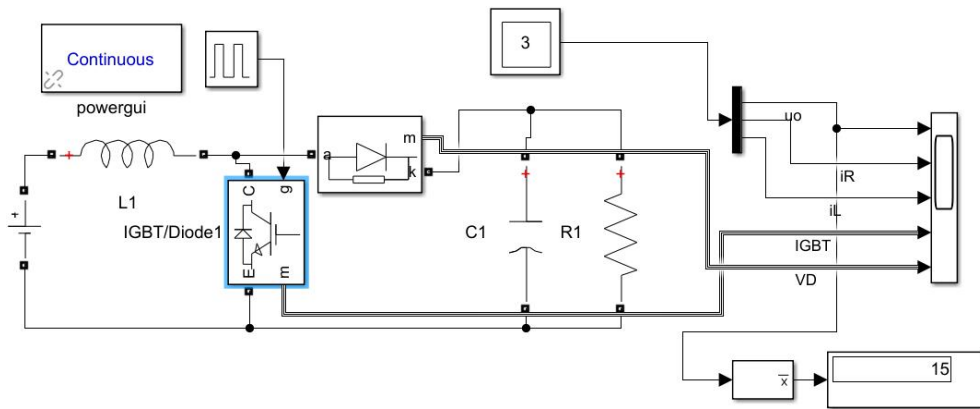
取 0.6

临界电感值

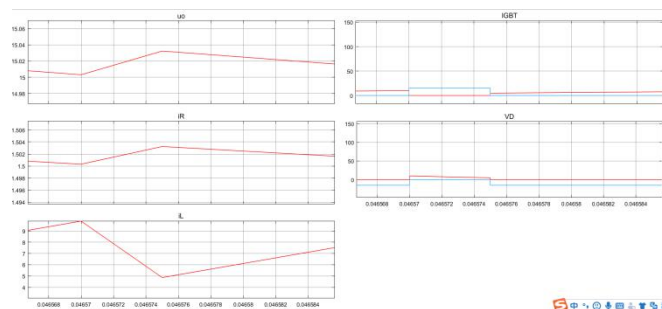
$$L_c = \frac{(1-\alpha_{\min})^2}{2} \alpha_{\min} R T_s = \frac{(1-0.6)^2}{2} \times 0.6 \times 10 \times \frac{1}{40000} = 12 \mu H$$

根据纹波要求

$$C = \frac{U_o \alpha_{\max} T_s}{R \Delta U_o} = \frac{0.8}{10 \times 0.2\%} (1/40000) = 1 mF$$



Boost $T_s=1/40000s$, $L=12\mu H$, $C=1mF$

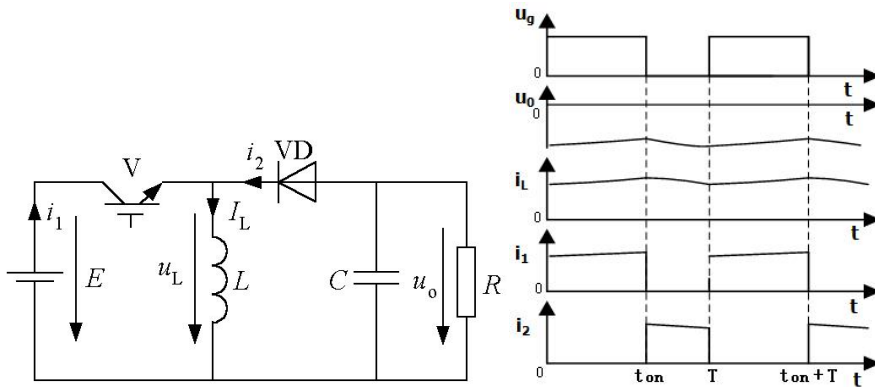


4.特点

- 1) 实现升压降流 DC-DC 变换
- 2) 输出电压高于输入电压

三、升降压斩波电路

1. 电路构成



2. 工作原理:

t_{on} 期间 V 导通, VD 截止:

$E-V-L$, 给 L 贮存能量;

$C-R$, 电容 C 向负载 R 放电。

t_{off} 期间 V 截止, VD 导通:

$L-C, R$, 电感 L 中贮存的能量向负载释放。

3. 输入输出电压关系

根据电感伏秒平衡原理

$$E t_{on} + U_o t_{off} = 0$$

$$U_o = -(t_{on}/t_{off})E$$

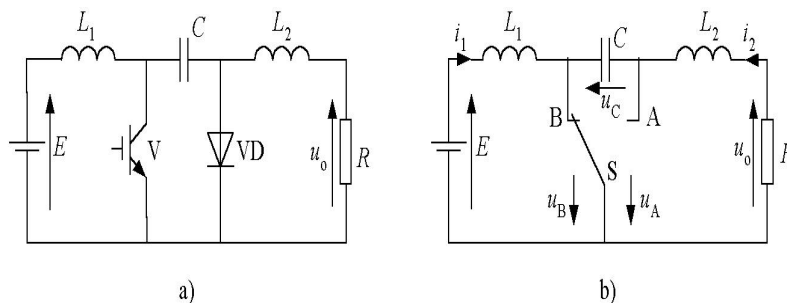
根据能量守恒

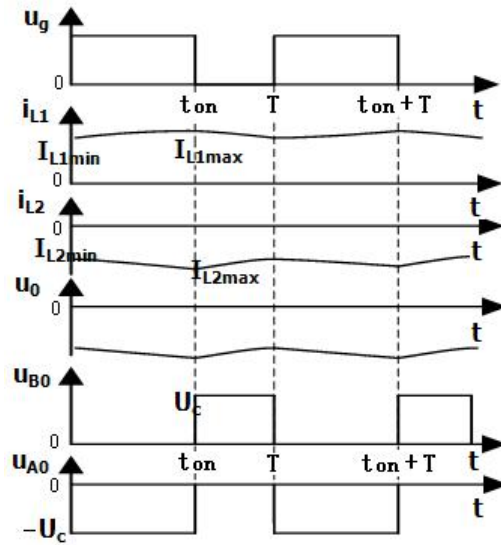
$$E I_1 = U_o I_2$$

$$I_2 = (E/U_o) I_1 = (t_{off}/t_{on}) I_1$$

升降压斩波电路可以实现电压增压或降压变换。

四、Cuk Chopper





1. 工作原理

V 导通时，E—L1—V 回路和 R—L2—C—V 回路分别流过电流。

V 关断时，E—L1—C—VD 回路和 R—L2—VD 回路分别流过电流。

输出电压的极性与电源电压极性相反。

2. 输入输出电压关系

$$E = U_{B0} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{B0} dt = \frac{1}{T} \int_{t_{on}}^T U_C dt = \frac{t_{off}}{T} U_C$$

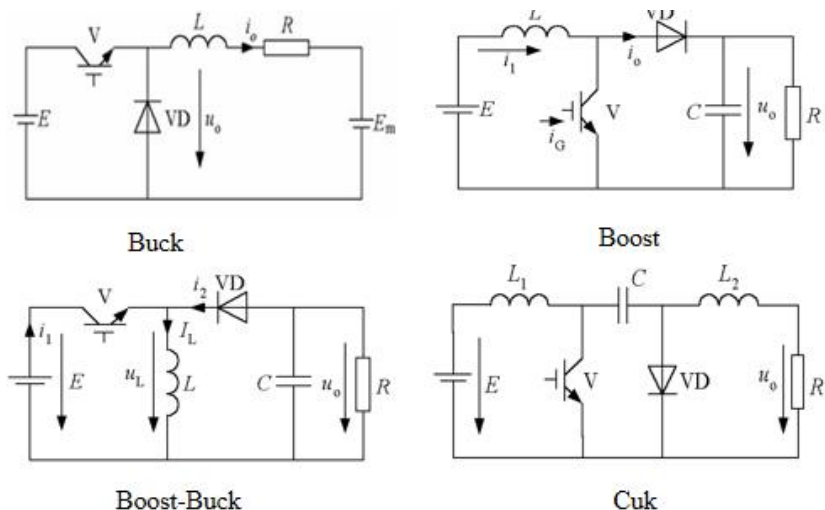
$$U_0 = U_{A0} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{A0} dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} (-U_C) dt = -\frac{t_{on}}{T} U_C$$

$$U_0 = -\frac{t_{on}}{t_{off}} E$$

与 boost-Buck 变换电路相比特点：

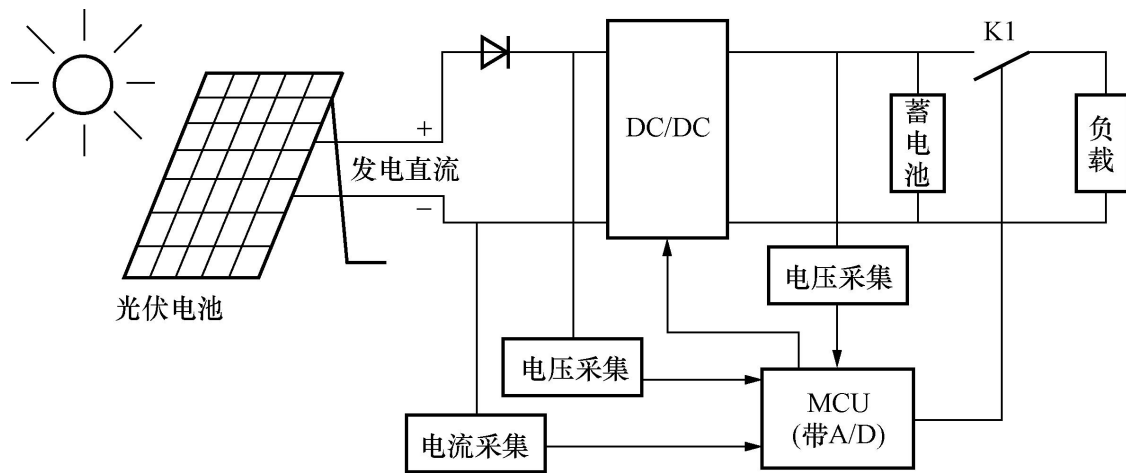
- 1) 直流电压传输率既可大于 1，也可以小于 1。
- 2) 输入电流波动 (i_{L1}) 小。

五、小结



	Buck	Boost	Boost-Buck	Cuk
输入电压	理想	理想	理想	理想
输入电流	纹波大	纹波小	纹波大	纹波小
输出电压	纹波大	纹波小	纹波小	纹波小
输出电流	纹波小	纹波大	纹波大	纹波小
常用器件	SCR、GTO、IGBT	MOSFET、IGBT	MOSFET、IGBT	MOSFET、IGBT
功率	较大	一般	一般	一般
用途	电力机车、电车等驱动	各种电子设备的直流供电电源	各种电子设备的直流供电电源	同左（可等效为电阻）
频率	一般	超音频、高频(为减小滤波电路产生的体积)	中、高频	中、高频
直流电源利用率	不高	高	不高	高
输出输入电压极性	同极性	同极性	反极性	反极性
输出输入电压比	ton/T	T/toff	ton/toff	ton/toff

思考：如下电路中 DC-DC 变换电路是哪种电路？作用？



省级一流本科课程申报课程教学日历(2020)

申报学校(盖章): 西安航空学院



课程名称: 电力电子技术

课程负责人: 薛荣辉

序号	日期	周次	讲次	学时(分钟)	教学内容(要点)	授课地点	学生人数	教学形式
1	2020.2.25	1	1	2(90分钟)	了解电力电子技术课程的相关知识	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
2	2020.2.27	1	2	2(90分钟)	了解电力电子器件,掌握电力二极管,晶闸管的工作原理	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
3	2020.3.3	2	3	2(90分钟)	熟悉晶闸管的参数和派生器件,掌握门极可关断晶闸管	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
4	2020.3.5	2	4	2(90分钟)	熟悉电力晶体管,电力场效应管,IGBT等	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
5	2020.3.10	3	5	2(90分钟)	掌握单相半波可控整流电路的原理	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
6	2020.3.12	3	6	2(90分钟)	掌握单相桥式全控整流电路的原理	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
7	2020.3.17	4	7	2(90分钟)	掌握全波整流电路和单相桥式半控整流电路的原理	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
8	2020.3.19	4	8	2(90分钟)	掌握三相半波可控整流电路的原理	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
9	2020.3.24	5	9	2(90分钟)	掌握三相桥式全控整流电路的原理	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
10	2020.3.26	5	10	2(90分钟)	了解变压器漏感对整流电路的影响,谐波和功率因数,大功率整流电路	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
11	2020.3.31	6	11	2(90分钟)	掌握逆变的概念、分类及逆变角,掌握有源逆变原理	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑



12	2020.4.2	6	12	2(90分钟)	了解触发电路的原理,掌握触发电路的定相	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
13	2020.4.7	7	13	2(90分钟)	掌握换流方式,掌握电压型无源逆变电路原理	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
14	2020.4.9	7	14	2(90分钟)	掌握电流型逆变电路的原理及换流过程	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
15	2020.4.14	8	15	2(90分钟)	掌握升、降压斩波的原理及波形分析	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
16	2020.4.16	8	16	2(90分钟)	掌握B斩波的原理及波形分析,了解多重多相斩波电路	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
17	2020.4.21	9	17	2(90分钟)	了解带隔离的直流-直流变换电路原理及波形分析	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
18	2020.4.23	9	18	2(90分钟)	掌握单相交流调压电路;了解三相交流调压电路	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
19	2020.4.28	10	19	2(90分钟)	了解交交变频的原理及电路分析	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
20	2020.4.30	10	20	2(90分钟)	掌握逆变、变频、斩波原理	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
21	2020.5.7	11	21	2(90分钟)	了解PWM控制技术	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
22	2020.5.9	11	22	2(90分钟)	掌握PWM整流	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
23	2020.5.12	12	23	2(90分钟)	了解软开关技术	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
24	2020.5.14	12	24	2(90分钟)	了解变频器和交流调速电路,不间断电源	阎教D1320	39	由于疫情线上讲授答疑
25	2020.5.19	13	25	2(90分钟)	单相半波可控整流电路的性能研究	实验楼2306	39	线下实验
26	2020.5.21	13	26	2(90分钟)	单相桥式全控整流电路的性能研究	实验楼2306	39	线下实验
27	2020.5.26	14	27	2(90分钟)	逆变电路的性能研究	实验楼2306	39	线下实验
28	2020.5.28	14	28	2(90分钟)	斩波电路的性能研究	实验楼2306	39	线下实验





4

西安航空学院课程考试试卷

2019~2020 学年第二学期期末考试

电力电子技术 B 试卷 B

题号	一	二	三	四	五	六	七	八	总分	总分人
得分										
阅卷人										

适用班级：电气工程 2116,2117,194A,195A

说明：一二三四大题写在答题纸上标明题号，第四题第 3 小题在原图上画。

得分	
----	--

一、填空题（每空 1 分，共 20 分）

1. 逆导晶闸管是将_____与晶闸管_____（如何连接）在同一管芯上的功率集成器件。
2. 整流电路实现_____到_____转换。
3. 某晶闸管型号为 KP100-12，额定电流是_____，额定电压是_____。
4. 有源逆变条件为（1）_____；（2）_____。
5. 逆变电路可以根据直流侧电源性质不同分类，当直流侧是电压源时，称此电路为_____，当直流侧为电流源时，称此电路为_____。电压型逆变电路一般采用_____器件，换流方式为_____。
6. 单相交流调压电路带阻感负载，当控制角 $\alpha < \varphi$ ($\varphi = \arctan(\omega L/R)$) 时，VT1 的导通时间_____，VT2 的导通时间_____。
7. 直流斩波电路中最基本的两种电路是_____和_____。

8. PWM 波形只在单个极性范围内变化的控制方式称_____控制方式，三相桥式 PWM 型逆变电路采用_____控制方式。

9. 软开关技术通过在电路中引入谐振改善了开关的开关条件，大大降低了硬开关电路存在的_____和_____问题。

得分	
----	--

二、选择题（每题 2 分，共 20 分）

1. 晶闸管的通态电流（额定电流）是用电流的什么值来表示的。 ()
A. 瞬时值 B. 最大值 C. 平均值 D. 有效值
2. 关于器件换流，下面表述正确的是哪一个？ ()
A. IGBT、MOSFET 等全控型器件的关断从而使电流通路转移到另一支路，属于器件换流。
B. 二极管从正向导通到反向截止也属于器件换流。
C. GTO、SCR 等可控器件的关断都是属于器件换流。
D. 二极管从反向截止到正向导通也属于器件换流。
3. 关于单相电压型逆变电路，下面表述正确的是哪一个？ ()
A. 单相电压型逆变电路的移相调压方式，改变占空比就可调节输出电压的有效值。
B. 单相电压型逆变电路的移相调压方式，改变占空比就可调节输出电压的峰值。
C. 单相电压型逆变电路的移相调压方式，只要改变滞后角 q 就可调节输出电压的有效值。
D. 单相电压型逆变电路的移相调压方式，改变改变滞后角 q 不能调节输出电压的有



西安航空学院课程考试试卷

效值。

4.多相多重斩波电路，表述正确的是：()

A.多相多重斩波电路是由多个结构相同基本斩波电路组成。相数指的是一周期电源侧电流脉波数，重数指的是负载电流脉波数。

B.多相多重斩波电路是由多个结构不同基本斩波电路组成。相数指的是基本斩波电路数量，重数指的是单相负载。

C.多相多重斩波电路是由多个结构相同基本斩波电路组成。相数指的是基本斩波电路数量，重数指的是负载数量。

D.多相多重斩波电路可以由多个结构不同的基本斩波电路组成。相数指的是一周期负载电流脉波数。重数指的是一周期电源侧电流脉波数。

5.单相半桥电压型逆变电路中，输入电压为 U_d ，则输出矩形波电压幅值应为。()

A. $2U_d$ B. $U_d/2$ C. 0 D. U_d

6.关于 PWM 异步调制，表述正确的是：()

A.载波信号和调制信号不保持同步的调制方式称为异步调制。通常载波频率 f_c 是变化的，信号波频率 f_r 也是变化的，载波比 N 却是不会变化的。

B.载波信号和调制信号不保持同步的调制方式称为异步调制。通常载波频率 f_c 固定不变，信号波频率 f_r 变化时，载波比 N 是变化的。

C.只要载波比 N 是不变的调制方式称为异步调制。通常载波频率 f_c 固定不变，信号波频率 f_r 是变化的。

D.异步调制指的是，载波频率 f_c 、信号波频率 f_r 都是变化的，载波比 N 是不变的。

7. 整流变压器漏抗对电路的影响是 ()。

A. 输出电压增大 B. 输出电压减小
C. 功率因数增加 D. 电流脉动程度加大

8. 关于斩控式单相交流调压电路而言，()种说法是错误的？

A.输出电压波形是由多段输入电压波形组成
B.占空比决定了输出电压的有效值
C.输出电压基波超前输入电压

D.斩波频率越高，输出电压的谐波含量越低

9.三相全控桥式整流电路中，共阴极组 VT_1 、 VT_3 、 VT_5 的触发脉冲要求间隔：()

A. 120° B. 180° C. 60° D. 90°

10.关于隔离型直流-直流变流电路，下面表述正确的是哪一个？()

A.直流-直流变流电路包括直接直流变流电路和间接直流变流电路两类。
B.正激和反激电路属于单端激励电路，用于大功率场合。
C.推挽电路属于双端激励电路，用于小功率场合。
D.全桥和半桥电路属于双端激励电路，用于小功率场合。

得分	
----	--

三、简答题（4 小题，共 24 分）

1、（本题 6 分）维持晶闸管导通的条件是什么？怎样才能使晶闸管由导通变为关断？

2、（本题 6 分）电压型逆变电路中反馈二极管的作用是什么？为什么电流型逆变器中没有反馈二极管？



西安航空学院课程考试试卷

- 3、(本题 6 分) 简述单相交变频的工作原理。
 4、(本题 6 分) 什么是 SPWM 波形的规则化采样法?

得分	
----	--

四、画图 and 计算题 (3 小题, 共 36 分)

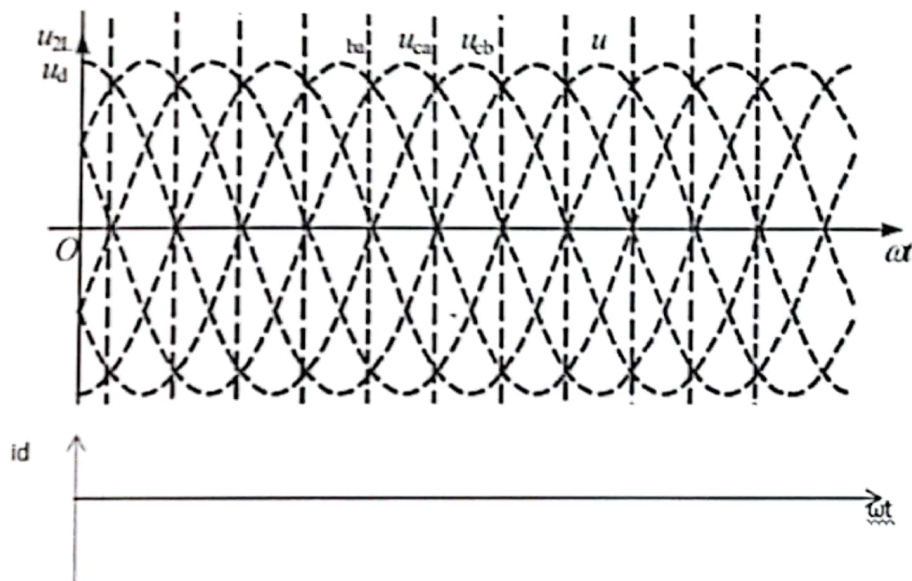
1、(本题 16 分) 单相桥式全控整流电路, $U_2=100V$, 负载中 $R=2\Omega$, L 值极大, 反电势 $E=60V$, 当 $\alpha=30^\circ$ 时, 要求;

- (1) 作出 u_d 、 i_d 和 i_2 的波形;
- (2) 求整流输出平均电压 U_d 、电流 I_d , 变压器二次侧电流有效值 I_2 ;
- (3) 考虑安全裕量, 确定晶闸管的额定电压和额定电流。

2、(本题 12 分) Cuk 斩波电路, 电阻负载, 要求:

- (1) 画出主电路;
- (2) 若电源电压 $E=100V$, 输出电压要求在 $50-200V$ 可调, 计算相应的占空比 $\alpha=ton/T$, 并写出 α 变化范围。

3、(本题 8 分) 三相桥式全控整流电路 R-L 负载, L 足够大, $U_2=220V$, $\alpha=30^\circ$; 绘制负载电压 u_d 和电流 i_d 波形。





西安航空学院课程考试试卷

2019~2020 学年第二学期期末考试答案

电力电子技术 B 试卷 B

一、填空题（每空 1 分，共 20 分）

1. 逆导晶闸管是将二极管与晶闸管反并联（如何连接）在同一管芯上的功率集成器件。
2. 整流电路实现交流电到直流电转换。
3. 某晶闸管型号为 KP100-12，额定电流是100A，额定电压是1200V。
4. 有源逆变条件为（1）直流侧要有直流电动势，极性与晶闸管的导通方向一致，绝对值略大于 U_d 的绝对值；（2）触发角大于 90 度， $U_d < 0$ 。
5. 逆变电路可以根据直流侧电源性质不同分类，当直流侧是电压源时，称此电路为电压型逆变电路，当直流侧为电流源时，称此电路为电流型逆变电路。电压型逆变电路一般采用全控型器件，换流方式为器件换流。
6. 单相交流调压电路带阻感负载，当控制角 $\alpha < \varphi$ ($\varphi = \arctan(\omega L/R)$) 时，VT1 的导通时间逐渐减小，VT2 的导通时间逐渐增大。
7. 直流斩波电路中最基本的两种电路是降压斩波和升压斩波。
8. PWM 波形只在单个极性范围内变化的控制方式称 PWM 单极性控制方式，三相桥式 PWM 型逆变电路采用 PWM 双极性控制方式。
9. 软开关技术通过在电路中引入谐振改善了开关的开关条件，大大降低了硬开关电路存在的开关损耗和开关噪声问题。

二、选择题（每题 2 分，共 20 分）

1. 晶闸管的通态电流（额定电流）是用电流的什么值来表示的。 (C)
 - A. 瞬时值
 - B. 最大值
 - C. 平均值
 - D. 有效值
2. 关于器件换流，下面表述正确的是哪一个？ (A)
 - A. IGBT、MOSFET 等全控型器件的关断从而使电流通路转移到另一支路，属于器件换流
 - B. 二极管从正向导通到反向截止也属于器件换流。
 - C. GTO、SCR 等可控器件的关断都是属于器件换流。
 - D. 二极管从反向截止到正向导通也属于器件换流。
3. 关于单相电压型逆变电路，下面表述正确的是哪一个？ (C)
 - A. 单相电压型逆变电路的移相调压方式，改变占空比就可调节输出电压的有效值。
 - B. 单相电压型逆变电路的移相调压方式，改变占空比就可调节输出电压的峰值。
 - C. 单相电压型逆变电路的移相调压方式，只要改变滞后角 q 就可调节输出电压的有效值。
 - D. 单相电压型逆变电路的移相调压方式，改变改变滞后角 q 不能调节输出电压的有效值。
4. 多相多重斩波电路，表述正确的是： (A)
 - A. 多相多重斩波电路是由多个结构相同基本斩波电路组成。相数指的是一周期电源侧电流脉波数，重数指的是负载电流脉波数。
 - B. 多相多重斩波电路是由多个结构不同基本斩波电路组成。相数指的是基本斩波电路数量，重数指的是单相负载。



西安航空学院课程考试试卷

C.多相多重斩波电路是由多个结构相同基本斩波电路组成。相数指的是基本斩波电路数量，重数指的是负载数量。

D.多相多重斩波电路可以由多个结构不同的基本斩波电路组成。相数指的是一周期负载电流脉波数。重数指的是一周期电源侧电流脉波数。

5..单相半桥电压型逆变电路中，输入电压为 U_d ，则输出矩形波电压幅值应为。(B)

- A. $2U_d$ B. $U_d/2$ C.0 D. U_d

6.关于 PWM 异步调制，表述正确的是：(B)

A.载波信号和调制信号不保持同步的调制方式称为异步调制。通常载波频率 f_c 是变化的，信号波频率 f_r 也是变化的，载波比 N 却是不会变化的。

B.载波信号和调制信号不保持同步的调制方式称为异步调制。通常载波频率 f_c 固定不变，信号波频率 f_r 变化时，载波比 N 是变化的。

C.只要载波比 N 是不变的调制方式称为异步调制。通常载波频率 f_c 固定不变，信号波频率 f_r 是变化的。

D.异步调制指的是，载波频率 f_c 、信号波频率 f_r 都是变化的，载波比 N 是不变的。

7. 整流变压器漏抗对电路的影响是 (B)。

- A. 输出电压增大 B. 输出电压减小
C. 功率因数增加 D. 电流脉动程度加大

8. 关于斩控式单相交流调压电路而言，(C) 种说法是错误的？

- A.输出电压波形是由多段输入电压波形组成
B.占空比决定了输出电压的有效值
C.输出电压基波超前输入电压

D.斩波频率越高，输出电压的谐波含量越低

9.三相全控桥式整流电路中，共阴极组 VT1、VT3、VT5 的触发脉冲要求间隔：(A)

- A. 120° B. 180° C. 60° D. 90°

10.关于隔离型直流-直流变流电路，下面表述正确的是哪一个？(A)

- A.直流-直流变流电路包括直接直流变流电路和间接直流变流电路两类。
B.正激和反激电路属于单端激励电路，用于大功率场合。
C.推挽电路属于双端激励电路，用于小功率场合。
D.全桥和半桥电路属于双端激励电路，用于小功率场合。

三、简答题 (4 小题，共 20 分)

1、(本题 6 分) 维持晶闸管导通的条件是什么？怎样才能使晶闸管由导通变为关断？

答：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。(3分)

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。

(3分)

2、(本题 6 分) 电压型逆变电路中反馈二极管的作用是什么？为什么电流型逆变电路中没有反馈二极管？

答：在电压型逆变电路中当交流侧为阻感性负载时需要提供无功功率，直流侧电容起缓冲无功能量的作用。为了给交流侧相直侧反馈的无功能量提供通道，逆变桥各臂都并联了反馈二极管。当输出交流电压和电流的极性相同时，电流经电路中可控开关器件流通，而当输出电压电流极性相反时，由反馈二极管提供电流通道。

(3分)



西安航空学院课程考试试卷

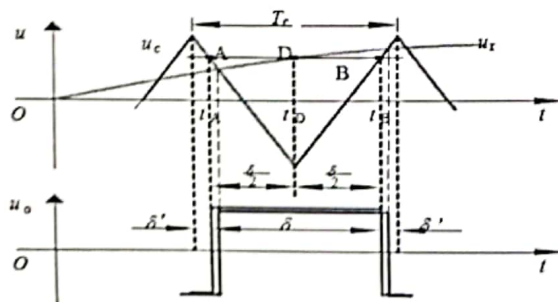
在电流型逆变电路中，直流电流极性是一定的，无功能量由直流侧电感来缓冲。当交流侧相直流侧反馈无功能量时，电流并不反向，依然经电路中的可控开关器件流通，因此，不需要并联反馈二极管。（3分）

3、（本题 6 分）简述单相交变频的工作原理。

答：电路由两组整流装置反并联构成，正组和反组整流器交替以低于电源的频率切换正反组整流器的工作状态。（2分）当正组工作时，反组封锁时，负载输出电压为上正下负，如果反组工作，正组封锁，负载输出电压为上负下正，如果触发角不变，输出电压波形为矩形波。（2分）如果让控制角从 $90^\circ \sim 0^\circ$ 逐渐减小，再从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 逐渐增加，正组工作时得到的输出电压的平均值按正弦规律变化，有零增大到最大值，再减小到 0，反组工作时用同样的方法，得到接近于正弦波的输出电压。（2分）

4、（本题 6 分）什么是 SPWM 波形的规则化采样法？

答：规则采样法是在取三角载波两个正峰值之间为一个采样周期，使每个 SPWM 脉冲的中点和三角波的中点重合（负峰值），在三角波的负峰值时刻对正弦信号波采样而得到正弦波的值，用幅值与该正弦波的值相等的一条水平直线近似代替正弦波信号，用该直线与三角载波的交点代替正弦波与载波的交点，得到开关器件的通断时刻。（6分）



脉冲宽度：

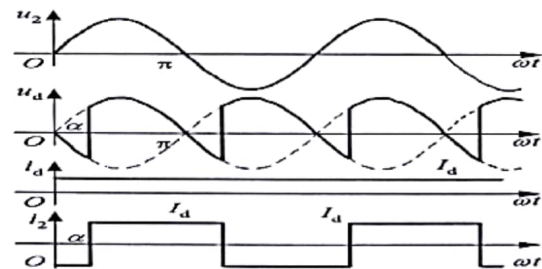
$$\delta = \frac{T_c}{2}(1 + a \sin \omega_r t_D)$$

四、画图 and 计算题（3 小题，共 36 分）

1、（本题 16 分）单相桥式全控整流电路， $U_2=100V$ ，负载中 $R=2\Omega$ ， L 值极大，反电势 $E=60V$ ，当 $\alpha=30^\circ$ 时，要求：

- 1) 作出 u_d 、 i_d 和 i_2 的波形；
- 2) 求整流输出平均电压 U_d 、电流 I_d ，变压器二次侧电流有效值 I_2 ；
- 3) 考虑安全裕量，确定晶闸管的额定电压和额定电流。

解：1)



(4分)

2) 整流输出平均电压 u_d 、电流 I_d ，变压器二次侧电流有效值 I_2 分别为：

$$U_d = 0.9 U_2 \cos \alpha = 0.9 \times 100 \times \cos 30^\circ = 77.94 \text{ (A)} \quad (2 \text{ 分})$$

$$I_d = (U_d - E) / R = (77.94 - 60) / 2 = 8.97 \text{ (A)} \quad (2 \text{ 分})$$

$$I_2 = I_d = 8.97 \text{ (A)} \quad (2 \text{ 分})$$

3) 晶闸管承受的最大反向电压为：

$$\sqrt{2} U_2 = 100 \sqrt{2} = 141.4 \text{ (V)} \quad (2 \text{ 分})$$



西安航空学院课程考试试卷

流过每个晶闸管的电流的有效值为:

$$I_{VT} = I_d / \sqrt{2} = 6.34 \text{ (A)} \quad (2 \text{ 分})$$

故晶闸管的额定电压为:

$$U_N = (2 \sim 3) \times 141.4 = 283 \sim 424 \text{ (V)} \quad (1 \text{ 分})$$

晶闸管的额定电流为:

$$I_N = (1.5 \sim 2) \times 6.34 / 1.57 = 6 \sim 8 \text{ (A)} \quad (1 \text{ 分})$$

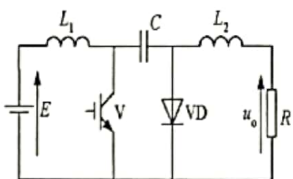
晶闸管额定电压和电流的具体数值可按晶闸管产品系列参数选取。

2、(本题 12 分) Cuk 斩波电路, 电阻负载, 要求:

1) 画出主电路;

2) 若电源电压 $E=100\text{V}$, 输出电压要求在 $50\text{--}200\text{V}$ 可调, 计算相应的占空比 $\alpha = t_{on}/T$, 并写出 α 变化范围。

解: 1) Cuk 斩波电路



a)

(4 分)

$$2) U_o = \frac{t_{on}}{t_{off}} E = \frac{t_{on}}{T - t_{on}} E = \frac{\alpha}{1 - \alpha} E \quad (2 \text{ 分})$$

当 $U_o=50\text{V}$

$$U_o = \frac{t_{on}}{t_{off}} E = \frac{t_{on}}{T - t_{on}} E = \frac{\alpha}{1 - \alpha} E$$

$$50 = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \times 100 \quad (2 \text{ 分})$$

$$\alpha \approx 0.33$$

当 $U_o=200\text{V}$

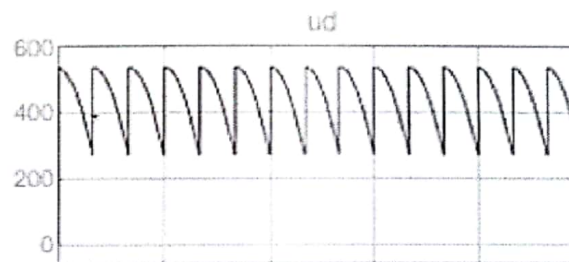
$$U_o = \frac{t_{on}}{t_{off}} E = \frac{t_{on}}{T - t_{on}} E = \frac{\alpha}{1 - \alpha} E$$

$$200 = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \times 100 \quad (2 \text{ 分})$$

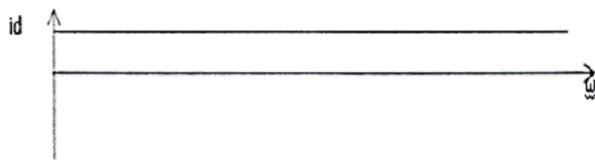
$$\alpha \approx 0.67$$

所以输出电压平均值在 $50\text{--}200\text{V}$ 可调, α 变化范围是 $0.33 \sim 0.67$ 。 (2 分)

3、(本题 8 分)



(5 分)



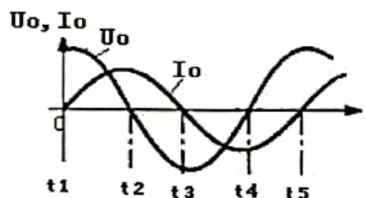
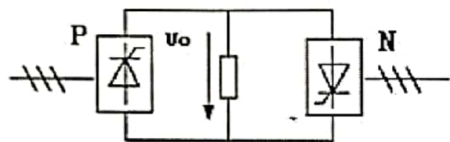
(3 分)



西安航空学院课程考试试卷

10、对于单相交变频电路如下图，在 $t_1 \sim t_2$ 时间段内，P 组晶闸管变流装置与 N 组晶闸管变流装置的工作状态是 ()

- A、P 组阻断，N 组整流
- B、P 组阻断，N 组逆变
- C、N 组阻断，P 组整流
- D、N 组阻断，P 组逆变



得分	
----	--

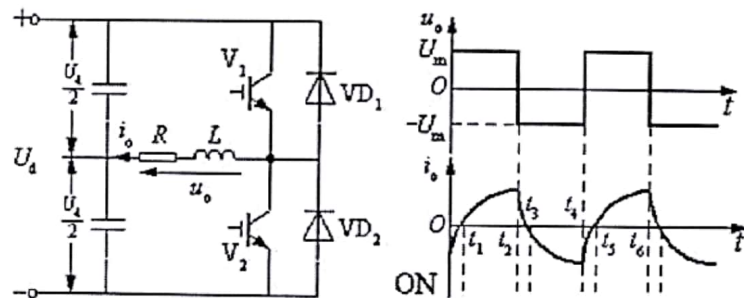
二、填空题 (每空 1 分, 共 20 分)

- 在电力电子器件中 _____ 存在二次击穿现象, _____ 存在擎住效应。
- 晶闸管实际承担的某波形电流有效值与通态平均电流 $I_{T(AV)}$ 的比值为 _____。
- 在 GTR、GTO、IGBT 与 MOSFET 中, 开关速度最快的是 _____, 应用最为广泛的是 _____。
- 电力电子器件在串联使用时应注意的问题是: _____, 在并联使用时应注意的问题是 _____。

5、在电流型逆变器中, 输出电压为 _____ 波, 输出电流为 _____ 波。

6、如下图, 指出单相半桥电压型逆变电路工作过程中各时间段电流流经的通路(用 V_1, VD_1, V_2, VD_2 表示)。

- $0 \sim t_1$ 时间段内, 电流的通路为 _____;
- $t_1 \sim t_2$ 时间段内, 电流的通路为 _____;
- $t_2 \sim t_3$ 时间段内, 电流的通路为 _____;
- $t_3 \sim t_4$ 时间段内, 电流的通路为 _____;
- $t_4 \sim t_5$ 时间段内, 电流的通路为 _____;



7、根据载波和信号波是否同步及载波比的变化情况, PWM 调制方式可分为 _____ 和 _____。一般为综合两种方法的优点, 在低频输出时采用 _____ 方法, 在高频输出时采用 _____ 方法。

8、按照开关过程前后开关器件电压电流状态, 软开关电路可分为 _____ 和 _____。

得分	
----	--

三、简答题 (共 4 小题, 每题 6 分, 共 24 分)



西安航空学院课程考试试卷

1、(本题 6 分) 列举本课程所介绍的电力电子器件, 并按照器件能够被控制电路信号所控制的程度进行分类。

2、(本题 6 分) 何为电压型逆变电路? 其主要特点是什么?

3、(本题 6 分) 试说明 PWM 控制的基本原理。

4、(本题 6 分) 交流调压电路和交流调功电路有什么区别? 为什么?

得分	
----	--

四、计算画图题 (共 3 小题, 共 40 分)

1、(本题 9 分) 试绘出降压斩波电路的电路原理图, 并简述其基本工作原理。推导输出电压平均值 U_o 关于占空比 α 的表达式若电源电压 $E=100V$, 电感极大, 负载电阻 $R=10\Omega$ 。计算当 $T=120\text{ s}$, 每开关周期导通 30 s 时, 输出电压的平均值 U_o 。



西安航空学院课程考试试卷

2、(本题 13 分)单相桥式全控整流电路, $U_2=200V$, 负载中 $R=2\Omega$, L 值极大, 当 $\alpha=30^\circ$ 时, 要求: ①作出 u_d 、 i_d 、和 i_2 的波形 ②求整流输出平均电压 U_d 、电流 I_d , 变压器二次电流有效值 I_2 ; ③考虑两倍安全裕量, 确定晶闸管的额定电压和额定电流。

3、(本题 14 分)三相桥式不可控整流电路, 阻感负载, $R=5\Omega$, $L=\infty$, $U_2=220V$, $X_B=0.3\Omega$, 求 U_d 、 I_d 、 I_{VD} 、 I_2 和 I_{2a} 的值并作出 u_d 、 i_{VD} 和 i_2 的波形。



西安航空学院课程考试试卷参考答案与评分标准

2019~2020 学年第 2 学期期末考试

电力电子技术 B 参考答案与评分标准 A

一、选择题（每题 2 分，共 20 分）

1-5 CDCBB 6-10 AACCC

二、填空题（每空 1 分，共 20 分）

- 1、GTR; IGBT
- 2、1.57
- 3、MOSFET ; IGBT
- 4、均压; 均流
- 5、正弦波; 矩形波
- 6、VD1; V1; VD2; V2; VD1;
- 7、同步调制; 异步调制; 异步调制同步调制;
- 8、零电压电路; 零电流电路

三、简答题（4 小题，共 24 分）

1、(本题 6 分) 答：不控型器件：电力二极管（1 分）；半控型器件：晶闸管 SCR(1 分)；全控型器件：GTR、GTO、MOSFET、IGBT（4 分）

2、(本题 6 分) 答：直流侧是电压源的称为逆变电路称为电压型逆变电路。(1 分) 电压型逆变电路的主要特点是：

①直流侧为电压源，或并联有大电容，相当于电压源。直流侧电压基本无脉动，直流回路呈现低阻抗。(1 分)

②由于直流电压源的钳位作用，交流侧输出电压波形为矩形波，并且与负载阻抗角无关。而交流侧输出电流波形和相位因负载阻抗情况的不同

而不同。(2 分)

③当交流侧为阻感负载时需要提供无功功率，直流侧电容起缓冲无功能量的作用。为了给交流侧向直流侧反馈的无功能量提供通道，逆变桥各臂都并联了反馈二极管。(2 分)

3、(本题 6 分) PWM 控制就是对脉冲的宽度进行调制的技术。即通过对一系列脉冲的宽度进行调制，利用面积等效原理获得所需要波形（含形状和幅值）。(3 分) 在采样控制理论中有一条重要的结论：冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时，其效果基本相同，冲量即窄脉冲的面积。效果基本相同是指环节的输出响应波形基本相同。上述原理称为面积等效原理（3 分）

4、(本题 6 分) 答：交流调压电路和交流调功电路的电路形式完全相同，二者的区别在于控制方式不同（2 分）。交流调压电路是在交流电源的每个周期对输出电压波形进行控制。(2 分) 而交流调功电路是将负载与交流电源接通几个周波，再断开几个周波，通过改变接通周波数与断开周波数的比值来调节负载所消耗的平均功率。(2 分)

四、计算画图题（共 3 小题，共 36 分）

1、(本题 10 分)

答：降压斩波器的原理是：在一个控制周期中，让 V 导通一段时间 t_{on} ，由电源 E 向 L、R、M 供电，在此期间， $u_o = E$ 。然后使 V 关断一段时间 t_{off} ，此时电感 L 通过二极管 VD 向 R 和 M 供电， $u_o = 0$ 。一个周期内的平均电

压 $U_o = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \times E$ 。输出电压小于电源电压，起到降压的作用。



西安航空学院课程考试试卷参考答案与评分标准

电路图 (3 分)、工作原理 (3 分) 及公式推导 2 分

输出电压平均值: $U_o = \alpha \times E = (30/120) \times 100 = 25V$ (2 分)

2、(本题 8 分)

解: 1) 当 $\alpha = 60^\circ$ 时不接续流二极管:

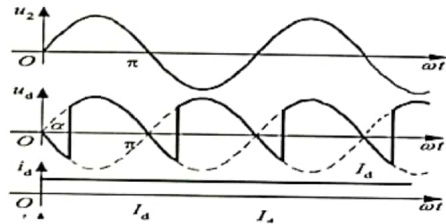
$$\begin{aligned} U_d &= 0.9 U_2 \cos \alpha \\ &= 0.9 \times 220 \times \cos 60^\circ \\ &= 99V \end{aligned}$$

(2 分)

$$I_d = \frac{U_d}{R} = \frac{99}{4} = 24.75A$$

(2 分)

3)



(4 分)

3、(本题 18 分)

解: 三相桥式不可控整流电路相当于三相桥式可控整流电路 $\alpha = 0^\circ$ 时的情况。

$$U_d = 2.34 U_2 \cos \alpha - \Delta U_d$$

$$\Delta U_d = 3 X_B I_d / \pi$$

$$I_d = U_d / R \quad (\text{每个式子 1 分})$$

解方程组得:

$$U_d = 2.34 U_2 \cos \alpha / (1 + 3 X_B / \pi R) = 486.9 (V) \quad (2 分)$$

$$I_d = 97.38 (A) \quad (1 分)$$

又:

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = 2 I_d X_B / \sqrt{6} U_2 \quad (2 分)$$

即得出

$$\cos \gamma = 0.892 \quad (1 分)$$

换流重叠角

$$\gamma = 26.93^\circ \quad (1 分)$$

二极管电流和变压器二次测电流的有效值分别为

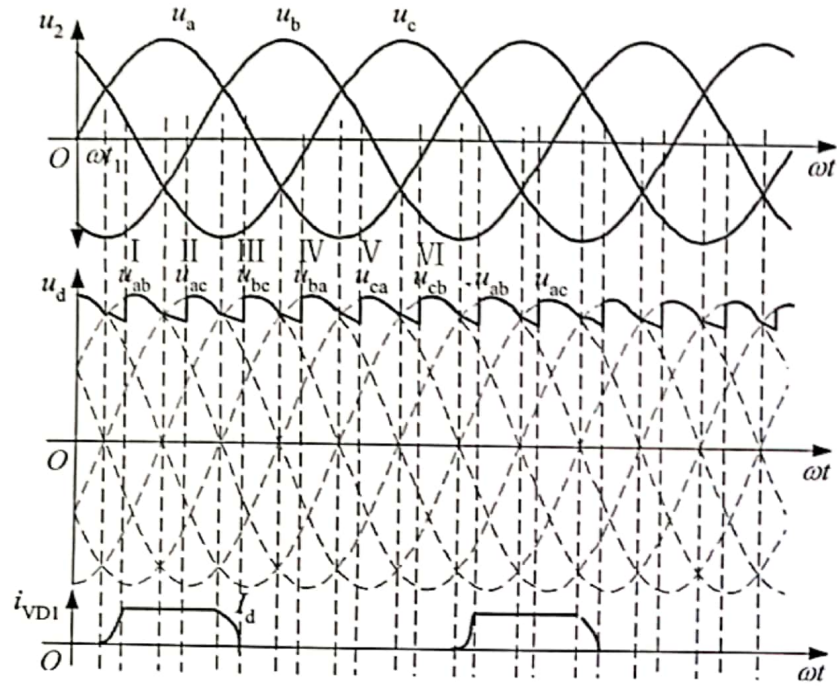
$$I_{VD} = I_d / 3 = 97.38 / 3 = 32.46 (A) \quad (2 分)$$

$$I_{2a} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = 79.51 (A) \quad (2 分)$$

u_d 、 i_{VD1} 的波形如下: (每图各 2 分)



西安航空学院课程考试试卷参考答案与评分标准



2019-2020-2 电力电子技术成绩分析统计 电气工程 194A

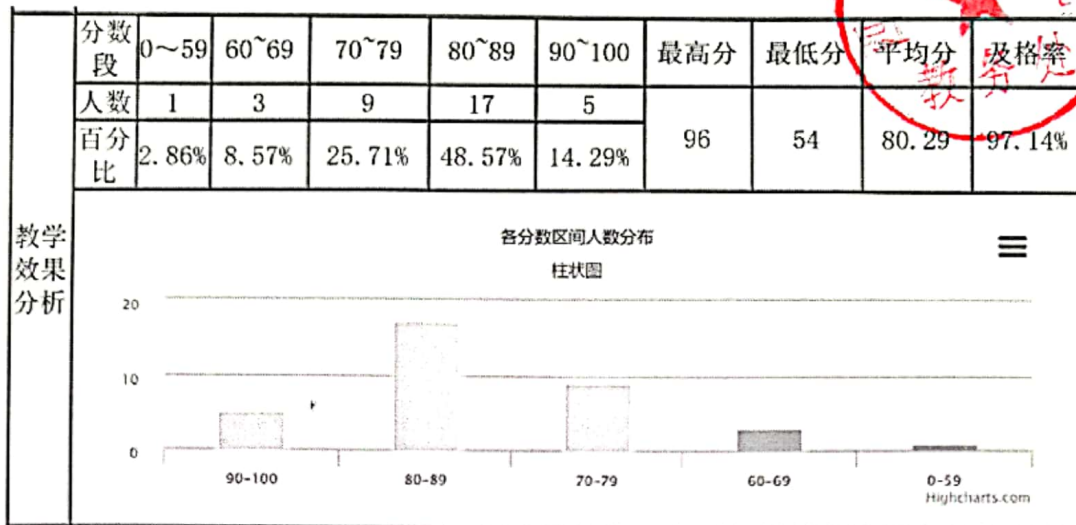
教学效果分析	成绩分数段	0~59	60~69	70~79	80~89	90~100	最高分	最低分	平均分	及格率
	人数	2	3	6	14	15	98	55	82.82	95%
	百分比	5%	7.5%	15%	35%	37.5%				

2019-2020-2 电力电子技术成绩分析统计 电气工程 195A

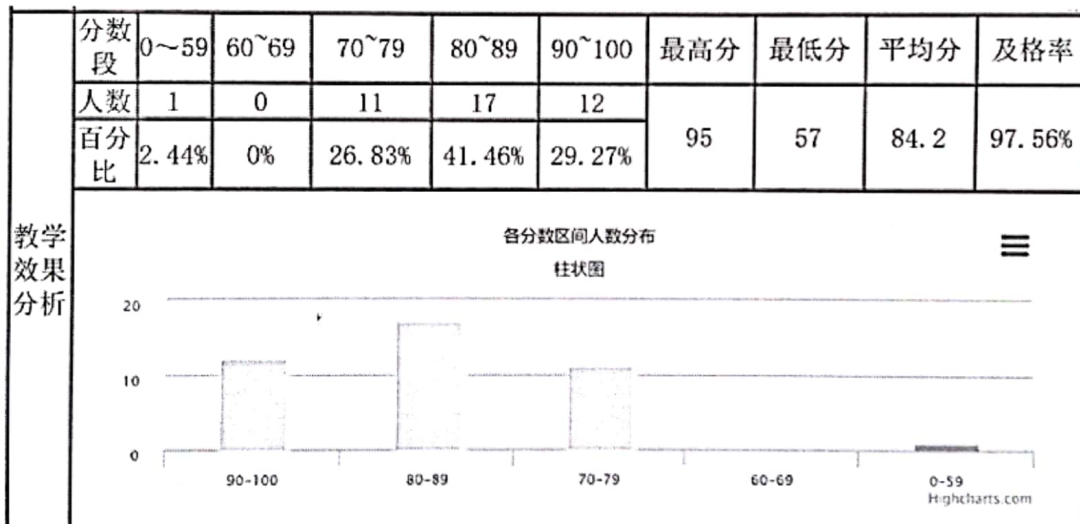
教学效果分析	成绩分数段	0~59	60~69	70~79	80~89	90~100	最高分	最低分	平均分	及格率
	人数	1	3	12	18	7	95	52	80.63	97.56%
	百分比	7.14%	46.43%	28.57%	17.86%	0%				



2019-2020-2 电力电子技术成绩分析统计 电气工程 2116



2019-2020-2 电力电子技术成绩分析统计 电气工程 2117

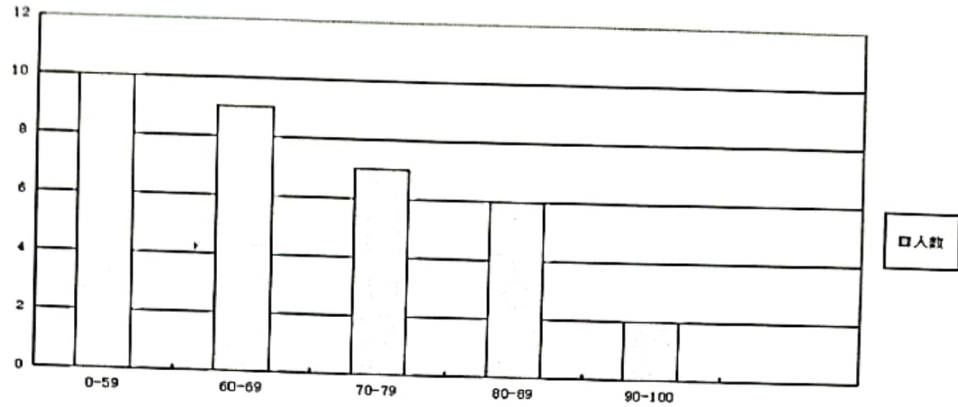


2018-2019-2 电力电子技术成绩分析统计 电气工程 2014



成绩分数段	0~59	60~69	70~79	80~89	90~100	最高分	最低分	平均分	及格率
人数	10	9	7	6	2	95	38	68.21	70.59%
百分比	29.41%	26.47%	20.59%	17.65%	5.88%				

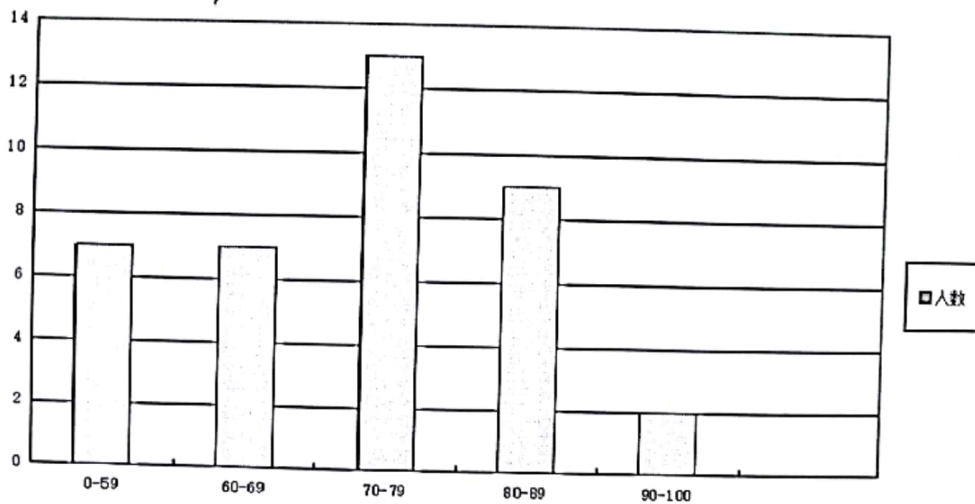
教学效果分析



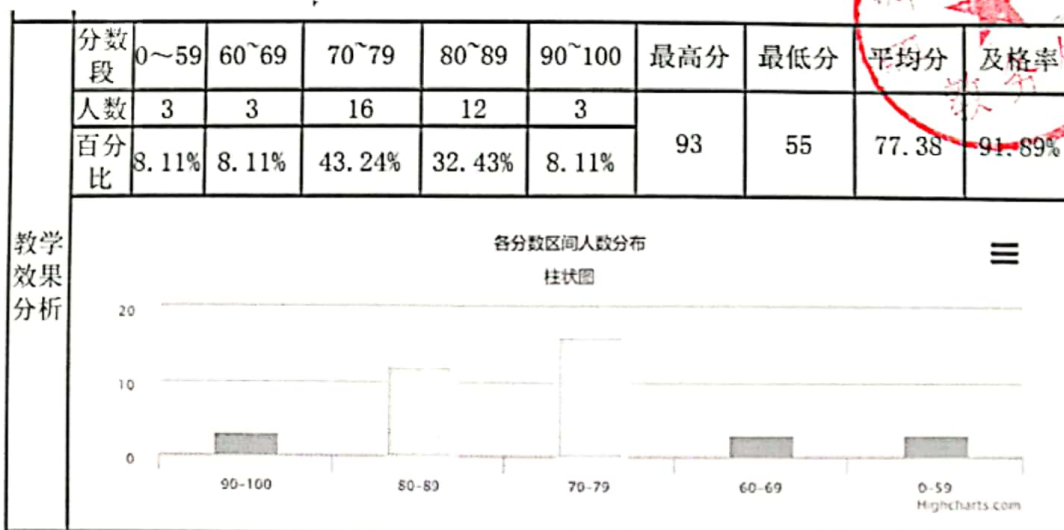
2018-2019-2 电力电子技术成绩分析统计 电气工程 2015

成绩分数段	0~59	60~69	70~79	80~89	90~100	最高分	最低分	平均分	及格率
人数	7	7	13	9	2	96	49	73	81.58%
百分比	18.42%	18.42%	34.21%	23.68%	5.26%				

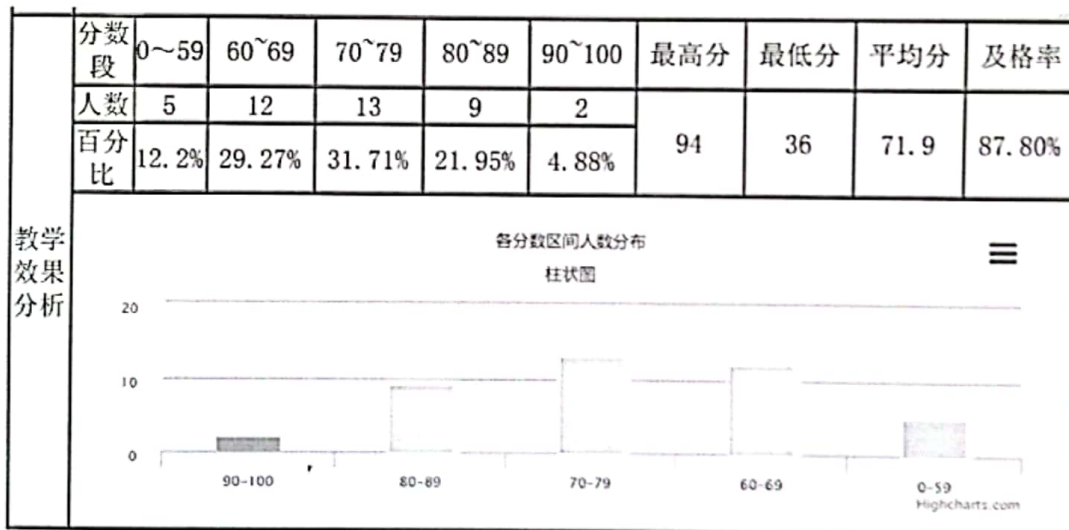
教学效果分析



2018-2019-2 电力电子技术成绩分析统计 电气工程 2013



2018-2019-2 电力电子技术成绩分析统计 电气工程 183A



2019-2020-2 电力电子技术 B

课程教案

学生：电气工程 2116,2117,194A,195A

学时：总学时 56，理论 48，实验 8

课程负责人：薛荣辉



《电力电子技术 B》电子教案

第 1 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第一章 绪论			
教学节次及名称	1.1 什么是电力电子技术 1.2 电力电子技术的发展史 1.3 电力电子技术的应用			
教学目的与要求	<ol style="list-style-type: none"> 1. 了解电力电子技术的基本知识 2. 掌握四种基本电力变换的概念 3. 了解电力电子技术的应用 			
教学重点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 四种基本电力变换的概念 2. 电力电子技术的应用，学习本门课程的意义 			
教学难点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 什么是电力电子技术 			
教学内容	<ol style="list-style-type: none"> 1. 介绍什么是电力电子技术<25 分钟> 2. 介绍电力电子技术四种基本电力变换<30 分钟> 3. 介绍电力电子技术的发展史<15 分钟> 4. 介绍电力电子技术的应用<15 分钟> 5. 小结、答疑。<5 分钟> 			
教学方法及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	了解电力电子技术的发展；掌握电力电子技术四种基本电力变换；了解电力电子技术的发展；了解电力电子技术的应用。			
作业和思考题	课后作业题			

教 案

电力电子技术 课 1 讲

主讲人 薛荣辉

课 题：绪论

目的任务：了解什么是电力电子技术，了解电力电子技术的四种电力变换，了解电力电子技术的发展史，了解电力电子技术的应用。

重点难点：电力电子变流技术

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

绪 论

一、什么是电力电子技术

1、电力电子技术的概念

电力电子技术(Power Electronic Technology) 是 20 世纪新兴的交叉学科技术, 主要由电子学、电力学及控制理论三者结合而成。电力电子技术具体完成的任务体现为: 使用电力电子器件对电能进行变换和控制, 最终将电能转换成不同的形式和用于不同的用途。电力电子器件对电能的变换范围可以从数瓦级至数百兆瓦级以上。

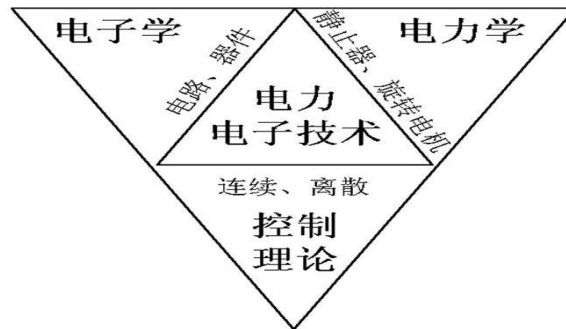


图 1-1 电力电子技术的新组合

电力电子技术和电子学

电力电子器件的制造技术和用于信息变换的电子器件制造技术的理论基础(都是基于半导体理论)是一样的, 其大多数工艺也是相同的。

电力电子电路和信息电子电路的许多分析方法也是一致的。

电力电子技术和电力学

电力电子技术广泛用于电气工程中, 这是电力电子学和电力学的主要关系。

2、电力变换

(1) 整流电路 (AC-DC): 是完成由交流电能向直流电能转换的电路。根据直流输出电压是否可以调整, 通常分为不可控整流电路和可控整流电路。

(2) 逆变电路 (DC-AC): 是完成由直流电能向交流电能转换的电路。如果逆变电路的交流输出侧与频率、电压一定的交流电源连接, 称为有源逆变; 而逆变电路的交流输出侧为无源负载时, 则称为无源逆变。

(3) 斩波电路 (DC-DC): 是通过断续开关控制将直流电压调制成稳定或可调电压的变换电路。如果斩波电路的输出电压高于输入电压, 则称为升压斩波电路; 相反, 如果斩波电路的输出电压低于输入电压, 则称为降压斩波电路。

(4) 交流交流变换 (AC-AC), 包括交流调压电路、周波变换电路、变频电路。

输入	输出	交流	直流
直流		整流	斩波
交流		交流电力变换, 变频、变相	逆变

电力电子电路中使用的电力电子器件一般均为开关元件, 根据其开关特性通常可划分为以下三种类型:

(1) 不可控器件: 这类器件主要为整流二极管, 属无控制端的二端器件, 在电力电子电路中体现为单向导电特性。

(2) 半控器件: 通常为具有三个连接端子的器件, 其中一个端子为控制端。这类器件

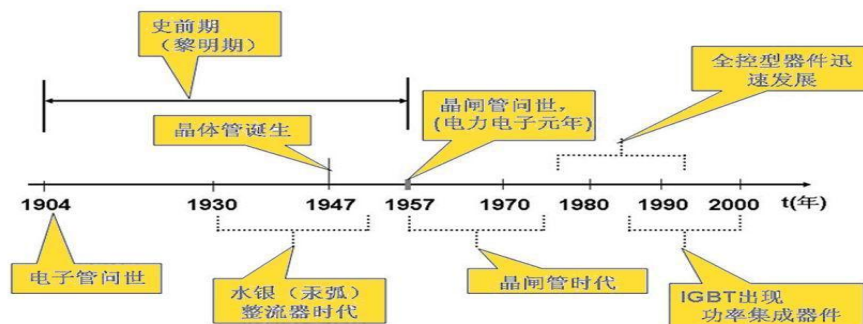
目前使用较多的是晶闸管（SCR），其特点是可以通过控制使器件开通单向导电，但控制端无法控制器件的关断。

（3）全控器件：通常也具有三个连接端子，与半控器件相比，全控器件能够通过可控开通和可控关断实现器件单向导电的开关特性。全控器件品种很多，最具代表性的器件有可关断晶闸管（GTO）和绝缘栅晶体管（IGBT）等。

三、电力电子技术的发展及现状

1. 电力电子技术的诞生

1957年美国通用电气公司研制出第一个晶闸管标志着电力电子技术的诞生，是半导体电力电子器件-晶闸管是电力电子技术发展史上的里程碑。



2. 电力电子器件发展展望

近年来出现了很多性能优良的新型化合物半导体材料，由这些基础材料的应用将使电力电子器件的性能提高到一个新的水平。

材料如下：

（1）砷化镓（GaAs）材料：与Si相比，GaAs有一些独特的优点。例如：禁带宽度能量较高，允许在高温下工作；另一优点是GaAs材料的电子迁移率为Si材料的5倍，因而同等容量下的器件几何尺寸更小，开关频率更高。

（2）碳化硅（SiC）材料：SiC是目前发展最成熟的宽禁带半导体材料，作为Si和GaAs的重要补充，可制作出性能更加优异的高温(300~500℃)、高频、高功率、高速度、抗辐射器件。用SiC材料制成的高电压、高功率器件对于电力输送和电动汽车的节能具有重要意义。

（3）磷化铟（InP）材料：InP是一种化合物半导体材料，是继Si和GaAs之后的新一代电子功能材料，可作为高速、高频微波功率器件的材料，频率可达340GHz。

概括上述内容可以看出，电力电子器件的发展趋势是：集成化、高频化、标准模块化和智能化。

四、电力电子技术的应用及前景

电力电子技术不仅广泛应用于工矿企业、交通运输、电力系统、通信系统、计算机系统、新能源系统等领域，而且在照明、空调等家用电器中也随处可见。以下是其在主要应用领域的介绍：

- （1）在电机调速传动中的应用
- （2）在电力系统中的应用
- （3）在工业感应加热电源中的作用
- （4）在大功率直流电源中的应用
- （5）在汽车工业中的应用

五、课程学习内容及教学要求

电力电子技术是自动化专业的专业课。该课程的学习需要具备高等数学、电工电子技术、

电机拖动、自动控制技术等方面的知识及相关课程的综合运用能力。

另外，通过本课程内容的学习，争取实现以下教学要求：

- (1) 了解电力电子技术的基本内容、发展过程及应用范围。
- (2) 掌握常用半导体器件的基本结构、工作原理、基本特性及主要参数。
- (3) 掌握基本整流电路的工作原理、波形特点、参数计算以及器件的选择。
- (4) 熟悉各类逆变电路的结构，能够通过电路波形分析工作过程和工作状态。
- (5) 掌握典型触发驱动控制电路的工作原理及应用方法。
- (6) 掌握交流调压的原理及输出调整的计算方法，掌握典型直流变换电路。
- (7) 了解电力电子电路的综合应用，获得一些基本的分析、调试及故障排除能力。

《电力电子技术 B》电子教案

第 2 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第二章 电力电子器件			
教学节次及名称	2.1 电力电子器件概述 2.2 电力二极管 2.3 晶闸管			
教学目的 与要求	<ol style="list-style-type: none"> 1. 了解电力电子器件概念和特征 2. 了解电力电子器件的分类 3. 掌握电力二极管的结构和工作原理 4. 掌握晶闸管的结构和工作原理 			
教学重点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 电力电子器件的特征分类 2. 电力二极管，晶闸管的工作原理，参数计算 			
教学难点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 电力电子器件的分类 			
教学内容	<ol style="list-style-type: none"> 1. 介绍电力电子器件概念<10 分钟> 2. 介绍电力电子器件与信息电子电路器件的区别<5 分钟> 3. 介绍电力电子器件的分类<20 分钟> 4. 介绍电力二极管的结构和工作原理<20 分钟> 5. 介绍晶闸管工作原理、符号、主要参数、派生器件<30 分钟> 6. 小结、答疑。<5 分钟> 			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	<p style="text-align: center;">了解电力电子器件与信息电子器件的区别，什么是电力电子器件？掌握电力电子器件的分类，掌握电力二极管，晶闸管的符号、工作原理、主要参数、派生器件符号。</p>			
作业和思 考题	课后作业题			

教 案

电力电子技术 课 2 讲

主讲人 薛荣辉

课 题：电力电子器件

目的任务：了解电力电子器件的发展，了解电力电子器件的分类，掌握电力二极管，晶闸管的工作原理。

重点难点：半导体器件的主要参数

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

电力电子器件的概念

一、基本概念

1.电力电子器件（Power Electronic Device）指可直接用于处理电能的主电路中，实现电能的变换或控制的电子器件。

2.主电路：在电气设备或电力系统中，直接承担电能的变换或控制任务的电路。

3.电力电子器件：广义上电力电子器件可分为电真空器件和半导体器件两类，目前往往专指电力半导体器件。

二、电力电子器件的特征

1.所能处理电功率的大小，也就是其承受电压和电流的能力，是其最重要的参数，一般都远大于处理信息的电子器件。

2.为了减小本身的损耗，提高效率，一般都工作在开关状态。

3.由信息电子电路来控制，而且需要驱动电路。

4.自身的功率损耗通常仍远大于信息电子器件，在其工作时一般都需要安装散热器。

3.电力电子器件的功率损耗

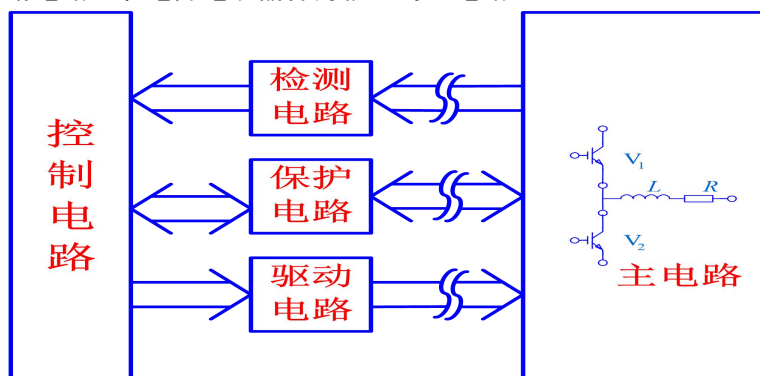
通态损耗

断态损耗

通断损耗 开通损耗 关断损耗

三、电力电子系统组成

控制电路、驱动电路、以电力电子器件为核心的主电路



四、电力电子器件的分类

1.按照能够被控制电路信号所控制的程度

◆半控型器件

☞主要是指晶闸管（Thyristor）及其大部分派生器件。

☞器件的关断完全是由其在主电路中承受的电压和电流决定的。

◆全控型器件

☞目前最常用的是 IGBT 和 Power MOSFET。

☞通过控制信号既可以控制其导通，又可以控制其关断。

◆不可控器件

☞电力二极管（Power Diode）

☞不能用控制信号来控制其通断。

2.按照驱动信号的性质

◆电流驱动型

☞通过从控制端注入或者抽出电流来实现导通或者关断的控制。

◆电压驱动型

☞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的控

制。

■按照驱动信号的波形（电力二极管除外）

◆脉冲触发型

☞通过在控制端施加一个电压或电流的脉冲信号来实现器件的开通或者关断的控制。

◆电平控制型

☞必须通过持续在控制端和公共端之间施加一定电平的电压或电流信号来使器件开通并维持在导通状态或者关断并维持在阻断状态。

3.按照载流子参与导电的情况

◆单极型器件

☞由一种载流子参与导电。

◆双极型器件

☞由电子和空穴两种载流子参与导电。

◆复合型器件

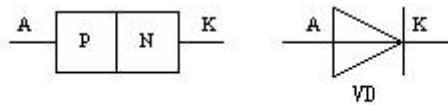
☞由单极型器件和双极型器件集成混合而成，也称混合型器件。

2.2 电力二极管

一、封装和符号

功率二极管又称为电力二极管，可以承受高电压大电流且具有较大的耗散功率，是由一个面积较大的PN结和两端引线封装组成的，引出的两个电极分别称为阳极A和阴极K。

可以把二极管看成是理想开关。



功率二极管的结构和图形符号

功率二极管主要参数的选择原则与普通二极管有所不同。

二、基本特性

1. 静特性

◆正向电压大到一定值（门槛电压 U_{TO} ），正向电流才开始明显增加，处于稳定导通状态。与 I_F 对应的电力二极管两端的电压即为其正向电压降 U_F 。

◆承受反向电压时，只有少子引起的微小而数值恒定的反向漏电流。

2. 动态特性

三、主要参数

1. 额定电流

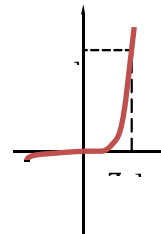
$$I_F = (1.5 \sim 2) \frac{I_{TD}}{1.57}$$

1

取相应标准系列值。

2. 额定电压

在额定结温条件下，取元件反向伏安特性不重复峰值电压值 U_{RSM} 的 80%称为反向重复



峰值电压 U_{RRM} ，将 U_{RRM} 值取规定的电压等级作为该元件的额定电压。反向重复峰值电压 U_{RRM} 的选择原则应为管子在所工作中可能承受到的最大反向瞬时电压值的 U_{DM} 2~3 倍，即

$$U_{RRM} = (2\sim 3)U_{DM} \quad 2$$

取相应标准系列值。

四、电力二极管的种类

1. 整流二极管

特点是通态正向压降很低，反向阻断电压和工作电流可以高达几千伏和几千安，但反向恢复时间较长。整流二极管多用于开关频率不高的场合，一般开关频率在 1 kHz 以下使用。

2. 快速恢复二极管

特点是恢复时间短，尤其是反向恢复时间短，一般在 $5\mu s$ 以内。它多用于与可控开关配合的高频电路中。

3. 肖特基二极管

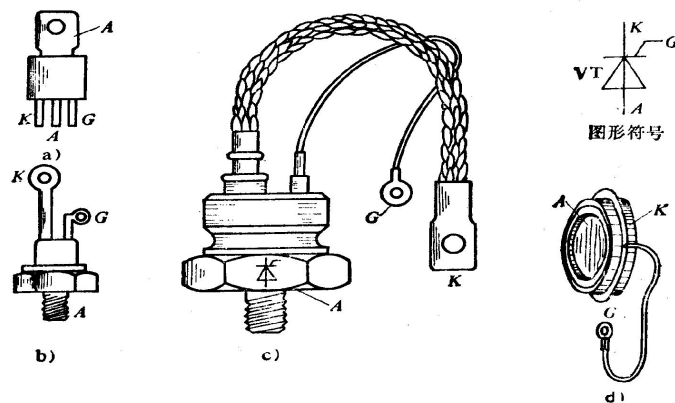
肖特基二极管是以金属材料(为正极)和 N 型半导体材料(为负极)接触面上形成的势垒具有整流特性为基础，制成的半导体二极管。其反向恢复时间更短，一般仅为几十 ns。它适用于较低输出电压和要求较低正向管压降(典型值为 0.3 V)的换流电路中。

2.3 晶闸管 (SCR)

一、晶闸管的基本结构与工作原理

1. 结构

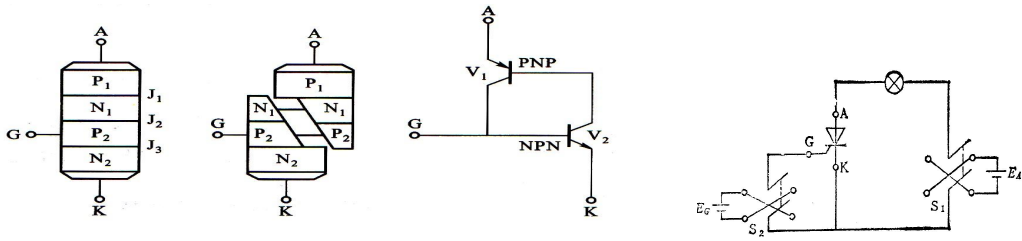
晶闸管的外形大致有三种：塑封形、螺栓形和平板形。额定电流 10 A 以下的多为塑封形，在 10 A 以上至 200 A 以下的为螺栓形，200 A 以上的为平板形。晶闸管的外形是为便于安装散热器而设计的，这是因为器件工作时，因损耗而产生热量，需要通过散热器来降低管芯温度。



晶闸管的外形及符号

(a)塑封形；(b)、(c)螺栓形；(d)平板形

晶闸管是具有三个 PN 结的四层 ($P_1N_1P_2N_2$) 三端 (A、K、G) 器件，由最外的 P_1 层和 N_2 层引出两个电极，分别为阳极 A 和阴极 K，由中间 P_2 层引出的电极是门极 G (也称控制极)。



通过以上实验结果，可得到如下结论：

(1) 晶闸管的导通条件：在晶闸管的阳极和阴极间加正向电压，同时在它的门极和阴极间也加适当的正向电压，两者缺一不可。

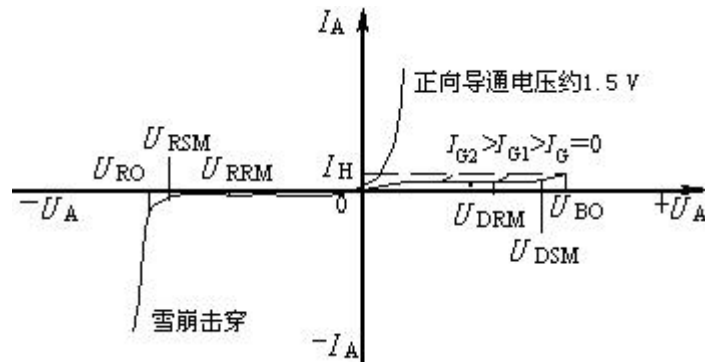
(2) 晶闸管一旦导通，门极即失去控制作用，此时可以把门极电压撤去。因此，门极电压不需保持直流电压，常采用脉冲信号。晶闸管从阻断变为导通的过程称为触发导通，一般门极的触发电流只有几十毫安到几百毫安，而晶闸管导通后，却可以通过几百、几千安的电，所以说，通过晶闸管实现了弱电对强电的控制。

