

# 榆林学院 教 案

2020~2021 学年第二学期

学院(系、部)	能源工程学院
教研室(实验室)	电气教研室
课 程 名 称	电力电子技术
授 课 班 级	
主 讲 教 师	李 艳
职 称	讲 师
	《电力电子技术》(第五版)
使 用 教 材	王兆安主编



二〇一九年七月

## 《电力电子技术》模块设计任务单

学习课程	电力电子技术
学习项目	可控整流与直流调速
任务 1	晶闸管性能测试
<p><b>一、任务描述</b></p> <p>能够通过对晶闸管元件进行正确接线及判断电极，从而理解晶闸管的工作原理及特性，正确表示晶闸管的电气符号，识别并读懂晶闸管的伏安特性曲线和额定参数，能够根据实际电路正确选择晶闸管的型号。</p> <p>任务完成时要求做到：</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1、能只用万用表识别判断晶闸管的管脚及好坏。</li><li>2、正确连接晶闸管简易测试电路并运行。</li><li>3、总结晶闸管的开关条件，符号表示。</li><li>4、读懂晶闸管的伏安特性曲线及主要参数含义。</li><li>5、根据实际电路正确选择晶闸管元件型号。</li><li>6、小组讨论学习，共同完成任务，并形成任务报告单。</li></ol> <p><b>二、相关资料及资源</b></p> <p><b>相关资料：</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1、教材“晶闸管、触发与整流”部分</li><li>2、电力电子实验指导书</li><li>3、补发资料</li></ol> <p><b>相关资源</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1、网络资源</li><li>2、电力电子实验台</li><li>3、晶闸管、万用表等</li><li>4、数字仿真软件</li><li>5、示波器等</li></ol>	

## 《电力电子技术》模块设计任务单

学习课程	电力电子技术
学习项目	可控整流与直流调速
任务 2	直流电动机调压调速可控整流电源设计
<p>一、任务描述</p> <p>以可控硅三相桥式全控整流电路构成系统的主电路，采用同步信号为锯齿波的触发电路，触发电路分成三个基本环节：同步电压形成、移相控制、脉冲形成和输出。此外，应有双窄脉冲形成环节。同时考虑保护电路和缓冲电路，通过参数计算对晶闸管进行选型。</p> <p>设计要求：</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1、输入交流电源：三相 140V，<math>f=50\text{Hz}</math>。</li><li>2、直流输出电压：50~150V。</li><li>3、直流输出电流额定值 50A。</li><li>4、直流输出电流连续的最小值为 5A。</li><li>5、给出整体设计框图，画出系统的完整原理图。</li><li>6、说明所选器件的型号、参数。</li></ol> <p>二、设计内容</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1、整流电路的选择</li><li>2、整流变压器额定参数的计算</li><li>3、晶闸管电流、电压额定值的选择</li><li>4、平波电抗器电感值的计算</li><li>5、保护电路的设计</li><li>6、触发电路的设计</li><li>7、画出完整的主电路原理图和控制电路原理图</li><li>8、列出主电路所用元器件的明细表</li><li>9、仿真分析验证</li></ol>	

## 《电力电子技术》模块设计任务单

学习课程	电力电子技术
学习项目	直流斩波与开关电源
任务 3	直流降压斩波电路的设计
<p><b>一、任务描述</b></p> <p>直流斩波的一个重要应用领域是直流供电电源。在各种应用场合中，不同用电设备所需要的直流供电电压的等级不同，采用直流斩波器可以将单一的、不稳定的直流输入电压变换成负载所需要的稳定的、不同电压等级的直流供电电压，因为直流斩波器工作在开关状态，因此这种类型的直流供电电源也称为开关电源。开关电源在计算机、通信等各个领域也得到了广泛的应用。</p> <p>设计要求：</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1、直流输入电压 200V。</li><li>2、输出电压 50V-100V 连续可调。</li><li>3、输出最大电流 40A。</li><li>4、实现 DC-DC 变换，接阻感性负载。</li><li>5、给出整体设计框图，画出系统的完整原理图。</li><li>6、说明所选器件的型号、参数。</li></ol> <p><b>二、设计内容</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1、Buck 电路的设计</li><li>2、开关管电流、电压额定值的选择</li><li>3、续流二极管的选择</li><li>4、平波电抗器电感值的计算</li><li>5、保护电路的设计</li><li>6、触发电路的设计</li><li>7、画出完整的主电路原理图和控制电路原理图</li><li>8、列出主电路所用元器件的明细表</li><li>9、仿真分析验证</li></ol>	

## 《电力电子技术》模块设计任务单

学习课程	电力电子技术
学习项目	直流斩波与开关电源
任务 4	开关电源的设计
<p><b>一、任务描述</b></p> <p>开关电源是利用现代电力电子技术，控制开关管开通和关断的时间比率，维持稳定输出电压的一种电源。它运用功率变换器进行电能变换，经过变换电能，可以满足各种对参数的要求。广义地说，利用半导体功率器件作为开关，将一种电源形式转变为另一种电源形式的主电路都叫做开关变换器电路；转变时用自动控制闭环稳定输出并有保护环节则称为开关电源。</p> <p>设计要求：</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1、设计和制作 12V,15V,24V,36V 中任一种开关电源并利用单片机检测显示电压。</li><li>2、采用隔离或非隔离变换电路。</li><li>3、采用 TOP 或 PWM 芯片实现。</li><li>4、给出整体设计框图，画出系统的完整原理图。</li><li>5、说明所选器件的型号、参数。</li></ol> <p><b>二、设计内容</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1、系统总电路的设计</li><li>2、变换电路的选择</li><li>3、控制器及控制方案设计</li><li>4、显示电路的设计</li><li>5、保护电路的设计</li><li>6、触发电路的设计</li><li>7、画出完整的主电路原理图和控制电路原理图</li><li>8、列出主电路所用元器件的明细表</li><li>9、仿真分析验证</li></ol>	

## 《电力电子技术》模块设计任务单

学习课程	电力电子技术
学习项目	单相交流调压调光灯
任务 5	单相交流调压电路设计
<p><b>一、任务描述</b></p> <p>交流调压是将幅值固定的交流电能转化为同频率的幅值可调的交流电能。交流调压电路广泛应用于灯光控制、工业加热、感应电机调速以及电解电镀的交流侧调压等场合。</p> <p>双向晶闸管是由普通晶闸管派生出来的，在交流电路中可以代替一组反并联的普通晶闸管，只需一个触发电路。因其具有触发电路简单、工作性能可靠的优点，在交流调压、无触点交流开关、温度控制、灯光调节及交流电动机调速等领域中应用广泛，是一种比较理想的交流开关器件。</p> <p>设计要求：</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1、输入交流 220V。</li><li>2、采用双向晶闸管开关器件，电阻性负载。</li><li>3、<math>\alpha=0</math> 时，电灯最亮，随着 <math>\alpha</math> 的增大，灯的亮度由亮变暗，当 <math>\alpha=\pi</math> 时，灯熄灭。</li><li>4、给出整体设计框图，画出系统的完整原理图。</li><li>5、说明所选器件的型号、参数。</li><li>6、提升部分：分析感性负载的情况。</li></ol> <p><b>二、设计内容</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1、系统总电路的设计</li><li>2、采用集成触发器组成的双向晶闸管触发电路设计</li><li>3、控制器及控制方案设计</li><li>4、画出完整的主电路原理图和控制电路原理图</li><li>5、列出主电路所用元器件的明细表</li><li>6、仿真分析验证</li></ol>	

## 《电力电子技术》模块设计任务单

学习课程	电力电子技术
学习项目	无源逆变电路
任务 6	电压型无源逆变电路设计
<p><b>一、任务描述</b></p> <p>把直流电变成交流电称为逆变。逆变电路分为三相和单相两大类。其中，单相逆变电路主要采用桥式接法。</p> <p>无源逆变是指逆变器的交流侧不与电网连接，而是直接接到负载，即将直流电逆变为某一频率或可变频率的交流电供给负载。它在交流电机变频调速、感应加热、不停电电源等方面应用十分广泛，是构成电力电子技术的重要内容。</p> <p>电压型逆变电路有以下特点：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。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。</p> <p>设计要求：</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1、输入直流电压 100V。</li><li>2、输出功率为 200W。</li><li>3、输出电压波形为 1kHz 方波。</li><li>4、给出整体设计框图，画出系统的完整原理图。</li><li>5、说明所选器件的型号、参数。</li></ol> <p><b>二、设计内容</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1、系统总电路的设计</li><li>2、驱动电路设计</li><li>3、过压与过流保护电路的设计</li><li>4、画出完整的主电路原理图和控制电路原理图</li><li>5、列出主电路所用元器件的明细表</li><li>6、仿真分析验证</li></ol>	

## 《电力电子技术》模块设计任务单

模块一	可控整流与直流调速
项目一	单相可控整流调光灯电路
任务 3	调光灯电路仿真与实验验证
<p><b>一、任务描述</b></p> <p>对于大、中电流容量的晶闸管，由于电流容量增大，要求触发电路的功率增大，为了保证其触发脉冲的可靠性，采用集成触发器。通过调整触发角的大小，改变调光灯的亮度。</p> <p>任务完成时要求做到：</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1、能阅读单相全控桥式整流调光灯电路图；</li><li>2、能理解单相全控桥式整流调光灯电路的工作原理；</li><li>3、能进行单相全控桥式整流调光灯电路的安装接线；</li><li>4、能使用电工电子仪表进行单相全控桥式整流调光灯的调试；</li><li>5、能对单相全控桥式整流调光灯电路进行维护。</li><li>6、小组讨论学习，共同完成任务，并形成任务报告单。</li></ol> <p><b>二、相关资料及资源</b></p> <p><b>相关资料：</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1、教材“晶闸管、触发与整流”部分</li><li>2、电力电子实验指导书</li><li>3、补发资料</li></ol> <p><b>相关资源</b></p> <ol style="list-style-type: none"><li>1、网络资源</li><li>2、电力电子实验台</li><li>3、晶闸管、万用表等</li><li>4、数字仿真软件</li></ol>	

## 《电力电子技术》模块设计任务评价表

学习任务名称				
任务名				
任务工作小组				
评分内容	标准 分值	自我评分 (20%)	班组评分 (30%)	教师评分 (50%)
<b>任务的领会及计划阶段</b>				
是否清楚组内分工，是否清楚任务内容及要求	5			
是否给定了实施计划	5			
<b>任务实施执行阶段</b>				
观察与学习是否积极进行	15			
是否在规定时间内完成任务	10			
是否独立完成	15			
是否注意安全文明学习	5			
是否具有环保意识	5			
<b>任务完成效果检查</b>				
是否指出电路的结构及工作原理	10			
任务完成质量	10			
表达是否清晰、流畅	5			
<b>评价</b>				
对任务设置合理性的评价	5			
任务有待改进之处	5			
改进方法	5			
总分	100			

# 电力电子技术 课程教案

## 第 1 讲

课程类别	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实训课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时安排	2
授课题目			
1 绪论			
教学目的、要求			
1. 掌握电力电子技术的基本概念、学科地位、基本内容； 2. 了解电力电子技术的发展史； 3. 了解电力电子技术的应用、电力电子技术的发展前景； 4. 了解本教材的内容。			
教学重点及难点			
重点：电力电子器件的分类，电能的 4 种变换形式。 难点：无			
教学过程		方法及手段	
导入：电力电子技术的应用案例。		多媒体	
新授： 1 基本概念 1.1 什么是电力电子技术 <b>电力电子技术</b> ：使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术目前电力电子器件均用半导体制成，故也称电力半导体器件。电力电子技术变换的“电力”可大到数百 MW 甚至 GW，也可小到数 W 甚至 mW 级。 电子技术一般即指信息电子技术，广义而言，也包括电力电子技术。 1.2 两大分支 (1) 电力电子器件制造技术 电力电子技术的基础，理论基础是半导体物理。 (2) 变流技术（电力电子器件应用技术） 用电力电子器件构成电力变换电路和对其进行控制的技术，以及构成电力电子装置和电力电子系统的技术。电力电子技术的核心，理论基础是电路理论。 <b>电力变换四大类：交流变直流、直流变交流、直流变直流、交流变交流</b> 1.3 与相关学科的关系 ➢ 电力电子学 (Power Electronics)名称 60 年代出现； ➢ 1974 年，美国的 W.Newell 用倒三角形对电力电子学进行了描述，被全世界普遍接受。 (1) 与电子学（信息电子学）的关系 ➢ 都分为器件和应用两大分支；		举例讲解	

- 器件的材料、工艺基本相同，采用微电子技术；
- 应用的理论基础、分析方法、分析软件也基本相同；
- 信息电子电路的器件可工作在开关状态，也可工作在放大状态；电力电子电路的器件一般只工作在开关状态；

#### (2) 与电力学（电气工程）的关系

- 电力电子技术广泛用于电气工程中：高压直流输电、静止无功补偿、电力机车牵引、交直流电力传、电解、电镀、电加热、高性能交直流电源；
- 国内外均把电力电子技术归为电气工程的一个分支，电力电子技术是电气工程学科中最为活跃的一个分支。

#### (3) 与控制理论（自动化技术）的关系

- 电力电子技术是弱电控制强电的技术，是弱电和强电的接口；控制理论是这种接口的有力纽带；
- 电力电子装置是自动化技术的基础元件和重要支撑技术。

#### (4) 地位和未来

电力电子技术和运动控制一起，和计算机技术共同成为未来科学技术的两大支柱。电力电子技术是一门崭新的技术，21世纪仍将以迅猛的速度发展。

### 2 电力电子技术的发展史

- 一般工业：交直流电机、电化学工业、冶金工业；
- 交通运输：电气化铁道、电动汽车、航空、航海；
- 电力系统：高压直流输电、柔性交流输电、无功补偿；
- 电子装置电源：为信息电子装置提供动力；
- 家用电器：“节能灯”、变频空调；
- 其他：UPS、航天飞行器、新能源、发电装置。

### 3 电力电子技术的应用

- 电源技术：电力电子装置提供给负载的是各种不同的电源；
- 节能技术：电力电子技术对节省电能有重要意义，特别在大型风机、水泵采用变频调速，在使用量十分庞大的照明电源等方面。

#### 作业和思考题：

思考：电力电子技术未来的发展方向

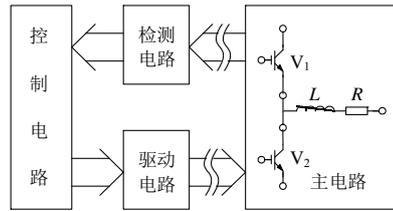
#### 教学反思：

对电力电子技术的实际应用举例不生动，以后需配有图片、视频等素材来说明。

# 电力电子技术 课程教案

## 第 2 讲

<b>课程类别</b>	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实训课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时 安排	2
<b>授课题目</b>			
2.1 电力电子器件概述			
2.2 不控型器件—电力二极管			
<b>教学目的、要求</b>			
1.掌握电力电子器件的概念和特征；			
2.熟悉应用电力电子器件的系统组成；			
3.了解电力电子器件的分类；			
4.掌握电力二极管的工作特性。			
<b>教学重点及难点</b>			
重点：器件的工作原理、基本特性、主要参数以及选择和使用中应注意的一些问题。			
难点：基本特性及电力电子器件的两个基本要求。			
<b>教 学 过 程</b>			<b>方法及手 段</b>
<b>导入：</b> 复习回顾：信息电子技术中半导体及二极管相关知识。			· 学习通+ 课件
<b>新授：</b> <b>1.1 电力电子器件概述</b> 1.1.1 电力电子器件的概念和特征 <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 主电路（Main Power Circuit）——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。</li> <li>➤ 电力电子器件（Power Electronic Device）——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。</li> <li>➤ 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。</li> <li>➤ 两类中，自 20 世纪 50 年代以来，真空管仅在频率很高（如微波）的大功率高频电源中还在使用，而电力半导体器件已取代了汞弧整流器（Mercury Arc Rectifier）、闸流管（Thyratron）等电真空器件，成为绝对主力。因此，电力电子器件目前也往往专指电力半导体器件。</li> <li>➤ 电力半导体器件所采用的主要材料仍然是硅。</li> <li>➤ 同处理信息的电子器件相比，电力电子器件的一般特征：             <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 处理电功率的能力小至毫瓦级，大至兆瓦级；</li> <li>2) 电力电子器件一般都工作在开关状态；</li> <li>3) 电力电子器件往往需要由信息电子电路来控制；</li> <li>4) 不仅在器件封装上讲究散热设计，在其工作时一般都要安装散热器。</li> </ol> </li> </ul> 1.1.2 应用电力电子器件的系统组成 <b>电力电子系统：</b> 由控制电路、驱动电路和以电力电子器件为核心的主电路组成。			



