

# 第一章 电力电子器件

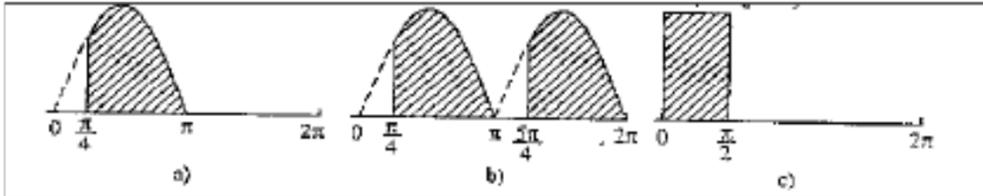
1.1 使晶闸管导通的条件是什么？

答：使晶闸管导通的条件是：晶闸管承受正相阳极电压，并在门极施加触发电流（脉冲）。或者  $U_{AK} > 0$  且  $U_{GK} > 0$

1.2 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。

1.3 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  $I_1, I_2, I_3$



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

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

b) 
$$I_{d2} = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi/4}^{3\pi/4} I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{2} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} - 1 \right) = 0.5434 I_m$$

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

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

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

解:额定电流  $I_{T(AV)} = 100A$  的晶闸管,允许的电流有效值  $I = 157A$ ,由上题计算结果知

a) 
$$I_{m1} = \frac{I}{0.4767} = 329.35 A, \quad I_{d1} = 0.2717 I_{m1} = 89.48 A$$

b) 
$$I_{m2} = \frac{I}{0.6741} = 232.90 A, \quad I_{d2} = 0.5434 I_{m2} = 126.56 A$$

c) 
$$I_{m3} = 2I = 314, \quad I_{d3} = \frac{1}{4} I_{m3} = 78.5$$

答:GTO 和普通晶闸管同为 PNP 结构,由 P1N1P2 和 N1P2N2 构成两个晶体管 V1、V2,分别具有共基极电流增益  $\beta_1$  和  $\beta_2$ ,由普通晶闸管的分析可得,  $\beta_1 \beta_2 > 1$  是器件临界导通的条件。  $\beta_1 \beta_2 > 1$  两个等效晶体管过饱和而导通;  $\beta_1 \beta_2 < 1$  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  $\beta_2$  较大,这样晶体管 V2 控制灵敏,易于 GTO 关断;

2)GTO 导通时  $\beta_1 \beta_2$  的更接近于 1,普通晶闸管  $\beta_1 \beta_2 = 1.5$ ,而 GTO 则为  $\beta_1 \beta_2 = 1.05$ ,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 P2 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。

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  $\pm 20$  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。

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。

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。

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	开关速度高,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

1. 10 什么是晶闸管的额定电流?

答: 晶闸管的额定电流就是它的通态平均电流, 国标规定: 是晶闸管在环境温度为 40°C 和规定的冷却状态下, 稳定结温不超过额定结温所允许的最大工频正弦半波电流的平均值。

1. 11 为什么要限制晶闸管断电电压上升律  $du/dt$ ?

答: 正向电压在阻断状态下, 反向结  $J_2$  相当的一个电容加在晶闸管两端电压上升率过大, 就会有过大的充电电流, 此电流流过  $J_3$ , 起到触发电流的作用, 易使晶闸管误触发, 所以要限制  $du/dt$

1. 12 为什么要限制晶闸管导通电流上升率  $di/dt$ ?

答: 在晶闸管导通开始时刻, 若电流上升过快, 会有较大的电流集中在门集附近的小区域内, 虽然平均电流没有超过额定值, 但在小的区域内局部过热而损坏了晶闸管, 所以要限制通态  $di/dt$ .

1. 13 电力电子器件工作时产生过电压的原因及防止措施有哪些?