(3) 晶闸管的关断条件：使流过晶闸管的阳极电流小于维持电流。维持电流是保持晶

闸管导通的最小电流。由于门极只能控制晶闸管的导通，却无法控制其关断，因此又称晶闸管为半控型器件。

二、晶闸管的伏安特性

晶闸管的阳极与阴极间的电压与阳极电流之间的关系，称为阳极伏安特性。伏安特性曲线如图 1-13 所示。



晶闸管的阳极伏安特性

图中位于第一象限的是正向特性，位于第三象限的是反向特性。

其主要特性表现如下：

(1) 在正向偏置下，当 $I_G = 0$ 时，如果在晶闸管两端所加正向电压 U_A 没有超过正向转折电压 U_{BO} 时，元件都处于正向阻断状态，只有很小的正向漏电流。当 $U_A = U_{BO}$ 时，发生转折，漏电流急剧增大，器件由阻断状态进入导通状态，正向电压降低，其特性和二极管的正向伏安特性相仿。这种由电压引起的导通称为电压触发导通，是一种硬开通，多次这样会造成晶闸管的损坏，所以通常不允许采用。

(2) 当采用门极触发导通方式时，门极触发电流 I_G 越大，正向转折电压 U_{BO} 就越低。而当 I_G 足够大时，管子就导通了。此时，晶闸管的正向转折电压 U_{BO} 很小，压降也很小。

晶闸管正向导通的伏安特性与二极管的正向特性类似。晶闸管一旦触发导通后，即使去掉门极信号，器件仍能维持导通状态不变。所以，晶闸管一旦导通，门极就失去控制作用。

(3) 导通之后，只要逐步减小阳极电流 I_A ，使 I_A 下降到小于维持电流 I_H ，则器件又可恢复到阻断状态。这种关断方式称为自然关断。除此之外，还可采用加反偏电压的方法进行强迫关断。

(4) 在反向偏置下，其伏安特性和整流管的反向伏安特性相似。处于反向阻断状态时，只有很小的反向漏电流，当反向电压超过反向击穿电压 U_{BO} 后，反向漏电流急剧增大，造成晶闸管反向击穿而损坏。

二、晶闸管主要参数

1. 电压参数

1) 额定电压 U_{Tn}

在门极断路和晶闸管正向阻断的条件下，可重复加在晶闸管两端的正向峰值电压称为正向重复峰值电压 U_{DRM} ，一般规定此电压为正向转折电压 U_{BO} 的 80%。同理，在门极断路时，可以重复加在晶闸管两端的反向峰值电压称为反向重复峰值电压 U_{RRM} ，此电压取 U_{RO} 的 80%。一般把 U_{DRM} 和 U_{RRM} 中较小的那个值按百位取整后作为该晶闸管的额定电压值。晶闸管元件的耐压会因散热条件恶化和结温升高而降低，因此选择元件的额定电压时应注意留有充分的裕量。一般应按工作电路中可能承受到的最大瞬时值电压 U_{TM} 的 2~3 倍来选择，即

$$U_{Tn} = (2 \sim 3) U_{TM} \quad 1$$

2) 通态平均电压 $U_{T(AV)}$

当流过正弦半波电流并达到稳定的额定结温时，晶闸管阳极与阴极之间电压降的平均值称为通态平均电压。额定电流大小相同的管子，通态平均电压越小，耗散功率就越小，管子质量就越好。

2. 电流参数

1) 额定电流 $I_{T(AV)}$

晶闸管的额定电流用通态平均电流来表示。在环境温度小于 40°C 和标准散热及全导通的条件下，晶闸管允许通过的工频正弦半波电流平均值称为通态平均电流 $I_{T(AV)}$ ，或正向平均电流。按晶闸管标准电流系列取值，称为该晶闸管的额定电流。通常所说晶闸管是多少安就是指这个电流。如果正弦半波电流的最大值为 I_m ，则

$$I_{T(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{\pi} \quad 2$$

额定电流有效值 I_T 为

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{2} \quad 3$$

但在实际使用中，对于不同的电路、不同的负载，流过晶闸管的电流波形及导通角并不并不相同，各种含有直流分量的电流波形都有一个电流平均值（一个周期内波形面积的平均值），也就有一个电流有效值（均方根值）。我们把某电流波形的有效值与平均值之比称为该电流的波形系数，用 K_f 表示，即

$$K_f = \frac{I_T}{I_{T(AV)}} = \frac{\pi}{2} = 1.57 \quad 4$$

这说明额定电流 $I_{T(AV)} = 100A$ 的晶闸管，其额定电流有效值为 $I_T = K_f I_{T(AV)} = 157A$ 。

在选用晶闸管的时候，首先要根据管子的额定电流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电流有效值，且散热冷却在规定的条件下，管芯的发热就可以限制在允许范围内。考虑到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，一般以实际最大工作电流乘以 1.5~2 的安全系数来选择 $I_{T(AV)}$ ，即

$$I_{T(AV)} = (1.5 - 2) \frac{I_T}{1.57} \quad 5$$

2) 维持电流 I_H

在室温和门极断开时，元件从较大的通态电流降至维持通态所必需的最小电流称为维持电流。

3) 掣住电流 I_L

在晶闸管由阻断状态转入导通状态时，去掉触发信号，此时能使元件保持导通所需的最小阳极电流称为掣住电流 I_L 。 I_L 为维持电流 I_H 的 2~4 倍。

3. 其他参数

1) 晶闸管的开通时间 t_{on} 与关断时间 t_{off}

晶闸管开通时间 t_{on} 是指从门极触发电压前沿的 10% 到元件阳极电压下降至 10% 所需的时间，普通晶闸管的 t_{on} 约为 $6\mu s$ 。为了缩短开通时间，常采用实际触发电流比规定触发电流大 3~5 倍、前沿陡的窄脉冲来触发。如果触发脉冲宽度不够，则晶闸管就不可能被触发导通。为保证晶闸管可靠触发，要求触发脉冲的宽度稍大于 t_{on} 。

晶闸管的关断时间 t_{off} 是指晶闸管从正向阳极电流下降为零到它恢复正向阻断能力所需要的时间。晶闸管的关断时间与元件结温、关断前阳极电流的大小以及所加反压的大小有关。普通晶闸管的 t_{off} 约为几十到几百微秒。

2) 门极触发电流 I_{GT} 和门极触发电压 U_{GT}

在室温下，对晶闸管加上 6V 正向阳极电压时，使元件由断态转入通态所必需的最小门极电流称为门极触发电流 I_{GT} ，相应的门极电压称为门极触发电压 U_{GT} 。若触发电流太小，容易受干扰而引起误触发；若触发电流太大则会造成控制电路功率的负担。因此，不同系列的晶闸管都规定了最大和最小触发电流、触发电压的范围。因为受温度影响很大，而元件铭牌上的数据是常温下所测，所以实际工作时的触发电压和触发电流应视具体情况而定。

3) 断态电压临界上升率 du/dt 和通态电流临界上升率 di/dt

在额定结温和门极开路情况下，使元件从断态到通态所需的最低阳极电压上升率称为断态电压临界上升率。为防止晶闸管的误导通，晶闸管使用中要求断态下阳极电压的上升速度要低于此值。可以通过在元件两端并接阻容电路，利用电容两端电压不能突变的性质来限制电压上升率。

在额定条件下，晶闸管在门极触发开通时管子能够承受而不致损坏的最大通态电流上升率称为通态电流临界上升率。为限制通态电流临界上升率，可以在阳极回路中串入小电感，来对增长过快的电流进行限制。

三、晶闸管的型号及简单测试方法

1. 晶闸管的型号

晶闸管通常采用两种命名标准，一种为 KP 型，另一种为 CT 型。命名如下：

KP[额定电流等级]-[额定电压等级][通态平均电压组别]

3CT[额定电流等级]/[额定电压]

其中 K 和 3CT 代表晶闸管；P 代表类型为普通型，可以替换为 S（双向型），G（可关断型），N（逆导型）。额定电压值为额定电压等级乘以 100；当额定电流小于 100 A 时，通态平均电压组别可以不标。

例如 KP100-12G，表示额定电流为 100 A，额定电压为 1200 V，通态平均电压小于 1 V 的普通型晶闸管。又如 3CT50/500 V，表示额定电流为 50 A，额定电压为 500 V 的普通型晶闸管。

例 1 一晶闸管接在 220 V 交流回路中，通过器件的电流有效值为 50 A，额定电压电流均考虑 2 倍的裕量，问应选择多大的晶闸管？

解：晶闸管额定电压 $U_{Tn} = 2U_{TM} = 2\sqrt{2} \times 220V = 622V$ ，

按晶闸管参数系列取 700 V，即 7 级。

晶闸管的额定电流

$$I_{T(AV)} = 2 \frac{I_T}{1.57} = 2 \times \frac{50}{1.57} A = 64A$$

按晶闸管参数系列取 100 A，所以选取晶闸管型号为 KP100-7。

2. 晶闸管的简单测试方法

利用万用表欧姆挡测试元件的三个电极之间的阻值的方法，可初步判断管子是否完好。当用万用表 $R \times 1 k \Omega$ 挡测量阳极 A 和阴极 K 之间的电阻，若阻值在几百千欧以上，且正、反向电阻相差很小；用 $R \times 10$ 或 $R \times 100$ 挡测量门极 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，否则晶闸管已经损坏。

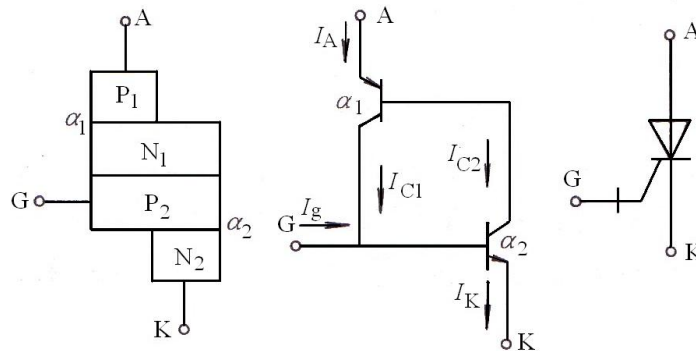
《电力电子技术 B》电子教案

第 3 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第二章 电力电子器件			
教学节次及名称	2.4 典型全控型器件			
教学目的 与要求	<ol style="list-style-type: none"> 1. 掌握门极可关断晶闸管的结构和工作原理 2. 掌握电力晶体管的工作原理 3. 掌握电力场效应晶体管的工作原理 			
教学重点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 电力电子器件的特征 2. 全控型器件的工作原理、主要参数、分类、特点 			
教学难点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 电力电子器件分类 2. 电力电子器件符号 			
教学内容	<ol style="list-style-type: none"> 1. 介绍门极可关断晶闸管<20 分钟> 2. 介绍电力晶体管<15 分钟> 3. 介绍场效应晶体管<20 分钟> 4. 小结、习题。<15 分钟> 			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	<p>掌握全控型器件符号、工作原理、主要参数。 熟悉电力电子器件的分类。</p>			
作业和思 考题	归纳器件分类。			

四、晶闸管的派生器件

1. 门极可关断晶闸管

GTO 触发导通的条件是：当它的阳极与阴极之间承受正向电压，门极与阴极间加正脉冲信号可以使元件导通。普通晶闸管导通时处于深度饱和状态，切断门极电流无法使其关断；但 GTO 采取了特殊工艺，使管子导通后处于接近临界饱和状态，可用门极与阴极间加负脉冲信号破坏临界状态使其关断。因此，GTO 是全控型双极型器件。GTO 导通压降较大，一般为 2~3 V，门极触发电流较大，所以 GTO 的导通功耗与门极功耗均较普通晶闸管大。



GTO 的主要参数：

(1) 最大可关断阳极电流 I_{ATO} 。 I_{ATO} 是管子的铭牌电流。GTO 的阳极电流不能过大，在使用中必须小于最大可关断阳极电流 I_{ATO} ，否则将破坏 GTO 的临界导通条件，导致门极关断失败。

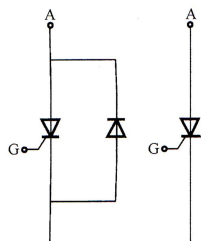
(2) 关断增益 β_q 。关断增益 β_q 为最大可关断阳极电流 I_{ATO} 与门极负电流最大值 I_{GM} 之比，即 $\beta_q = I_{ATO} / |-I_{GM}|$ ，是用来反映 GTO 关断能力的。 β_q 一般较小，只有 3~5，这是 GTO 的一个主要缺点。

2. 快速晶闸管(FST)

快速晶闸管通常是指那些关断时间 $t_{off} \leq 50 \mu s$ 、响应速度快的晶闸管。它的基本结构、伏安特性和符号与普通晶闸管完全一样。它的特点是：开通速度快，关断时间短，一般开通时间约为 1~2 μs ，关断时间约为数微秒，比普通晶闸管快一个数量级；通态压降低，开关损耗小；有较高的通态电流临界上升率及断态电压临界上升率；使用频率范围广，可以从几十到至几千赫兹。这种快速晶闸管主要应用于直流电源供电的逆变器的斩波器中。快速晶闸管的型号用 KK 表示。

3. 逆导型晶闸管(RCT)

普通晶闸管表现为正向可控闸流特性，反向高阻特性，称为逆阻型器件。而逆导型晶闸管是一个反向导通的晶闸管，是将一个晶闸管与一个续流二极管反并联集成在同一硅片上构成的新器件，如图 1-17 所示。逆导型晶闸管正向表现为晶闸管正向伏安特性，反向表现为二极管特性。与普通晶闸管相比，逆导型晶闸管有如下特点：正向转折电压比普通晶闸管高，电流容量大，易于提高开关速度，高温特性好（允许结温可达 150℃ 以上），减小了接线电感，缩小了装置体积。逆导型晶闸管的型号用 KN 表示。



逆导型晶闸管

4. 双向晶闸管 (TRIAC)

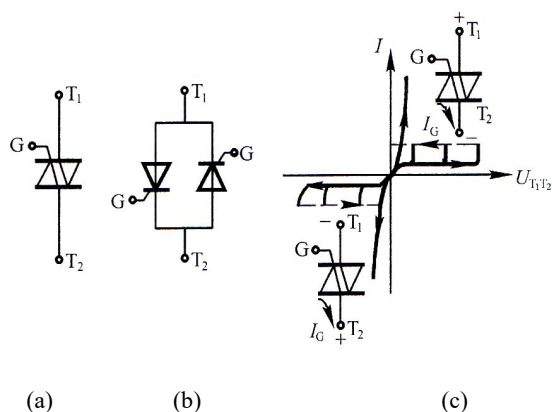
(1) 主电极 T_1 相对 T_2 电位为正的情况下, 门极 G 和 T_1 之间加正触发脉冲电压、电流, 这时双向晶闸管导通工作在第一象限, 称为 I_+ 触发方式。

(2) 主电极 T_1 相对 T_2 电位为正的情况下, 门极 G 和 T_1 之间加负触发脉冲电压、电流, 这时双向晶闸管导通工作在第一象限, 称为 I_- 触发方式。

(3) 主电极 T_2 相对 T_1 电位为正的情况下, 门极 G 和 T_1 之间加正触发脉冲电压、电流, 这时双向晶闸管导通工作在第三象限, 称为 III_+ 触发方式。

(4) 主电极 T_2 相对 T_1 电位为正的情况下, 门极 G 和 T_1 之间加负触发脉冲电压、电流, 这时双向晶闸管导通也工作在第三象限, 称为 III_- 触发方式。

I_+ 、 III_- 两种触发方式灵敏度很高, 在实用中常被采用。双向晶闸管主要应用在交流调压电路中, 正、负半波都工作, 所以, 通态时的额定电流不像二极管和晶闸管那样按正弦半波电流平均值定义, 而是用有效值来定义。由额定电流的定义可知: 在交流电路中一只双向晶闸管能承载的全波负载电流有效值为 I_T , 半波负载电流为 $I_T / 2$; 若用普通晶闸管, 其额定电流应为 $0.45I_T$ 。因此, 电流为 I_T 的双向晶闸管可代替两只并联的电流额定值为 $0.45I_T$ 的普通型晶闸管。双向晶闸管的型号用 KS 表示。



双向晶闸管的符号、等效电路及伏安特性

3.5 全控型器件

一、电力晶体管 (GTR)

1. 结构



2. GTR 的主要参数

1) 最大电流额定值 I_{CM} 和 I_{BM}

一般将电流放大倍数 β 下降到额定值的 $1/2 \sim 1/3$ 时集电极电流 I_C 的值定为集电极最大电流 I_{CM} ，使用时绝不能让 I_C 值达到 I_{CM} 。否则，前面所说的三种物理效应会使 GTR 的电气性能变差，甚至使器件损坏。基极电流的最大额定值 I_{BM} 规定为内引线允许流过的最大基极电流，通常取 $I_{BM} = (1/2 \sim 1/6) I_{CM}$ 。

2) 集电极的额定电压 U_{CEM}

集电极的最高工作电压不可超过规定值，否则会出现击穿现象，它与 GTR 的本身特性及外电路的接法有关。常用 BU_{CBO} 、 BU_{CEO} 、 BU_{CES} 、 BU_{CER} 和 BU_{CEX} 表示。 BU_{CBO} 为发射结开路时集基极的击穿电压； BU_{CEO} 为发射结开路时集射极的击穿电压； BU_{CES} 为发射结短路时集射极的击穿电压； BU_{CER} 表示基射极间并联电阻时的基射极击穿电压，随并联电阻的减小 BU_{CBO} 增大； BU_{CEX} 表示基射极施加反偏电压时的集射极击穿电压。一般情况下， $BU_{CEO} > BU_{CEX} > BU_{CES} > BU_{CER} > BU_{CBO}$ ，GTR 的最高工作电压 U_{CEM} 应比最小击穿电压 BU_{CEO} 低，从而保证元器件的工作安全。

3) 饱和压降 U_{CES}

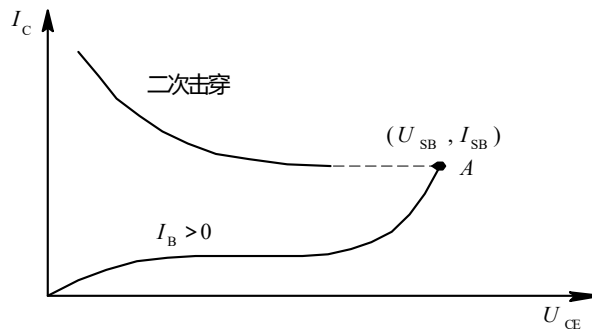
单个 GTR 的饱和压降一般不超过 $1 \sim 1.5$ V， U_{CES} 随集电极电流的增大而增大。

4) 集电极最大耗散功率 P_{CM}

P_{CM} 即 GTR 在最高允许结温 T_{JM} 时所对应的耗散功率，它等于集电极工作电压与集电极工作电流的乘积。这部分能量转化为热能使 GTR 发热。在使用中要特别注意 GTR 的散热。如果散热条件不好，则器件会因温度过高而迅速损坏。所以，使用 GTR 时必须选配合适的散热器。

3. 二次击穿现象

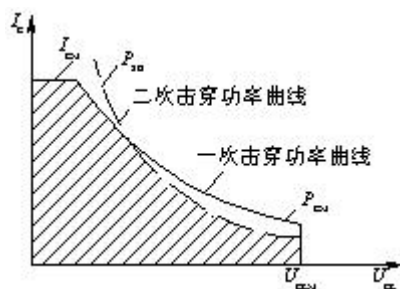
处于工作状态的 GTR，当其集电极反偏电压 U_{CE} 逐渐增加到最大电压 BU_{CEO} 时，集电极电流 I_C 急剧增大，出现击穿现象，但此时集电结上的电压基本保持不变，这叫一次击穿。一击穿可用外接串联电阻的办法加以控制，只要进入击穿区的时间不长，一般不会引起晶体管的特性变坏。但是，一次击穿出现后若继续增大 U_{CE} ，而外接限流电阻又不改变，则当 I_C 上升到某一数值时， U_{CE} 会突然下降，而 I_C 迅速增大（负阻效应），这时进入低压大电流段，在极短的时间内，将使器件内出现明显的电流集中和过热点，导致管子被烧坏，这个现象称为二次击穿。为了防止发生二次击穿，应确保 GTR 开关过程中的瞬时功率不要超过集电极最大耗散功率 P_{CM} 。一般说来，工作在正常开关状态的 GTR 是不会发生二次击穿现象的。



GTR的二次击穿

4. 安全工作区

安全工作区 SOA (Safe Operation Area) 是指在输出特性曲线图上 GTR 能够安全运行的电流电压的极限范围，它受到 GTR 的直流极限参数 I_{CM} 、 P_{CM} 、电压容量 BU_{CEO} 及二次击穿等问题的限制，并由这四条限制界线所围成，如图 1-21 所示，阴影部分即为 SOA。

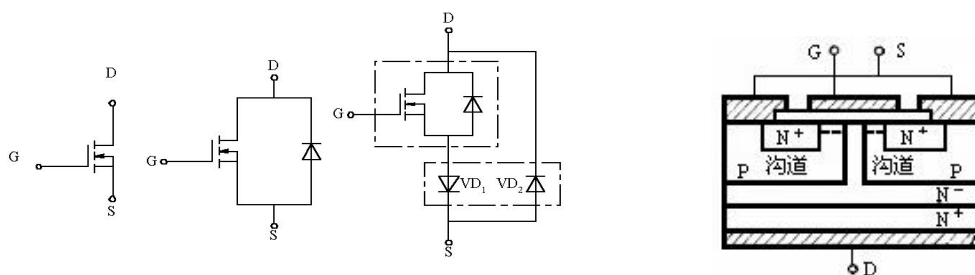


GTR安全工作区

二、 电力场效应晶体管 (P-MOSFET)

1. P-MOSFET 的结构与工作原理

MOSFET 的类型很多，按导电沟道可分为 P 沟道和 N 沟道；根据栅极电压与导电沟道出现的关系可分为耗尽型和增强型，电力场效应晶体管一般为 N 沟道增强型。电力场效应晶体管是多元集成结构，即一个器件由多个 MOSFET 单元组成。MOSFET 单元结构如图所示，有三个引脚，分别为源极 S、栅极 G 和漏极 D。



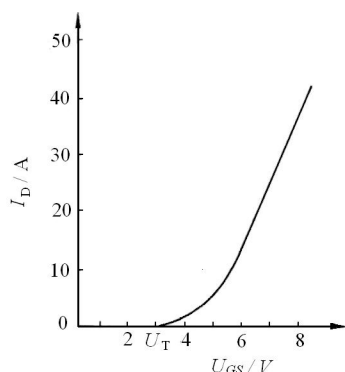
当漏极接电源正极，源极接电源负极，即 $U_{DS} > 0$ 时，栅源之间电压 $U_{GS} \leq 0$ ，P 型区和 N-型漂移区之间的 P-N 结反向，漏源之间无电流流过。如果在栅极和源极所加的正向电压 $U_{GS} \leq U_T$ (U_T 为开启电压，又叫阈值电压，典型值为 $2 \sim 4 \text{ V}$) 时，也不会有栅流和漏极电流 I_D 出现，PM 仍处于截止状态，但栅极的正电压所形成电场的感应作用却会将其下面 P 型区中的少数载流子电子吸引到栅极下面的 P 型区表面。只有当 $U_{GS} > U_T$ 时，栅极下面 P 型区表面的电子浓度才会超过空穴浓度，使 P 型半导体反型成 N 型半导体，沟通了漏极和源极，形成漏极电流 I_D ，PM 进入处于导通状态。 U_{GS} 超过 U_T 越多，导电能力就越强，漏极电流 I_D 也就越大。

2. PM 的特性

1) 转移特性

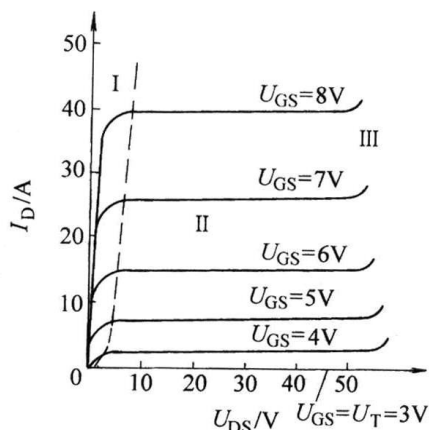
转移特性是指电力场效应晶体管的输入栅源电压 U_{GS} 与输出漏极电流 I_D 之间的关系，如图 1-24 所示。当 I_D 较大时，该特性基本为线性。曲线的斜率 $g_m = \frac{\Delta i_D}{\Delta U_{GS}}$ 称为跨导，表示 PM 栅源电压对漏极电流的控制能力。仅当 $U_{GS} > U_T$ 时，才会出现导电沟道，产生栅极电流 I_D 。转移特性反映了该器件是电压型场控器件。由于栅极的输入电阻很高，可以等效

为一个电容，所以栅源电压 U_{GS} 能够形成电场，但栅极电流近似为零。因此，MOSFET 的驱动功率可以很小。



2) 输出特性

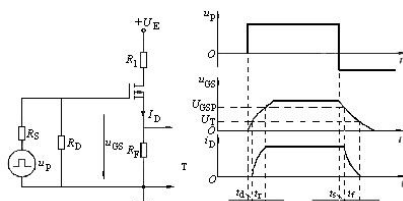
PM 的输出特性曲线分为三个区域：可调电阻区 I，饱和区 II 和雪崩区 III。在 I 区内，漏源电阻 R_{DS} 的阻值是变化的。固定栅极电压 U_{GS} ，漏源电压 U_{DS} 从零上升过程中，漏极电流 I_D 首先线性增长，接近饱和区 II 时， I_D 变化缓慢，达到饱和区 II 后，此后 U_{DS} 虽然增大，但 I_D 维持恒定。当 MOSFET 用做线性放大时，工作在饱和区。从该区域中可以看出，在同样的漏源电压下， U_{GS} 越高，漏极电流 I_D 也就越大。如果出价限制地增加 U_{DS} ，PM 还会进入雪崩击穿区 III。在应用中要避免出现这种情况，否则造成器件的损坏。



PM 的输出特性曲线

3) 开关特性

PM 是多数载流子器件，不存在少数载流子特有的存储效应，因此开关时间很短，典型值为 20 ns，影响开关速度的主要因素是器件极间电容、开关时间与输入电容的充、放电时间常数有很大关系。



3. 重要参数

(1) 漏极电压 U_{DS} : 即 PM 的额定电压, 选用时应小于漏源击穿电压 BU_{DS} , 必须留有较大安全裕量。

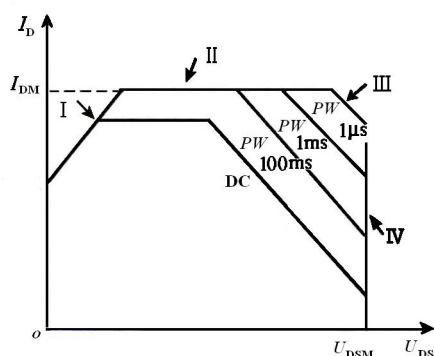
(2) 漏极连续电流 I_D : 即 PM 允许通过的最大漏极连续电流, 其大小主要受管子的温升限制, 应小于峰值电流 I_{DM} 。

(3) 栅源电压 U_{GS} : 即施加在栅极和源极之间的控制电压。栅极和源极之间的绝缘层很薄, 承受电压很低, 一般不能超过 20 V, 否则绝缘层可能被击穿而损坏。

(4) 通态电阻 R_{on} : 在确定的 U_{GS} 下, PM 由可调电阻区进入饱和区时的直流电阻称为通态电阻。输出功率的大小与该参数直接相关。

4. 安全工作区

PM 是多数载流子工作的器件, 元件的通态电阻具有正的温度系数, 即温度升高通态电阻增大, 使漏极电流随温度升高而下降, 因而不存在电流集中和二次击穿的限制, 有较宽的安全工作区。PM 的正向偏置安全工作区是由四条边界包围而成, 如图 1-27 所示。其中 I 为漏源通态电阻限制线, II 为最大漏极电流限制线, III 为最大功耗限制线, IV 为最大漏源电压限制线。



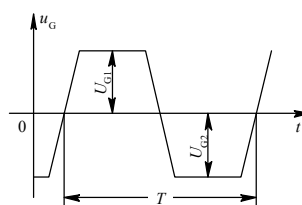
PM 的正向偏置安全工作区

5. PM 的栅极驱动电路

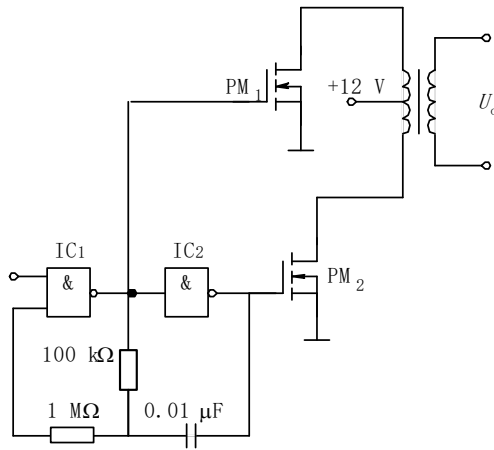
对栅极驱动电路的要求如下:

- (1) 可向栅极提供所需要的栅压, 以保证 PM 的可靠导通和关断。
- (2) 为提高器件的开关速度, 应减小驱动电路的输入电阻以提高栅极充放电速度。
- (3) 主电路与控制电路间要实现电隔离。
- (4) 应具有较强的抗干扰能力, 这是因为 PM 的工作频率和输入阻抗都较高, 易被干扰的缘故。

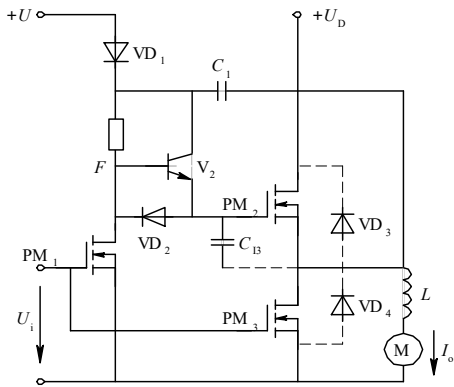
理想的栅极控制电压波形如图 1-28 所示。正、负栅极电压的幅值要小于器件规定的允



许值。



PM数控逆变器



PM直流斩波器驱动电路

6. PM 的保护

PM 的缺点是栅极绝缘氧化层很薄，在静电较强的场合很易引起静电击穿，从而造成栅源短路或开路。因此，在使用时必须采取静电保护措施。器件应存放在抗静电包装袋、金属容器或导电材料包装袋中。工作人员取用器件时，必须配戴腕带并保持良好接地。取器件时，应拿器件管壳，而不要接触引线；安装时，工作台和电烙铁应良好接地；测试时，测量仪器和工作台要良好接地，器件的三个电极必须都接入测试仪器或电路，才能施加电压，改换测试时，电压和电流要先恢复到零。此外还需注意进行栅源、漏源的过电压保护和过电流保护

7. PM 的应用

(1) 作为高频开关稳压调压电源，可使开关电源的体积减小，重量减轻，成本降低，效率提高。

(2) 作为功率变换器件，广泛应用于计算机接口电路中。PM 器件可直接用集成电路的逻辑信号驱动，开关速度快，工作频率高，大大改善了变换器的功能。

(3) 作为高频功率振荡、放大器件，在高频加热、超声波等设备中使用，具有高效、高频、简单可靠等优点。

《电力电子技术 B》电子教案

第 4 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第二章 电力电子器件			
教学节次及名称	2.4 典型全控型器件 2.5 其他新型电力电子器件			
教学目的 与要求	<ol style="list-style-type: none"> 1. 掌握绝缘栅双极晶体管工作原理 2. 了解新型电力电子器件和集成电力电子模块 			
教学重点	1.全控型器件的工作原理、主要参数、分类、特点			
教学难点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 电力电子器件符号 2. 新型电力电子器件 			
教学内容	<ol style="list-style-type: none"> 1. 介绍绝缘栅双极晶体管<20 分钟> 2. 介绍新型电力电子器件<30 分钟> 3. 介绍功率集成电路与集成电力电子模块<20 分钟> 4.小结、习题。<20 分钟> 			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	<p>掌握全控型器件符号、工作原理、主要参数。 熟悉电力电子器件的分类。</p>			
作业和思 考题	电力电子器件分类？各器件的特点符号，工作原理，主要参数计算。			

教 案

电力电子技术 课 4 讲

主讲人 薛荣辉

课 题：电力电子器件

目的任务：掌握 IGBT 工作原理，了解新型电力电子器件

重点难点：半导体器件的主要参数

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

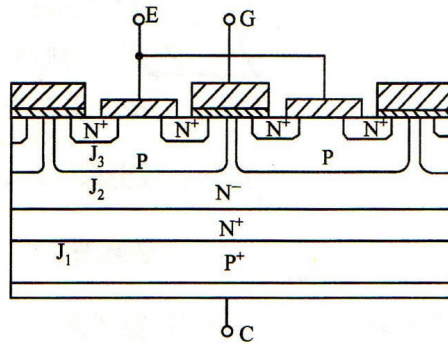
抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

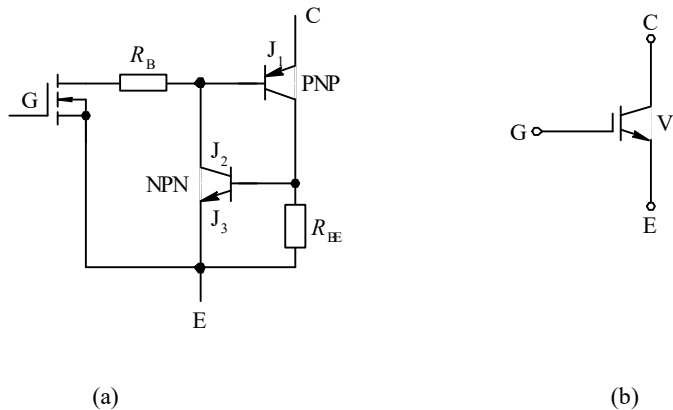
三、 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)

1 . IGBT 的结构和工作原理



IGBT的结构

IGBT 比电力 MOSFET 多了一层 P⁺注入区, 因而形成了一个大面积的 P⁺N⁻结 J₁, 使得 IGBT 导通时可由 P⁺注入区向 N 基区发射载流子(空穴), 对漂移区电导率进行调制, 因而 IGBT 具有很强的电流控制能力。仔细观察发现, IGBT 是在 P-MOSFET 结构的基础上作了相应的改善, 相当于一个由 P-MOSFET 驱动的厚基区 GTR 晶体管, 其内部实际上包含了两个双极型晶体管 P⁺NP 和 N⁻PN。



IGBT 的简化等效电路和电气符号

IGBT 有三个电极, 分别是集电极 C、发射极 E 和栅极 G。IGBT 的导通和关断由栅极电压来控制, 原理与 PM 相同。当栅极施以正向电压时, PM 内形成沟道, 为 PNP 型的晶体管提供基极电流, 从而使 IGBT 导通。此时, 从 P 区注入到 N 区的空穴(少数载流子)对 N 区进行电导调制, 减少 N 区的电阻, 使高耐压的 IGBT 也具有低的通态压降。在栅极上施以负电压时, PM 内的沟道消失, PNP 晶体管的基极电流被切断, IGBT 关断。

2 . IGBT 的特性

1)IGBT 的转移特性

与 P-MOSFET 的转移特性相似，开启电压 $U_{GE(TH)}$ 是 IGBT 能通过电导调制实现导通的最低栅射电压，其值一般为 2~6V。

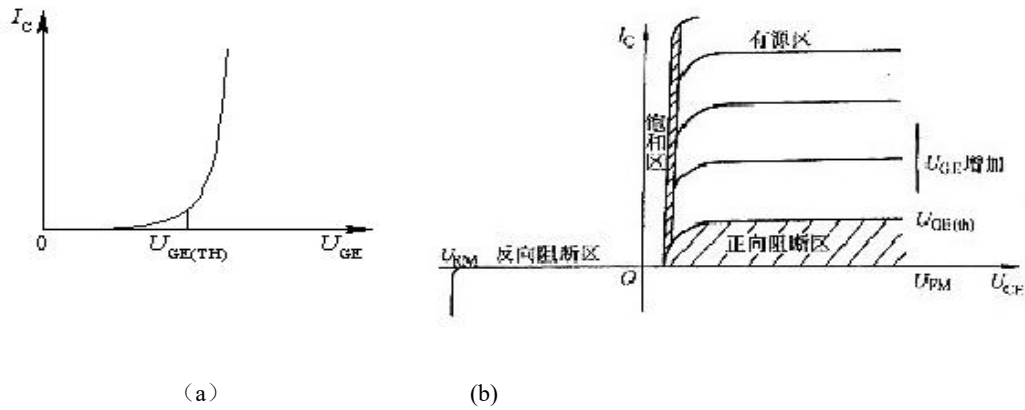


图1-33 IGBT的转移特性和静态输出特性

2. IGBT 的静态输出特性

IGBT 的静态输出特性如图 1-33 (b) 所示，与 GTR 的输出特性相似，它反映了在一定的栅-射极电压 U_{GE} 下器件的输出端电压 U_{CE} 与电流 I_C 的关系， U_{GE} 越高， I_C 越大。IGBT 的伏安特性分为截止区、有源放大区、饱和区和击穿区。由于 PN 结的开启电压不为零，因此造成 IGBT 的输出特性曲线不起始于坐标原点。在电力电子电路中，IGBT 工作在开关状态，因而是在正向阻断区和饱和区之间转换。与 P-MOSFET 相比，IGBT 的通态压降小得多，1000 V 的 IGBT 约有 2~5 V 的通态压降；IGBT 开关损耗仅为 GTR 的 1/10。IGBT 的通态压降在 1/2 或 1/3 额定电流以下区段具有负温度系数，以上区段有正温度系数，因此 IGBT 在并联使用时具有电流调节的能力，即有易于并联的特点。但是 IGBT 的反向电压承受能力很差，从曲线可知，其反向阻断电压 U_{RM} 只有几十伏，因此限制了它在需要承受高反压场合的应用。

3. IGBT 的动态特性

IGBT 的动态特性即开关特性，开通过程的特性类似于 MOSFET。由于晶体管的存在，虽然带来了电导调制效应的好处，但也引入了少数载流子的存储效应，因此 IGBT 的开关速度要低于 P-MOSFET。开关时间随漏极电流 I_C 和门极电阻 R_B 以及结温的增大而增加，尤其受门极电阻的影响最大。

3. IGBT 的主要参数

- (1) 集电极-发射极额定电压 U_{CES} ：该电压值是根据器件的雪崩击穿电压而规定的，是栅射极短路时能承受的耐压值。
- (2) 栅极-发射极额定电压 U_{GES} ：是栅极控制信号的电压额定值。目前，IGBT 的 U_{GES} 值为 +20 V，使用时不可超过此值。
- (3) 额定集电极电流 I_C ：是指在导通时能流过器件的持续最大电流。

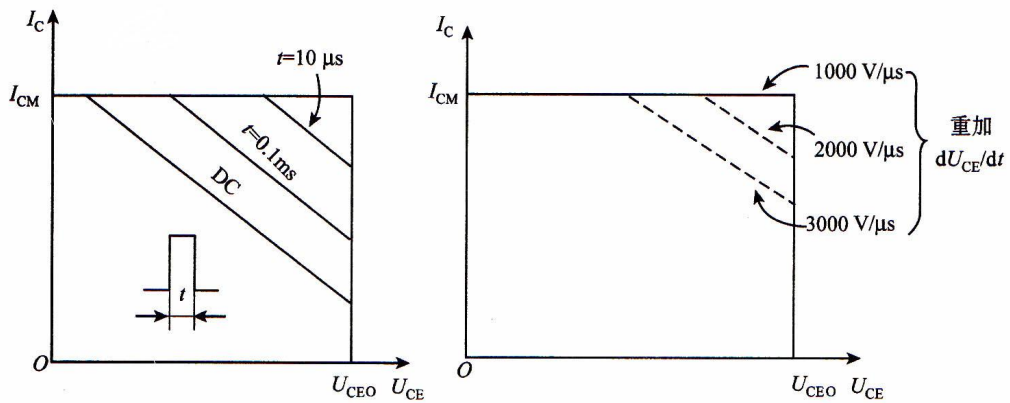
4. IGBT 的擎住效应和安全工作区

IGBT 内部寄生着一个 NPN 型晶体管，在管子的基极与发射极之间存在体区短路电阻 R_{BE} ，相当于 NPN 管的一个偏置电阻。在额定集电极电流范围内， R_B 上的偏压很小，不足以使 J_3 结开通，然而一旦 PNP 管集电极有大电流流过， R_{BE} 上的压降造成 J_3 结开通，就会

促使 NPN、PNP 两晶体管同时处于饱和状态。由于寄生晶体的导通，栅极控制电压被旁路，失去了对 IGBT 集电极电流的控制，导致集电极电流过大，造成器件功耗过高而损坏。这种电流失控现象，就像普通晶闸管被导通以后，即使撤去触发信号晶闸管仍然因进入正反馈过程而维持导通的机理一样，这就是所谓擎住效应或自锁效应。引起擎住效应的原因，可能是集电极电流过大（称之为静态擎住效应），也可能是最大电压允许上升率过大（称之为动态擎住效应），当然温度过高也会加重擎住效应的危险。

动态擎住效应比静态擎住效应所允许的集电极电流小，因此，所允许的最大集电极电流 I_{CM} 实际上是根据动态擎住效应而确定的。擎住效应曾是限制 IGBT 电流容量进一步提高的因素之一，目前这一问题已得到极大改善，促使了 IGBT 研究和制造水平的迅速提高。

IGBT 开通和关断时，具有较宽的安全工作区。IGBT 的开通时对应于正偏安全工作区（FBSOA），由导通时的最大集电极电流 I_{CM} 、最大集射极电压 U_{CES} 和最大集电极功耗确定；关断时对应于反偏安全工作区（RBSOA），由关断时的最大集电极电流 I_{CM} 、最大集射极电压 U_{CEM} 和最大允许电压上升率 dU_{CE}/dt 确定。



(a) (b)
IGBT 的安全工作区

5. IGBT 的栅极驱动电路

为保证 IGBT 的安全可靠工作，对栅极驱动电路提出下列要求：

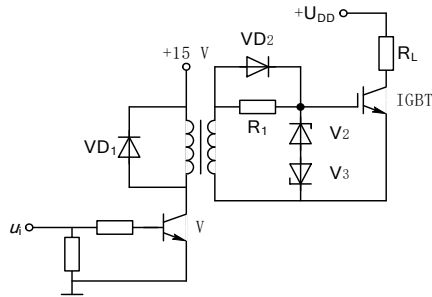
(1) IGBT 驱动电路的驱动电源的内阻要低，以较快地对栅极电容充放电，保证 U_{GE} 的前后沿陡峭，从而减小开关损耗。一般正偏压为 12~15V，负偏压为 -2~-10V。IGBT 开通后，驱动电源要提供足够的功率使 IGBT 不致退出饱和而损坏。

(2) IGBT 多用于高压场合，应保证驱动电路与整个控制电路在电位上严格隔离；同时驱动电路要对 IGBT 有自保护功能，并具有较强的抗干扰能力。

(3) 对于电感性负载，为限制 dU_{CE}/dt 所形成的尖峰电压，IGBT 的关断时间不宜过短。

由于 IGBT 的转移特性几乎和 PM 相同，因此 PM 的驱动电路同样适用于 IGBT。

控制脉冲 u_i 经晶体管 V 放大后由脉冲变压器隔离耦合，经稳压管 V_2 、 V_3 限幅后驱动 IGBT。脉冲变压器的初级并接了续流二极管 VD_1 ，以防止 V 可能承受过电压。 R_1 用来限制栅极驱动电流的大小， R_1 两端并接了加速二极管 VD_2 ，以提高开通速度。



采用变压器隔离的栅极驱动电路

IGBT 也可采用专用集成驱动电路，日本富士公司出品的 EXB841 系列、中国西安生产的 HL402 系列 IGBT 专用集成驱动模块因其性能好、可靠性高、体积小而得到了广泛的应用。有兴趣的读者可以查阅相关资料。

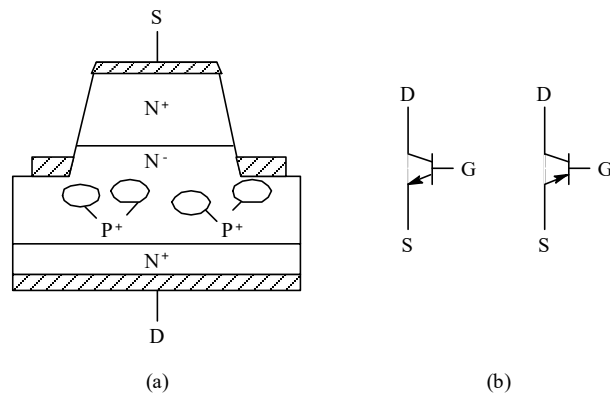
6. IGBT 的保护

IGBT 是由 GTR 和 MOSFET 复合而成的，因此可以按 GTR、MOSFET 保护电路来考虑。当电流过大时会产生不可控的擎住效应，应实行过流保护。注意，IGBT 使用的最大电流不可超过额定电流，通常的做法是，检出过电流信号后切断栅极控制信号或产生负的栅极驱动信号来关断 IGBT。在 IGBT 关断时，因主回路电流急剧变化，使主回路布线电感或所带的感性负载中感应出高压而产生开关浪涌电压，或因 IGBT 的驱动脉冲不正常等因素造成过电压而导致 IGBT 的损坏。此时，可以采用电容吸收电路构成的缓冲电路对 IGBT 实行过电压抑制和限制过快的电压变化率 du/dt 。

四、其他电力电子器件

1. 静电感应晶体管 (SIT)

静电感应晶体管 (Static Induction Transistor, SIT)，是一种多子导电的单极电压型控制器件。SIT 是采用垂直导电型式的多胞集成结构，SIT 有漏极 D、栅极 G 和源极 S 三极，分为 N 沟道和 P 沟道两种。SIT 为常开器件，以 N-SIT 为例，当栅-源电压 U_{GS} 大于或等于零，漏-源电压 U_{DS} 为正向电压时，两栅极之间的



(a) 结构； (b) 符号
SIT 的结构及其符号

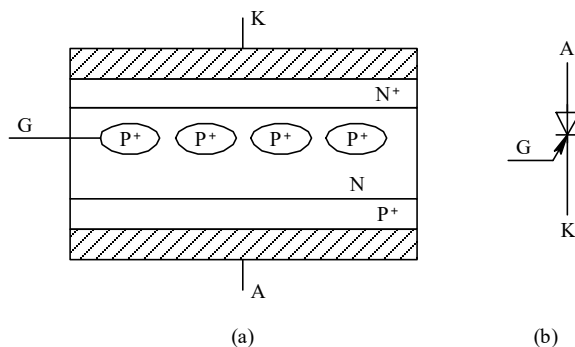
导电沟道使漏-源之间导通。一旦加上负栅-源电压 U_{GS} 时，栅源间 PN 结产生耗尽层，随着负偏压 U_{GS} 的增加，其耗尽层加宽，漏-源间导电沟道变窄。当 $U_{GS} = U_{GS(off)}$ (夹断电压) 时，导电沟道被耗尽层夹断，SIT 关断。

SIT 具有输出功率大，输入阻抗高，开关特性好，热稳定性好以及抗幅射能力强等优点。SIT 已广泛用于开关电源、超声波功率放大、雷达通信和高频感应加热等方面。现已商品化的 SIT 可工作在 10 MHz，电流达 300 A，电压达 2000 V 水平。

2. 静电感应晶闸管 (SITH)

静电感应晶闸管 (Static Induction Thyristor, SITH)，的通、断控制机理与 SIT 类似。结构上的差别仅在于 SITH 是在 SIT 结构的基础上增加了一个 PN 结，而在内部多形成了一个三极管，两个三极管构成一个晶闸管而成为静电感应晶闸管，所以 SITH 又称为场控晶闸管 (FCT)。其基本结构与电路图形符号如图 1-37 所示，三个电极为阳极 A、阴极 K 和栅极 (门极) G。

SITH 也是常开型器件。当栅极开路时，SITH 与 SIT 一样也处于通态，在阳极 A 和阴



(a) 结构; (b) 符号
SITH 的结构及其符号

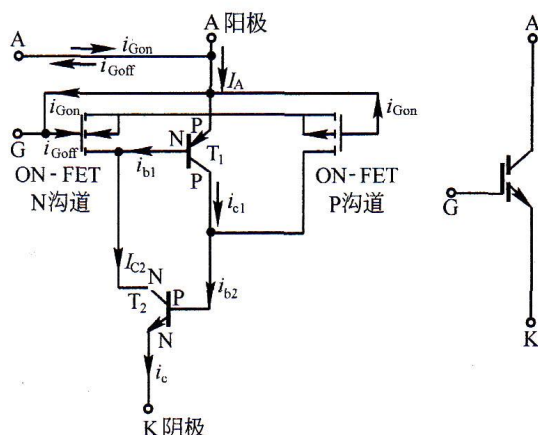
极 K 间加正向电压，有电流流过 SITH，其特性与二极管正向特性相似。在栅极 G 和阴极 K 之间加负电压，G、K 之间 PN 结反偏，在两个栅极区之间的导电沟道中出现耗尽层，A、K 之间电流被夹断，SITH 关断。这一过程与 GTO 的关断非常相似。栅极所加的负偏压越高，可关断的阴极电流也就越大。实际使用时，为了使器件可靠地导通，常取 5~6 V 的正栅压而不是零栅压以降低器件通态压降。一般关断 SIT 和 SITH 需要几十伏的负栅压。

SITH 属于双极型开关器件，与 GTO 相比，SITH 有许多优点，比如通态电阻小，通态压降低，开关速度快，损耗小， di/dt 及 du/dt 耐量高等，它在直流调速系统、高频加热电源和开关电源等领域发挥着重要作用，但制造工艺复杂、成本高是阻碍其发展的重要因素。

3. MOS 控制晶闸管 (MCT)

MOS 控制晶闸管 (MOS Controlled Thyristor, MCT) 是在晶闸管结构中引进一对 MOSFET 管而构成的，通过这一对 MOSFET 管来控制晶闸管的开通和关断。MCT 的静态特性与晶闸管相似，使 MCT 开通的 MOSFET 称为 ON-FET，使 MCT 关断的 MOSFET 称为 OFF-FET。当正电压加在 MCT 开关管阳极 A、阴极 K 之间时，如果门极 G 相对于阳极 A 加负脉冲电压驱动信号时，P 沟道的 ON-FET 导电，从而引发 MCT 中晶闸管导通，最终导致 MCT 开通。一旦晶闸管导通后，撤除 ON-FET 的门极控制电压，MCT 继续导通。当门极

G 相对于阳极 A 加正脉冲电压信号时，使 N 沟道的 OFF-FET 管开通，最终导致 MCT 从通态转入断态。

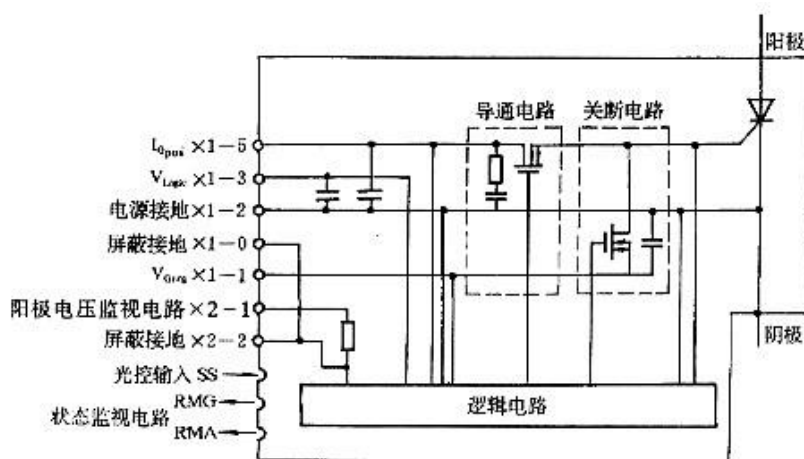


MCT 属场控型器件，结构类似于 IGBT，是一种复合型大功率器件。它将 P-MOSFET 的高输入阻抗、低驱动功率及快开关速度和晶闸管的高电压、大电流、低导通压降的特点结合于一身。

4. 集成门极换流晶闸管 (IGCT)

集成门极换流晶闸管 (IGCT) 是一种新型的大功率复合器件，是把 GTO 芯片与反并联二极管和门极驱动电路集成在一起，再将其门极驱动器在外部以低电感方式连接成环状的门电极。图 1-39 为 IGCT 的原理框图。

IGCT 兼有 IGBT 和 GTO 的优点，具有大电流，高电压，高开关频率 (比 GTO 高 10 倍)，可靠性好，损耗低，制造成品率高等特点。与常规 GTO 晶闸管相比，IGCT 具有不用缓冲电路即可实现可靠控制，存储时间短，开通能力强，关断门极电荷少等优良的特性。



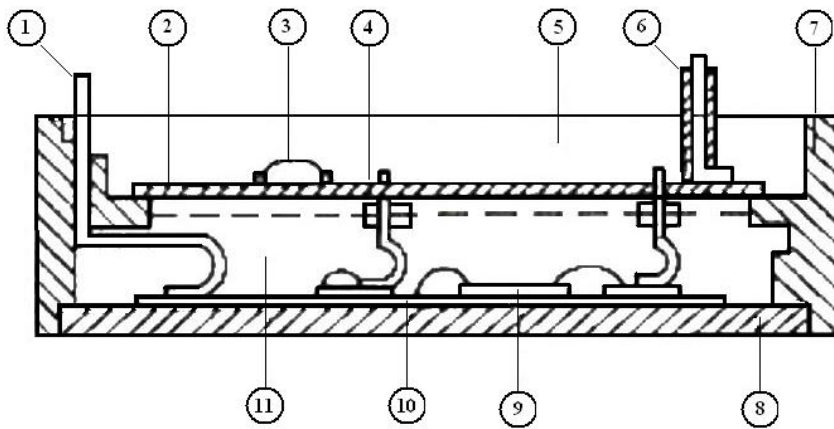
IGCT 的原理框图

5. 功率集成电路 (PIC) 和智能功率模块 (IPM)

近些年来,功率半导体器件发展的一个重要趋势是将功率半导体电力开关器件与其驱动电路、缓冲电路、检测电路、控制和保护电路等集成在一块芯片上,采用模块化的结构,构成一个功率集成电路 (Power-Integrated circuit, PIC)。PIC 器件不仅方便了使用,而且使系统成本降低,重量减轻,体积缩小,把寄生电感减小到几乎为零,大大提高了电力电子变换和控制的可靠性,从而开辟了电力电子器件智能化的方向,具有广阔的应用前景。

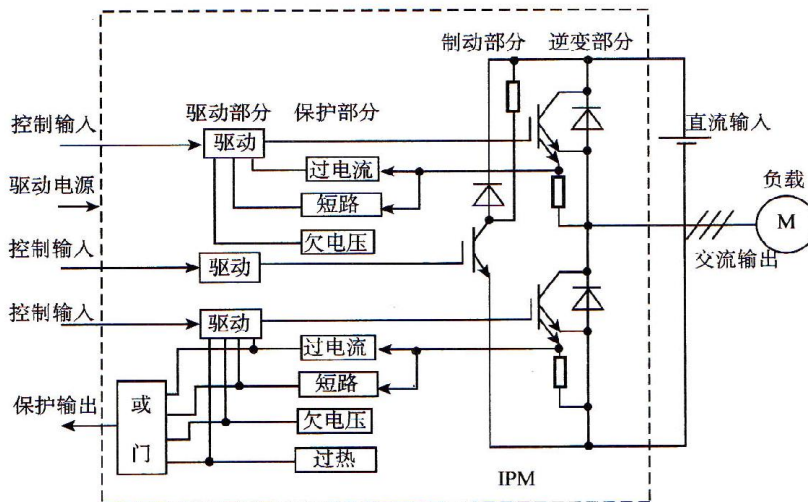
智能功率模块(Intelligent Power Module, IPM)又称智能集成电路,是功率集成电路中典型的例子,近年来得到了较为广泛的应用。IPM 除了集成功率器件和驱动电路以外,还集成了缓冲环节、过压、过流、过热等自诊断检测电路,并可将监测信号传送至 CPU,以保证 IPM 自身不受损坏,也避免了由于分布参数、保护延迟所带来的一系列技术难题。IPM 的封装剖面示意图如图 1-40 所示。

三菱电机公司在 1991 年推出的智能功率模块 (IPM)是较为先进的混合集成功率器件,采用高速、低功耗的 IGBT 芯片和优化的门极驱动及保护电路构成,可以实现高效的过流保护



①电源端子 ②特殊防护层 ③集成电路 ④内连线 ⑤环氧树脂
⑥信号端子 ⑦密封盒 ⑧基板 ⑨IGBT芯片 ⑩陶瓷基板 (11) 硅胶
IPM的封装剖面示意图

和短路保护。其基本结构如图 1-41 所示。IPM 集成了过流和欠压锁定保护电路,系统的可靠性得到进一步提高。



IPM 的特点为：① 采用低饱和压降、高开关速度、内设低损耗电流传感器的 IGBT 功率器件；② 采用单电源、逻辑电平输入、优化的栅极驱动。实行实时逻辑栅压控制模式，以严密的时序逻辑，对过电流、欠电压、短路、过热等故障进行监控保护。提供系统故障输出，向系统控制器提供报警信号。对输出三相故障，如桥臂直通、三相短路、对地短路故障也提供了良好的保护。

目前，IPM 已经在中频(<20KHz)、中功率范围内取得了应用上的成功。IPM 的应用比较方便，对于其中的每一个 IGBT 器件，只需一个+15 V 的单电源即可。但它也往往存在着内部死区时间及过流、短路保护阈值不可由用户调节的缺陷。

本章小结

本章介绍了功率二极管、晶闸管 SCR、大功率晶体管 GTR、功率场效应晶体管 P-MOSFET、绝缘栅双极型晶体管 IGBT 等五种常用的半导体器件的基本结构、工作原理、基本特性、主要参数等内容；又对晶闸管派生器件、静电感应晶体管 SIT、静电感应晶闸管 SITH、MOS 控制晶闸管 MCT、集成门极换流晶闸管 IGCT、智能功率模块 IPM 等各种功率半导体器件的结构和工作原理做了简要介绍，以拓宽学生的知识面。

功率半导体器件可按可控性、驱动信号类型和内部载流子来进行分类。

1. 按可控性分类

根据能被驱动(触发)电路输出控制信号所控制的程度，可将功率半导体器件分为不可控器件、半控型器件和全控型器件等 3 种。

1) 不可控器件

不可控器件是指器件的开通和关断完全由其在主电路中承受的电压、电流决定，不能用控制信号来控制开通、关断，只有功率二极管是不可控开关器件。其阳极 A 阴极 K 间加正向阳极电压时，导通；反之关断。

2) 半控型器件

能利用控制信号控制其导通，但不能控制其关断的功率半导体器件称为半控型器件。SCR 及其大多数派生器件(GTO 除外)都为半控型器件，它们的开通由来自触发电路的触发脉冲来控制，而关断则只能由其在主电路中承受的电压、电流或其他辅助换流电路来完成。在交流整流电路中电源电压周期地过零换向，可使 SCR 自然地由通态转入断态，所以 SCR 广泛地应用于可控整流。

3) 全控型器件

能利用控制信号控制其导通，也能控制其关断的功率半导体器件称为全控型器件，通常也称为自关断器件。GTO、GTR、P-MOSFET、IGBT、SIT、SITH、MCT、IGCT、IPM 等都是全控型器件。

2. 按控制极驱动信号的类型区分

根据开通和关断所需控制极驱动信号的不同要求，开关器件又可分为电流控制型开关器件和电压控制型开关器件两大类。

1) 电流控制型开关器件

通过在控制端注入或抽出电流来实现开通或关断的器件称为电流控制型开关器件。SCR、GTR、GTO 等器件均为电流控制型器件。SCR 只要求脉冲电流触发其开通，并不要求有持续的门极(或控制极)电流保持其通态；GTO 要求有正的脉冲电流触发其开通，负的脉冲电流使其关断，并不要求有持续的正、负控制极电流保持其通态或断态；GTR 要求有正的、持续的基极电流开通并保持为通态，当基极电流为零后 GTR 关断，但为了加速其关

断，最好能提供负的脉冲电流。为了使其可靠截止，最好加负基极电压。

电流控制型开关器件具有通态压降低，导通损耗小，工作频率低，驱动功率大，驱动电路复杂等特点。

2) 电压控制型开关器件

通过在控制端和另一公共端加入一定的电压信号来实现开通或关断的器件称为电压控制型开关器件。P-MOSFET、IGBT、MCT、SIT、SITH、IGCT 等器件均为电压控制型开关器件。P-MOSFET 和 IGBT 要求有正的持续的栅极(或门极)驱动电压使其开通并保持为通态，要求有负的、持续的栅极(或门极)电压使其关断并保持为可靠的断态。SIT、SITH 要求有持续的负栅极电压控制截止，栅极不加电压时处于通态。MCT 只要求有正、负脉冲电压控制其通、断状态。

电压控制型开关器件具有输入阻抗大，驱动功率小，驱动电路简单，工作频率高等特点。

3. 按开关器件内部导电载流子的情况区分

按开关器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况，开关器件又可分为单极型器件、双极型器件和复合型器件。

1) 单极型器件

只有一种载流子(电子或空穴)参与导电的功率半导体器件称为单极型器件，如 P-MOSFET、SIT 等，单极型器件都是电压驱动型全控器件。单极型器件的共同特点是输入阻抗高，驱动电路简单，工作频率高；但通态压降大。

2) 双极型器件

电子和空穴两种载流子均参与导电的功率半导体器件称为双极型器件。功率二极管、SCR、GTO、GTR、SITH 等器件中的电子与空穴均参与导电，故属双极型器件。双极型器件的共同特点是通态压降小，通态损耗小；但所需驱动功率大，驱动电路比较复杂，工作频率较低。

3) 复合型器件

IGBT 和 MCI 是由 MOSFET 和 GTR 或 SCR 复合而成的，因此是复合型电力电子器件。IGBT 和 MCT 的驱动输入部分是 MOSFET，因此也都是电压驱动型器件。

复合型器件，是由双极型和单极型器件混合集成而成的，它利用耐压高、电流密度大、导通压降低的双极型器件(如 SCR、GTR、GTO 等)作为输出元件，而用输入阻抗高，开关速度快的单极型器件 MOSFET 作为输入级，因而兼备了两者的优点，成为电力电子器件的发展方向。

目前已广泛应用的开关器件中，SCR 是电压、电流额定值最高的功率半导体开关器件，其余依次是 GTO、IGBT、MCT、SIT、GTR，最小的是 P-MOSFET。允许工作频率最高的功率半导体开关器件是 P-MOSFET、SIT、SITH，其余依次是 IGBT、GTR、MCT 和 GTO，最低的是 SCR。

《电力电子技术 B》电子教案

第 5 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第三章 整流电路			
教学节次及名称	3.1 单相可控整流电路			
教学目的 与要求	<ol style="list-style-type: none"> 1. 掌握整流电路基本概念和分类 2. 了解单相半波可控整流电路 3. 掌握单相桥式全控整流电路 			
教学重点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 掌握整流电路中晶闸管的开关状态 2. 掌握整流电路的基本概念及分类，熟悉主电路的分析方法。 3. 掌握单相半波可控整流电路和单相桥式全控整流电路分析，波形分析，参数计算。 			
教学难点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 晶闸管的工作状态。 2. 波形分析，参数计算。 			
教学内容	<ol style="list-style-type: none"> 1. 介绍整流电路基本概念，分类，应用场合。〈15 分钟〉 2. 探讨单相半波可控整流电路带电阻性负载工作原理、波形分析、参数计算。〈15 分钟〉 3. 分析单相半波可控整流电路带阻感性负载工作原理、波形分析、参数计算。这部分需要强调阻抗角与导通角，与触发角之间的关系。〈15 分钟〉 4. 动画演示单相半波可控整流电路阻性负载，阻感性负载工作情况。〈5 分钟〉 5. 介绍单相桥式全控整流电路电路结构，探讨带不同负载时电路工作原理，波形分析，参数计算。〈35 分钟〉 6. 小结、习题。〈5 分钟〉 			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	<p>掌握单相半波可控整流电路分析参数计算。</p> <p>掌握单相桥式全控整流电路分析参数计算。</p> <p>搭建模型进行仿真，对仿真波形进行分析。</p>			
作业和思 考题	<p>单相半波可控整流电路带阻感性负载情况下，阻抗角、触发角、导通角之间的关系，以及对输出整流电压平均值之间的关系，如果要提高输出电压平均值有没有什么解决方案？</p> <p>试着画出单相桥式全控整流电路在相同触发角不同负载时，输出电压 u_d，电流 i_d 的波形，并计算输出电压和电流的平均值。</p>			

教 案

电力电子技术 课 5 讲

主讲人薛荣辉

课 题：单相可控整流电路

目的任务：掌握单相半波可控整流电路和单相桥式全控整流电路带不同负载不同触发角情况下各电路的工作原理，波形分析，参数计算。

重点难点：电路工作原理分析，波形分析

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

第3章 整流电路

3.1 单相可控整流电路

一、单相半波可控整流电路

1. 电阻性负载

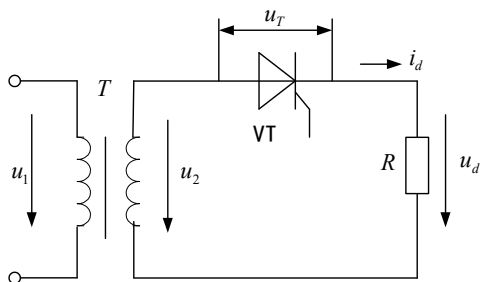


图 单相半波可控整流电路原理图

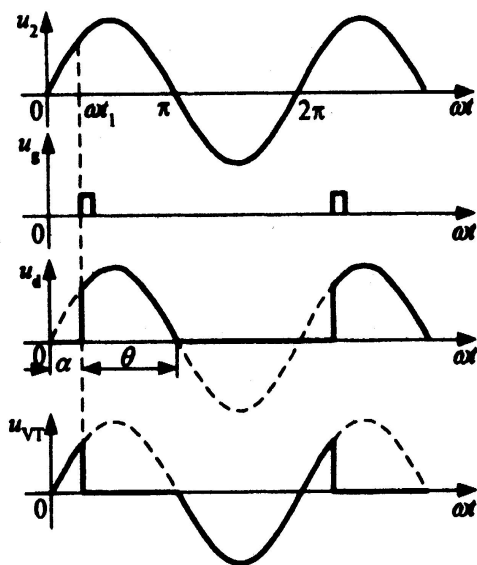


图 电阻负载时单相半波电路的工作波形

(1) 工作原理和波形分析

在电源的正半周， ωt 在 $0 \sim \omega t_1$ 阶段内，晶闸管加上正向阳极电压，但在未加触发脉冲之前，不满足晶闸管导通的条件，晶闸管无法导通，所以晶闸管处于阻断状态，电路中无电流通过，此时负载电阻上没有输出电压，全部电源电压施加在晶闸管两端。

当 ωt_1 时，晶闸管门极加上触发脉冲 u_g ，VT 立即导通，电路中有电流通过，电源电压全部加在负载 R 上(忽略晶闸管电压降)，波形如图所示。

当 $\omega t = \pi$ 时，电源电压下降为零，晶闸管因流过它的电流随着下降到零，小于管子的维持电流而关断，晶闸管由导通状态转入阻断状态。

在电源的负半周期间，VT 因承受反向电压而处于阻断状态，电源电压又全部加在晶闸

管两端，负载上的电压和电流均为零。直至下一个周期，晶闸管又在正向电压作用下，再加上触发脉冲时，晶闸管再重新导通。当电源电压的每一个周期都以恒定的时刻加上触发脉冲时，则负载 R 上就能得到稳定的缺角半波电压输出波形，如此循环重复上述过程。这是一个单方向的脉动直流电压，负载电流与电压波形相同，见图 2-2 所示。

由图 2-2 的波形可以看出，改变施加的触发脉冲电压的相位（即控制脉冲的触发时刻），输出电压的波形随之改变，所以把这种通过相位控制来调节直流输出电压大小的方式称为移相控制方式，简称相控方式。

(2) 主要概念

控制角：在单相电路中，把晶闸管承受正压到施加触发脉冲导通为止的电角度称为控制角，亦称移相角(Firing Angle)，常用 α 表示。

导通角：晶闸管在一个周期内导通的电角度称为导通角(Conduction Angle)，用 θ 表示。显然 $\alpha + \theta = \pi$ 。

移相：改变 α 的大小，即改变触发脉冲在每周期内出现的相位称为移相。

移相范围：触发角从 0 度开始到最大触发电角度的区间称为移相范围。对单相半波电路而言， α 的移相范围为 $0 \sim \pi$ 。

(3) 主要参数关系

整流输出电压的平均值：

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

$$\approx 0.45U_2 \frac{(1 + \cos \alpha)}{2}$$

单相半波电路可控整流电路在电阻性负载时， α 的移相范围为 $0^\circ \sim \pi$ 。

整流输出电流的平均值：

$$I_d = \frac{U_d}{R} = 0.45 \frac{U_2}{R} \frac{(1 + \cos \alpha)}{2}$$

由于整流输出电流也是缺角正弦半波，因此在选择晶闸管、熔断器、导线截面以及计算负载电阻 R 的有功功率时必须按电流有效值计算。

整流输出电压的有效值即均方根值 U ：

$$U = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}U_2 \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = U_2 \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi} + \frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha}$$

整流输出电流有效值：

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_2}{R} \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi} + \frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha}$$

电流的波形系数：

$$k_f = \frac{I}{I_d} = \frac{\sqrt{2\pi(\pi - \alpha) + \pi \sin 2\alpha}}{\sqrt{2}(1 + \cos \alpha)}$$

对于整流电路通常要考虑功率因数，不难看出，变压器二次侧所供给的有功功率（忽略晶闸管的损耗） $P = I^2 R = UI$ （注意：不是 $I_d^2 R$ ），而变压器二次侧的视在功率 $S = U_2 I$ 。

所以电路功率因数：

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{UI}{U_2 I} = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi} + \frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha}$$

从公式(2-6)可见,功率因数是 α 的函数, $\alpha = 0^\circ$ 时,功率因数最大,为0.707。这说明尽管是电阻性负载,由于存在谐波电流,电源的功率因数也不会是1,而且当 α 越大时,功率因数越低。

在选用晶闸管时,必须要考虑流过晶闸管的电流波形。因为即使在同一电路中,当 α 角不同时刻,流过器件的电流波形不同,其波形系数不同,则流过器件的电流的有效值也不同,为避免晶闸管不因结温过高而损坏,应按有效值选晶闸管,确保器件安全可靠工作。

流过晶闸管的电流平均值和有效值:

$$I_{dT} = I_d = \frac{U_d}{R}$$

$$I_T = I = I_2 = \frac{U_2}{R} \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{2\alpha}}$$

从图2-2中也可看出,晶闸管承受的最大正、反向电压均为变压器二次侧电压的最大值,即 $U_T = \sqrt{2}U_2$ 。

2. 电感性负载

流过电感 L 的电流变化时,要产生自感电动势 u_L ,其大小与电流的变化率有关,起阻碍电流变化的作用,所以流过电感的电流不能突变,当电感中电流增大时, u_L 阻碍电流增大,产生的 u_L 极性为上正下负;当电感中电流减小时, u_L 阻碍电流减小,极性为上负下正。

(1) 工作原理及波形分析

在电源正半周,晶闸管承受正向电压,在 $\alpha = \omega t_1$ 时刻,触发晶闸管导通,直流侧输出电压和电源电压相同。但由于 L 的作用,晶闸管触发导通后,电流不能突变,只能从零开始逐渐增大,此过程中电流的变化在电感中形成的电压 u_L 极性为上正下负,阻止电流的增加。此时电源除了供给电阻消耗的能量外,还供给电感受到的磁场能量。当电流达到最大值时,电流变化率为0,即 $u_L = 0$,由于电源电压的减小,电流也开始减小,电感中的电压 u_L 的极性变为上负下正, L 释放能量,此能量除了供给电阻的消耗外,还供给电源的吸收。在 $\omega t = \pi$ 时刻,电源电压变成零,但电感中的能量没有释放完毕,其极性仍为下正上负,使晶闸管仍承受正向电压而继续维持导通,负载上输出电压仍和电源电压相同,由于电源电压已经过零变负,所以负载上也出现负的瞬时电压。直到电感中能量释放完毕,电流下降到零,晶闸管立刻承受反向电压而关断。如图2.3波形所示。由图可知,由于晶闸管在电源电压的负半周一段时间内还处于导通状态,所以整流电压波形中出现负值,使输出直流电压的平均值下降,且电源电压进入负半周后, L 维持晶闸管的导通时间越长,则整流输出电压波形中的负面积越大,整流输出电压平均值越小。当 $\omega L \gg R$ 时,整流输出电压波形中正、负面积相等,使输出电压的平均值 $U_d = 0$ 。下个周期开始重复上述过程。

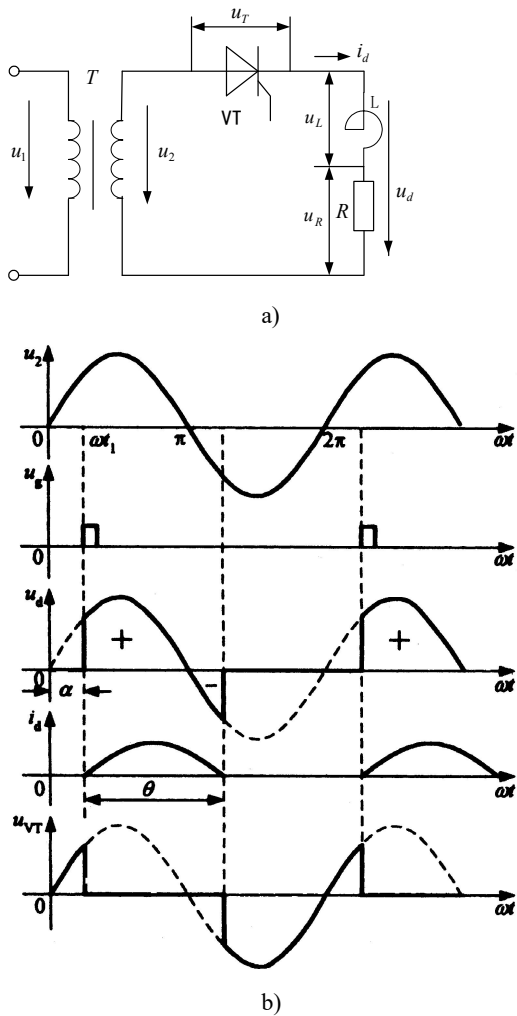


图 感性负载的单相半波整流电路原理图及其电压、电流波形
 a)电路原理图 b)工作波形图

整流输出的电压平均值:

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} (u_R + u_L) d(\omega t) \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} u_R d(\omega t) + \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\theta} L\omega \frac{di}{d\omega t} d\omega t \\
 &= U_R + \frac{1}{2\pi} \int_0^{\theta} \omega L di \\
 &= U_R
 \end{aligned}$$

$$i_d = i_T + i_{vD}$$

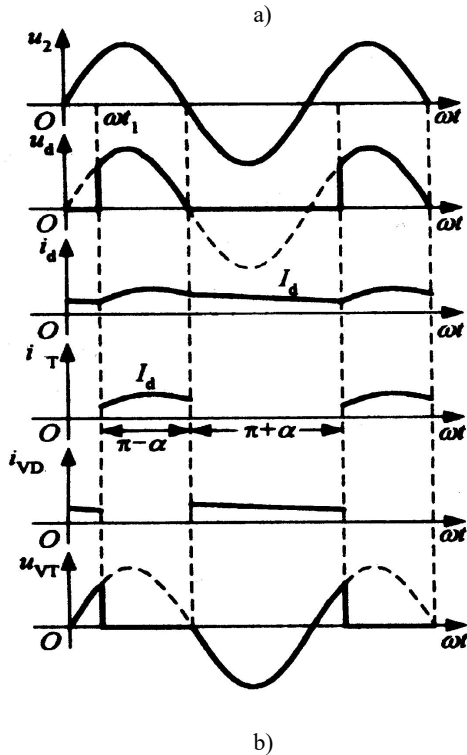
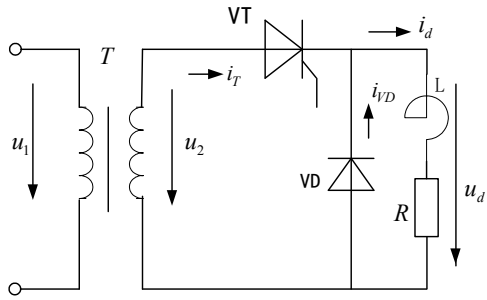