### 1.1.3 电力电子器件的分类

➤按照器件能够被控制电路信号所控制的程度，分为以下三类：

➤半控型器件：通过控制信号可以控制其导通而不能控制其关断，如晶闸管；

➤全控型器件：通过控制信号既可控制其导通又可控制其关断，又称自关断器件，包括绝缘栅双极晶体管IGBT、电力场效应晶体管MOSFET以及门极可关断晶闸管GTO；

➤不可控器件：不能用控制信号来控制其通断，因此也就不需要驱动电路，如电力二极管。

(2) 按照驱动电路加在器件控制端和公共端之间信号的性质，分为两类：

➤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。

(3) 按照器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况分为三类：

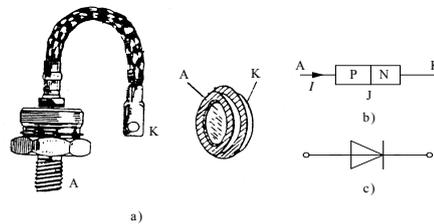
➤单极型器件：由一种载流子参与导电的器件；

➤双极型器件：由电子和空穴两种载流子参与导电的器件；

➤复合型器件：由单极型器件和双极型器件集成混合而成的器件。

## 1.2不可控器件—电力二极管

### 1.2.1 PN结与电力二极管的工作原理



PN结的单向导电性：二极管的基本原理就在于PN结的单向导电性这一主要特征。

造成电力二极管和信息电子电路中的普通二极管区别的一些因素：

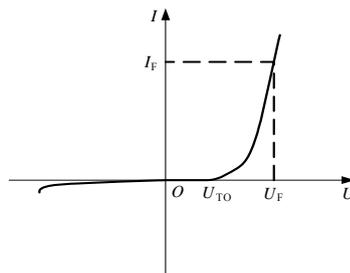
➤正向导通时要流过很大的电流；

➤引线 and 焊接电阻的压降等都有明显的影响；

➤承受的电流变化率 $di/dt$ 较大；

➤为了提高反向耐压，其掺杂浓度低也造成正向压降较大。

### 1.2.2 电力二极管的基本特性



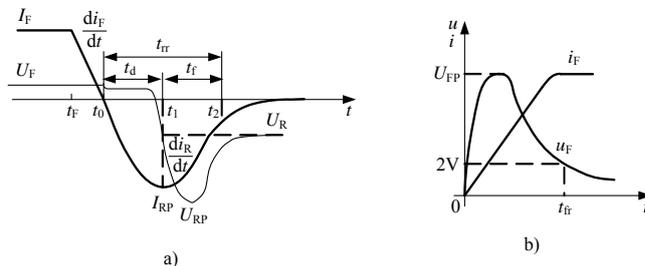
(1) 静态特性：伏安特性

当电力二极管承受的正向电压大到一定值（门槛电压 $U_{T0}$ ），正向电流才开始明显

增加，处于稳定导通状态。与正向电流 $I_F$ 对应的电力二极管两端的电压 $U_F$ 即为其正向电压降。当电力二极管承受反向电压时，只有少数引起的微小而数值恒定的反向漏电流。

(2) 动态特性：因结电容的存在，三种状态之间的转换必然有一个过渡过程，此过程中的电压—电流特性是随时间变化的。

(3) 开关特性：反映通态和断态之间的转换过程。



电力二极管的正向压降先出现一个过冲 $U_{FP}$ ，经过一段时间才趋于接近稳态压降的某个值（如 2V）。这一动态过程时间被称为正向恢复时间 $t_{fr}$ 。

### 1.2.3 电力二极管的主要参数

(1) 正向平均电流 $I_{F(AV)}$

在指定的管壳温度（简称壳温，用 $T_C$ 表示）和散热条件下，其允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值。

(2) 正向压降 $U_F$

指电力二极管在指定温度下，流过某一指定的稳态正向电流时对应的正向压降。

(3) 反向重复峰值电压 $U_{RRM}$

指对电力二极管所能重复施加的反向最高峰值电压，通常是其雪崩击穿电压 $U_B$ 的2/3，使用时，往往按照电路中电力二极管可能承受的反向最高峰值电压的两倍来选定。

(4) 最高工作结温 $T_{JM}$

结温是指管芯PN结的平均温度，用 $T_J$ 表示，最高工作结温 $T_{JM}$ 是指在PN结不致损坏的前提下所能承受的最高平均温度， $T_{JM}$ 通常在125~175°C范围之内。

(5) 反向恢复时间 $t_{rr}$

$t_{rr} = t_d + t_f$ ，关断过程中，电流降到0起到恢复反向阻断能力止的时间。

(6) 浪涌电流 $I_{FSM}$

指电力二极管所能承受最大的连续一个或几个工频周期的过电流。

### 1.2.4 电力二极管的主要类型

- 普通二极管（General Purpose Diode）
- 快恢复二极管（Fast Recovery Diode— FRD）
- 肖特基二极管

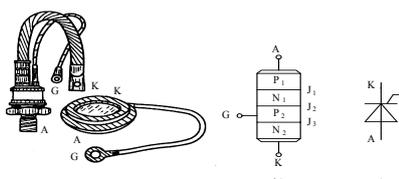
作业和思考题：

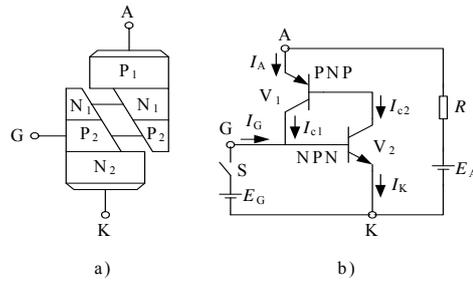
教学反思：

课堂教学如果添加仿真动态演示环节会更好

# 电力电子技术 课程教案

## 第 3 讲

课程类别	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实训课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时安排	2
<b>授课题目</b> 2.3 半控型器件—晶闸管			
<b>教学目的、要求</b> 1.掌握晶闸管的工作原理、参数的确定和型号的选择，熟悉其基本特性，了解晶闸管的派生器件； 2.熟悉可关断晶闸管（GTO）的结构和工作原理，了解有关特性和参数。			
<b>教学重点及难点</b> 重点：晶闸管的额定电流、额定电压参数，晶闸管的额定电流计算，GTO 的工作原理； 难点：晶闸管的额定电流计算和型号选择，几个重要参数的理解；			
<b>教学过程</b>		<b>方法及手段</b>	
<b>导入：</b> 复习回忆： 1. 二极管的导通原理是什么？ 2. 功率二极管的额定电流如何计算？ 3. 功率二极管的伏安特性相比较有什么特点？ <b>新授：</b> <b>1.3 半控型器件—晶闸管</b> 晶闸管（Thyristor）：晶体闸流管，又称可控硅整流器（Silicon Controlled Rectifier——SCR），1956年美国贝尔实验室（Bell Lab）发明了晶闸管，1957年美国通用电气公司（GE）开发出第一只晶闸管产品，1958年商业化，开辟了电力电子技术迅速发展和广泛应用的崭新时代，20世纪80年代以来，开始被性能更好的全控型器件取代，能承受的电压和电流容量最高，工作可靠，在大容量的场合具有重要地位。 <b>1.3.1 晶闸管的结构与工作原理</b> >外形有螺栓型和平板型两种封装， >引出阳极A、阴极K和门极（控制端）G三个联接端， >对于螺栓型封装，通常螺栓是其阳极，能与散热器紧密联接且安装方便，平板型封装的晶闸管可由两个散热器将其夹在中间。		多媒体、 举例 录像	
			
<b>工作原理：</b> $I_{c1} = \alpha_1 I_A + I_{CBO1}; \quad I_{c2} = \alpha_2 I_K + I_{CBO2};$ $I_K = I_A + I_G; \quad I_A = I_{c1} + I_{c2}.$			



式中 $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 分别是晶体管 $V_1$ 和 $V_2$ 的共基极电流增益； $I_{CBO1}$ 和 $I_{CBO2}$ 分别是 $V_1$ 和 $V_2$ 的共基极漏电流。由以上式（1-1）~（1-4）可得

$$I_A = \frac{\alpha_2 I_G + I_{CBO1} + I_{CBO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}$$

晶体管的特性是：在低发射极电流下 $\alpha$ 是很小的，而当发射极电流建立起来之后， $\alpha$ 迅速增大。

阻断状态： $I_G=0$ ， $\alpha_1+\alpha_2$ 很小，流过晶闸管的漏电流稍大于两个晶体管漏电流之和。

开通（门极触发）：注入触发电流使晶体管的发射极电流增大以致 $\alpha_1+\alpha_2$ 趋近于1的话，流过晶闸管的电流 $I_A$ （阳极电流）将趋近于无穷大，实现饱和导通。 $I_A$ 实际由外电路决定。

其他几种可能导通的情况：

- 阳极电压升高至相当高的数值造成雪崩效应；
- 阳极电压上升率 $du/dt$ 过高；
- 结温较高；

光直接照射硅片，即光触发。光触发可以保证控制电路与主电路之间的好绝缘而应用于高压电力设备中之外，其它都因不易控制而难以应用于实践，称为光控晶闸管（Light Triggered Thyristor——LTT）

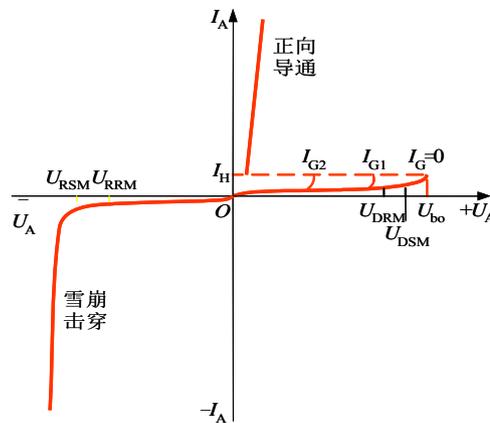
只有门极触发（包括光触发）是最精确、迅速而可靠的控制手段。

**晶闸管正常工作时的特性总结：**

- 承受反向电压时，不论门极是否有触发电流，晶闸管都不会导通；
- 承受正向电压时，仅在门极有触发电流的情况下晶闸管才能开通；
- 晶闸管一旦导通，门极就失去控制作用。

要使晶闸管关断，只能使晶闸管的电流降到接近于零的某一数值以下。

### 1.3.2 晶闸管的基本特性



(1) 正向特性

$I_G=0$ 时，器件两端施加正向电压，只有很小的正向漏电流，为正向阻断状态；正向电压超过正向转折电压 $U_{bo}$ ，则漏电流急剧增大，器件开通；随着门极电流幅值的增大，正向转折电压降低。

### (2) 反向特性。

反向阻断状态时，只有极小的反向漏电流流过；当反向电压达到反向击穿电压后，可能导致晶闸管发热损坏。

### 1.3.3 晶闸管的主要参数

#### 1) 断态重复峰值电压 $U_{DRM}$

在门极断路而结温为额定值时，允许重复加在器件上的正向峰值电压。

#### 2) 反向重复峰值电压 $U_{RRM}$

在门极断路而结温为额定值时，允许重复加在器件上的反向峰值电压。

#### 3) 通态（峰值）电压 $U_T$

——晶闸管通以某一规定倍数的额定通态平均电流时的瞬态峰值电压。

➤通常取晶闸管的 $U_{DRM}$ 和 $U_{RRM}$ 中较小的标值作为该器件的额定电压；

➤选用时，一般取额定电压为正常工作时晶闸管所承受峰值电压2~3倍。

#### 4) 维持电流 $I_H$ ：使晶闸管维持导通所必需的最小电流。

5) 擎住电流  $I_L$ :晶闸管刚从断态转入通态并移除触发信号后，能维持导通所需的最小电流。对同一晶闸管来说，通常 $I_L$ 约为 $I_H$ 的2~4倍。

6) 浪涌电流 $I_{TSM}$ :指由于电路异常情况引起的并使结温超过额定结温的不重复性最大正向过载电流。

#### 7) 通态平均电流 $I_{T(AV)}$

使用时应按实际电流与通态平均电流所造成的发热效应相等，即有效值相等的原则来选取晶闸管。应留一定的裕量，一般取1.5~2倍。

作业和思考题：P42 习题 4、5

教学反思：

# 电力电子技术 课程教案

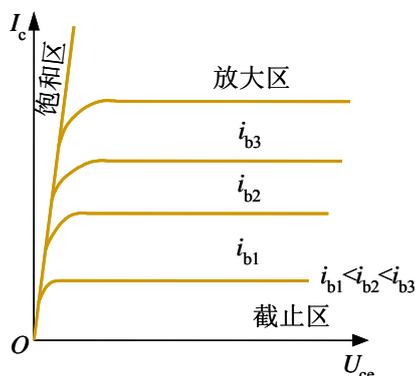
## 第 4 讲

<b>课程类别</b>	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实训课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时 安排	2
<b>授课题目</b>			
2.4 典型全控型器件			
<b>教学目的、要求</b>			
1. 熟悉可关断晶闸管（GTO）的结构和工作原理，了解有关特性和参数； 2. 熟悉电力晶体管（GTR）、功率场效应晶体管（P-MOSFET）的结构和工作原理。			
<b>教学重点及难点</b>			
重点：熟悉 GTR、P-MOSFET、绝缘栅双极型晶体管（IGBT）的结构及其工作原理； 难点：上述各种器件的导通和关断过程分析。			
<b>教 学 过 程</b>		<b>方法及手段</b>	
<b>导入：</b> 复习回顾： 1. 晶闸管的额定电流如何计算？ 2. 晶闸管的主要参数有哪些？ 3. 与普通晶闸管相比较，对 GTO 的结构、工作原理进行比较分析。		多媒体	
<b>新授：</b> <b>1.4 典型全控型器件</b> 门极可关断晶闸管（GTO）在20世纪80年代问世，是晶闸管的一种派生器件，标志电力电子技术进入了一个崭新时代，典型代表包括门极可关断晶闸管、电力晶体管、电力场效应晶体管、绝缘栅双极晶体管。		举例讲解	
<b>1.4.1 门极可关断晶闸管</b> （1）主要特点： ➤ 可以通过在门极施加负的脉冲电流使其关断 ➤ GTO的电压、电流容量较大。 （2）结构：（与普通晶闸管相比） ➤ 相同点：PNPN四层半导体结构，外部引出阳极、阴极和门极。 ➤ 不同点：GTO是一种多元的功率集成器件。 （3）工作原理：普通晶闸管一样，可以用图所示的双晶体管模型来分析。			
<b>1.4.2 电力晶体管</b> ➤ 电力晶体管（Giant Transistor—GTR，直译为巨型晶体管）； ➤ 耐高电压、大电流的双极结型晶体管（Bipolar Junction Transistor——BJT），英文有时候也称为Power BJT。 ➤ 应用：20世纪80年代以来，在中、小功率范围内取代晶闸管，但目前又大多被IGBT和电力MOSFET取代。			

