

# 电力电子学复习纲要 ( 2016 版 )

戴卫力 编

## 一、电力电子器件的分类

( 1 ) 按照控制程度分：不可控型、半控型、全控型；

( 2 ) 按照驱动电路加在器件控制端和公共端之间信号性质分：电流驱动型、电压驱动型；

( 3 ) 按照器件内部电子、空穴两种载流子参与导电的情况分：单极型、双极型和复合型。

电力二极管：不可控型 ( P41 , 电力电子器件分类树 )

晶闸管：不可控型、电流型、双极型

GTO：全控型、电流型、双极型

GTR：全控型、电流型、双极型

MOSFET：全控型、电压型、单极型

IGBT：全控型、电压型、复合型

MCT：全控型、电压型、复合型

## 二、电力二极管

( 1 ) 两种反向击穿：雪崩击穿、齐纳击穿

( 2 ) 二极管的容性效应：势垒电容  $C_B$  和扩散电容  $C_D$ 。  $C_B$  与外加电压有关，电压频率越高，  $C_B$  作用越明显；  $C_D$  仅正向偏置时起作用。正向电压较低时，  $C_B$  为主；正向电压较高时，  $C_D$  为主。

( 3 ) 电力二极管的基本特性

A、静态特性 ( 伏安特性 )

B、动态特性：二极管的反向恢复问题 ( 当二极管由正向偏置转为反向偏置时，由于二极管的反向恢复，会造成明显的反向电压过冲 )

电力二极管的反向恢复的原因为正向导通时在 PN 结两侧储存的大量少子 ( 电荷 ) 需要被清除以达到反向偏置稳态的缘故。

不同类型的二极管，反向恢复时间由大到小分别是：普通二极管 > 快恢复二极管 > 肖特基二极管。

软度系数的概念：下降时间与延迟时间的比值。

软度系数越大，恢复特性越软，反向电压过冲约小。

如何减小二极管的反向恢复电压？陈述机理和方法？

(1) 减小线路寄生感 ; (2) 选择软度系数大的二极管 ; (3) 减小负载电流 (如 boost 电路中采用多相多重斩波电路)

肖特基的优点 : 反向恢复时间短、正向压降低、反向恢复问题小 ; 缺点 : 反向耐压不高 ; 温度敏感。

C、电力二极管的主要参数

正向通态平均电流

## 二、晶闸管

结构 : 四层三端、有阴极、阳极和门极 ; 有螺栓型、平板型

导通条件 : 阳极和阴极之间加正向电压且门极有触发电流 (信号)

关断条件 : 阳极和阴极之间加反向电压或在外电路作用下使流过晶闸管的电流降到维持电流以下。

晶闸管误导通的几种情况 : 阳极电压过高造成雪崩击穿 ; 阳极电压上升率过高 ; 结温过高 ; (光触发不属于误导通范围 , 可精确控制)

晶闸管的静态特性 (了解)

晶闸管的主要参数——重点掌握通态平均电流和波形系数的定义。

通态平均电流 : 在规定的环境温度和冷却状态下 , 稳定结温不超过额定结温时所允许流过的最大工频正弦半波电流的平均值。

波形系数 : 有效值与平均值之比。  $k_f = I / I_d$

习题 : P42 题 3 (a)

该波形下的电流平均值 :

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

该波形下的电流有效值 :

$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi/4}^{\pi} (I_m \sin \omega t)^2 d\omega t} = I_m \sqrt{3/16 + \frac{1}{8\pi}} \approx 0.4767 I_m$$

因此 , 该波形下的波形系数 :

$$k_{f1} = \frac{I_1}{I_{d1}} \approx 1.755$$

若不考虑安全裕量 , 采用电流定额 100A 的晶闸管 , 则  $I_{T(av)} = 100A$  , 根据在不同电流波形下 , 晶闸管所能承受的电流有效值相等原则 , 可知 :

$I_{T(av)} = 100A$  为在电流半波下测定 , 波形系数  $k_f = 1.57$  , 因此该晶闸管所能流过的最大电流有效值为 157A。

因此 , 若电流波形为题 3 (a) , 则晶闸管能流过的最大平均电流为 :

$$I_{d1} = \frac{I_1}{k_{f1}} = \frac{157}{1.755} \approx 89.46 \text{ A}$$

则电流峰值为

$$I_m \approx \frac{I_{d1}}{0.2717} = \frac{89.46}{0.2717} \approx 329.25 \text{ A}$$