图 带续流管的单相半波整流电路及其电压、电流波形

a)电路原理图 b)工作波形图

当电感量足够大时，流过负载的电流不但连续，而且基本维持不变，波形可以看成是一条平行于横轴的直线，晶闸管电流与续流管电流均为矩形波。

(2) 主要参数关系

由于整流输出电压的波形与电阻性负载时相同，所以整流输出电压的平均值公式与电阻性负载时也相同。即

$$U_d = 0.45U_2 \frac{(1 + \cos \alpha)}{2}$$

由图 2-4 也可知道，当控制角为 α 时，晶闸管导通角为 $\pi - \alpha$ ，续流二极管导通角为 $\pi + \alpha$ ，所以流过晶闸管电流平均值和有效值为：

$$I_{dT} = \frac{\pi - \alpha}{2\pi} I_d$$

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

流过续流管的电流平均值和有效值：

$$I_{dD} = \frac{\pi + \alpha}{2\pi} I_d$$

$$I_D = I_d \sqrt{\frac{\pi + \alpha}{2\pi}}$$

晶闸管承受的最大正、反向电压均为 $\sqrt{2}U_2$ ，电路的移相范围仍为 $0 \sim \pi$ 。

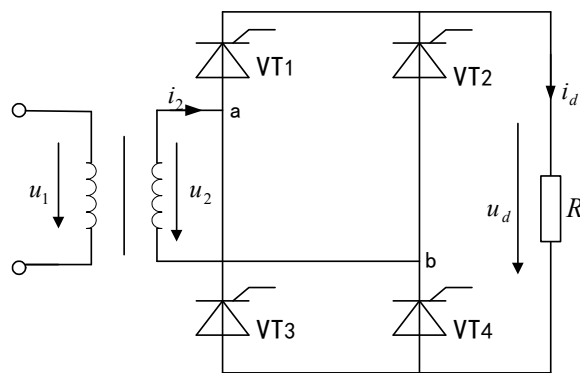
单相半波可控整流电路的特点是简单、易调整，但输出的电流脉动大。而且变压器二次侧绕组中通过含直流分量的电流也容易使铁心产生直流磁化问题，所以半波整流只适用小容量的场合。

二、 单相桥式全控整流电路

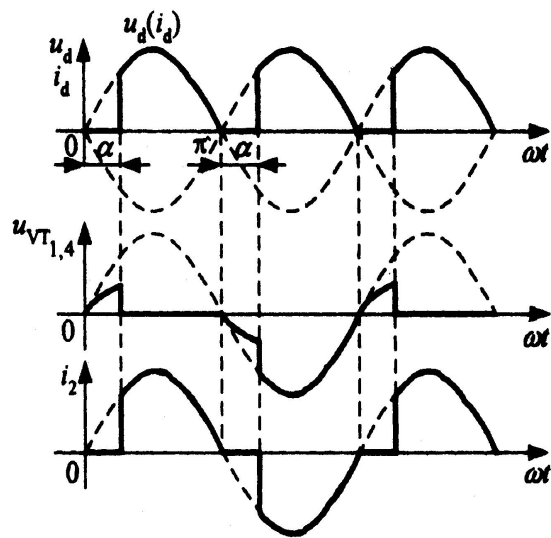
1. 电阻性负载

(1) 工作原理及波形分析

单相全控桥式整流电路如图 3-5 所示，图中晶闸管 VT₁、VT₄ 组成一对桥臂，VT₂、VT₃ 组成另一对桥臂，变压器二次电压接在桥臂中点。



a)



b)

图 3-5 单相桥式全控整流电路在电阻性负载时的电路和输出波形

a) 电路原理图

b) 工作波形图

(2) 主要参数关系

整流输出电压的平均值:

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

电路的移相范围为 180° 。

整流输出电流的平均值:

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

整流输出电压的有效值:

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

整流输出电流的有效值:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_2}{R} \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha}$$

由于两组晶闸管轮流导通, 所以流过每个晶闸管的电流平均值为负载电流的一半, 即:

$$I_{dT} = \frac{1}{2} I_d$$

流过晶闸管电流的有效值:

$$I_T = \frac{1}{\sqrt{2}} I$$

变压器二次侧绕组电流的有效值:

$$I_2 = I$$

电路的功率因数:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{U I}{U_2 I_2} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

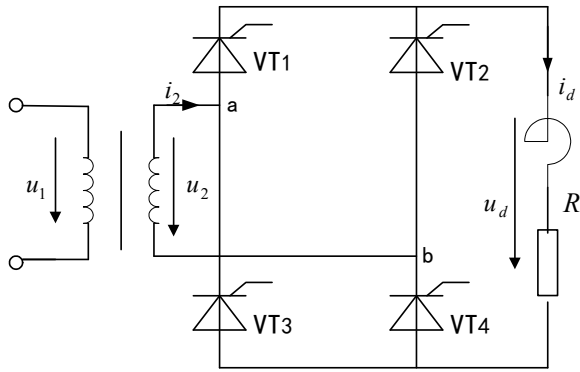
显然当 $\alpha = 0^\circ$ 时, $\cos \varphi = 1$, 电流波形没有畸变, 为完整的正弦波形。

晶闸管承受的最大正、反向电压为二次电源电压的峰值, 即 $U_T = \sqrt{2} U_2$ 。

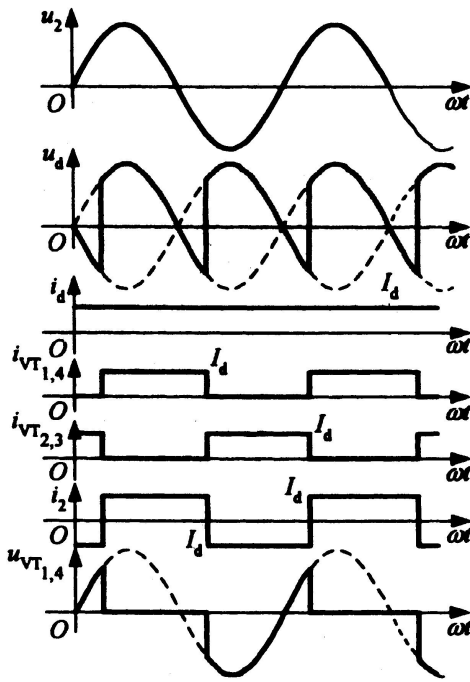
2. 电感性负载

(1) 工作原理和波形分析

单相桥式全控整流电路带感性负载时的电路及工作波形如图 3-6 所示。假设电感很大, 即 $\omega L \gg R$, 电流连续, 波形为一条直线。



a)



b)

图 3-6 感性负载时整流电路及工作波形

a) 电路原理图 b) 工作波形图

(2) 主要参数关系

整流输出电压的平均值:

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) \\
 &= \frac{2\sqrt{2} U_2}{\pi} \cos \alpha \\
 &\approx 0.9 U_2 \cos \alpha
 \end{aligned}$$

显然当 $\alpha = 90^\circ$ 时, $U_d = 0$; 当 $\alpha = 0^\circ$ 时, $U_{d \max} = 0.9 U_2$ 。

整流输出电流的平均值:

$$I_d = \frac{U_d}{R} = 0.9 \frac{U_2}{R} \cos \alpha$$

由于一个周期两组管子轮流导通，各导通 180° ，与 α 大小没有关系，所以流过晶闸管电流的平均值：

$$I_{dT} = \frac{1}{2} I_d$$

流过晶闸管电流的有效值：

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} I_d^2 d(\omega t)} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_d$$

变压器二次侧电流的有效值：

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\pi} I_d^2 d(\omega t)} = I_d$$

如果负载电感较小，电感储存的能量不能维持电流导通到 $\pi + \alpha$ ，则负载电流将不连续，出现断续状态，其波形如图 3-7 所示。

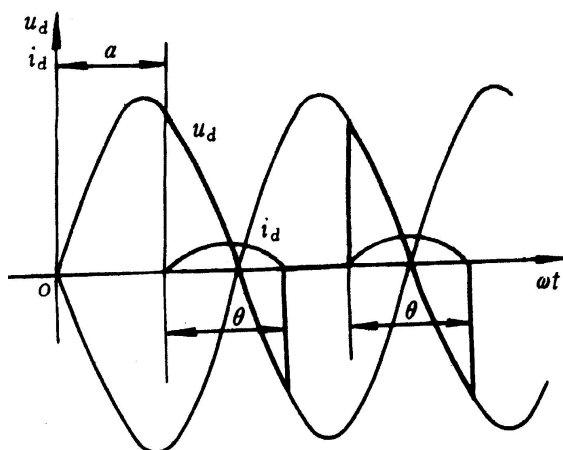


图 3-7 电感较小时整流电的电压和电流波形

从上面分析可知，单相桥式整流电路带感性负载时，由于整流输出电压的波形出现了负面积，从而使整流输出电压的平均值下降，如果想提高整流输出电压的平均值，可以在负载两端反并联续流二极管，如图 3-8 所示，工作过程自行分析。

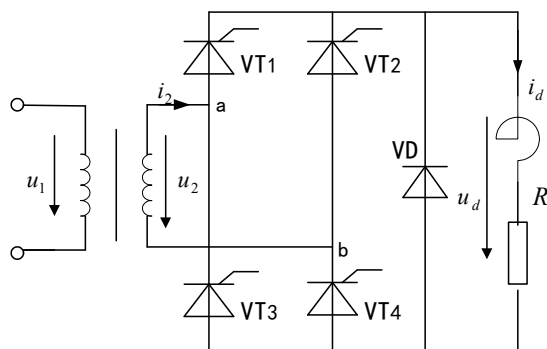


图 3-8 带续流二极管的单相可控整流电路

3. 反电势负载

蓄电池、直流电机的电枢等类负载本身是一个直流电源。对于可控整流电路来说，它们是反电动势性质的负载，如图 3-9 所示。

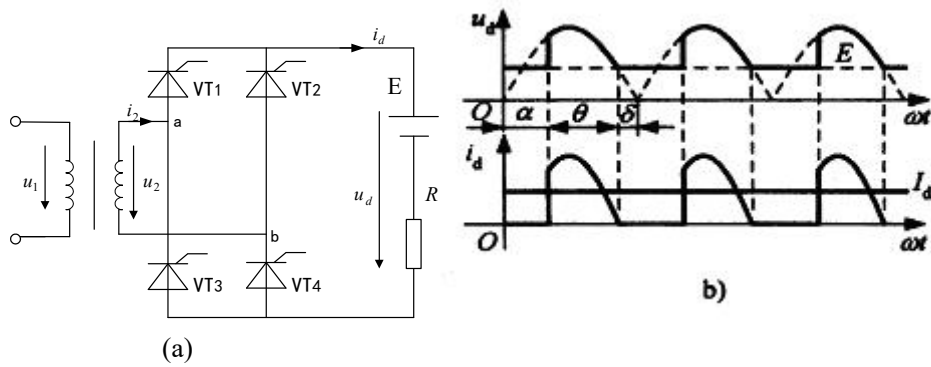


图 3-9 反电动势负载时的输出波形

a)原理图 b)输出波形图

如果变压器二次电压的峰值为 $\sqrt{2}U_2$ ，反电动势 E 的大小也确定，则晶闸管停止导通时的导电角即可确定

$$\delta = \sin^{-1} \frac{E}{\sqrt{2}U_2}$$

根据上图即可求出整流输出电压的平均值为

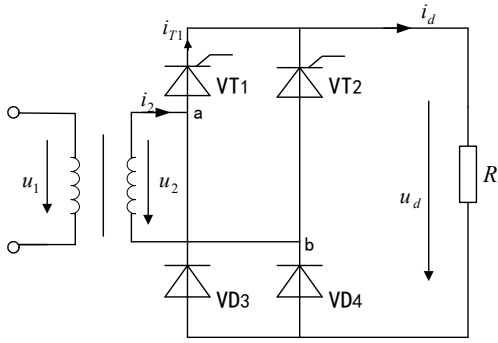
$$U_d = E + \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\delta} (\sqrt{2}U_2 \sin \omega t - E) d\omega t$$

电流的平均值和有效时可用下式表示

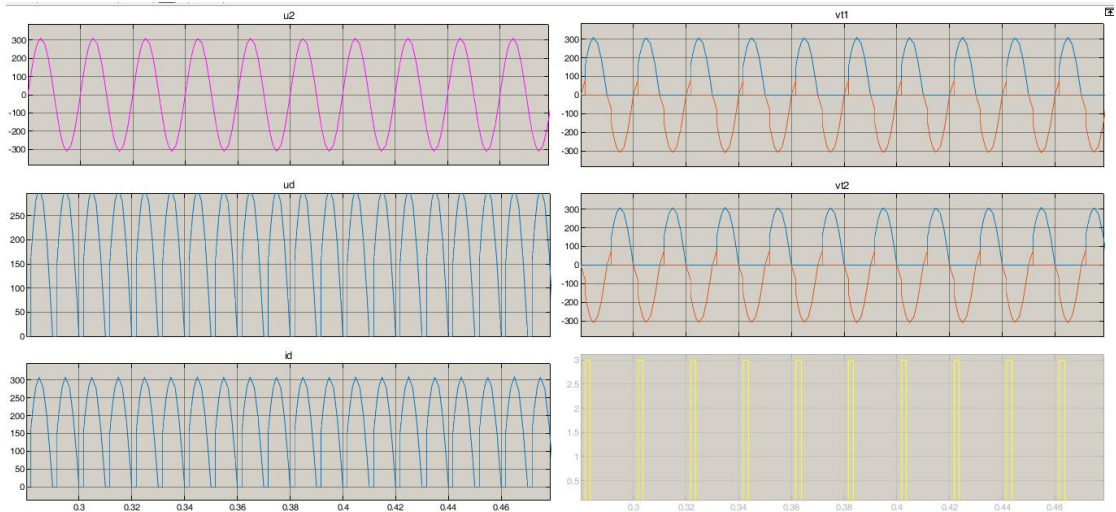
$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\delta} \frac{\sqrt{2}U_2 \sin \omega t - E}{R} d\omega t$$

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

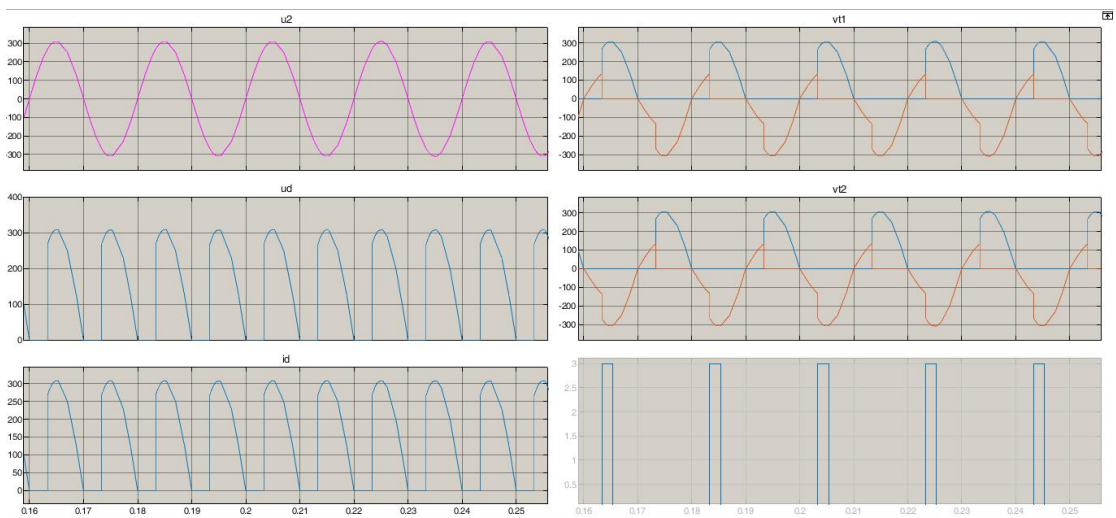
当 $\alpha < \delta$ 时，为了使晶闸管可靠导通，要求触发脉冲有足够的宽度，保证当 $\omega t = \delta$ 时，脉冲仍存在，可是晶闸管被触发。



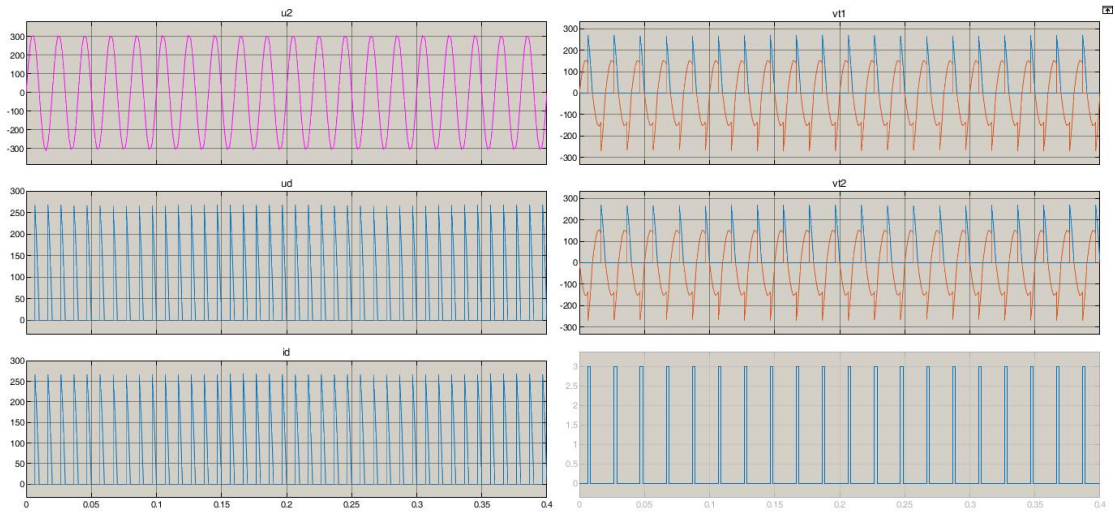
1.单相桥式全控整流电路阻性负载触发角为 30° 波形



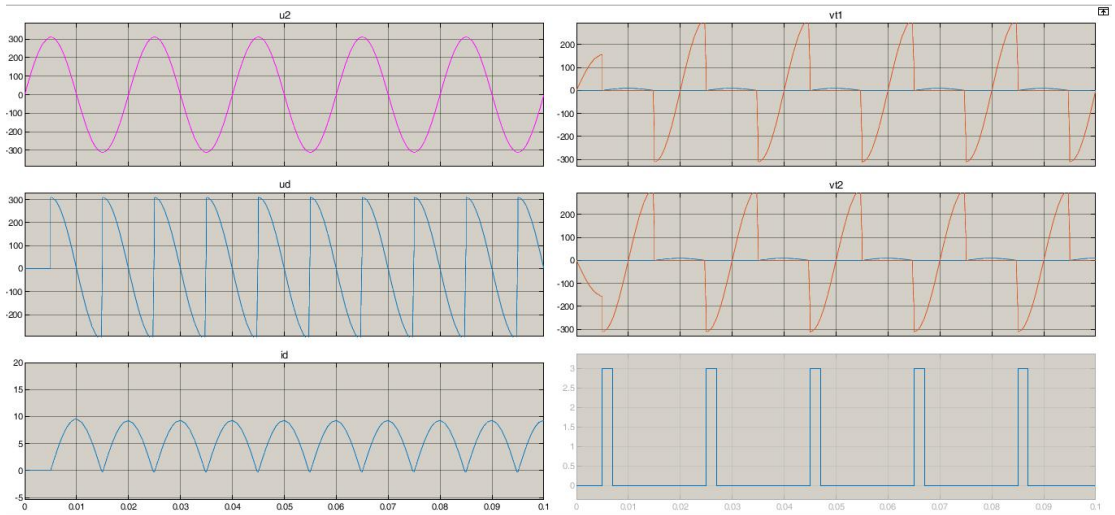
2.单相桥式全控整流电路阻性负载触发角为 60°



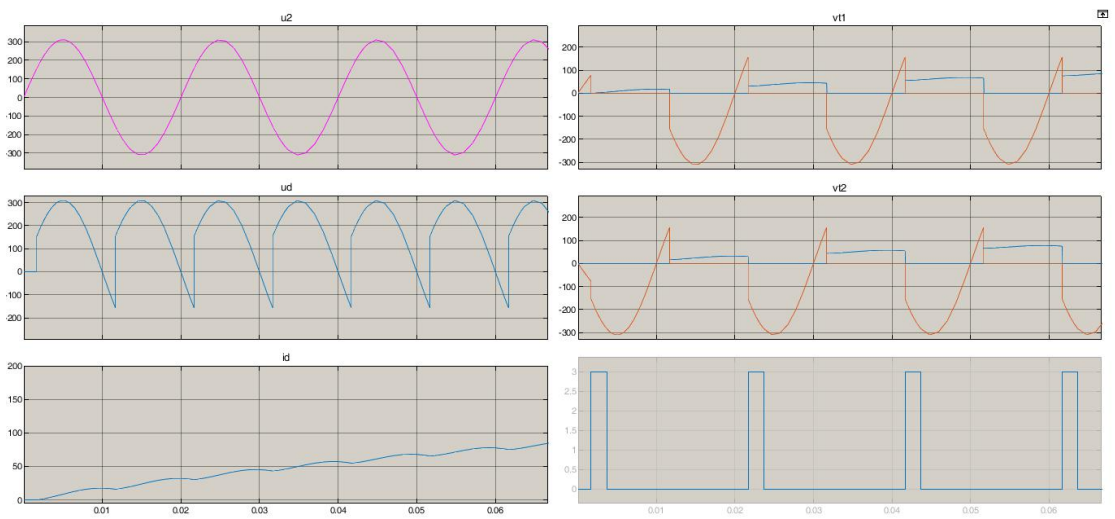
3.单相桥式全控整流电路阻性负载触发角为 120°



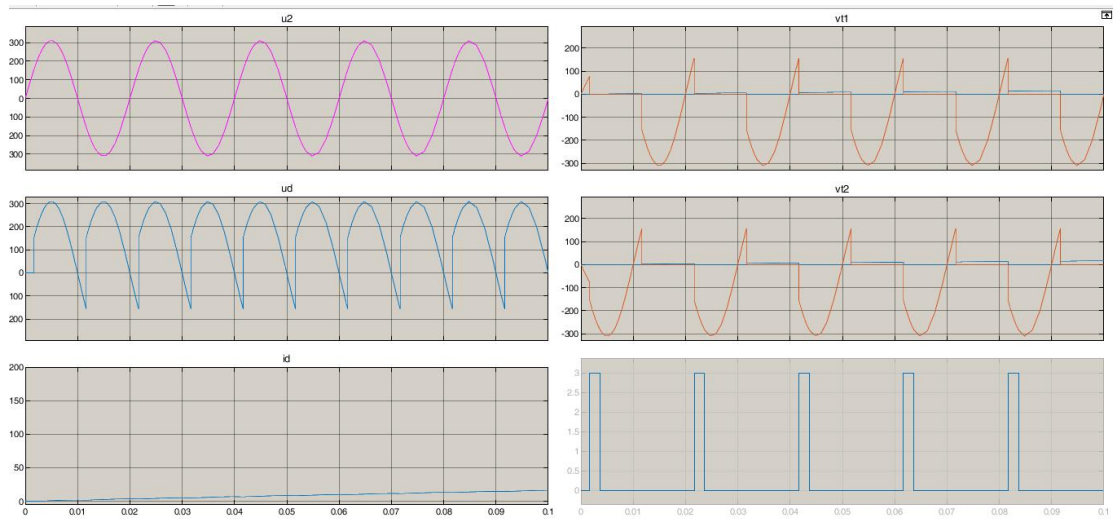
4.单相桥式全控整流电路 $L=0.1H, R=1\Omega$ ，触发角为 90°



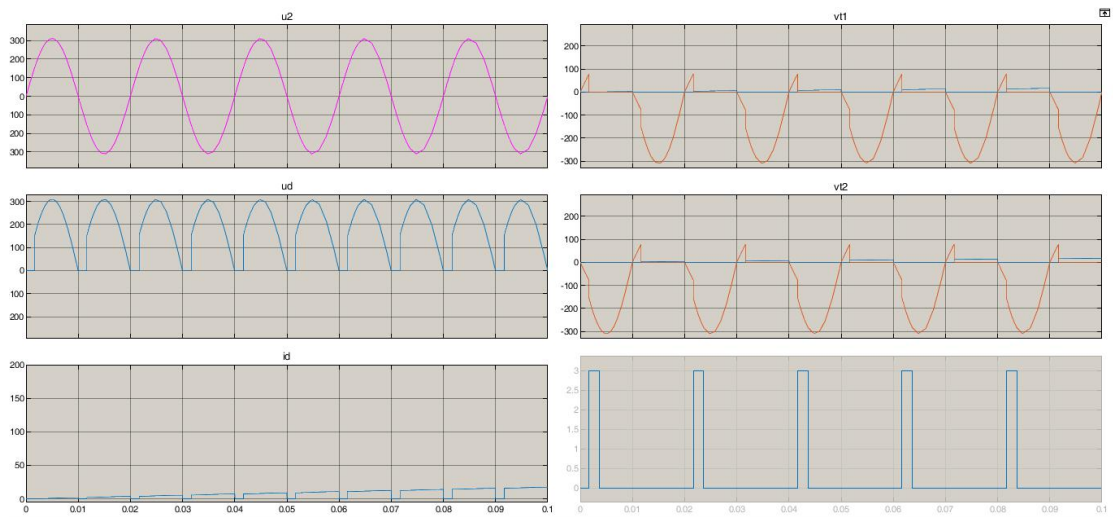
5.单相桥式全控整流电路 $L=0.1H, R=1\Omega$ ，触发角为 30°



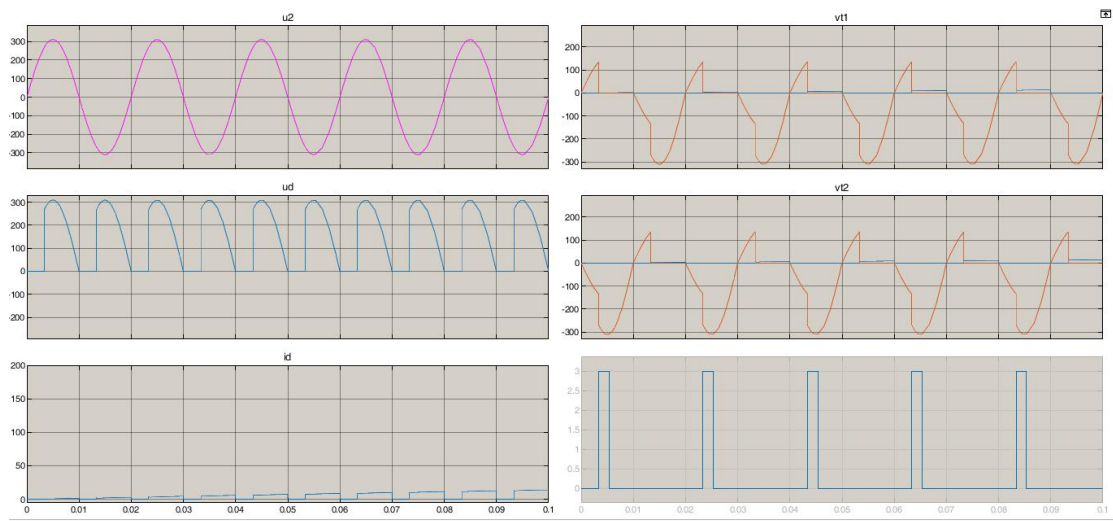
6.单相桥式全控整流电路 $L=1H, R=1\Omega$ ，触发角为 30°



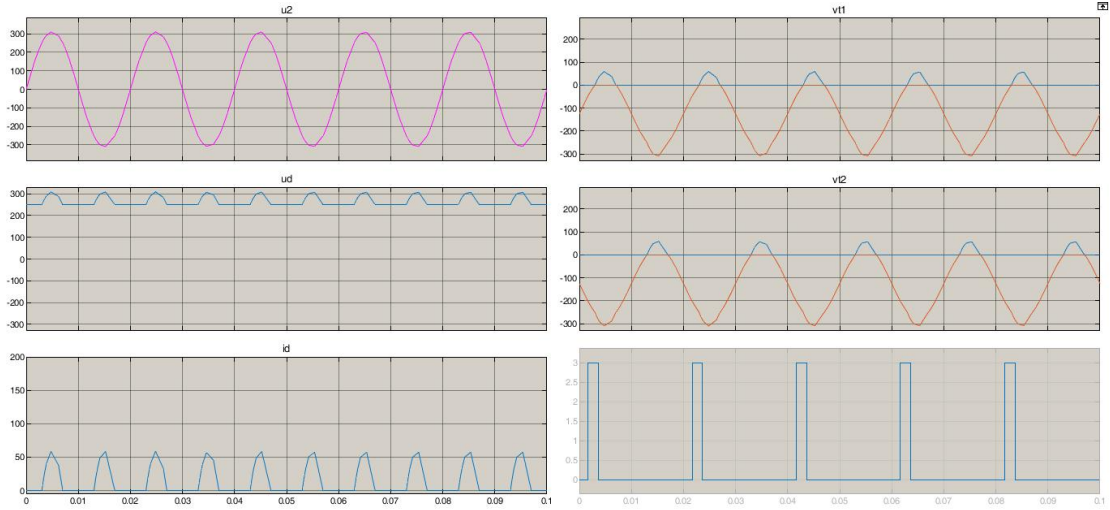
6.单相桥式全控整流电路 $L=1H, R=1\Omega$ ，触发角为 30° , 续流二极管



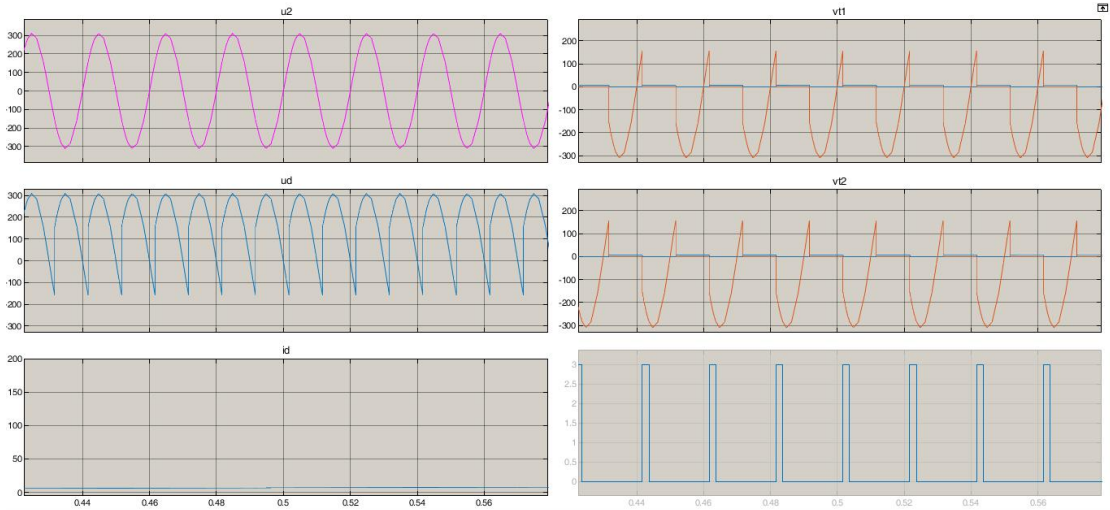
7.单相桥式全控整流电路 $L=1H, R=1\Omega$ ，触发角为 60° , 续流二极管



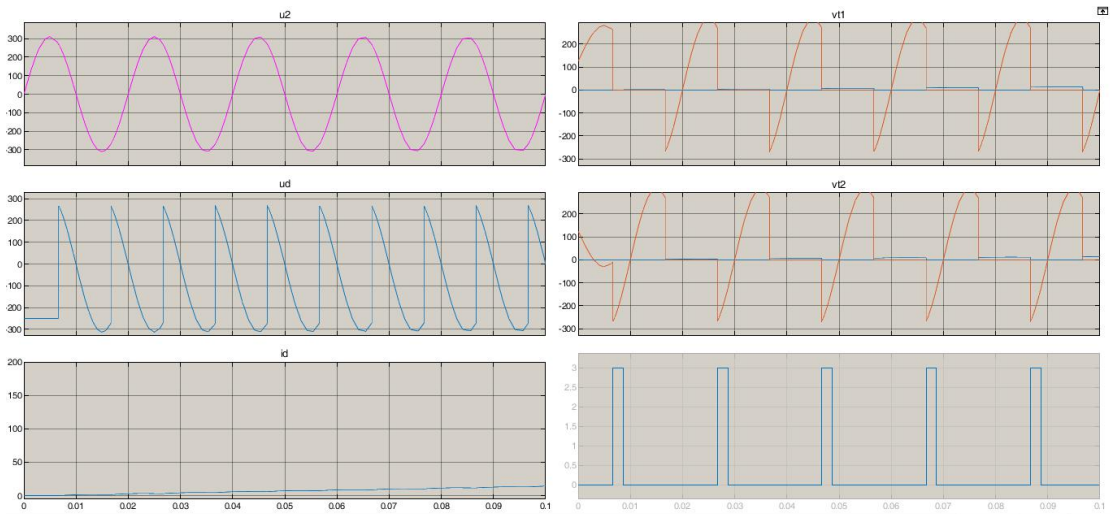
8.单相桥式全控整流电路 $R=1\Omega$ ，反电动势负载 $E=250V$ 触发角为 30°



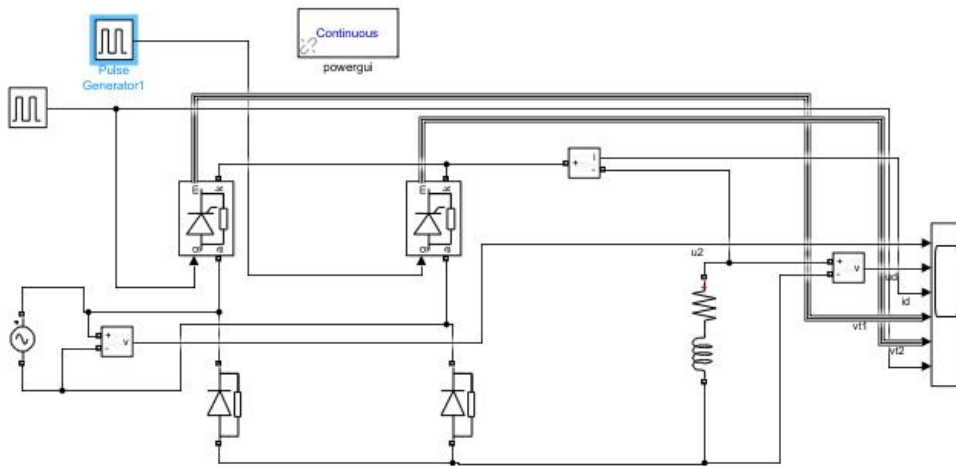
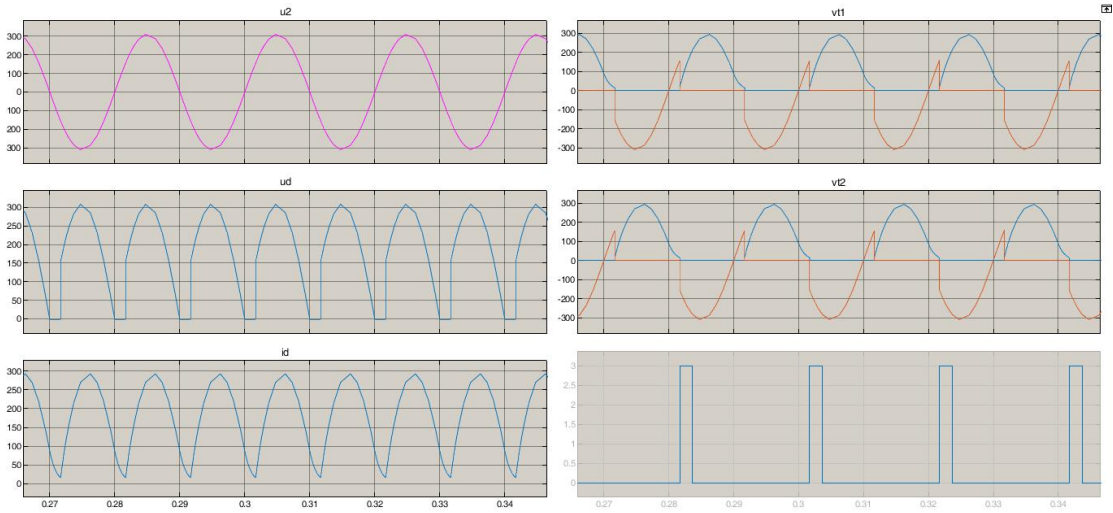
8.单相桥式全控整流电路 $R=1\ \Omega$, $L=10H$,反电动势负载 $E=30v$ 触发角为 30°



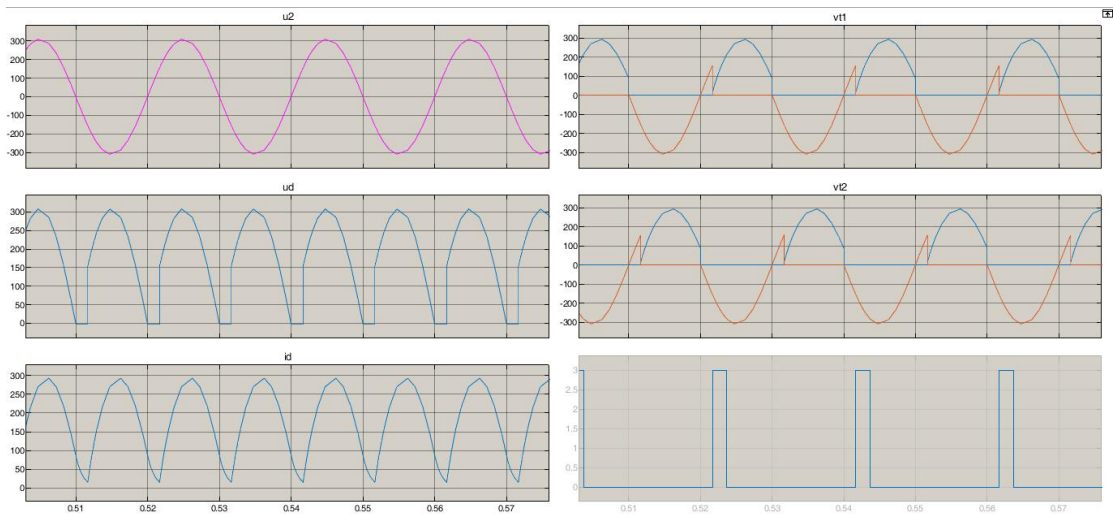
9.单相桥式全控整流电路 $R=1\ \Omega$, $L=1H$,有源逆变 $E=250v$,触发角为 120°

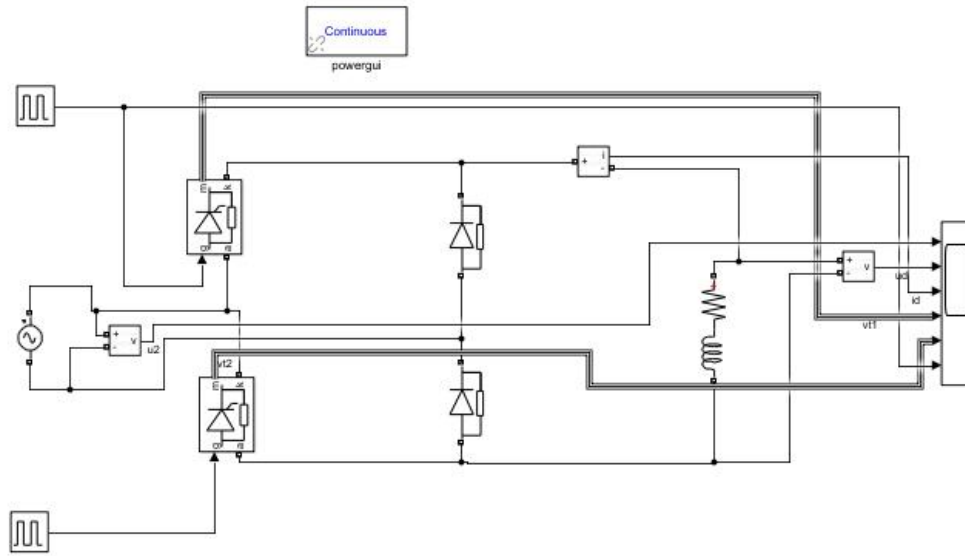


10.单相桥式半控整流电路 $R=1\ \Omega$, $L=1mH$,触发角为 30°



11.单相桥式半控整流电路 $R=1\Omega$, $L=1\text{mH}$,触发角为 30°





《电力电子技术 B》电子教案

第 6 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第三章 整流电路			
教学节次及名称	3.1 单相可控整流电路 3.2 三相半波可控整流电路			
教学目的 与要求	<ol style="list-style-type: none"> 1. 了解单相全波可控整流电路 2. 掌握单相桥式半控整流电路 3. 掌握三相半波可控整流电路 			
教学重点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 掌握单相桥式半控整流电路。 2. 掌握三相半波可控整流电路电路分析，波形分析，参数计算。 			
教学难点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 晶闸管的工作状态。 2. 波形分析，参数计算。 			
教学内容	<ol style="list-style-type: none"> 1. 分析单相全波可控整流电路带电阻性负载以及带阻感性负载工作原理、波形分析、参数计算。探讨单相桥式全控整流电路在两种负载情况下的波形，参数的异同。<15 分钟> 2. 分析单相桥式半控整流电路带阻感性负载工作原理、波形分析、参数计算。与哪一种整流电路波形相似。<15 分钟> 3. 介绍失控现象，探讨解决办法。<15 分钟> 4. 分析三相半波可控整流电路带电阻性负载工作原理、波形分析、参数计算。熟悉晶闸管自然换向点位置的判断。<25 分钟> 5. 分析三相半波可控整流电路带阻感性负载工作原理、波形分析、参数计算。探讨晶闸管的换相位置。（不考虑晶闸管的换相时间）<15 分钟> 6. 小结、答疑。<5 分钟> 			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	<p>掌握单相桥式全控整流电路在各种负载情况下电路的状态，波形分析，参数计算。</p> <p>掌握三相半波可控整流电路在各种负载情况下电路的状态，波形分析，参数计算。</p>			
作业和思 考题	<ol style="list-style-type: none"> 1.单相桥式半控整流电路工作原理？什么是失控现象？如何解决？ 2.三相半波可控整流电路整流变压器一般采用什么接法？ 3.三相半波可控整流电路共阴极接法，各相晶闸管的自然换向点的位置如何判断？ 4.利用 MATLAB/Simulink 搭建模型，晶闸管触发角如何设置？ 			

教 案

电力电子技术 课 6讲

主讲人薛荣辉

课 题：单相可控整流电路

三相半波可控整流电路

目的任务：熟悉单相可控整流电路的分析方法，掌握三相半波可控整流电路阻性负载，阻感性负载，带续流二极管三种情况下的工作原理，参数计算。

重点难点：电路工作原理分析，波形分析

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

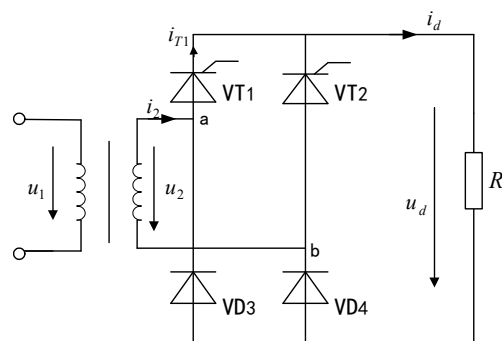
年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

三、单相桥式半控整流电路



3.2 三相可控整流电路

一、三相半波可控整流电路

1. 电阻性负载

(1) 工作原理和波形分析

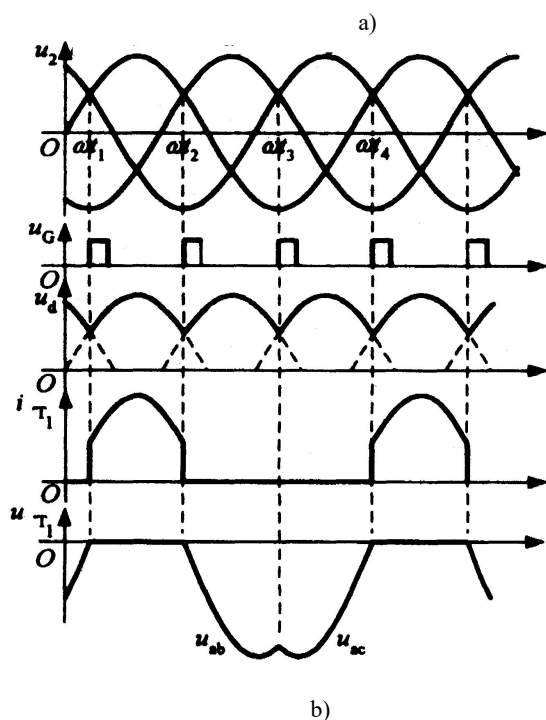
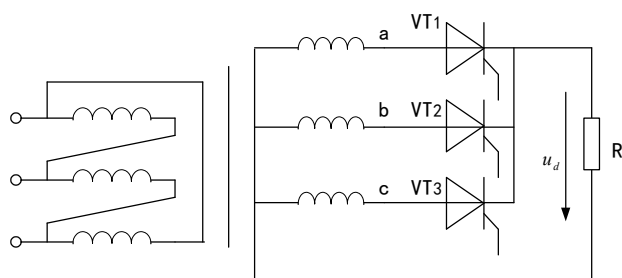


图 1 三相半波可控整流电路及 $\alpha = 0^\circ$ 时的工作波形

a)原理图 b)输出波形图

假设图 1 中的晶闸管为整流二极管，则此电路为三相半波不可控整流电路，由于二极管在任何时刻都是阳极电位高的管子导通，即相电压最高相所在的二极管导通，其余两相二极管将承受反向电压而关断，整流输出电压为该相的相电压。如图波形所示。 $\omega t_1 \sim \omega t_2$ 期间，a 相电压最高，a 相所在的二极管导通，负载电压和 a 相电压相等； $\omega t_2 \sim \omega t_3$ 期间，b 相电压最高，b 相所在的二极管导通，负载电压和 b 相电压相等； $\omega t_3 \sim \omega t_4$ 期间，c 相电压最高，c 相所在的二极管导通，负载电压和 c 相电压相等。下个周期重复上述过程。

由以上分析可知，一个周期中三个二极管轮流导通，每个导通时间为 120° ，整流输出电压波形为三相电源电压的三个完整的波头。二极管换相发生在三相相电压的交点 ωt_1 、 ωt_2 、 ωt_3 处，把这些点称为自然换相点。对三相半波可控整流电路来说，自然换相点是各相晶闸管触发导通的最早时刻，因此将这些点作为晶闸管控制角 α 的起点，即记这些点处 $\alpha = 0^\circ$ ，所以 $\alpha = 0^\circ$ 对应相电压的 30° 的时刻。单相可控整流电路中， $\alpha = 0^\circ$ 对应相电压的过零时刻。

三相半波可控整流电路，晶闸管控制角 $\alpha = 0^\circ$ 的工作过程和波形与不可控整流电路完全一样，如图 1 所示。变压器二次绕组中电流与各相晶闸管电流相同，每周期只有单向的电流通过，存在直流磁化问题。

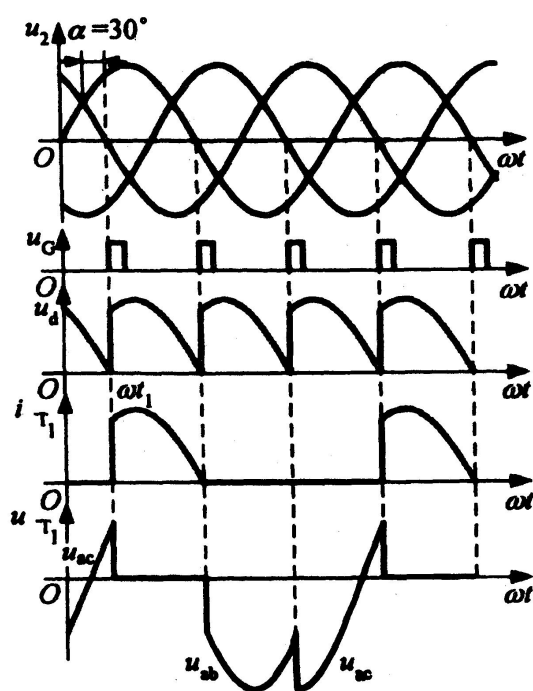


图 2 三相半波可控整流电路阻性负载
在 $\alpha = 30^\circ$ 时的工作波形

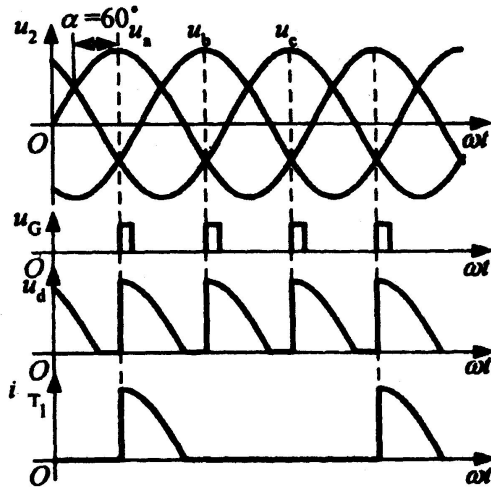


图3 三相半波可控整流电路阻性负载 $\alpha = 60^\circ$ 在时的工作波形

当控制角继续增大时，整流输出电压将随着控制角的增大而减小， $\alpha \geq 150^\circ$ 后，即使晶闸管获得脉冲，也不会导通，因此时晶闸管承受的相电压已经过零变负，所以整流输出电压变为零，所以三相半波可控整流电路带阻性负载时的移相范围为 $0 \sim 150^\circ$ 。

(2) 主要参数关系

整流输出电压的平均值：

$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ 时，电流连续，各个晶闸管导通角始终是 120° ，所以

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) \\
 &= \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_2 \cos \alpha \approx 1.17U_2 \cos \alpha
 \end{aligned}$$

$30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ 时，电流断续，各相晶闸管导通角小于 120° ，到相电压过零的时刻关断，所以

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) \\
 &= \frac{1.17}{\sqrt{3}} U_2 \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) \right]
 \end{aligned}$$

负载电流的平均值：

$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ 时

$$I_d = \frac{1.17U_2}{R} \cos \alpha$$

$30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ 时

$$I_d = \frac{1.17U_2}{\sqrt{3}R} \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) \right]$$

电流连续时，整流变压器二次侧一相电流有效值

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{5\pi}{6}+\alpha} \left(\frac{\sqrt{2}U_2}{R} \sin \omega t \right)^2 d(\omega t)}$$

$$= \frac{U_2}{R} \sqrt{\frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{4\pi} \cos 2\alpha}$$

电流断续时，二次电流有效值：

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\pi} \left(\frac{\sqrt{2}U_2}{R} \sin \omega t \right)^2 d(\omega t)}$$

$$= \frac{U_2}{R} \sqrt{\frac{5}{12} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\sqrt{3}}{8\pi} \cos 2\alpha + \frac{1}{8\pi} \sin 2\alpha}$$

$$I_{dT} = I_d / 3。$$

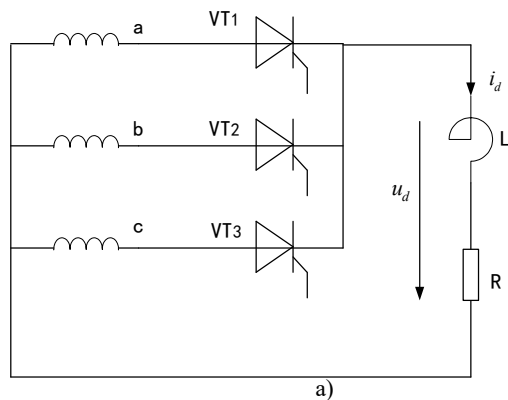
晶闸管所承受的最大正向电压为相电压的峰值 $\sqrt{2}U_2$ ，最大反向电压为线电压的峰值

$\sqrt{6}U_2$ 。

2. 电感性负载

(1) 工作原理和波形分析

阻感负载时，如果 L 值足够大，则整流电流的波形连续且基本为一水平直线。



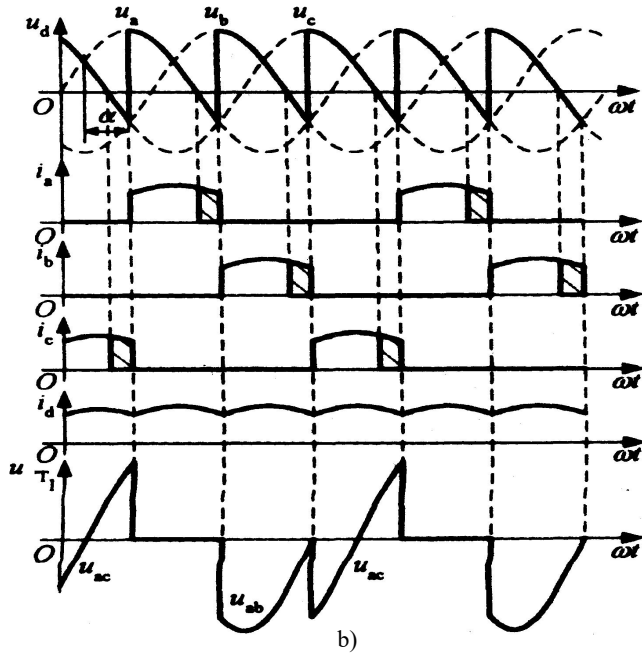


图 4 带阻感负载的三相半波可控整流电路及 $\alpha = 60^\circ$ 时的工作波形

a)原理图 b)输出波形图

$\alpha \leq 30^\circ$ 时，整流输出电压波形与电阻负载时波形完全相同，因为两种负载情况下，负载电流均连续。但负载电流波形不同。

$30^\circ < \alpha$ 时，如图 $\alpha = 60^\circ$ 时的输出波形。

(2) 主要参数关系

由于电流始终是连续的，所以晶闸管的导通角始终为 120° ，因此整流输出电压的平均值：

$$U_d = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 1.17U_2 \cos \alpha$$

当 $\alpha = 0^\circ$ 时， $U_{d\max} = 1.17U_2$ ；当 $\alpha = 90^\circ$ 时， $U_d = 0$ ，所以移相范围为 90° 。

负载电流的平均值为：

$$I_d = \frac{U_d}{R} = \frac{1.17U_2}{R} \cos \alpha$$

流过晶闸管的电流平均值和有效值：

$$I_{dT} = \frac{1}{3} I_d$$

$$I_T = \frac{1}{\sqrt{3}} I_d$$

流过晶闸管的电流就是流过变压器二次侧的电流，所以整流变压器二次侧电流有效值：

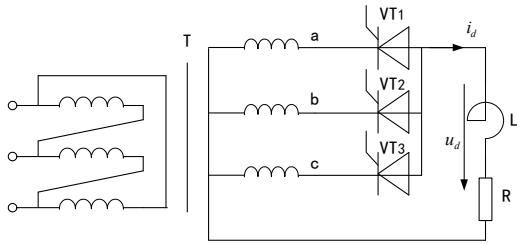
$$I_2 = I_T = \frac{1}{\sqrt{3}} I_d$$

变压器二次侧容量:

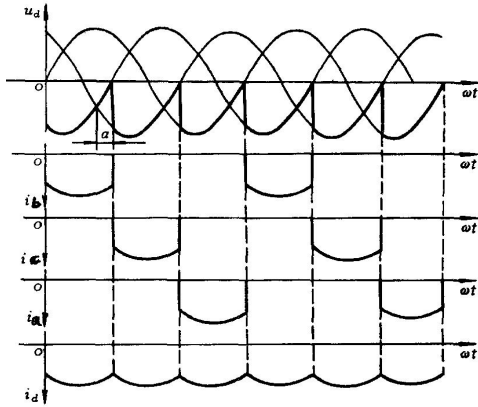
$$S_2 = 3U_2 I_2$$

三相半波可控整流电路只用三个晶闸管,接线和控制都很简单,但整流变压器二次侧绕组一个周期仅半个周期通电一次,为 120° ,输出电压的脉动频率为 150Hz ,脉动较大,绕组利用率低,且单方向的电流也会造成铁心的直流磁化,引起损耗的增大。所以三相半波整流电路一般用在中小容量的设备上。

3. 三相半波共阳极整流电路



a)



《电力电子技术 B》电子教案

第 7 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第三章 整流电路			
教学节次及名称	3.3 三相可控整流电路			
教学目的 与要求	掌握三相桥式全控整流电路			
教学重点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 掌握三相桥式全控整流电路的特点。 2. 掌握三相桥式全控整流电路分析，波形分析，参数计算。 			
教学难点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 晶闸管的工作状态。 2. 波形分析，参数计算。 			
教学内容	<ol style="list-style-type: none"> 1. 回顾三相半波可控整流电路电路分析。<5 分钟> 2. 分析三相桥式全控整流电路的特点。（两个三相半波可控整流电路串联。各晶闸管的序号，自然换相点的位置上。）<15 分钟> 3. 分析三相桥式全控整流电路带电阻性负载工作原理、波形分析、参数计算。<20 分钟> 4. 三相桥式全控整流电路阻性负载动画演示，讲解工作过程。<5 分钟> 5. 分析三相桥式全控整流电路带阻感性负载工作原理、波形分析、参数计算。<20 分钟> 6. 三相桥式全控整流电路阻感性负载动画演示，讲解工作过程。<5 分钟> 7. 分析不同触发角整流电路带阻感性负载分析波形变化。熟悉晶闸管自然换相点位置的判断。<15 分钟> 8. 小结，习题（腾讯课堂学生选择答案）。<5 分钟> 			
教学方法 及手段	腾讯课堂授课，设置题目，布置课后思考题			
小结	掌握三相桥式全控整流电路在各种负载情况下电路的状态，波形分析，参数计算。			
作业和思 考题	<ol style="list-style-type: none"> 1. 三相桥式全控整流电路各晶闸管的自然换相点的位置如何判断？ 2. 三相半波可控整流电路与三相桥式全控整流有什么关系？ 3. 三相桥式全控整流电路带阻感性负载情况下触发角为 60 度波形如何画？ 			

教 案

电力电子技术 课 7 讲

主讲人薛荣辉

课 题：三相桥式全控整流电路

目的任务：掌握三相桥式全控整流电路阻性负载，阻感性负载的工作原理，参数计算。

重点难点：电路工作原理分析，波形分析

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

二、三相桥式全控整流电路

1. 电阻性负载

1) 工作原理和波形分析

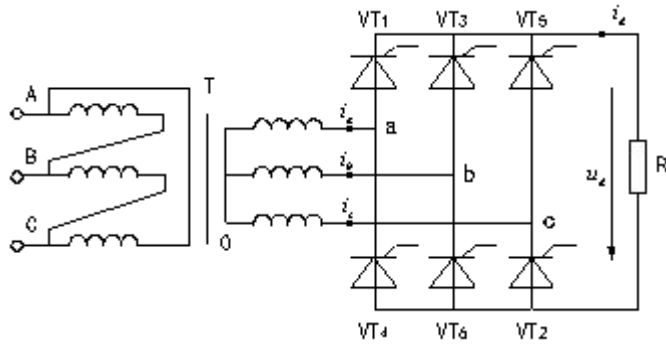


图 3-20 带阻性负载的三相桥式全控整流电路原理图

为了说明晶闸管的工作情况，将波形中的一个周期分为 6 个阶段，每个阶段为 60° ，如图 3-21 所示。每一个阶段中导通的晶闸管和整流输出电压的情况如表 3-1 所示。

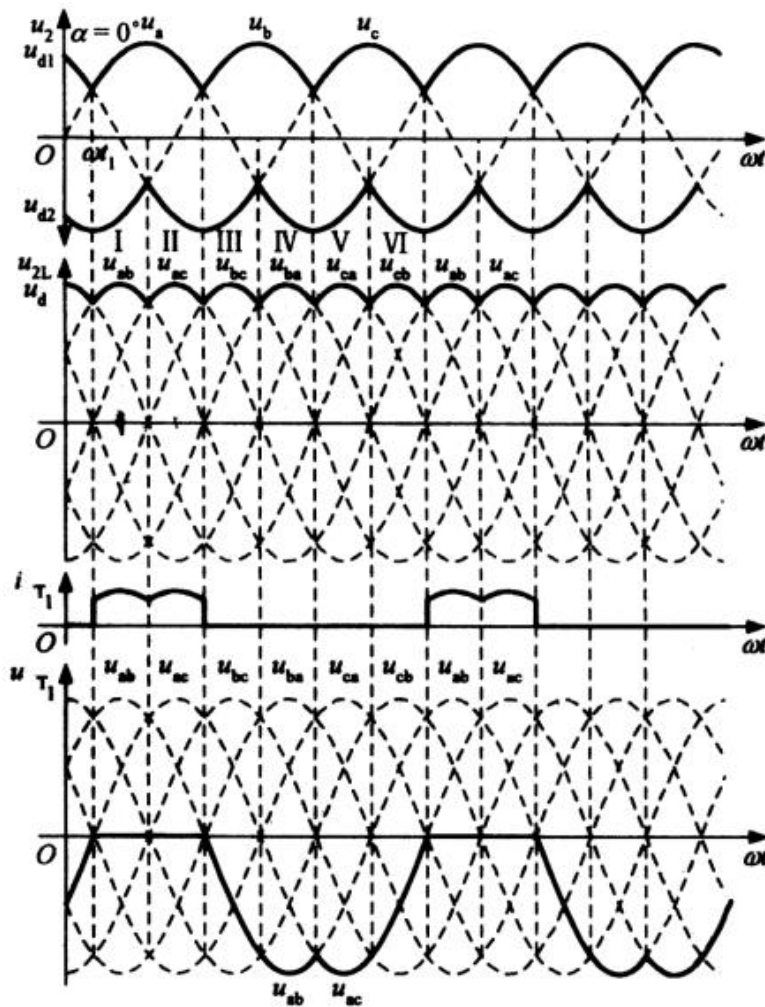


图 3-21 三相桥式全控整流电路阻性负载 $\alpha = 0^\circ$ 时的工作波形

表 3-1 三相桥式全控整流电路阻性负载 $\alpha = 0^\circ$ 时的情况

阶段	I	II	III	IV	V	VI
共阴极组导通的晶闸管编号	VT ₁	VT ₁	VT ₃	VT ₃	VT ₅	VT ₅
共阳极组导通的晶闸管编号	VT ₆	VT ₂	VT ₂	VT ₄	VT ₄	VT ₆
整流输出电压	U_{ab}	U_{ac}	U_{bc}	U_{ba}	U_{ca}	U_{cb}

$\alpha = 60^\circ$ 是电流连续和断续的临界角度，当 $\alpha > 60^\circ$ 后，电流波形断续。且阻性负载时，晶闸管承受的最大正向电压为线电压峰值的 1/2，即为 $(\sqrt{6}U_2)/2$ ，最大反向电压为线电压的峰值 $\sqrt{6}U_2$ 。随着控制角的增大，整流输出电压减小，当 α 增大到 120° ，整流输出电压波形将全为零，其平均值也为零。可见带阻性负载时三相桥式全控整流电路控制角的移相范围为 120° 。

由以上分析可知得出如下结论：

1) 三相桥式全控整流电路每个时刻必须有两个晶闸管导通，才能构成电流通路，其中共阳极组和共阴极组各有一个晶闸管导通。本组内每隔 120° 换流一次，共阴极与共阳极组间每隔 60° 换流一次。同组内晶闸管的触发脉冲相位差为 120° ，而同一桥臂上的晶闸管的触发脉冲相位差为 180° 。

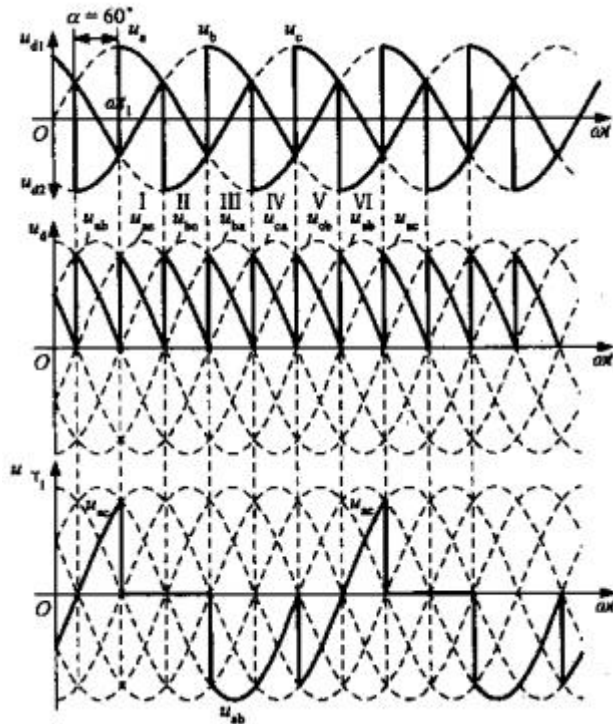


图 3-22 三相桥式全控整流电路 $\alpha = 60^\circ$ 时的输出波形

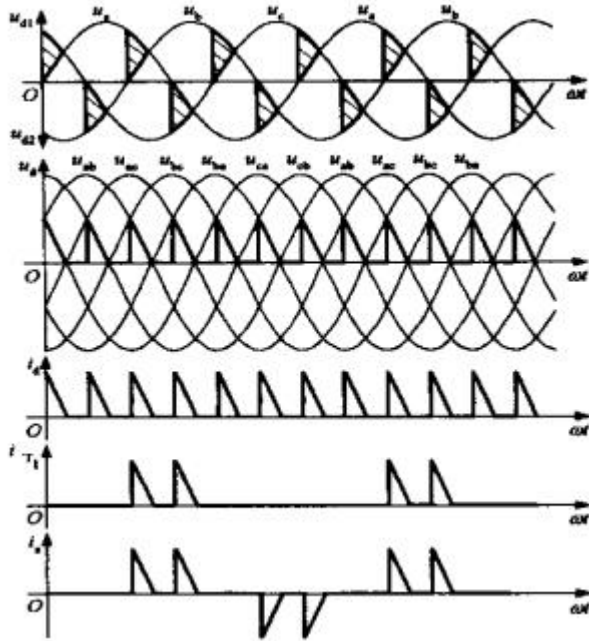


图 3-23 三相桥式全控整流电路阻性负载 $\alpha = 90^\circ$ 时的输出波形

2) 为了保证整流电路启动时或电流断续后能再次导通, 要求共阴极组和共阳极组各有一个管子导通, 则必须对两组中的一对晶闸管同时给触发脉冲。因此需要采用宽脉冲(脉冲宽度大于 60° , 小于 120° , 一般在 $80^\circ \sim 100^\circ$ 之间取值)或双窄脉冲(一个周期内对每一个晶闸管间隔 60° 连续发两次脉冲)触发晶闸管。

3) 一个周期内整流输出电压脉动 6 次, 脉动频率为 300Hz, 比三相半波整流输出大 1 倍。

(2) 主要参数关系

$\alpha \leq 60^\circ$ (负载电流连续) 时, 整流输出电压的平均值:

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} \sqrt{6}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{3\sqrt{6}U_2}{\pi} \cos \alpha \\
 &= 2.34U_2 \cos \alpha
 \end{aligned} \tag{3-46}$$

$\alpha > 60^\circ$ (电流断续) 时, 整流输出电压的平均值:

$$\begin{aligned}
 U_d &= \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\pi} \sqrt{6}U_2 \sin \omega t d(\omega t) \\
 &= 2.34U_2 \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{3} + \alpha \right) \right]
 \end{aligned} \tag{3-47}$$

负载电流的平均值:

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

变压器二次绕组的电流有效值:

$\alpha \leq 60^\circ$ 电流连续时,

$$\begin{aligned}
 I_2 &= \sqrt{\frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \left(\frac{\sqrt{6}U_2}{R} \sin \omega t \right)^2 d(\omega t)} \\
 &= \frac{\sqrt{6}U_2}{R} \sqrt{\frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3} \cos 2\alpha}{2\pi}}
 \end{aligned} \tag{3-48}$$

$\alpha > 60^\circ$ 电流断续时,

$$\begin{aligned}
 I_2 &= \sqrt{\frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\pi} \left(\frac{\sqrt{6}U_2}{R} \sin \omega t \right)^2 d(\omega t)} \\
 &= \frac{\sqrt{3}U_2}{R} \sqrt{\frac{4}{3} - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{3} + 2\alpha\right)}{\pi}}
 \end{aligned} \tag{3-49}$$

流过晶闸管电流的平均值和有效值:

$$I_{dT} = \frac{1}{3} I_d \tag{3-50}$$

$$I_T = \frac{1}{\sqrt{2}} I_2 \tag{3-51}$$

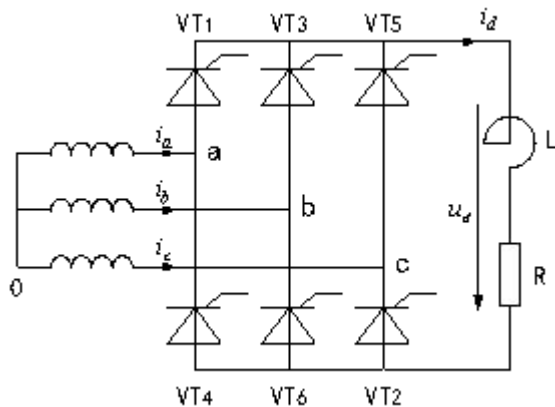
整流变压器二次绕组的容量:

$$S_2 = 3U_2 I_2$$

2. 电感性负载

(1) 工作原理和波形分析

如图 3-24 所示, 假设电感足够大, 使整流输出的负载电流连续且为一条水平线。



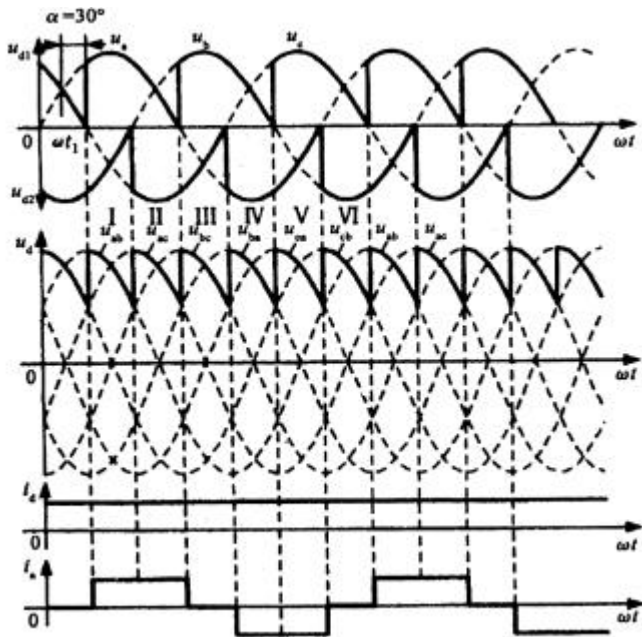


图 3-25 三相桥式全控整流阻感负载 $\alpha = 30^\circ$ 时的输出波形

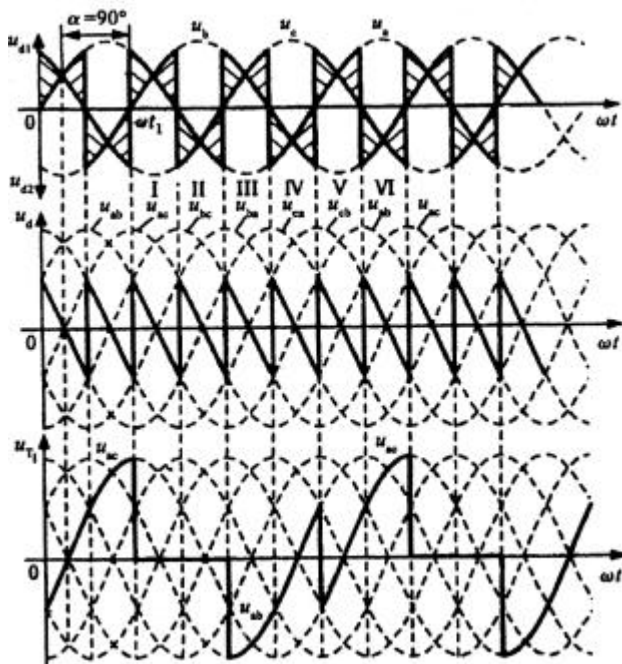


图 3-26 三相桥式全控整流阻感性负载 $\alpha = 90^\circ$ 时的输出波形

从图 3-26 所示，晶闸管所承受的最大正、反向电压均为 $\sqrt{6}U_2$ 。

(2) 主要参数关系

阻感负载时，负载电流总是连续的，因此每个晶闸管的导通角总是 120° ，整流输出电压的波形每隔 60° 重复一次，所以整流输出电压的平均值：

$$U_d = \frac{6}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} \sqrt{6}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 2.34 U_2 \cos \alpha \quad (3-52)$$

负载电流的平均值：

$$I_d = \frac{U_d}{R} = 2.34 \frac{U_2}{R} \cos \alpha \quad (3-53)$$

变压器二次侧绕组由于一个周期流过正、反两个方向的两次电流，每次时间为 120° ，所以变压器二次侧电流有效值：

$$I_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad (3-54)$$

流过晶闸管的电流平均值和有效值：

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{3}} I_d \quad (3-55)$$

$$I_{dT} = \frac{1}{3} I_d \quad (3-56)$$

和单相桥式整流电路一样，为了提高输出电压的平均值，可在负载端并联续流二极管，构成带续流二极管的三相桥式整流电路，工作过程自行分析。

三相桥式全控整流电路接反电势阻感负载时，只要电感足够大，可以使负载电流连续，则电路的工作情况与阻感负载时相似，电路输出电压、电流波形均相同，只是在计算整流输出电流的平均值时，求解公式不同。接反电势阻感负载时的电流平均值为

$$I_d = \frac{U_d - E}{R} \quad (3-57)$$

式中， E 为负载中的反电势值。

《电力电子技术 B》电子教案

第 7 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第三章 整流电路			
教学节次及名称	3.3 变压器漏感对整流电路的影响 3.4 电容滤波的不可控整流电路			
教学目的 与要求	熟悉变压器漏感对整流电路的影响。 了解电容滤波的不可控整流电路。			
教学重点	1. 掌握考虑变压器漏感的整流电路引起的换相压降，换相重叠角的计算。 2. 掌握三相电容滤波的不可控整流电路电路分析。			
教学难点	1. 换相过程分析。 2. 波形分析，参数计算。			
教学内容	<p>1. 分析考虑变压器漏感情况下三相半波可控整流电路工作原理及波形分析。 <15 分钟></p> <p>2. 分析换相压降产生原因，推导三相半波可控整流电路换相压降计算公式。 <10 分钟></p> <p>3. 分析换相重叠角与触发角之间关系，推导三相半波可控整流电路换相重叠角计算公式。<10 分钟></p> <p>4. 根据三相半波可控整流电路推导得到的换相重叠角和换相压降计算公式进一步讨论其它整流电路的换相重叠角和换相压降计算公式。<15 分钟></p> <p>5. 分析电容滤波单相不可控整流电路工作原理及参数计算。<25 分钟></p> <p>6. 分析电容滤波三相不可控整流电路工作原理及参数计算。<10 分钟></p> <p>7. 小结、答疑。<5 分钟></p>			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	掌握考虑变压器漏感整流电路电路分析，波形分析以及换相压降和换相重叠角的参数计算。掌握电容滤波的不可控整流电路分析方法。			
作业和思 考题	<p>1. 考虑变压器漏感时，换相重叠角变化规律？</p> <p>2. 单相桥式全控整流电路考虑变压器漏感时，输出电压的平均值和换相重叠角如何计算？</p> <p>3. 电容滤波的不可控整流电路分析？</p>			

教 案

电力电子技术 课 8 讲

主讲人薛荣辉

课 题：3.3 变压器漏感对整流电路的影响 3.4 3.5 3.6

目的任务：了解变压器漏感对电路的影响，了解谐波的基本概念，了解大功率整流电路的分析方法。

重点难点：电路分析

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

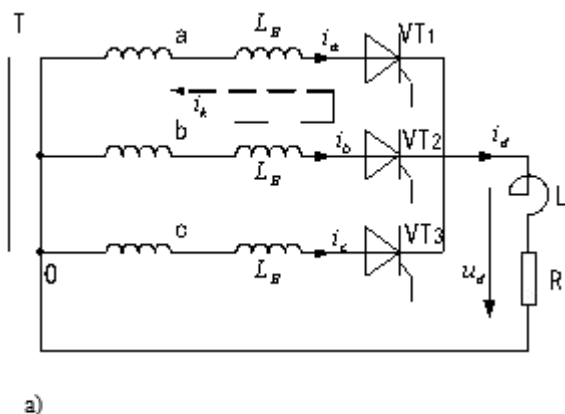
年 月 日

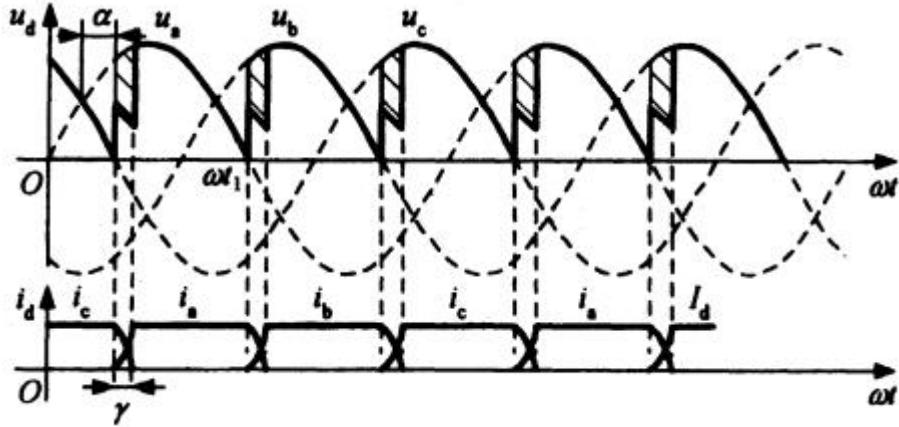
3.3 变压器漏感对整流电路的影响

前面讨论整流电路的电压计算时，都忽略了变压器漏抗，因此晶闸管的动态特性，认为换流时要关断的管子电流从 I_d 突然降到零，而刚开通的管子电流从零瞬间上升到 I_d ，输出负载电流的波形为一条水平线。但是实际上变压器存在漏电抗，必然影响晶闸管的换流过程。如将每相电感折算到变压器的二次侧，用一个电感 L_B 表示，则由于此电感的影响，电流变化不再突变，换流不能瞬间完成。以三相半波整流电路带大电感负载的换流过程说明变压器漏电抗对整流电路的影响。