## 1. GTR的结构和工作原理

### (1) 静态特性

- 共发射极接法时的典型输出特性：截止区、放大区和饱和区；
- 在电力电子电路中GTR工作在开关状态；



### (2) 动态特性

- 开通过程：延迟时间 $t_d$ 和上升时间 $t_r$ ，二者之和为开通时间 $t_{on}$ 。
  - 关断过程：储存时间 $t_s$ 和下降时间 $t_f$ ，二者之和为关断时间 $t_{off}$ 。
- GTR的开关时间在几微秒以内，比晶闸管和GTO都短很多。

### (3) 参数

#### 1) 最高工作电压

- GTR上电压超过规定值时会发生击穿；
- 击穿电压不仅和晶体管本身特性有关，还与外电路接法有关；
- $BU_{cbo} > BU_{cex} > BU_{ces} > BU_{cer} > BU_{ceo}$ 。

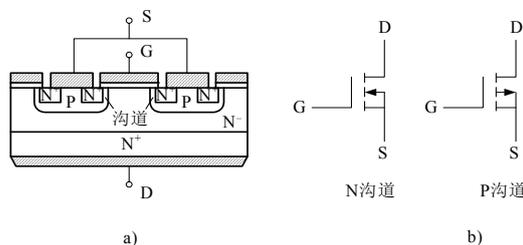
#### 2) 集电极最大耗散功率 $P_{cM}$

- 最高工作温度下允许的耗散功率。
- 一次击穿：集电极电压升高至击穿电压时， $I_c$ 迅速增大，只要 $I_c$ 不超过限度，GTR一般不会损坏，工作特性也不变。
- 二次击穿：一次击穿发生时， $I_c$ 突然急剧上升，电压陡然下降，常常立即导致器件的永久损坏，或者工作特性明显衰变。

### 1.4.3 电力场效应晶体管

通常主要指绝缘栅型中的MOS型（Metal Oxide Semiconductor FET），简称电力MOSFET（Power MOSFET）。

#### (1) 结构



**截止：**漏源极间加正电源，栅源极间电压为零；

P基区与N漂移区之间形成的PN结 $J_1$ 反偏，漏源极之间无电流流过。

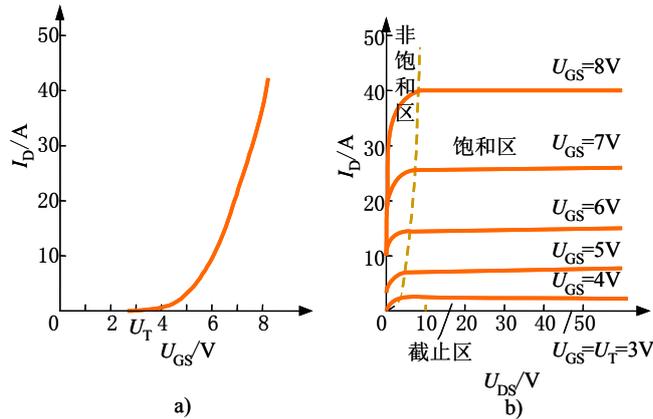
**导电：**在栅源极间加正电压 $U_{GS}$

当 $U_{GS}$ 大于 $U_T$ 时，P型半导体反型成N型而成为反型层，该反型层形成N沟道而使PN结 $J_1$ 消失，漏极和源极导电。

#### (2) 特性

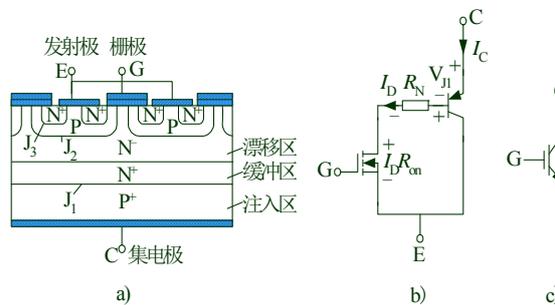
- 漏极电流 $I_D$ 和栅源间电压 $U_{GS}$ 的关系称为MOSFET的转移特性。

➤  $I_D$ 较大时,  $I_D$ 与 $U_{GS}$ 的关系近似线性, 曲线的斜率定义为跨导 $G_{fs}$ 。



### 1.4.4 绝缘栅双极晶体管 (IGBT)

#### (1) 结构和工作原理



➤ 三端器件: 栅极G、集电极C和发射极E;

➤ N沟道VDMOSFET与GTR组合——N沟道IGBT;

➤ IGBT比VDMOSFET多一层 $P^+$ 注入区, 具有很强的通流能力;

➤ 简化等效电路表明, IGBT是GTR与MOSFET组成的达林顿结构, 一个由MOSFET驱动的厚基区PNP晶体管;

➤  $R_N$ 为晶体管基区内的调制电阻。

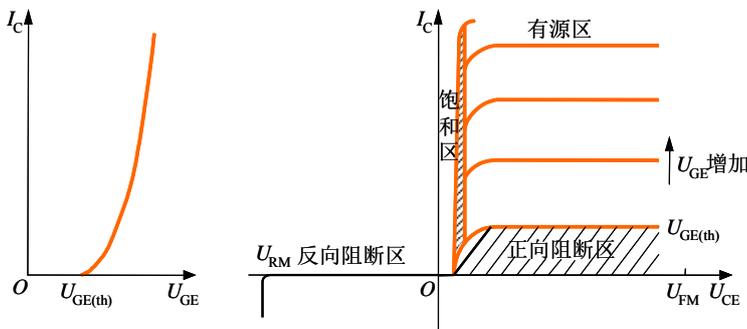
➤ 驱动原理与电力MOSFET基本相同, 场控器件通断由栅射极电压 $u_{GE}$ 决定:

**导通:**  $u_{GE}$ 大于开启电压 $U_{GE(th)}$ 时, MOSFET内形成沟道, 为晶体管提供基极电流, IGBT导通;

**通态压降:** 电导调制效应使电阻 $R_N$ 减小, 使通态压降减小;

**关断:** 栅射极间施加反压或不加信号时, MOSFET内的沟道消失, 晶体管的基极电流被切断, IGBT关断。

#### (2) 基本特性



**作业和思考题：**

- 1、对比分析说明 GTO、GTR、电力 MOSFET、IGBT 各自的优缺点及应用领域
- 2、仿真分析电力 MOSFET 的开关特性。

**教学反思：**

采用对比学习法，注意总结

# 电力电子技术 课程教案

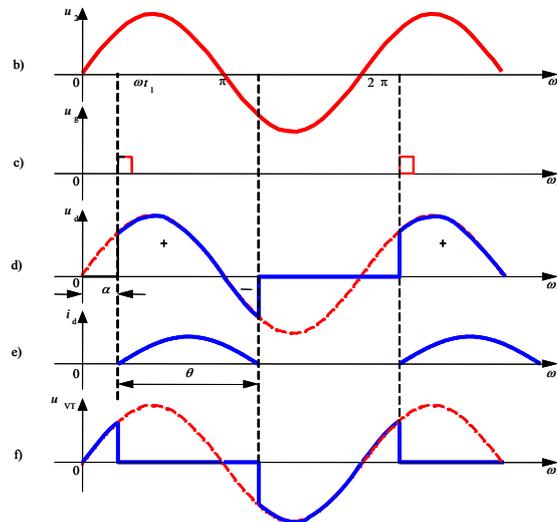
## 第 5 讲

课程类别	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实训课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时安排	4
<b>授课题目</b> 3.1 单相可控整流电路			
<b>教学目的、要求</b> 1. 掌握单相半波可控整流电路的电路结构、工作原理、波形分析、数量关系； 2. 掌握不同负载时，单相桥式全控整流电路的结构、工作原理、波形分析和数量关系。			
<b>教学重点及难点</b> 重点：1. 掌握单相半波可控整流电路的工作原理、波形分析和数量关系； 2. 掌握单相桥式全控整流电路的工作原理、波形分析和数量关系； 难点：1. 单相半波可控整流电路的工作原理、波形分析。 2. 单相桥式全控整流电路的工作原理、波形分析。			
<b>教学过程</b>		<b>方法及手段</b>	
<b>导入：</b> 复习回顾： <b>新授：</b> 2.1 单相可控整流电路 2.1.1 单相半波可控整流电路（电阻负载）		多媒体  举例讲解	
<p style="text-align: center;">       ➤ 变压器T起变换电压和电气隔离的作用；        ➤ 电阻负载的特点：电压与电流成正比，两者波形相同；        ➤ 基本数量关系：     </p> $U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}U_2}{2\pi} (1 + \cos \alpha) = 0.45U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$ <p>VT 的 移相范围为 180°，通过控制触发脉冲的相位来控制直流输出电压大小的方式称为相位控制方式，简称相控方式。</p>			

**触发延迟角：**从晶闸管开始承受正向阳极电压起到施加触发脉冲止的电角度，用 $\alpha$ 表示，也称触发角或控制角。

**导通角：**晶闸管在一个电源周期中处于通态的电角度，用 $\theta$ 表示。

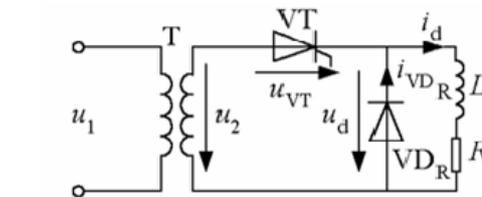
### 2.1.2 单相半波可控整流电路（阻感负载）



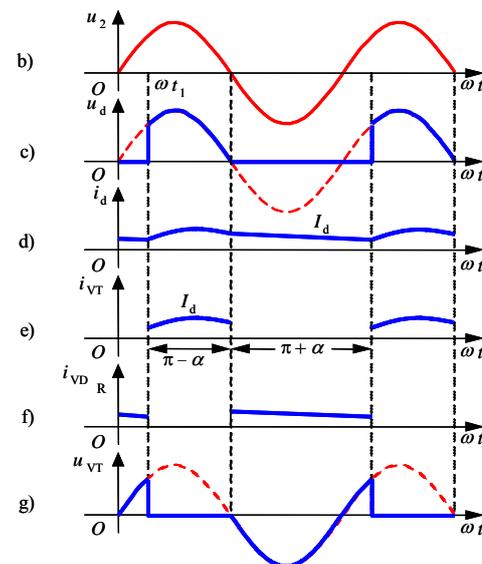
(1) 特点：

- 电感对电流变化有抗拒作用，使得流过电感的电流不发生突变；
- VT的移相范围为 $180^\circ$ ；
- 简单，但输出脉动大，变压器二次侧电流中含直流分量，造成变压器铁芯直流磁化。

(2) 讨论负载阻抗角 $\varphi$ 、触发角 $\alpha$ 、晶闸管导通角 $\theta$ 的关系。



a)



➤ 当 $u_2$ 过零变负时， $VD_R$ 导通， $u_d$ 为零，VT承受反压关断；

►L储存的能量保证了电流 $i_d$ 在L-R-VDR回路中流通，此过程通常称为续流，数量关系（ $i_d$ 近似恒为 $I_d$ ）：

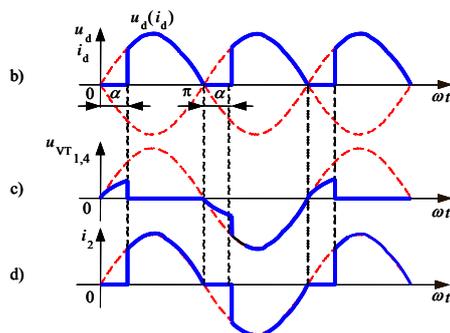
$$I_{dVT} = \frac{\pi - \alpha}{2\pi} I_d$$

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

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

### 2.1.3 单相桥式全控整流电路

#### 1. 带电阻负载的工作情况



(1) 工作原理及波形分析

►VT1和VT4组成一对桥臂，在 $u_2$ 正半周承受电压 $u_2$ ，得到触发脉冲即导通，当 $u_2$ 过零时关断。

►VT2和VT3组成另一对桥臂，在 $u_2$ 正半周承受电压 $-u_2$ ，得到触发脉冲即导通，当 $u_2$ 过零时关断。

(2) 数量关系

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

► $\alpha$ 的移相范围为 $180^\circ$ 。

►向负载输出的平均电流值为：

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

►流过晶闸管的电流平均值只有输出直流平均值的一半，即：

$$I_{dVT} = \frac{1}{2} I_d = 0.45 \frac{U_2}{R} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

►流过晶闸管的电流有效值：

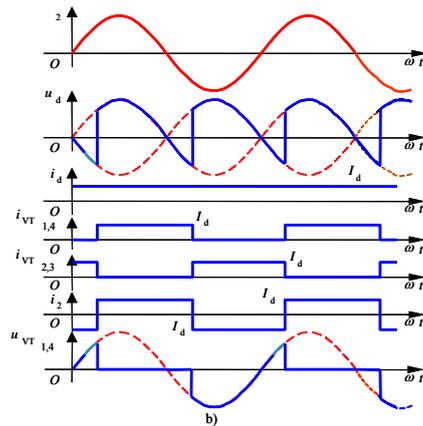
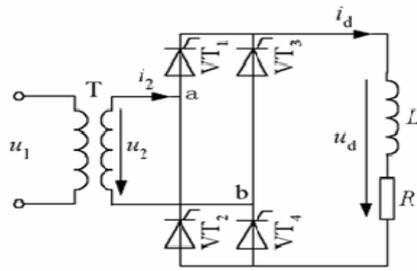
$$I_{VT} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left( \frac{\sqrt{2} U_2}{R} \sin \omega t \right)^2 d(\omega t)} = \frac{U_2}{\sqrt{2} R} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

►变压器二次测电流有效值 $I_2$ 与输出直流电流 $I$ 有效值相等：

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

$$I_{VT} = \frac{1}{\sqrt{2}} I$$

## 2. 带阻感负载的工作情况



### (1) 工作原理及波形分析

- 假设电路已工作于稳态， $i_d$ 的平均值不变；
- 假设负载电感很大，负载电流 $i_d$ 连续且波形近似为一水平线；

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

### (2) 数量关系

- 晶闸管移相范围为 $90^\circ$ 。
- 晶闸管导通角 $\theta$ 与 $\alpha$ 无关，均为 $180^\circ$ 。电流的平均值和有效值：

$$I_{dT} = \frac{1}{2} I_d \quad I_T = \frac{1}{\sqrt{2}} I_d = 0.707 I_d$$

## 作业和思考题：

- 1、P95 习题 3
- 2、单相整流电路小结：

单相整流电路	原理图	输出电压波形	晶闸管承受的最大正、反向电压	触发延迟角的移相范围	最大输出电压平均值
半波可控(阻性)					
半波可控(阻感)					
桥式全控(阻性)					
桥式全控(阻感)					
全波可控(阻性)					
桥式半控(阻感)					

$\omega t$	$0 \sim \alpha$	$\alpha \sim \pi$	$\pi \sim \pi + \alpha$	$\pi + \alpha \sim 2\pi$
VT导通情况				
$u_d$ 大小				
$i_d$ 大小				
$i_2$ 大小				
$u_{VT}$ 大小				

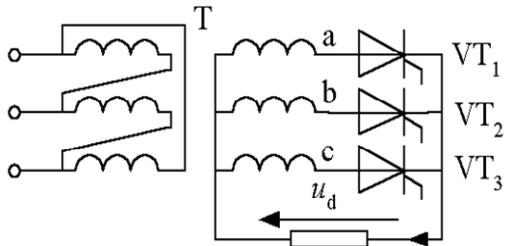
桥式全控分阻性、阻感、反电动势E负载类型  
 桥式半控阻感负载  
 一共四个表格