### 三、MOSFET 和 IGBT

结构：横向导电结构：小功率，耐压低

纵向导电结构：大功率、耐压高

有栅极、源极和漏极

MOSFET 的通态电阻具有正温度系数，可以进行器件并联。( MOSFET 并联自然均流要会证明，书写证明过程 ) 栅源电压不能超过 20V。

MOSFET 的三个电极之间存在极间电容  $C_{GS}$ 、 $C_{GD}$  和  $C_{DS}$ 。输入电容  $C_{iss}$ 、输出电容  $C_{oss}$  和反向转移电容  $C_{rss}$ 。

$$C_{iss} = C_{GS} + C_{GD}$$

$$C_{rss} = C_{GD}$$

$$C_{oss} = C_{DS} + C_{GD}$$

双极型电流驱动器件，通流能力强、但开关速度较低，所需驱动功率大，驱动电路复杂；

单极型电压驱动器件，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。

IGBT ( 绝缘栅极晶体管 ) 是 MOSFET 与 GTR 的复合。

MCT ( MOS 控制晶闸管 ) 是 MOSFET 与晶闸管的复合。

### 四、驱动和保护电路

驱动电路提供控制电路与主电路之间的电气隔离环节，一般采用光耦隔离或磁耦隔离两种方式。

晶闸管驱动：应保证触发脉冲有足够的宽度。移采用宽脉冲和双窄脉冲触发。对三相全控桥式电路应采用宽于  $60^\circ$  或采用间隔  $60^\circ$  的双窄脉冲。

MOSFET 和 IGBT 驱动的要求：

- ( 1 ) 驱动电路的输出电阻小；
- ( 2 ) 驱动电压对于 MOSFET 一般取 10-15V，对于 IGBT 为 15-20V，不能超过 20V；
- ( 3 ) 施加一定幅值的负压 ( 一般-5V ) 有利于减小关断时间，保证可靠关断；

外因过电压主要由操作过电压和雷击过电压造成。

内因过电压主要由换相过电压和关断过电压造成。

## 第二章、整流电路 ( 理解、计算 )

### 一、单相可控整流电路

自然换相点为相电压的过零点；导通角的概念。

阻性负载：

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 0.45U_2 \frac{1 + \cos\alpha}{2} ;$$

触发角的移相范围 180 度，承受正向和反向最大电压均为  $\sqrt{2}U_2$  ；

阻感负载：

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 0.45U_2 \cos\alpha$$

移相范围 90 度，承受正向和反向最大电压均为  $\sqrt{2}U_2$  ；

#### 1、单相桥式全控整流电路

阻性负载：

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

触发角的移相范围 180 度，晶闸管承受的最大正向电压为  $\sqrt{2}U_2 / 2$  ( 这是由于有  $U_d = 0$  的情况 )，承受反向电压为  $\sqrt{2}U_2$ 。

阻感负载：

$$U_d = 0.9U_2 \cos\alpha$$

触发角的移相范围 90 度，承受正向和反向最大电压均为  $\sqrt{2}U_2$  ( 这是轮流导通的原因 )；

反电动势负载：

停止导电角的概念：

$$\delta = \arcsin \frac{E}{\sqrt{2}U_2}$$

单相全波可控整流电路与单相全控桥式电路的区别：

单相全波可控整流电路	单相全控桥式电路
变压器绕组带中心抽头，结构复杂，铜材料消耗多	变压器结构简单
晶闸管 2 个，承受最大电压为 $2\sqrt{2}U_2$	晶闸管 4 个，承受最大电压为 $\sqrt{2}U_2$

低压场合	较高电压场合
------	--------

## 2、单相桥式半控整流电路（重点）

加续流二极管的作用：避免可能发生的失控现象。

相当于桥式的阻性负载，注意计算。

## 二、三相可控整流电路

自然换相点为线电压的过零点。

### 1、三相半波可控整流电路

分共阴极和共阳极两种接法。共阴极：谁大谁做主；共阳极：谁弱谁受宠

阻性负载：

$\alpha < 30^\circ$  度，输出电压连续， $U_d = 1.17U_2 \cos\alpha$

$\alpha = 30^\circ$  度，输出电压临界连续，

$\alpha > 30^\circ$  度，输出电压断续，

因为关断时，晶闸管流通电流由相电压决定，导通时由线电压决定，且线电压超前相电压  $30^\circ$  度，因此移相范围  $180-30=150^\circ$  度。晶闸管承受的最大正向电压  $\sqrt{2}U_2$ ，承受的最大反向电压为  $\sqrt{6}U_2$ 。