3.3.1 换相期间的输出电压

在换相时，由于漏抗的存在，阻碍电流变化，因此电流不能突变，而要有一个变化的过程。如图 2-34 所示。 ωt_1 时刻触发 VT_2 导通，电流从 a 相换流到 b 相，由于 a 相电流从 I_d 不能瞬时下降为零，b 相电流也不能瞬时上升到 I_d 值，使电流换相需要一段时间，直到 ωt_2 时刻完成换相，这个过程称为换相过程。换相过程对应的时间以电角度计算，称为换相重叠角(换相角、换流角)，用 γ 表示，即 $\omega t_1 \sim \omega t_2$ 期间对应的电角度。在此过程中两个相邻相的晶闸管同时导通，相当于 a、b 两相同时导通，两相线间短路。 $U_b - U_a$ 为短路电压，在两相回路中产生一假想的短路电流 i_k ，如图 2-34 中虚线所示(实际上晶闸管都是单向导电的，相当于在原有电流上叠加一个 i_k)。a 相电流 $i_a = I_d - i_k$ 随着 i_k 的增大而逐渐减小；而 $i_b = i_k$ 将逐渐增大。当 i_b 增大到 I_d 也就是 i_a 下降为零时， VT_1 关断， VT_2 管电流达到稳定值，完成了 a 到 b 相之间的换流。





b)

考虑变压器漏抗的可控整流电路及其电压电流波形

a) 电路原理图

b) 输出波形图

换流期间，短路电压由两个漏抗电动势所平衡即

$$U_b - U_a = 2L_B \frac{di_k}{dt} \quad (3-68)$$

负载上整流输出电压为

$$U_d = U_b - L_B \frac{di_k}{dt} = U_b - \frac{1}{2}(U_b - U_a) = \frac{1}{2}(U_a + U_b) \quad (3-69)$$

上式说明，在换流期间，直流输出电压的波形既不是 U_a 也不是 U_b ，而是换流的两相电压的平均值，如图 2-34 所示。与不考虑漏抗即 $\gamma = 0$ 相比，输出电压波形减少了一块阴影面积，使输出平均电压 U_d 值减小。这块减少的面积是由负载电流 I_d 换相引起的，因此这块面积的平均值也就是 I_d 引起的压降，相当于 L 在某电阻上产生一个压降，称换相压降，其大小为图中三块阴影面积在一周期内的平均值。由式 (2-69) 可见，换相期间降低的电压值为 $U_b - U_d = L_B (di_b/dt)$ ，所以一块阴影面积为

$$\begin{aligned} \Delta U_\gamma &= \int_0^\gamma (U_b - U_d) d\omega t = \int_0^\gamma L_B \frac{di_b}{dt} d\omega t = \omega L_B \int_0^{I_d} di_b \\ &= X_B I_d \end{aligned}$$

如图一个周期换相 m 次，则换相压降为

$$U_\gamma = \frac{m}{2\pi} X_B I_d \quad (3-70)$$

上式中， m 根据换相次数不同而不同。三相半波整流时为 $m=3$ ，三相桥式整流时 $m=6$ 。换相压降可看成在整流电路直流侧增加一只等效内电阻，其阻值为 $mX_B/2\pi$ ，负载电流 I_d 在它上面产生的压降，区别仅在于这项内阻并不消耗有功功率。

3.3.2 换相重叠角 γ

重叠角 γ 的大小可通过对式 (2-68) 进行数学运算求得

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{X_B I_d}{\sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{m}} \quad (3-71)$$

上式是一个普通公式，对于不同的整流电路只需改变 m 值。对于三相半波电路代入 $m=3$ 可得

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{X_B I_d}{\sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{3}} = \frac{2 X_B I_d}{\sqrt{6} U_2} \quad (3-72)$$

对于三相桥式整流电路，因它等效于相电压为 $\sqrt{3}U_2$ 时的六相半波整流电路，电压以 $\sqrt{3}U_2$ ， $m=6$ 代入，其结果与三相半波整流电路相同。其他不同形式的整流电路分别代入不同的 m 值即可得出。

由式 (2-72) 可知，已知 I_d 、 X_B 、 U_2 与控制角 α ，即可计算重叠角 γ 。当 α 一定时， I_d 、 X_B 增大，则换流时间增大即 γ 增大，这是因为重叠角的产生是由于换相期间变压器漏抗储存的电磁能量引起的， I_d 、 X_B 越大，变压器储存的能量越多，因此大电流时更要考虑换相重叠角的影响。当 I_d 、 X_B 一定时， α 愈大 γ 愈小，这是因为 α 愈大，换相时的电压差愈大，为使两相重叠导电， di_k/dt 势必增大，以迅速释放磁能， $\alpha=0^\circ$ 时 γ 最大。

由以上分析可知，由于存在换相电抗，相当于增加电源内阻抗，所以使换流期间的整流输出电压降低，使交流电源的电压相间短路，波形出现缺口，造成波形畸变，形成干扰源。用示波器观察电压波形时，在换流点上出现“毛刺”，严重时将造成电网电压波形畸变，影响本身与其他用电设备的正常运行。为了限制短路电流，和换流过程中晶闸管上的 di/dt 与 du/dt ，有时单靠变压器的漏抗电感还不够大，因此可在交流侧串入进线电抗。因此在工程实践中要全面权衡利弊来考虑。

3.3.3 可控整流电路的外特性

可控整流电路对直流负载来说，是一个带内阻的可变直流电源，考虑到换相压降 U_r 、整流变压器电阻 R_T （为变压器二次绕组每相电阻与一次绕组折算到二次侧的每相电阻之和）以及晶闸管导通压降 ΔU 后，直流输出电压为

$$\begin{aligned} U_d &= U_{d0} \cos \alpha - n \Delta U - I_d \left(R_T + \frac{m X_B}{2\pi} \right) \\ &= U_{d0} \cos \alpha - n \Delta U - I_d R_i \end{aligned} \quad (2-73)$$

3.3.4 变压器漏抗对整流电路的其他影响

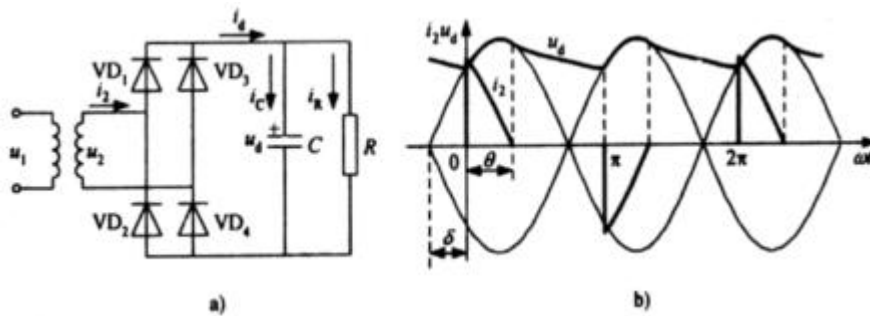
1. 限制短路电流：与交流进线电抗器作用相同。
2. 造成电网电压波形畸变：换相期间使相间短路，致使相电压出现一很深的缺口。
3. 功率因数恶化。
4. 电压脉动系数增加，输出电压调整率降低。

3.4 电容滤波的整流电路

本章的前两节介绍的都是可控整流电路，且负载性质重点介绍的是电阻性和阻感性负载。近年来，在交一直一交变频器、不间断电源、开关电源等应用场合中，大都采用不可控整流电路经电容滤波后提供直流电源，供后级的逆变器、斩波器等使用。在前面第一节和第二节中介绍的各种全控整流电路形式，只要将其中的晶闸管换为整流二极管，就是不可控整流电路。其中，目前最常用的是单相桥式和三相桥式两种接法的不可控整流电路。由于电路中的整流器件采用的是整流二极管，故也称这类电路为二极管整流电路。

3.4.1 电容滤波的单相不可控整流电路

本电路常用于小功率单相交流输入的场所。目前大量普及的微机、电视机等家电产品中所采用的开关电源中，其整流部分多是单相桥式不可控整流电路。如图 2-36 所示。本节将对该电路的工作原理进行分析，并总结其特点。



电容滤波的单相桥式不可控整流电路及其工作波形
a) 电路 b) 波形

1. 工作原理及波形分析

假设该电路已工作于稳态，同时由于实际中作为负载的后级电路稳态时消耗的直流平均电流是一定的，所以电路分析过程中以电阻 R 作为负载。

此电路的基本工作过程是，在电源电压正半周过零点至 $\omega t = 0$ 期间，因 $u_2 < u_c$ ，故二极管均不导通，此阶段电容 C 向 R 放电，提供负载所需电流，同时 u_c 下降。至 $\omega t = 0$ 之后， u_2 将超过 u_c ，使得 VD_1 和 VD_4 开通， $u_c = u_2$ ，交流电源向电容充电，同时向负载 R 供电。

设 VD_1 和 VD_4 导通的时刻与 u_2 过零点相距 δ 角，则 u_2 可用下式表示

$$u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t + \delta) \quad (3-74)$$

在 VD_1 和 VD_4 导通时间内，下式成立

$$\begin{cases} u_c(0) = \sqrt{2}U_2 \sin \delta \\ u_c(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_C dt = u_2 \end{cases} \quad (3-75)$$

式中， $u_c(0)$ 为 VD_1 和 VD_4 开始导通时刻直流侧电压值。

将 u_2 代入并求解得出

$$i_C = \sqrt{2}\omega C U_2 \cos(\omega t + \delta) \quad (3-76)$$

负载电流为

$$i_R = \frac{u_2}{R} = \frac{\sqrt{2}U_2}{R} \sin(\omega t + \delta) \quad (3-77)$$

于是

$$i_d = i_C + i_R = \sqrt{2}\omega C U_2 \cos(\omega t + \delta) + \frac{\sqrt{2}U_2}{R} \sin(\omega t + \delta) \quad (3-78)$$

设 VD_1 和 VD_4 的导通角为 θ ，则当 $\omega t = \theta$ 时， VD_1 和 VD_4 关断。将 $i_d(\theta) = 0$ 代入式(3-78)，得

$$\tan(\theta + \delta) = -\omega RC \quad (3-79)$$

电容被充电到 $\omega t = \theta$ 时， $u_d = u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin(\theta + \delta)$ ， VD_1 和 VD_4 关断。电容开始以时间常数为 RC ，按指数函数放电，当 $\omega t = \pi$ ，即放电经过 $\pi - \theta$ 角时， u_d 降至开始充电时的初值 $\sqrt{2}U_2 \sin \delta$ ，另一对二极管 VD_2 和 VD_3 导通，此后 u_2 又向 C 充电，与 u_2 正半周的情况一样。由于二极管导通后 u_2 开始向 C 充电时的 u_d 与二极管关断后 C 放电结束时的 u_d 相等，故有下式成立

$$\sqrt{2}U_2 \sin(\theta + \delta) \cdot e^{-\frac{\pi - \theta}{\omega RC}} = \sqrt{2}U_2 \sin \delta \quad (3-80)$$

由于 $\delta + \theta$ 在第二象限，由式(2-79)和式(2-80)求出

$$\pi - \theta = \delta + \arctan(\omega RC) \quad (3-81)$$

$$\frac{\omega RC}{\sqrt{(\omega RC)^2 + 1}} e^{-\frac{\arctan(\omega RC)}{\omega RC}} e^{-\frac{\delta}{\omega RC}} = \sin \delta \quad (3-82)$$

在 ωRC 已知时，即可由式(3-82)求出 δ ，进而由式(3-81)求出 θ 。显然 θ 和 δ 仅由乘积 ωRC 决定。

二极管 VD_1 和 VD_4 关断期间，即 ωt 达到 θ 的时刻，还可用另一种方法确定。显然，在 u_2 达到峰值之前， VD_1 和 VD_4 是不会关断的。 u_2 过了峰值之后， u_2 和电容电压 u_d 都开始下降。 VD_1 和 VD_4 的关断时刻，从物理意义上讲，就是两个电压下降速度相等的时刻，一个是电源电压的下降速度 $\left| \frac{du_2}{d(\omega t)} \right|$ ，另一个是假设二极管 VD_1 和 VD_4 关断而电容开始单独向电阻放电时电压的下降速度 $\left| \frac{du_d}{d(\omega t)} \right|_p$ （下标表示假设）。前者等于该时刻 u_2 导数的绝对值，而后者等于该时刻 u_d 与 ωRC 的比值。据此即可确定 θ 。

2. 主要的参数关系

(1) 输出电压平均值:

整流电压平均值可根据前述波形及有关计算公式推导得出, 但推导繁琐, 故此处不在详述。空载时, $R = \infty$, 放电时间常数为无穷大, 输出电压最大, 即为相电压的峰值; 重载时, R 很小, 电容放电很快, 随着负载加重 U_d 逐渐接近电阻负载时的特性, 即 $U_d \approx 0.9U_2$ 。

通常在设计时根据负载的情况选择电容 C 值, 使 $RC \geq \frac{3 \sim 5}{2} T$, T 为交流电源的周期, 此时输出电压为

$$U_d \approx 1.2U_2 \quad (3-83)$$

(2) 输出电流平均值

$$I_R = \frac{U_d}{R} \quad (3-84)$$

在稳态时, 电容 C 在一个电源周期内吸收的能量和释放的能量相等, 其电压平均值保持不变, 相应地, 流经电容的电流在一周期内的平均值为零, 又因为 $i_d = i_c + i_R$ 得出:

$$I_d = I_R \quad (3-85)$$

在一个电源周期中, i_d 有两个波头, 分别轮流流过 VD_1 、 VD_4 和 VD_2 、 VD_3 。反过来说, 流过某个二极管的电流 i_{VD} 只是两个波头中的一个, 故其平均值为

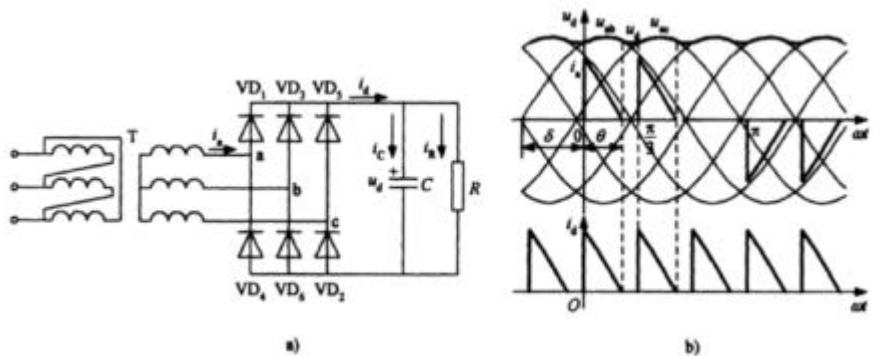
$$I_{VD} = \frac{I_d}{2} = \frac{I_R}{2} \quad (3-86)$$

(3) 二极管承受的电压

二极管承受反向电压最大值为变压器二次侧电压的峰值。

3.4.2 电容滤波的三相不可控整流电路

在电容滤波的三相不可控整流电路中, 最常用的是三相桥式结构, 其电路及理想的工作波形如图 3-37 所示。



电容滤波的三相桥式不可控整流电路及其波形

a) 电路 b) 波形

1. 工作原理

该电路中，当某一对二极管导通时，输出直流电压等于交流侧线电压中最大的一个，该线电压既向电容供电，也向负载供电。当没有二极管导通时，由电容向负载放电， u_d 按指数规律下降。

设二极管在距线电压过零点 δ 角处开始导通，并以二极管 VD_6 和 VD_1 开始同时导通的时刻为时间零点，则线电压为

$$u_{ab} = \sqrt{6}U_2 \sin(\omega t + \delta)$$

而相电压为

$$u_a = \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t + \delta - \frac{\pi}{6})$$

在 $\omega t=0$ 时，二极管 VD_6 和 VD_1 开始同时导通，直流侧电压等于 u_{ab} ；下一次同时导通的一对管子是 VD_2 和 VD_1 ，直流侧电压等于 u_{ac} 。这两段导通过程之间的交替有两种情况，一种是在 VD_2 和 VD_1 同时导通之前 VD_6 和 VD_1 是关断的，交流侧向直流侧的充电电流 i_d 是断续的，如图3-37所示；另一种是 VD_1 一直导通，交替时由 VD_6 导通换相至 VD_2 导通， i_d 是连续的。介于二者之间的临界情况是， VD_6 和 VD_1 同时导通的阶段与 VD_1 和 VD_2 同时导通的阶段在 $\omega t + \delta = 2\pi/3$ 处恰好衔接了起来， i_d 恰好连续。由前面所述“电压下降速度相等”的原则，可

以确定临界条件。假设在 $\omega t + \delta = 2\pi/3$ 的时刻“速度相等”恰好发生，则有

$$\left| \frac{d[\sqrt{6}U_2 \sin(\omega t + \delta)]}{d(\omega t)} \right|_{\omega t + \delta = \frac{2\pi}{3}} = \left| \frac{d\left\{ \sqrt{6}U_2 \sin \frac{2\pi}{3} e^{-\frac{1}{\omega RC}[\omega t - (\frac{2\pi}{3} - \delta)]} \right\}}{d(\omega t)} \right|_{\omega t + \delta = \frac{2\pi}{3}} \quad (3-87)$$

可得

$$\omega RC = \sqrt{3}$$

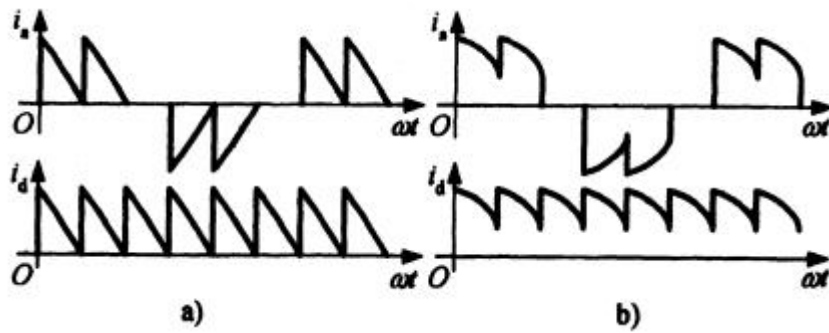
此即临界条件。 $\omega RC > \sqrt{3}$ 和 $\omega RC \leq \sqrt{3}$ 分别是电流 i_d 断续和连续的条件。图3-38给出了

ωRC 等于和小于 $\sqrt{3}$ 时的电流波形。对一个确定的装置来讲，通常只有 R 是可变的，它的大小反映了负载的大小。因此可以说，在轻载时直流侧获得的充电电流是断续的，重载时是连续的，分界点就是 $R = \sqrt{3}/(\omega C)$ 。

$\omega RC > \sqrt{3}$ 时，交流侧电流和电压波形如图2-37所示，其中 δ 和 θ 的求取和单相电路的方法相同。 δ 和 θ 确定之后，即可推导出交流侧线电流 i_d 的表达式，在此基础上可对交流侧电流进行谐波分析。由于推导过程十分繁琐，这里不再详述。

以上分析的是理想的情况，未考虑实际电路中存在的交流侧电感以及为抑制冲击电流而

串连的电感



2. 主要参数关系

(1) 输出电压平均值

空载时, 输出电压平均值最大, 为 $U_d = \sqrt{6}U_2 = 2.45U_2$ 。随着负载加重, 输出电压平均值减小, 至 $\omega RC = \sqrt{3}$ 进入 i_d 连续情况后, 输出电压波形成为线电压的整个波头, 其平均值为 $U_d = 2.34U_2$ 。可见, U_d 在 $2.34U_2 \sim 2.45U_2$ 之间变化。

与电容滤波的单相桥式不可控整流电路相比, U_d 的变化范围小得多, 当负载加重到一定程度后, U_d 就稳定在 $2.34U_2$ 不变了。

(2) 电流平均值

输出电流平均值为

$$I_R = \frac{U_d}{R}$$

与单相电路情况一样, 电容电流 i_c 平均值为零。因此

$$I_d = I_R$$

在一个电源周期中, i_d 有 6 个波头, 流过每一个二极管的是其中的两个波头, 因此二极管电流平均值为

$$I_{VD} = \frac{I_d}{3} = \frac{I_R}{3}$$

(3) 二极管承受的电压

二极管承受的最大反向电压为线电压的峰值, 即为 $\sqrt{6}U_2$ 。

3.5 大功率可控整流电路

在电解电镀工业应用中经常需要低电压、大电流的可调直流电源, 或是在拖动轧机的晶闸管电动机系统中, 需要功率达数千千瓦, 工业生产中都需要大容量可控整流装置。在大容量可控整流装置中, 如果要求高电压小电流则会遇到晶闸管串连的均压问题; 如果要求低电压大电流则会遇到晶闸管并联的均流问题。并且大容量可控整流电路必须考虑如何减少直流电压脉动和高次谐波, 从而提高电压质量, 减少对电网的危害问题。带平衡电抗器的双反星形可控整流路的特点就是适用于要求低电压、大电流的场合。本节就介绍此中电路。

图 3-30 所示为带平衡电抗器的双反星形可控整流电路, 由双反星形变压器供电。电路

特点：一是整流变压器具有两组二次绕组，且都接成星形，但两绕组接到晶闸管的同名端相反，其电压矢量图是两个相反的星形，所以称为双反星形。二是两组二次绕组的中型点是通过平衡电抗器连接在一起。其中平衡电抗器是一个带有中心抽头的铁心线圈，抽头两侧的匝数相等，两边电感量相等，在任一边线圈中有交变电流流过时，在两边的电感中都会形成大小相同，方向一致的感应电动势。

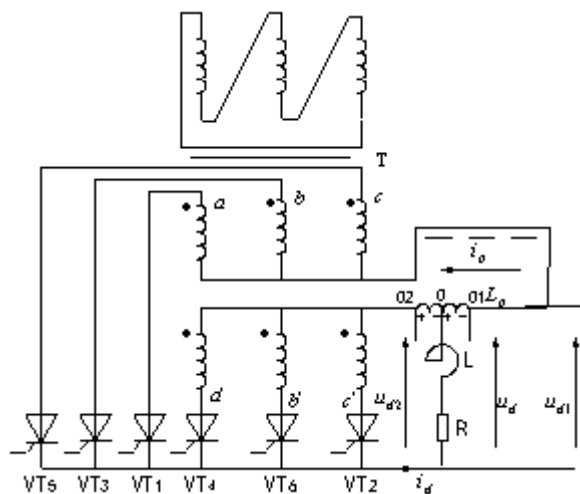


图 3-30 带平衡电抗器的双反星形可控整流电路原理图

整流变压器二次侧每相两个匝数相同极性相反的绕组，分别接成两组三相半波电路，即 a、b、c 一组，a'、b'、c' 一组。a 与 a' 绕组接在同一相铁心上，如图中所示，“·”表示同名端。两绕组的极性相反可消除铁心的直流磁化，设置电感量为 L_p 的平衡电抗器是为了保证两组三相半波整流电路同时导电，每组承担一半负载。因此与三相桥式电路相比，在采用相同晶闸管的条件下，双反星形电路的输出电流可大一倍。

当两组三相半波电路的控制角 $\alpha = 0^\circ$ 时，两组整流电压电流的波形如图 3-31 所示。

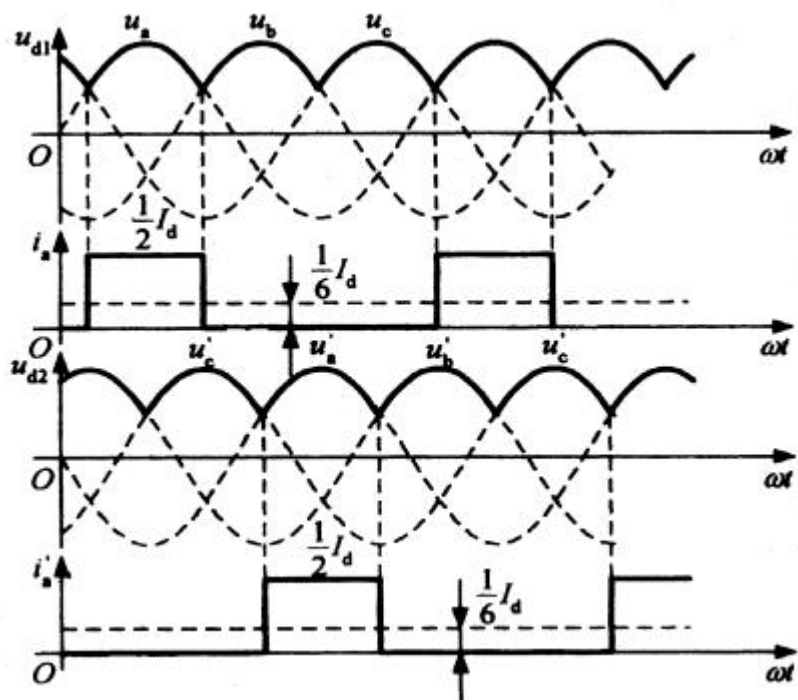


图 3-31 双反星形可控整流电路 $\alpha = 0^\circ$ 时两组整流电压、电流波形

图中，两组的相电压相差 180° ，因此相电流也相差 180° 。它们幅值相等，都是 $I_d/2$ 。

以 a 相而言，相电流 i_a 和 i'_a 出现的时刻虽不同，但它们的平均值都是 $I_d/6$ ，因为平均电流相等而绕组的极性相反，所以直流磁势相互抵消。

在这种并联电路中，在两个星形的中点间接有带中间抽头的平衡电抗器，因为直流电源并联运行时，只有当电源的电压平均值和瞬时值均相等时，才能使负载电流平均分配。假设两组同时导电，则虽然输出电压平均值 U_{d1} 和 U_{d2} 相等，但其瞬时值不同，它们的脉动波相差

60° 。如图 3-32 所示。 u_{d1} 由电压 u_a 、 u_b 、 u_c 的正包络线组成的波形； u_{d2} 由电压 u'_a 、 u'_b 、 u'_c 的正包络线组成的波形。因为 6 个元件为共阴极连接，所以两个星形的中点 o_1 和 o_2 间的电压等于 u_{d1} 和 u_{d2} 瞬时值之差。它的波形是 3 倍基频的近似三角波形。如图 3-32 所示。这个电压加在平衡电抗器 L_p 上，产生电流 i_p ，通过两组星形组成回路，不流过负载，所以称为环流或平衡电流。考虑 i_p 后，每组三相半波承担 $I_d/2 + i_p$ 的电流。另该电压全部降落在电抗器上，与 i_p 通过 L_p 时产生的感生电势相平衡。同时为了使两组电流尽可能平均分配，一般使 L_p 值足够大，限制环流在负载额定电流的 $1\sim 2\%$ 以内。

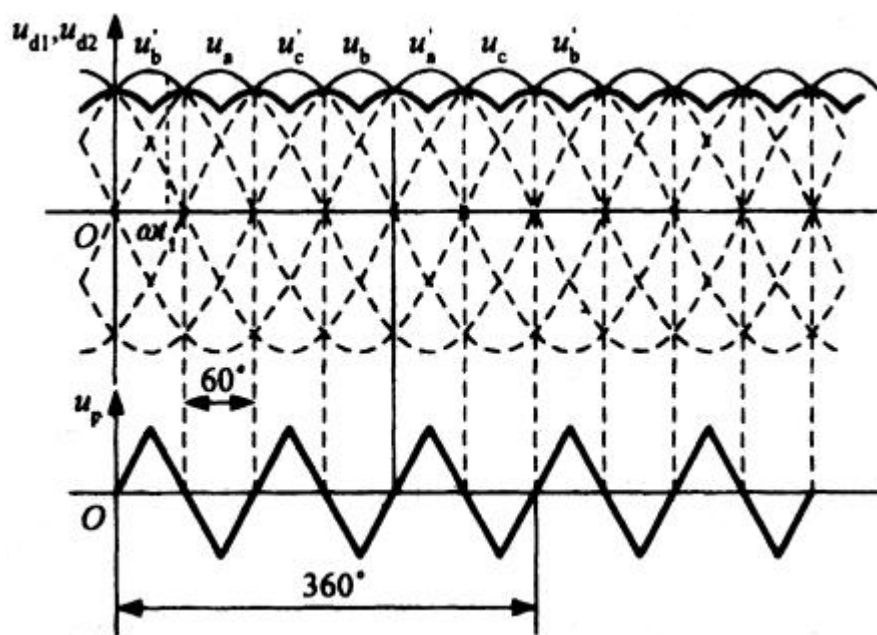


图 3-32 平衡电抗器作用下输出电压的波形和平衡电抗器上电压的波形

在 3-30 图中，没有平衡电抗器时，相当于六相半波整流电路。任一瞬间只有 1 个晶闸管导通，其他 5 个晶闸管均承受反压而阻断。每管最大导通角为 60° ，每管的平均电流 $I_d/6$ 。

当控制角 $\alpha = 0^\circ$ 时，输出电压 6 个波头组成的包络线，可求出输出平均直流电压 $U_d = 1.35 U_{2\phi}$

(式中 $U_{2\phi}$ 为相电压有效值)，比三相半波略大。六相半波整流电路因元件导电时间短，变压器利用率低，体现不出供应大电流的优点，故极少采用。所以有无平衡电抗器是区分双反星形和六相半波电路的关键，同时掌握平衡电抗器的作用也是理解双反星形电路原理的关键。

下面分析两组晶闸管同时导电的原理。

在图 3-32 中取任一瞬时 ωt_1 , 这时 u'_b 、 u_a 均为正, 但 u'_b 大于 u_a , 如果两组三相半波整流电路中点 o_1 和 o_2 直接相连, 则必然只有 b' 相的晶闸管 VT₆ 能导通。但接平衡电抗器 L_p 后, 在 ωt_1 时刻, b' 相电压最高, 由于 VT₆ 导通, 电流流过 L_p , 在 o 和 o_2 端感应电势为 $u_p/2$, 方向是阻止电流增大, 即 o 端为正, o_2 端为负。在 o 和 o_1 端感应电势为 $u_p/2$, 它的方向 o 端为负, o_1 端为正。由此可看出 o 和 o_2 间的电势与 u'_b 方向相反, 而 o 和 o_1 间电势与 u_a 方向相同, 因此只要平衡电抗器感应的电势 u_p 等于 u'_b 与 u_a 的差值, 则 $u'_b - \frac{u_p}{2} = u_a + \frac{u_p}{2}$, 因此晶闸管 VT₁ 和 VT₆ 同时导通。

在 u'_b 与 u_a 的交点 $u'_b = u_a$, VT₁ 和 VT₆ 继续导通, 此时 $u_p = 0$ 。此后 $u'_b > u_a$, 流过 b' 相的电流要减少, 同理由平衡电抗器具有阻止电流减小的作用, 使 VT₆ 继续导通, 直到 c' 相电压大于 b' 相, 电流才从 VT₆ 管换到 VT₂ 管, 此时改为 VT₁ 和 VT₂ 同时导电。如此类推, 可得出其它时间内元件的换流和导通情况。显然, 接入平衡电抗器后, 两组三相半波可以同时工作, 即在任一瞬间, 每组都有一个管子导通, 共同负担负载电流。且每隔 60° 换相一次, 而同组间每隔 120° 换流一次, 这样不仅提高了变压器的利用率, 而且不存在直流磁化问题。此种带平衡电抗器的整流电路输出整流电压瞬时值为两组三相半波整流电压瞬时值的平均。关系如下:

$$u_d = u_{d1} + \frac{1}{2}u_p = u_{d2} - \frac{1}{2}u_p$$

所以得

$$u_d = \frac{1}{2}(u_{d1} + u_{d2}) \quad (3-64)$$

$$u_p = u_{d2} - u_{d1} \quad (3-65)$$

波形如图 3-32 粗黑线所示。 u_d 为周期性函数, 可按付氏级数展开为直流分量与各次正弦波的叠加。其中控制角 $\alpha = 0^\circ$ 时, 直流电压平均值为

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_d \alpha \omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{1}{2}(u_{d1} + u_{d2}) \alpha \omega t \\ &= \frac{1}{2}(U_{d1} + U_{d2}) \\ &= 1.17U_{2\phi} \end{aligned} \quad (3-66)$$

当分析其他控制角时的输出波形时, 可先作出两组三相半波电路的 u_{d1} 和 u_{d2} 的波形, 然后作出叠加出波形 $(u_{d1} + u_{d2}) / 2$ 即可。

图 3-33 给出了控制角 $\alpha = 30^\circ$ 、 60° 、 90° 时的输出电压波形。由图可以看出, 双反星形整流电路与三相半波整流电路相比, 输出脉动减小了, 脉动频率加大 1 倍, 为 300Hz。但阻

性负载时为了保证电流断续后，两组三相半波电路还能同时工作，要求采用双脉冲或宽脉冲触发，移相范围为 120° （单组工作为 150° ）。晶闸管承受的最大正反向电压同三相半波为 $\sqrt{6}U_2$ 。

在双反星形整流电路中，由于每组三相半波整流是负载电流的 50%，所以选择元件和变压器次级绕组容量时，按 $I_d/2$ 计算。流过晶闸管的和变压器次级的电流相同，在感性负载时都是矩形波，有效值为

$$I_T = I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{2} I_d\right)^2 - \frac{2\pi}{3}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} I_d = 0.289 I_d \quad (3-67)$$

由以上分析可知带平衡电抗器的双反星形整流电路具有如下特点：

1. 双反星形为两组三相半波整流电路的并联，且需要平衡电抗器。整流输出电压的波动比半波电路小得多，波形与六相半波一样。
2. 解决了半波电路中的直流磁化问题，即此种整流电路不存在直流磁化问题，因为同时有两组工作，同三相桥式整流电路相同（三相桥式整流电路为两组半波的串联）。
3. 与三相半波整流电路相比，变压器利用率提高了一倍。整流输出平均值同半波电路。
4. 每组整流器承受负载电流的一半，流过元件的电流有效值为 $0.289 I_d$ ，导电时间比六相半波增加了一倍。整流电流的平均值是单相桥式电路的 2 倍。
5. 晶闸管的脉冲分配关系和三相桥式整流电路一样，整流电压和电流的输出波形形状也相同。

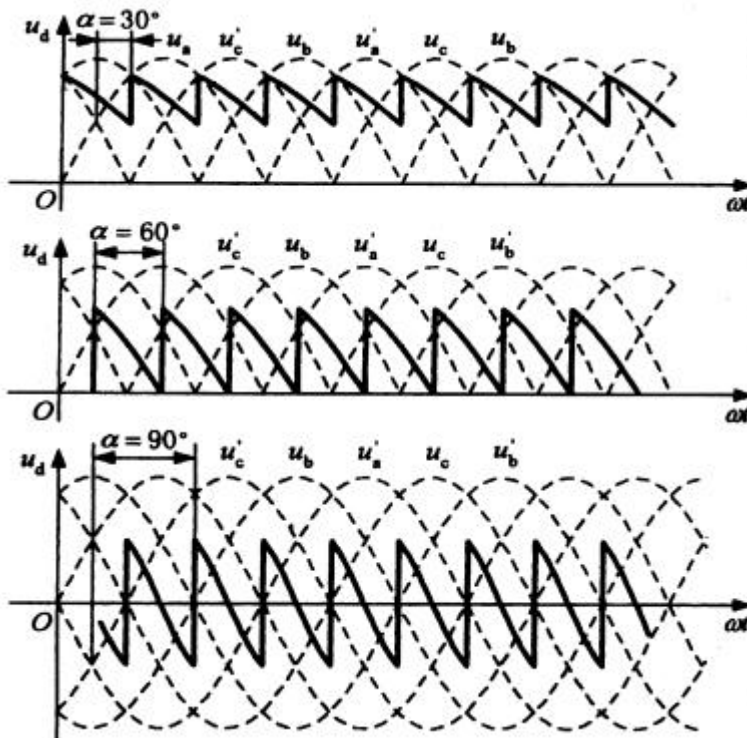


图 3-33 带平衡电抗器双反星形整流电路输出电压的波形

a) $\alpha = 30^\circ$ b) $\alpha = 60^\circ$ c) $\alpha = 90^\circ$

《电力电子技术 B》电子教案

第 9 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第三章 整流电路			
教学节次及名称	3.7 整流电路的有源逆变工作状态			
教学目的 与要求	掌握逆变的基本概念，逆变的分类。 掌握有源逆变的条件，有源逆变状态的分析。			
教学重点	1. 掌握有源逆变的条件。 2. 掌握三相桥式全控整流电路工作于有源逆变工作状态电路分析，参数计算，波形分析。			
教学难点	1. 有源逆变条件。 2. 三相桥式全控整流电路工作于有源逆变时逆变角的确定，波形分析，参数计算。			
教学内容	1. 介绍逆变基本概念和分类。〈10 分钟〉 2. 推导有源逆变的条件。〈20 分钟〉 3. 分析三相桥整流电路的有源逆变工作状态。〈10 分钟〉 4. 根据三相半波可控整流电路推导得到的换相重叠角和换相压降计算公式进一步讨论其它整流电路的换相重叠角和换相压降计算公式。〈15 分钟〉 5. 分析电容滤波单相不可控整流电路工作原理及参数计算。〈25 分钟〉 6. 分析电容滤波三相不可控整流电路工作原理及参数计算。〈10 分钟〉 7. 小结、答疑。〈5 分钟〉			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	掌握有源逆变的条件和工作于有源逆变状态时参数计算。熟悉逆变失败的概念，了解解决措施。			
作业和思 考题	1. 有源逆变条件。 2. 哪些整流电路可以工作于有源逆变工作状态？ 3. 三相桥式全控桥工作于有源逆变时，逆变角为 60 度时，输出电压波形，参数计算。			

教 案

电力电子技术 课 9 讲

主讲人薛荣辉

课 题：3.7 整流电路的有源逆变工作状态

目的任务：掌握整流电路工作在有源逆变状态的条件和电路参数计算

重点难点：电路分析

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

第 3 章 整流电路

3.9 有源逆变

一、直流发电机 - 电动机系统电能的转换

直流发电机 - 电动机系统如图 3-1 所示。其中 G 为直流他励发电机，M 为直流他励电动机， R 为回路的总电阻，图中省略了电机的励磁回路。在此，我们通过控制发电机、电动机电势的大小和方向来判断能量之间的转换。

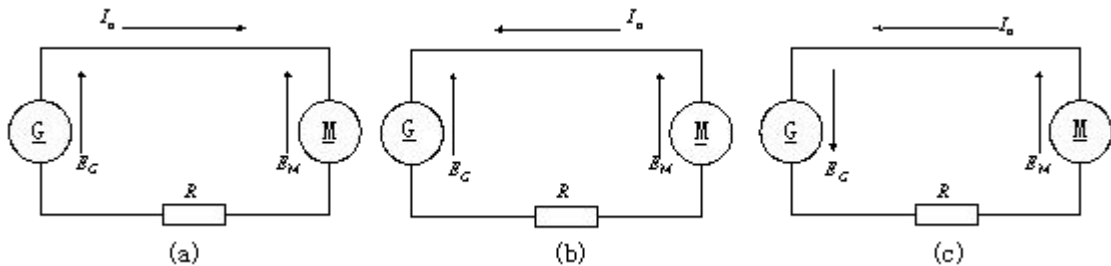


图 3-1 直流发电机-电动机功率传递图

(a)两个电势同极性相联；(b)两个电势同极性相联 $E_G < E_M$ ；(c)两个电势反极性相联

(1) 如图 3-1(a)，设 $E_G > E_M$ ，即发电机电势大于电动机电势，则回路电流 I_a 的大小为

$$I_a = \frac{E_G - E_M}{R}$$

回路电流 I_a 的方向与发电机电势 E_G 的方向相同，即电流从发电机电势 E_G 的正端流出，从电动机电势 E_M 的正端流入，因此，电机输出功率，电动机吸收功率，电动机运行于电动状态。从能量的角度来讲，发电机输出的电能转换为电动机轴上的机械能。

(2) 如图 3-1(b)。设 $E_M > E_G$ ，即电动机电势大于发电机电势，则回路电流 I_a 的大小为

$$I_a = \frac{E_M - E_G}{R}$$

回路电流 I_a 的方向与电动机电势 E_M 的方向相同，即电流从电动机电势 E_M 流出，从发电机电势 E_G 流入，因此，电动机输出功率，发电机吸收功率，电动机运行于回馈制动状态。从能量的角度来讲，电动机轴上输入的机械能转换为电能反送给发电机。

(3) 如图 3-1(c)所示。设 E_M 与 E_G 顺向串联（反极性相接），回路电压为两个电势之和，电动机和发电机都输出功率，电阻消耗功率。由于回路电阻阻值很小，因此可形成很大的回路电流，相当于两个电源短路。这种情况在实际使用过程中是绝对不允许的。

从以上分析我们可以得出以下几个结论：

① 两个电势同极性相接时，电流总是从电势高的流向电势低的，电流的大小取决于两个电势之差和回路总电阻。当回路总电阻很小时，即使很小的电势差也能产生很大的电流，使两个电势源之间交换很大的功率。

② 电流从电势正极端流出的为输出功率，从电势正极端流入的为输入功率。

③ 两个电势反极性相接时，由于回路电阻很小，使得回路电流很大，相当于短路，这是不允许的。

二、逆变实现的条件

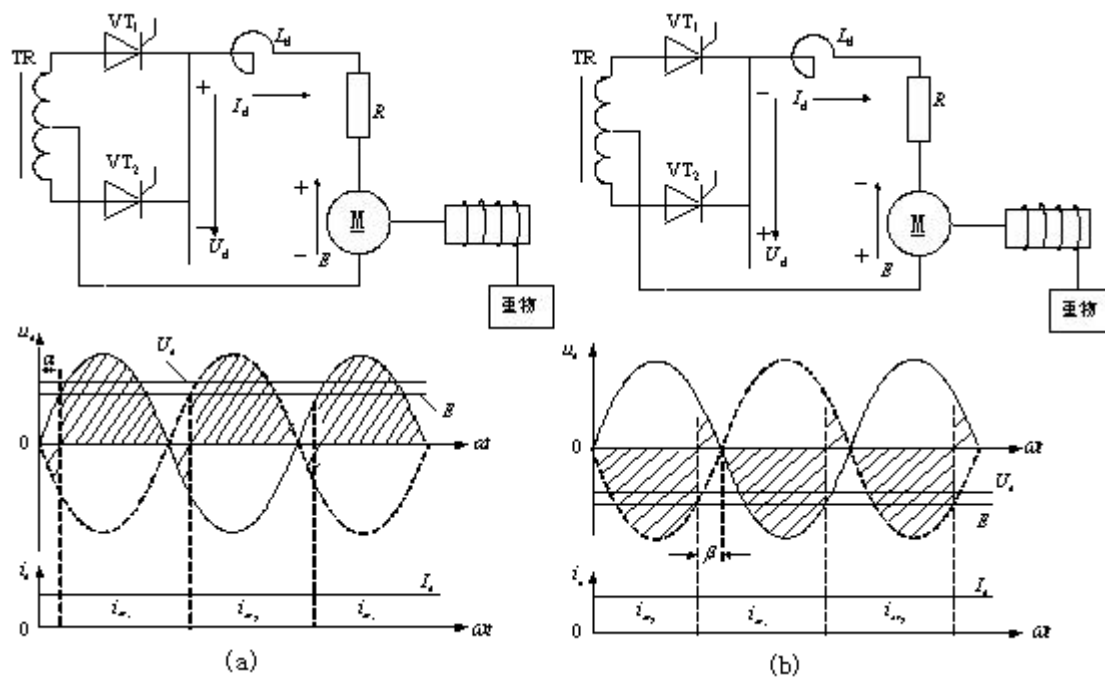


图 3-2 单相全波变流装置

(a) 单相全波整流电路 ; (b) 单相全波逆变电路

(1) 单相全波工作在整流状态

从图 3-2(a)可知,要使得重物上升,电动机必须工作在电动状态,即电机消耗能量,因此单相全波晶闸管电路需工作在整流状态。根据单相全波可控整流电路的工作原理,控制角 α 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 时,直流侧的输出电压 U_d 上正下负。在输出电压 U_d 的作用下,电动机产生反电势 E , E 的方向为上正下负。此时 U_d 与 E 为同极性相连,且 $U_d > E$,波形如图所示,则回路电流 I_d 的大小为

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

式中: $U_d = 0.9U_2 \cos \alpha$, (α 的范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$)。

回路的电流方向从 U_d 的正端流出,从 E 的正端流入。从能量的角度来讲,交流电网输出功率,电动机吸收功率,即变流器将电能转换为电动机轴上的机械能带动重物上升。同时,改变控制角 α 就可改变重物上升的速度。例如减小控制角 α ,则 U_d 增大,电动机产生的电磁转矩增大,因电动机轴上重物产生的阻转矩不变,所以电动机的转速升高,电动机的反电势 E 亦增大,使 I_d 恢复到原来的数值,此时电动机稳定运行在较高转速。反之, α 值增大,则电动机转速减小。

(2) 当重物提升到一定高度需要停止时,可以逐渐增大控制角 α ,随着 α 的增大,输出电压 U_d 减小,电动机转速减小。当 α 增大到 90° 时,输出电压 $U_d = 0$,电动机转速继续下降,到转速 $n = 0$ 时,采用电磁抱闸,电机停转。这时,输出电压的波形为正、负面积相等,交流电源既不输出功率,也不输入功率。

(3) 单相全波工作在逆变状态

如图 3-2(b)所示,电动机停止运转时,使重物下降,电动机则在重物的作用下反向运转,产生上负下正的反电势 E 。在直流发电机-电动机系统中,由于电流的流向不受限制,

因此电能实现反方向输送十分方便。但是对于晶闸管电路，由于晶闸管的单向导电性，决定了回路的电流方向不能发生改变。为了不使 E 和 U_d 反极性相接，就必须将直流侧输出电压 U_d 的方向改变，才不会造成短路。同时，电动机的电势 $|E|$ 应大于 $|U_d|$ ，才能保证晶闸管的可靠导通。当调整控制角 α 到大于 90° 时，尽管电源电压提供给晶闸管的阳极电压大部分为负半周时刻，但由于 E 的作用，晶闸管仍能承受正压而导通，同时又能改变 U_d 的极性。因此，在保证在 E 大于 U_d 的情况下，晶闸管仍能轮流导通 180° ，维持电流 I_d 连续，晶闸管电路的输出电压 u_d 波形负面积大于正面积，如图所示。回路电流 I_d 的大小为：

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

式中， $U_d = 0.9U_2 \cos \alpha$ (α 的范围为 $90^\circ \sim 180^\circ$)。

上述电路中晶闸管的导通主要取决于反电势 E ，在整个过程中电动机输出功率，为发电机工作状态，变流器吸收功率，电动机输出的功率通过变流器转变成交流功率回送交流电网，从而实现有源逆变。单相全波晶闸管电路工作在逆变状态。

从以上分析可知，晶闸管电路工作在整流状态时，交流电网输出功率，控制角 $\alpha < 90^\circ$ ， u_d 波形正面积大于负面积，输出电压平均值 $U_d > 0$ 。晶闸管电路工作在逆变状态时，交流电网吸收功率， u_d 波形负面积大于正面积， $U_d < 0$ ，控制角 $\alpha > 90^\circ$ 。当 $\alpha = 90^\circ$ 时， u_d 波形负面积等于正面积， $U_d = 0$ ，为临界状态。

综上所述，要实现有源逆变必须满足如下条件：

(1) 外部条件：直流侧必须外接一个直流电源势（例如直流电动机的电枢电势、蓄电池电势等），其方向与直流电流 I_d 的方向一致，其大小比 U_d 稍大。

(2) 内部条件：晶闸管控制角 $\alpha > 90^\circ$ ，使 $U_d < 0$ 。

这两个条件缺一不可。

必须指出，对于阻性负载、半控桥晶闸管电路或者带续流二极管的变流电路，由于不可能输出负电压，也不允许在直流侧接上反极性的电势源，因此这样的电路不能实现有源逆变。

《电力电子技术 B》电子教案

第 10 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第三章 整流电路			
教学节次及名称	3.8 整流电路相位控制的实现			
教学目的 与要求	熟悉相控整流电路的概念。 了解同步信号为锯齿波的触发电路。			
教学重点	1. 同步信号为锯齿波的触发电路组成以及各部分电路分析。 2. 触发电路的定相。			
教学难点	1. 锯齿波同步触发电路工作原理。 2. 定相。			
教学内容	1. 介绍相控电路基本概念。〈5 分钟〉 2. 分析同步信号为锯齿波同步触发电路电路构成。〈5 分钟〉 3. 分析同步环节。〈10 分钟〉 4. 分析锯齿波的形成和脉冲移相。〈20 分钟〉 5. 分析双脉冲的形成环节。〈10 分钟〉 6. 分析强触发环节。〈10 分钟〉 7. 分析集成触发电路。〈10 分钟〉 8. 分析触发电路的定相。〈15 分钟〉 7. 小结、答疑。〈5 分钟〉			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	了解相控整流电路，熟悉锯齿波同步触发电路的工作原理。			
作业和思 考题	1. 锯齿波同步触发电路由哪几部分构成？ 2. 三相桥式全控整流电路六个晶闸管如何实现控制驱动？（查资料讨论可行性）			

教 案

电力电子技术 课 10 讲

主讲人薛荣辉

课 题：3.8 相控电路的驱动控制

目的任务：熟悉锯齿波同步触发电路的原理

重点难点：电路分析

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

3.8 相控电路的驱动控制

晶闸管是半控型器件，触发导通后门极即失去控制作用，为了减少门极损耗与确保触发时刻的准确性，最好采用短暂的正脉冲。能够为门极提供触发电压和触发电流的电路称为触发电路，它决定每个晶闸管的导通时刻，是变流装置的重要部分。

一、对触发电路的要求

1) 对发信号功率的要求

触发电信号应有足够的功率（电压与电流）。

2) 对触发电信号波形的要求

触发电脉冲应有一定的宽度，脉冲前沿尽可能陡，以使元件在触发导通后阳极电流能迅速上升超过掣住电流而维持导通。

3) 触发电脉冲的同步及移相范围

为使晶闸管在每个周期都在相同的控制角 α 触发导通，触发电脉冲必须与晶闸管的阳极电压（也就是电源）同步，且脉冲与电源波形保持固定的相位关系。

4) 防止干扰与误触发

晶闸管的误导通往往是由于干扰信号进入门极电路而引起，因此需要对触发电路进行屏蔽、隔离等抗干扰措施。

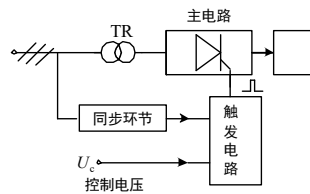
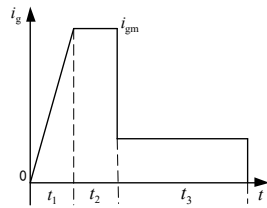
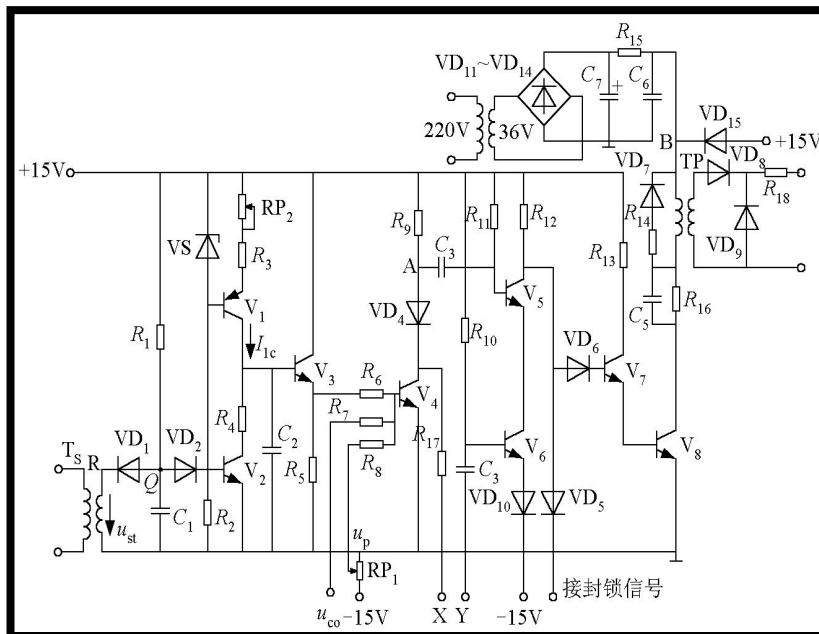
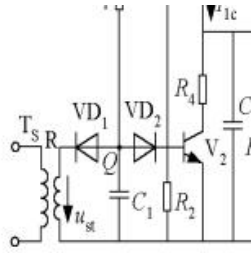


图 理想触发脉冲波形 图 整流装置图

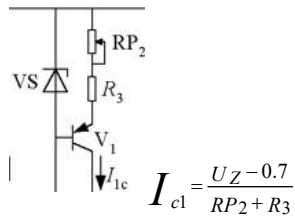
二、锯齿波同步触发电路



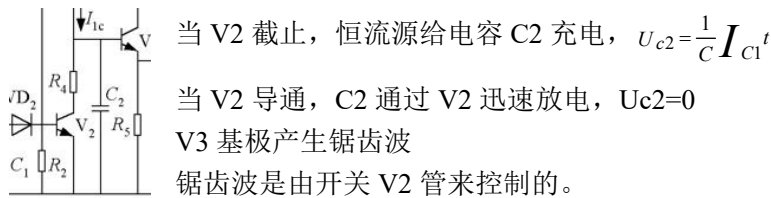
1. 同步环节 要求触发脉冲的频率与主电路电源的频率相同且相位关系确定。



2. 恒流源环节



3. 锯齿波的形成和移相



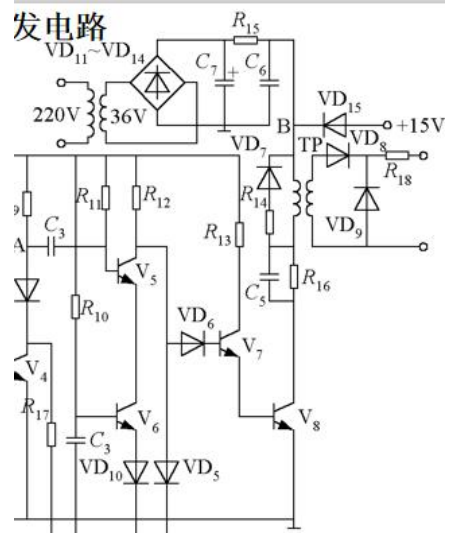
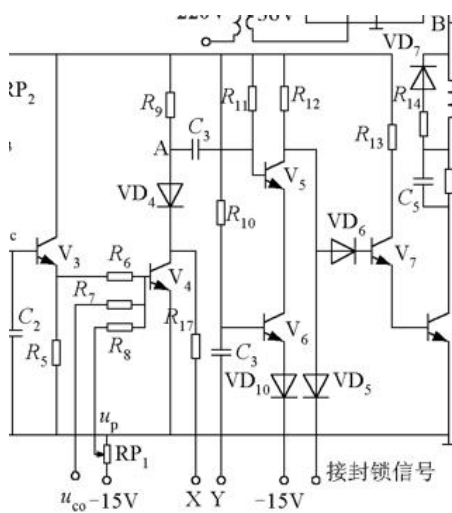
\$V_2\$ 开关的频率就是锯齿波的频率——由同步变压器所接的交流电压决定。

\$V_2\$ 由导通变截止期间产生锯齿波——锯齿波起点基本就是同步电压由正变负的过零点。

\$V_2\$ 截止状态持续的时间就是锯齿波的宽度——取决于充电时间常数 \$R_1C_1\$。

4. 脉冲的形成和放大环节

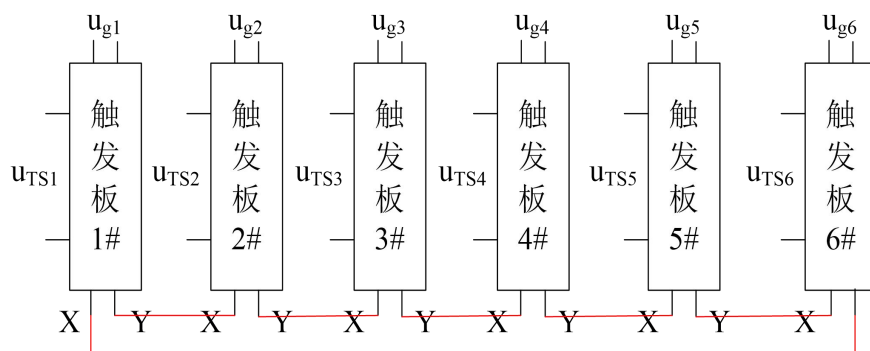
5. 强触发环节



\$V_4\$ 截止

\$V_4\$ 导通

6.双窄脉冲

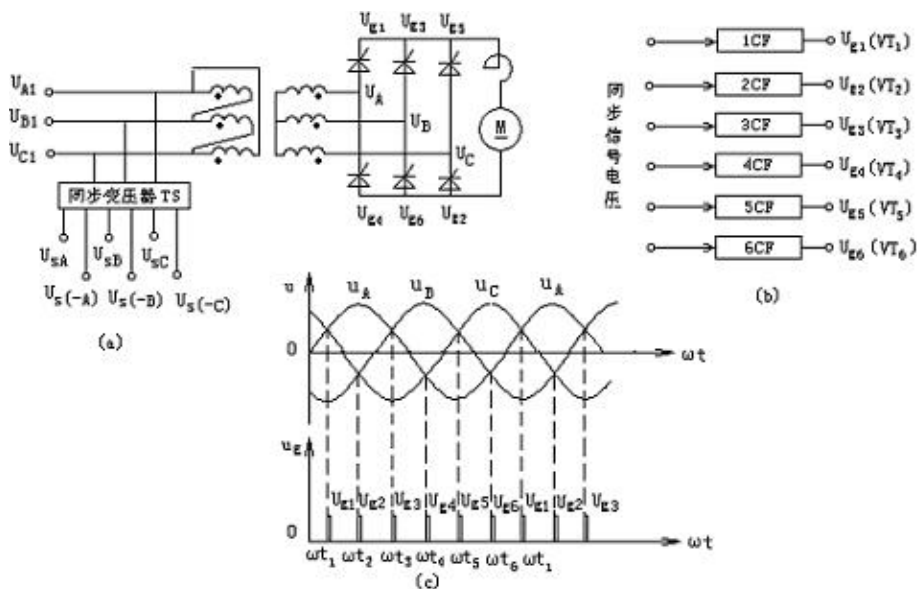
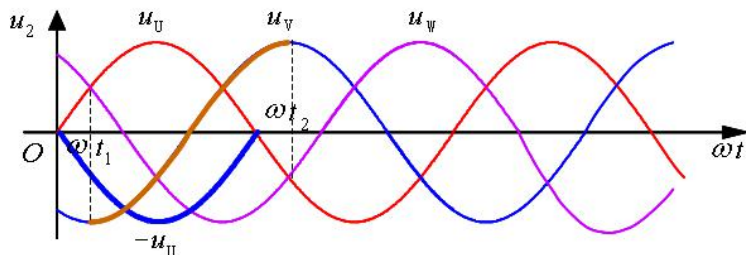


二、触发电路的定相

1.定相：触发电路应保证每个晶闸管触发脉冲与施加于晶闸管的交流电压保持固定、正确的相位关系。

◆利用一个同步变压器保证触发电路和主电路频率一致。

◆选择同步电压信号的相位，以保证触发脉冲相位正确，关键是确定同步信号与晶闸管阳极电压的关系。



2. 同步变压器的接法

同步变压器的二次只能是星形连接。

由于同步变压器二次电压要分别接到各单元触发电路，而一套主电路的各单元触发装置一般有公共“接地”端点。

确定变压器的钟点数。

由于整流变压器、同步变压器二者的一次绕组总是接在同一三相电源上，对于同步变压器接线组别的确定，可采用简化的电压矢量图解方法确定出变压器的钟点数（其表示法是以三相变压器一次侧任一线电压为参考矢量，箭头向上，作为时钟长针，指向 12 点位置，然后画出对应二次侧线电压矢量，作为短针方向，短针指向几点就是几点钟接法）。

3. 钟点数表示方法：

三相变压器 24 种接法，以 360° 为电角度，可得 12 种不同相位的二次电压。

相位滞后：顺时针转

相位超前：逆时针转

钟点数：奇数-----一二次侧接法不同

偶数-----一二次侧接法相同

相电压滞后线电压 30°

4. 实现同步的步骤：

①根据主电路的结构，负载的性质及触发电路的形式与脉冲移相范围的要求，确定该触发电路的同步电压 U_S 与对应 VT 阳极电压之间的相位关系。

NPN 180° ； PNP 0°

②根据电源变压器的接法，以电网某线电压作参考矢量，画出电源变压器次级电压的矢量，从而确定相对应的同步电压和同步线电压矢量。

③根据同步变压器次级线电压矢量位置，确定同步变压器钟点数。

《电力电子技术 B》电子教案

第 11 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第三章 整流电路			
教学节次及名称	3.1-3.8			
教学目的 与要求	系统整理整流电路电路分类，各电路不同负载情况下波形分析，参数计算，使学生更好地掌握整流电路。			
教学重点	1. 各整流电路波形分析，参数计算。			
教学难点	1. 参数计算。 2. 波形分析。			
教学内容	1. 讨论整流电路有哪些？现实生活中哪些电路中有整流电路。〈5 分钟〉 2. 讨论整理各整流电路不同负载情况下参数计算公式。〈25 分钟〉 3. 讨论有源逆变电路和整流电路之间的关系，复习有源逆变的条件。〈5 分钟〉 4. 处理课后部分习题。〈55 分钟〉			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	整理第三章内容，有助于学生掌握相控整流电路的分析方法，波形分析，参数计算。			
作业和思 考题	1. 有源逆变和整流之间有什么关系？ 2. 整流电路只能用不可控电力二极管和晶闸管实现吗？			

教 案

电力电子技术 课 11 讲

主讲人薛荣辉

课 题：习题

目的任务：掌握前三章知识点

处理习题

重点难点：电路分析

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

第一章 作业题

2. 使晶闸管导通的条件是什么？

答：使晶闸管导通的条件是：晶闸管承受正向阳极电压，并在门极施加触发电流（脉冲）。

或： $u_{AK} > 0$ 且 $u_{GK} > 0$ 。

3. 维持晶闸管导通的条件是什么？怎样才能使晶闸管由导通变为关断？

答：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。

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。

4. 图 1-43 中阴影部分为晶闸管处于通态区间的电流波形，各波形的电流最大值均为 I_m ，试计算各波形的电流平均值 I_{d1} 、 I_{d2} 、 I_{d3} 与电流有效值 I_1 、 I_2 、 I_3 。

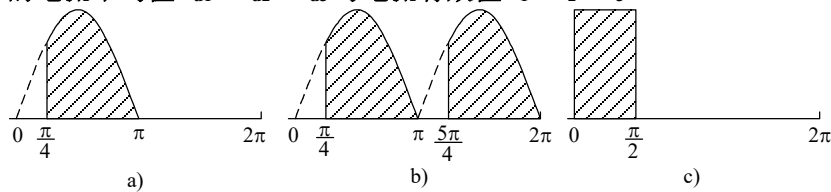


图 1-43 晶闸管导电波形

解：a)
$$I_{d1} = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/4}^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{2\pi} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + 1 \right) \approx 0.2717 I_m$$

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi/4}^{\pi} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{2} \sqrt{\frac{3}{4} + \frac{1}{2\pi}} \approx 0.4767 I_m$$

b)
$$I_{d2} = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/4}^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{\pi} \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + 1 \right) \approx 0.5434 I_m$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\pi/4}^{\pi} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{\sqrt{2} I_m}{2} \sqrt{\frac{3}{4} + \frac{1}{2\pi}} \approx 0.6741 I_m$$

c)
$$I_{d3} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_m d(\omega t) = \frac{1}{4} I_m$$

$$I_3 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_m^2 d(\omega t)} = \frac{1}{2} I_m$$

5. 上题中如果不考虑安全裕量，问 100A 的晶闸管能送出平均电流 I_{d1} 、 I_{d2} 、 I_{d3} 各为多少？这时，相应的电流最大值 I_{m1} 、 I_{m2} 、 I_{m3} 各为多少？

解： $I_{T(AV)} = 100A$ ，流过晶闸管电流有效值 $I_T = 1.57 * 100 = 157A$

a)
$$I_{m1} = \frac{I_T}{0.4767} \approx 329.35A$$

$$I_{d1} \approx 0.2717 I_{m1} \approx 89.48A$$

b)
$$I_{m2} = \frac{I_T}{0.6741} \approx 232.9A$$

$$I_{d2} \approx 0.5434 I_{m2} \approx 126.63A$$

c)
$$I_{m3} = \frac{I_T}{0.5} = 314A$$

$$I_{d3} = \frac{1}{4} I_{m3} = 78.5A$$

6. GTO 和普通晶闸管同为 PNP 结构，为什么 GTO 能够自关断，而普通晶闸管不能？

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 α_1 和 α_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。 $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$ ，两个等效晶体管过饱和而导通； $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$ ，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 α_2 较大，这样晶体管 V_2 控制灵敏，易于 GTO 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。

7. 如何防止电力 MOSFET 因静电感应引起的损坏？

答：电力 MOSFET 的栅极绝缘层很薄弱，容易被击穿而损坏。MOSFET 的输入电容是低泄漏电容，当栅极开路时极易受静电干扰而充上超过 ± 20 的击穿电压，所以为防止 MOSFET 因静电感应而引起的损坏，应注意以下几点：

- ① 一般在不用时将其三个电极短接；
- ② 装配时人体、工作台、电烙铁必须接地，测试时所有仪器外壳必须接地；
- ③ 电路中，栅、源极间常并联齐纳二极管以防止电压过高
- ④ 漏、源极间也要采取缓冲电路等措施吸收过电压。

8. IGBT、GTR、GTO 和电力 MOSFET 的驱动电路各有什么特点？

答：IGBT 驱动电路的特点是：驱动电路具有较小的输出电阻，IGBT 是电压驱动型器件，IGBT 的驱动多采用专用的混合集成驱动器。

GTR 驱动电路的特点是：驱动电路提供的驱动电流有足够陡的前沿，并有一定的过冲，这样可加速开通过程，减小开通损耗，关断时，驱动电路能提供幅值足够大的反向基极驱动电流，并加反偏截止电压，以加速关断速度。

GTO 驱动电路的特点是：GTO 要求其驱动电路提供的驱动电流的前沿应有足够的幅值和陡度，且一般需要在整个导通期间施加正门极电流，关断需施加负门极电流，幅值和陡度要求更高，其驱动电路通常包括开通驱动电路，关断驱动电路和门极反偏电路三部分。

电力 MOSFET 驱动电路的特点：要求驱动电路具有较小的输入电阻，驱动功率小且电路简单。

9. 全控型器件的缓冲电路的主要作用是什么？试分析 RCD 缓冲电路中各元件的作用。

答：全控型器件缓冲电路的主要作用是抑制器件的内因过电压， du/dt 或过电流和 di/dt ，减小器件的开关损耗。

RCD 缓冲电路中，各元件的作用是：开通时， C_s 经 R_s 放电， R_s 起到限制放电电流的作用；关断时，负载电流经 V_{DS} 从 C_s 分流，使 du/dt 减小，抑制过电压。

10. 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 的优缺点的比较如下表：

器 件	优 点	缺 点
-----	-----	-----

IGBT	开关速度快, 开关损耗小, 具有耐脉冲电流冲击的能力, 通态压降较低, 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	耐压高, 电流大, 开关特性好, 通流能力强, 饱和压降低	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, 一般只适用于功率不超过 10kW 的电力电子装置

第二章

1. 单相半波可控整流电路对电感负载供电, $L=20\text{mH}$, $U_2=100\text{V}$, 当 $\alpha=0^\circ$ 和 60° 时的负载电流 I_d , 并画出 u_d , i_d 波形。

1) $\alpha=0^\circ$ 电感 $0^\circ\sim 180^\circ$ 储存能量, $180^\circ\sim 360^\circ$ 释放能量, 导通区间 $0^\circ\sim 360^\circ$ 晶闸管导通器件:

$$L \frac{di_d}{dt} = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t$$

$$i_d = \frac{\sqrt{2} U_2}{\omega L} (-\cos \omega t + A)$$

当 $\omega t=0$, $i_d=0$, 代入 i_d , 计算得到: $A = \frac{\sqrt{2} U_2}{\omega L}$

$$i_d = \frac{\sqrt{2} U_2}{\omega L} (1 - \cos \omega t)$$

计算输出电流平均值:

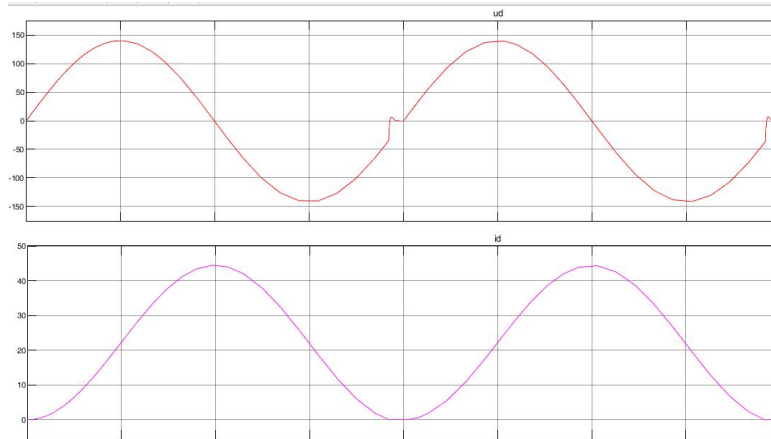
$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sqrt{2} U_2}{\omega L} (1 - \cos \omega t) d\omega t$$

$$= \frac{1}{2\pi} \frac{\sqrt{2} U_2}{\omega L} \left[\omega t \Big|_0^{2\pi} - \sin \omega t \Big|_0^{2\pi} \right]$$

$$= \frac{1}{2\pi} \frac{\sqrt{2} U_2}{\omega L} \times 2\pi$$

$$= \frac{1}{2\pi} \frac{\sqrt{2} \times 100}{2\pi \times 50 \times 20 \times 10^{-3}} \times 2\pi$$

$$= 22.51\text{A}$$



2) $\alpha=60^\circ$ 电感 $60^\circ\sim 180^\circ$ 储存能量, $180^\circ\sim 300^\circ$ 释放能量, 导通区间 $60^\circ\sim 300^\circ$
晶闸管导通器件:

$$L \frac{di_d}{dt} = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t$$

$$i_d = \frac{\sqrt{2} U_2}{\omega L} (-\cos \omega t + B)$$

当 $\omega t = \pi/3$, $i_d = 0$, 代入 i_d , 计算得到:

$$B = \frac{\sqrt{2} U_2}{\omega L} \cos \frac{\pi}{3}$$

$$= \frac{\sqrt{2} U_2}{\omega L} \times \frac{1}{2}$$

$$= \frac{1}{2} \times \frac{\sqrt{2} U_2}{\omega L}$$

$$i_d = \frac{\sqrt{2} U_2}{\omega L} \left(\frac{1}{2} - \cos \omega t \right)$$

计算输出电流平均值:

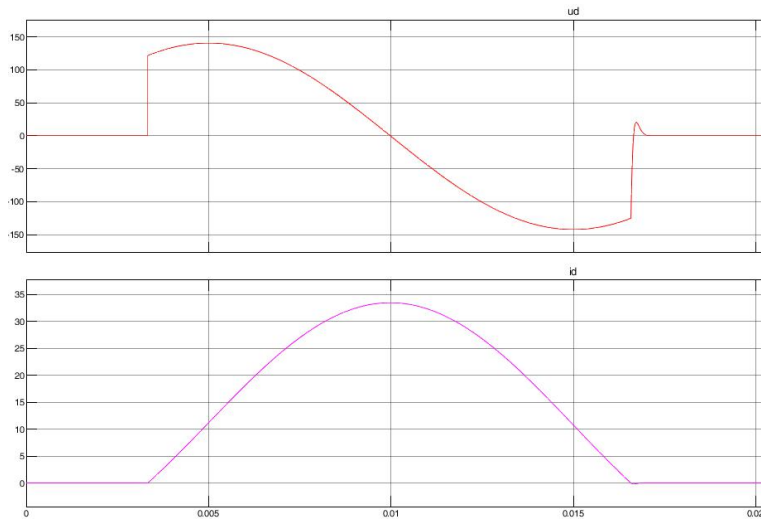
$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/3}^{5\pi/3} \frac{\sqrt{2} U_2}{\omega L} \left(\frac{1}{2} - \cos \omega t \right) d\omega t$$

$$= \frac{1}{2\pi} \frac{\sqrt{2} U_2}{\omega L} \left[\frac{1}{2} \omega t \Big|_{\pi/3}^{5\pi/3} - \sin \omega t \Big|_{\pi/3}^{5\pi/3} \right]$$

$$= \frac{1}{2\pi} \frac{\sqrt{2} \times 100}{2\pi \times 50 \times 20 \times 10^{-3}} \left[\frac{1}{2} \times \frac{4\pi}{3} - \sin \frac{5\pi}{3} + \sin \frac{\pi}{3} \right]$$

$$= \frac{\sqrt{2} \times 100}{4\pi^2} \left(\frac{2\pi}{3} + \sqrt{3} \right)$$

$$\approx 13.73 A$$

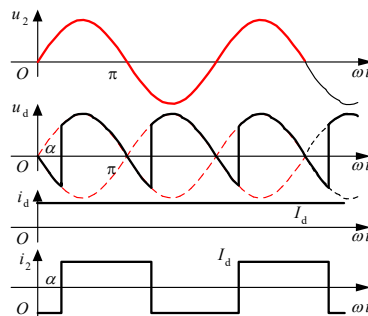


3. 单相桥式全控整流电路， $U_2=100\text{V}$ ，负载中 $R=2\Omega$ ， L 值极大，当 $\alpha=30^\circ$ 时，要求：

①作出 u_d 、 i_d 和 i_2 的波形；

②求整流输出平均电压 U_d 、电流 I_d ，变压器二次电流有效值 I_2 ；

解：① u_d 、 i_d 和 i_2 的波形如下图：



②输出平均电压 U_d 、电流 I_d ，变压器二次电流有效值 I_2 分别为

$$U_d = 0.9 U_2 \cos \alpha = 0.9 \times 100 \times \cos 30^\circ = 77.97 \text{ (V)}$$

$$I_d = U_d / R = 77.97 / 2 = 38.99 \text{ (A)}$$

$$I_2 = I_d = 38.99 \text{ (A)}$$

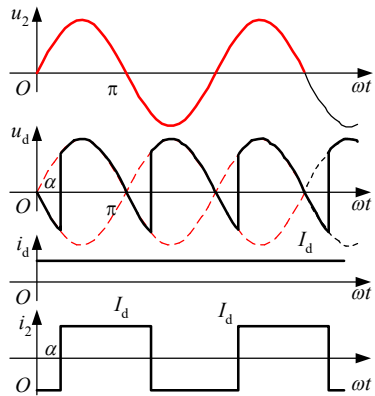
5. 单相桥式全控整流电路， $U_2=200\text{V}$ ，负载中 $R=2\Omega$ ， L 值极大，反电势 $E=100\text{V}$ ，当 $\alpha=45^\circ$ 时，要求：

① 作出 u_d 、 i_d 和 i_2 的波形；

② 求整流输出平均电压 U_d 、电流 I_d ，变压器二次侧电流有效值 I_2 ；

③ 考虑安全裕量，确定晶闸管的额定电压和额定电流。

解：① u_d 、 i_d 和 i_2 的波形如下图：



②整流输出平均电压 U_d 、电流 I_d ，变压器二次侧电流有效值 I_2 分别为

$$U_d = 0.9 U_2 \cos \alpha = 0.9 \times 200 \times \cos 45^\circ = 127.28(\text{A})$$

$$I_d = (U_d - E) / R = (127.28 - 100) / 2 = 13.64(\text{A})$$

$$I_2 = I_d = 13.64(\text{A})$$

③晶闸管承受的最大反向电压为：

$$\sqrt{2} U_2 = 200 \sqrt{2} = 282.8 (\text{V})$$

流过每个晶闸管的电流的有效值为：

$$I_{VT} = I_d / \sqrt{2} = 9.6 (\text{A})$$

故晶闸管的额定电压为：

$$U_N = (2 \sim 3) \times 282.8 = 566 \sim 848 (\text{V})$$

晶闸管的额定电流为：

$$I_N = (1.5 \sim 2) \times 9.6 / 1.57 = 9.17 \sim 12.23 (\text{A})$$

晶闸管额定电压和电流的具体数值可按晶闸管产品系列参数选取。

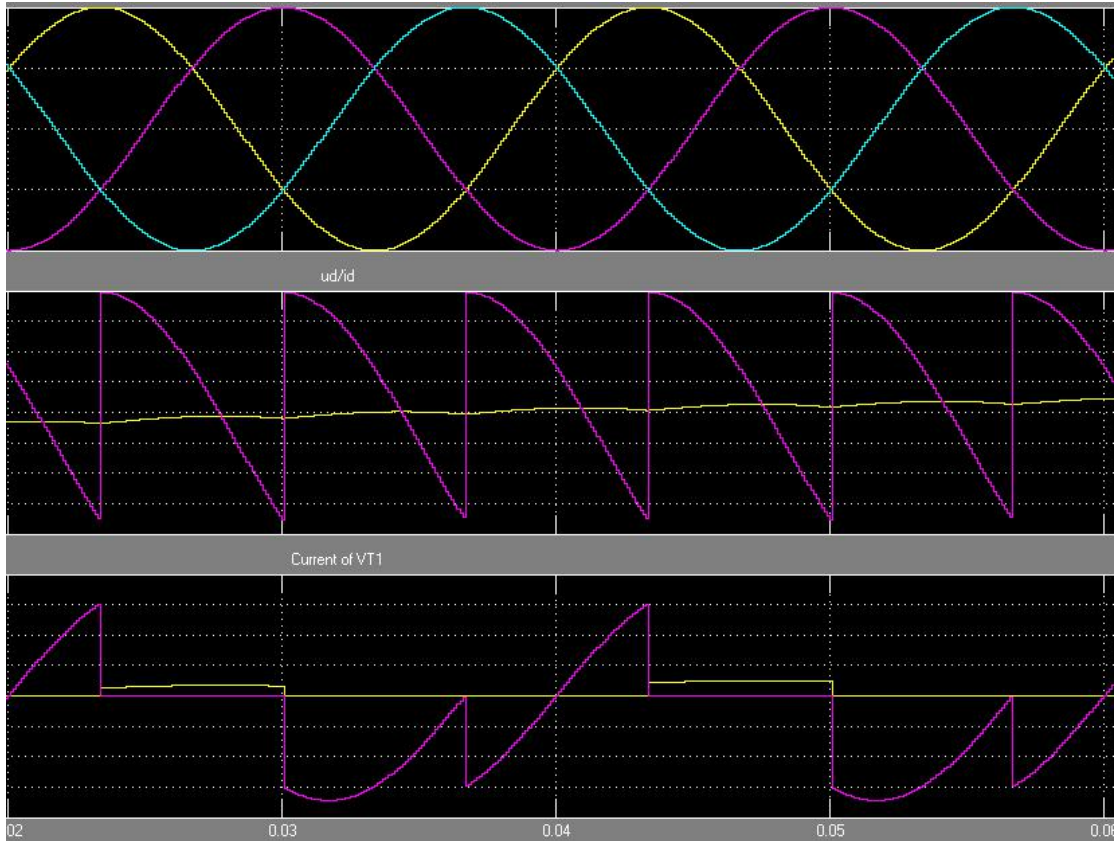
11.三相半波可控整流电路， $U_2=100\text{V}$ ，带电阻电感负载， $R=5\Omega$ ， L 值极大，当 $\alpha=60^\circ$ 时，要求：

①画出 u_d 、 i_d 和 i_{VT1} 的波形；

②计算 U_d 、 I_d 、 I_{dVT} 和 I_{VT} 。

解

：



$$\textcircled{2} U_d = 1.17 U_2 \cos \alpha = 1.17 \times 100 \times \cos 60^\circ = 58.5 \text{ (V)}$$

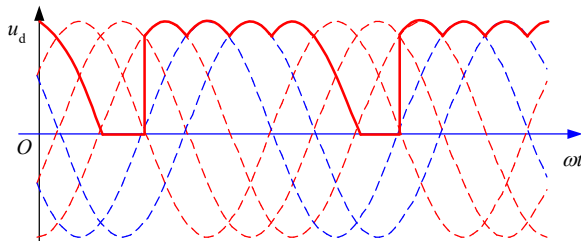
$$I_d = U_d / R = 58.5 / 5 = 11.7 \text{ (A)}$$

$$I_{dVT} = I_d / 3 = 11.7 / 3 = 3.9 \text{ (A)}$$

$$I_{VT} = I_d / \sqrt{3} = 11.7 / \sqrt{3} = 6.755 \text{ (A)}$$

12. 在三相桥式全控整流电路中，电阻负载，如果有一个晶闸管不能导通，此时的整流电压 u_d 波形如何？如果有一个晶闸管被击穿而短路，其他晶闸管受什么影响？

答：假设 VT_1 不能导通，整流电压 u_d 波形如下：



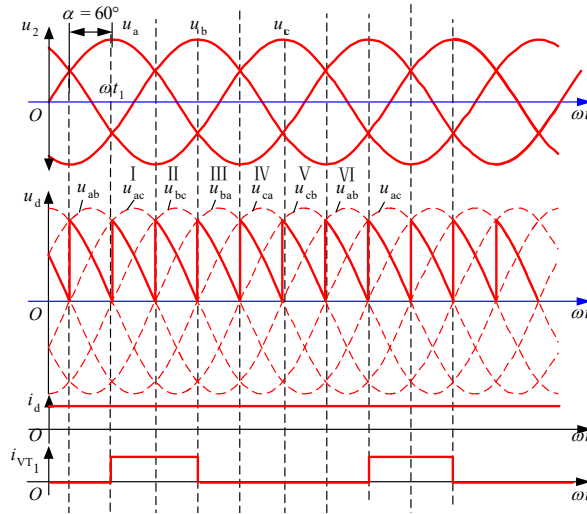
假设 VT_1 被击穿而短路，则当晶闸管 VT_3 或 VT_5 导通时，将发生电源相间短路，使得 VT_3 、 VT_5 也可能分别被击穿。

13. 三相桥式全控整流电路， $U_2=100\text{V}$ ，带电阻电感负载， $R=5\ \Omega$ ， L 值极大，当 $\alpha=60^\circ$ 时，要求：

(1) 画出 u_d 、 i_d 和 i_{VT1} 的波形；

(2) 计算 U_d 、 I_d 、 I_{dT} 和 I_{VT} 。

解：① u_d 、 i_d 和 i_{VT1} 的波形如下：



② U_d 、 I_d 、 I_{dT} 和 I_{VT} 分别如下

$$U_d = 2.34U_2 \cos \alpha = 2.34 \times 100 \times \cos 60^\circ = 117 \text{ (V)}$$

$$I_d = U_d / R = 117 / 5 = 23.4 \text{ (A)}$$

$$I_{DV T} = I_d / 3 = 23.4 / 3 = 7.8 \text{ (A)}$$

$$I_{VT} = I_d / \sqrt{3} = 23.4 / \sqrt{3} = 13.51 \text{ (A)}$$

14 单相全控桥，反电动势阻感负载， $R=1\Omega$ ， $L=\infty$ ， $E=40V$ ， $U_2=100V$ ， $L_B=0.5mH$ ，当 $\alpha=60^\circ$ 时求 U_d 、 I_d 与 γ 的数值，并画出整流电压 u_d 的波形。
解：

$$X_B = \omega L_B = 2\pi f L_B = 2 \times 3.14 \times 50 \times 0.5 \times 10^{-3} = 0.157 \Omega$$

$$U_d = 0.9U_2 \cos \alpha - \Delta U_d = 0.9 \times 100 \times \cos 60^\circ - \Delta U_d = 45 - \Delta U_d$$

$$\Delta U_d = \frac{4}{2\pi} X_B I_d = \frac{2}{\pi} \times 0.157 I_d$$

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

解得：

$$I_d = \frac{U_d - E}{R} = \frac{45 - 0.1I_d - 40}{1}$$

$$1.1I_d = 5$$

$$I_d = 4.55A$$

$$U_d = 45 - 0.1I_d = 44.55V$$

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{2I_d X_B}{\sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{2}} = \frac{2 \times 4.55 \times 0.157}{\sqrt{2} \times 100 \times 1} = 0.101$$

$$\cos(60^\circ + \gamma) = 0.5 - 0.101$$

$$\gamma = 61.33^\circ - 60^\circ = 1.33^\circ$$

15. 三相半波可控整流电路，反电动势阻感负载， $U_2=100V$ ， $R=1\Omega$ ， $L_B=1mH$ ，求当 $\alpha=30^\circ$ ， $E=50V$ 时， U_d 、 I_d 、 γ 值，并画出 u_d 、 i_{VT1} 、 i_{VT2} 波形。

解:

$$U_d = 1.17U_2 \cos \alpha - \frac{3}{2\pi} X_B I_d$$

$$I_d = \frac{U_d - E}{R} \quad (5 \text{ 分})$$

$$X_B = 2\pi f L_B$$

$$= 2 \times 3.14 \times 50 \times 1 \times 10^{-3}$$

$$= 0.314 \Omega \quad (1 \text{ 分})$$

联立得到:

$$U_d = 1.17 \times 100 \cos 30^\circ - \frac{3}{2\pi} \times 0.314 I_d$$

$$= 101.3 - 0.15 I_d$$

$$I_d = \frac{U_d - E}{R} = \frac{U_d - 50}{1} = U_d - 50$$

$$= 101.3 - 0.15 I_d - 50$$

$$I_d = 101.3 - 0.15 I_d - 50$$

$$1.15 I_d = 51.3$$

$$I_d = 44.6 A$$

$$U_d = 101.3 - 0.15 I_d$$

$$= 101.3 - 0.15 \times 44.6$$

$$= 94.61 V$$

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{X_B I_d}{\sqrt{2} U_2 \sin \frac{\pi}{3}}$$

$$\cos 30^\circ - \cos(30^\circ + \gamma) = \frac{0.314 \times 44.6}{\sqrt{2} \times 100 \sin \frac{\pi}{3}}$$

$$\cos(30^\circ + \gamma) = \frac{\sqrt{3}}{2} - 0.11434$$

$$\gamma = 41.26^\circ - 30^\circ$$

$$\gamma = 11.26^\circ$$

17. 三相全控桥, 反电动势阻感负载, $E = 200V$, $R = 1\Omega$, $L = \infty$, $U_2 = 220V$, $\alpha = 60^\circ$, 当① $L_B = 0$ 和 ② $L_B = 1mH$ 两种情况下分别 U_d 、 I_d 的值, 后者还应求 γ 并分别画出 u_d 与 i_{VT} 的波形。

解: 1) $L_B = 0$

$$U_d = 2.34 U_2 \cos \alpha = 2.34 \times 220 \times \frac{1}{2} = 257.2 V$$

$$I_d = \frac{U_d - E}{R} = \frac{257.2 - 200}{1} = 57.2 A$$

2) $L_B = 1mH$

$$X_B = \omega L_B = 2\pi \times 50 \times 0.001 = 0.1\pi = 0.314 \Omega$$

$$U_d = 2.34 U_2 \cos \alpha - \Delta U_d$$

$$\Delta U_d = \frac{6 X_B I_d}{2\pi}$$

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

解得: $I_d=44.15A$

$$U_d=244.15V$$

$$\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{X_B I_d}{\sqrt{6} U_2 \sin \frac{\pi}{6}}$$

解得:

$$\gamma = 63.35^\circ - 60^\circ$$

$$\gamma = 3.35^\circ$$

27. 三相全控桥变流器, 反电动势负载阻感负载, $R=1\Omega, L=\infty, U_2=220V, L_B=1mH$, 当 $E_M=-400V, \beta=60^\circ$, 求 U_d, I_d, γ 值, 此时送回电网的有功功率是多少?