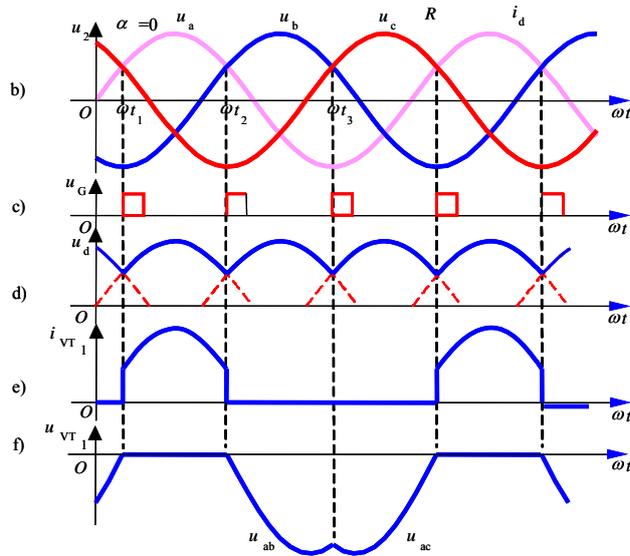
教学反思:

学生对于晶闸管承受的最大正反向电压以及触发延迟角范围的理解不到位。补充文件进行说明, 详见“学习通”资料。

# 电力电子技术 课程教案

## 第 6 讲

课程类别	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实训课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时安排	2
授课题目 3.2 三相可控整流电路（三相半波可控整流电路）			
教学目的、要求 1. 掌握三相半波可控整流电路的电路结构、工作原理、波形分析、数量关系。			
教学重点及难点 重点：工作原理、输出电压波形、晶闸管电压波形分析； 难点：三相可控整流电路时，强调自然换流点、触发脉冲移相范围、临界连续点等概念。			
教学过程		方法及手段	
<p><b>导入：</b> 复习回顾：三相电路的构成特点及电流、电压关系。重点复习三相电源的特点，连接方式，相电压与线电压的大小关系。</p> <p><b>新授：</b> <b>2.2 三相可控整流电路</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 交流测由三相电源供电。</li> <li>➤ 负载容量较大，或要求直流电压脉动较小、容易滤波。</li> <li>➤ 基本的是三相半波可控整流电路，三相桥式全控整流电路应用最广。</li> </ul> <div style="text-align: center;">  </div> <p><b>2.2.1 三相半控整流电路</b></p> <p><b>1. 电阻性负载</b></p> <p>(1) 电路特点</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 变压器二次侧接成星形得到零线，而一次侧接成三角形避免3次谐波流入电网。</li> <li>➤ 三个晶闸管分别接入a、b、c三相电源，其阴极连接在一起—共阴极接法。</li> </ul> <p>(2) 自然换相点</p> <p>二极管换相时刻为<b>自然换相点</b>，是各相晶闸管能触发导通的最早时刻，将其作为计算各晶闸管触发角 <math>\alpha</math> 的起点，即 <math>\alpha = 0^\circ</math>。</p>		多媒体          举例讲解	



(3) 整流电压平均值的计算

当  $\alpha \leq 30^\circ$  时，负载电流连续，有：

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\frac{5\pi}{6} + \alpha} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_2 \cos \alpha = 1.17 U_2 \cos \alpha$$

当  $\alpha > 30^\circ$  时，负载电流断续，晶闸管导通角减小，此时有：

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6} + \alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_2 \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) \right] = 0.675 \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) \right]$$

(4) 负载电流平均值为

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

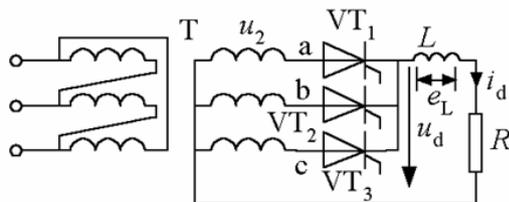
(5) 晶闸管承受的最大反向电压，为变压器二次线电压峰值，即

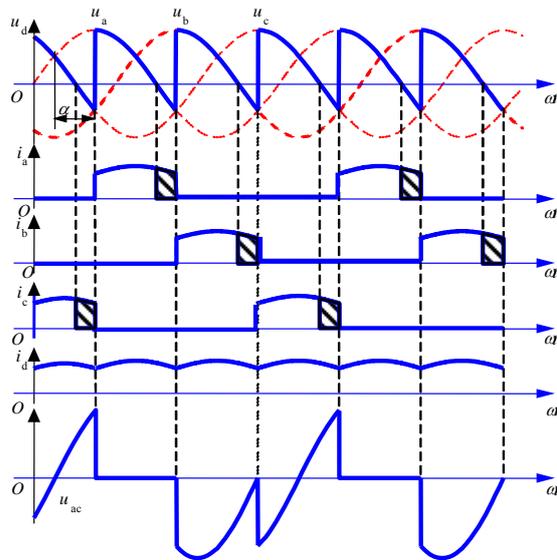
$$U_{RM} = \sqrt{2} \times \sqrt{3} U_2 = \sqrt{6} U_2 = 2.45 U_2$$

(6) 晶闸管阳极与阴极间的最大正向电压等于变压器二次相电压的峰值，即

$$U_{FM} = \sqrt{2} U_2$$

## 2. 电阻性负载





(1) 特点：阻感负载，L值很大， $i_d$ 波形基本平直。

➤  $\alpha \leq 30^\circ$ 时：整流电压波形与电阻负载时相同。

➤  $\alpha > 30^\circ$ 时（如 $\alpha = 60^\circ$ 时的波形如图2-16所示）。

➤  $u_2$ 过零时，VT1不关断，直到VT2的脉冲到来，才换流，—— $u_d$ 波形中出现负的部分。

➤  $i_d$ 波形有一定的脉动，但为简化分析及定量计算，可将 $i_d$ 近似为一条水平线。

➤ 阻感负载时的移相范围为 $90^\circ$ 。

(2) 数量关系

$$U_d = U_{d0} = 1.17U_2$$

➤ 变压器二次电流即晶闸管电流的有效值为

$$I_2 = I_{VT} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_d = 0.577I_d$$

➤ 晶闸管的额定电流为

$$I_{VT(AV)} = \frac{I_{VT}}{1.57} = 0.368 I_d$$

➤ 晶闸管最大正、反向电压峰值均为变压器二次线电压峰值

$$U_{FM} = U_{RM} = 2.45U_2$$

作业和思考题： P97 习题 13

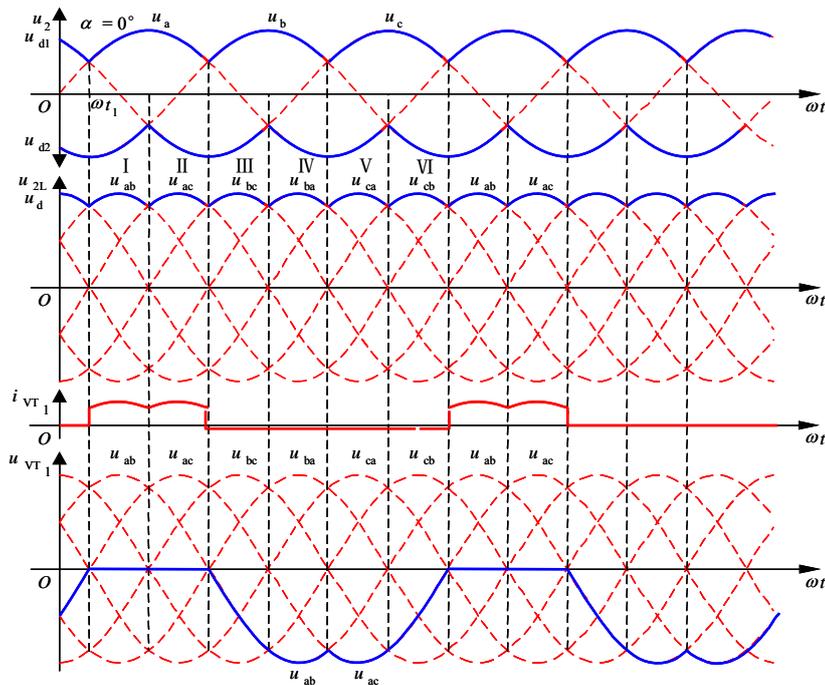
教学反思：

随堂测试效果显示，同学们能够基本掌握本节课内容的基础问题。

# 电力电子技术 课程教案

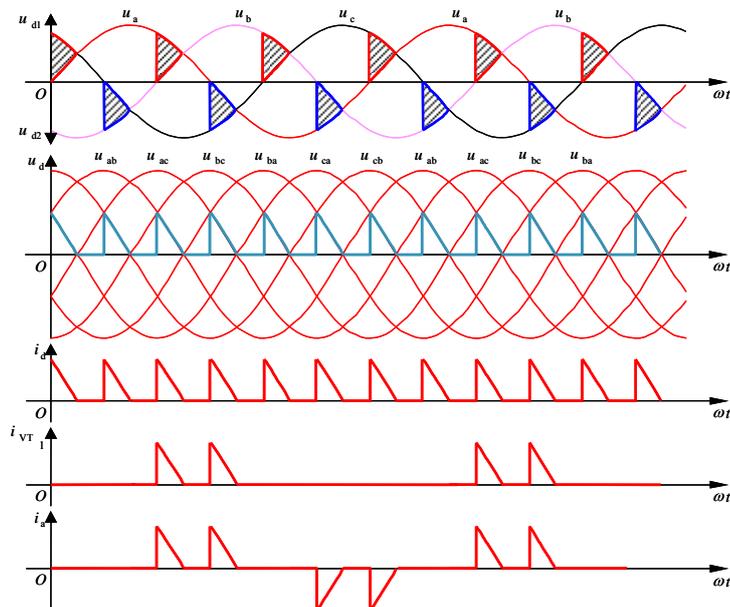
## 第 7 讲

课程类别	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实训课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时安排	2
授课题目			
3.2 三相可控整流电路（三相桥式全控整流电路）			
教学目的、要求			
1. 掌握三相桥式全控整流电路的电路结构、工作原理、波形分析、数量关系。			
教学重点及难点			
重点：工作原理、输出电压波形、晶闸管电压波形分析；			
难点：三相可控整流电路时，强调自然换流点、触发脉冲移相范围、临界连续点等概念。			
教学过程		方法及手段	
<p>导入：</p> <p style="padding-left: 20px;">复习回顾：三相半波整流电路的特性</p> <p>新授：</p> <p>2.2.2 三相全控整流电路</p> <p style="padding-left: 20px;">三相桥是应用最为广泛的整流电路。</p> <div style="text-align: center;"> </div> <p>1. 带电阻负载时的工作情况</p> <p style="padding-left: 20px;">➤当<math>\alpha \leq 60^\circ</math>时，<math>u_d</math>波形均连续，对于电阻负载，<math>i_d</math>波形与<math>u_d</math>波形形状一样，也连续。</p> <p><math>\alpha = 0^\circ</math>：</p>		<p>多媒体</p> <p>举例讲解</p>	



➤当 $\alpha > 60^\circ$ 时， $u_d$ 波形每 $60^\circ$ 中有一段为零， $u_d$ 波形不能出现负值波形图：

$\alpha = 90^\circ$ ：



带电阻负载时三相桥式全控整流电路  $\alpha$  角的移相范围是  $120^\circ$

**对触发脉冲的要求：**

- 按 $VT_1$ - $VT_2$ - $VT_3$ - $VT_4$ - $VT_5$ - $VT_6$ 的顺序，相位依次差 $60^\circ$ ；
- 共阴极组 $VT_1$ 、 $VT_3$ 、 $VT_5$ 的脉冲依次差 $120^\circ$ ，共阳极组 $VT_4$ 、 $VT_6$ 、 $VT_2$ 也依次差 $120^\circ$ ；同一相的上下两个桥臂，即 $VT_1$ 与 $VT_4$ ， $VT_3$ 与 $VT_6$ ， $VT_5$ 与 $VT_2$ ，脉冲相差 $180^\circ$ ；
- $u_d$ 一周脉动6次，每次脉动的波形都一样，故该电路为6脉波整流电路；
- 需保证同时导通的2个晶闸管均有脉冲。

## 2. 阻感负载时的工作情况

(1)  $\alpha \leq 60^\circ$ 时

➤ $u_d$ 波形连续，工作情况与带电阻负载时十分相似。各晶闸管的通断情况、输出

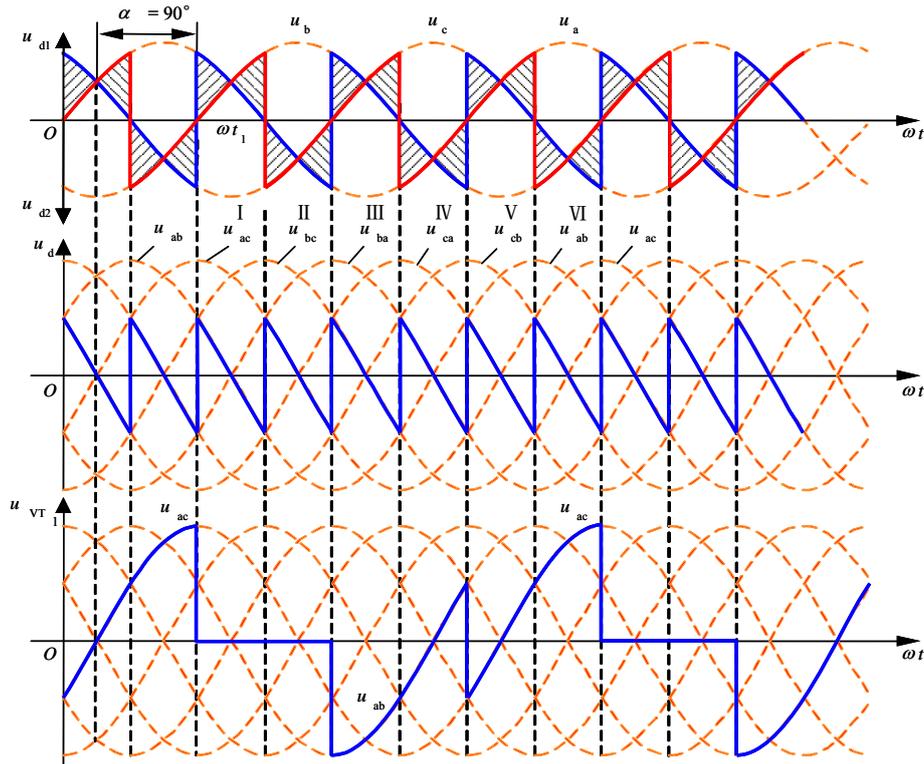
整流电压 $u_d$ 波形、晶闸管承受的电压波形。

➤ 区别在于：得到的负载电流 $i_d$ 波形不同。当电感足够大的时候， $i_d$ 的波形可近似为一条水平线。

(2)  $\alpha > 60^\circ$ 时

- 阻感负载时的工作情况与电阻负载时不同；
- 电阻负载时， $u_d$ 波形不会出现负的部分；
- 阻感负载时， $u_d$ 波形会出现负的部分；
- 带阻感负载时，三相桥式全控整流电路的 $\alpha$ 角移相范围为 $90^\circ$ 。

$$\alpha = 90^\circ$$



定量分析：

➤ 当整流输出电压连续时（即带阻感负载时，或带电阻负载 $\alpha \leq 60^\circ$ 时）的平均值为：

$$U_d = \frac{1}{\frac{\pi}{3}} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\frac{2\pi}{3} + \alpha} \sqrt{6} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 2.34 U_2 \cos \alpha$$

➤ 带电阻负载且 $\alpha > 60^\circ$ 时，整流电压平均值为：

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3} + \alpha}^{\pi} \sqrt{6} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 2.34 U_2 \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi}{3} + \alpha\right) \right]$$