阻感负载：

输出电压连续，触发角的移相范围为  $90^\circ$  度， $U_d = 1.17U_2 \cos\alpha$

晶闸管最大正反向耐压  $\sqrt{6}U_2$ 。

### 2、三相桥式全控整流电路

分析时，可看作共阴和共阳的串联。

晶闸管的导通规律：

1) 任何时刻均有 2 个管子导通，与负载构成通路，一个来自共阴，一个来自共阳；

2) 触发脉冲按 V、V2、V3、V4、V5、V6 顺序依次差  $60^\circ$  度；共阴 1、3、5 依次差  $120^\circ$  度，共阳 4、6、2 依次差  $120^\circ$  度，同一相的上下两个桥臂，如 1 和 4 依次差  $180^\circ$  度。

阻性负载：

$\alpha < 60$  度，输出电压连续， $U_d = 2.34U_2 \cos \alpha$

$\alpha = 60$  度，输出电压临界连续，

$\alpha > 60$  度，输出电压断续，

因为关断时，晶闸管流通电流由线电压决定，且线电压超前相电压 30 度，因此移相范围为  $180-30-30=120$  度。晶闸管承受的最大正向电压  $\sqrt{6}U_2$ ，承受的最大反向电压为  $\sqrt{6}U_2$ 。

感性负载：输出电压连续

### 3、变压器漏感对整流电路的影响

换相参数：换相时间、换相重叠角

换相特点：

- 1) 换相期间，整流输出电压瞬时值为参与换相的两相相电压的平均值；
- 2) 从下述式子可看出：换相参数与参与换相的两相电压差（线电压）、漏感以及负载大小有关。

$$di_k / dt = (u_b - u_a) / 2L_B$$

$$\Delta U_d = 3\omega L_B I_d / 2\pi$$

图 2-25 的绘制和表 2-2 换相压降和换相重叠角的计算。

### 4、电容滤波的不可控整流电路

全桥变换器的 输出电压平均值范围： $0.9U_2, \sqrt{2}U_2$

三相桥式变换器，输出电压平均值范围： $2.34U_2, \sqrt{6}U_2$

## 三、大功率整流电路（理解）

### （1）带平衡电抗器的双反星形电路

★双反星形电路中加装平衡电抗器的原因是：两组三相半波整流电路输出电压的平均值虽相等，但瞬时值不等。

★平衡电抗器的作用是平衡两组三相半波整流电路输出电压的瞬时值差。

★带平衡电抗器的双反星形电路的整流输出电压瞬时值为两组三相半波整流电压瞬时值的平均值。

### （2）多重化整流电路

**功率因素，非正弦波的话，基波因素与位移因素乘积**

采用多重化联结的优点：①减少交流输入电流的谐波；②减小直流输出电压中的谐波幅值，提高纹波频率，进而减小平波电抗器；

### （3）多重联结电路的顺序控制

因此，通过提高基波因素来提高网侧功率因素的是多重化整流技术；

通过改善位移因素而提高功率因素的是多重联接电路的顺序控制；

#### 四、整流电路的有源逆变（理解、计算）

有源逆变的定义：看交流电路的交流侧是否与电网相连。

G-M 模型的理解。发电机与电动机惯例。

逆变的实质是能量的逆流，而非电流的逆向流动。

产生逆变的条件：

1) 要有源，即直流电动势；2) 源的极性与晶闸管的导通方向一致，且值应大于变流电路直流侧平均电压；3) 晶闸管的控制角  $\alpha > \pi/2$ ，使  $U_d$  为负值。

特别注意的：半控桥和有续流二极管的电路，由于整流电压不能出现负值，因此不能实现有源逆变。

有源逆变计算与整流类似。逆变角  $\beta$  与触发角  $\alpha$  之间遵守的数学关系：

$$\alpha + \beta = \pi$$

有源逆变中相电压、线电压和输出电压作图：

(1) 根据电路拓扑确定自然换相点位置；

(2) 确定以触发角  $\alpha$  为基准还是逆变角  $\beta$  为基准来认定自然换相点所控制的相应的相电压和触发角（逆变角）；

★ 以  $\alpha$  为基准，控制相电压和触发角计算以自然换相点开始往右计算；

★ 以  $\beta$  为基准，控制相电压和逆变角计算以自然换相点开始往左计算；

(3) 根据上述触发角或逆变角描出相应的相电压（对于感性负载以下一个换相点开始为该相电压导通的结束点）；

(4) 根据各区间所画的相应相电压按线电压为两相电压之差画出线电压波形；

教科书 P82 为例。

逆变失败的原因，见书 P82

确定最小逆变角由以下因素决定：晶闸管关断时间折合的电角度；换相重叠角；安全余量角

#### 五、晶闸管直流电动机系统（V-M 系统。理解）

V-M 系统在电流断续时机械特性的两个显著特点分别是理想空载转速抬高和电动机的机械特性变软；当然，另外一个特点是随着  $\alpha$  的增大，进入断续区的电流值增加。