解:

$$X_B = \omega L_B = 0.314\Omega$$

$$\begin{aligned} U_d &= 2.34U_2 \cos(\pi - \beta) - \frac{6}{2\pi} X_B I_d \\ &= 2.34 * 220 * (-0.5) - \frac{3}{\pi} * 2\pi * 50 * 1 * 10^{-3} I_d \\ &= -257.4 - 0.3 I_d \end{aligned} \quad (2)$$

$$I_d = \frac{U_d - E_M}{R} = \frac{U_d + 400}{1} = U_d + 400$$

(1) 代入 (2)

$$I_d = -257.4 - 0.3 I_d + 400$$

$$1.3 I_d = 142.6$$

$$I_d = 109.7A$$

$$\begin{aligned} U_d &= -257.4 - 0.3 * 109.7 \\ &= -290.3V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P &= E_M I_d + I_d^2 R \\ &= -400 * 109.7 + 109.7 * 109.7 * 1 \\ &= -31.84kw \end{aligned}$$

$$\cos\alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{X_B I_d}{\sqrt{6} U_2 \sin \frac{\pi}{6}}$$

$$\cos(120^\circ + \gamma) = -\frac{1}{2} - \frac{2 * 109.7 * 0.314}{\sqrt{6} * 220}$$

$$\gamma = 8.9^\circ$$

30. 单相桥式全控整流电路、三相桥式全控整流电路中, 当负载分别为电阻负载或电感负载时, 要求的晶闸管移相范围分别是多少?

答: 单相桥式全控整流电路, 当负载为电阻负载时, 要求的晶闸管移相范围是 $0 \sim 180^\circ$, 当负载为电感负载时, 要求的晶闸管移相范围是 $0 \sim 90^\circ$ 。

三相桥式全控整流电路，当负载为电阻负载时，要求的晶闸管移相范围是 $0 \sim 120^\circ$ ，当负载为电感负载时，要求的晶闸管移相范围是 $0 \sim 90^\circ$ 。

《电力电子技术 B》电子教案

第 12 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第四章 逆变电路			
教学节次及名称	4.1 换流方式 4.2 电压型逆变电路			
教学目的 与要求	掌握换流基本概念，掌握换流方式及各自的特点。 掌握逆变电路的分类。 掌握电压型逆变电路特点。 掌握电压型逆变电路工作状态的分析和波形分析。			
教学重点	1. 换相方式。 2. 电压型逆变电路分析。			
教学难点	1. 三相电压型逆变电路波形分析。			
教学内容	1. 介绍逆变基本概念。〈5 分钟〉 2. 介绍换流方式。〈25 分钟〉 3. 分析电压型逆变电路特点。〈10 分钟〉 4. 分析单相电压型逆变电路工作原理，波形分析。〈15 分钟〉 5. 分析三相电压型逆变电路工作原理，波形分析。〈30 分钟〉 6. 小结、答疑。〈5 分钟〉			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	掌握换流方式，掌握电压型逆变电路特点，掌握电压型逆变电路工作状态的分析和波形分析。			
作业和思 考题	1. 针对晶闸管的换流方式有哪些？各有什么特点？ 2. 电压型逆变电路有什么特点？			

教 案

电力电子技术 课 12 讲

主讲人薛荣辉

课 题：4.1 换流方式

4.2 电压型逆变电路

目的任务：1. 掌握换流基本概念及分类

2. 掌握电压型逆变电路的分析方法

重点难点：电路分析

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

第4章 逆变电路

在生产实践中，需要不同频率的交流电源，例如，熔炼、加热与淬火的中频电源，交流调速系统的变频电源以及计算机的不停电电源等。目前，大多采用将 50 Hz 的工频电源变换成固定或可调的电源以供给负载，这时实现的是无源逆变，无源逆变也称为变频器。

一、换流方式

换流：电流从一条支路换到另一条支路。

常用的换流方法有以下三种：

1) 电网换流

在交-交变频器中，利用电网电压过零变负的特点实现导通晶闸管的关断，电路简单，仅适用于交流电网供电的电路，采用晶闸管实现整流电路也采用电网换流。

2) 负载换流

在直流供电的负载回路中，利用电阻、电感和电容形成的振荡特性，使负载电流超前于电压的时间 t_0 大于晶闸管的关断时间 t_q ，便能保证晶闸管可靠地关断。由于 t_0 是随负载与频率变换的，因此这种换流方式只适用于负载及频率变化不大的场合。

3) 强迫换流

利用专门的换流电路使晶闸管在任何需要的时刻关断，称为强迫换流。换流电路是利用换流电容储存的能量，在换流时刻产生一个短暂的脉冲，迫使原来导通的晶闸管电流下降到零，再加一段时间的反向电压，便可保证晶闸管可靠关断。

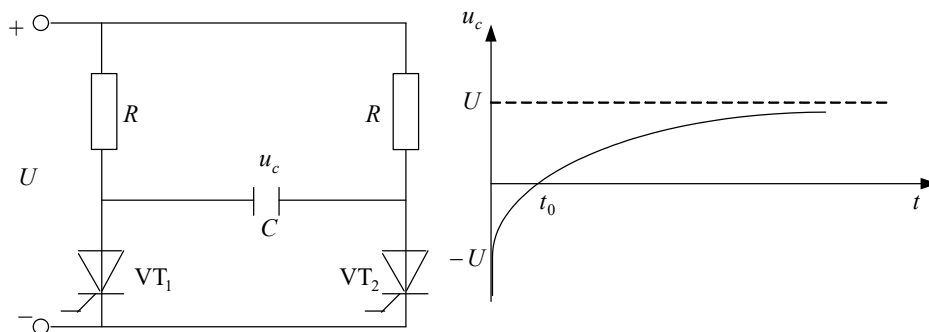


图 强迫换流原理及波形

强迫换流多用于斩波器及逆变器中，可使输出频率不受电源频率的限制，但需要附加庞大的换流装置，同时还要增加晶闸管的电压、电流定额，对晶闸管的动态特性要求也高。下

4) 器件换流

全控型器件可以控制器件导通也可以控制器件截止，换流方式为器件换流。

二、电压型逆变电路

在交-直-交变频器中，由于负载一般都是感性的，它和电源之间必有无功功率传递，因此在中间的直流环节需要有储存能量的元件。电压型逆变电路采用的是大电容器，因此它为逆变器提供的直流电源呈低阻抗，类似于恒压源。逆变器输出的电压为比较平直的矩形波，输出的交流电流则近似于正弦波。

为电压型逆变电路供电的电动机如果工作在再生制动状态下，由于直流侧电压的方向不易改变，要改变电流的方向，而把电能反馈到电网，就需要再加一套反并联的整流器，因此它适宜于不经常起动、制动和反转的拖动装置。电压型逆变器的种类比较多，这里我们主要介绍电压型单相半桥逆变电路和电压型三相逆变电路，可控器件采用全控型器件 GTR。

1. 电压型单相半桥逆变电路

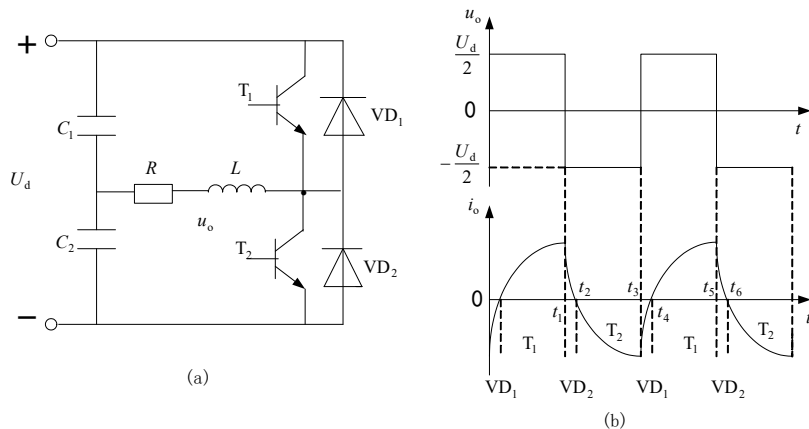


图 电压型单相半桥逆变电路
(a) 电路图 ; (b) 输出波形

该电路的工作原理:

如图设 T_1 和 T_2 的基极信号在一个周期内各有半周正偏、半周反偏，且两者互补。

假设 t_2 时刻以前， T_1 导通、 T_2 截止，则负载端电压 $u_o = \frac{1}{2}U_d$ 。

在 t_2 时刻，给 T_1 加关断信号，给 T_2 加导通信号，电感作用的结果是电流不能发生突变，从而使得 VD_2 导通续流，负载端电压 $u_o = -\frac{1}{2}U_d$ ，回路电流慢慢减小。

t_3 时刻， i_o 降为零， VD_2 截止， T_2 导通，负载端电压 $u_o = -\frac{1}{2}U_d$ 。

在 t_4 时刻，给 T_2 加关断信号， T_1 加导通信号，此时 VD_1 导通，负载端电压 $u_o = \frac{1}{2}U_d$ 。

在 t_5 时刻， i_o 降为零， VD_1 截止， T_1 导通，负载端电压 $u_o = \frac{1}{2}U_d$ 。

由上面的分析可知，半桥逆变电路负载端电压波形为矩形波，电流波形接近于正弦波。当 T_1 或 T_2 导通时，负载电流与电压同方向，直流侧向负载提供能量；而当 VD_1 或 VD_2 导通时，负载电流方向与电压方向相反，负载中储存的能量反馈给直流侧，反馈的能量暂时储存在直流侧电容中，此时直流侧电容起着缓冲无功能量的作用。

半桥逆变电路的优点是简单，使用器件少。其缺点是输出交流电压的幅值仅为直流电源的一半，且直流侧需要两个电容器串联。因此，半桥逆变电路常用于几 kW 以下的小功率逆变电源。如果要提高负载端的电压幅值，可采用全桥逆变电路。

2. 全桥逆变电路

相当于两个半桥逆变电路组合而成。具体工作原理在此不再详述，请读者自行分析。

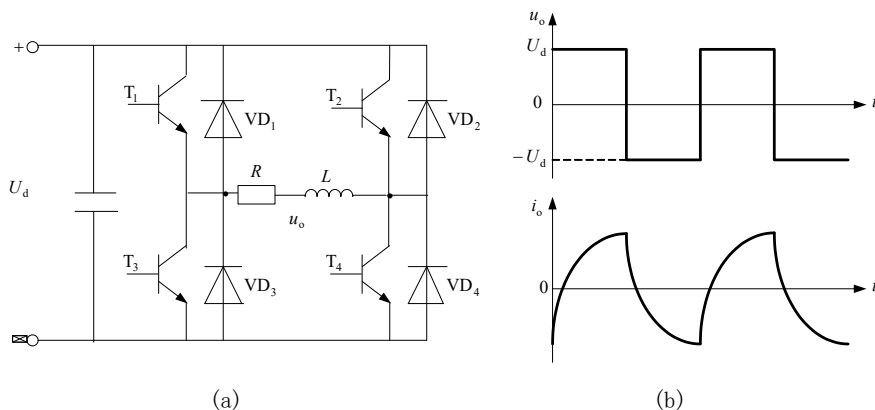


图 电压型全桥逆变电路

3. 电压型三相桥式逆变电路

电压型三相桥式逆变电路如下图所示， $T_1 \sim T_6$ 为全控型器件， $VD_1 \sim VD_6$ 为续流二极管， Z_a 、 Z_b 、 Z_c 是三相平衡负载。

本逆变器属于 180° 导电型，全控型器件的导通情况列于表 4-1。从表中可以看出：在一个周期内的任何时刻都有分属三相的三个开关器件同时导通，导通顺序是 $T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_3 \rightarrow T_4 \rightarrow T_5 \rightarrow T_6 \rightarrow T_1 \dots$ ，每个开关器件的导通角为 180° ，各触发信号依次相差 60° 。三相对应开关器件的导通角互差 120° 的三相电流同时流经负载。改变 6 个开关器件的驱动信号的频率，就能改变输出电压的频率。

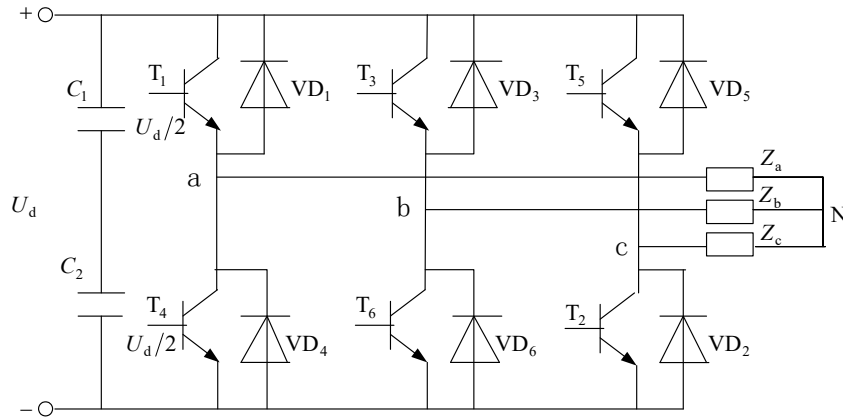


图 电压型三相桥式逆变器

表 4-1 全控型器件的导通情况

导通区间	导通晶闸管
$0^\circ \sim 60^\circ$	T_1 、 T_2 、 T_3
$60^\circ \sim 120^\circ$	T_2 、 T_3 、 T_4
$120^\circ \sim 180^\circ$	T_3 、 T_4 、 T_5
$180^\circ \sim 240^\circ$	T_4 、 T_5 、 T_6
$240^\circ \sim 300^\circ$	T_5 、 T_6 、 T_1
$300^\circ \sim 360^\circ$	T_6 、 T_1 、 T_2

下面分析各相负载相电压和线电压的波形。设负载为 Y 形连接，三相负载对称，中性点为 N。上图给出了电压型三相桥式逆变电路的工作波形。为了分析方便，将一个工作周期分成 6 个阶段。

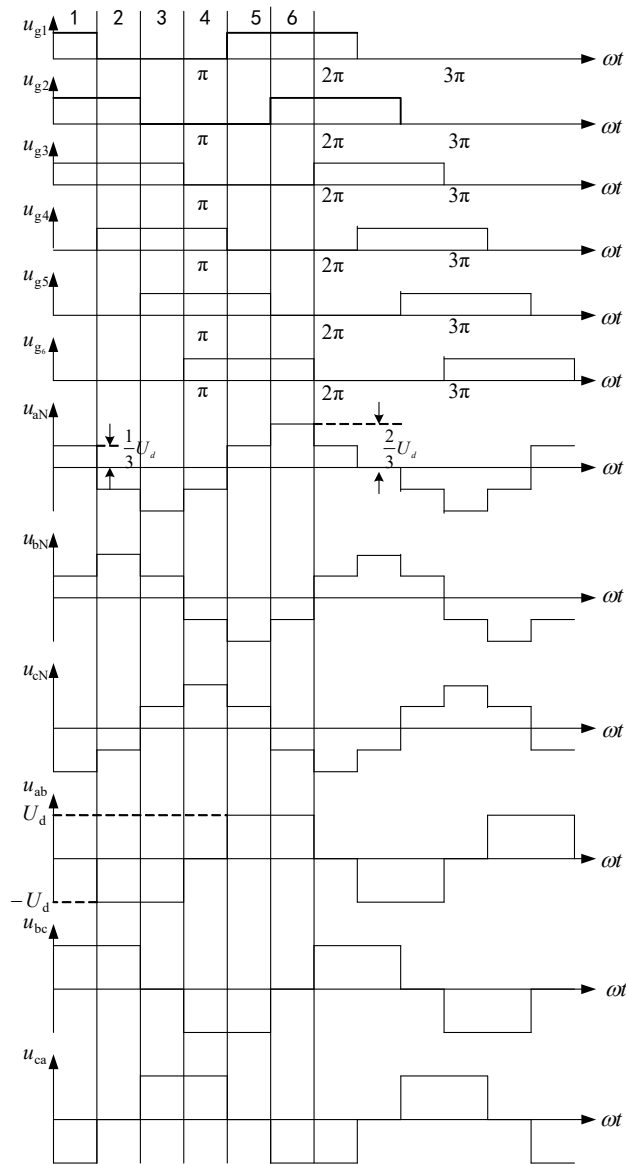


图 电压型三相桥式逆变电路波形图

在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 范围内， T_1 、 T_2 、 T_3 导通，此时逆变电路的等效电路如下图所示。

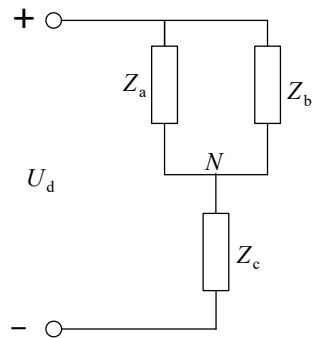


图 负载等效电路

输出相电压为：

$$u_{aN} = \frac{1}{3}U_d$$

$$u_{bN} = \frac{1}{3}U_d$$

$$u_{cN} = -\frac{2}{3}U_d$$

则输出线电压为:

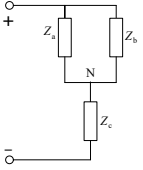
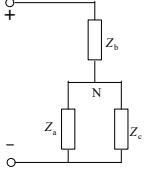
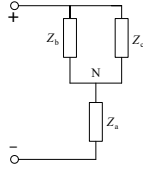
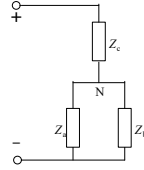
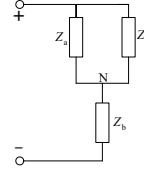
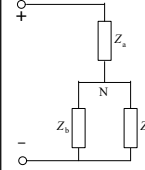
$$u_{ab} = u_{aN} - u_{bN} = 0$$

$$u_{bc} = u_{bN} - u_{cN} = U_d$$

$$u_{ca} = u_{cN} - u_{aN} = -U_d$$

同理可得其它 5 个阶段的相电压和线电压的值。具体见表 4-2。

表 4-2 输出相电压与线电压值

ωt	$0 \sim \frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{3} \sim \frac{2\pi}{3}$	$\frac{2\pi}{3} \sim \pi$	$\pi \sim \frac{4\pi}{3}$	$\frac{4\pi}{3} \sim \frac{5\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{3} \sim 2\pi$	
导通管子	T ₁ T ₂ T ₃	T ₂ T ₃ T ₄	T ₃ T ₄ T ₅	T ₄ T ₅ T ₆	T ₅ T ₆ T ₁	T ₆ T ₁ T ₂	
负载等值电路							
输出相电压	u_{aN}	$\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{2}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$	$\frac{1}{3}U_d$	$\frac{2}{3}U_d$
	u_{bN}	$\frac{1}{3}U_d$	$\frac{2}{3}U_d$	$\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{2}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$
	u_{cN}	$-\frac{2}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$	$\frac{1}{3}U_d$	$\frac{2}{3}U_d$	$\frac{1}{3}U_d$	$-\frac{1}{3}U_d$
输出线电压	u_{ab}	0	$-U_d$	$-U_d$	0	U_d	U_d
	u_{bc}	U_d	U_d	0	$-U_d$	$-U_d$	0
	u_{ca}	$-U_d$	0	U_d	U_d	0	$-U_d$

《电力电子技术 B》电子教案

第 13 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第四章 逆变电路			
教学节次及名称	4.3 电流型逆变电路 4.4 多重逆变电路和多电平逆变电路			
教学目的 与要求	掌握电流型逆变电路特点。 掌握单相电流型逆变电路的原理和工作波形。 掌握三相电流型逆变电路的分析方法。 了解多重和多电平逆变电路。			
教学重点	1. 单相电流型逆变电路工作原理，波形分析。 2. 三相电流型逆变电路工作原理。			
教学难点	1. 单相电流型逆变电路工作波形。 2. 多相多重逆变电路和多电平逆变电路工作原理。			
教学内容	1. 回顾逆变的基本概念，电压型逆变电路。〈5 分钟〉 2. 介绍单相电流型逆变电路。〈30 分钟〉 3. 分析三相电流型逆变电路。〈20 分钟〉 4. 介绍多重逆变电路。〈15 分钟〉 5. 介绍多电平逆变电路。〈15 分钟〉 6. 小结、答疑。〈5 分钟〉			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	掌握电流型逆变电路的特点，掌握单相电压型逆变电路的工作原理，波形分析。了解多重和多电平逆变电路的结构，工作原理。			
作业和思 考题	1. 电流型逆变电路有什么特点？ 2. 为什么电流型逆变电路中开关器件不用反并联续流二极管？			

教 案

电力电子技术 课 13讲

主讲人薛荣辉

课 题：电流型逆变电路

多重逆变电路和多电平逆变电路

目的任务：熟悉电流型逆变电路的工作原理，了解多重逆变电路和多电平逆变电路

重点难点：电路工作原理分析，波形分析

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

第 4 章 逆变电路

三、电流型逆变电路

直流侧为电流源的逆变电路称为电流型逆变电路。

特点：1) 直流侧接有大电感，相当于恒流源。2) 直流侧大电感，缓冲无功能量，不需要续流二极管。3) 逆变器输出的电流近似为矩形波，输出电压波形由负载阻抗决定，接近于正弦波。

电流型逆变器的发展较电压型逆变器晚，但由于它的许多优点，在交-直-交变频器中，日益受到重视。

1. 电流型单相桥式逆变电路

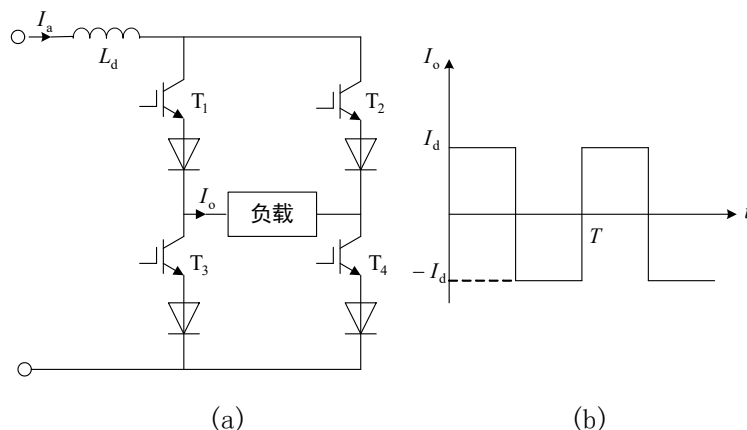


图 电流型单相桥式逆变电路

当 T_1 、 T_4 导通， T_2 、 T_3 关断时， $I_o = I_d$ ；反之， $I_o = -I_d$ 。当以频率 f 交替切换 T_1 、 T_4 和 T_2 、 T_3 时，则在负载上得到图 (b) 所示的电流波形。不论电路负载性质如何，其输出电流波形为矩形波，而输出电压波形则由负载性质决定。主电路采用的自关断器件，如果其反方向不能承受高电压时，则需在各开关器件支路串入二极管。

将图 (b) 所示的电流波形展开成傅利叶级数得

$$i_o = \frac{4I_d}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots \right)$$

其中基波幅值 I_{o1m} 和基波有效值 I_{o1} 分别为：

$$I_{o1m} = \frac{4I_d}{\pi} = 1.27I_d \quad (1)$$

$$I_{o1} = \frac{4I_d}{\sqrt{2}\pi} = 0.9I_d \quad (2)$$

2. 电流型三相桥式逆变电路

下图为电流型三相桥式逆变电路。电流型三相桥式逆变电路在同一时刻，不同相的上、下桥臂各有一个管子同时导通，在一个周期内，每个桥臂的管子导通 120° ，因此它属于 120° 导电方式。管子导通的顺序为 $T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow T_3 \rightarrow T_4 \rightarrow T_5 \rightarrow T_6$ ，相邻两个管子的导通间隔 60° 。

如下图 (b) 所示为电流型三相桥式逆变电路的输出电流波形，波形为正负脉宽各为 120° 的矩形波，与负载的性质无关。

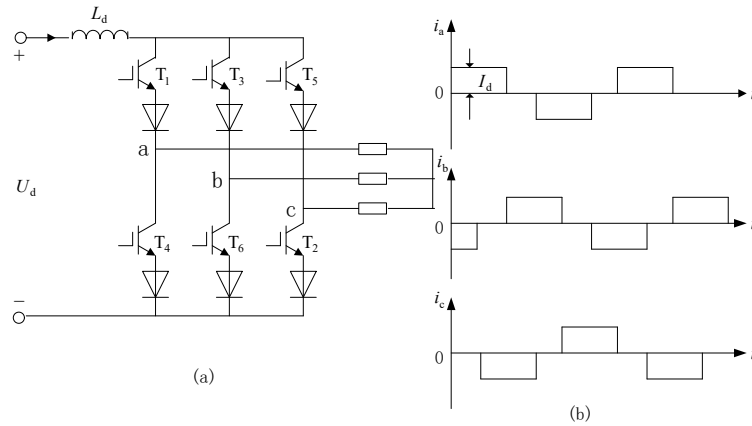


图 电流型三相桥式逆变电路

3. 并联谐振逆变电路

1) 主电路

下图为并联谐振逆变电路，负载电路中电容与炉圈 (L, R) 并联，换流是基于并联谐振的原理，因此称为并联谐振式逆变电路。直流电源 U_d (通过晶闸管可控整流电路而得) 连续可调，并联逆变电路将直流电逆变为中频交流电供给负载。直流侧串有滤波大电感 L_d ，因此属于电流型逆变器。因工作频率较高，故逆变电路 4 个桥臂的晶闸管采用快速晶闸管。

$L_1 \sim L_4$ 为电感量很小的电感，用于限制晶闸管的电流上升率 di/dt 。

电容器 C 的作用主要是提供无功功率，使负载电流 i_o 总是超前 u_o 一定角度，达到自动换流关断晶闸管的目的。

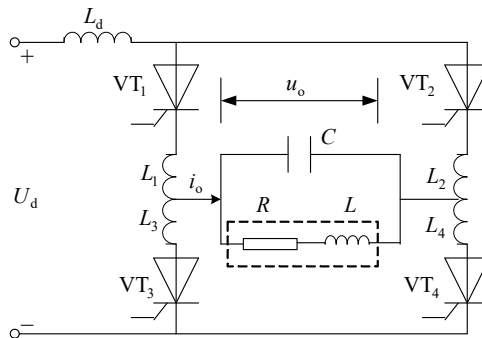


图 并联谐振逆变电路

2) 工作过程

下图所示为并联谐振逆变电路的工作过程。

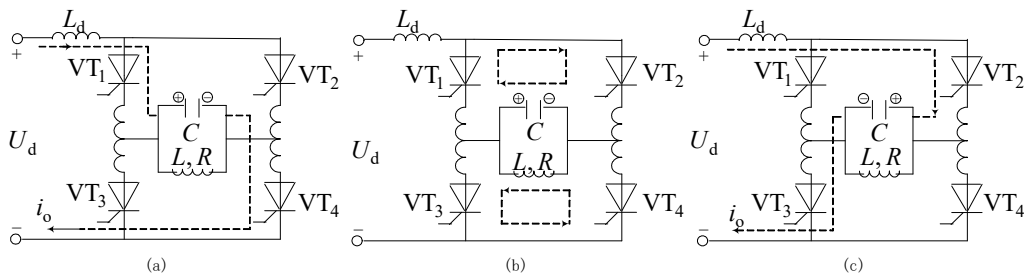


图 并联谐振逆变电路的工作过程

晶闸管 VT_1 、 VT_4 导通，电流 i_o 的路径如图 (a) 所示。由于电感 L_d 的滤波作用，整流

输出电流 i_d 近似为恒值，电容 C 上的电压为左正右负，负载电压 u_o 近似为矩形波。

在 t_2 时刻触发晶闸管 VT_2 、 VT_3 ，使得 VT_2 、 VT_3 导通，从而将负载端的电压加在 VT_1 、 VT_4 两端。由于 $L_1 \sim L_4$ 的作用，出现四个管子同时导通，回路电流方向如图 (b) 所示，流经 VT_1 、 VT_4 的电流慢慢减小，流经 VT_2 、 VT_3 的电流慢慢增加，随着时间的推移，流经 VT_1 、 VT_4 的电流减小到零，流经 VT_2 、 VT_3 的电流增加到 I_d ，此段时间称为换流时间，用 t_γ 表示。 VT_1 、 VT_4 中的电流减小到零以后，还需一段时间后才能恢复正向阻断，因此换流结束后，还要使 VT_1 、 VT_4 承受一段反压时间 t_β 才能保证管子的可靠关断， t_β 应大于晶闸管的关断时间 t_q 。

为保证换流可靠，晶闸管 VT_2 、 VT_3 必须在输出电压 u_o 过零前 t_f 时间触发， t_f 称为触发引前时间。按上述分析，可得

$$t_f = t_\gamma + kt_\beta$$

式中， k 为大于 1 的安全系数，一般取为 2~3。

负载的功率因数角 φ 由负载电流和电压的相位差决定，由图 3-37 可见：

$$t_\varphi = \frac{t_\gamma}{2} + t_\beta$$

或者

$$\varphi = \omega \left(\frac{t_\gamma}{2} + t_\beta \right)$$

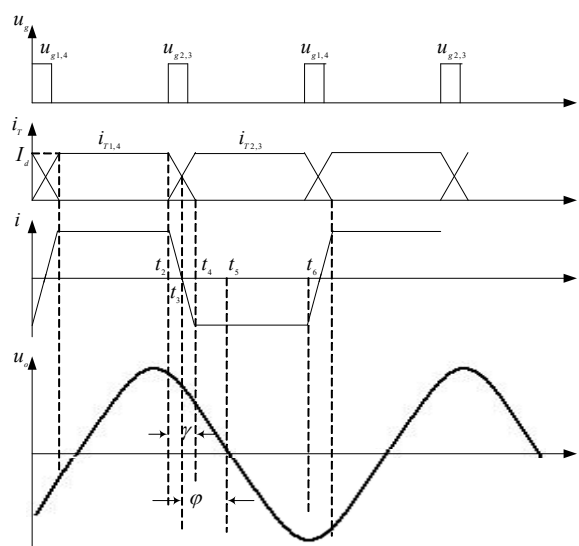


图 3-37 并联谐振逆变电路工作波形

到了 t_4 时刻，换流结束， VT_2 、 VT_3 正常导通，回路电流方向如图 (c) 所示。

四、电压型和电流型逆变器的比较

电压型和电流型逆变器的比较见表 4-3。

表 4-3 电压型与电流型逆变器的比较

比较项目 \ 类型	电压型	电流型
直流回路滤波环节	电容器	电抗器
输出电压波形	矩形	取决于负载,当负载为异步电动机时,为近似正弦波
输出电流波形	取决于逆变器电压与电动机的电动势,有较大谐波分量	矩形
输出动态电阻	小	大
再生制动	需要附加电源侧反并联逆变器	方便,不需附加设备
过电流及短路保护	较困难	容易
动态特性	较慢,用 PWM 则快	快
对开关管要求	耐压较低,关断时间要求短	耐压高
电路结构	较复杂	较简单
适用范围	用于多台电动机供电,不可逆拖动、稳速工作,快速性要求不高的场合	适用于单机拖动,频繁加、减速情况下运行,并需经常反向的场合

五. 多重逆变电路和多电平逆变电路

1. 基本知识

多重逆变电路把输出几个矩形波组合（串联或并联）起来，接近正弦。

多电平逆变电路输出较多电平，使输出接近正弦。

2. 多重逆变电路

{ 串联多重：多用于电压型逆变电路
 { 并联多重：多用于电流型逆变电路

1) 单相多重逆变电路

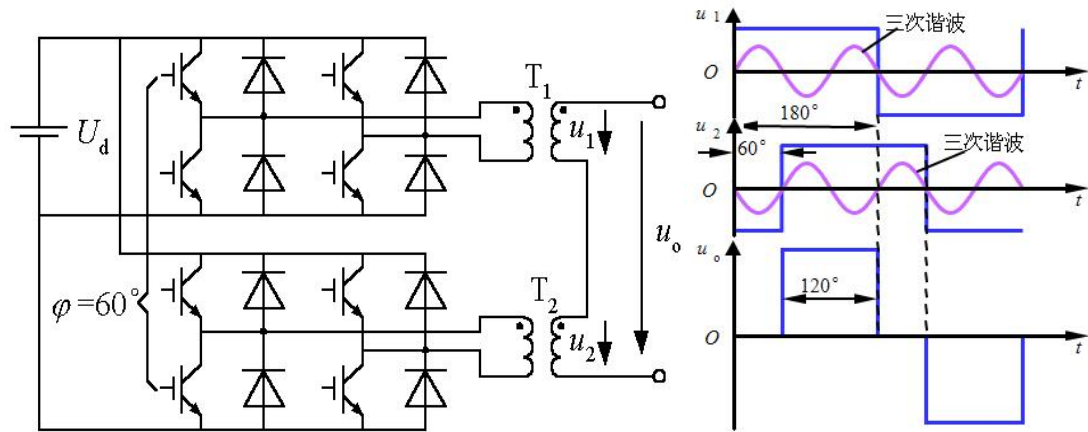
组成：两个单相全桥逆变电路组成，输出通过变压器 T1 和 T2 串联起来。

◆ 输出波形

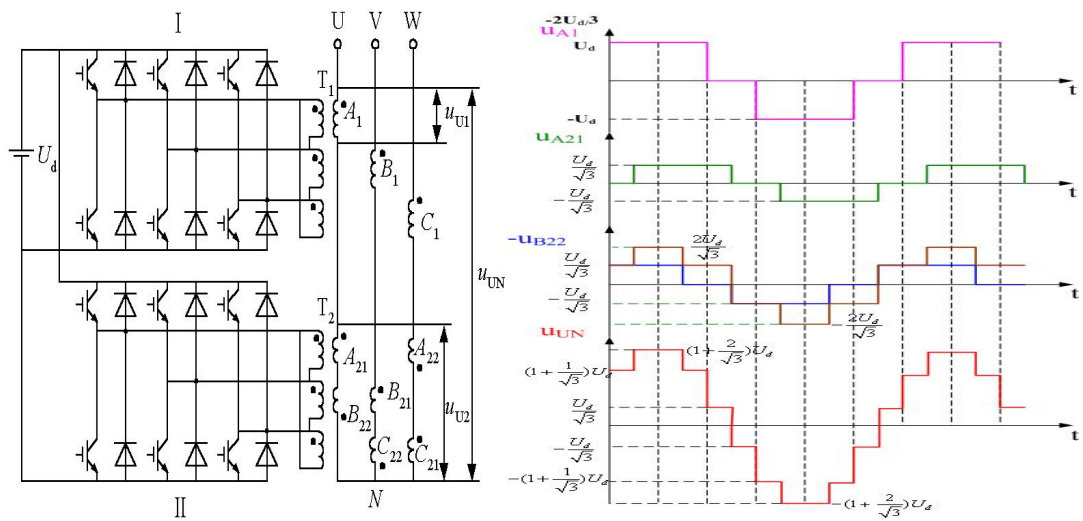
u_1 和 u_2 是 180° 矩形波。

u_1 和 u_2 相位错开 $=60^\circ$ ，变压器串联合成后，3 次谐波互相抵消，总输出电压中不含 3 次谐波。

u_o 波形是 120° 矩形波，含 $6k \pm 1$ 次谐波， $3k$ 次谐波都被抵消。



2) 三相多重逆变电路

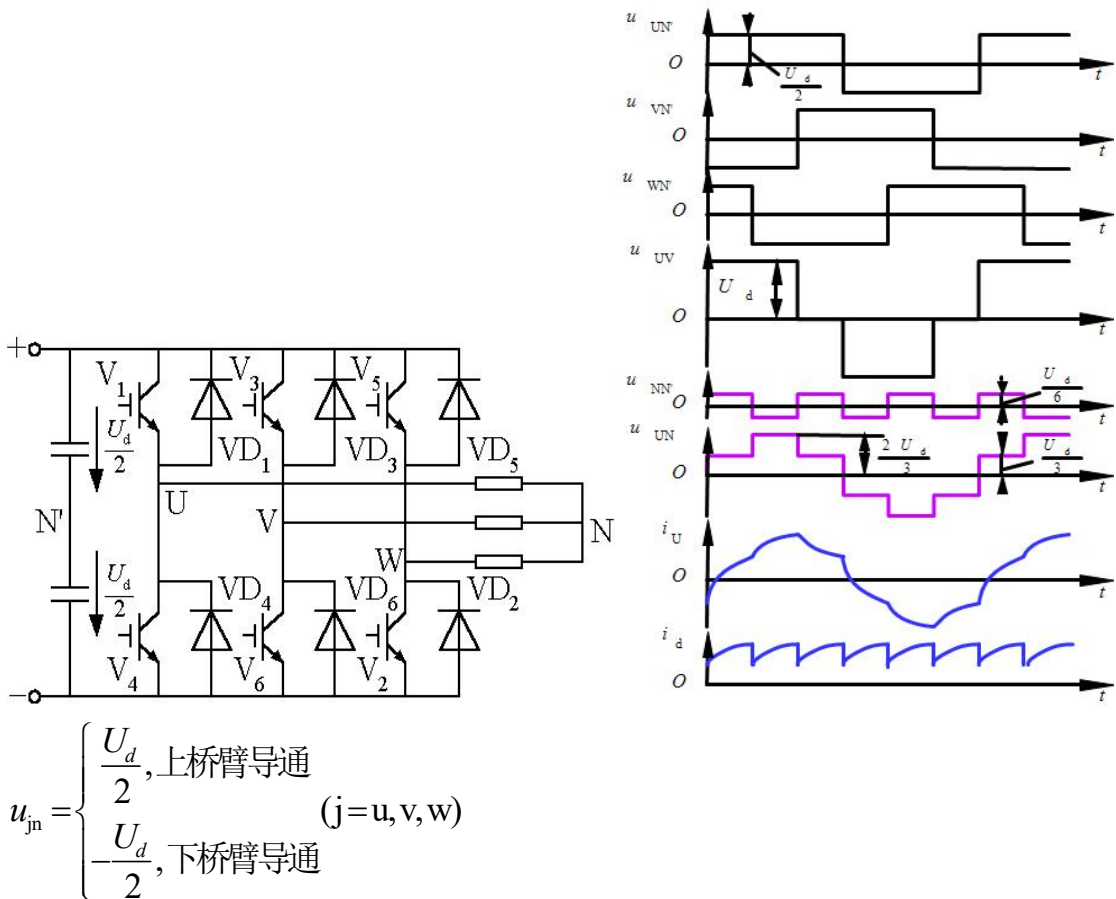


电路结构分析

- ☞ 由两个三相桥式逆变电路构成，输出通过变压器串联合成。
- ☞ 两个逆变电路均为 180° 导通方式。
- ☞ 工作时，逆变桥 II 的相位比逆变桥 I 滞后 30° 。

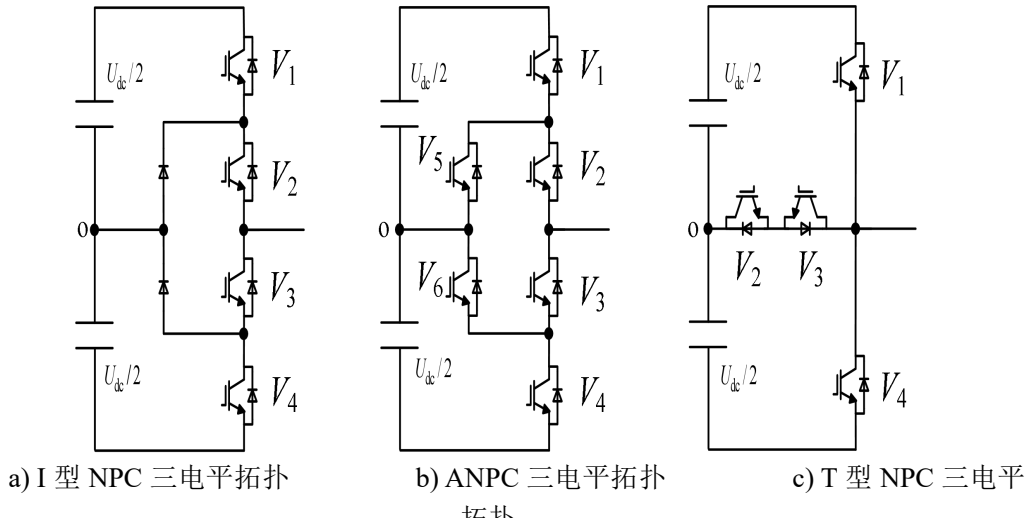
2、多电平逆变电路

a. 两电平逆变器 (Two-level Inverter)



b. 三电平逆变器 (Three-level Inverter)

中点钳位 (NPC) 三电平逆变器能获得更低的输出谐波和更高的效率。



1) I 型 NPC 三电平拓扑及换流

工作原理为：

- 当输出电压正半周期时，V1、V2 同时导通，即输出 $U_{dc}/2$ 电平，在续流状态下同时驱动 V2、V3（当电流正半周时 V2 导通，而当电流负半周时 V3 导通），即输出 0 电平；
- 当输出电压负半周期时，在有源供电状态下 V3、V4 同时导通，即输出 $-U_{dc}/2$ 电平，在续

流状态下同时驱动 V2、V3，即输出 0 电平。

由换流过程可以看出，I 型 NPC 三电平拓扑的 V2 和 V3 不承担开关损耗，而 V1 和 V4 承担了几乎所有的开关损耗。

2) ANPC 三电平拓扑及换流

ANPC 三电平拓扑增加了两个可控开关管，获得了更多的零续流状态，有效提高了系统的控制自由度，使得开关管的功率损耗更加均匀。

以输出电压正半周期为例。

存在 2 种续流状态（0 电平输出）：

- 续流状态 1——电流通过 V2、V5 续流
- 续流状态 2——电流通过 V3、V6 续流

由上述一个开关周期的换流过程可以看出，内管和外管各自承担了一半的开关损耗。

- 不过 ANPC 三电平拓扑比 I 型 NPC 三电平拓扑多出 2 个全控开关管，增加了系统成本；
- 另外 ANPC 三电平拓扑的开关状态比较多，控制较为复杂。

3) T 型 NPC 三电平拓扑及换流

T 型 NPC 三电平拓扑是一种改进型的 NPC 结构。

该电路使用两个串联的背靠背 IGBT 来实现双向开关，从而将输出钳位至直流侧中性点。

工作原理为：

当输出电压正半周期时，在有源状态下开关管 V1 导通（输出 $U_{dc}/2$ 电平），在续流状态下开关管 V2 和 V3 同时驱动（输出 0 电平）；

当输出电压负半周期时，在有源状态下开关管 V4 导通（输出 $-U_{dc}/2$ 电平），在续流状态下开关管 V2 和 V3 同时驱动（输出 0 电平）。

《电力电子技术 B》电子教案

第 14 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第五章 直流-直流变流电路			
教学节次及名称	5.1 基本斩波电路			
教学目的 与要求	掌握直流-直流变流电路的基本概念，分类。 掌握基本斩波电路。			
教学重点	1. 降压斩波电路、升压斩波电路工作原理，波形分析，参数计算。 2. 升降压斩波电路工作原理，波形分析，参数计算。			
教学难点	1. 斩波输出电流断续连续的判断。			
教学内容	<p>1. 介绍 DC-DC 变流技术基本知识。〈15 分钟〉</p> <p>2. 介绍降压斩波电路工作原理，波形分析，推导输出电压与输入电压之间的关系。〈25 分钟〉</p> <p>3. 介绍升压斩波电路工作原理，波形分析，推导输出电压与输入电压之间的关系。〈20 分钟〉</p> <p>4. 介绍升降压斩波电路，Cuk 工作原理，波形分析，推导输出电压与输入电压之间的关系。〈25 分钟〉</p> <p>5. 小结、答疑。〈5 分钟〉</p>			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	掌握基本斩波电路工作原理，波形分析，参数计算。			
作业和思 考题	1. 画出基本斩波电路，分析工作原理。			

教 案

电力电子技术 课 14 讲

主讲人 薛荣辉

课 题：基本斩波电路

目的任务：掌握升压斩波，降压斩波工作原理，熟悉升降压斩波电路工作原理

重点难点：升压斩波电路，降压斩波电路

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

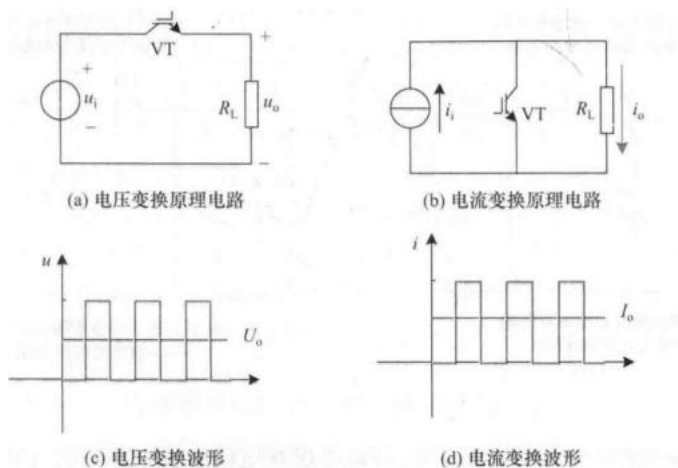
第 5 章 直流直流变流电路

基本知识点

1. 分类

DC-DC 直接变换---斩波 (降压, 升压, 升降压, Cuk)

DC-AC-DC 间接变换 逆变-变压器-整流(正激, 反激, 推挽)



2. 开关周期 T_s , 开关频率 $f_s=1/T_s$

3. 理想变换器条件

- 1) 开关管、二极管瞬间通断, 无损耗;
- 2) 电容电感均无损耗理想器件;
- 3) 线路阻抗为 0。

4. 开关器件电容、电感基本特性

1) 电容电流安秒平衡

$$\frac{1}{C} \int_0^{T_s} i_C dt = \frac{1}{C} \int_0^{t_{on}} i_C dt + \frac{1}{C} \int_0^{t_{off}} i_C dt = 0$$

$$\Rightarrow i_{C_{ton}} t_{on} + i_{C_{toff}} t_{off} = 0$$

2) 电感电压伏秒平衡

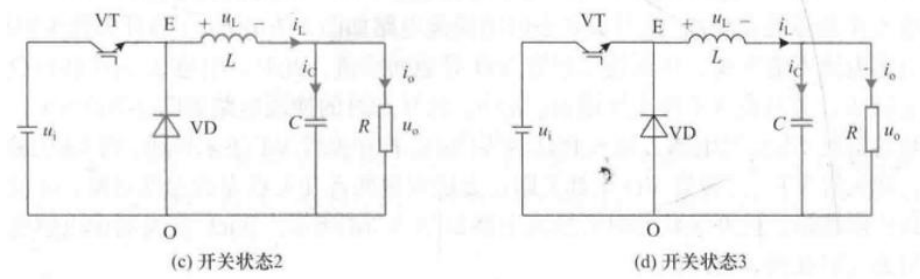
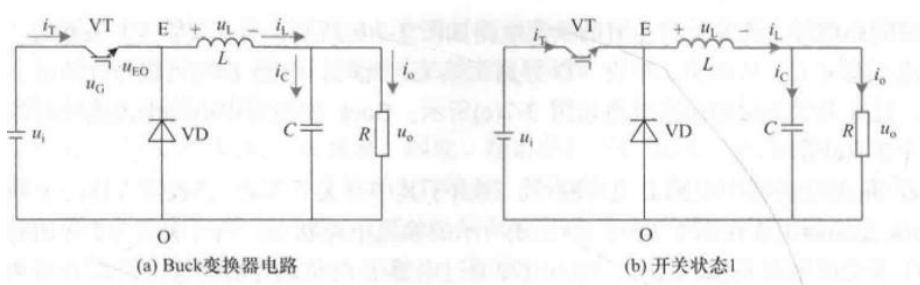
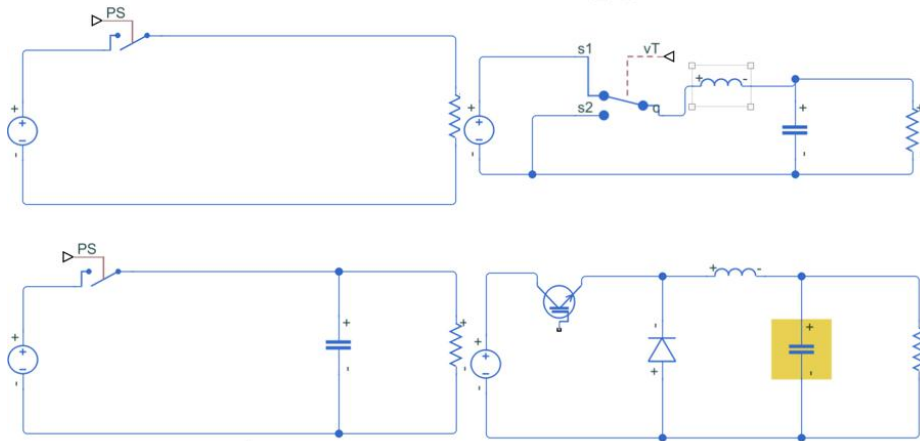
$$\frac{1}{L} \int_0^{T_s} u_L dt = \frac{1}{L} \int_0^{t_{on}} u_L dt + \frac{1}{L} \int_0^{t_{off}} u_L dt = 0$$

$$\Rightarrow u_{L_{ton}} t_{on} + u_{L_{toff}} t_{off} = 0$$

5.1 基本斩波电路

一、降压直流斩波电路

主要用于直流可调电源和直流电动机驱动中。



1. 工作原理

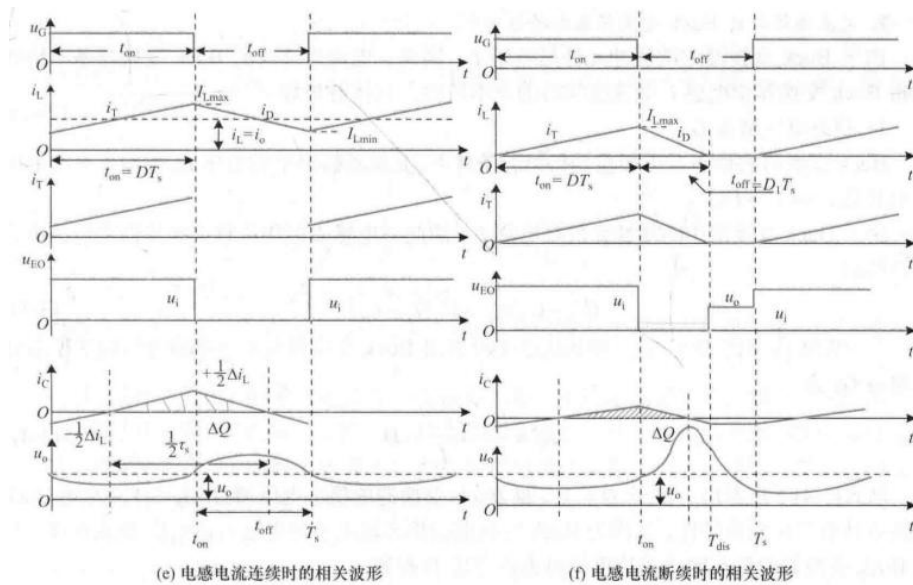


图 Buck 变换器不同换流状态时的换流电路及相关波形

当电感电流 $i > 0$ 时, Buck 变换器工作在电流连续状态;

当一段时间中存在 $i=0$ ，则 Buck 变换器工作在电流断续状态；

若只有某一瞬时时刻存在 $i=0$ ，则 Buck 变换器工作在临界状态，而临界状态是电流连续状态的一种特例。

2. 电流连续时基本特性

1) 稳态电压增益

$$(E - U_o)t_{on} + (-U_o)t_{off} = 0$$

$$\Rightarrow U_o = \frac{t_{on}}{T} E = \alpha E$$

$$G_V = \frac{U_o}{E} = \alpha$$

2) 稳态电流增益

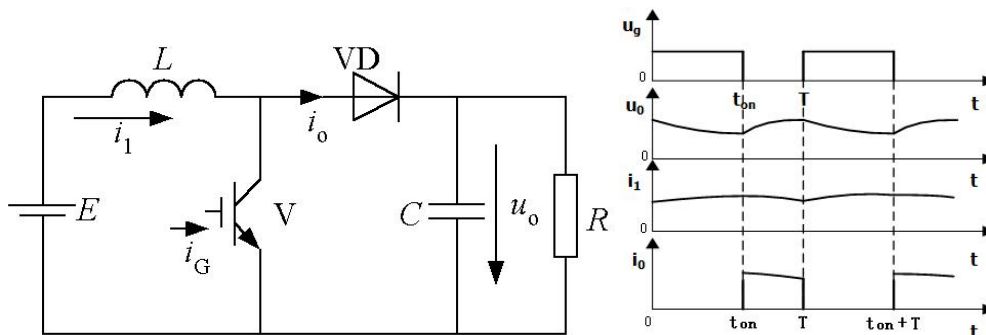
$$EI_i = U_o I_o$$

$$I_o = \frac{E}{U_o} I_i = \frac{1}{\alpha} I_i$$

$$\Rightarrow G_I = \frac{I_o}{I_i} = \frac{1}{\alpha}$$

降压斩波电路降压变换，增流变换。

二、升压斩波电路



1. 工作原理

$0 \leq t \leq t_{on}$ V 通，VD 止。

E -- L -- V，L 储能；

C -- R，电容向负载放电。

$t_{on} < t \leq T$ V 止，VD 通。

E -- L -- VD -- C，E 和 L 给 C 和负载充电。

2. 输入-输出电压关系

由电感元件伏秒平衡特性

$$E t_{on} + (E - U_o) t_{off} = 0$$

$$U_o = (T/t_{off})E$$

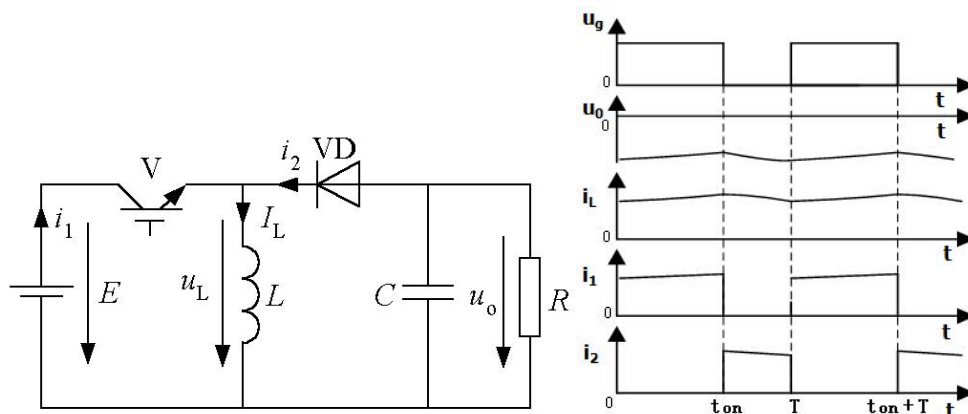
根据能量守恒

$$EI_i = U_o I_o$$

$$I_o = (t_{off}/T)I_i$$

升压斩波电路具有增压变换特性，降流变换特性

三、升-降压斩波电路



1.工作原理:

t_{on} 期间 V 导通, VD 截止:

$E-V-L$, 给 L 贮存能量;

$C-R$, 电容 C 向负载 R 放电。

t_{off} 期间 V 截止, VD 导通:

$L-C, R$, 电感 L 中贮存的能量向负载释放。

2.输入输出电压关系

根据电感伏秒平衡原理

$$E t_{on} + U_o t_{off} = 0$$

$$U_o = -(t_{on}/t_{off})E$$

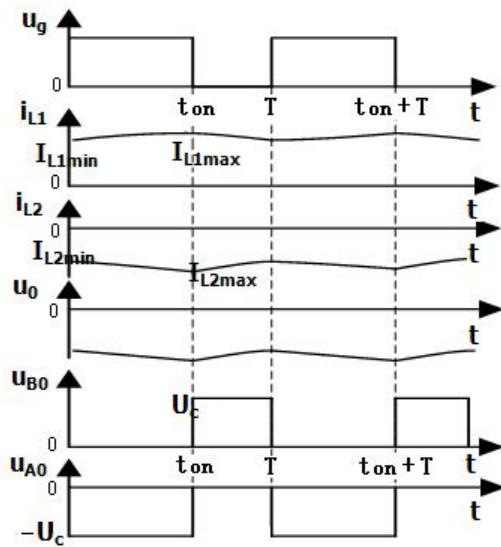
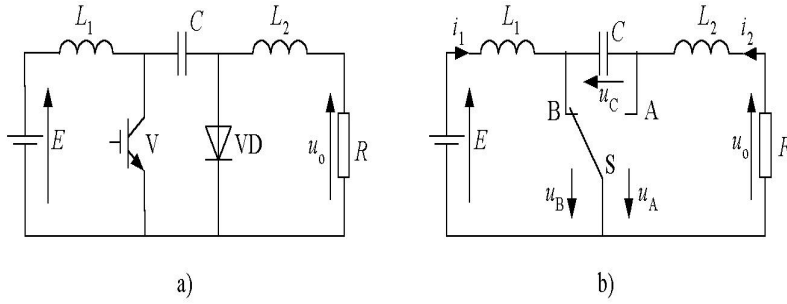
根据能量守恒

$$EI_1 = U_o I_2$$

$$I_2 = (E/U_o)I_1 = (t_{off}/t_{on})I_1$$

升降压斩波电路可以实现电压增压或降压变换。

四、Cuk Chopper



1.工作原理

V 导通时，E—L1—V 回路和 R—L2—C—V 回路分别流过电流。

V 关断时，E—L1—C—VD 回路和 R—L2—VD 回路分别流过电流。

输出电压的极性与电源电压极性相反。

2.输入输出电压关系

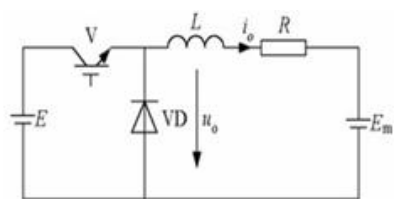
$$E = U_{B0} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{B0} dt = \frac{1}{T} \int_{t_{on}}^T U_C dt = \frac{t_{off}}{T} U_C$$

$$U_0 = U_{A0} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{A0} dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} (-U_C) dt = -\frac{t_{on}}{T} U_C$$

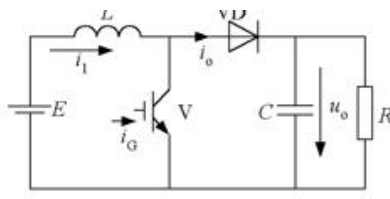
$$U_0 = -\frac{t_{on}}{t_{off}} E$$

与 boost-Buck 变换电路相比特点：

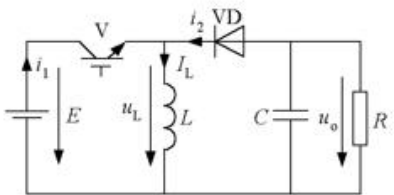
- 1) 直流电压传输率既可大于 1，也可以小于 1。
- 2) 输入电流波动 (iL1) 小。



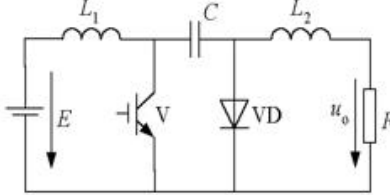
Buck



Boost



Boost-Buck



Cuk

	Buck	Boost	Boost-Buck	Cuk
输入电压	理想	理想	理想	理想
输入电流	纹波大	纹波小	纹波大	纹波小
输出电压	纹波大	纹波小	纹波小	纹波小
输出电流	纹波小	纹波大	纹波大	纹波小
常用器件	SCR、GTO、IGBT	MOSFET、IGBT	MOSFET、IGBT	MOSFET、IGBT
功率	较大	一般	一般	一般
用途	电力机车、电车等驱动	各种电子设备的直流供电电源	各种电子设备的直流供电电源	同左（可等效为电阻）
频率	一般	超音频、高频（为减小滤波电路产生的体积）	中、高频	中、高频
直流电源利用率	不高	高	不高	高
输出输入电压极性	同极性	同极性	反极性	反极性
输出输入电压比	ton/T	T/toff	ton/toff	ton/toff

《电力电子技术 B》电子教案

第 15 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第五章 直流-直流变流电路			
教学节次及名称	5.2 复合斩波电路和多相多重斩波电路			
教学目的 与要求	了解复合斩波电路构成，工作原理。 了解多相多重斩波电路。			
教学重点	电流可逆斩波电路工作原理。			
教学难点	复合斩波电路工作原理。			
教学内容	<ol style="list-style-type: none"> 1. 回顾基本斩波电路工作原理。〈20 分钟〉 2. 探讨电流可逆斩波电路构成，工作原理。〈25 分钟〉 3. 探讨桥式可逆斩波电路工作原理，探讨与全桥逆变电路的关系。〈20 分钟〉 4. 介绍多相多重斩波电路的工作原理。〈20 分钟〉 5. 小结、答疑。〈5 分钟〉 			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	掌握基本斩波电路，熟悉复合斩波电路，了解多相多重斩波电路			
作业和思 考题	电流可逆斩波电路负载为直流电机时，直流电机可以工作在哪几个象限？			

教 案

电力电子技术 课 15 讲

主讲人 薛荣辉

课 题：复合斩波电路和多相多重斩波电路

目的任务：掌握基本斩波电路，熟悉复合斩波电路，了解多相多重斩波电路

重点难点：复合斩波电路

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

5.2 复合斩波电路和多相多重斩波电路

基本知识点

将 DC-DC 变换器的输出电压（纵坐标）、输出电流（横坐标）构成四象限坐标系；

上述各类基本的 DC-DC 变换器由于各自的输出只能工作在输出电压、电流坐标系的第一象限，因此可称为单象限 DC-DC 变换器；

单象限 DC-DC 变换器的共同特征就是各自的输出电压、电流不可逆，即 DC-DC 变换器的能量传递不可逆。

实际应用时能量可逆的 DC-DC 变换器在驱动诸如阻感加反电势型一类的负载（如直流电动机）时是必不可少的；

当 DC-DC 变换器的输出电流或输出电压可逆时，变换器可在两象限运行，因此称这类 DC-DC 变换器为两象限 DC-DC 变换器；

当 DC-DC 变换器的输出电流、输出电压均可逆时，变换器可在四象限运行，因此称这类 DC-DC 变换器为四象限 DC-DC 变换器。

两象限 DC-DC 变换器和四象限 DC-DC 变换器的拓扑结构均可由基本的单象限 DC-DC 变换器拓扑组合而成；

单象限 DC-DC 变换器需要扩大容量时，也可以由基本的单象限 DC-DC 变换器拓扑组合而成；

一般将由基本的 DC-DC 变换器拓扑组合而成的 DC-DC 变换器统称为复合型 DC-DC 变换器。

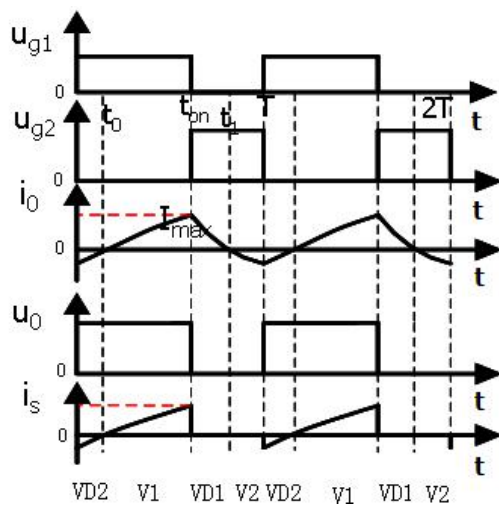
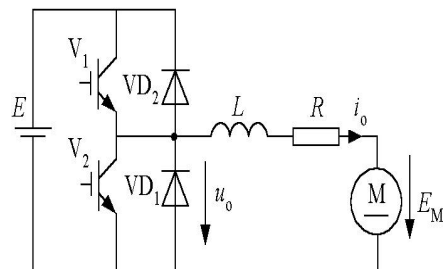
一、电流可逆斩波电路

1. 电路分析

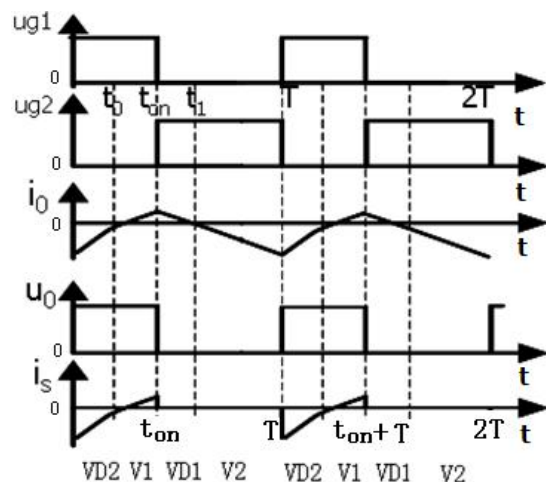
工作在 I、II 象限的 A 型斩波器的组合（Buck 和 Boost）。第一象限：V1、VD1 工作（Buck）。第二象限：V2、VD2 工作（Boost）。

2. 脉冲的要求

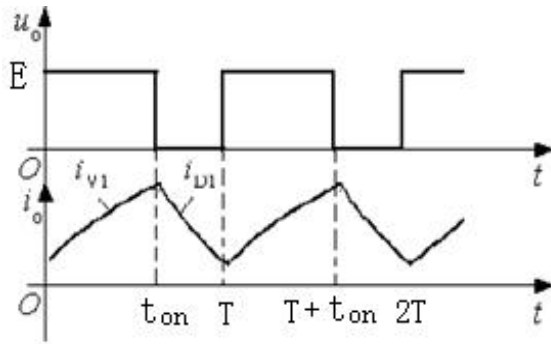
u_{g1} 与 u_{g2} 脉冲互补，中间应有足够的死区 t_d 。



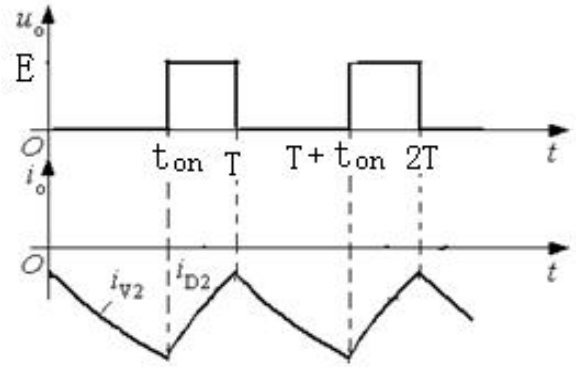
模式 1



模式 2



模式 3



模式 4

3. 工作状态

B 型斩波器的工作状况和 A 型斩波器在连续工作时没有本质的差别。以前 A 型斩波器主电路的分析均可用。

$$i_o = \frac{E - E_M}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + I_{\min} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad 0 \leq t \leq t_{on}$$

$$\text{其中 } \tau = \frac{L}{R}$$

$$i_o = -\frac{E_M}{R} (1 - e^{-\frac{t-t_{on}}{\tau}}) + I_{\max} e^{-\frac{t-t_{on}}{\tau}} \quad t_{on} \leq t \leq T$$