输出电流平均值为： $I_d = U_d / R$

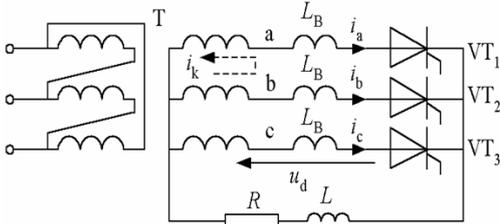
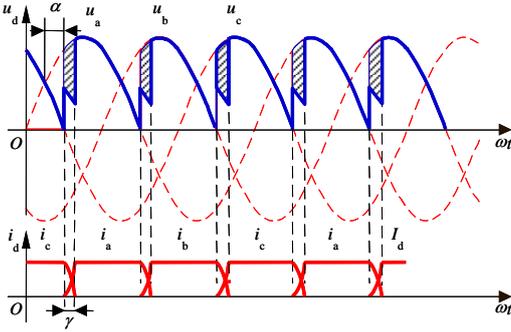
➤ 当整流变压器为采用星形接法，带阻感负载时，变压器二次侧电流有效值为：

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left( I_d^2 \times \frac{2}{3} \pi + (-I_d)^2 \times \frac{2}{3} \pi \right)} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = 0.816 I_d$$

<b>作业和思考题：</b> 仿真分析单相整流电路的特性	
<b>教学反思：</b> 画波形的时候比较乱。	

# 电力电子技术 课程教案

## 第 8 讲

课程类别	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实训课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时安排	2
授课题目			
3.3 变压器漏感对整流电路的影响			
教学目的、要求			
1. 掌握变压器漏感对整流电路的影响及换相压降的计算			
教学重点及难点			
重点：换相过程中的换相重叠角概念、换相期间的整流电压和换相压降、重叠角的计算； 难点：重叠角的产生，换相期间整流电压、换相压降和重叠角的计算。			
教学过程			方法及手段
<p>导入： 复习回顾。</p> <p>新授： 2.3 变压器漏感对整流电路的影响</p> <p>考虑包括变压器漏感在内的交流侧电感的影响，该漏感可用一个集中的电感<math>L_B</math>表示，现以三相半波为例，然后将其结论推广。</p>			多媒体
			举例讲解
			
<p>(1) VT1 换相至 VT2 的过程：</p> <p>因a、b两相均有漏感，故<math>i_a</math>、<math>i_b</math>均不能突变。于是VT1和VT2同时导通，相当于将a、b两相短路，在两相组成的回路中产生环流<math>i_k</math>；<math>i_k=i_b</math>是逐渐增大的，而<math>i_a=I_d-i_k</math>是逐渐减小的；当<math>i_k</math>增大到等于<math>I_d</math>时，<math>i_a=0</math>，VT1关断，换流过程结束。</p>			
<p>(2) 换相重叠角——换相过程持续的时间，用电角度<math>\gamma</math>表示。</p> <p>➤换相过程中，整流电压<math>u_d</math>为同时导通的两个晶闸管所对应的两个相电压的平均值：</p>			

$$u_d = u_a + L_B \frac{di_k}{dt} = u_b - L_B \frac{di_k}{dt} = \frac{u_a + u_b}{2}$$

➤换相压降—与不考虑变压器漏感时相比， $u_d$ 平均值降低的多少。

$$\begin{aligned} \Delta U_d &= \frac{1}{2\pi/3} \int_{\alpha+\frac{5\pi}{6}}^{\alpha+\gamma+\frac{5\pi}{6}} (u_b - u_d) d(\omega t) = \frac{3}{2\pi} \int_{\alpha+\frac{5\pi}{6}}^{\alpha+\gamma+\frac{5\pi}{6}} [u_b - (u_b - L_B \frac{di_k}{dt})] d(\omega t) \\ &= \frac{3}{2\pi} \int_{\alpha+\frac{5\pi}{6}}^{\alpha+\gamma+\frac{5\pi}{6}} L_B \frac{di_k}{dt} d(\omega t) = \frac{3}{2\pi} \int_0^{I_d} \omega L_B di_k = \frac{3}{2\pi} X_B I_d \end{aligned}$$

➤换相重叠角的计算

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

(3) 变压器漏抗对各种整流电路的影响

➤出现换相重叠角  $\gamma$ ，整流输出电压平均值  $U_d$  降低；

➤整流电路的工作状态增多；

➤晶闸管的  $di/dt$  减小，有利于晶闸管的安全开通。有时人为串入进线电抗器以抑制晶闸管的  $di/dt$ ；

➤换相时晶闸管电压出现缺口，产生正  $du/dt$ ，可能使晶闸管误导通，为此必须加吸收电路；

➤换相使电网电压出现缺口，成为干扰源。

作业和思考题：

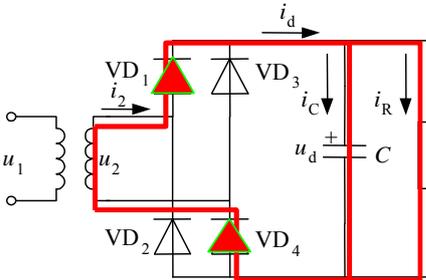
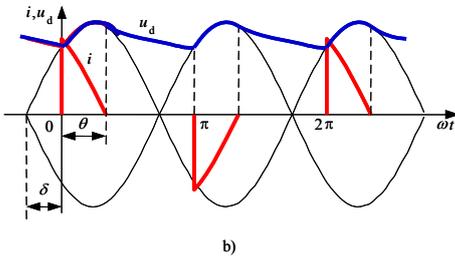
P96, 习题 17

教学反思：

学习通课堂测试效果良好，95%的同学掌握该部分内容

# 电力电子技术 课程教案

## 第 9 讲

课程类别	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实训课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时安排	2
授课题目			
3.4 电容滤波的不可控整流电路			
教学目的、要求			
1. 了解电容滤波的不可控整流电路单相、三相的工作原理和波形分析。			
教学重点及难点			
重点：电容滤波的不可控整流电路单相、三相的工作原理和波形分析。 难点：无			
教学过程		方法及手段	
<p>导入：     复习回忆。</p> <p>新授： 2.4 电容滤波的不可控整流电路 2.4.1 电容滤波的单相不可控整流电路     常用于小功率单相交流输入的场所，如目前大量普及的微机、电视机等家电产品中。</p> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;">  <p style="text-align: center;">b)</p> </div> <p>(1) 基本工作过程：          ➤ 在 <math>u_2</math> 正半周过零点至 <math>\omega t = 0</math> 期间，因 <math>u_2 &lt; u_d</math>，故二极管均不导通，电容 <math>C</math> 向 <math>R</math> 放电，提供负载所需电流；          ➤ 至 <math>\omega t = 0</math> 之后，<math>u_2</math> 将要超过 <math>u_d</math>，使得 <math>VD_1</math> 和 <math>VD_4</math> 开通，<math>u_d = u_2</math>，交流电源向电容充电，同时向负载 <math>R</math> 供电。</p> <p>(2) 主要的数量关系</p>		<p>多媒体</p> <p>举例讲解</p>	

1) 输出电压平均值

➤空载时,  $U_d = \sqrt{2}U_2$ ;

➤重载时,  $U_d$ 逐渐趋近于 $0.9U_2$ , 即趋近于接近电阻负载时的特性;

➤在设计时根据负载的情况选择电容 $C$ 值, 此时输出电压为:  $U_d \approx 1.2 U_2$ 。

2) 电流平均值

➤输出电流平均值  $I_R$  为:  $I_R = U_d / R$ ,  $I_d = I_R$

➤二极管电流  $I_D$  平均值为:  $I_D = I_d / 2 = I_R / 2$

3) 二极管承受的电压

$$\sqrt{2}U_2$$

### 2.4.2 电容滤波的三相不可控整流电路

(1) 基本原理

➤某一对二极管导通时, 输出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。

➤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联的电感时的工作情况:

➤电流波形的前沿平缓了许多, 有利于电路的正常工作。随着负载的加重, 电流波形与电阻负载时的交流侧电流波形逐渐接近。

(2) 主要数量关系

(1) 输出电压平均值:  $U_d$  在  $(2.34U_2 \sim 2.45U_2)$  之间变化。

(2) 电流平均值:

➤输出电流平均值  $I_R$  为:  $I_R = U_d / R$

➤与单相电路情况一样, 电容电流  $i_C$  平均值为零, 因此  $I_d = I_R$

➤二极管电流平均值为  $I_d$  的1/3, 即:  $I_D = I_d / 3$

(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, 为  $\sqrt{6}U_2$ 。

**作业和思考题:** 整流电路仿真分析

**教学反思:**

有 20% 的同学抄袭了别人的仿真结果, 做出警告。对优秀同学 (李旭升) 进行表扬。通过仿真分析, 同学们熟悉了仿真软件, 且进一步理解了整流电路的工作原理。

# 电力电子技术 课程教案

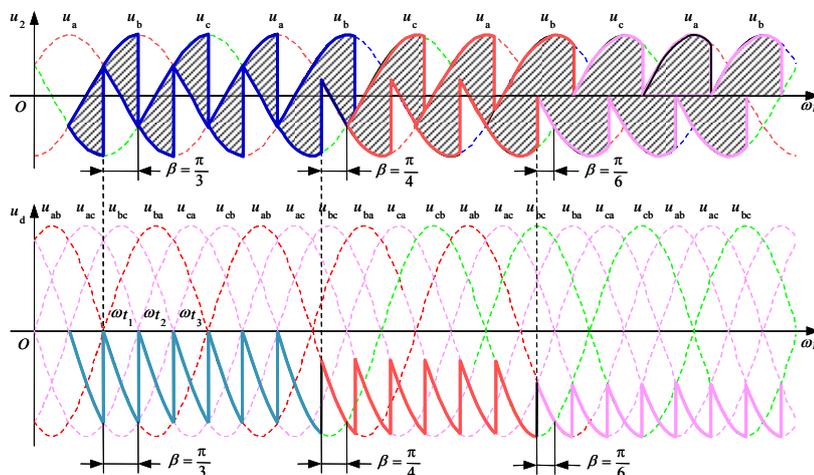
## 第 10 讲

<b>课程类别</b>	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实训课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时 安排	2
<b>授课题目</b>			
3.7 整流电路的有源逆变工作状态			
<b>教学目的、要求</b>			
1.掌握逆变的概念、逆变的分类、有源逆变与无源逆变的区别； 2.有源逆变的条件、逆变失败、造成逆变失败的原因与预防措施。了解有源逆变的应用。			
<b>教学重点及难点</b>			
重点：逆变的概念、分类，有源逆变与无源逆变的区别，实现有源逆变的条件、逆变失败的原因与预防措施； 难点：有源逆变的条件、影响逆变失败的因素。			
<b>教 学 过 程</b>			<b>方法及手段</b>
<b>导入：</b> 复习回忆。			多媒体
<b>新授：</b> <b>一、逆变的概念</b> <b>1. 什么是逆变？为什么要逆变？</b> 1)逆变（Inverion）：把直流电转变成交流电，整流的逆过程。 2)逆变电路：把直流电逆变成交流电的电路。 ➤有源逆变电路：交流侧和电网连结，应用在直流可逆调速系统、交流绕线转子异步电动机串级调速以及高压直流输电等。 ➤无源逆变电路：变流电路的交流侧不与电网联接，而直接接到负载，将在第5章介绍。 对于可控整流电路，满足一定条件就可工作于有源逆变，其电路形式未变，只是电路工作条件转变；既工作在整流状态又工作在逆变状态，称为变流电路。			举例讲解
<b>2. 逆变产生的条件</b> 1) 从上述分析中，可以归纳出产生逆变的条件有： ✧ 有直流电动势，其极性和晶闸管导通方向一致，其值大于变流器直流侧平均电压； ✧ 晶闸管的控制角 $\alpha > \pi/2$ ，使 $U_d$ 为负值。 2) 逆变和整流的区别：控制角 $\alpha$ 不同： ➤ $0 < \alpha < \pi/2$ 时，电路工作在整流状态； ➤ $\pi/2 < \alpha < \pi$ 时，电路工作在逆变状态。			
<b>3. 波形与参数计算</b>			

➤把  $\alpha > \pi/2$  时的控制角用  $\pi - \alpha = \beta$  表示， $\beta$  称为逆变角；

➤逆变角  $\beta$  和控制角  $\alpha$  的计量方向相反，其大小自  $\beta = 0$  的起始点向左方计量；

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha = -U_{d0} \cos \beta$$



#### 4 逆变失败（逆变颠覆）

逆变时，一旦换相失败，外接直流电源就会通过晶闸管电路短路，或使变流器的输出平均电压和直流电动势变成顺向串联，形成很大短路电流。

##### 1) 逆变失败的原因

- ✧ 触发电路工作不可靠，不能适时、准确地给各晶闸管分配脉冲，如脉冲丢失、脉冲延时等，致使晶闸管不能正常换相。
- ✧ 晶闸管发生故障，该断时不断，或该通时不通。
- ✧ 交流电源缺相或突然消失。
- ✧ 换相的裕量角不足，引起换相失败。

##### 2) 确定最小逆变角 $\beta_{\min}$ 的依据

逆变时允许采用的最小逆变角  $\beta$  应等于  $\beta_{\min} = \delta + \gamma + \theta'$ ，这样， $\beta_{\min}$  一般取  $30^\circ \sim 35^\circ$ 。

#### 作业和思考题：

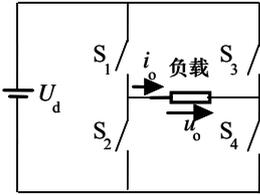
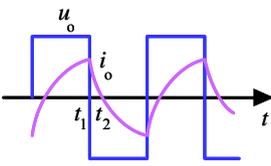
本章节随堂考试

#### 教学反思：

80 分以上同学占 76.52%，60-79 分的同学占 13.64%。学生对本章基本内容掌握情况较好。

# 电力电子技术 课程教案

## 第 11 讲

课程类别	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实训课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时安排	2
<b>授课题目</b>			
4.1 换流方式			
<b>教学目的、要求</b>			
1. 了解逆变电路的概念、换流方式和应用； 2. 理解基本的逆变电路的结构及其工作原理。			
<b>教学重点及难点</b>			
重点：逆变电路的结构及其工作原理； 难点：无。			
<b>教学过程</b>		<b>方法及手段</b>	
<b>导入：</b> 复习回顾： <b>逆变的概念：</b> 与整流相对应，直流电变成交流电，交流侧接电网，为有源逆变；交流侧接负载，为无源逆变。		多媒体	
<b>新授：</b> <b>4.1 换流方式</b> (1) 逆变与变频 ➤变频电路：分为交交变频和交直交变频两种。 ➤交直交变频由交直变换（整流）和直交变换两部分组成，后一部分就是逆变。 (2) 主要应用 ➤各种直流电源，如蓄电池、干电池、太阳能电池等。 ➤交流电机调速用变频器、不间断电源、感应加热电源等电力电子装置的核心部分都是逆变电路。		举例讲解	
<b>4.1.1 逆变电路的基本工作原理</b> 以单相桥式逆变电路为例说明最基本的工作原理。			
 <p style="text-align: center;">a)</p>		 <p style="text-align: center;">b)</p>	
逆变电路最基本的工作原理：改变两组开关切换频率，可改变输出交流电频率： $S_1$ 、 $S_4$ 闭合， $S_2$ 、 $S_3$ 断开时，负载电压 $u_o$ 为正； $S_1$ 、 $S_4$ 断开， $S_2$ 、 $S_3$ 闭合时，负载电压 $u_o$ 为负。			

**换流：电流从一个支路向另一个支路转移的过程，也称为换相。**

➤开通：适当的门极驱动信号就可使器件开通。

➤关断：全控型器件可通过门极关断；半控型器件晶闸管，必须利用外部条件才能关断；一般在晶闸管电流过零后施加一定时间反压，才能关断；研究换流方式主要是研究如何使器件关断。

#### 4.1.2 换流方式分类

1) 器件换流 (Device Commutation)

——利用全控型器件的自关断能力进行换流。

——在采用IGBT、电力MOSFET、GTO、GTR等全控型器件的电路中的换流方式是器件换流。

2) 电网换流 (Line Commutation)

——电网提供换流电压的换流方式。

——将负的电网电压施加在欲关断的晶闸管上即可使其关断。不需要器件具有门极可关断能力，但不适用于没有交流电网的无源逆变电路。

3) 负载换流 (Load Commutation)