三相半波整流电路，要保证电流连续所需的主回路电感量  $L$ （单位为 mH）为

$$L = 1.46 \frac{U_2}{I_{d \min}}$$

而三相桥式全控整流电路，

$$L = 0.693 \frac{U_2}{I_{d \min}}$$

直流可逆电力拖动系统，四个工作象限的情况要做好理解。

发电和电动的判断是看电机工作在电动机惯例还是发电机惯例；

正反转看转速正负；

逆变还是整流看能量是流向电机还是流向电网源；

### 第三章、直流斩波电路（理解、计算）

（1）6种基本斩波电路拓扑：Buck 电路、Boost 电路、Buck-boost 电路、Cuk 电路、Sepic 电路和 Zeta 电路。

斩波电路的三种控制方式：脉冲宽度调制（PWM）

掌握电感伏秒平衡推导原则。

重点掌握降压和升压电路的计算。

两种计算类型。（以 Buck 为例）

#### 1、电动机系统

P111 第 2 题

解：占空比  $D = t_{on} / T = 20 / 50 = 0.4$ ，则输出电压平均值

$$U_o = DE = 0.4 \times 200 = 80V$$

输出电流平均值：

$$I_o = \frac{U_o - E_M}{R} = \frac{80 - 30}{10} = 5A$$

#### 2、电源电感计算

设计一 buck 变换器满足如下性能指标：输入电压：17V-34V；输出电压：5V；

输出电流：0.2A—1A；工作频率：40kHz，要求从最小负载 0.2A 到最大负载 1A

都要工作在 CCM 状态下，求满足条件的电感值的大小。

解：该电源最大占空比：



$$D_{\max} = U_o / E_{\min} = 5/17 = 0.294$$

最小占空比：

$$D_{\min} = U_o / E_{\max} = 5/34 = 0.147$$

由题意得：当达到最小负载 0.2A 时，电感电流正好工作在临界连续状态，此时有  $\Delta i_L / 2 = I_{o\min}$ ，又因为为

$$-U_o = L \frac{-|\Delta i_L|}{(1-D)T_s}$$

因此，当占空比最小时，L 较大，从而能保证在占空比较大时也能工作在连续状态，因此所求电感

$$L = \frac{(1-D_{\min})U_o}{2I_{o\min}f_s} = 0.27 \text{ mH}$$

可取 0.3mH，使电源满足从 0.2A 到 1A 均工作在 CCM。

#### 第四章、交流调压电路（理解）

交流调压有两种控制方式：分别为相位控制和斩波控制；斩波控制的优点是输入功率因素接近 1。

单相交流调压电路中，电阻负载下的触发角移相范围： $[0, \pi]$ ；阻感负载下的触发角移相范围： $[\varphi, \pi]$ 。

三相支路控制三角形联结方式的一个典型用例是晶闸管控制电抗器，可看成为纯电感负载， $\alpha$  的移相范围为  $[\pi/2, \pi]$

交流调功电路，控制通过改变接通周波数和断开周波数的比值来调节负载消耗的平均功率。

TSC 运行时选择晶闸管投入时刻的原则是，该时刻交流电源电压应和电容器预先充电的电压相等。

交流调压电路和交流调功电路在电路和控制方式上有什么相同点和不同点？

(1) 交流调压电路和交流调功电路在电路形式上完全相同，但控制方式不同。

(2) 交流调压电路的控制方式主要有相位控制和斩波控制，是每个交流电源周期都对输出电压进行控制；

(3) 交流调功电路是将负载与交流电源接通几个整周波，再断开几个整周波，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。

(4) 交流调功电路通常控制晶闸管导通的时刻都是在电源电压过零的时刻，

不会对电网电流造成谐波污染；而交流调压电路在相控方式下，随着触发角的增加，功率因素逐渐降低，而在斩控方式下功率因素接近为 1。

加深对单相交交变频输入输出特性中输出上限频率和输入功率因素的理解！

三相交交变频电路主要有公共交流母线进线方式和输出星形联结方式。

三相交交变频电路改善输入功率因素和提高输出电压的两种方法？(理解)

- 1、施加直流偏置
- 2、施加交流偏置（即梯形波输出控制）