故用终值: $t = t_{on}$ 时 $i_d = I_{\max}$ 代入两式可得:
 $t = T$ 时 $i_d = I_{\min}$

$$I_{\max} = \frac{E}{R} \cdot \frac{e^{-\frac{t_{on}}{\tau}} - 1}{e^{-\frac{T}{\tau}} - 1} - \frac{E_M}{R} \quad I_{\min} = \frac{E}{R} \cdot \frac{e^{\frac{t_{on}}{\tau}} - 1}{e^{\frac{T}{\tau}} - 1} - \frac{E_M}{R}$$

4. 主要参数计算

1) 负载电压平均值

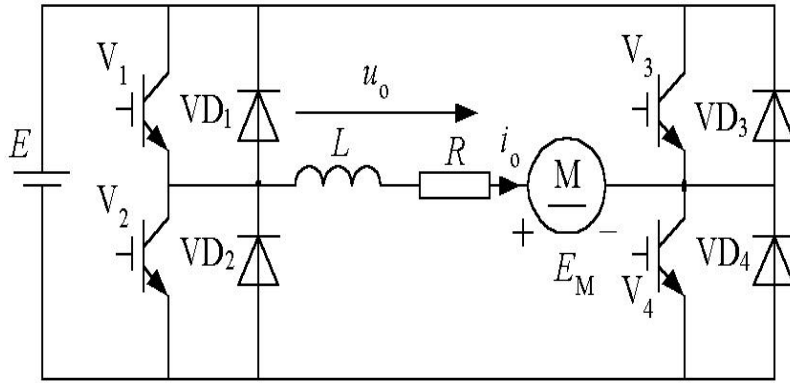
$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^{t_{on}} E dt = \frac{t_{on}}{T} E$$

2) 负载电流平均值

$$I_0 = \frac{U_0 - E_M}{R}$$

二、桥式可逆斩波电路

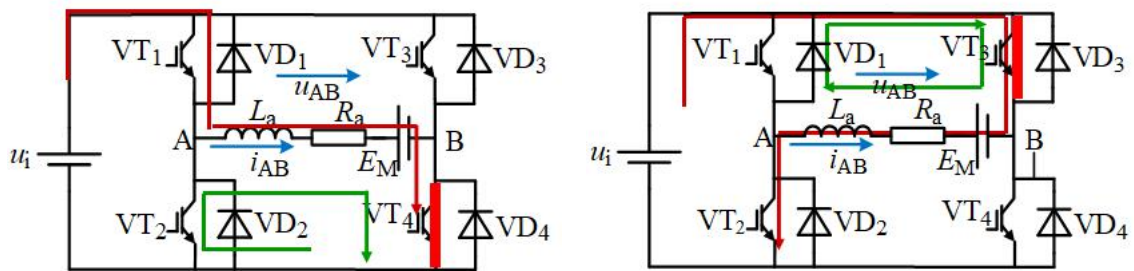
当需要使 DC-DC 变换器的输出电压、电流均可逆时,就必须设计四象限 DC-DC 变换器实际上,将两个对称工作的二象限 DC-DC 变换器组合便可以构成一个四象限 DC-DC 变换器,其电路结构如图所示。



桥式可逆斩波器

1.工作原理

- A)当 VT4 保持导通而 VT3 关断时，利用 VT2、VT1 进行斩波控制，则构成了一组电流可逆的二象限 DC-DC 变换器，此时 $U_{AB} \geq 0$ ，变换器运行在一、二象限；
 - B)当 VT3 保持导通而 VT4 关断时，利用 VT1、VT2 进行斩波控制，则构成了另一组电流可逆的二象限 DC-DC 变换器，此时 $U_{AB} \leq 0$ ，变换器运行在三、四象限；
- 四象限 DC-DC 变换器电路是典型的桥式可逆电路，具有电流可逆和电压可逆的特点。



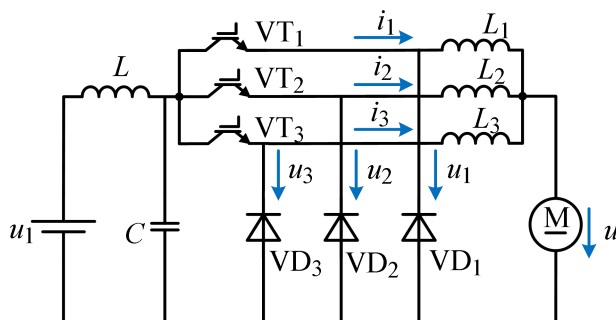
以上所讨论的二象限、四象限 DC-DC 变换器实际上是为了扩大 DC-DC 变换器的运行象限而由基本 DC-DC 变换器组合而成，因此，二象限、四象限 DC-DC 变换器实质上属于复合型 DC-DC 变换器

问题引出：

在实际的基本 DC-DC 变换器运用中，如果单台的 DC-DC 变换器容量不足时，是否可以考虑将基本 DC-DC 变换器并联以构成另一类复合型 DC-DC 变换器呢？

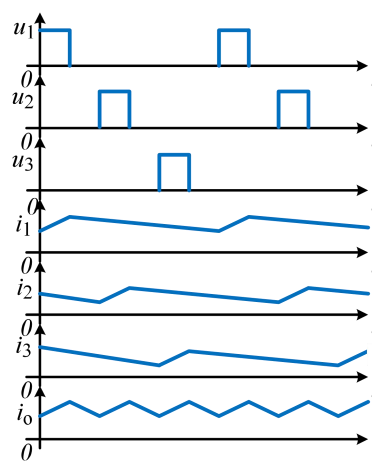
当将数个基本 DC-DC 变换器并联，不仅可以扩大变换器容量，而且通过适当的斩波控制还可以提高并联 DC-DC 变换器输出的等效开关频率，以降低变换器的输出谐波。

三、多相多重 DC-DC 变换器



表示出三个 Buck 变换器并联的复合型 DC-DC 变换器电路

如果将三个 Buck 变换器的开关管驱动信号在时间上分别相差 $1/3$ 开关周期，即采用移相斩波控制，那么这种三个 Buck 变换器并联的复合型 DC-DC 变换器输出的等效开关频率将是单个 Buck 变换器开关频率的三倍，从而有效地降低了变换器的输出电流谐波。由于输出等效开关频率的提高，在一定的输出谐波指标条件下，可有效地减少了输出滤波器的体积，降低变换器的损耗。这种采用移相斩波控制复合型 DC-DC 变换器，在提高了输出等效开关频率的同时，其单个的开关频率不变，因而变换器的开关损耗并不因此而增加。



所谓的“相”是指变换器输入侧（电源端）的各移相斩波控制的支路相数

所谓的“重”则是指变换器输出侧（负载端）的各移相斩波控制的支路重叠数

改变多相多重 DC-DC 变换器的输入输出模式

1) 针对上述三相三重 DC-DC 变换器电路，若其输入侧不变（共用一个直流电源），而输出侧分别驱动三个独立的负载，则称这种复合型 DC-DC 变换器为三相一重 DC-DC 变换器。在一个开关周期内，复合型 DC-DC 变换器的输入电流脉动三次，而输出电流脉动一次。

2) 针对上述三相三重 DC-DC 变换器电路，若其输出侧不变（共同驱动一个负载），而输入侧分别采用三个独立的直流电源，则称这种复合型 DC-DC 变换器为一相三重 DC-DC 变换器。在一个开关周期内，复合型 DC-DC 变换器的输入电流脉动一次，而输出电流脉动三次。

结论：根据变换器输入、输出电流在一个开关周期的脉动次数，就可以确定多相多重 DC-DC 变换器的“相”数和“重”数

例如：对于多个同样 DC-DC 变换器并联且采用移相控制的多相多重 DC-DC 变换器，若在一个开关周期内其输入电流脉动 m 次而输出电流脉动 n 次，则可称其为 m 相 n 重 DC-DC 变换器。

m 相 m 重 DC-DC 变换器的特性

每个变换器单元的占空比均为 D ；

每个变换器单元开关管的驱动信号错开 $1/m$ 的开关周期时间；

每个变换器单元的输出电压的平均值均相等且等于 m 相 m 重 DC-DC 变换器的输出平均电压；

每个变换器单元的平均输出电流则为输出负载平均电流的 $1/m$ 。

多相多重 DC-DC 变换器在扩大变换器容量和改善输入、输出电流波形的同时提高了变换器供电的可靠性；

基本 DC/DC 变换器的一般问题：

输入电压一般从电网直接经整流滤波取得，输出直接给负载供电，从而造成了低压供电负载与电网电压之间的直接电联系；

输出电压等级与输入电压等级若相差太大，势必影响调节控制范围。

《电力电子技术 B》电子教案

第 16 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第五章 直流-直流变流电路			
教学节次及名称	5.3 带隔离的直流-直流变流电路			
教学目的 与要求	掌握直-交-直电路的构成及特点。 了解正激电路，反激电路，推挽电路工作原理。			
教学重点	1. 正激电路工作原理。 2. 反激电路工作原理。			
教学难点	1. 变压器磁芯复位。			
教学内容	1. 复习直流-直流之间变换斩波电路。〈5 分钟〉 2. 介绍直-交-直变流电路。〈10 分钟〉 3. 介绍正激电路工作原理。〈25 分钟〉 4. 介绍反激电路工作原理。〈20 分钟〉 5. 介绍推挽电路工作原理。〈15 分钟〉 6. 探讨其他间接直流变换电路工作原理。〈10 分钟〉 7. 小结、答疑。〈5 分钟〉			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	掌握直交直变流电路分析方法。			
作业和思 考题	1. 直交直变流电路构成？			

教 案

电力电子技术 课 16 讲

主讲人 薛荣辉

课 题：带隔离的直流直流变流电路

目的任务：了解带隔离直流直流变流电路构成与特点，应用场合，熟悉正激电路，反激电路，推挽电路

重点难点：正激电路磁复位

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

引入:

基本 DC/DC 变换器的一般问题:

输入电压一般从电网直接经整流滤波取得, 输出直接给负载供电, 从而造成了低压供电负载与电网电压之间的直接电联系;

输出电压等级与输入电压等级若相差太大, 势必影响调节控制范围。

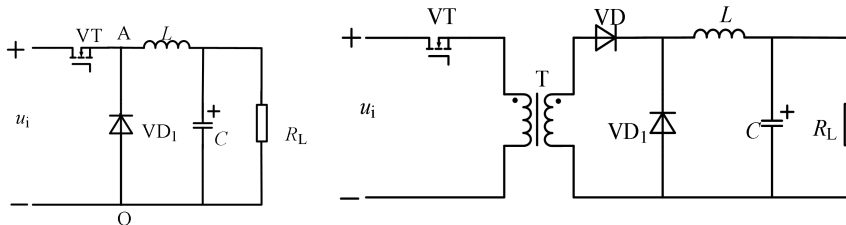
解决措施: 1.工频隔离型 2.高频隔离型



电路特点:

- ◆输出与输入隔离。
- ◆需要相互隔离的多路输出。
- ◆输出电压与输入电压比远小于 1 或远大于 1。
- ◆交流环节工作频率较高, 可减小变压器和滤波电感、滤波电容的体积和重量。

一、正激电路---带隔离的 Buck 斩波电路



这种正激式隔离型 Buck 变换器, 变压器原边施加单方向的脉冲电压, 使变压器单向励磁——单端;

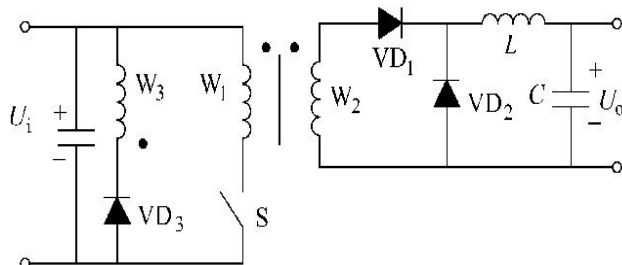
当 VT 导通时, 原边线圈加正向电压并通以正向电流, 磁芯中的磁感应强度将达到某一值; 由于磁芯的磁滞效应, 当 VT 关断时, 线圈电压或电流回到零, 而磁芯中磁通并不回到零, 这就是剩磁通;

剩磁通的累加可能导致磁芯饱和, 因此需要进行磁复位。

磁芯复位技术可以分成两种:

- 1) 将铁芯的剩磁能量自然地转移, 并在复位所加的电子元件上消耗掉, 或者把剩磁能量馈送到输入端或输出端 ;
- 2) 通过外部能量强迫铁芯磁复位。

隔离型 Buck 变换器大多采用将剩磁能量馈送到输入端的再生式磁芯复位方法进行磁复位!



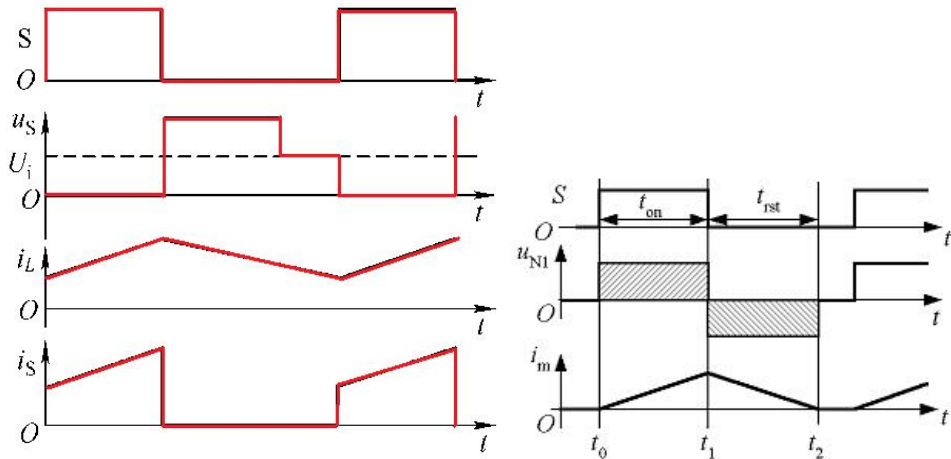
其中磁复位电路由绕组 W3 和箝位二极管 VD3 构成。

1. 工作原理

工作过程

S 开通, 变压器感应电动势, VD1 导通, 电源向负载提供能量, 电感上电流逐渐增大。

S 关断，VD1 截止，VD2 导通，电感释放能量，电感电流逐渐减小。



变压器的磁心复位

☞ S 开通后，变压器激磁电流增大，直到 S 关断，下一周期则在上一周期结束时的电流值上增加，导致变压器激磁电感饱和，损坏开关器件。

☞ 须使激磁电流在 S 关断后到下一次再开通时间内降回零，这一过程称为变压器的磁心复位。

S 关断后，W3 绕组感应电势极性为上正下负，使 VD3 导通，磁场能量回馈给电源，回路电流逐渐减小为零。

S 关断期间，开关承受的电压高于电源电压，为：

$$u_S = \left(1 + \frac{N_1}{N_3}\right)U_i$$

2. 输出电压

☞ 输出滤波电感电流连续时

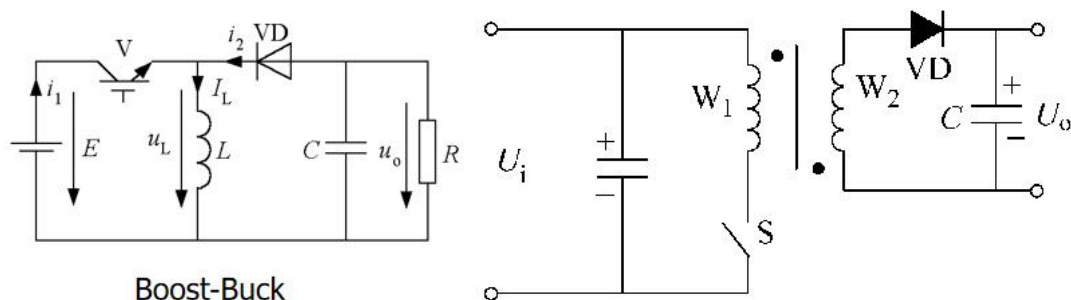
$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{N_2 t_{on}}{N_1 T} = \frac{N_2}{N_1} \alpha$$

3. 结论

输出电压仅决定于变换器输入电压、变压器的匝比和功率管的占空比，与负载电阻无关。

二、反激电路-----隔离型 Buck-Boost 变换器

1. 电路结构



对如图 (a) 所示的 Buck-Boost 直流变换器，若将中间的电感改为隔离变压器，即可导出隔离型 Buck-Boost 变换器。

当开关管 VT 导通时，变压器存储能量，二极管 VD 截止，单开关管导通时无功率传输；而当开关管 VT 关断时，则二极管 VD 导通，即有功率传输；

这种在开关管关断期间传输功率的隔离型 Buck-Boost 变换器称为反激式 (Fly-back) 变换器，如图 (b) 所示。

2. 工作原理

稳态工作过程

☞ S 开通，VD 截止， W_1 电流线性增长，电感储能增加。负载由电容供电。

☞ S 关断， W_1 电流被切断，变压器磁场能量通过 W_2 和 VD 向输出端释放，提供负载能量，电容充电。

反激：电源能量是在开关关断期间传递到负载侧的。

阶段 1：开关管 VT 导通——变压器（电感）储能阶段

阶段 2：开关管 VT 关断——电感能量释放阶段

阶段 3：开关管关断——滤波电容供电阶段

隔离型 Buck-Boost 变换器中能量转移的过程：

在 VT 导通期间先由电源输入的能量以磁能的形式储存于反激变压器（电感）中；

在 VT 截止期间再由反激变压器（电感）中储存的能量通过副边绕组传输给负载；

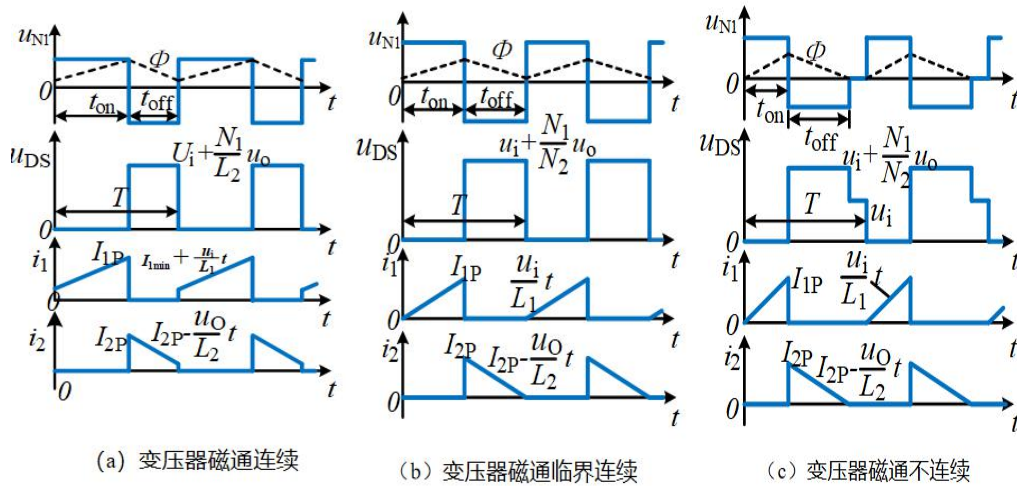
将具有上述这种能量转移过程的变换器也称为电感储能型隔离变换器。

根据功率管导通期间变压器（电感）储能在截止期间释放情况不同，单端反激式变换器有 3 种工作模式：

模式 1：变压器磁通连续工作模式

模式 2：变压器磁通临界连续工作模式

模式 3：变压器磁通断续工作模式



3. 参数

A) 电流连续时

开关器件承受的电压为

$$u_s = U_i + \frac{N_1}{N_2} U_o$$

变压器原边电压为

$$u_{N1} = \frac{N_1}{N_2} U_o$$

输出电压为

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{N_2 t_{on}}{N_1 t_{off}}$$

B) 电流断续时

开关器件承受的电压

$$u_s = U_i$$

变压器原边电压为

$$u_{N1} = 0$$

输出电压

$$U_o = U_i t_{on} \sqrt{\frac{R_L}{2 L_1 T}}$$

输出电压 u_o 与负载电阻 R_L 有关, R_L 愈大则输出电压愈高, 反之 R_L 愈小则输出电压愈低, 这是反激变换器的一个特点。

输出电压 u_o 与负载电阻 R_L 的二次方根成正比, 即在不应该让负载开路 (负载开路相当于负载电阻无穷大, u_o 会出现过电压) 必须接入一定的负载或者在电路中接入 “假负载”;

输出电压 u_o 随输入电压 u_i 的增大而增大;

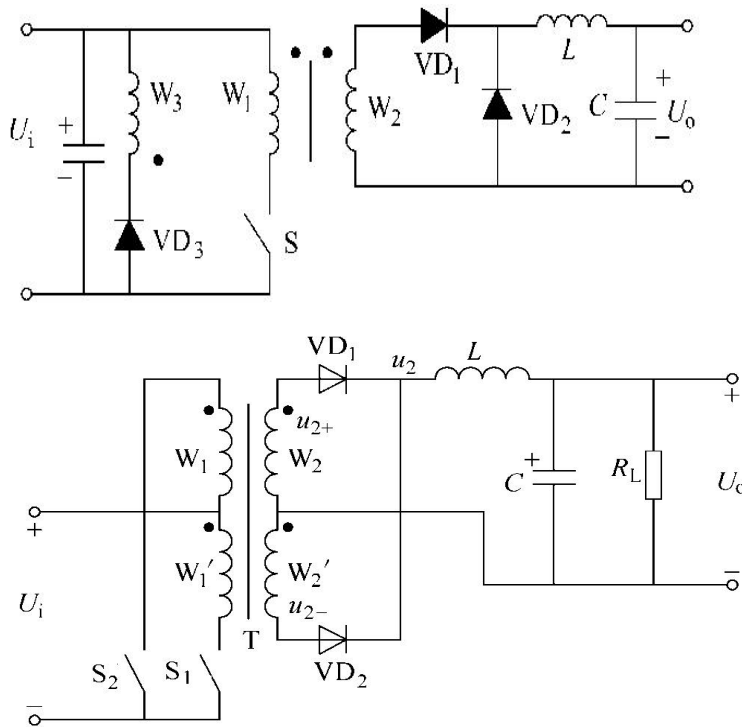
输出电压 u_o 随导通时间的增大而增大;

输出电压 u_o 随 N_1 绕组的电感量 L_1 的减小而增大。

三、推挽电路

正激变换器，如果需要通过双向磁化以提高变压器的利用率，可以考虑将两台正激变换器并联。若将两个开关管的控制信号占空比相同，在相位上相差 180° 的这种经过变压器副边绕组和整流二极管 VD 续流的变换器的输入和输出都并联起来对同一个负载供电，就构成了双正激变换器。

两个变压器共用一个磁芯。由于两个正激变换器的原边绕组和 IGBT 的反并联二极管互为对方的磁复位电路，可将原先的磁复位电路去掉，输出续流二极管可又用输出整流二极管取代。



1. 电路特点

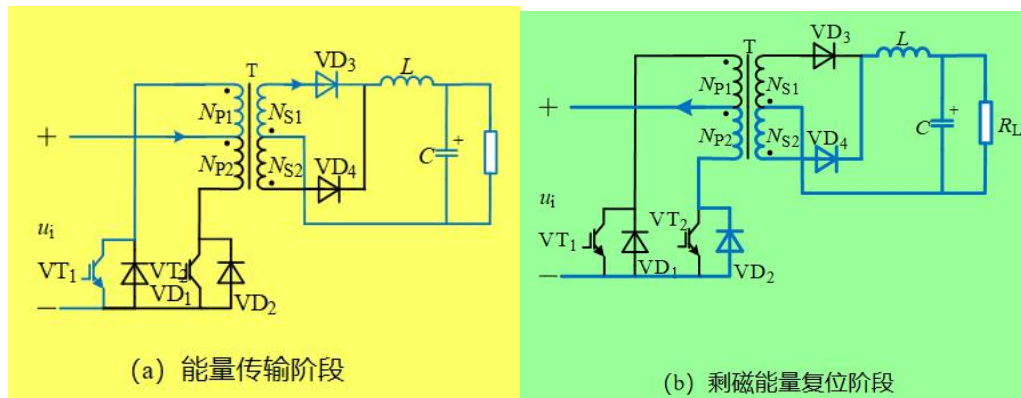
变压器有中心抽头。

二极管既做整流，又做续流。

可看作为两个单端正激组合而成，常用于多端输出电路。

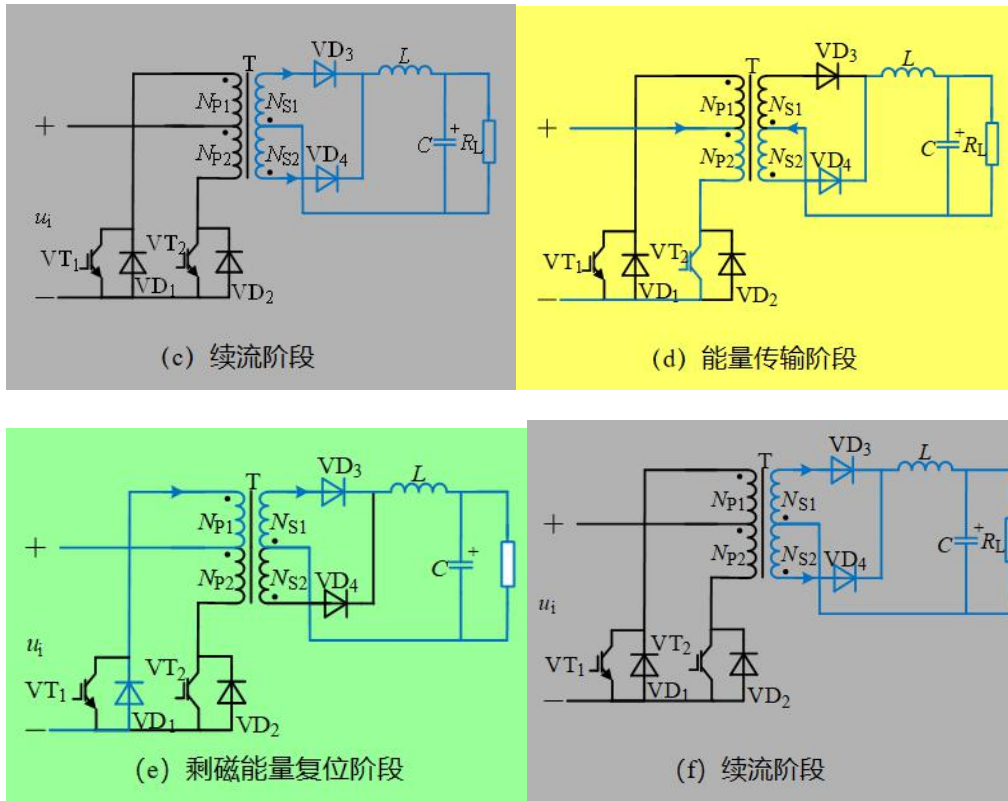
2. 工作原理

假定电路已工作在稳定状态，两个开关管 VT1、VT2 的驱动信号相位相差 180° 且考虑变压器剩磁能量的释放，推挽式变换器一个开关周期有 6 个工作阶段：



(a) 能量传输阶段

(b) 剩磁能量复位阶段



3.参数

假设 $N_1 = N_2 = N$, $N_1' = N_2' = N$, 忽略损耗, 且不考虑剩磁复位时间, 则输出电压由下式决定:

$$U_o = 2 \times \frac{N_s}{N_p} * \frac{t_{on}}{T} * U_i = \frac{N_s}{N_p} * 2D * U_i = 2D * U_i$$

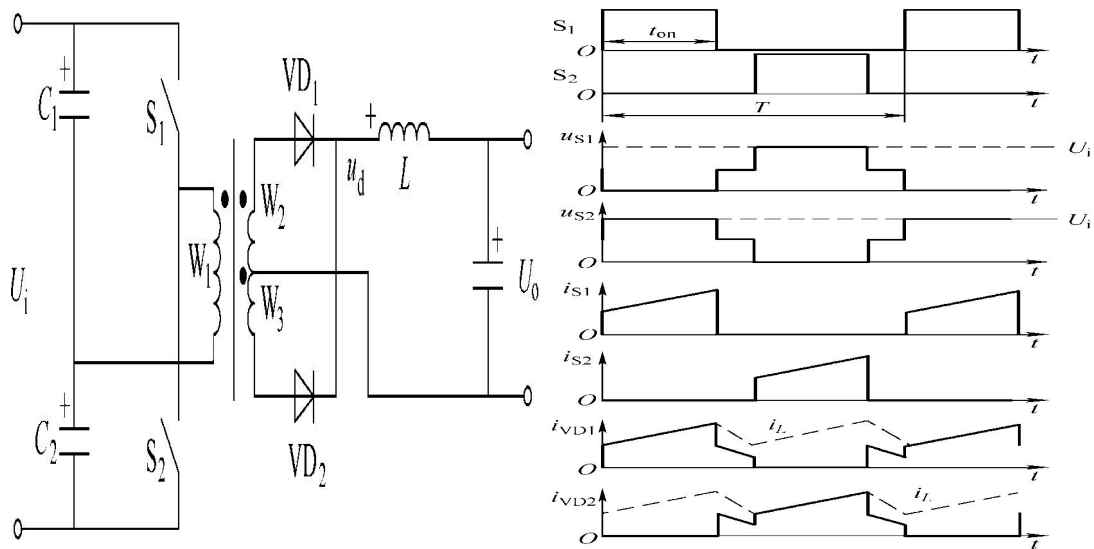
在推挽变换器中, 要求功率管的电压额定值必须至少是两倍的直流输入电压;

若直流变换器是从交流电网供电, 国内常为 50Hz、220V 电网, 这时从电网直接整流, 输出的峰值电压为 $1.4 \times 220 = 308V$, 这时开关管上的电压为 $2 \times 308 = 616V$ (忽略硅桥式整流器约 2V 的压降);

考虑 1.5 倍左右的安全裕量, 功率管的额定电压分别为 $1.5 \times 616 = 924V$ 。目前, 具有合适的开关速度、电流以及电压额定值均满足的管子不多, 且价格昂贵。

在从交流电网直接供电的情况下, 很少采用推挽电路, 在这种情况下, 通常采用双管正激、全桥或半桥变换器。

三、半桥型变换电路



在小功率逆变器设计中，为降低成本，常常采用如图 3-28(a)所示的半桥变换器电路；
 相对与推挽逆变器，其开关管上所承受的电压从 $2u_i$ 减小到 u_i ；
 在半桥变换器中，电容器的中点电位大约充电到 $u_i/2$ 的平均电位；
 半桥变换器中的变压器原边电压峰值为 $u_i/2$ （全桥时为 u_i ），这样对于同样的变压器副边输出功率，半桥变换器原边电流为全桥的两倍；

1.工作原理

S_1 与 S_2 交替导通，使变压器一次侧形成幅值为 $U_i/2$ 的交流电压，改变开关占空比，可改变二次侧整流电压 u_d 平均值，即改变了输出电压 U_o 。

S_1 导通时， VD_1 导通； S_2 导通时， VD_2 导通。当两个开关都关断时， VD_1 和 VD_2 都导通，各分担一半的电流。

S_1 或 S_2 导通时 L 电流逐渐上升；

两个开关都关断时， L 电流逐渐下降；

S_1 和 S_2 断态时承受的峰值电压均为 U_i 。

由于电容的隔直作用，半桥电路对由于两个开关导通时间不对称而造成的变压器一次侧电压的直流分量有自动平衡作用，因此不容易发生变压器的偏磁和直流磁饱和。

2.输出电压

滤波电感 L 的电流连续时

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{N_2}{N_1} \frac{t_{on}}{T}$$

输出电感电流不连续，输出电压 U_o 将高于连续时的计算值，并随负载减小而升高，在负载为零的极限情况下

$$U_o = \frac{N_2}{N_1} \frac{U_i}{2}$$

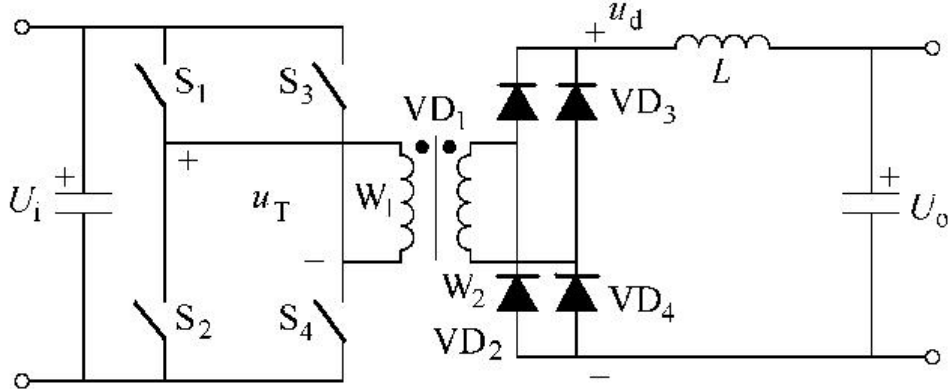
电路特点

- 变压器利用率高，无偏磁问题；
- 与全桥电路比，开关器件少，但器件承受电压高；
- 用于数百瓦至数千瓦的电源。

四、全桥型变换电路的结构及工作原理

电路结构

☞ 互为对角的两个开关同时导通，同一侧半桥上下两开关交替导通，变压器一次侧形成幅值为 U_i 的交流电压，改变占空比就可以改变输出电压。



1. 工作原理

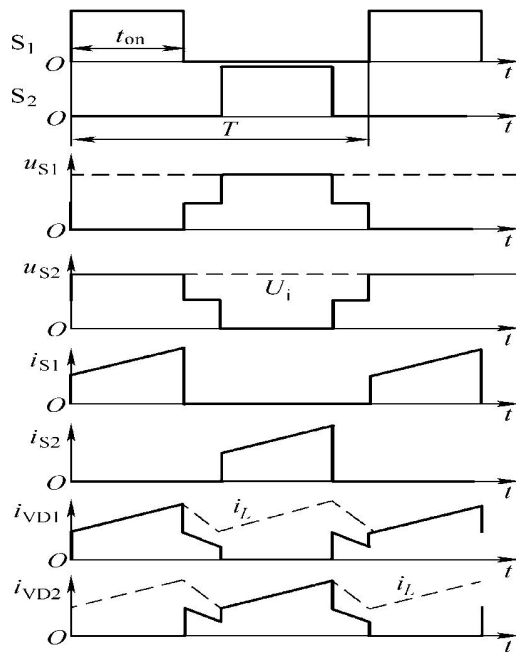
当 S_1 与 S_4 开通后， VD_1 和 VD_4 导通， L 电流逐渐上升。

☞ 当 S_2 与 S_3 开通后， VD_2 和 VD_3 导通， L 电流也上升。

☞ 4 个开关都关断时，4 个二极管都导通，各分担一半电感电流， L 电流逐渐下降。

S_1 和 S_2 断态时承受的峰值电压均为 U_i 。如 S_1 、 S_4 与 S_2 、 S_3 的导通时间不对称，则交流电压 u_T 中含有直流分量，在变压器一次侧产生很大的直流分量，造成磁路饱和，因此全桥电路应注意避免电压直流分量的产生，可在一次侧回路串一电容，阻断直流电流。

☞ 为避免同一侧半桥中上下两开关同时导通，每个开关占空比不能超过 50%，还应留有裕量。



2. 输出电压

滤波电感电流连续时

$$\frac{U_o}{U_i} = \frac{N_2}{N_1} \frac{2t_{on}}{T}$$

输出电感电流不连续，输出电压 U_o 将高于电流连续时的计算值，并随负载减小而升高，在负载为零的极限情况下

$$U_o = \frac{N_2}{N_1} U_i$$

《电力电子技术 B》电子教案

第 17 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第六章 交流-交流变流电路			
教学节次及名称	6.1 交流调压电路			
教学目的 与要求	掌握交流-交流变流电路基本概念。 掌握交流调压电路。			
教学重点	1. 单相交流调压电路。 2. 三相交流调压电路。			
教学难点	1. 交流调压电路带阻感性负载时，触发角，阻抗角，导通角之间的关系。			
教学内容	1. 介绍交流-交流变流电路。〈5 分钟〉 2. 讨论单相交流调压电路阻性负载工作原理，波形分析，参数计算。〈15 分钟〉 3. 介绍单相交流调压电路带阻感性负载工作原理，波形分析，参数计算。（特别注意阻抗角、触发角、导通角之间的关系。）〈20 分钟〉 4. 讲解例题 6-1。〈10 分钟〉 5. 介绍三相交流调压电路带阻感性负载工作原理，波形分析，参数计算。〈30 分钟〉 6. 探讨斩控式交流调压电路。〈5 分钟〉 7. 小结、答疑。〈5 分钟〉			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	掌握单相交流调压电路，掌握三相交流调压电路工作原理。			
作业和思 考题	1. 单相交流调压电路带阻感性负载时，触发角的范围？			

教 案

电力电子技术 课 17 讲

主讲人 薛荣辉

课 题：交流调压电路

目的任务：了解交流交流变换电路，掌握交流调压电路工作原理

重点难点：交流电力变换电路

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

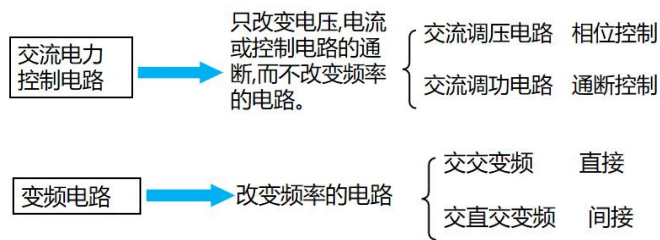
系主任（签字）：

年 月 日

本章主要讨论交流调压电路、交流电力控制电路和交-交变频电路的构成和基本工作原理。建议重点学习以下主要内容：

- 1) 交流调压电路构成的基本思想、单相相控式交流调压电路的工作原理、星形连接的三相相控式交流调压电路的工作原理和电路工作特点；
- 2) 交流调功电路的工作原理、晶闸管投切电容器电路的工作特点；
- 3) 相控式单相交-交变频器的电路构成特点、工作原理、调制方法以及输入输出特性；相控式三相交-交变频器的电路接线特点；矩阵式交-交变频器的基本概念、电路构成的基本思想、矩阵式交交变频电路的基本工作原理。

交流-交流变流电路——一种形式的交流变成另一种形式交流的电路，可改变相关的电压、电流、频率和相数等



交流电力控制电路

两个晶闸管反并联后串联在交流电路中，控制晶闸管就可控制交流电力；

交流调压电路——每半个周波控制晶闸管开通相位，调节输出电压有效值；

交流调功电路——以交流电周期为单位控制晶闸管通断，改变通断周期数的比，调节输出功率的平均值；

交流电力电子开关——并不着意调节输出平均功率，而只是根据需要接通或断开电路。

交流调功电路

在一些大惯性环节中，例如温度控制有时也采用通断控制，这种电路称交流调功电路；

通断控制一般在交流电压的过零点接通或关断，加在负载上是整数倍周期的交流电，在接通期间负载上承受的电压与流过的电流均是正弦波，与相位控制相比，对电网不会造成谐波污染，仅仅表现为负载整周期的通断；

交流电子开关

交流电子开关一般也采用通断控制，用来替代交流电路中的机械开关，常用于投切交流电力电容器以控制电网的无功功率；

交流调功电路和交流电子开关通称交流电力控制电路。

交流调压电路

一般采用相位控制，其特点是维持频率不变，仅改变输出电压的大小，它广泛应用于电炉温度控制、灯光调节、异步电机的软启动和调速等场合；

此外，在高压或低压大功率直流电源中，也常用交流调压电路调节变压器一次电压；

在这种电路中如采用晶闸管相控整流电路，高电压大功率可控直流电源就需要很多晶闸管串联，低电压大功率直流电源需要很多晶闸管并联，这都是十分不合理的。若采用交流调压电路在变压器一次侧调压，其电压电流值都适中，而在变压器二次侧只要用二极管整流就可以了。

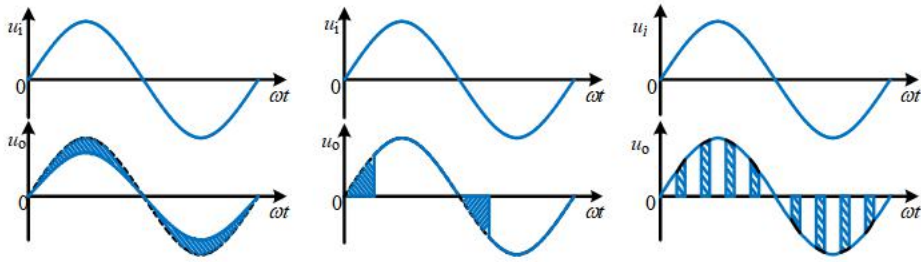
交流调压电路的应用：

灯光控制（如调光台灯和舞台灯光控制）；

异步电动机软启动；

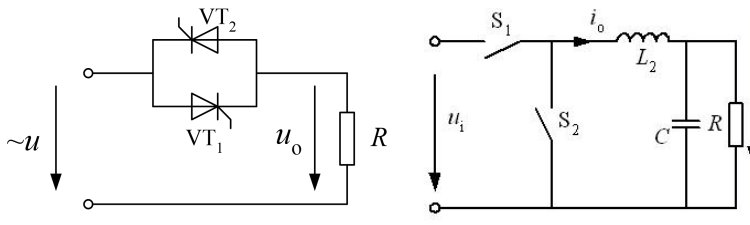
异步电动机调速；

供用电系统对无功功率的连续调节；
 在高压小电流或低压大电流直流电源中，用于调节变压器一次电压。
 几种交流调压方案的构思



(a) 自耦变压器交流调压方案 (b) 相控式交流调压方案 (c) 斩控式交流调压方案

图6-1 交流调压的几种方案比较



6.1 交流调压电路

用晶闸管对单相交流电压进行调压的电路有多种形式，可由一只双向晶闸管组成，也可以用两只普通的晶闸管或其它全控器件反并联组成。由双向晶闸管组成的单相交流调压电路线路简单，成本低。在工业加热，灯光控制，小容量感应电动机调速等场合得到了广泛的应用。以下，就其在不同应用条件下的工作原理进行分析。

1. 电阻负载

单相交流电压电路如图 5-8 (a) 所示，由一只双向晶闸管组成主电路，接电阻负载。

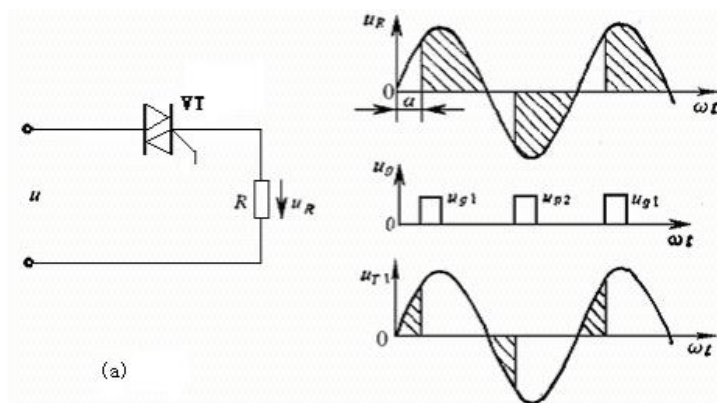


图 6-8 单相交流调压电阻负载电路

(a) 电路图 ; (b) 波形图

通过改变 α 可得到不同的输出电压的有效值，以达到交流调压的目的。

若电路由两只反并联单向晶闸管组成，则要用两组独立的触发电路分别控制两只晶闸管，在正、负半周对称的相应时刻 ($\omega t = \alpha$, $\omega t = \pi + \alpha$) 给触发脉冲，便与双向晶闸管电路一样，负载上得到同样的可调交流电压。

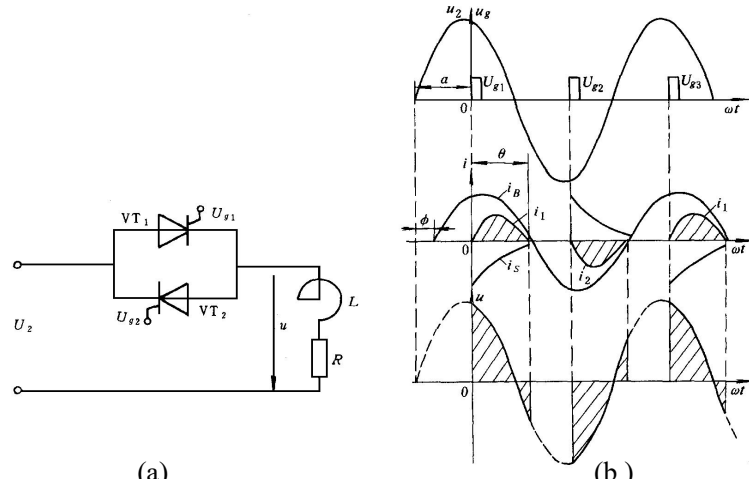


图 6-9 电感性负载单相交流调压电路

电阻负载单相交流调压的数量关系如下：

输出交流电压有效值和电流有效值

$$U_R = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}U_2 \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = U_2 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (6-7)$$

电流有效值

$$I = \frac{U_R}{R} = \frac{U_2}{R} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (6-8)$$

功率因数

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{U_R I}{U I} = \frac{U_R}{U} = \sqrt{\frac{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}{2\pi}} \quad (6-9)$$

2. 电感负载：

当电源电压反向过零时，由于电感产生感应电动势阻止电流变化，故电流不能立即为零，此时晶闸管导通角 θ 的大小，不但和控制角 α 有关，而且与负载阻抗角 $\varphi(\arctg \frac{\omega L}{R})$ 有关。当控制角为 α 时， U_{g1} 触发 VT_1 导通，流过 VT_1 的电流 i_1 有两个分量，即稳定分量 i_B 与自由分量 i_s ，其值分别为：

$$i_B = \frac{\sqrt{2}U_2}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$$

其中： $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ ， $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$

$$i_s = -\frac{\sqrt{2}U_2}{Z} \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$= -\frac{\sqrt{2}U_2}{Z} \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{\omega t}{\tau}} \quad (6-10)$$

其中： $\tau = \frac{L}{R}$ 为自由分量衰减时间常数。

流过晶闸管的电流即负载电流为

$$i_1 = i_s + i_B = \frac{\sqrt{2}U_2}{Z} [\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{\omega t}{\tau}}] \quad (6-11)$$

当 $\alpha > \varphi$ 时，电压电流波形如图 6-9 (b) 所示。随着电源电压下降，过零进入负半周，电路中电感储存的能量释放完毕，电流减小到零，VT₁ 管才关断。取 $\omega t = 0$ 时触发管子， $\omega t = \theta$ 时关断，代入式(6-11)可得：

$$\sin(\theta + \alpha - \varphi) = \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{\theta}{\tau}}$$

当取不同的 φ 角时， $\theta = f(\alpha)$ 曲线如图 6-10 所示。由图得见，当 $\alpha > \varphi$ 时， $\theta < 180^\circ$ 时，负载电路处于电流断续状态。当 $\alpha = \varphi$ 时， $\theta = 180^\circ$ ，电流处于临界连续状态。当 $\alpha < \varphi$ 时， θ 仍维持 180° ，电路已不起调压作用。

1) $\alpha > \varphi$

稳定分量 i_B 与自由分量 i_s 如图 6-9 (b) 所示，迭加后电流波形 i_1 的导通角 $\theta < 180^\circ$ ，正负半波电流断续。 α 越大， θ 越小，波形断续越严重。

2) $\alpha = \varphi$

自由分量 $i_s = 0$ 时， $i = i_B$ ， $\theta = 180^\circ$ 。正负半周电流处于临界连续状态，相当于晶闸管失去控制，负载上获得最大功率，此时电流波形滞后电压 $\varphi (= \alpha)$ 角。

3) $\alpha < \varphi$

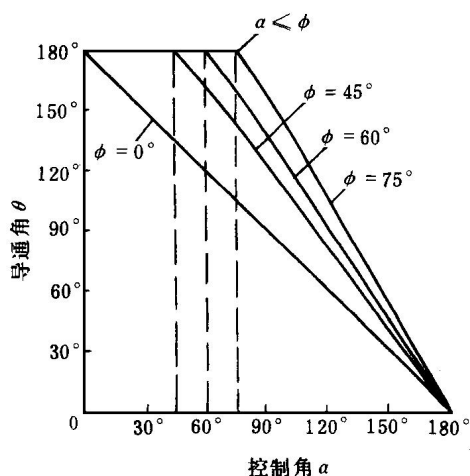


图 6-10 取不同的 φ 角时， $\theta = f(\alpha)$ 曲线图

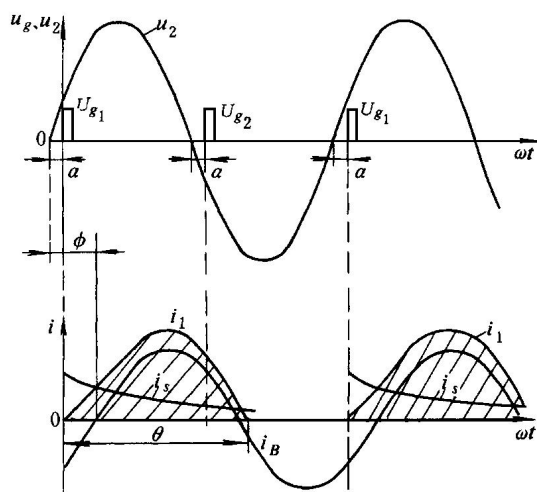


图 6-11 $\alpha < \varphi$ ，窄脉冲时电流波形

VT₁ 的导通角 $\theta > 180^\circ$ ，触发脉冲如图所示为窄脉冲，则当 u_{g2} 出现时，VT₁ 的电流还未到零，VT₂ 受反压不能触发导通；待 VT₁ 中电流变到零关断，VT₂ 开始受正压时， u_{g2} 脉冲已消失，故 VT₂ 无法导通。当第三个半周时又触发 VT₁ 管，这样使负载只有正半波，电流出现很大的直流分量，电路不能正常工作。

带感性负载时，晶闸管不能用窄脉冲触发，可采用宽脉冲或脉冲列。这样，在 $\alpha < \varphi$

时,虽然在刚开始触发晶闸管的几个周期内。两管的电流波形是不对称的,但是当负载电流中的自由分量衰减后,负载电流即得到完全对称连续的波形,电流滞后电源电压 φ 角。

综上所述,单相交流调压可归纳为以下三点:

(1) 带电阻性负载时,负载电流波形与单相桥式可控整流交流侧电流波形一致,改变控制角 α 可以改变负载电压有效值,达到交流调压的目的。

(2) 带感性负载时,不能用窄脉冲触发,否则当 $\alpha < \varphi$ 时会发生一个晶闸管无法导通的现象,电流出现很大的直流分量,会烧坏熔断器或晶闸管。

(3) 带大感性负载时,最小控制角 $\alpha_{\min} = \varphi$ (负载功率因数角),所以 α 的移相范围为 $\varphi \sim 180^\circ$,而带电阻性负载时移相范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

6.2 三相交流调压

单相交流调压适用于单相负载,对于三相负载,如三相电热炉、大容量的异步电动机软启动装置和高温感应加热等设备,若需要调压或通过调压调节输出功率,则可以使用三相交流调压电路来实现。三相调压电路有多种组成形式,下面介绍较常用的几种接线形式。

一、星型连接带中性线的三相交流调压电路

其工作原理和波形与单相交流相同,图 6-14 (a) 中晶闸管触发导通的顺序为 $VT_1 \rightarrow VT_2 \rightarrow VT_3 \rightarrow VT_4 \rightarrow VT_5 \rightarrow VT_6$, 图 5-14 (b) 中双向晶闸管的导通顺序也是 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6$, 由于存在中性线, 故不需要双窄脉冲或宽脉冲触发。

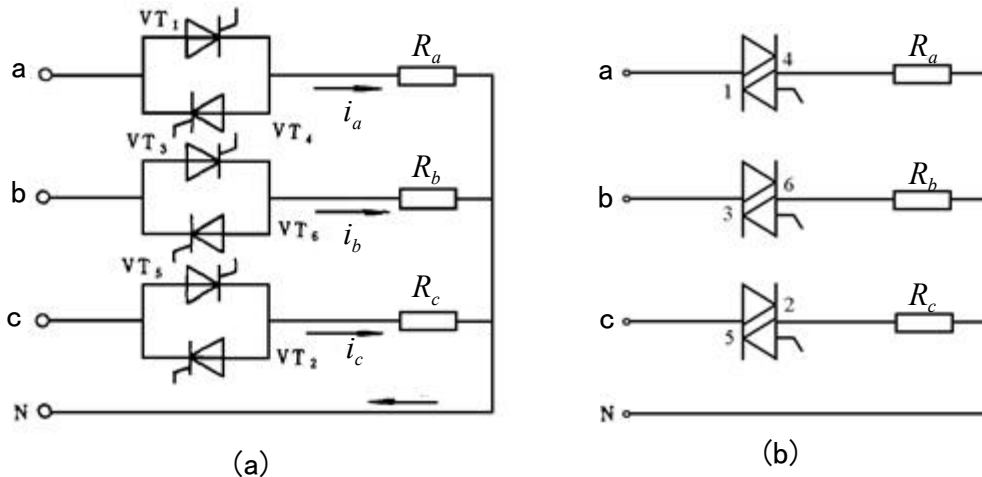


图 6-14 星形带中性线的三相交流调压电路

在三相正弦交流电路中,由于各相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 相位互差 120° ,因此中性线的电流 $i_N=0$ 。而在交流调压电路中,每相负载电流为正负对称的缺角正弦波,它包含较大的奇次谐波电流,主要是 3 次谐波电流。交流正弦波的各次谐波分量与控制角的关系如图 6-15 所示。当 $\alpha = 90^\circ$ 时,3 次谐波电流最大。在三相电路中各相 3 次谐波是同相的,因此中性线的电流 i_N 为一相 3 次谐波电流的三倍,数值较大。如经三柱式变压器供电,则 3 次谐波磁通不能在铁心中形成通路,出现较大的漏磁通,引起发热与噪声,带来干扰,因

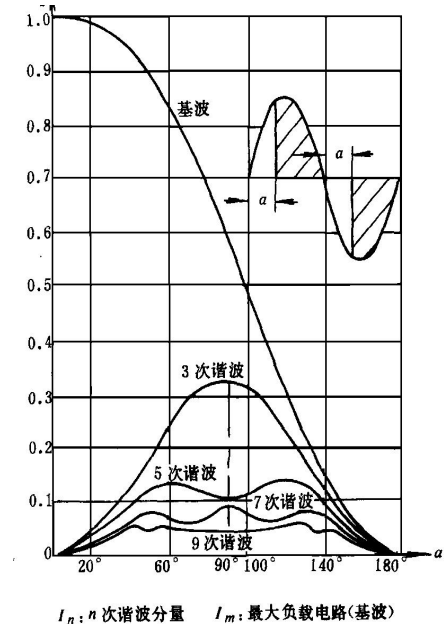


图 5-15 缺角正弦电流的谐波分量与控制

此这种电路的应用有一定的局限性。

二、晶闸管与负载连接成内三角形的三相交流调压电路

其优点是由于晶闸管串接在三角形内部，流过晶闸管的电流是相电流，故在同样线电流情况下，管子容量可降低；另外，线电流中无 3 的倍数次谐波分量，对电源影响与对通信、广播干扰都较小。缺点是必须能折成三个部分才能接成此种电路。

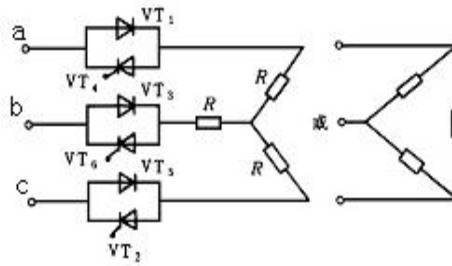
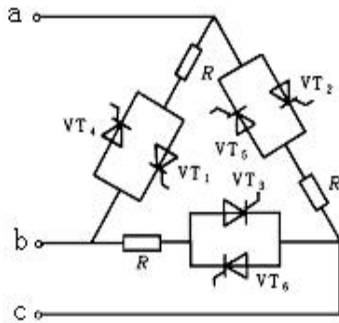


图 6-16 联接成内三角形的三相交流调压电路 图 6-17 三相三线交流调压电路

三、晶闸管反并联的三相三线交流调压电路

该接线形式如图 6-17 所示，负载可以联结成星形，也可以联结成三角形。所用触发电路和三相全控桥式整流电路一样，需采用宽脉冲或双窄脉冲。

现以电阻负载联结成星形为例，分析其工作原理。

(1) 控制角 $\alpha = 0^\circ$ 。 $\alpha = 0^\circ$ 即在相应的每相电压过零处给晶闸管触发脉冲，这就相当于把六只晶闸管换成六只整流二极管，因而三相正、反向电流都畅通，相当于一般的三相交流电路。当每相的负载电阻为 R 时，各相的电流为 $i = \frac{u_2}{R}$ 。晶闸管的导通顺序为 VT_1 、 VT_2 、 VT_3 、 VT_4 、 VT_5 、 VT_6 ；触发脉冲的间隔为 60° ；每管的导通角为 $\theta = 180^\circ$ ，除换流点外，每时刻均有三只晶闸管导通。

(2) 控制角 $\alpha = 60^\circ$

a 相晶闸管导通情况与电流波形如图 6-18 所示， ωt_1 时刻触发 VT_1 管导通，与原导通的 VT_6 管构成电流回路，此时在线电压 u_{ab} 的作用下 a 相电流为

$$i_a = \frac{u_{ab}}{2R}$$

ωt_2 时刻， VT_2 管被触发导通。此后， VT_1 与 VT_2 构成电流回路，此时在线电压 u_{ac} 的作用下 a 相电流为

$$i_a = \frac{u_{ac}}{2R}$$

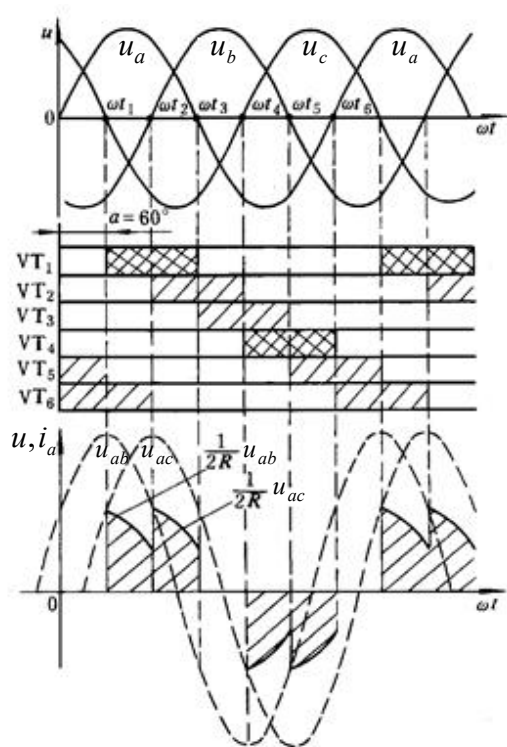


图 6-18 $\alpha = 60^\circ$ 时的波形

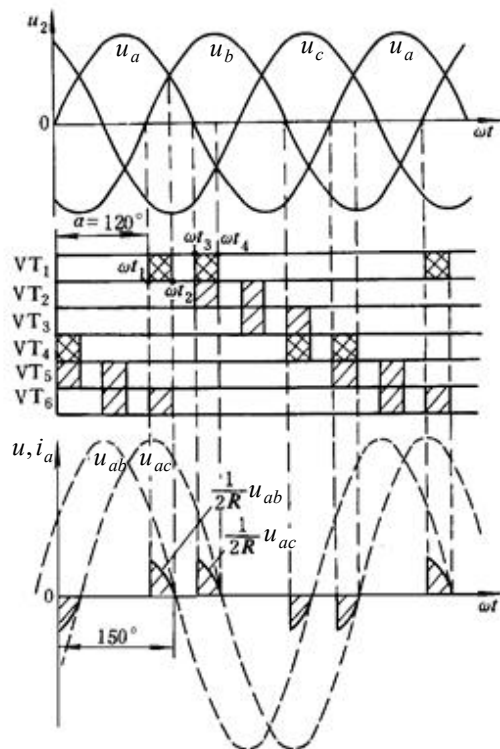


图 6-19 $\alpha = 120^\circ$ 时的波形

ωt_3 时刻, VT_1 管被关断, VT_4 管还未导通, 所以 $i_a = 0$ 。

ωt_4 时刻, VT_4 管被触发导通, i_a 在 u_{ab} 电压作用下, 经 VT_3 、 VT_4 构成电流回路。

同理, 在 $\omega t_5 \sim \omega t_6$ 期间, u_{ac} 电压经过 VT_4 、 VT_5 构成电流回路, 电流波形 i_a 如图 5-18 中剖面线所示。

同样分析可得到 i_b 、 i_c 的波形, 其波形与 i_a 相同, 只是相位互差 120° 。

当 $\alpha = 90^\circ$ 时, 电流开始断续, 图 6-19 为 $\alpha = 120^\circ$ 时的电流波形。

值得注意的是, 当 VT_1 与 VT_6 从 ωt_1 导通到 ωt_2 时, 由于 u_{ab} 电压过零反向, 强迫 VT_1 关断 (VT_1 管先导通了 30°)。当 ωt_3 时刻, VT_2 管被触发导通, 由于同时采用了脉宽大于 60° 的宽脉冲或双窄脉冲的触发方式, 故 VT_1 仍然有脉冲触发。此时在线电压 u_{ab} 的作用下, 经 VT_1 、 VT_2 管构成回路, 使 VT_1 又重新导通 30° 。从图 6-19 可见, 当 α 增加到 150° , $i_a = 0$ 。因此, 电阻性负载时电路的移相范围为 $0^\circ \sim 150^\circ$, 导通角 $\theta = \pi - \alpha$ 。

《电力电子技术 B》电子教案

第 18 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第六章 交流-交流变流电路			
教学节次及名称	6.2 其它交流电力控制电路 6.3 交-交变频电路			
教学目的 与要求	了解交流调功电路和交流电力电子开关。 掌握交-交直接变频电路。			
教学重点	1. 交流调压电路，交流调功电路，交流电力电子开关三种电路的异同。 2. 交交直接变频电路工作原理。			
教学难点	1. 交交变频电路工作原理。			
教学内容	1. 回顾交流调压电路。〈5 分钟〉 2. 介绍调功电路和交流电力电子开关的工作原理。〈10 分钟〉 3. 讨论交流电力控制电路特点。探讨交流调压电路，交流调功电路，交流电力电子开关三个电路的异同。〈10 分钟〉 4. 介绍单相交交变频电路工作原理，波形分析。〈45 分钟〉 5. 介绍三相交交变频电路接线方式。〈15 分钟〉 6. 小结、答疑。〈5 分钟〉			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	掌握单相交交变频电路工作原理，了解三相交交变频接线方式。			
作业和思 考题	1. 交交直接变频输出频率有什么来决定，频率有没有制约？			

教 案

电力电子技术 课 18 讲

主讲人 薛荣辉

课 题：交交变频电路

目的任务：掌握交交变频电路工作原理

重点难点：单相交交变频电路

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

6.3 交交变频电路

一、基本概念

1) 定义

把固定频率的交流电变换为频率可调的交流电的变换电路。

2) 分类

直接变频

间接变频

3) 用途

交流电机调速，风力发电等

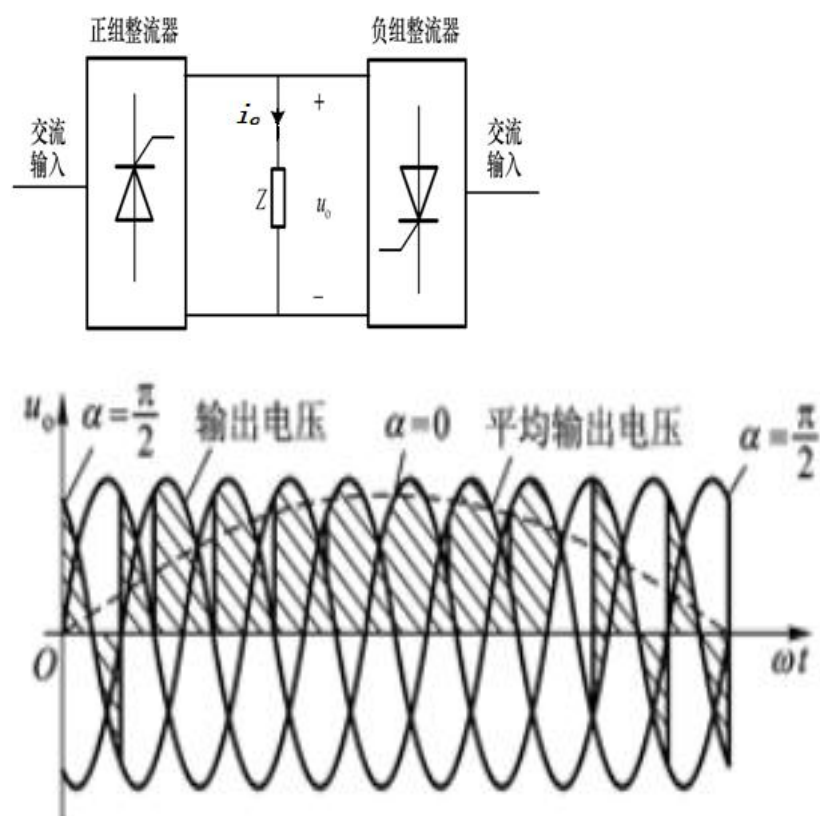
4) 主要控制方法

相控法---余弦交点法

主要思路：用整流电路的直流电压平均值去逼近交流输出电压的瞬时值。

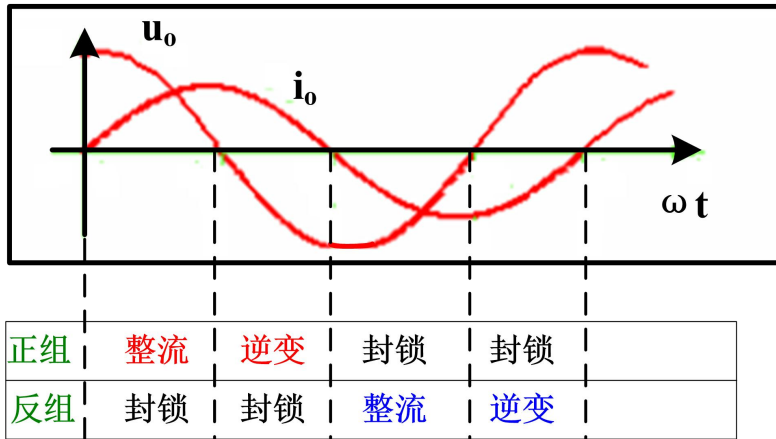
脉冲宽度调制

适用于矩阵变换器和间接变频器



二、单相交交变频

1. 基本工作原理（阻感性负载）



变换器组选择：由输出负载电流决定，与负载电压无关；

变换器工作状态：由输出负载电压和电流方向的异同决定；

同向：整流；

异向：逆变

2. 拓扑实现方式

单相-单相交交变频

三相-单相交交变频

3. 与直流电动机可逆调速差别

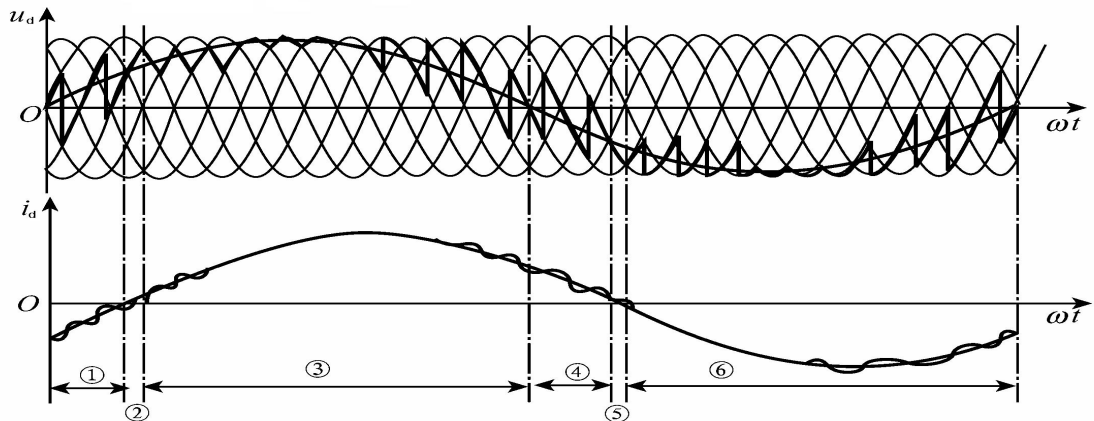
主电路：完全相同；

控制方法：不同，在每个负载周期内，正组变换器和反组变换器交替工作。

4. 余弦交点法

控制角不固定，随着输出电压幅值变化而变化。

调制思路：用整流电路的直流电压平均值去逼近交流输出电压的瞬时值。



①反组逆变 $i_o < 0, u_o > 0$

②无环流死区

③正组整流 $i_o > 0, u_o > 0$

④正组逆变 $i_o > 0, u_o < 0$

⑤无环流死区

⑥反组整流 $i_o < 0, u_o < 0$

实现方法:

1) 计算法

不同控制 α ，变换器输出的平均电压:

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha$$

理想输出的正弦波电压为:

$$u_d = U_{dm} \sin \omega t$$

某一时刻 t_1 变换器的控制角为:

$$\cos \alpha_1 = \frac{U_{dm}}{U_{d0}} \sin \omega t_1 = \gamma \sin \omega t_1$$

其中: γ 为输出电压比。

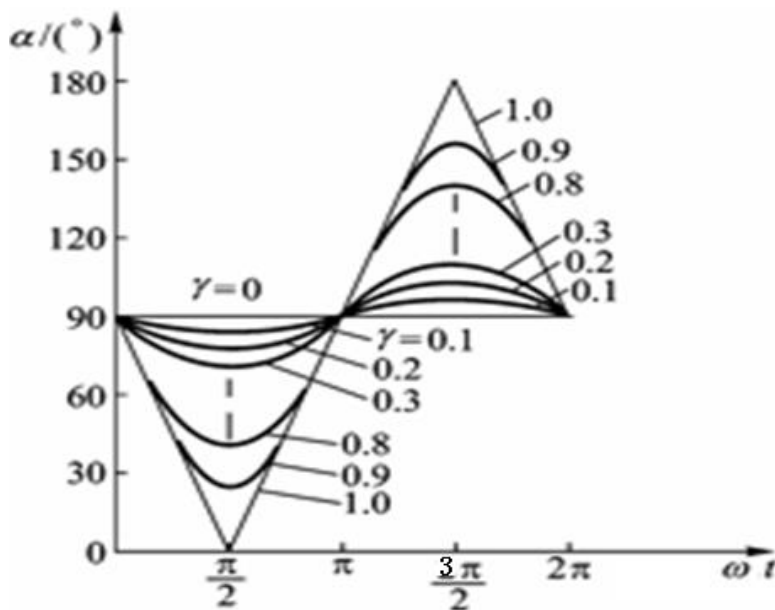
采样时间间隔大于等于 $\frac{2\pi}{m}$ (m 为波头数), 采样点越多, 负载波形越逼近于理想

输出波形, 谐波越少。

输出电压和控制角的关系

$$\alpha = \cos^{-1}(\gamma \sin \omega t) = \pi/2 - \sin^{-1}(\gamma \sin \omega t)$$

γ 较小, 即输出电压较低时, α 只在离 90° 很近的范围内变化, 电路的输入功率因数非常低。



2) 调制法

调制波 u_r : 理想的输出波形

$$u_d = U_{dm} \sin(\omega t + \phi)$$

载波 u_c : 用来与调制波交接产生可变控制角的一组余弦波。余弦峰点为对应功率器件的自然换相点。

$$u_{s2} = U_{s2m} \cos \omega_s t$$

某一时刻 t_1 :

$$u_d(t_1) = U_{dm} \sin(\omega t_1 + \phi)$$

$$u_{s2}(t_1) = U_{s2m} \cos \omega_s t_1$$

并且:

$$u_d(t_1) = u_{s2}(t_1)$$

此时变换器输出电压:

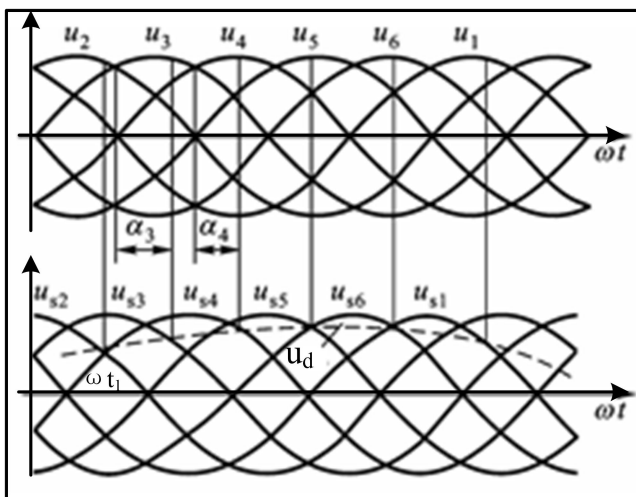
$$U_d = U_{d0} \cos \alpha_1$$

若令:

$$U_{s2m} = U_{d0}$$

则此刻变换器的控制角为:

$$\alpha_1 = \omega_s t_1$$

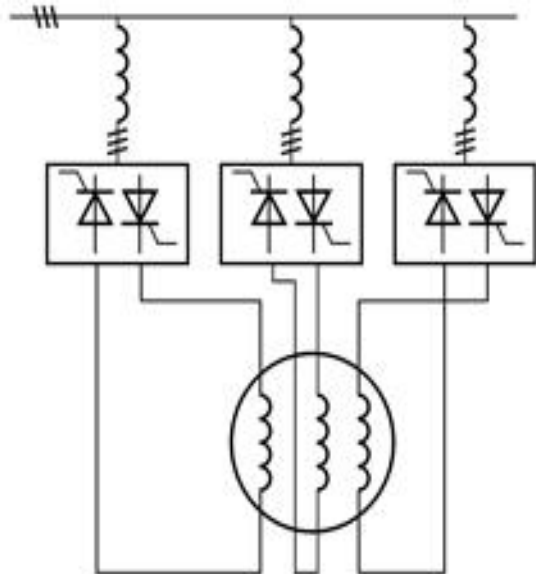


三、三相交交变频

由三组输出电压相位各相差 120° 的单相交—交变频电路组成。

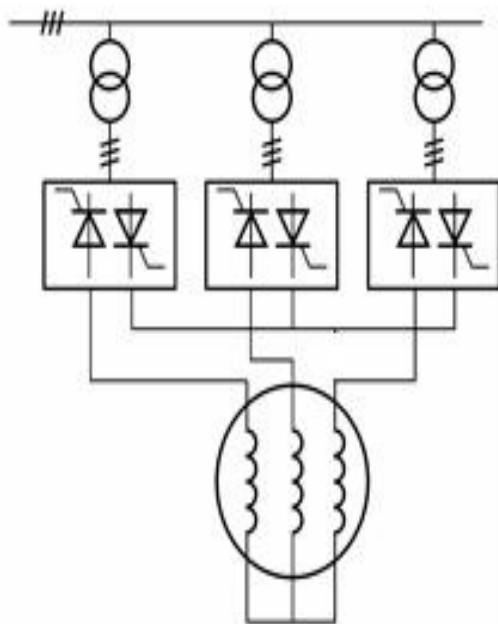
电路接线形式主要：

1. 公共交流母线进线方式



电源进线端公用,故三相单相变频电路的输出端必须隔离。

2. 输出星形联结方式



三组单相变频器连接在一起，其电源进线必须隔离；
由于变频器输出中点不和负载中点相联结，所以在构成三相变频器的六组桥式电路中，至少要有不同相的两组桥中的四个晶闸管同时导通才能构成回路，形成电流。

《电力电子技术 B》电子教案

第 19 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第七章 PWM 控制技术			
教学节次及名称	7. 1PWM 控制的基本原理 7. 2PWM 逆变电路及其控制方法			
教学目的 与要求	掌握 PWM 控制的基本原理。 掌握 PWM 逆变电路及控制方法。			
教学重点	1. PWM 控制原理。 2. PWM 逆变电路控制方法。			
教学难点	1. 三相桥式 PWM 逆变电路控制方法和波形分析。			
教学内容	1. 回顾四种基本电力变换。〈5 分钟〉 2. 介绍 PWM 控制的基本原理。〈15 分钟〉 3. 回顾单相电压型逆变电路相位控制方法，器件导通情况，输出波形分析。 〈10 分钟〉 4. 介绍 PWM 逆变电路控制方法计算法和调制法。〈30 分钟〉 5. 介绍三相桥式 PWM 逆变电路工作原理波形分析。〈25 分钟〉 6. 小结、答疑。〈5 分钟〉			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	掌握 PWM 控制的基本原理，掌握 PWM 逆变电路控制技术。			
作业和思 考题	1. 单极性和双极型 PWM 控制方式有何区别？			