4) 强迫换流 (Forced Commutation)

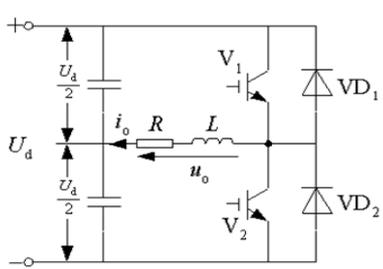
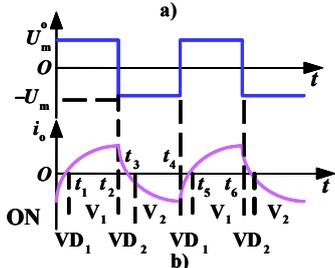
**作业和思考题：**换流方式随堂测试，针对逆变电路的某一实际应用，分析其工作过程及特点。

**教学反思：**

随堂测试显示 95% 的同学全部正确。说明同学们对换流方式的相关问题掌握情况良好。

# 电力电子技术 课程教案

## 第 12 讲

课程类别	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实训课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时安排	2
授课题目			
4.2 电压型逆变电路			
教学目的、要求			
1. 掌握无源逆变器的分类、电流型和电压型逆变器的概念； 2. 了解单相半桥、单相全桥逆变电路；掌握 $180^\circ$ 导电型交-直-交逆变电路。			
教学重点及难点			
重点：无源逆变器的分类、电流和电压型逆变器的概念、 $180^\circ$ 导电型交-直-交逆变电路； 难点：电流型和电压型逆变器的比较； $180^\circ$ 导电型交-直-交逆变电路。			
教学过程		方法及手段	
导入： 复习回顾。		多媒体	
新授： <b>4.2 电压型逆变电路</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 逆变电路的分类（根据直流侧电源性质的不同）             <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 直流侧是电压源：电压型逆变电路——又称为电压源型逆变电路；</li> <li>➢ 直流侧是电流源：电流型逆变电路——又称为电流源型逆变电路。</li> </ul> </li> <li>2. 电压型逆变电路的特点             <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 直流侧为电压源或并联大电容，直流侧电压基本无脉动,直流回路呈现低阻抗；</li> <li>➢ 输出电压为矩形波，输出电流因负载阻抗不同而不同；</li> <li>➢ 阻感负载时需提供无功功率。为了给交流侧向直流侧反馈的无功能量提供通道，逆变桥各臂并联反馈二极管。</li> </ul> </li> </ol>			
<b>4.2.1 单相电压型逆变电路</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 半桥逆变电路             <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 工作原理</li> </ol> </li> </ol>			
 <p style="text-align: center;">a)</p>  <p style="text-align: center;">b)</p>			

➤V1和V2栅极信号在一周期内各半周正偏、半周反偏，两者互补，输出电压 $u_o$ 为矩形波，幅值为 $U_m=U_d/2$ 。

➤V1或V2通时， $i_o$ 和 $u_o$ 同方向，直流侧向负载提供能量；VD1或VD2通时， $i_o$ 和 $u_o$ 反向，电感中储能向直流侧反馈。VD1、VD2称为反馈二极管，它又起着使负载电流连续的作用，又称续流二极管。

(2) 优点：电路简单，使用器件少。

(3) 缺点：输出交流电压幅值为 $U_d/2$ ，且直流侧需两电容器串联，要控制两者电压均衡。

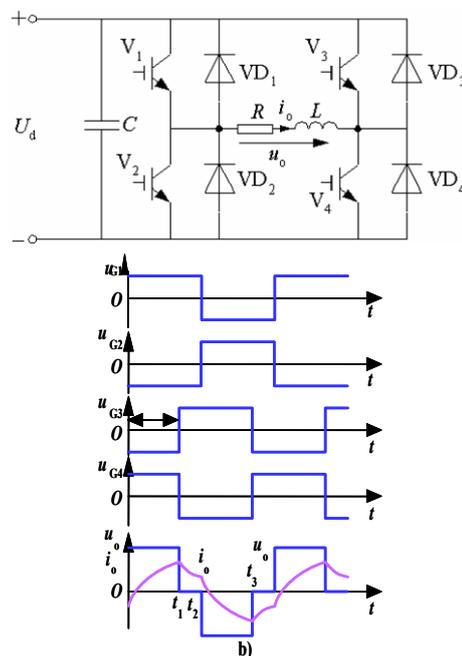
(4) 应用：

➤用于几kW以下的小功率逆变电源；

➤单相全桥、三相桥式都可看成若干个半桥逆变电路的组合。

## 2. 全桥逆变电路

(1) 工作原理



➤共四个桥臂，可看成两个半桥电路组合而成，两对桥臂交替导通 $180^\circ$ ；

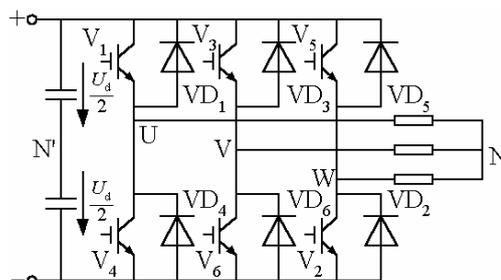
➤输出电压和电流波形与半桥电路形状相同，幅值高出一倍；

➤改变输出交流电压的有效值只能通过改变直流电压 $U_d$ 来实现；

➤阻感负载时，还可采用移相方式来调节输出电压—移相调压。

➤V3的基极信号比V1落后 $\theta$  ( $0 < \theta < 180^\circ$ )，V3、V4的栅极信号分别比V2、V1的前移 $180-\theta$ ，输出电压是正负各为 $\theta$ 的脉冲，改变 $q$ 就可调节输出电压。

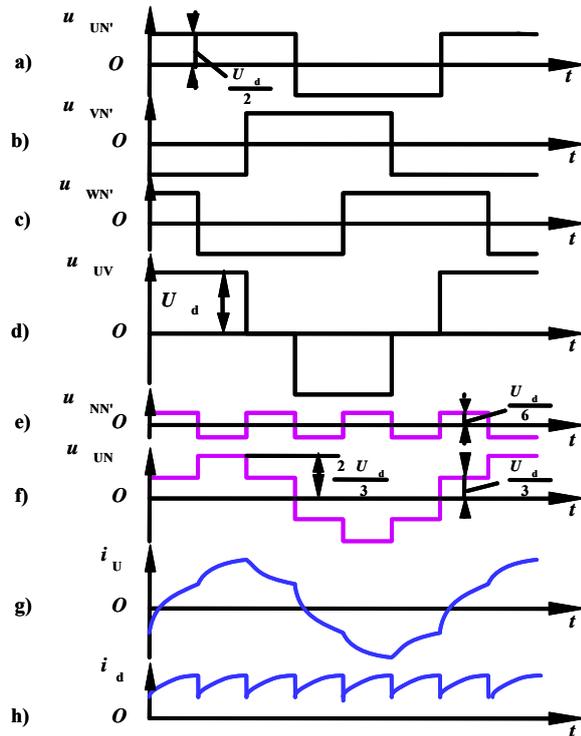
### 4.2.2 三相电压型逆变电路



工作原理和特点：

➤基本工作方式： $180^\circ$ 导电方式

- 每桥臂导电180°，同一相上下两臂交替导电，各相开始导电的角度差120°；
- 任一瞬间有三个桥臂同时导通；
- 每次换流都是在同一相上下两臂之间进行，也称为纵向换流。

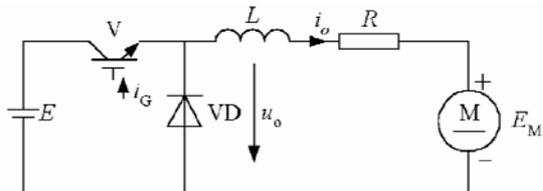


作业和思考题：

教学反思：

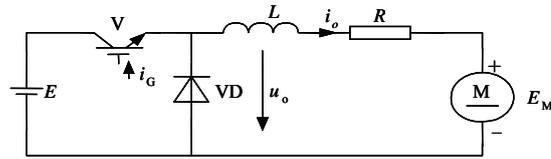
# 电力电子技术 课程教案

## 第 13 讲

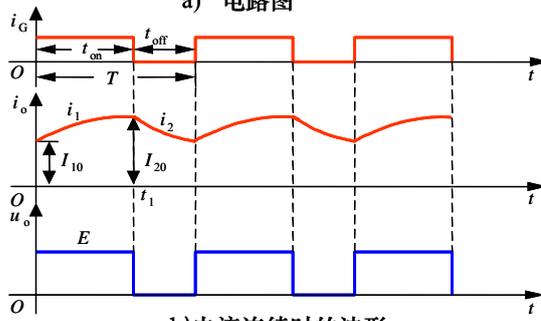
课程类别	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实训课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时安排	2
授课题目			
5.1 基本斩波电路			
教学目的、要求			
1. 熟悉直流斩波电路的基本结构和分类； 2. 掌握降压式和升压直流斩波电路的基本结构、工作原理和波形； 3. 掌握降压和升压式直流斩波电路的输入和输出之间的关系。			
教学重点及难点			
重点：降压斩波电路和升压斩波电路的工作原理、输入输出关系、电路解析方法和工作特点； 难点：直流斩波电路的结构、工作原理、输入和输出之间的关系分析。			
教学过程		方法及手段	
导入： 复习回顾。		多媒体	
新授： <b>5.1.1 降压斩波电路</b> (1) 电路结构		举例讲解	
			
(2) 工作原理			
➤ $t=0$ 时刻驱动V导通，电源E向负载供电，负载电压 $u_o=E$ ，负载电流 $i_o$ 按指数曲线上升；			
➤ $t=t_1$ 时控制V关断，二极管VD续流，负载电压 $u_o$ 近似为零，负载电流呈指数曲线下降；			
➤ 通常串接较大电感L使负载电流连续且脉动小。			
(3) 数量关系			
➤ 电流连续			
$U_o = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} E = \frac{t_{on}}{T} E = \alpha E$			
➤ 负载电压平均值：			
$I_o = \frac{U_o - E_M}{R}$			
➤ 负载电流平均值：			

(4) 斩波电路三种控制方式

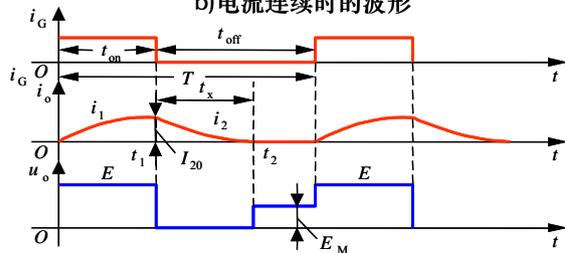
- $T$ 不变, 变 $t_{on}$ —脉冲宽度调制 (PWM)。
- $t_{on}$ 不变, 变 $T$ —频率调制。
- $t_{on}$ 和 $T$ 都可调, 改变占空比—混合型。



a) 电路图



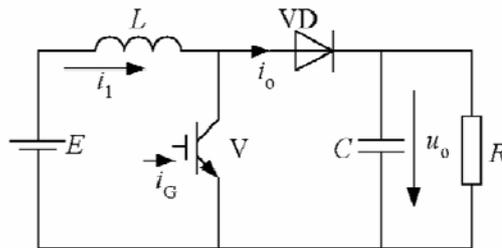
b) 电流连续时的波形



c) 电流断续时的波形

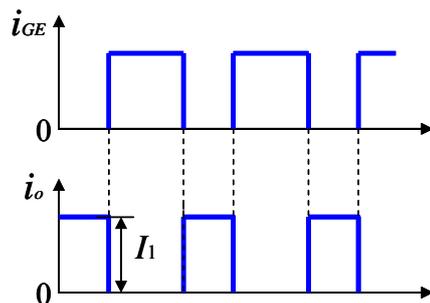
5.1.2 升压斩波电路

(1) 电路结构



(2) 工作原理

- 假设 $L$ 和 $C$ 值很大;
- $V$ 处于通态时, 电源 $E$ 向电感 $L$ 充电, 电流恒定 $I_1$ , 电容 $C$ 向负载 $R$ 供电, 输出电压 $U_o$ 恒定;
- $V$ 处于断态时, 电源 $E$ 和电感 $L$ 同时向电容 $C$ 充电, 并向负载提供能量。



(3) 数量关系

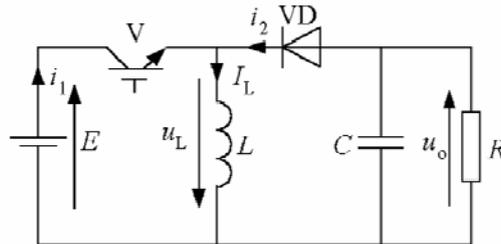
$$U_o = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} E = \frac{T}{t_{off}} E$$

输出电流的平均值  $I_o$  为:

$$I_o = \frac{U_o}{R} = \frac{1}{\beta} \frac{E}{R}$$

### 5.1.3 升降压斩波电路

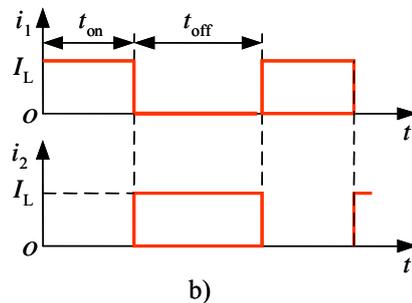
(1) 电路结构



(2) 基本工作原理

➤V通时，电源E经V向L供电使其贮能，此时电流为 $i_1$ 。同时，C维持输出电压恒定并向负载R供电；

➤V断时，L的能量向负载释放，电流为 $i_2$ 。负载电压极性为上负下正，与电源电压极性相反，该电路也称作反极性斩波电路。



(3) 数量关系

所以输出电压为: 
$$U_o = \frac{t_{on}}{t_{off}} E = \frac{t_{on}}{T - t_{on}} E = \frac{\alpha}{1 - \alpha} E \quad (3-41)$$

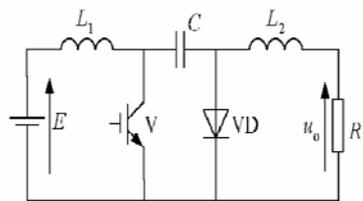
输出电流:

$$I_2 = \frac{t_{off}}{t_{on}} I_1 = \frac{1 - \alpha}{\alpha} I_1$$

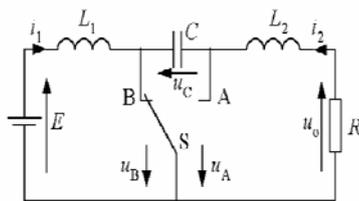
### 5.1.3 Cuk 斩波电路

(1) 工作原理

- V通时， $E-L1-V$ 回路和 $R-L2-C-V$ 回路有电流；
- V断时， $E-L1-C-VD$ 回路和 $R-L2-VD$ 回路有电流；
- 输出电压的极性与电源电压极性相反；
- 电路相当于开关S在A、B两点之间交替切换。



a)



b)

(2) 数量关系

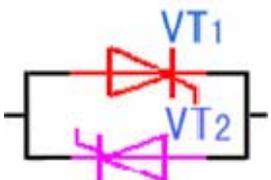
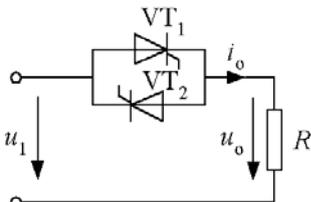
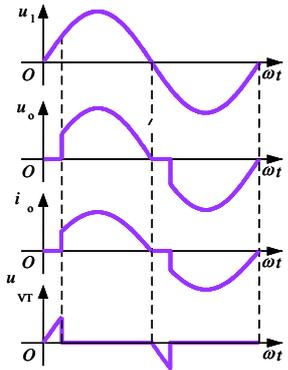
$$U_o = \frac{t_{\text{on}}}{t_{\text{off}}} E = \frac{t_{\text{on}}}{T - t_{\text{on}}} E = \frac{\alpha}{1 - \alpha} E$$