教 案

电力电子技术 课 19 讲

主讲人薛荣辉

课 题：7.1PWM 控制基本原理

7.2PWM 逆变电路及控制方法

目的任务：掌握 PWM 控制基本原理

掌握 PWM 逆变电路及控制方法

重点难点：电路分析

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

一、基本概念

1. PWM (Pulse Width Modulation) 控制就是对脉冲的宽度进行调制的技术, 即通过对一系列脉冲的宽度进行调制, 来等效地获得所需要波形 (含形状和幅值)。

2. PWM 控制在逆变电路中的应用最为广泛, 对逆变电路的影响也最为深刻, 现在大量应用的逆变电路中, 绝大部分都是 PWM 型逆变电路。

3. 面积等效原理

原理内容: 冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时, 其效果基本相同。

冲量即指窄脉冲的面积。

效果基本相同, 是指环节的输出响应波形基本相同。

如果把各输出波形用傅里叶变换分析, 则其低频段非常接近, 仅在高频段略有差异。

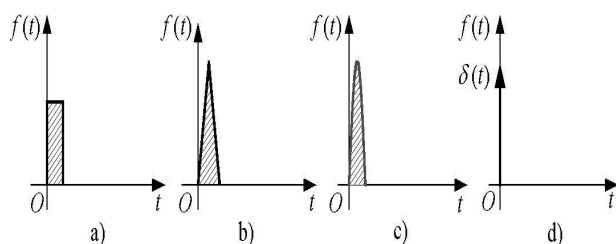


图 7-1 形状不同而冲量相同的各种窄脉冲

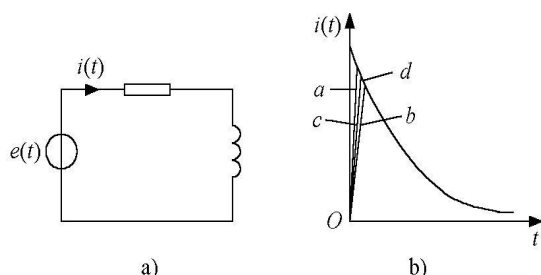


图 7-2 冲量相同的各种窄脉冲的响应波

将图 7-1a、b、c、d 所示的脉冲作为输入, 加在图 7-2a 所示的 R-L 电路上, 设其电流 $i(t)$ 为电路的输出, 图 7-2b 给出了不同窄脉冲时 $i(t)$ 的响应波形。

二、PWM 控制的基本原理

用 PWM 波代替正弦半波

◆将正弦半波看成是由 N 个彼此相连的脉冲宽度为 π/N , 但幅值顶部是曲线且大小按正弦规律变化的脉冲序列组成的。

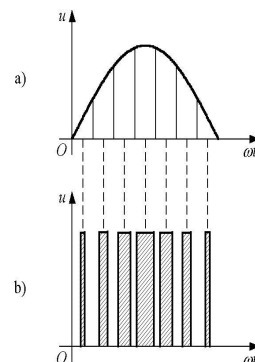
◆把上述脉冲序列利用相同数量的等幅而不等宽的矩形脉冲代替, 使矩形脉冲的中点和相应正弦波部分的中点重合, 且使矩形脉冲和相应的正弦波部分面积 (冲量) 相等, 这就是 PWM 波形。

◆对于正弦波的负半周, 也可以用同样的方法得到 PWM 波形。

◆脉冲的宽度按正弦规律变化而和正弦波等效的 PWM 波形, 也称 SPWM (Sinusoidal PWM) 波形。

■PWM 波形可分为等幅 PWM 波和不等幅 PWM 波两种, 由直流电源产生的 PWM 波通常是等幅 PWM 波。

■基于等效面积原理, PWM 波形还可以等效成其他所需要的波形, 如等效所需要的非正弦交流波形等。



三、PWM 逆变电路及控制

1. 计算法

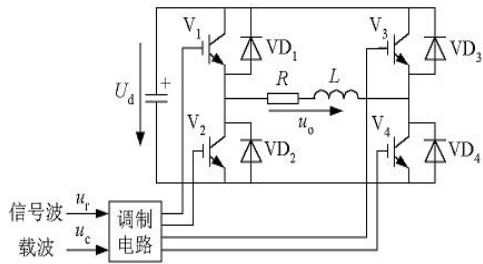
◆根据逆变电路的正弦波输出频率、幅值和半个周期内的脉冲数, 将 PWM 波形中各脉冲的宽度和间隔准确计算出来, 按照计算结果控制逆变电路中各开关器件的通断, 就可以得到所需要的 PWM 波形。

特点: 计算繁琐。

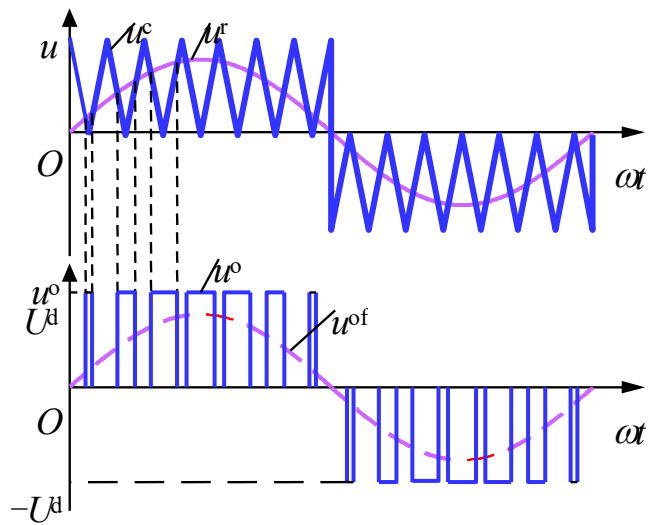
2. 调制法

◆调制波: 希望输出的波形;

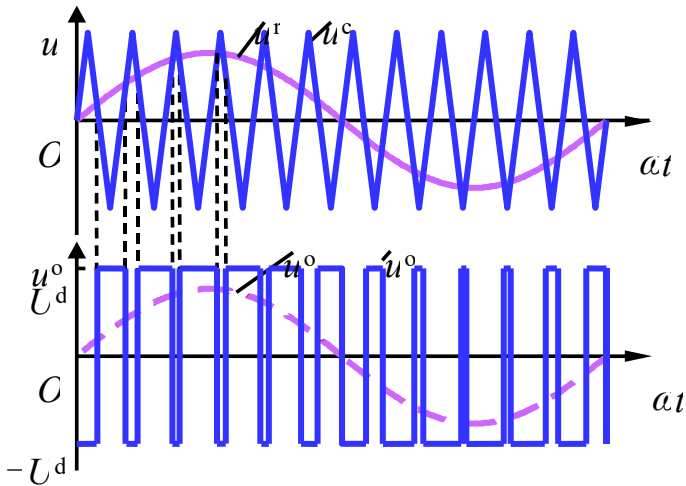
载波：接受调制的信号；通常采用等腰三角波或锯齿波作为载波，其中等腰三角波应用最多。



1) 单极性控制



2) 双极型控制



3.对比

每半个周波输出电压波形对比：

单极性： U_d ，0 或 $-U_d$ ，0；

双极性： U_d 或 $-U_d$ 。

开关次数：

单极性少，双极性多。

控制脉冲:

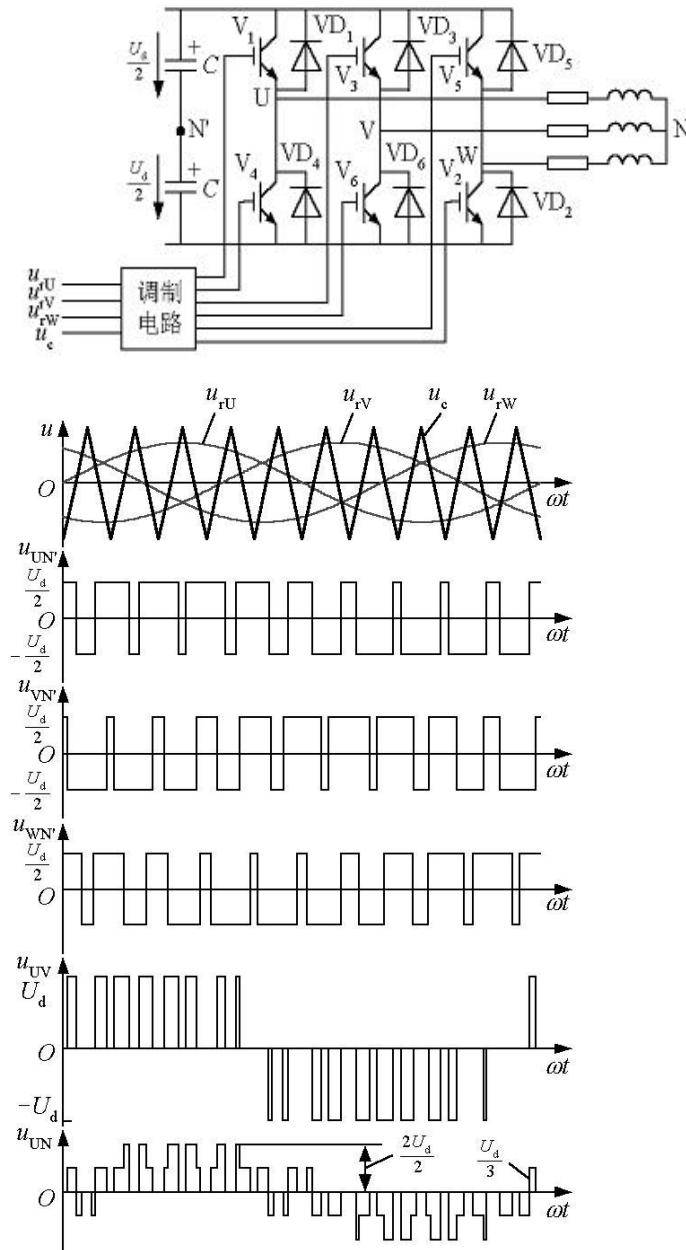
单极性: 复杂。调制波正、负半周 V1 和 V2 互补且为方波, V3 和 V4 互补且为 PWM 波。

双极性: 简单。调制波正、负半周 V1 和 V4 相同, V2 和 V3 相同, V1(V4) 和 V2(V3) 互补。

三、三相桥式 PWM 逆变电路 (调制法)

◆采用双极性控制方式。

◆U、V 和 W 三相的 PWM 控制通常公用一个三角波载波 u_c , 三相的调制信号 u_{rU} 、 u_{rV} 和 u_{rW} 依次相差 120° 。



总结:

相电压---两电平

当 $u_{rU} > u_c$ 时, 上桥臂 V1 导通, 下桥臂 V4 关断, 则 U 相相对于直流电源假想中点 N' 的输出电压为 $U_d/2$ 。

当 $u_U < u_c$ 时, V4 导通, V1 关断, 则 U 相相对于直流电源假想中点 N' 的输出电压为 $-U_d/2$ 。

线电压----三电平

臂 1 和 6 导通: $u_{UV} = U_d$ 。

臂 3 和 4 导通: $u_{UV} = -U_d$ 。

臂 1 和 3 或臂 4 和 6 导通: $u_{UV} = 0$ 。

负载相电压-----五电平

$(\pm 2/3)U_d$ 、 $(\pm 1/3)U_d$ 和 0

脉冲 上桥臂和下桥臂的 IGBT 驱动信号始终是互补的, 且要加死区。

导通特性

当给 V1(V4)加导通信号时, 可能是 V1(V4)导通, 也可能是二极管 VD1(VD4)续流导通, 这要由阻感负载中电流的方向来决定。

《电力电子技术 B》电子教案

第 20 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第七章 PWM 控制技术			
教学节次及名称	7. 4PWM 整流电路及其控制			
教学目的 与要求	1. 了解跟踪控制技术。 2. 熟悉 PWM 整流电路。			
教学重点	PWM 整流电路工作原理			
教学难点	PWM 的运行方式			
教学内容	1. PWM 基本知识回顾提问 ppt 讲解<10 分钟> 2. 单相 PWM 整流电路 ppt 讲解<50 分钟> 3. 三相 PWM 整流电路 ppt 讲解<10 分钟> 4. PWM 整流电路的控制方法 ppt 讲解<15 分钟> 5. 小结 讲解<5 分钟>			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	本次课主要掌握 PWM 整流电路。			
作业和思 考题	PWM 整流电路与相控式各有什么特点？			

7.4 PWM 整流电路及其控制方法

一、晶闸管相控整流电路或二极管整流电路特点：

- ◆随着触发延迟角 α 的增大，位移因数降低。
- ◆输入电流中谐波分量相当大，功率因数很低。

二、PWM 整流

把逆变电路中的 SPWM 控制技术用于整流电路，就形成了 PWM 整流电路。

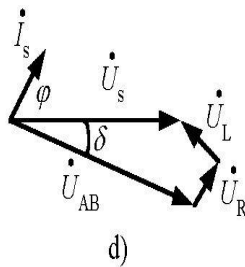
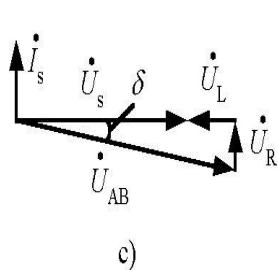
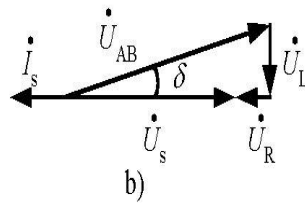
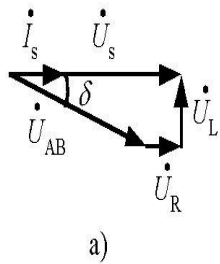
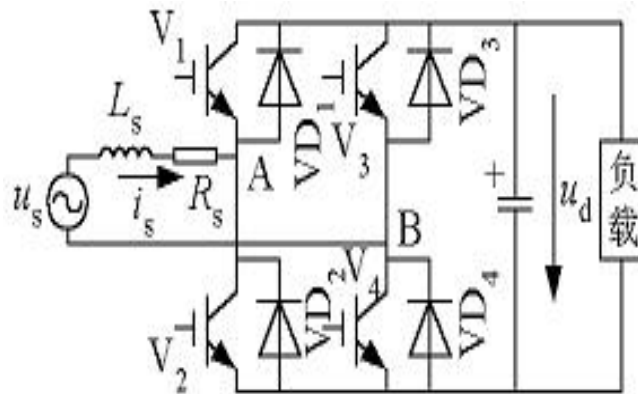
- ◆通过对 PWM 整流电路的适当控制，可以使其输入电流非常接近正弦波，且和输入电压同相位，功率因数近似为 1。也称为单位功率因数变流器，或高功率因数整流器。

三、单相全桥 PWM 整流电路

工作原理：

对 V1~V4 进行 SPWM 控制，可以在桥的交流输入端 AB 产生一个 SPWM 波 u_{AB} 。

$\sqrt{2}u_{AB}$ 中含有和正弦信号波同频率且幅值成比例的基波分量，以及和三角波载波有关的频率很高的谐波，而不含有低次谐波。由于 L_s 的滤波作用， i_s 脉动很小，可以忽略，所以当正弦信号波的频率和电源频率相同时， i_s 也为与电源频率相同的正弦波。



改变 u_{AB} 的幅值和相位，就可以改变 i_s 和 u_s 相位关系。

√图 a 中，滞后的相角为 δ ，和完全同相位，电路工作在整流状态，且功率因数为 1，是 PWM 整流电路最基本的工作状态。

√图 b 中超前的相角为 δ ，和 u_s 的相位正好相反，电路工作在逆变状态，说明 PWM 整流电路可以实现能量正反两个方向的流动。

图 c 中滞后的相角为 ϕ ，超前 90° ，电路在向交流电源送出无功功率，这时的电路被称为静止无功功率发生器（Static Var Generator—SVG）。图 d 的情况下，通过对 \dot{I}_s 幅值和相位的控制，可以使 \dot{U}_{AB} 比 \dot{U}_s 超前或滞后任一角度。

☞ 整流运行状态

√当 $u_s > 0$ 时，由 V2、VD4、VD1、Ls 和 V3、VD1、VD4、Ls 分别组成了两个升压斩波电路。

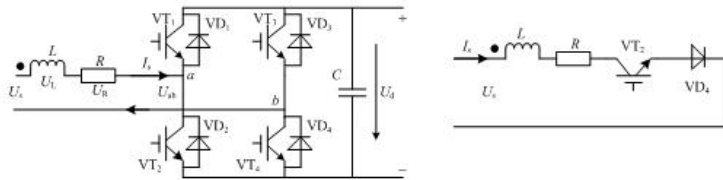
√以包含 V2 的升压斩波电路为例，当 V2 导通时， u_s 通过 V2、VD4 向 Ls 储能，当 V2 关断时，Ls 中储存的能量通过 VD1、VD4 向直流侧电容 C 充电。

√当 $u_s < 0$ 时，由 V1、VD3、VD2、Ls 和 V4、VD2、VD3、Ls 分别组成了两个升压斩波电路，工作原理和 $u_s > 0$ 时类似。

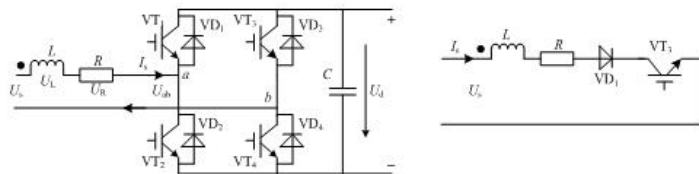
◆电压型 PWM 整流电路是升压型整流电路，其输出直流电压可以从交流电源电压峰值附近向高调节，使用时要注意电力半导体器件的保护；同时也要注意，向低调节就会使电路性能恶化，以至不能工作。

(1) 电感 L 正向蓄能

单相全桥整流电路工作过程

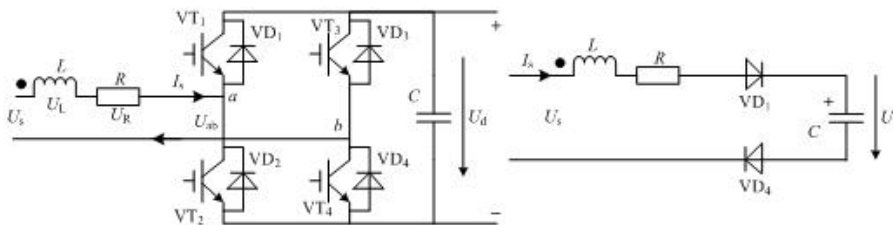


实际触发形式 VT_2 、 VT_4 同时触发，储能并 SPWM 输出为 0



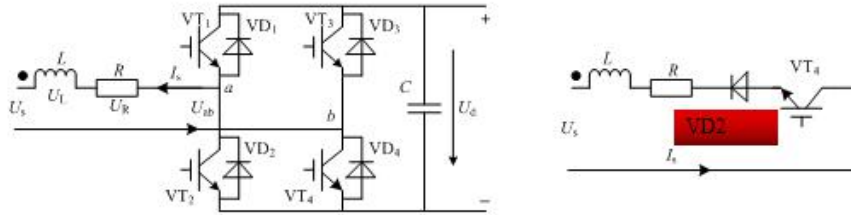
实际触发形式 VT_3 、 VT_1 同时触发，储能并 SPWM 输出为 0

(2) 电感 L 正向释放

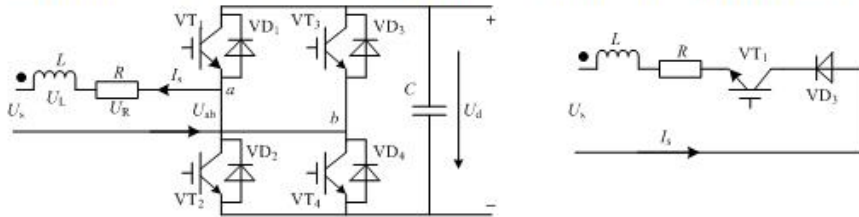


实际触发形式 VT_1 、 VT_4 同时触发，整流输出并 SPWM 输出为最大幅值。

(3) 电感L反向蓄能

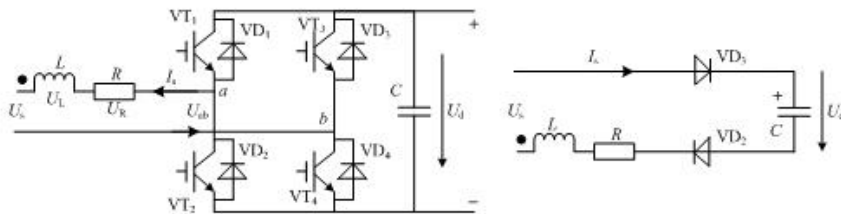


实际触发形式VT₂、VT₄同时触发，储能并SPWM输出为0。



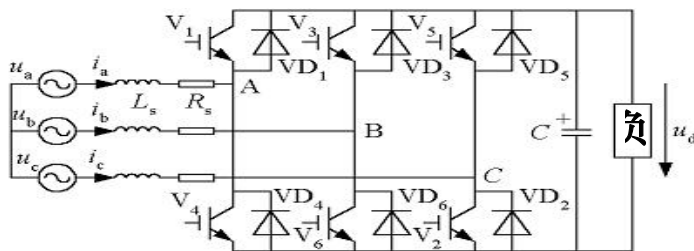
实际触发形式VT₁、VT₃同时触发，储能并SPWM输出为0。

(4) 电感L反向释放



实际触发形式VT₂、VT₃同时触发，整流输出并SPWM输出为最大幅值。

四、三相 PWM 整流电路



- ◆是最基本的 PWM 整流电路之一，其应用也最为广泛。
- ◆电路的工作原理也和前述的单相全桥电路相似，只是从单相扩展到三相。
- ◆对电路进行 SPWM 控制，在桥的交流输入端 A、B 和 C 可得到 SPWM 电压，对各相电压按图 7-31a 的相量图进行控制，就可以使各相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 为正弦波且和电压相位相同，功率因数近似为 1。
- ◆该电路也可以工作在图 7-31b 的逆变运行状态及图 c 或 d 的状态。

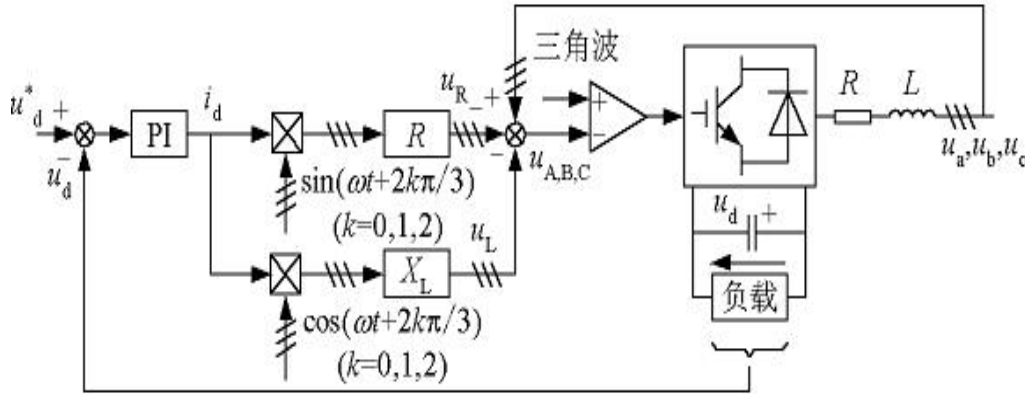
五、PWM 整流电路的控制方法

根据有没有引入电流反馈可以将这些控制方法分为两种，没有引入交流电流反馈的称为间接电流控制，引入交流电流反馈的称为直接电流控制。

1.间接电流控制

◆也称为相位和幅值控制，按照图 7-31a（逆变运行时为图 7-31b）的相量关系来控制整流桥交流输入端电压，使得输入电流和电压同相位，从而得到功率因数为 1 的控制效果。

◆控制系统的闭环是整流器直流侧电压控制环。



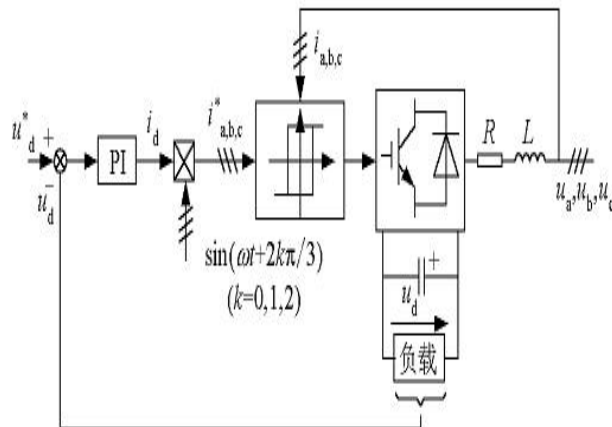
2.直接电流控制

◆通过运算求出交流输入电流指令值，再引入交流电流反馈，通过对交流电流的直接控制而使其跟踪指令电流值。

◆图 7-34 的控制系统是一个双闭环控制系统，其外环是直流电压控制环，内环是交流电流控制环。

◆控制原理

☞外环 PI 调节器的输出为 i_d ， i_d 分别乘以和 a、b、c 三相相电压同相位的正弦信号，得到三相交流电流的正弦指令信号 i^*_a 、 i^*_b 和 i^*_c 。



本章小结

1.PWM 控制技术用于逆变电路

◆PWM 控制在逆变电路中的应用最具代表性。

◆正是由于在逆变电路中广泛而成功的应用，才奠定了 PWM 控制在电力电子技术中的突出地位。

◆除功率很大的逆变装置外，不用 PWM 控制的逆变电路已十分少见。

◆第 4 章因尚未涉及到 PWM 控制技术，因此对逆变电路的介绍是不完整的，学完本章

才能对逆变电路有较完整的认识。

2.PWM 控制技术用于整流电路

- ◆PWM 控制技术用于整流电路即构成 PWM 整流电路。
- ◆可看成逆变电路中的 PWM 技术向整流电路的延伸。
- ◆PWM 整流电路已获得了一些应用，并有良好的应用前景。
- ◆ PWM 整流电路作为对第 3 章的补充，可使我们对整流电路有更全面的认识。

《电力电子技术 B》电子教案

第 21 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第七章 PWM 控制技术			
教学节次及名称	7. 4PWM 整流电路及其控制方法			
教学目的 与要求	掌握 PWM 整流电路的工作原理。 熟悉 PWM 整流电路的控制方法。			
教学重点	1. PWM 整流电路工作原理。			
教学难点	1. PWM 整流电路工作原理。			
教学内容	1. 回顾相控整流电路，PWM 逆变电路。〈5 分钟〉 2. 介绍 PWM 整流电路结构。〈10 分钟〉 3. 探讨 PWM 整流电路工作原理。〈40 分钟〉 4. 介绍 PWM 整流电路控制方法。〈25 分钟〉 5. 讨论 PWM 控制技术可以用到哪些电力变换。〈5 分钟〉 6. 小结、答疑。〈5 分钟〉			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	掌握 PWM 整流电路工作原理。 熟悉 PWM 整流控制方法。			
作业和思 考题	1. 什么是 PWM 整流？它与相控整流电路的工作原理和性能有何不同？			

教 案

电力电子技术 课 21 讲

主讲人薛荣辉

课 题：7.4 PWM 整流及其控制方法

目的任务：1. 了解 PWM 整流电路
2. 了解 PWM 控制方法

重点难点：电路分析

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

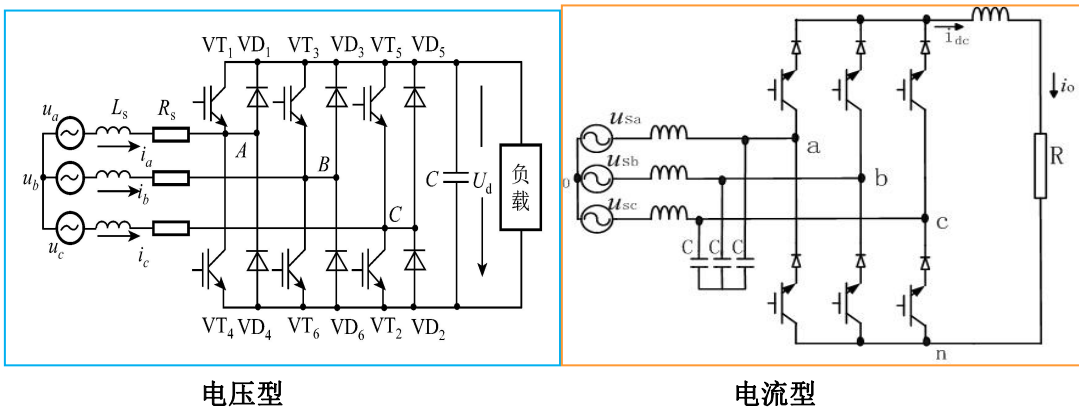
7.4 PWM 整流及其控制

一、传统整流器特点

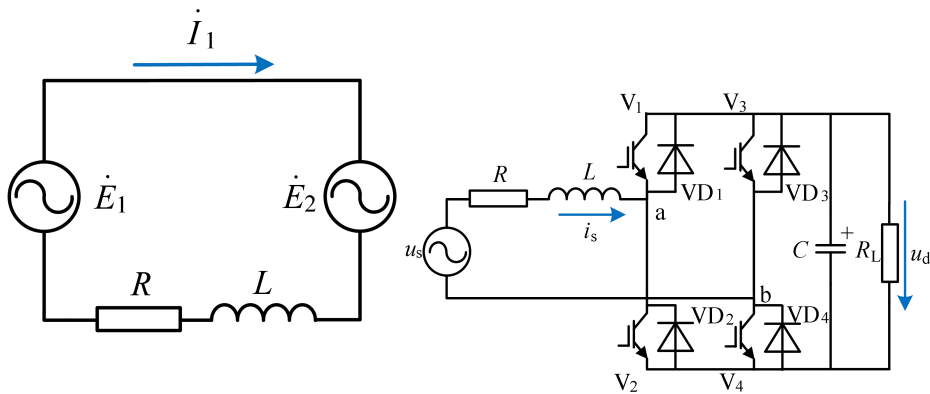
- (1) 传统的整流电路几乎都是晶闸管整流或二极管整流；
- (2) 晶闸管相控整流电路：输入电流滞后于电压，且其谐波分量很大，因此功率因数很低。
- (3) 二极管整流电路：虽位移因数接近 1，但输入电流中谐波分量很大，所以功率因数也很低。

二、PWM 整流器特点

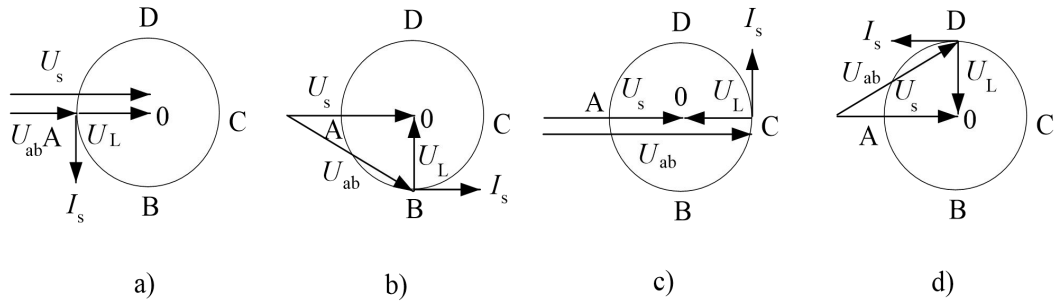
- (1) 输出直流电压（电流）平稳，可迅速调节控制；
- (2) 输入交流电源电流波形正弦；
- (3) 输入的交流电流功率因数可任意控制；功率因数为 1 时，就为绿色整流电源。
- (4) 能量双向流动。



三、电压型桥式 PWM 整流电路



四象限整流器基本原理



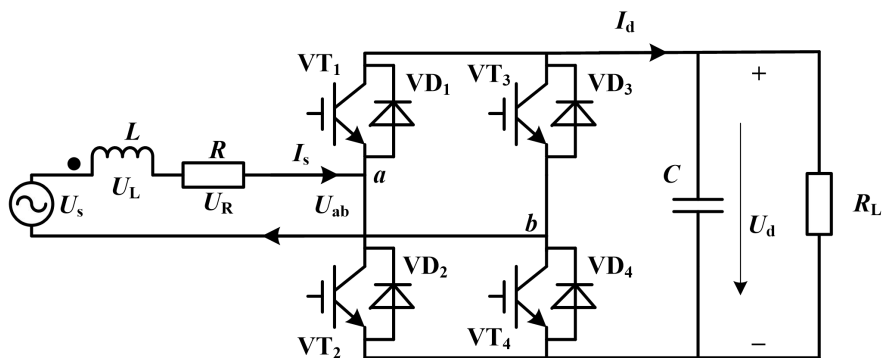
PWM 整流电路交流侧稳态矢量关系

a) 纯电感特性运行 b) 正阻特性运行 c) 纯电容特性运行 d) 负阻特性运行

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_s - \dot{U}_L = \dot{U}_s - j\omega L \dot{I}_s$$

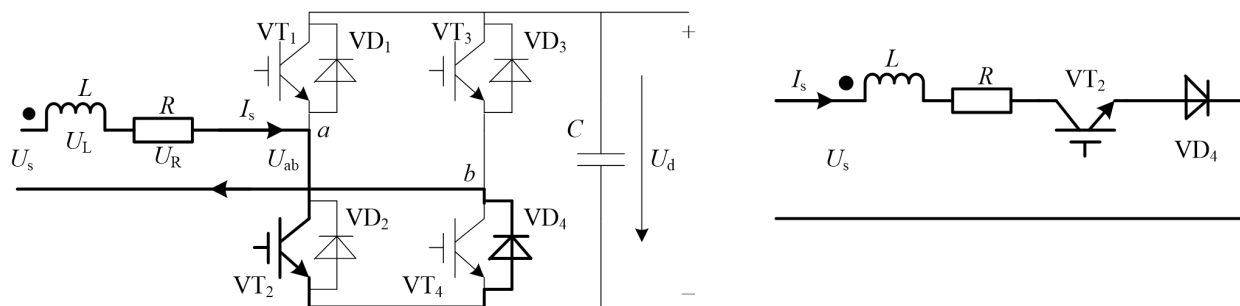
PWM 整流电路原理分析

1.单相电压型电路拓扑结构 (VSR)

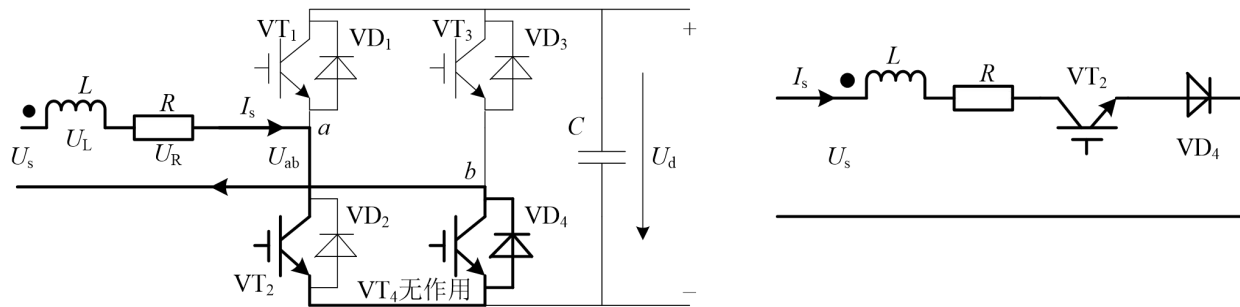


2. 六步法工作原理

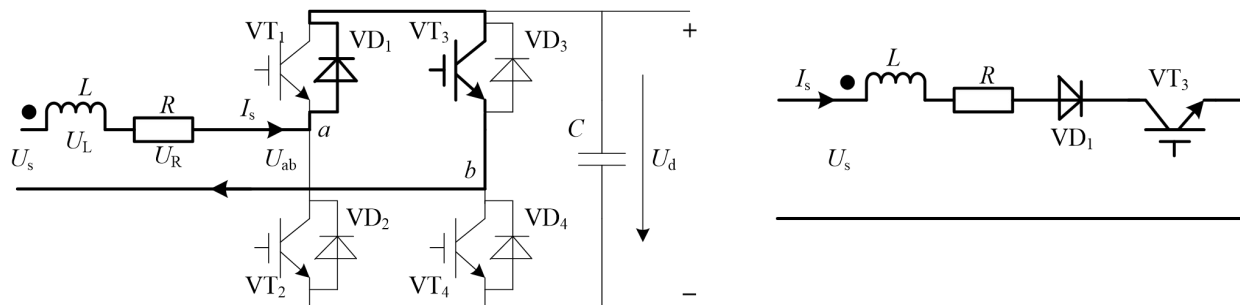
(1) 电感 \$L\$ 正向蓄能



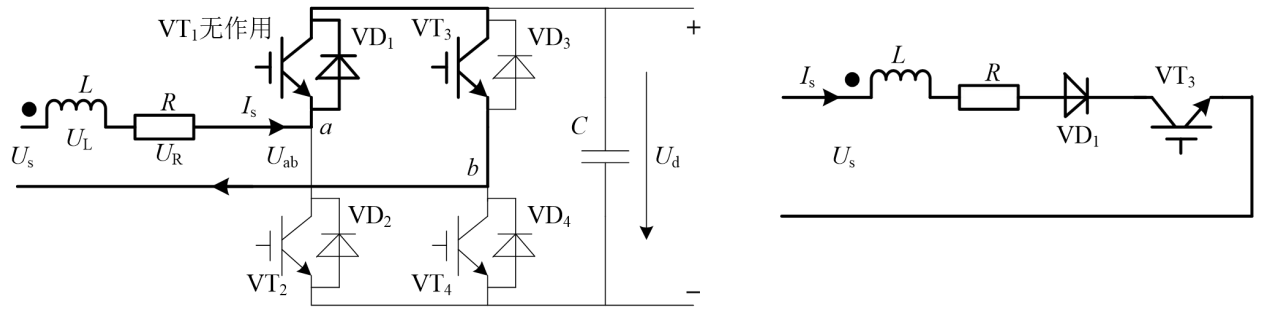
实际触发形式 \$VT_2\$、\$VT_4\$ 同时触发，储能并 SPWM 输出为 0。



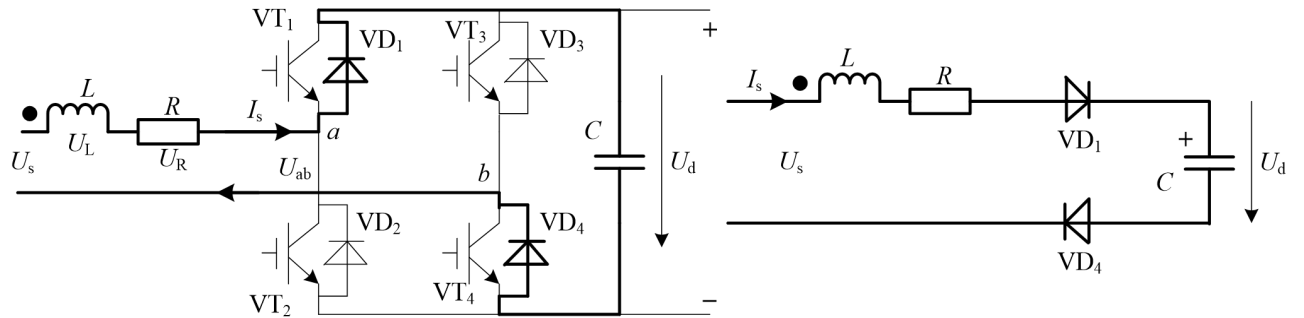
(2) 电感 \$L\$ 正向蓄能



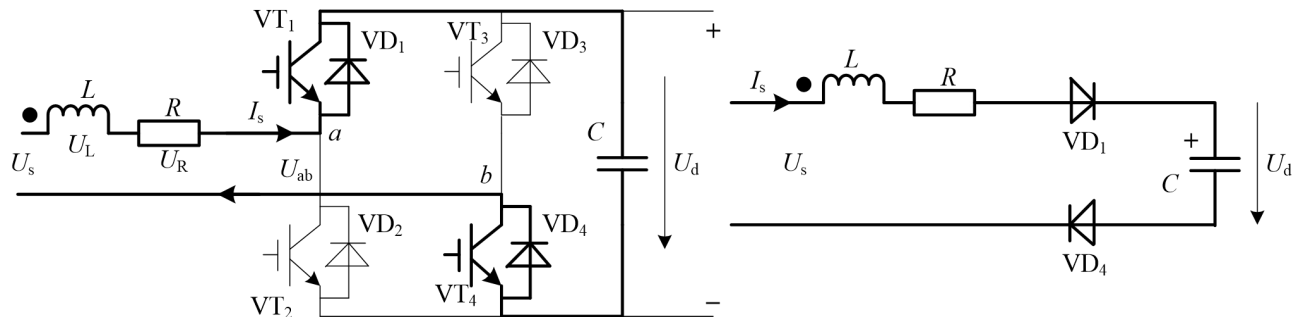
实际触发形式：\$VT_1\$、\$VT_3\$ 同时触发，储能并 SPWM 输出为 0。



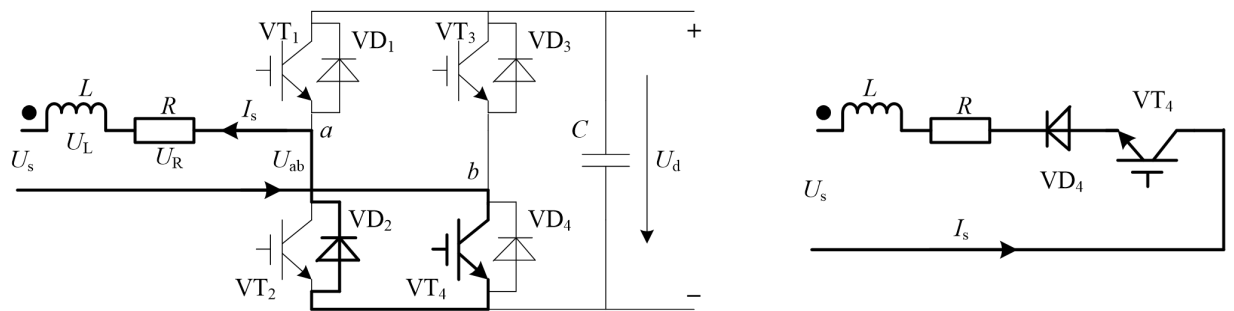
(3) 电感 L 正向释放



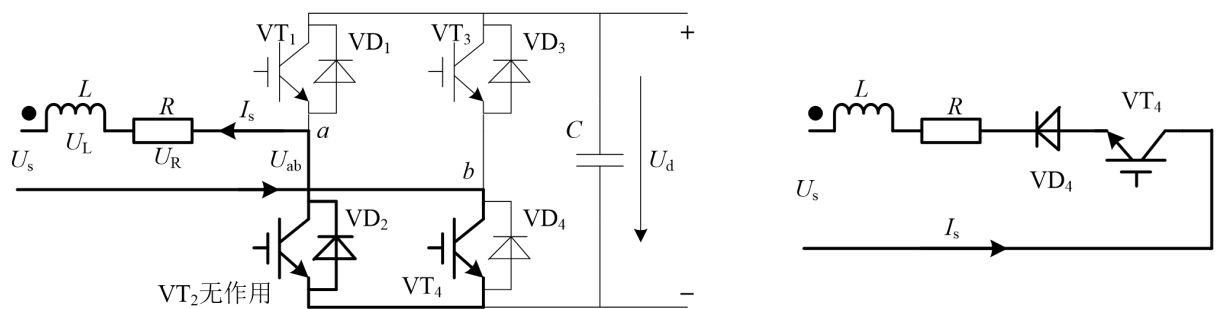
实际触发形式 VT_1 、 VT_4 同时触发，整流输出并 SPWM 输出为最大幅值。



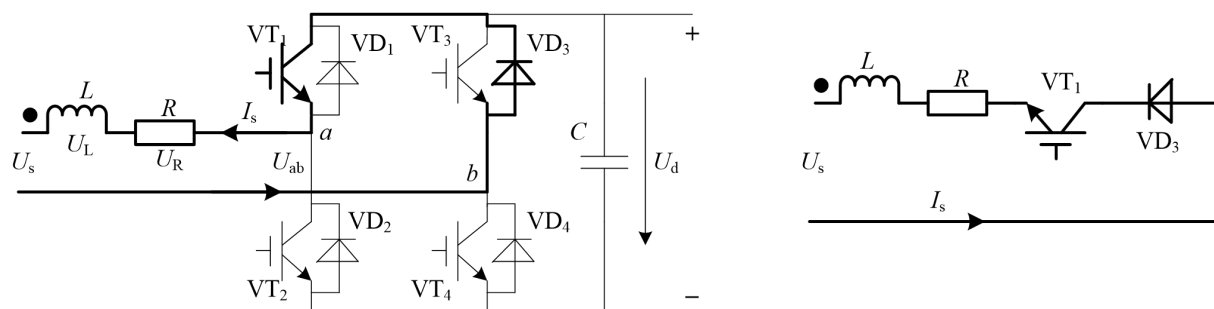
(4) 电感 L 反向蓄能



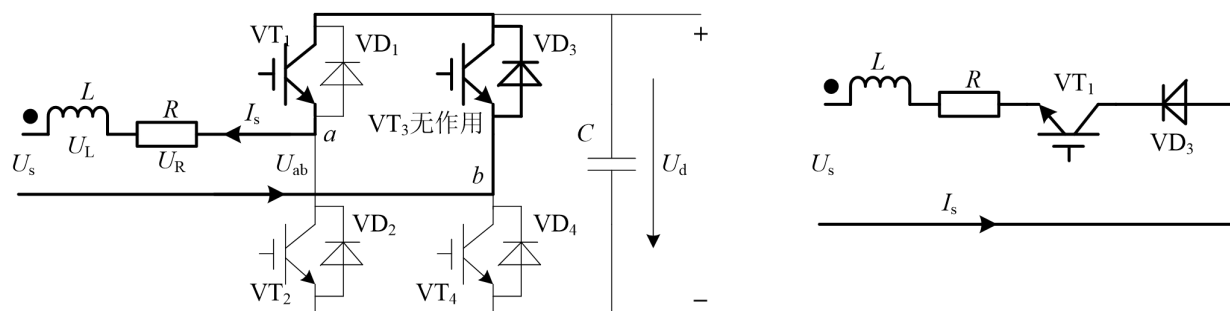
实际触发形式 VT_2 、 VT_4 同时触发，储能并 SPWM 输出为 0。



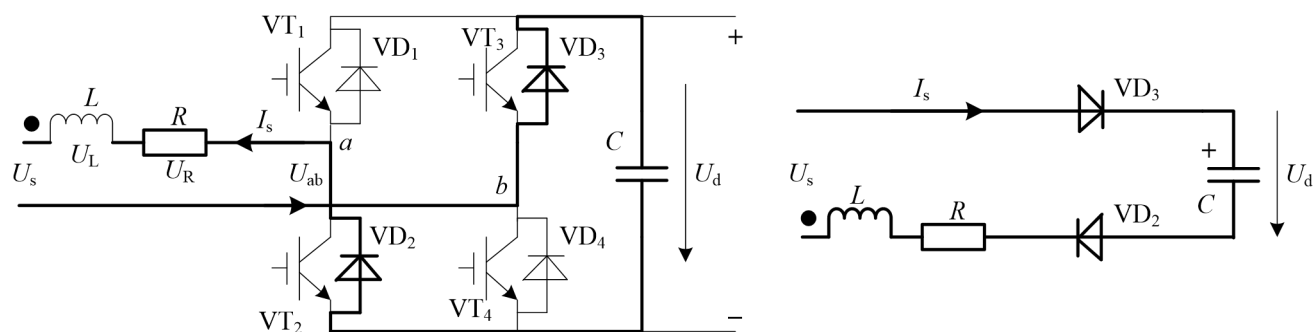
(5) 电感 L 反向蓄能



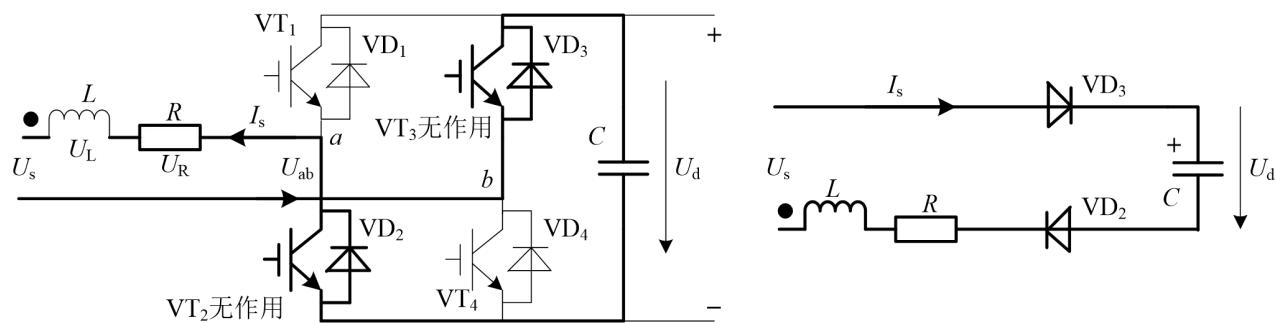
实际触发形式 VT_1 、 VT_3 同时触发，储能并 SPWM 输出为 0。



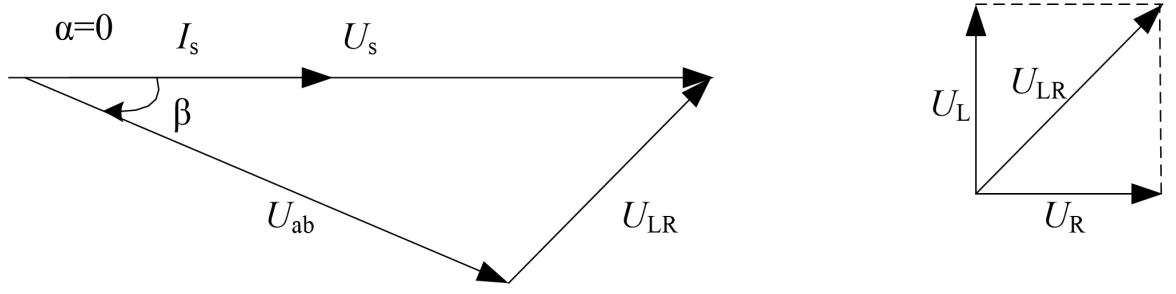
(6) 电感 L 反向释放



实际触发形式 VT_2 、 VT_3 同时触发，整流输出并 SPWM 输出为最大幅值。

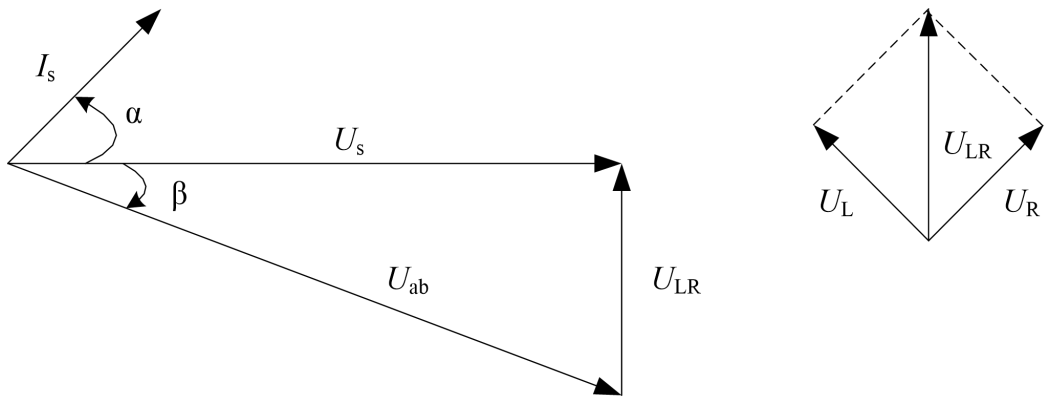


(1) 输入电流与输入电压相位角为 0° (纯阻性)

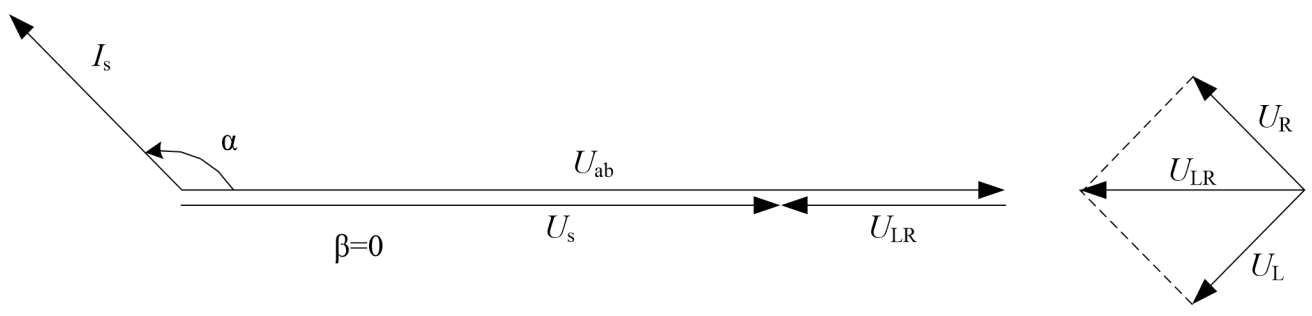


(2)

输入电流超前输入电压（容性）

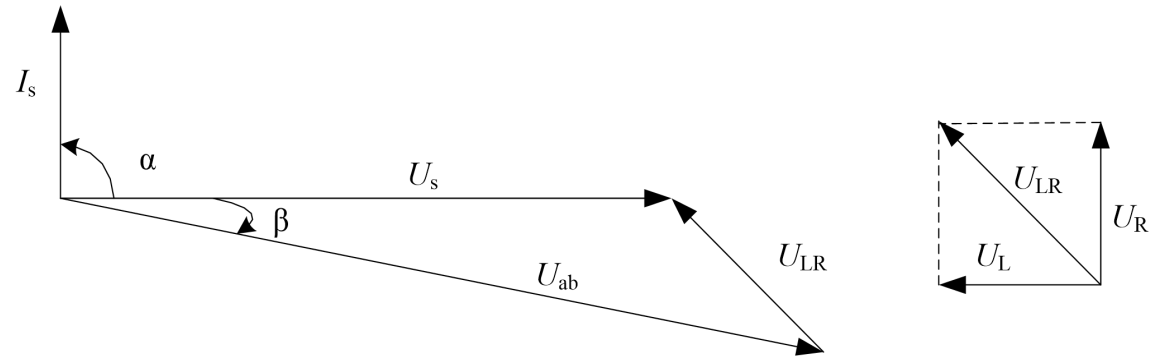


超前相位角为 $0^\circ \sim 90^\circ$

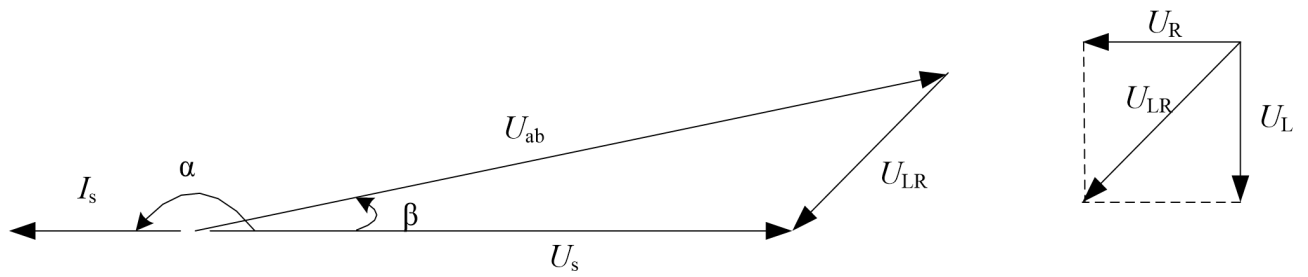


超前相位角为 $90^\circ \sim 180^\circ$

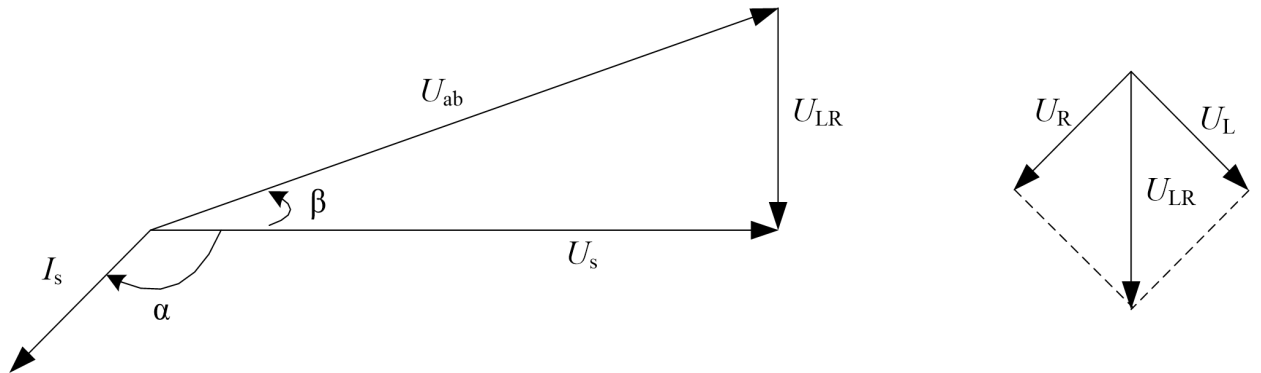
(3) 输入电流超前输入电压 90° （纯容性）



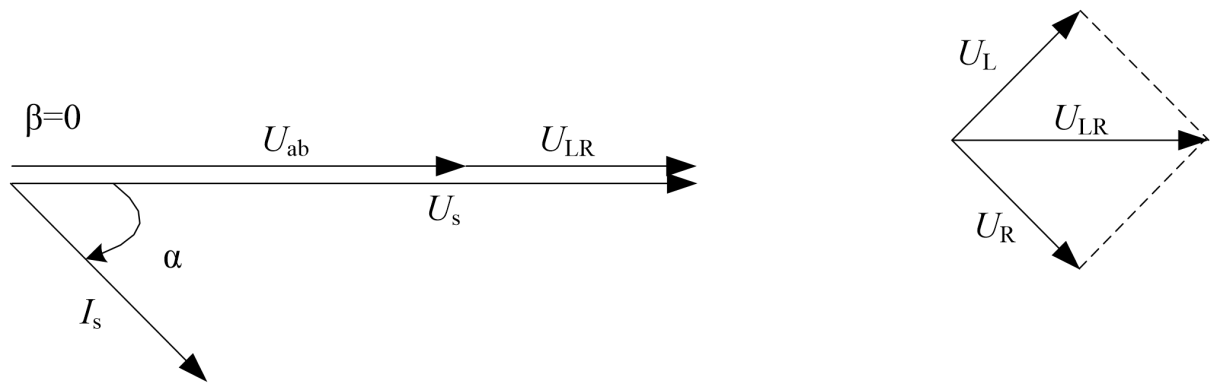
(4) 输入电流与输入电压相位差为 180° （负阻性）



(5) 输入电流滞后输入电压 (感性)

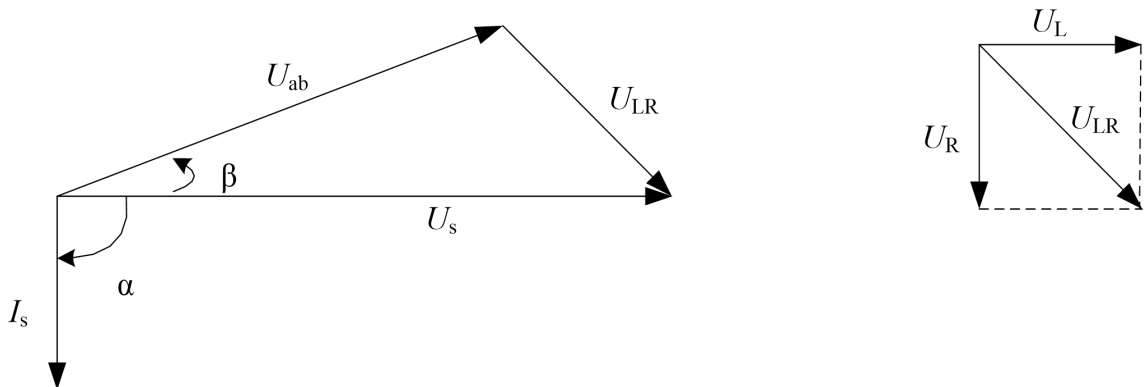


滞后相位角为 $90^\circ \sim 180^\circ$



滞后相位角为 $0^\circ \sim 90^\circ$

(6) 输入电流滞后输入电压 90° (纯感性)



The equations of the converter are: the power balance equation of the converter

$$L \frac{di_s}{dt} = v_s - d v_o \qquad C \frac{dv_o}{dt} = di_s - \frac{v_o}{R}$$

Main objectives

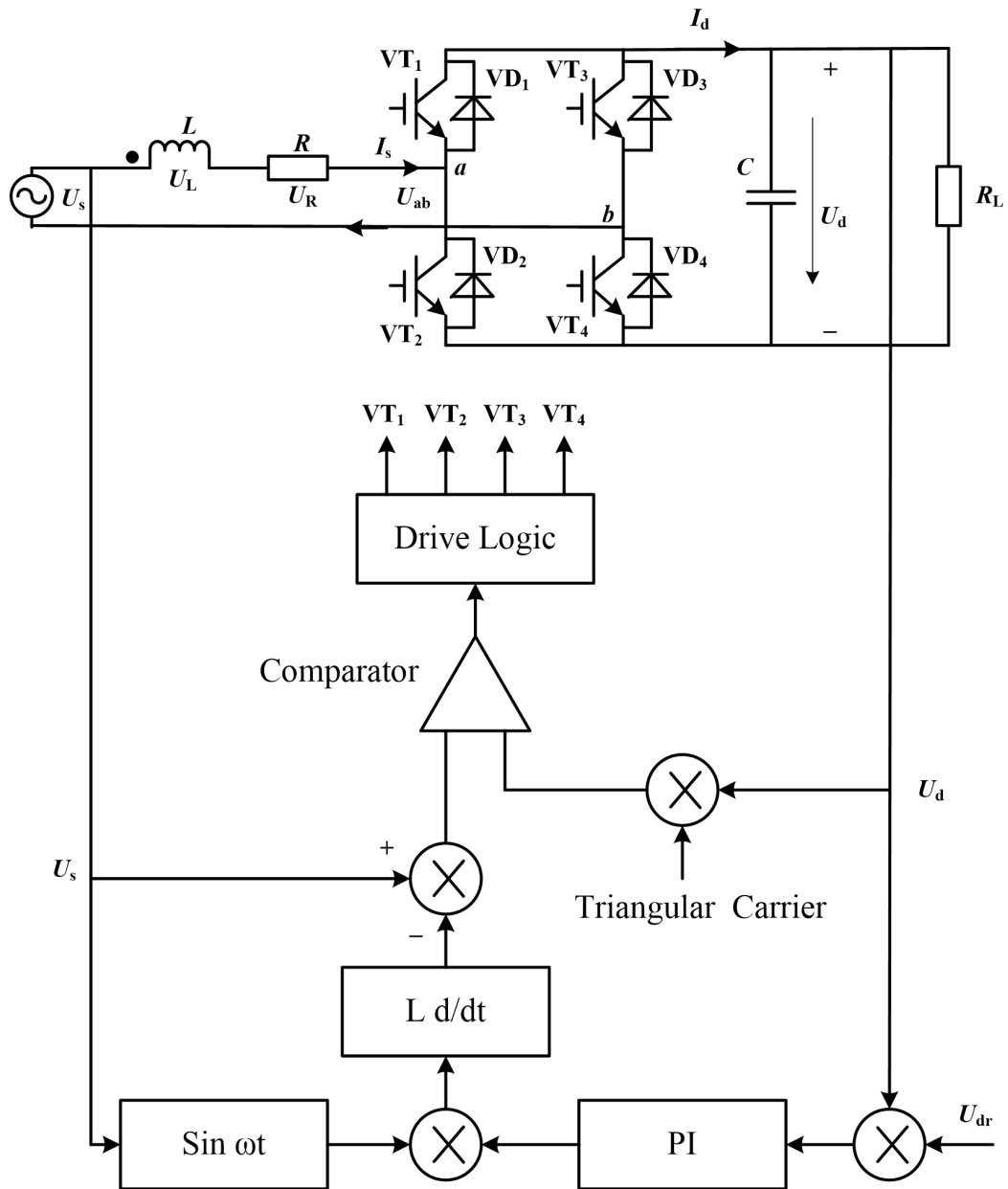
1. Input AC current with low harmonic distortion.
2. Input AC current with a high power factor.
3. To control the average load voltage.

Capability

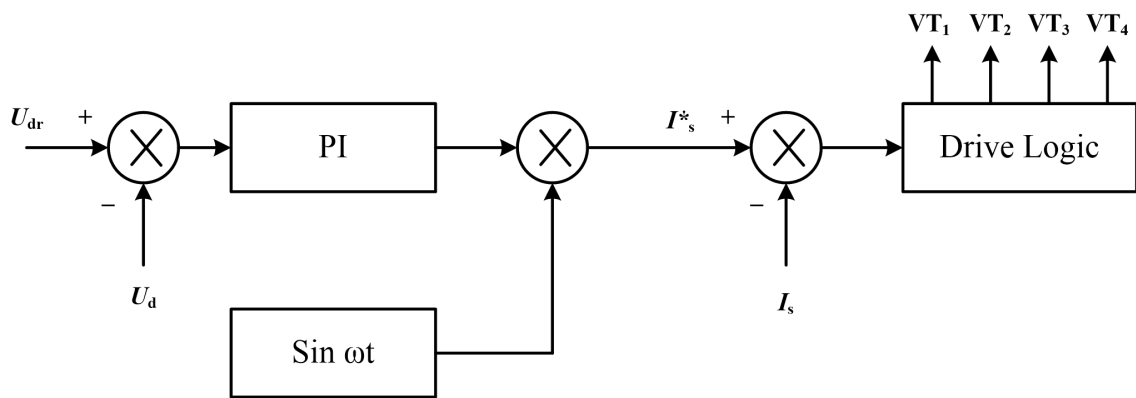
1. Instantaneous reversal of power flow.
2. Power factor management.
3. Reduction of input harmonic distortion.

The main features of PWM rectifiers are [5]:

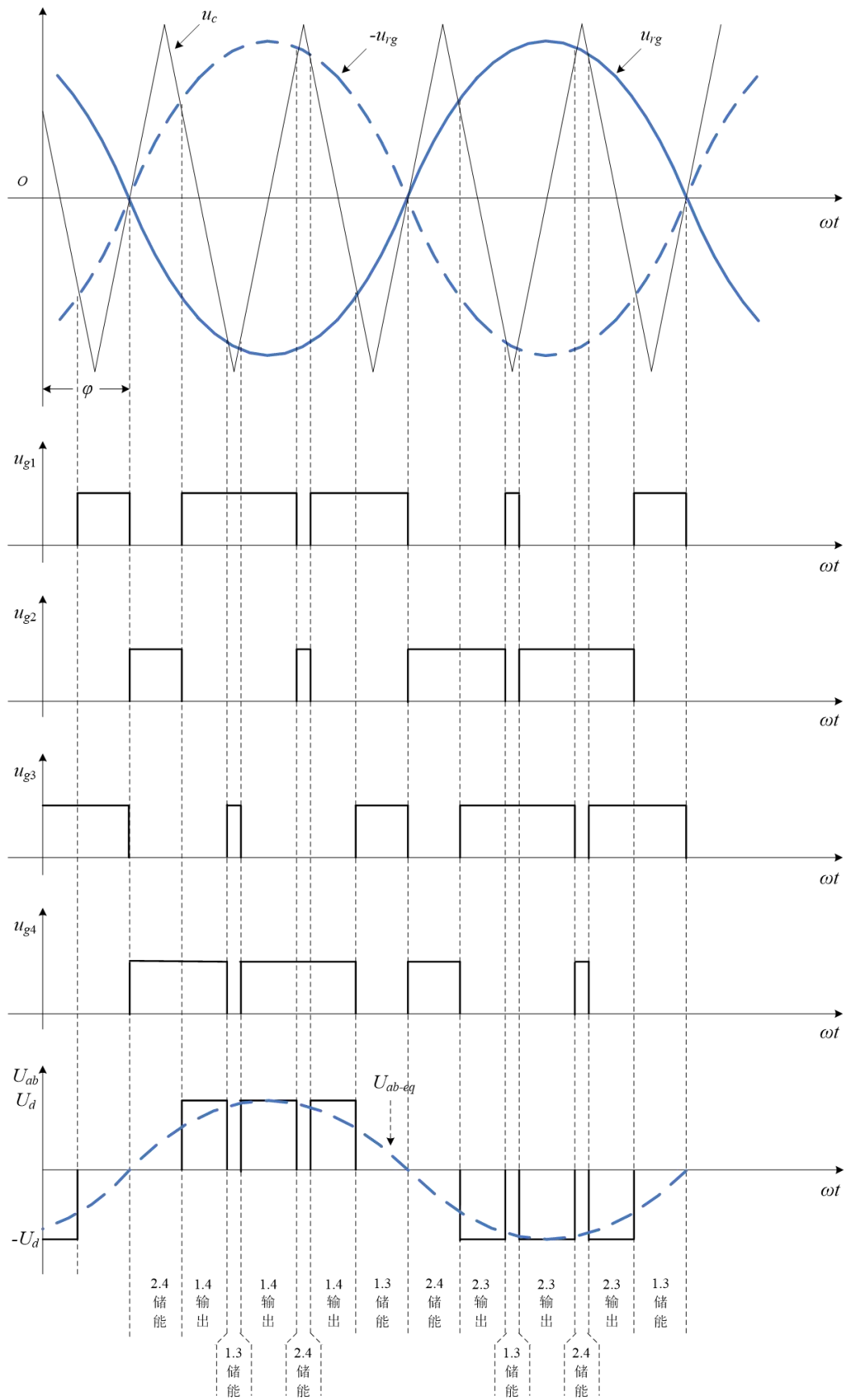
- bi-directional power flow,
- nearly sinusoidal input current,
- regulation of input power factor to unity,
- low harmonic distortion of line current (THD below 5%),
- adjustment and stabilization of DC link voltage (or current),
- reduced capacitor (or inductor) size due to the continuous current,
- properly operated under line voltage distortion and line frequency variations.



由输出平衡方程规划的控制逻辑



参考伊朗遗传法控制逻辑



《电力电子技术 B》电子教案

第 22 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第八章 软开关技术 第九章 电力电子器件应用的共性问题			
教学节次及名称	8.1 软开关的基本概念 8.2 软开关的分类 9.1 电力电子器件的驱动 9.2 电力电子器件的保护			
教学目的 与要求	了解软开关技术及分类。 了解电力电子器件的驱动，了解电力电子器件的保护。			
教学重点	1. 软开关的基本概念。 2. 典型全控型器件的驱动电路。			
教学难点	如开关技术电路分析。			
教学内容	1. 回顾换流基本概念及分类。〈5 分钟〉 2. 介绍软开关的基本概念。〈10 分钟〉 3. 介绍软开关技术的分类。〈20 分钟〉 4. 介绍电力电子器件的驱动电路。〈25 分钟〉 5. 介绍电力电子器件的保护电路。〈25 分钟〉 6. 小结、答疑。〈5 分钟〉			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	了解软开关技术及分类。了解电力电子器件的驱动电路和保护电路。			
作业和思 考题	1. 什么是软开关？什么是硬开关？			

教 案

电力电子技术 课 22 讲

主讲人薛荣辉

课 题：第 8 章 软开关技术

目的任务：了解硬开关，软开关

重点难点：无

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

第八章 软开关技术

一、 电力电子装置高频化

滤波器、变压器体积和重量减小，电力电子装置小型化、轻量化。

开关损耗增加，电磁干扰增大。

二、 软开关技术

降低开关损耗和开关噪声。

进一步提高开关频率。

三、软开关及其特点

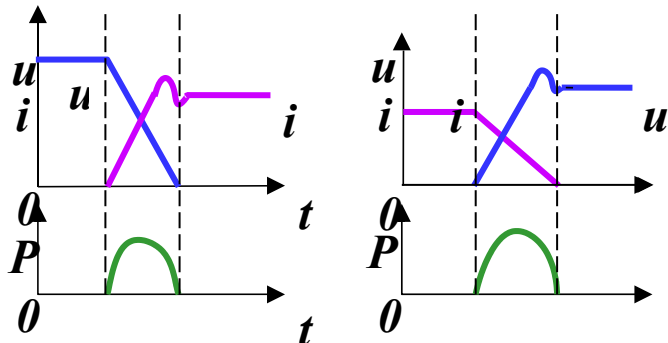
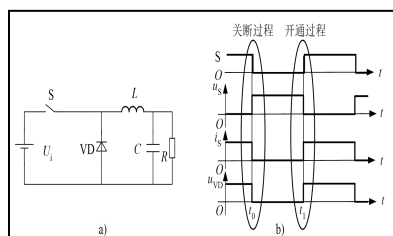
1、硬开关：

1) 定义：

开关器件在其端电压不为零时开通（硬开通），在其电流不为零时关断（硬关断），硬开通、硬关断统称为硬开关。

2) 特点：

开关的开通和关断过程伴随着电压和电流的剧烈变化。产生较大的开关损耗和开关噪声。



有显著的开关损耗：开关过程中电压、电流重叠。

产生了开关噪声：电压和电流变化很快，有明显的过冲。

随着开关频率的提高，开关损耗就越来越显著。

2、软开关：

1) 定义：

开关器件在开通过程中端电压很小，在关断过程中其电流也很小，这种开关过程的功率损耗不大，称之为软开关。

2) 特点：

不存在电压和电流的交迭。

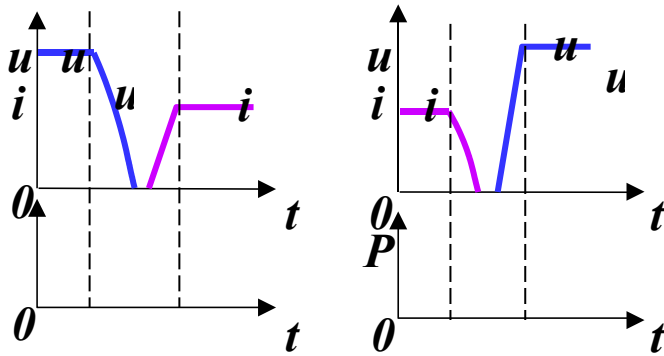
降低开关损耗、开关噪声。提高开关频率。

a、理想软开关：

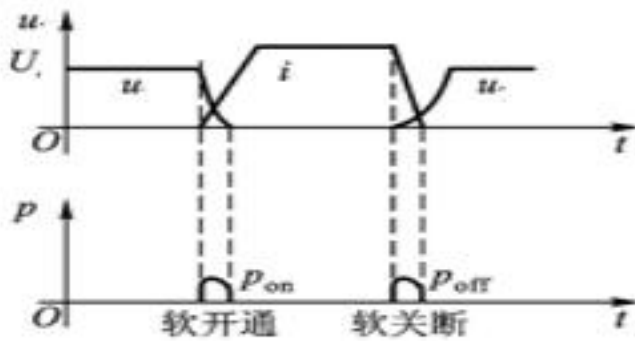
器件开通：器件两端电压 u 首先下降为零，然后施加驱动信号，器件的电流 i 才开始上升；

器件关断：通过某种控制方式使器件中电流 i 下降为零后，撤除驱动信号，电压 u 才开始

上升。



b、实际软开关：



3) 命名：

零电压开通：开关开通前其两端电压为零，则开通时不会产生损耗和噪声。

零电流关断：开关关断前其电流为零，则关断时不会产生损耗和噪声。

零电压关断：与开关并联的电容能延缓开关关断后电压上升的速率，从而降低关断损耗。

零电流开通：与开关串联的电感能延缓开关开通后电流上升的速率，降低了开通损耗。

在很多情况下，不再指出开通或关断，仅称零电压开关和零电流开关。

四、软开关的分类

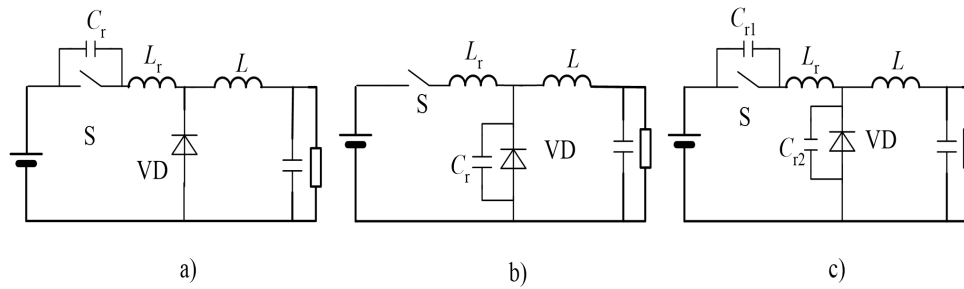
1、根据开关元件开通和关断时电压/电流状态：

- 1) 零电压开关 (ZVS-Zero Voltage Switching)；
- 2) 零电流开关 (ZCS-Zero Current Switching)。

2、根据软开关技术发展的历程：

- 1) 准谐振变换电路；
- 2) 零开关 PWM 变换电路；
- 3) 零转换 PWM 变换电路。

准谐振电路



分类

- ☞ 零电压开关准谐振电路 (Zero-Voltage-Switching Quasi-Resonant Converter—ZVS QRC)
- ☞ 零电流开关准谐振电路 (Zero-Current-Switching Quasi-Resonant Converter—ZCS QRC)
- ☞ 零电压开关多谐振电路 (Zero-Voltage-Switching Multi-Resonant Converter—ZVS MRC)
- ☞ 用于逆变器的谐振直流环节 (Resonant DC Link)

特点:

准谐振电路中电压或电流的波形为正弦半波---准谐振。

B、开关损耗和开关噪声都大大下降，但现存问题:

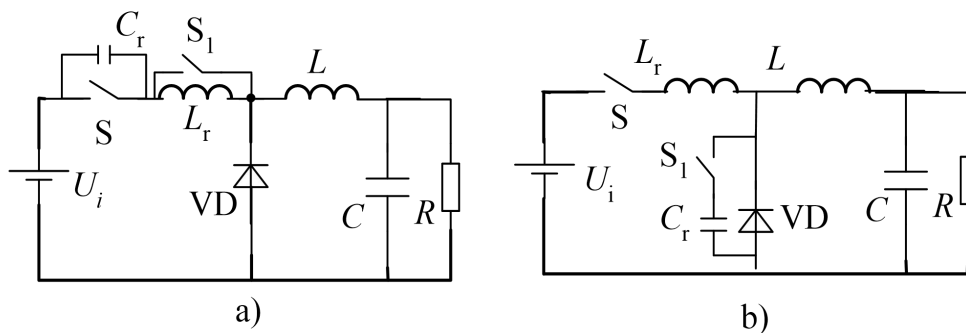
- ☞ 谐振电压峰值很高---器件耐压高。
- ☞ 谐振电流的有效值很大---无功交换多，导通损耗大。
- ☞ 谐振周期随输入电压、负载变化而改变，因此电路只能采用脉冲频率调制 (Pulse Frequency Modulation—PFM) 方式来控制，变频的开关频率给电路设计带来困难。

零开关 PWM 电路

电路中引入了辅助开关来控制谐振的开始时刻，使谐振仅发生于开关过程前后。

◆ 分类

- ☞ 零电压开关 PWM 电路 (Zero-Voltage-Switching PWM Converter—ZVS PWM)
- ☞ 零电流开关 PWM 电路 (Zero-Current-Switching PWM Converter—ZCS PWM)



◆ 特点:

- 同准谐振电路相比，这类电路有很多明显的优势:
- 电压和电流基本上是方波，只是上升沿和下降沿较缓;
- 开关承受的电压明显降低;
- 电路可以采用开关频率固定的 PWM 控制方式。

零转换 PWM 电路

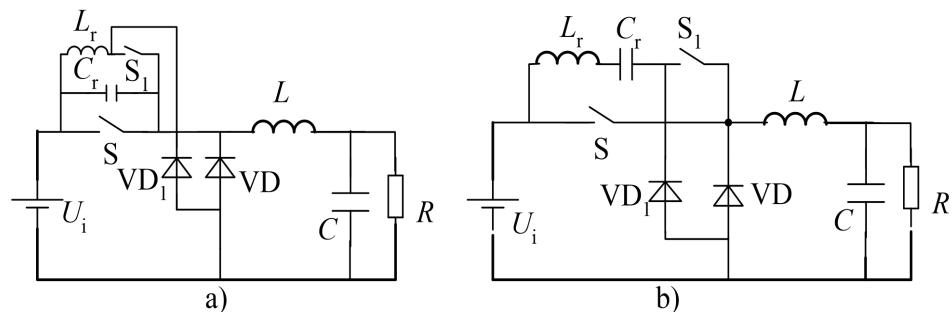
电路中采用辅助开关控制谐振的开始时刻，谐振电路是与主开关并联的，因此输入电压

和负载电流对电路的谐振过程的影响很小。

◆分类

☞零电压转换 PWM 电路 (Zero-Voltage-Transition PWM Converter—ZVT PWM);

☞零电流转换 PWM 电路 (Zero-Current Transition PWM Converter—ZCT PWM)。



◆特点:

电路在很宽的输入电压范围内和从零负载到满载都能工作在软开关状态;
无功功率的交换被削减到最小, 电路效率提高。

《电力电子技术 B》电子教案

第 23 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	第十章 电力电子技术的应用			
教学节次及名称	10.3 不间断电源 10.4 开关电源			
教学目的 与要求	了解不间断电源的结构及工作原理。 了解开关电源的结构和控制方式。			
教学重点	1. 不间断电源的结构。 2. 开关电源的结构和控制方式。			
教学难点	开关电源的控制方式。			
教学内容	1. 探讨电力电子技术的应用。〈15 分钟〉 2. 介绍不间断电源结构和工作原理。〈20 分钟〉 3. 介绍开关电源结构。〈10 分钟〉 4. 介绍开关电源的控制方式。〈30 分钟〉 5. 探讨开关电源的应用。〈10 分钟〉 6. 小结、答疑。〈5 分钟〉			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	熟悉不间断电源的结构，了解开关电源的基本结构以及控制方法。			
作业和思 考题	1. 什么是 UPS?			

教 案

电力电子技术 课 23 讲

主讲人薛荣辉

课 题：10.3 不间断电源

10.4 开关电源

目的任务：1. 了解电力电子技术应用

2. 了解不间断电源，开关电源工作原理

重点难点：电路分析

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

10.3 不间断电源

不间断电源 (Uninterruptible Power Supply — UPS) 是当交流输入电源 (习惯称为市电) 发生异常或断电时, 还能继续向负载供电, 并能保证供电质量, 使负载供电不受影响的装置。

■ 广义地说, UPS 包括输出为直流和输出为交流两种情况, 目前通常是指输出为交流的情况。UPS 是恒压恒频 (CVCF) 电源中的主要产品之一, 广泛应用于各种对交流供电可靠性和供电质量要求高的场合。

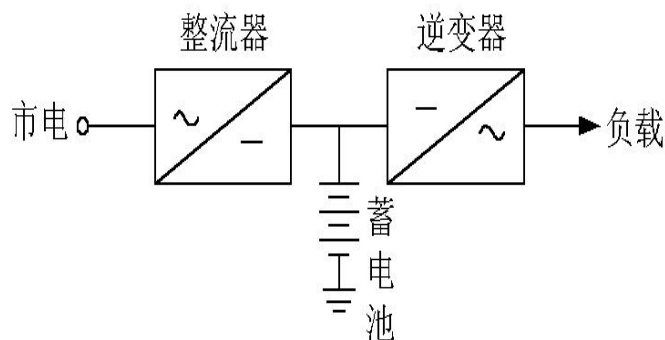


图 10-15 UPS 基本结构原理图

UPS 基本工作原理: 当市电正常时, 由市电供电, 当市电异常乃至停电时, 由蓄电池向逆变器供电, 因此从负载侧看, 供电不受市电停电的影响; 在市电正常时, 负载也可以由逆变器供电, 此时负载得到的交流电压比市电电压质量高, 即使市电发生质量问题 (如电压波动、频率波动、波形畸变和瞬时停电等) 时, 也能获得正常的恒压恒频的正弦波交流输出, 并且具有稳压、稳频的性能, 因此也称为稳压稳频电源。

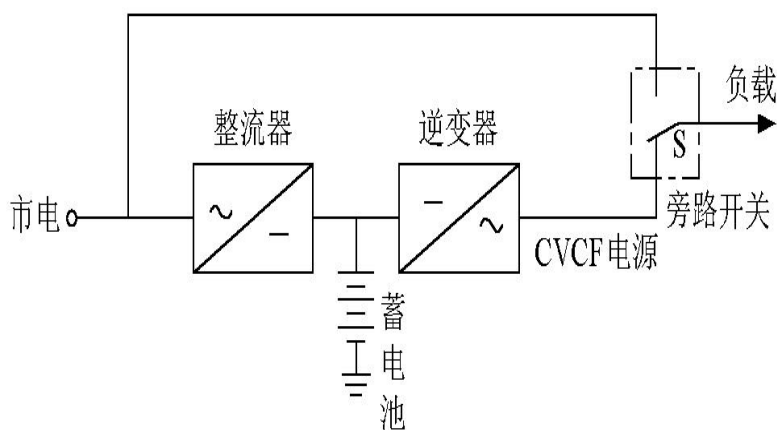


图 10-16 具有旁路开关的 UPS 系统

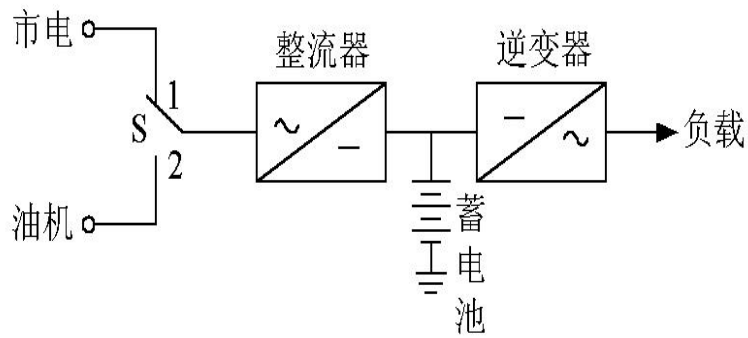


图 10-17 用柴油发电机作为后备电源的 UPS

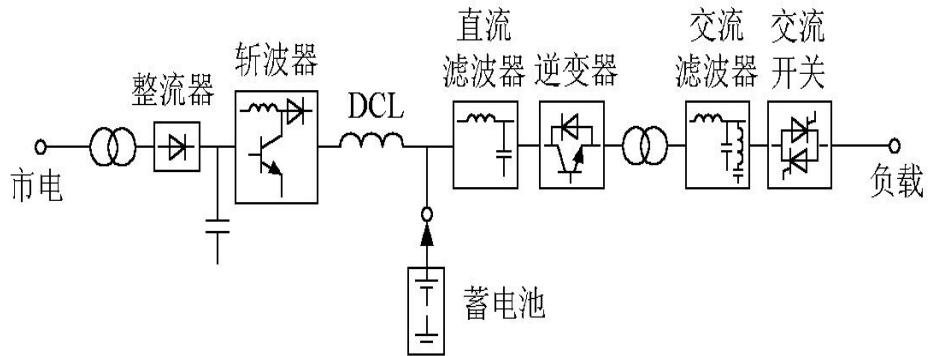


图 10-18 小容量 UPS 主电路

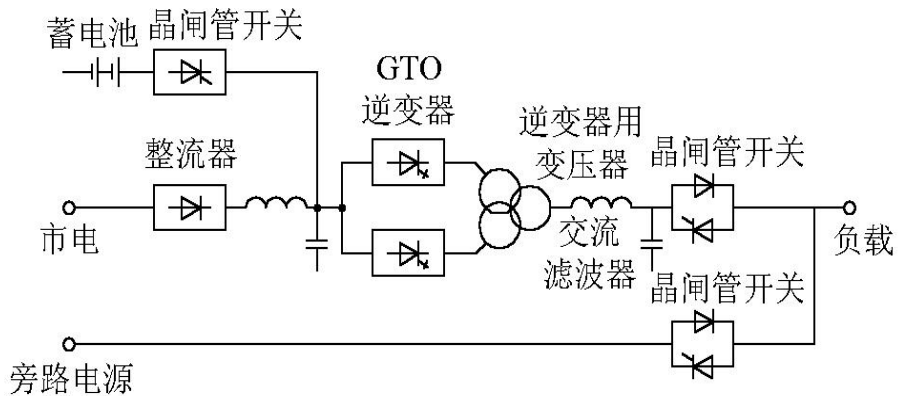


图 10-19 大功率 UPS 主电路

UPS 的主电路结构

◆容量较小的 UPS 主电路

☞整流部分使用二极管整流器和直流斩波器（用作 PFC），可获得较高的交流输入功率因数。

☞由于逆变器部分使用 IGBT 并采用 PWM 控制，可获得良好的控制性能。

◆使用 GTO 的大容量 UPS 主电路

- ☞ 逆变器部分采用 PWM 控制，具有调节电压和改善波形的功能。
- ☞ 为减少 GTO 的开关损耗，采用较低的开关频率。
- ☞ 输出电压中所含的最低次谐波为 11 次，从而使交流滤波器小型化。

10.4 开关电源

一、开关电源的结构

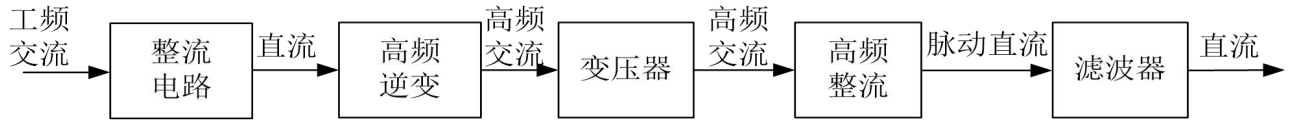


图 10-22 开关电源的能量变换过程

交流输入的开关电源

- ◆ 交流输入、直流输出的开关电源将交流电转换为直流电。
- ◆ 整流电路普遍采用二极管构成的桥式电路，直流侧采用大电容滤波，较为先进的开关电源采用有源的功率因数校正(Power Factor Correction - PFC)电路。
- ◆ 高频逆变—变压器—高频整流电路是开关电源的核心部分，具体的电路采用的是隔离型直流变流电路。
- ◆ 高性能开关电源中普遍采用了软开关技术。
- ◆ 可以采用给高频变压器设计多个二次侧绕组的方法来实现不同电压的多组输出，而且这些不同的输出之间是相互隔离的，但是仅能选择 1 路作为输出电压反馈，因此也就只有这 1 路的电压的稳压精度较高，其它路的稳压精度都较低，而且其中 1 路的负载变化时，其它路的电压也会跟着变化。

二、开关电源

直流输入的开关电源

- ◆ 也称为直流—直流变换器(DC-DC Converter)，分为隔离型和非隔离型，隔离型多采用反激、正激、半桥等隔离型电路，而非隔离型采用 Buck、Boost、Buck-Boost 等电路。
- ◆ 负载点稳压器(POL-Point Of the Load regulator)
 - ☞ 仅仅为 1 个专门的元件（通常是一个大规模集成电路芯片）供电的直流—直流变换器。
 - ☞ 计算机主板上给 CPU 和存储器供电的电源都是典型的 POL。
- ◆ 非隔离的直流—直流变换器、尤其是 POL 的输出电压往往较低，为了提高效率，经常采用同步 Buck (Sync Buck)电路，该电路的结构为 Buck，但二极管也采用 MOSFET，利用其低导通电阻的特点来降低电路中的通态损耗，其原理类似同步整流电路。

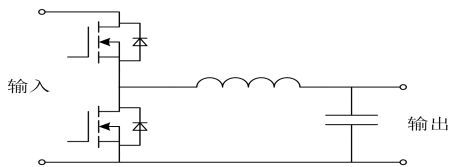


图 10-24 a) 同步降压电路

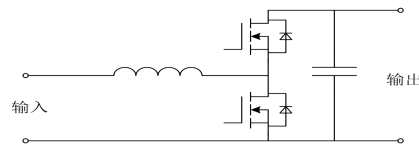


图 10-24 b) 同步升压电路

分布式电源系统

- ◆ 在通信交换机、巨型计算机等复杂的电子装置中，供电的路数太多，总功率太大，难以用一个开关电源完成，因此出现了分布式的电源系统。
- ◆ 如图 10-25，一次电源完成交流—直流的隔离变换，其输出连接到直流母线上，直流母线连接到交换机中每块电路板，电路板上都有自己的 DC-DC 变换器，将 48V 转换为电路所需的各种电压；大容量的蓄电池组保证停电的时候交换机还能正常工作。
- ◆ 一次电源采用多个开关电源并联的方案，每个开关电源仅仅承担一部分功率，并联合

行的每个开关电源有时也被成称为“模块”，当其中个别模块发生故障时，系统还能够继续运行，这被称为“冗余”。

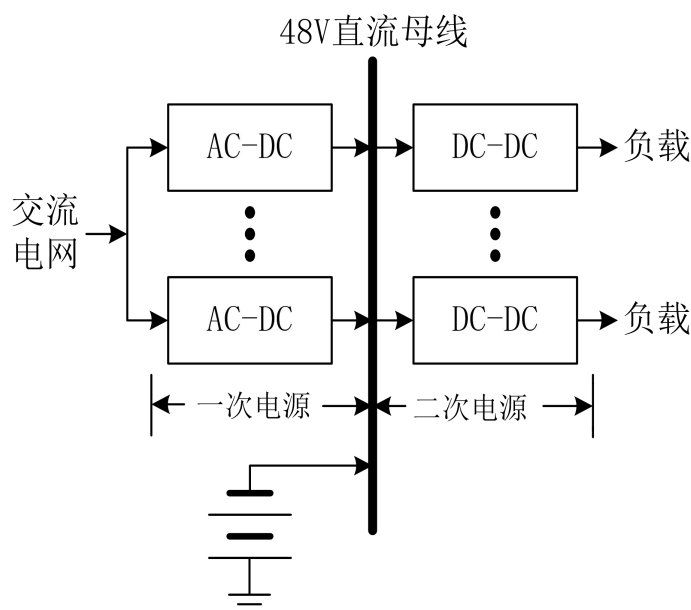


图 10-25 通信电源系统

典型的开关电源控制系统如图 10-26 所示，采用反馈控制，控制器根据误差 e 来调整控制量 v_c 。

■电压模式控制 ◆图 10-26 所示即为电压模式控制，仅有一个输出电压反馈控制环。

◆其优点是结构简单，但有一个显著的缺点是不能有效的控制电路中的电流。

■电流模式控制 ◆在电压反馈环内增加了电流反馈控制环，电压控制器的输出信号作为电流环的参考信号，给这一信号设置限幅，就可以限值电路中的最大电流，达到短路和过载保护的目，还可以实现恒流控制。

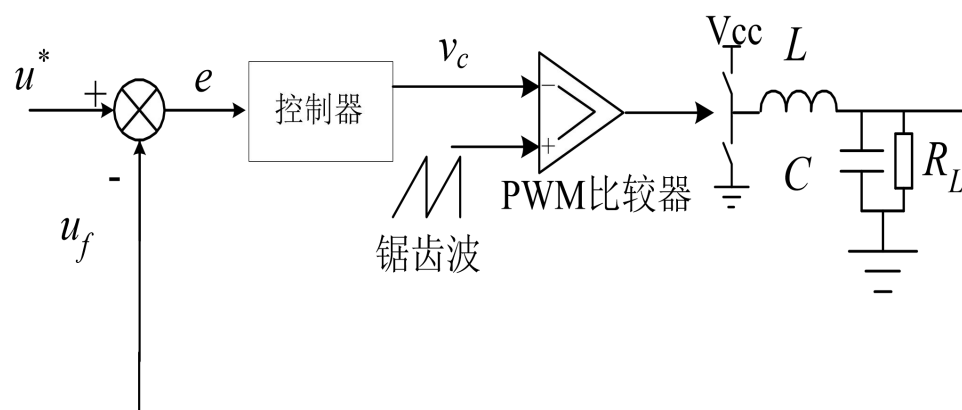


图 10-26 开关电源的控制系统

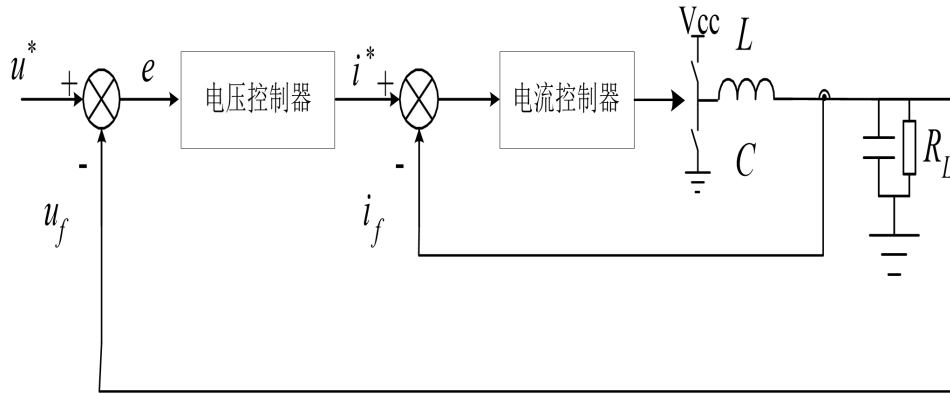


图 10-27 电流模式控制系统的结构

三、开关电源应用

开关电源广泛用于各种电子设备、仪器，以及家电等，如台式计算机和笔记本电脑的电源，电视机、DVD 播放机的电源，以及家用空调器、电冰箱的电脑控制电路的电源等，这些电源功率通常仅有几十 W~几百 W；手机等移动电子设备的充电器也是开关电源，但功率仅有几 W；通信交换机、巨型计算机等大型设备的电源也是开关电源，但功率较大，可达数 kW~数百 kW；工业上也大量应用开关电源，如数控机床、自动化流水线中，采用各种规格的开关电源为其控制电路供电。

■开关电源还可以用于蓄电池充电、电火花加工，电镀、电解等电化学过程等，功率可达几十~几百 kW；在 X 光机、微波发射机、雷达等设备中，大量使用的是高压、小电流输出的开关电源。

《电力电子技术 B》电子教案

第 24 讲	授课方式	理论课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	MATLAB/Simulink 仿真			
教学节次及名称				
教学目的 与要求	熟悉电力电子主电路利用 MATLAB/Simulink 完成仿真。			
教学重点	控制信息如何设置。			
教学难点				
教学内容	<ol style="list-style-type: none"> 1. MATLAB/Simulink 仿真实现三相桥式全控整流电路仿真及波形分析。〈20 分钟〉 2. MATLAB/Simulink 仿真实现降压斩波电路仿真及波形分析。〈20 分钟〉 3. MATLAB/Simulink 仿真实现斩控式交流调压电路仿真及波形分析。〈20 分钟〉 4. MATLAB/Simulink 仿真实现 PWM 逆变电路仿真及波形分析。〈25 分钟〉 5. 小结、答疑。〈5 分钟〉 			
教学方法 及手段	多媒体课件与板书结合讲授，现场提问，布置课后思考题			
小结	掌握 MATLAB/Simulink 电力电子技术主电路的仿真及波形分析。			
作业和思 考题	试完成三相 PWM 整流电路的仿真。			

教 案

电力电子技术 B 课 1 讲

主讲人薛荣辉

课 题：单相半波可控整流电路仿真与测试

目的任务：掌握单相半波可控整流电路阻性负载，阻感性负载，阻感性负载接续流二极管的情况下电路波形分析

重点难点：阻感性负载触发角，阻抗角，电感三者之间关系

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

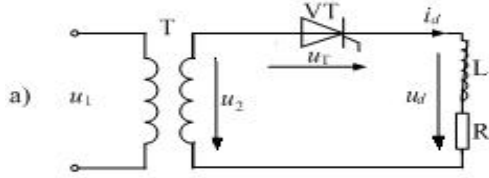
年 月 日

《电力电子技术B》实验电子教案 1

学分	2	授课方式	实验课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	单相半波可控整流电路仿真与测试				
教学节次及名称					
教学目的 与要求	<ol style="list-style-type: none"> 1. 掌握单相半波可控整流电路不同负载的电路分析，参数计算。 2. 完成仿真。 3. 完成实验台接线，示波器测量波形。 				
教学重点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 仿真。 2. 接线波形分析。 				
教学难点	无				
教学内容	<ol style="list-style-type: none"> 1. 介绍实验台单相半波可控整流电路结构。 讲解<15 分钟> 2. 学生分组连线，示波器观察波形，分析工作原理。 讲解<35 分钟> 3. 学生搭建仿真模型。 要求<30 分钟>内完成 4. 检查总结 要求<10 分钟>内完成 				
教学方法 及手段	学生操作为主，引导学生完成接线测试。				
小结	单相半波可控整流电路阻感性负载导通角由什么决定？				
作业和思 考题					

实验一 单相半波可控整流电路仿真与测试

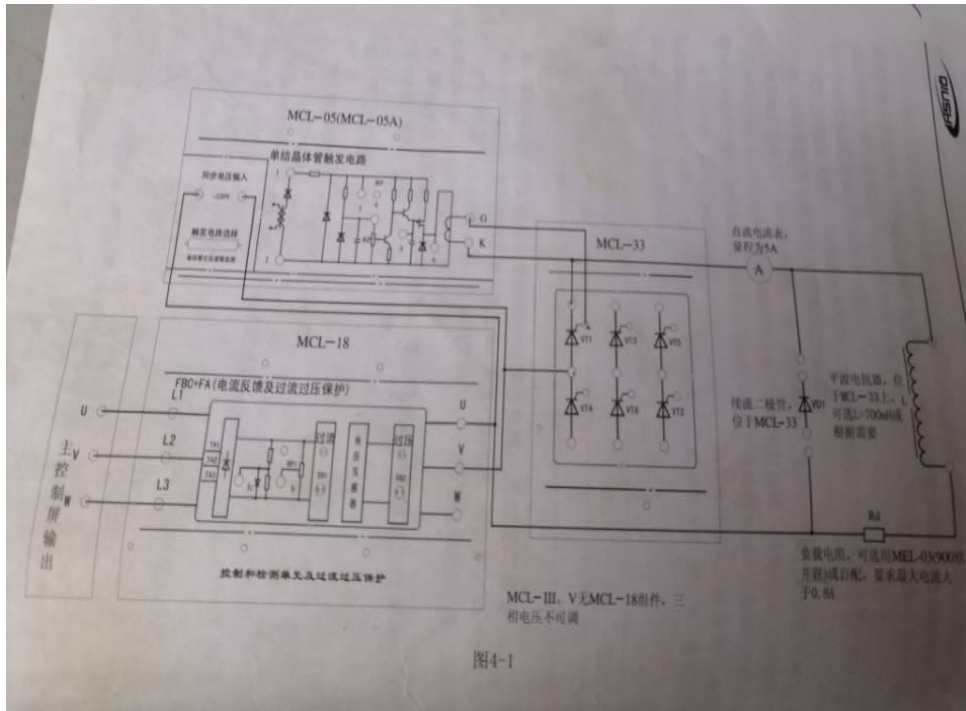
一、单相半波可控整流电路原理



晶闸管满足导通条件，晶闸管导通，忽略管压降，输出端电压等于电源电压；当晶闸管承受反向电压，晶闸管截止，输出电压为0。

二、接线电路

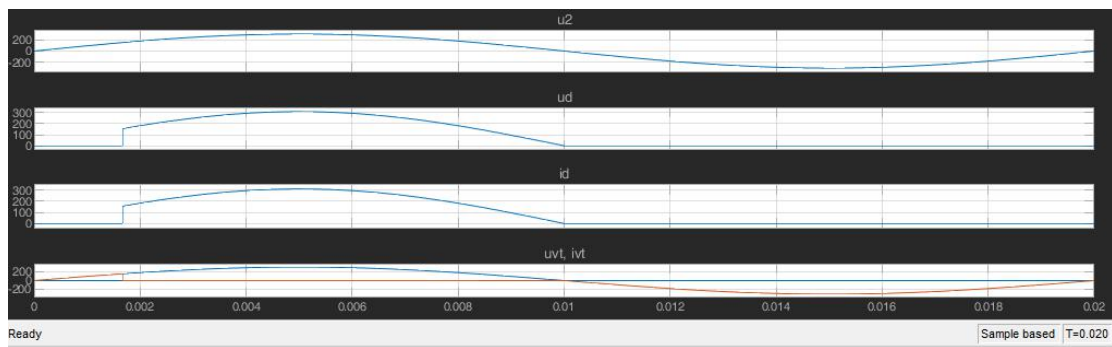
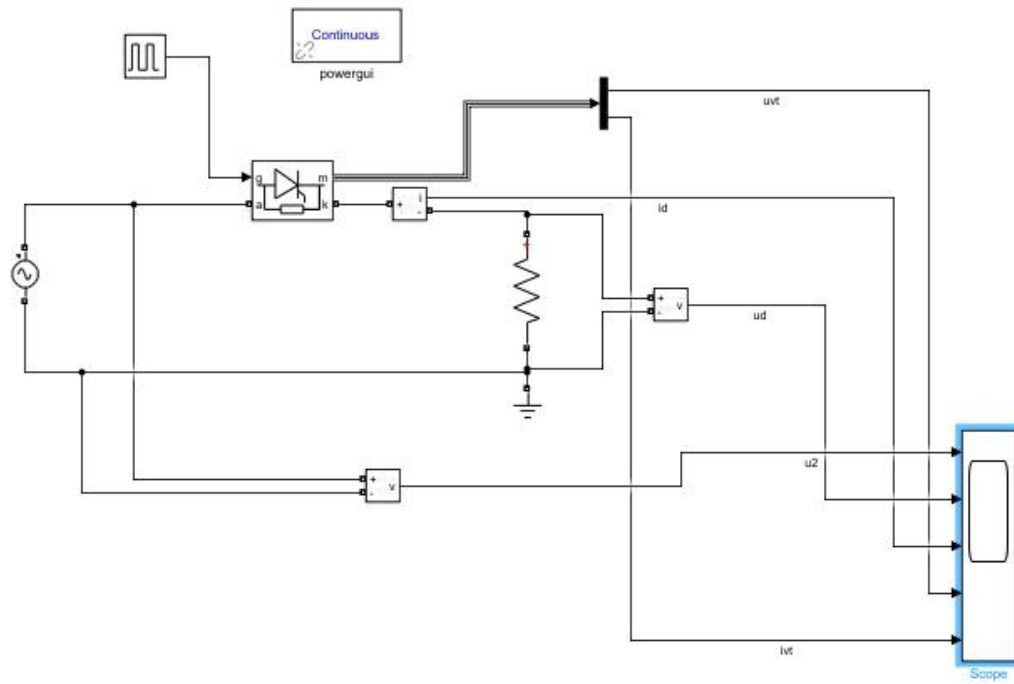
1. 接入阻性负载，观察不同触发角输出电压波形；
2. 接入阻感性负载，观察不同触发角输出电压波形；



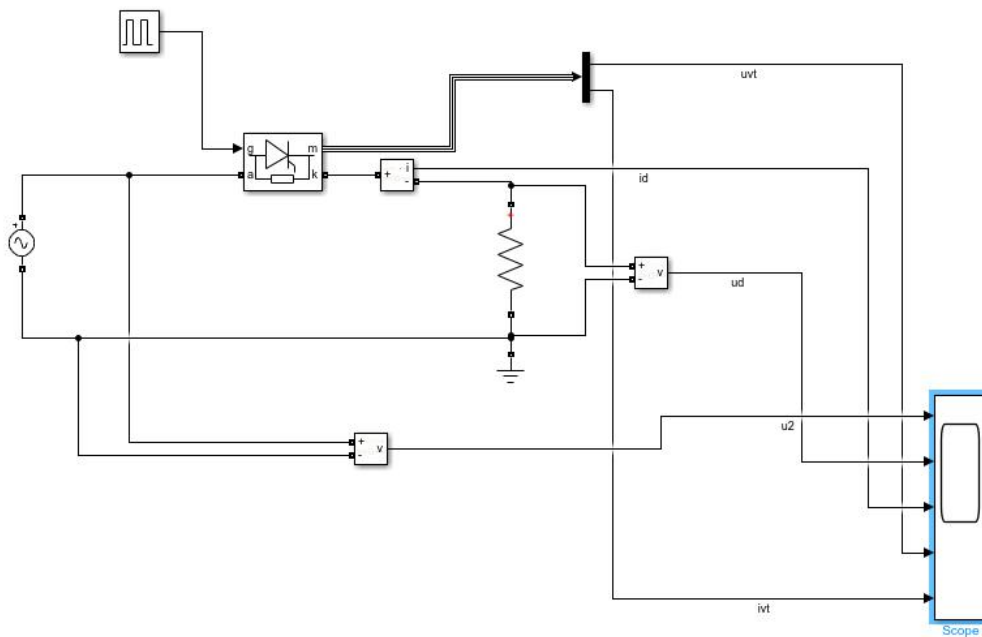
3. 接入阻感性负载及续流二极管，输出电压波形。

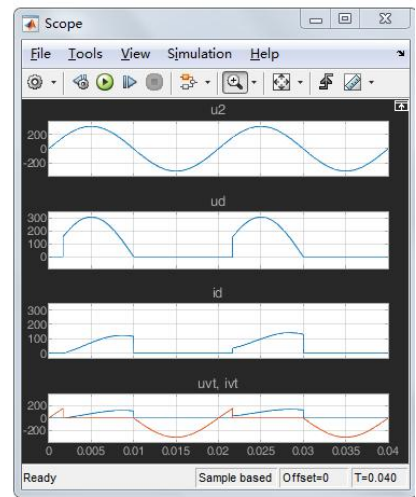
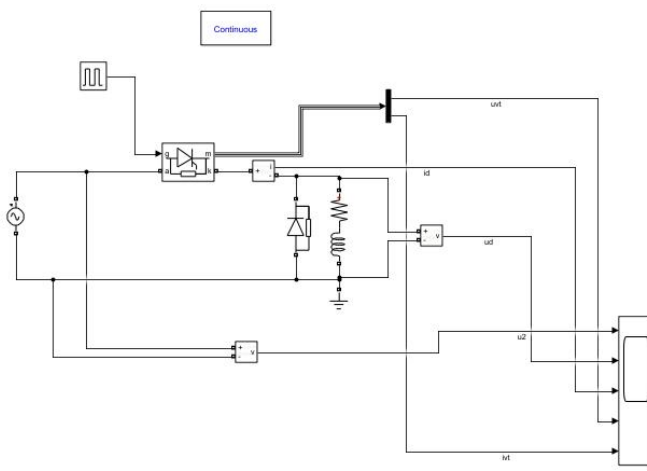
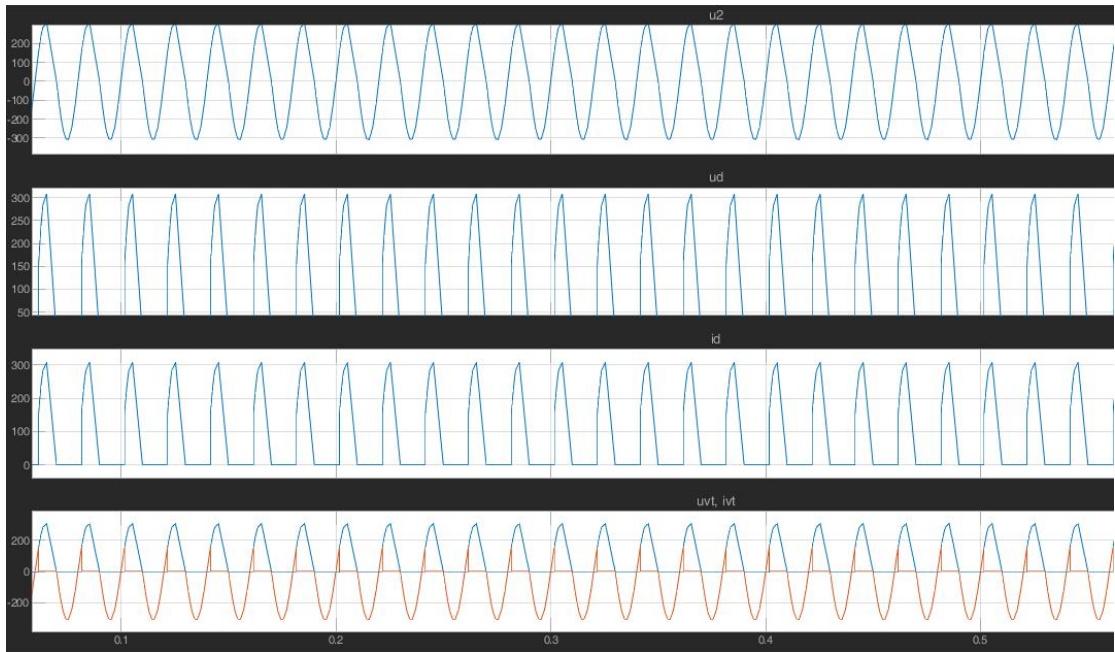
三、完成仿真模型

1. 阻性负载



2. 阻感性负载





教 案

电力电子技术 B 实验 课 2 讲

主讲人薛荣辉

课 题：单相桥式全控整流电路仿真与测试

目的任务：掌握单相桥式全控整流电路阻性负载，阻感性负载，阻感性负载接续流二极管的情况下电路波形分析

重点难点：阻感性负载触发角，阻抗角，电感三者之间关系

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

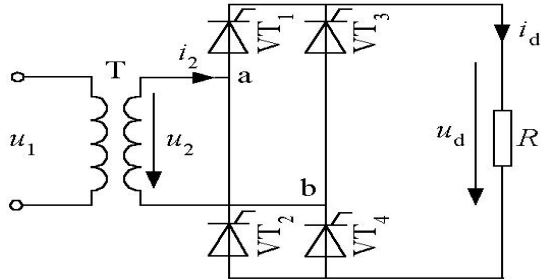
年 月 日

《电力电子技术 B》实验二电子教案

学分	2	授课方式	实验课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	单相桥式全控整流电路性能研究				
教学节次及名称					
教学目的 与要求	<ol style="list-style-type: none"> 1. 掌握单相全控整流电路不同负载的电路分析，参数计算。 2. 完成仿真。 3. 完成实验台接线，示波器测量波形。 				
教学重点	<ol style="list-style-type: none"> 1. 仿真。 2. 接线波形分析。 				
教学难点	无				
教学内容	<ol style="list-style-type: none"> 1. 介绍实验台单相桥式全控整流电路结构。 讲解<15 分钟> 2. 学生分组连线，示波器观察波形，分析工作原理。 讲解<35 分钟> 3. 学生搭建仿真模型。 要求<30 分钟>内完成 4. 检查总结 要求<10 分钟>内完成 				
教学方法 及手段	学生操作为主，引导学生完成接线测试。				
小结	单相桥式全控整流电路阻感性负载导通角由什么决定？				
作业和思 考题					

实验二 单相桥式全控整流电路仿真与测试

一、单相桥式全控整流电路原理



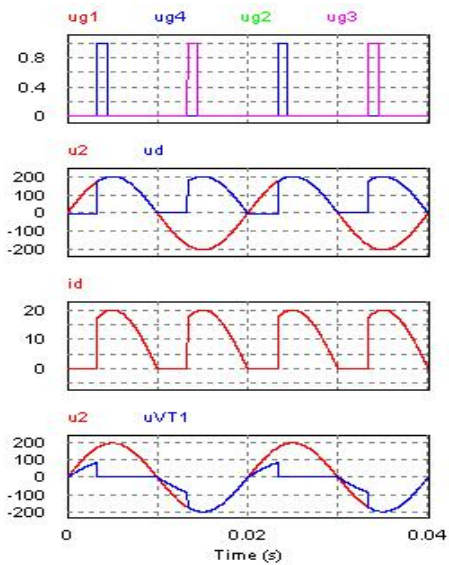
VT1, VT4 够成一对桥臂，当 u_2 为正值，VT1, VT4 触发导通， $u_d = u_2$ ；
VT2, VT3 够成一对桥臂，当 u_2 为负值，VT2, VT3 触发导通， $u_d = -u_2$ ；

二、接线电路

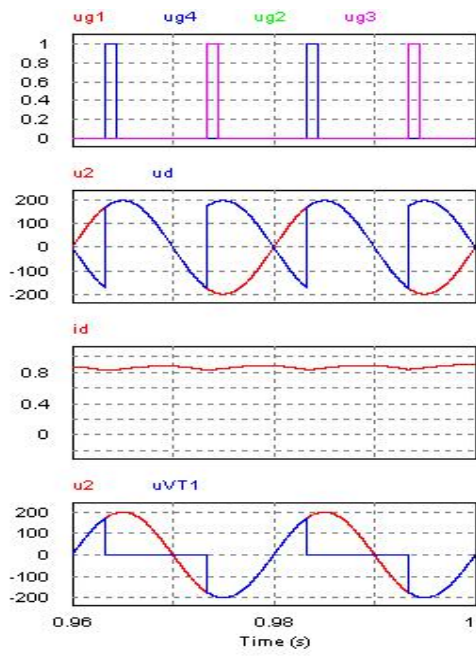
1. 测试锯齿波同步触发电路
2. 接入阻性负载，观察不同触发角输出电压波形；
3. 接入阻感性负载，观察不同触发角输出电压波形。

三、完成仿真模型

1. 阻性负载



2. 阻感性负载



3. 阻感性负载续流二极管
4. 反电动势负载

教 案

电力电子技术 B 实验课 3 讲

主讲人薛荣辉

课 题：逆变电路的性能研究

目的任务：掌握单相电压型逆变电路阻性负载和阻感性负载情况下仿真

重点难点：

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

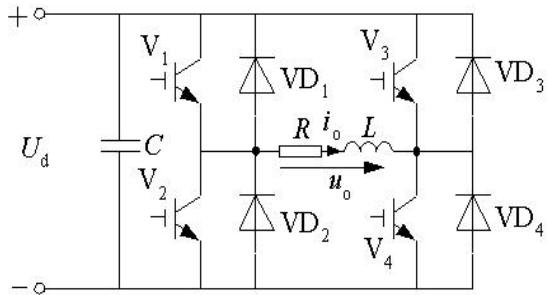
年 月 日

《电力电子技术实验》电子教案 3

学分	2	授课方式	实验课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	实验三 逆变电路性能研究				
教学节次及名称					
教学目的 与要求	1. 掌握电压型逆变电路电路分析。 2. 完成仿真。				
教学重点	仿真参数设置。				
教学难点	无				
教学内容	1. 介绍电压型逆变电路仿真模型。 讲解<20 分钟> 2. 学生搭建仿真模型。 要求<60 分钟>内完成 3. 检查总结 要求<10 分钟>内完成				
教学方法 及手段	学生操作为主				
小结	单相电压型逆变电路输出电压和电流不同相时，管子导通情况？				
作业和思 考题					

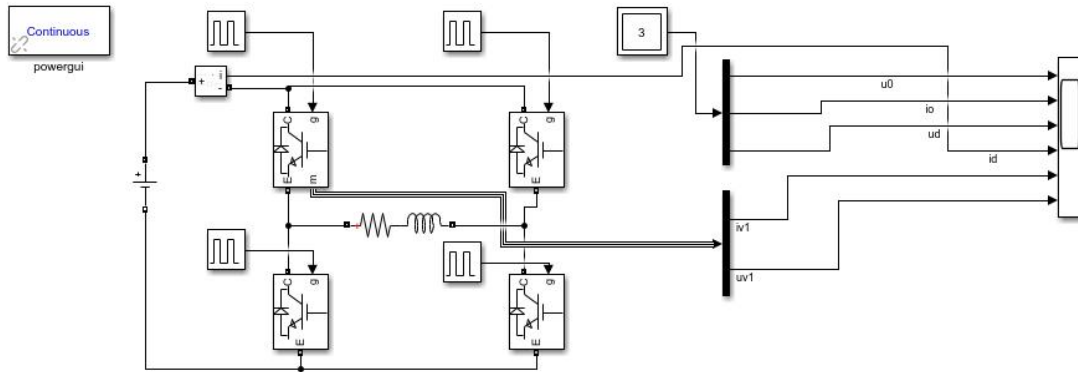
实验三 电压型逆变电路仿真

一、单相电压型逆变电路

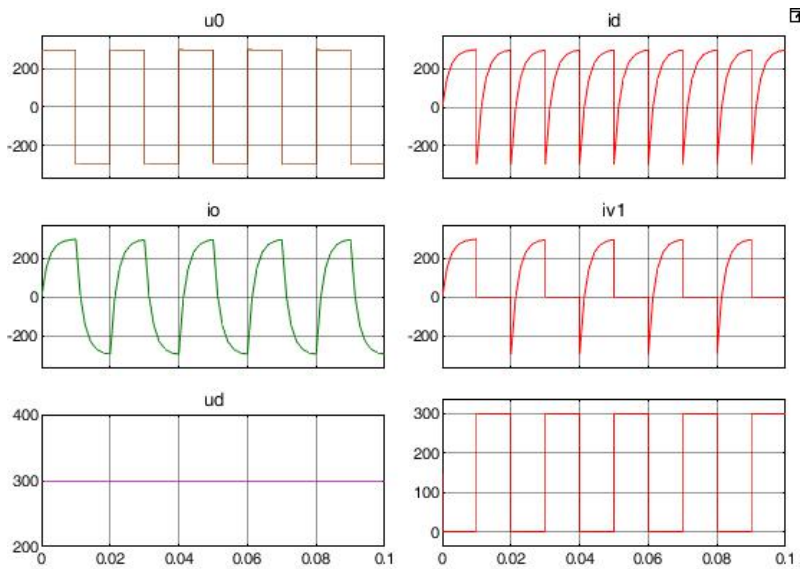


二、完成仿真模型

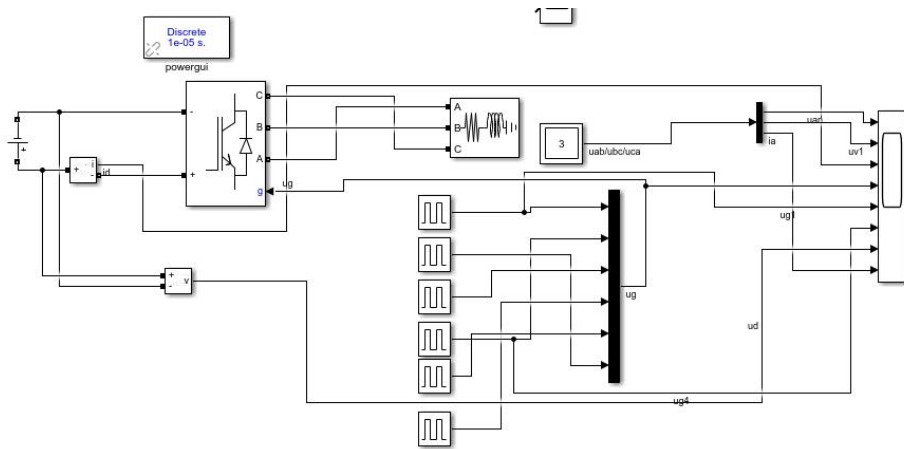
1. 单相电压型逆变电路仿真



T1-T4 占空比为 50%



2.三相电压型逆变电路仿真



Three-Phase Series RLC Load (mask) (link)

Implements a three-phase series RLC load.

Parameters **Load Flow**

Configuration **Y (grounded)**

Nominal phase-to-phase voltage V_n (Vrms)

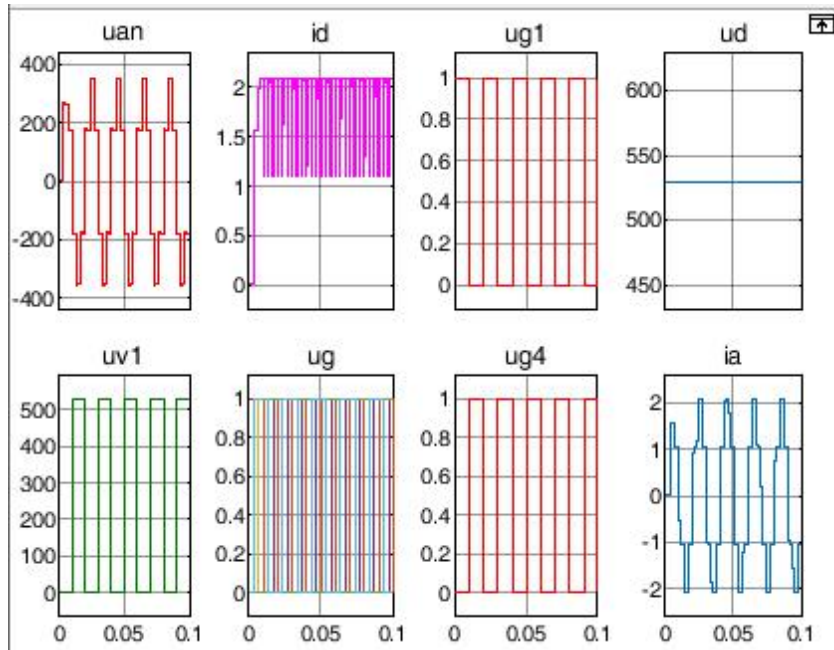
Nominal frequency f_n (Hz):

Specify PQ powers for each phase

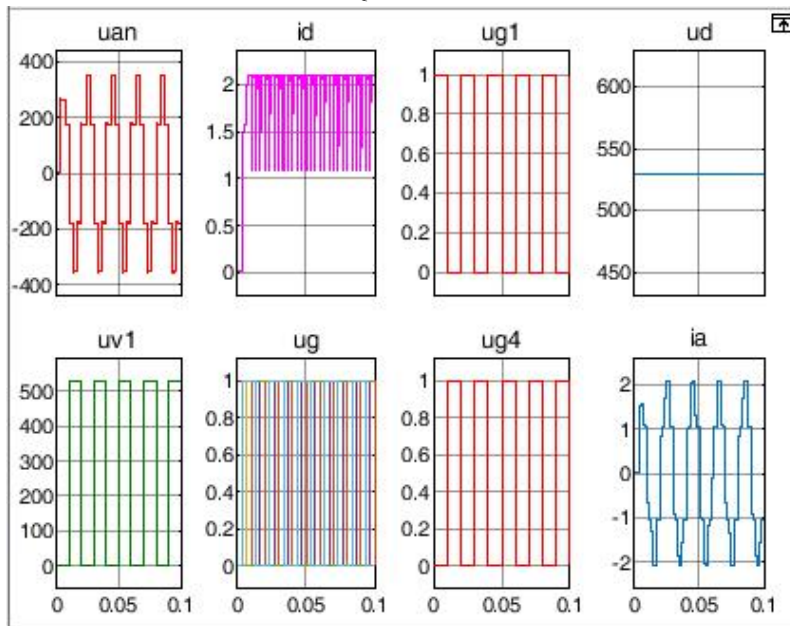
Active power P (W):

Inductive reactive power Q_L (positive var):

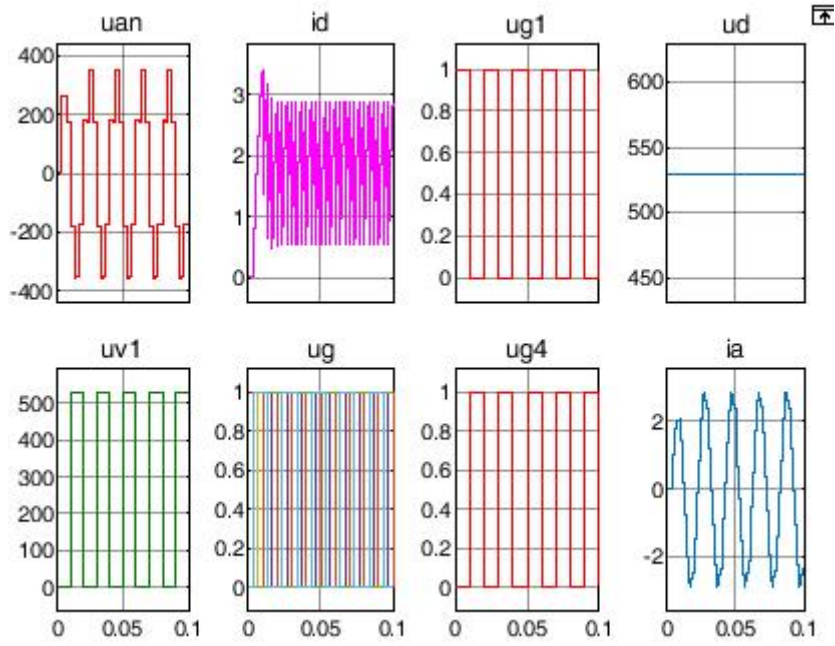
Capacitive reactive power Q_C (negative var):



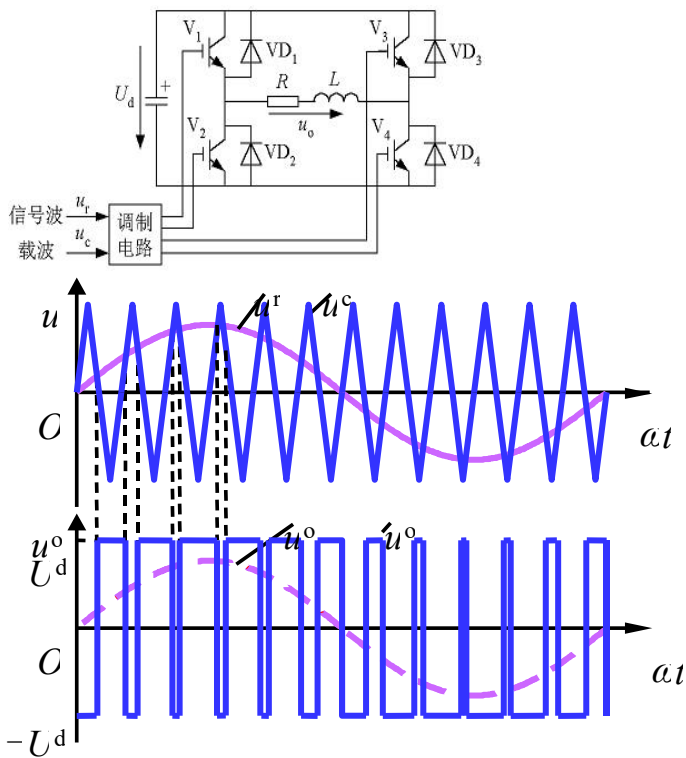
Q=100var



Q=1000var



三、PWM 双极性调制

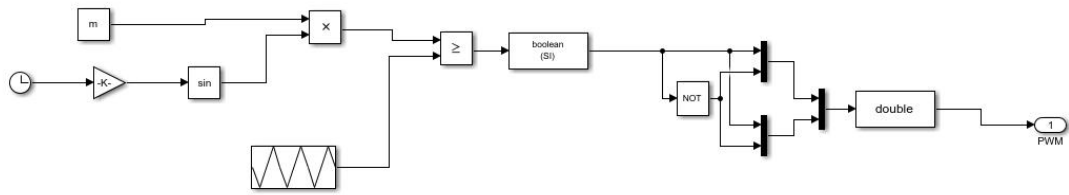


☞在调制信号 u_r 和载波信号 u_c 的交点时刻控制各开关器件的通断。

☞在 u_r 的正负半周，对各开关器件的控制规律相同。

√当 $u_r > u_c$ 时， V_1 和 V_4 导通， V_2 和 V_3 关断，这时如 $i_o > 0$ ，则 V_1 和 V_4 通，如 $i_o < 0$ ，则 VD_1 和 VD_4 通，不管哪种情况都是 $u_o = U_d$ 。

√当 $u_r < u_c$ 时， V_2 和 V_3 导通， V_1 和 V_4 关断，这时如 $i_o < 0$ ，则 V_2 和 V_3 通，如 $i_o > 0$ ，则 VD_2 和 VD_3 通，不管哪种情况都是 $u_o = -U_d$ 。

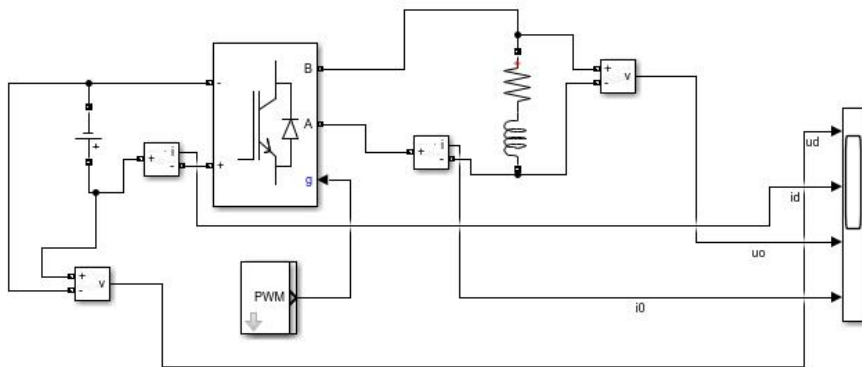


调制波 $u_r = m \sin \omega t$ $f = 50\text{Hz}$

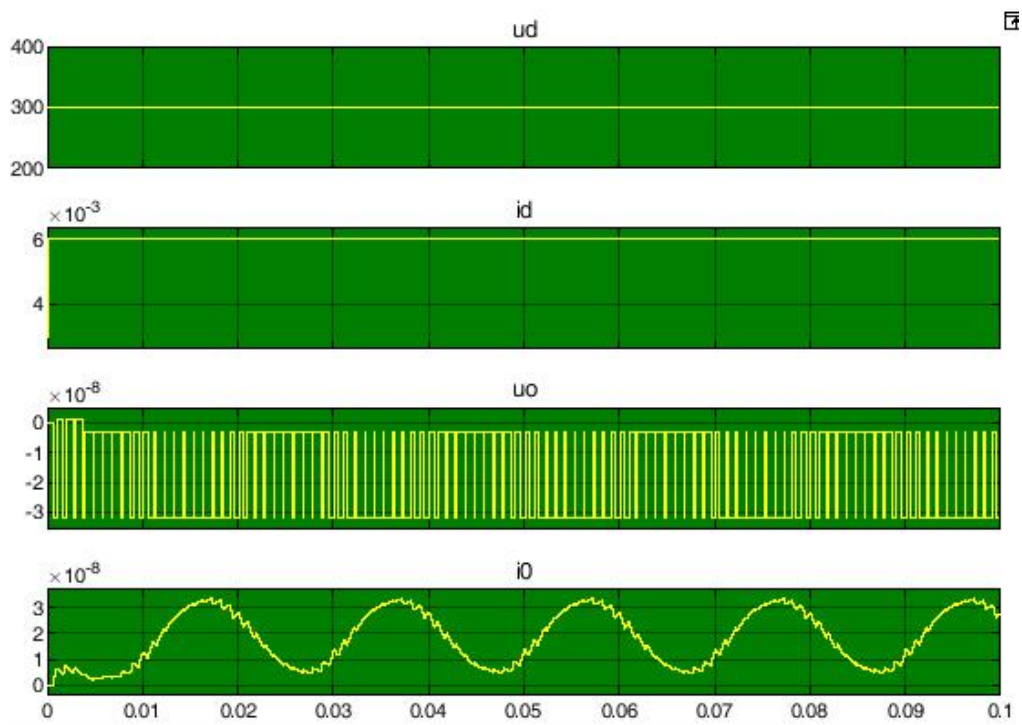
载波信号等腰三角形 u_c f_c $[0 \quad 1/(4*f_c) \quad 3/(4*f_c) \quad 1/f_c]$ $[0 \quad -1 \quad 1 \quad 0]$

设置 $char f$ fc m

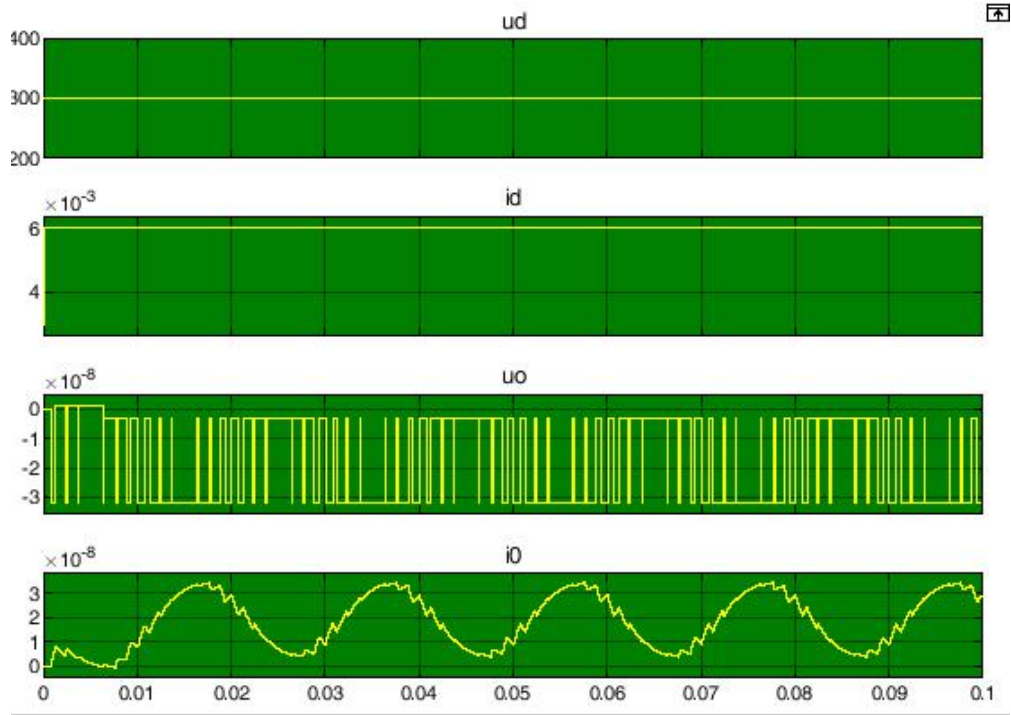
Discrete
5e-05 s.
powergui1



1) $m=0.8$ $f=50\text{Hz}$ $f_c=1000\text{Hz}$



2) $m=0.5$ $f=50\text{Hz}$ $f_c=750\text{Hz}$



教 案

电力电子技术 B 课 4 讲

主讲人薛荣辉

课 题：斩波电路仿真

目的任务：掌握 Buck，Boost 斩波电路仿真

重点难点：占空比设置

教学方法：讲授

使用教具：无

提问作业：

备课时间： 年 月 日 上课时间： 年 月 日

审 批

教研室主任（签字）：

年 月 日

抽 查

系主任（签字）：

年 月 日

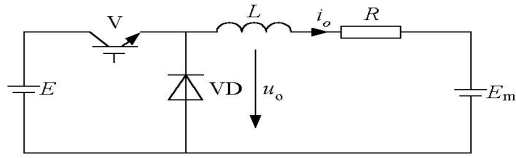
《电力电子技术》实验四电子教案

学分	2	授课方式	实验课	课时安排	2 学时
教学章次及名称	实验四 斩波电路				
教学节次及名称					
教学目的 与要求	1. 完成 Buck 斩波电路建模仿真； 2. 完成 Boost 斩波电路建模仿真； 3. 分析斩波电路工作原理				
教学重点	1. 仿真参数设置。				
教学难点	无				
教学内容	1. 讲解仿真模型搭建注意事项。 讲解<15 分钟> 2. 学生搭建仿真模型。 要求<60 分钟>内完成 3. 检查结果 要求<15 分钟>内完成				
教学方法 及手段	学生仿真为主				
小结	占空比与输入输出电压之间关系？				
作业和思 考题					

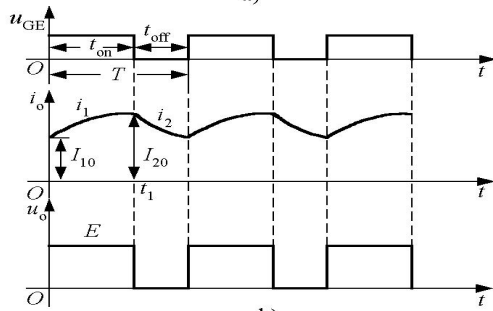
实验四 斩波电路仿真

一、Buck 斩波电路

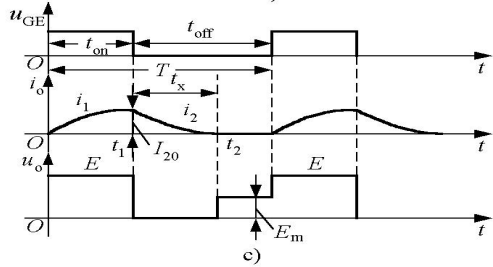
1. 主电路



a)

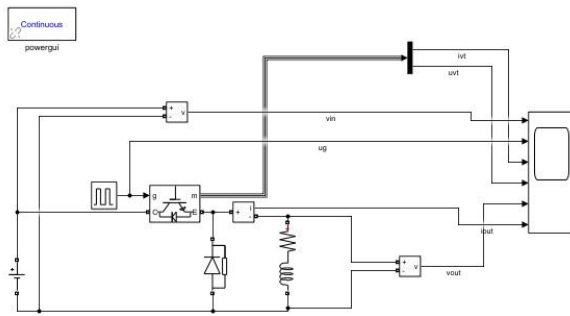


b)

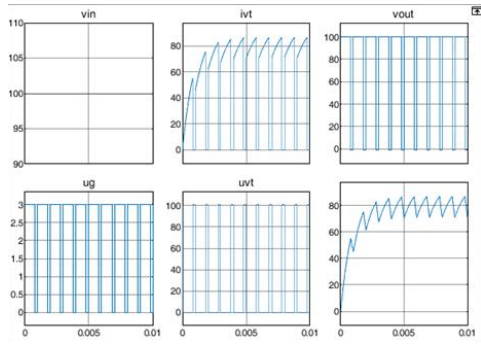


c)

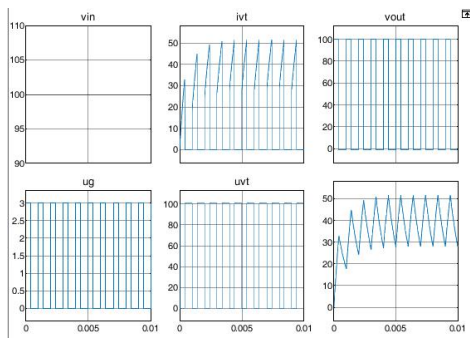
2. 完成仿真模型



1) 周期设为 0.001s, 占空比为 80%

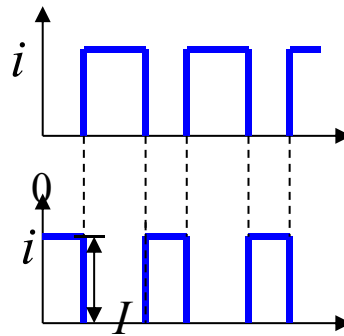
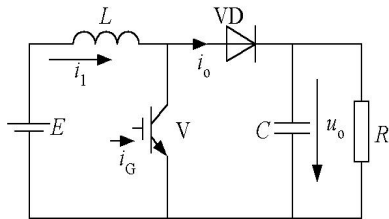


2) 周期设为 0.001s, 占空比为 40%



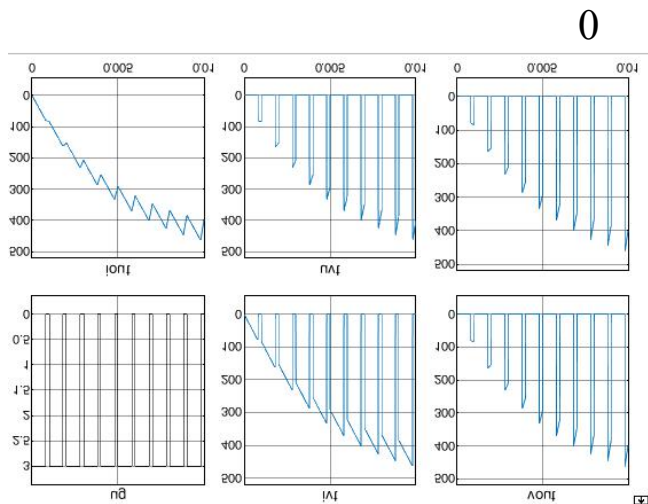
二、Boost 斩波电路

1. 主电路

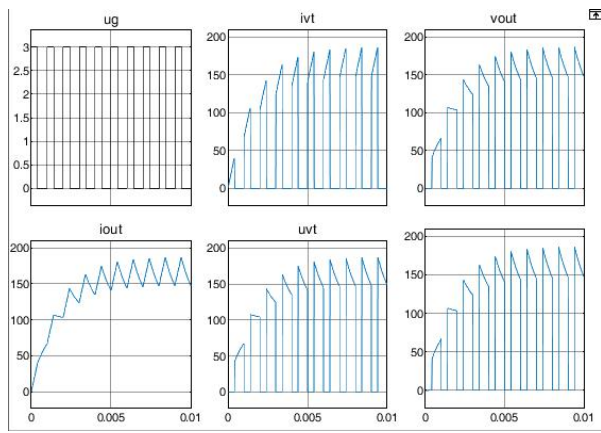


2. 仿真

1) 周期设为 0.001s, 占空比为 80%



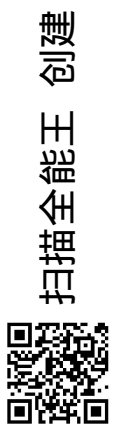
2) 周期设为 0.001s, 占空比为 40%



“电力电子技术B”学生评教记录



序号	学期	开课单位	课程名称	教师工号	教师姓名	课程名称	评价时间	评价分数
1	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-19 14:04:02.0	100
2	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程194A	2020-06-20 19:00:03.0	100
3	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-19 12:24:28.0	100
4	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-19 14:38:48.0	100
5	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-21 01:54:45.0	100
6	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程194A	2020-06-20 18:17:48.0	100
7	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-19 14:52:34.0	100
8	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-19 19:59:22.0	100
9	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-19 20:39:43.0	100
10	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程194A	2020-06-19 19:42:21.0	100
11	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-19 20:37:13.0	100
12	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-20 17:51:14.0	100
13	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程194A	2020-06-19 15:11:04.0	100
14	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程194A	2020-06-20 17:21:26.0	100
15	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程194A	2020-06-28 14:21:40.0	100
16	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程194A	2020-06-19 20:20:11.0	100
17	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-19 23:48:48.0	100
18	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-20 09:00:56.0	100
19	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-19 20:38:40.0	99.9
20	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-19 14:31:17.0	99.9
21	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程194A	2020-06-29 15:32:47.0	99.9
22	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程194A	2020-06-20 02:06:25.0	99.9
23	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程194A	2020-06-19 18:16:30.0	99.8
24	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-19 13:46:55.0	99.4
25	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-19 14:27:35.0	99.3
26	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程194A	2020-06-21 06:59:48.0	99.3
27	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-19 19:34:13.0	99
28	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程194A	2020-06-21 06:55:35.0	98.9
29	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程194A	2020-06-21 15:02:32.0	98.6
30	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-19 18:50:16.0	98.6
31	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程194A	2020-06-21 06:56:39.0	98.5
32	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程194A	2020-06-19 15:22:58.0	98.3
33	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-19 14:28:40.0	98
34	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-19 13:49:35.0	97.9
35	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程194A	2020-06-19 21:37:53.0	97.8
36	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-19 13:53:44.0	97.2



扫描全能王 创建



序号	学期	开课单位	课程名称	教师工号	教师姓名	课程名称	评价时间	学生评教分数
37	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-24 05:29:53.0	95.6
38	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程194A	2020-06-21 06:57:08.0	93
39	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	200307002	薛荣辉	电气工程195A	2020-06-28 09:05:35.0	91
学期平均分								98.97

序号	学期	开课单位	课程名称	教师工号	教师姓名	课程名称	评价时间	学生评教分数
1	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2116	2020-06-20 08:23:14.0	100
2	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2116	2020-06-20 00:32:40.0	100
3	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2117	2020-06-19 10:37:59.0	99.9
4	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2117	2020-06-19 11:39:33.0	99.9
5	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2117	2020-06-20 09:28:56.0	99.9
6	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2117	2020-06-20 07:40:01.0	99.8
7	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2117	2020-06-19 01:58:29.0	99.7
8	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2117	2020-06-19 08:25:45.0	99.7
9	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2117	2020-06-19 08:20:11.0	99.5
10	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2117	2020-06-19 17:54:11.0	99.5
11	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2116	2020-06-19 22:51:23.0	98.8
12	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2117	2020-06-20 00:21:09.0	98.5
13	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2117	2020-06-19 12:27:07.0	98.4
14	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2117	2020-06-19 21:07:33.0	97.9
15	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2116	2020-06-19 23:23:46.0	97.9
16	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2117	2020-06-20 00:51:10.0	97.3
17	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2117	2020-06-20 00:40:58.0	97.3
18	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2117	2020-06-19 01:32:50.0	96.8
19	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2116	2020-06-20 12:04:03.0	96.8
20	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2117	2020-06-19 13:24:03.0	96.3
21	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2117	2020-06-19 17:31:29.0	96.1
22	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2117	2020-06-19 10:47:25.0	94.6
23	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2117	2020-06-19 11:55:05.0	93.8
24	2019-2020-2	电子工程学院	电力电子技术B	201803011	琚晓涛	电气工程2117	2020-06-18 10:09:11.06.0	92
学期平均分								97.93



西安航空学院课堂教学质量评价表 (普通课)

2020-2021 学年第 二 学期

教师姓名	薛宇辉	类别: <input checked="" type="checkbox"/> 专 <input type="checkbox"/> 兼 <input type="checkbox"/> 聘	职称	副教授	任课单位	电子工程
讲授课程	电力电子技术B					
授课题目	单相可控整流					
授课时间	2021年3月11日 星期四 第一小节			授课地点	闫教01306	
授课班级	电气工程 204A		应到学生: 31 实到学生: 31 到课率: 100%			
一级指标	二级指标			分值	得分	
教学态度 (20分)	1. 仪态端庄大方, 言行文明。			5	5	
	2. 教案书写认真规范, 教学资料齐全。			5	5	
	3. 严格要求, 善于管理。			5	5	
	4. 遵守教学规章制度, 按时上下课。			5	5	
教学内容 (30分)	1. 概念准确, 重点突出, 难点讲清, 条理清晰。			10	10	
	2. 教学组织合理, 内容充实, 深度、广度适宜。			10	9	
	3. 内容娴熟, 能脱稿讲解。			10	10	
教学方法 (20分)	1. 普通话教学, 语言生动流畅, 富有激情。			5	5	
	2. 板书工整、规范, 合理应用多媒体课件。			5	5	
	3. 因材施教, 教学方法灵活多样。			5	5	
	4. 注重师生互动, 善于理论联系实际。			5	4	
教学效果 (30分)	1. 课堂纪律好, 气氛活跃, 学生注意力集中。			10	10	
	2. 学生能够认真听讲, 积极思考, 大胆发言。			10	9	
	3. 能够调动学生学习的主动性、积极性。			10	9	
总分				100	96	

(此表请正反两面打印)



第3章 整流电路

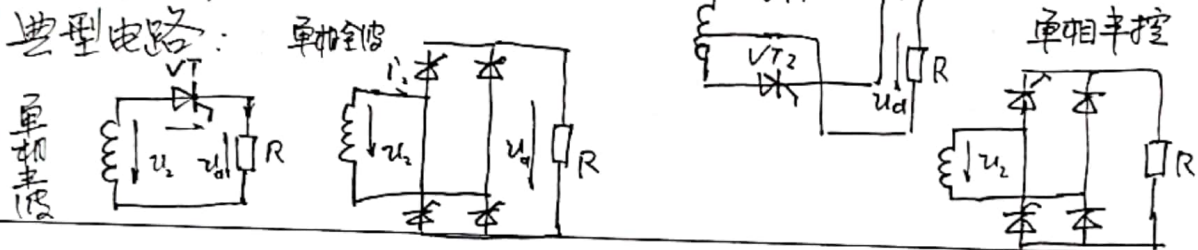
·整流电路的功能：将交流电变为直流电，供给直流用电设备。

·整流电路的分类：

1. 按电路组成的器件分为：不可控、半控和全控(3种)
2. 按电路的组成结构分为：桥式电路和零式电路(全波半波)
3. 按交流输入电路分为：单相电路和多相电路(三相以上)
4. 按变压器二次侧电流的方向分为单相电路和双相电路。

§3.1 单相可控整流电路

典型电路：



总体评价

概念比较准确，学习重点突出，并在电路分析过程中指出了学习难点，较好地实现了教学大纲提出的知识点掌握程度，另外，适当列举的应用实例，也较好地起到了理论与实践结合的作用。

问题与建议

建议：每列出一种典型可控电路，即时应给出电路输入输出波形，在分析波形的同时理解电路工作原理，并总结关键知识点。

是否与授课教师沟通交流：是 否

是否与学生沟通交流：是 否

听课人类别：校领导 职能部门领导 院(部)领导 教研室主任 教师

听课人单位：质评处 教研室： 听课人(签字)：刘西棟



学校政治审查意见

“电力电子技术”申报本次省级线下一流课程，该课程内容及上传的申报材料无危害国家安全、涉密及其他不适宜公开传播的内容，思想导向正确，不存在思想性问题。

该课程团队负责人及成员遵纪守法，无违法违纪行为，不存在师德师风问题、学术不端等问题，五年内未出现过重大教学事故。

中国共产党西安航空学院委员会

2021年5月15日



学校教学工作委员会对课程的评价意见

“电力电子技术”课程遵循学校办学定位和人才培养理念，在专业人才培养方案中对学生培养目标的定位准确，有电的地方就有电力电子技术，电力电子技术在交通、电力系统、新能源、工业、航空航天等领域应用十分广泛。本课程是电气工程及其自动化专业开设的一门专业必修课，是一门理论与应用相结合，实践性强的课程。主要培养学生的分析问题和解决问题的能力，为学生从事与电气工程及其自动化相关技术工作和应用研究奠定一定的基础。

“电力电子技术”课程是体现电力学、电子学、控制理论三门学科交叉形成的综合课程，基于课程的特点，课程团队教师通过翻转课堂，制作 Flash 动画，搭建 Matlab/Simulink 仿真等多种教学手段展示电路的工作原理，并将课程思政贯穿于教学，由全球能源问题引申到新能源发电及电力电子技术的应用，引申到科技兴国的重大意义，作为每个科技工作者应负的责任与义务，引导学生关注国内外电力电子技术的发展，并鼓励学生为国家科技贡献自己的力量，在专业课程教学方面达到协同育人成效。课程整体上符合线下一流课程的建设标准。同意推荐“电力电子技术”课程参评线下一流课程。

西安航空学院教学工作委员会

2021年5月15日

委员签字：

毕杨 梁凌 敬学