作业和思考题:

教学反思:

# 电力电子技术 课程教案

## 第 14 讲

<b>课程类别</b>	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实训课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时安排	2
<b>授课题目</b>			
6.1 交流调压电路			
<b>教学目的、要求</b>			
1. 了解交流变流电路的分类及其基本概念； 2. 理解单相交流调压电路的电路构成，两种负载时的工作原理和电路特性； 3. 掌握三相交流调压电路的基本构成和基本工作原理。			
<b>教学重点及难点</b>			
重点：晶闸管交流调压电路中的部分概念、单相交流调压电路、三对晶闸管反并联的三相三线交流调压电路（电阻性负载）； 难点：三相三线交流调压电路（电阻性负载）不同触发角时的波形分析。			
<b>教学过程</b>		<b>方法及手段</b>	
<b>6.1 交流调压电路</b> (1) 原理 两个晶闸管反并联后串联在交流电路中，通过对晶闸管的控制就可控制交流电力。		多媒体	
		举例讲解	
(2) 应用 > 灯光控制（如调光台灯和舞台灯光控制）； > 异步电动机软起动； > 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。			
<b>6.1.1 单相交流调压电路</b>			
<b>1. 电阻负载</b>			
			

1) 输出电压与  $\alpha$  的关系

➤ 移相范围为  $0 \leq \alpha \leq \pi$ ;

➤  $\alpha = 0$  时, 输出电压为最大,  $U_0 = U_1$ ; 随  $\alpha$  的增大,  $U_0$  降低,  $\alpha = \pi$  时,  $U_0 = 0$ 。

2)  $\lambda$  与  $\alpha$  的关系

$\alpha = 0$  时, 功率因数  $\lambda = 1$ ,  $\alpha$  增大, 输入电流滞后于电压且畸变,  $\lambda$  降低。

## 2. 阻感负载

➤ 负载阻抗角:  $\varphi = \arctan(\omega l/R)$ ;

➤ 若晶闸管短接, 稳态时负载电流为正弦波, 相位滞后于  $u_1$  的角度为  $\varphi$ , 当用晶闸管控制时, 只能进行滞后控制, 使负载电流更为滞后;

➤  $\alpha = 0$  时刻仍定为  $u_1$  过零的时刻,  $\alpha$  的移相范围应为  $\varphi \leq \alpha \leq \pi$ 。

## 6.1.2 三相交流调压电路

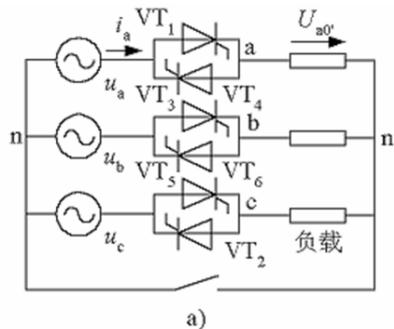
### 1. 三相四线

(1) 基本原理

相当于三个单相交流调压电路的组合, 三相互相错开  $120^\circ$  工作。基波和 3 倍次以外的谐波在三相之间流动, 不流过零线。

(2) 问题

三相中 3 倍次谐波同相位, 全部流过零线。零线有很大 3 倍次谐波电流。  $\alpha = 90^\circ$  时, 零线电流甚至和各相电流的有效值接近。



### 2. 三相三线 (电阻负载)

➤ 任一相导通须和另一相构成回路;

➤ 电流通路中至少有两个晶闸管, 应采用双脉冲或宽脉冲触发;

➤ 触发脉冲顺序和三相桥式全控整流电路一样, 为  $VT_1 \sim VT_6$ , 依次相差  $60^\circ$ ;

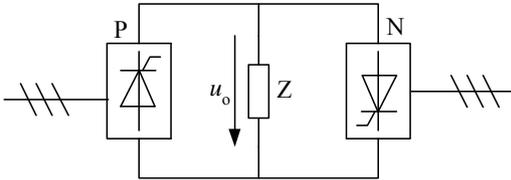
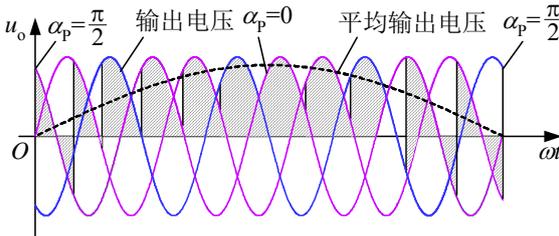
➤ 相电压过零点定为  $a$  的起点,  $\alpha$  移相范围是  $0^\circ \sim 150^\circ$ 。

作业和思考题:

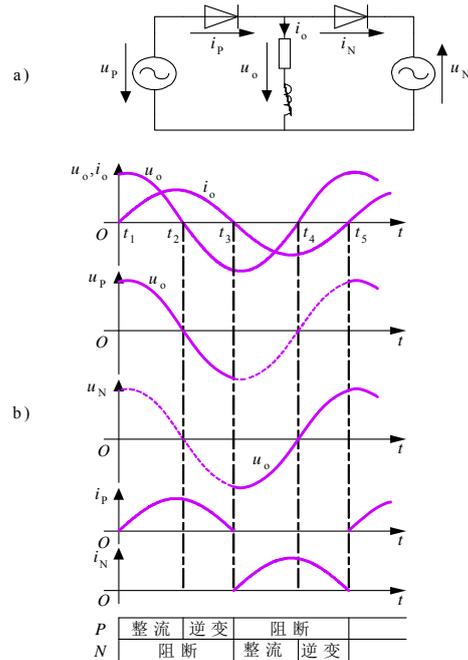
教学反思:

# 电力电子技术 课程教案

## 第 15 讲

课程类别	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实训课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时安排	2
<b>授课题目</b>			
6.3 交交变频电路			
<b>教学目的、要求</b>			
1. 掌握晶闸管交-交变频器（方波型、正弦波型）、输出正弦波形的获得方法、三相-单相交-交变频电路、三相交-交变频电路（原理电路的接线方式、具体电路结构）。			
<b>教学重点及难点</b>			
重点：晶闸管交-交变频的概念，输出方波型和正弦波形的获得方法，三相-单相、三相交-交变频电路的接线方式；			
难点：输出方波型和正弦波形的获得方法、三相交-交变频电路的接线方式。			
<b>教学过程</b>		<b>方法及手段</b>	
<p><b>导入：</b> 复习回忆。</p> <p><b>新授：</b> 6.3.1 单相交交变频器</p> <p>1. 电路构成和基本工作原理</p> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;">  </div> <p>1) 电路构成 如图由 P 组和 N 组反并联的晶闸管变流电路构成，和直流电动机可逆调速用的四象限变流电路完全相同。变流器 P 和 N 都是相控整流电路。</p> <p>2) 工作原理 P 组工作时，负载电流 <math>i_o</math> 为正。N 组工作时，<math>i_o</math> 为负；两组变流器按一定的频率交替工作，负载就得到该频率的交流电；改变两组变流器的切换频率，就可改变输出频率。改变变流电路的控制角，就可以改变交流输出电压的幅值。为使 <math>u_o</math> 波形接近正弦波，可按正弦规律对 <math>\alpha</math> 角进行调制。</p>		<p>多媒体</p> <p>举例讲解</p>	

## 2. 整流与逆变工作状态



把交交变频电路理想化，忽略变流电路换相时  $u_o$  的脉动分量，就可把电路等效成正弦波交流电源和二极管的串联。

1) 设负载阻抗角为  $j$ ，则输出电流滞后输出电压  $j$  角。

2) 两组变流电路采取无环流工作方式，即一组变流电路工作时，封锁另一组变流电路的触发脉冲。

3) 工作状态

➤  $t_1 \sim t_3$  期间： $i_o$  正半周，正组工作，反组被封锁；

$t_1 \sim t_2$ ： $u_o$  和  $i_o$  均为正，正组整流，输出功率为正； $t_2 \sim t_3$ ： $u_o$  反向， $i_o$  仍为正，正组逆变，输出功率为负。

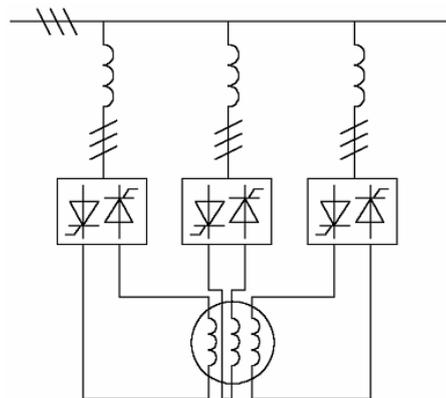
➤  $t_3 \sim t_5$  期间： $i_o$  负半周，反组工作，正组被封锁；

$t_3 \sim t_4$ ： $u_o$  和  $i_o$  均为负，反组整流，输出功率为正； $t_4 \sim t_5$ ： $u_o$  反向， $i_o$  仍为负，反组逆变，输出功率为负。

➤ 小结：

哪一组工作由  $i_o$  方向决定，与  $u_o$  极性无关；工作在整流还是逆变，则根据  $u_o$  方向与  $i_o$  方向是否相同确定。

### 6.3.2 三相交交变频电路



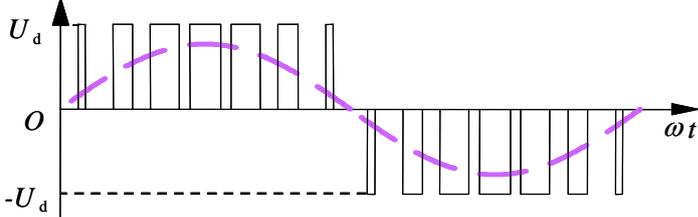
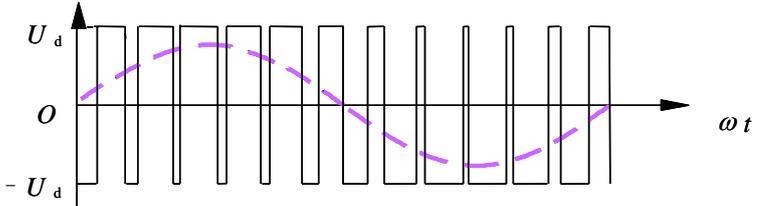
(1) 特征

➤ 由三组彼此独立的、输出电压相位相互错开  $120^\circ$  的单相交交变频电路构成；

<p>           ➤ 电源进线通过进线电抗器接在公共的交流母线上；            ➤ 因为电源进线端公用，所以三组的输出端必须隔离。为此，交流电动机的三个绕组必须拆开；            ➤ 主要用于中等容量的交流调速系统。         </p> <p>交交变频电路的优点：效率较高（一次变流），可方便地实现四象限工作，低频输出波形接近正弦波。</p> <p>（2）缺点</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 接线复杂，采用三相桥式电路的三相交交变频器至少要用36只晶闸管；</li> <li>➤ 受电网频率和变流电路脉波数的限制，输出频率较低；</li> <li>➤ 输入功率因数较低；</li> <li>➤ 输入电流谐波含量大，频谱复杂。</li> </ul> <p>（3）应用</p> <p>主要用于 500kW 或 1000kW 以上的大功率、低转速的交流调速电路中。目前已在轧机主传动装置、鼓风机、矿石破碎机、球磨机、卷扬机等场合应用；既可用于异步电动机，也可用于同步电动机传动。</p>	
<p><b>作业和思考题：</b></p>	
<p><b>教学反思：</b></p>	

# 电力电子技术 课程教案

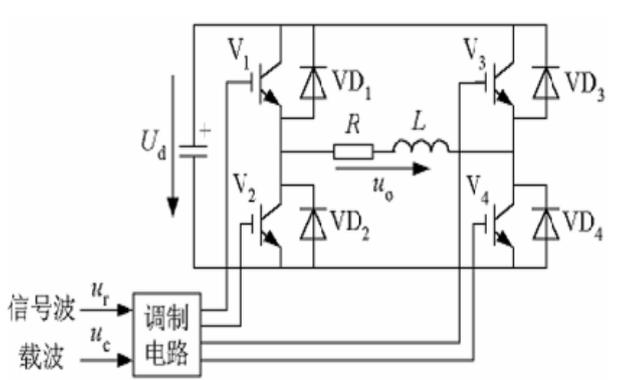
## 第 16 讲

课程类别	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实训课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时安排	2
<b>授课题目</b>			
7.1 PWM 控制的基本原理			
<b>教学目的、要求</b>			
1. 了解 PWM 控制技术的概念、应用； 2. 理解 PWM 控制的基本原理。			
<b>教学重点及难点</b>			
重点：PWM 控制技术的基本原理； 难点：PWM 控制技术的基本原理。			
<b>教学过程</b>		<b>方法及手段</b>	
<b>导入：</b> 复习回顾：		多媒体          举例讲解	
<b>新授：</b> <b>7.1 PWM 控制的基本原理</b> 脉宽调制技术（Pulse Width Modulation, PWM）通过对一系列脉冲的宽度进行调制，来等效的获得所需要的波形（含形状和幅值）。 第3、4章已涉及到PWM控制，第3章直流斩波电路采用的就PWM技术，第4章的4.1斩控式调压电路和4.4矩阵式变频电路都涉及到了。 <b>重要理论基础——面积等效原理</b> ➤对于正弦波的负半周，采取同样的方法，得到PWM波形，因此正弦波一个完整周期的等效PWM波为： <u>（三电平调制方法）</u>			
			
➤根据面积等效原理，正弦波还可等效为下图中的PWM波，而且这种方式在实际应用中更为广泛。 <u>（两电平调制方法）</u>			
			

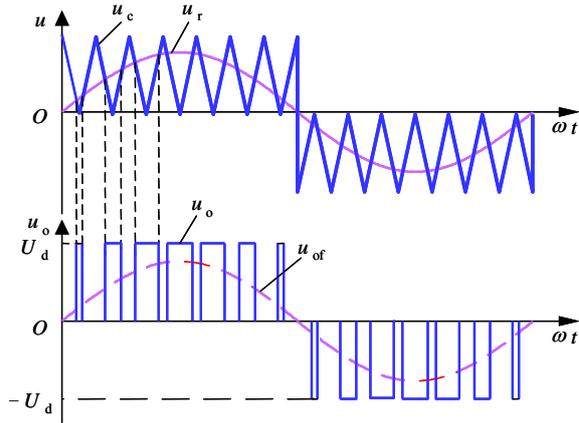
作业和思考题:	
教学反思:	

# 电力电子技术 课程教案

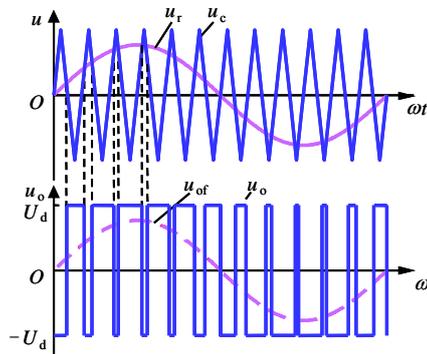
## 第 17 讲

<b>课程类别</b>	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实训课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时安排	2
<b>授课题目</b>			
7.2 PWM 逆变电路及其控制方法			
<b>教学目的、要求</b>			
1. 掌握 PWM 逆变电路及其控制方法。			
<b>教学重点及难点</b>			
重点：PWM 逆变电路及其控制方法的工作原理、波形分析。 难点：无。			
<b>教学过程</b>		<b>方法及手段</b>	
<p><b>导入：</b> 复习回顾：电压正弦脉宽调制法的基本思想。</p> <p><b>新授：</b></p> <p><b>7.2.1 计算法</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 根据正弦波频率、幅值和半周期脉冲数，准确计算PWM波各脉冲宽度和间隔，据此控制逆变电路开关器件的通断，就可得到所需PWM波形；</li> <li>➢ 本法较繁琐，当输出正弦波的频率、幅值或相位变化时，结果都要变化。</li> </ul> <p><b>7.2.2 调制法</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➢ 把希望输出的波形作为调制信号，把接受调制的信号作为载波，通过信号波的调制得到所期望的PWM波形；</li> <li>➢ 调制信号波：正弦波；</li> <li>➢ 载波：等腰三角波或锯齿波。</li> </ul>		<p>多媒体</p> <p>举例讲解</p>	
			
<b>1. 工作原理</b>			

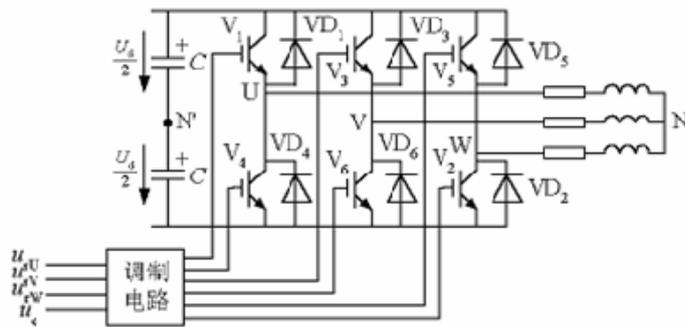
### 1) 单极性 PWM 控制方式



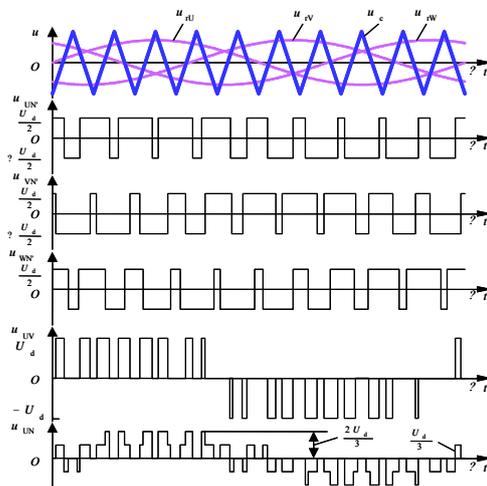
### 2) 双极性 PWM 控制方式



### 3) 双极性 PWM 控制方式（三相桥逆变）

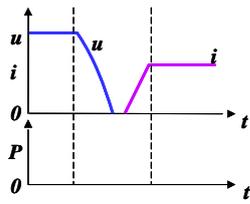


- 三相的PWM控制公用三角波载波 $u_c$ ;
- 三相的调制信号 $u_{rU}$ 、 $u_{rV}$ 和 $u_{rW}$ 依次相差 $120^\circ$ 。

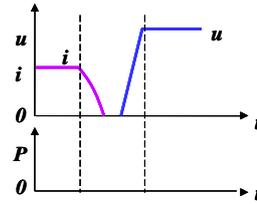


<ul style="list-style-type: none"> <li>➤输出线电压 PWM 波由<math>\pm U_d</math> 和 0 三种电平构成</li> <li>➤负载相电压 PWM 波由<math>(\pm 2/3)U_d</math>、<math>(\pm 1/3)U_d</math> 和 0 共 5 种电平组成。</li> </ul> <p><b>2. 防直通的死区时间</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤同一相上下两臂的驱动信号互补，为防止上下臂直通而造成短路，留一小段上下臂都施加关断信号的死区时间；</li> <li>➤死区时间的长短主要由开关器件的关断时间决定；</li> <li>➤死区时间会给输出的PWM波带来影响，使其稍稍偏离正弦波。</li> </ul>	
<p><b>作业和思考题：</b></p>	
<p><b>教学反思：</b></p>	





a) 软开关的开通过程



b) 软开关的关断过程

- 零电压开通：开关开通前其两端电压为零，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，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。
  - ✓ 根据开关元件开通和关断时电压电流状态，分为零电压电路和零电流电路两大类。
  - ✓ 根据软开关技术发展的历程可以将软开关电路分成准谐振电路、零开关PWM电路和零转换PWM电路。
  - ✓ 每一种软开关电路都可以用于降压型、升压型等不同电路，可以从基本开关单元导出具体电路。

作业和思考题：P178 习题 2

教学反思：

# 电力电子技术 课程教案

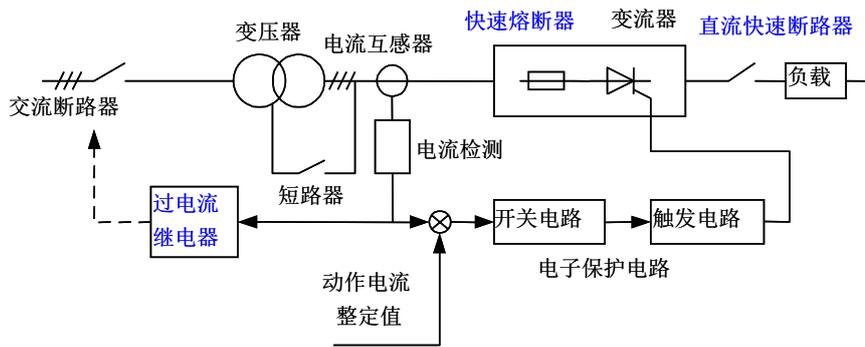
## 第 19 讲

<b>课程类别</b>	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实训课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时安排	2
<b>授课题目</b>			
8.2 软开关电路的分类			
<b>教学目的、要求</b>			
1. 理解软开关电路的分类。			
<b>教学重点及难点</b>			
重点：软开关电路的分类及工作原理； 难点：无。			
<b>教学过程</b>			<b>方法及手段</b>
<b>导入：</b> 复习回顾：			多媒体
<b>新授：</b> <b>8.2 软开关电路的分类</b> <b>1) 准谐振电路</b> 准谐振电路—准谐振电路中电压或电流的波形为正弦半波，因此称之为准谐振。是最早出现的软开关电路。 ➤ 谐振电压峰值很高，要求器件耐压必须提高； ➤ 谐振电流有效值很大，电路中存在大量无功功率的交换，电路导通损耗加大； ➤ 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。			举例讲解
<b>2) 零开关PWM电路</b> ➤ 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。 ➤ 零开关PWM电路可以分为： ➤ 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）			
<b>3) 零转换PWM电路</b> ➤ 采用辅助开关控制谐振的开始时刻，但谐振电路是与主开关并联的。 ➤ 零转换PWM电路可以分为： ➤ 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—ZVT PWM） ➤ 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。 ➤ 电路中无功功率的交换被削减到最小，这使得电路效率有了进一步提高。			

作业和思考题： P178 习题 2	
教学反思：	







❖ **全保护**：过载、短路均由快熔进行保护，适用于小功率装置或器件裕度较大的场合。

❖ **短路保护**：快熔只在短路电流较大的区域起保护作用。

➤ 对重要的且易发生短路的晶闸管设备，或全控型器件，需采用电子电路进行过电流保护；

➤ 常在全控型器件的驱动电路中设置过电流保护环节，响应最快。

### 9.2.3 缓冲电路

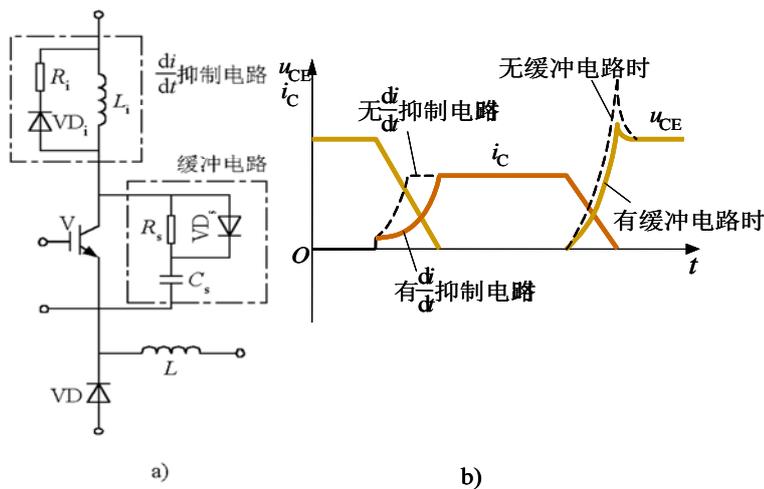
❖ **关断缓冲电路**（ $du/dt$ 抑制电路）：吸收器件的关断过电压和换相过电压，抑制 $du/dt$ ，减小关断损耗。

❖ **开通缓冲电路**（ $di/dt$ 抑制电路）：抑制器件开通时的电流过冲和 $di/dt$ ，减小器件的开通损耗。

❖ **复合缓冲电路**：关断缓冲电路和开通缓冲电路的结合。

❖ **按能量的去向分类法**：耗能式缓冲电路和馈能式缓冲电路（无损吸收电路）。

❖ 通常将缓冲电路专指关断缓冲电路，将开通缓冲电路叫做 $di/dt$ 抑制电路。



作业和思考题：P42 习题 7、8

教学反思：

# 电力电子技术 课程教案

## 第 19 讲

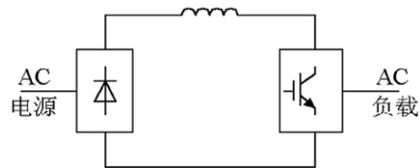
<b>课程类别</b>	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实训课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时安排	2
<b>授课题目</b>			
6.2 交直交变频器			
<b>教学目的、要求</b>			
1. 了解组合交流电路的概念； 2. 理解间接交流变流电路、间接直流变流电路的构成、特点等。			
<b>教学重点及难点</b>			
重点：间接交流变流电路、间接直流变流电路的构成、工作原理、特点等； 难点：间接交流变流电路、间接直流变流电路的构成、工作原理、特点等。			
<b>教学过程</b>		<b>方法及手段</b>	
<b>导入：</b> 复习回顾：		多媒体	
<b>新授：</b> <b>6.2 间接交流变流电路</b> <b>特点：</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 间接交流变流电路由整流电路、中间直流电路和逆变电路构成；</li> <li>➤ 分为电压型间接交流变流电路和电流型间接交流变流电路；</li> <li>➤ 间接交流变流电路的逆变部分多采用PWM控制；</li> <li>➤ 当负载为电动机时，通常要求间接交流变流电路具有再生反馈电力的能力，要求输出电压的大小和频率可调，此时该电路又名交直交变频电路。</li> </ul> <b>1 电压型间接交流变流电路</b>		多媒体  举例讲解	
1) 不能再生反馈电力的电压型间接交流变流电路的整流部分采用的是不可控整流，它只能由电源向直流电路输送功率，而不能反馈电力。图中逆变电路的能量是可以双向流动的，若负载能量反馈到中间直流电路，将导致电容电压升高，称为泵升电压。			
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 带有泵升电压限制电路的电压型间接交流变流电路。</li> <li>➤ 当泵升电压超过一定数值时，使V0导通，把从负载反馈的能量消耗在R0上。</li> </ul>			

2) 利用可控变流器实现再生反馈的电压型间接交流变流电路,当负载回馈能量时,可控变流器工作于有源逆变状态,将电能反馈回电网。

➤整流和逆变均为PWM控制的电压型间接交流变流电路。

➤整流和逆变电路的构成完全相同,均采用PWM控制,能量可双向流动。输入输出电流均为正弦波,输入功率因数高,且可实现电动机四象限运行。

## 2 电流型间接交流变流电路



为使电路具备再生反馈电力的能力,可采用:

➤整流电路采用晶闸管可控整流电路;

➤负载回馈能量时,可控变流器工作于有源逆变状态,使中间直流电压反极性;

➤负载为三相异步电动机,适用于较大容量的场合;

➤整流和逆变均为PWM控制的电流型间接交流变流电路;

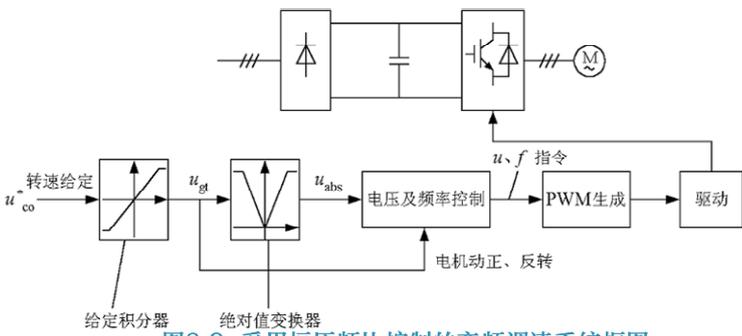
➤通过对整流电路的PWM控制使输入电流为正弦并使输入功率因数为1。

作业和思考题:

教学反思:

# 电力电子技术 课程教案

## 第 20 讲

<b>课程类别</b>	理论课 <input checked="" type="checkbox"/> 实训课 <input type="checkbox"/> 实验课 <input type="checkbox"/> 习题课 <input type="checkbox"/> 其他 <input type="checkbox"/>	课时安排	2
<b>授课题目</b>			
6.3 间接直流变流电路			
<b>教学目的、要求</b>			
1. 了解交直交变频器的概念和工作原理及控制方式。			
<b>教学重点及难点</b>			
重点：交直交变频器的概念和工作原理及控制方式； 难点：交直交变频器的概念和工作原理及控制方式。			
<b>教学过程</b>		<b>方法及手段</b>	
<p><b>导入：</b></p> <p>复习回顾：</p> <p>1) 晶闸管直流电动机传动系统存在一些固有的缺点：受使用环境条件制约、需要定期维护、最高速度和容量受限制等。</p> <p>2) 交流调速传动系统除了克服直流调速传动系统的缺点外还具有：交流电动机结构简单，可靠性高；节能；高精度，快速响应等优点。</p> <p>3) 采用变频调速方式时，无论电机转速高低，转差功率的消耗基本不变，系统效率是各种交流调速方式中最高的，具有显著的节能效果，是交流调速传动应用最多的一种方式。</p> <p><b>新授：</b></p> <p><u>笼型异步电动机的定子频率控制方式，有：恒压频比(U/f)控制；转差频率控制；矢量控制；直接转矩控制等。</u></p> <p><b>1 恒压频比控制</b></p>		<p>多媒体</p> <p>举例讲解</p>	
 <p style="text-align: center;">图8-9 采用恒压频比控制的变频调速系统框图</p>			
<p>➤ 为避免电动机因频率变化导致磁饱和而造成励磁电流增大,引起功率因数和效率的降低, 需对变频器的电压和频率的比率进行控制, 使该比率保持恒定, 即恒压频比控制, 以维持气隙磁通为额定值。</p> <p>➤ 恒压频比控制是比较简单, 被广泛采用的控制方式。该方式被用于转速开环的交流调速系统, 适用于生产机械对调速系统的静、动态性能要求不高的场合。</p>			

## 2 转差频率控制

➤在稳态情况下，当稳态气隙磁通恒定时，异步电机电磁转矩近似与转差角频率成正比。因此，控制 $\omega_s$ 就相当于控制转矩。采用转速闭环的转差频率控制，使定子频率 $\omega_1 = \omega_r + \omega_s$ ，则 $\omega_1$ 随实际转速 $\omega_r$ 增加或减小，得到平滑而稳定的调速，保证了较高的调速范围。

➤转差频率控制方式可达到较好的静态性能，但这种方法是基于稳态模型的，得不到理想的动态性能。

## 3 矢量控制

➤异步电动机的数学模型是高阶、非线性、强耦合的多变量系统。传统设计方法无法达到理想的动态性能。

➤矢量控制方式基于异步电机的按转子磁链定向的动态模型，将定子电流分解为励磁分量和与此垂直的转矩分量，参照直流调速系统的控制方法，分别独立地对两个电流分量进行控制，类似直流调速系统中的双闭环控制方式。

➤控制系统较为复杂，但可获得与直流电机调速相当的控制性能。

## 4 直接转矩控制

直接转矩控制方法同样是基于动态模型的，其控制闭环中的内环，直接采用了转矩反馈，可以得到转矩的快速动态响应。并且控制相对要简单许多。

作业和思考题：

教学反思：