答: 产生原因:

- a. 由分闸,合闸产生的操作过电压
- b. 雷击引起的雷击过电压
- c. 晶闸管换相过程中产生的换相电压。并联储流=集管令控元件的换相时产生的换相电压

措施：

压触发电阻，交流侧 RC 抑制电路，直流侧 RC 控制电路，直流侧 RC 抑制电路，变压器屏蔽层，避雷器，器件关断过电压 RC 抑制电路。

## 第 2 章 整流电路

2.1 单相半波可控整流电路对电感负载供电,  $Z = 20\text{mH}$ ,  $U_2 = 100\text{V}$ , 求当  $\alpha = 0$  时和  $60^\circ$  时的负载电流  $I_d$ , 并画出  $U_d$  与  $I_d$  波形。

解：  $\alpha = 0$  时, 在电源电压  $U_2$  的正半周期晶闸管导通时, 负载电感  $L$  储能, 在晶闸管开始导通时刻, 负载电流为零。在电源电压  $U_2$  的负半周期, 负载电感  $L$  释放能量, 晶闸管继续导通。因此, 在电源电压  $U_2$  的一个周期里, 以下方程均成立：

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

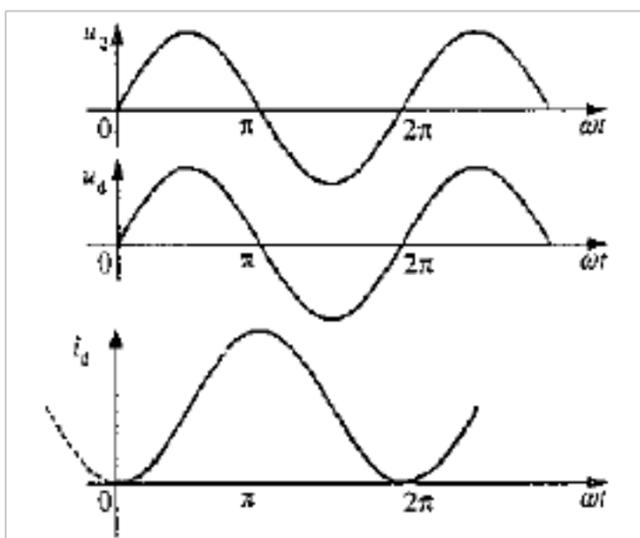
考虑到初始条件：当  $t = 0$  时  $i_d = 0$  可解方程：

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

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

$$\frac{\sqrt{2}U_2}{L} = 22.51(\text{A})$$

$U_d$  与  $I_d$  的波形如下图：



当  $\alpha = 60^\circ$  时, 在  $U_2$  的正半周期  $60^\circ \sim 180^\circ$  期间, 晶闸管导通使电感  $L$  储能, 电感  $L$  储藏的能量在  $U_2$  负半周期  $180^\circ \sim 300^\circ$  期间释放, 因此在  $U_2$  的一个周期中  $60^\circ \sim 300^\circ$  期间, 以下微分方程成立：

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

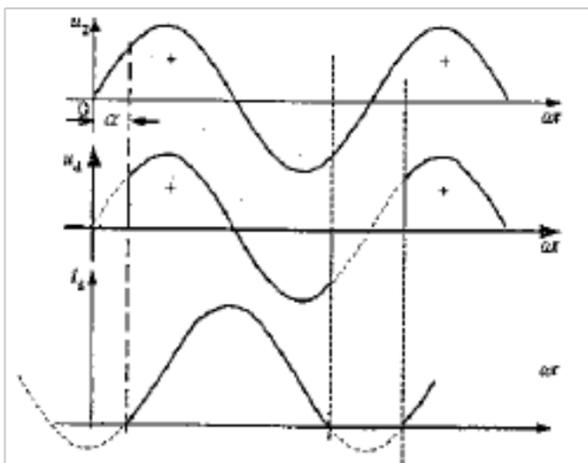
考虑到初始条件：当  $t = 60^\circ$  时  $i_d = 0$  可解方程得：

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

其平均值为

$$I_d = \frac{1}{2} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\pi} \frac{\sqrt{2}U_2}{L} \left( \frac{1}{2} - \cos t \right) dt = \frac{\sqrt{2}U_2}{2L} = 11.25(\text{A})$$

此时  $U_d$  与  $i_d$  的波形如下图：



2. 图 2-9 为具有变压器中心抽头的单相全波可控整流电路,问该变压器还有直流磁化问题吗?试说明:

① 晶闸管承受的最大反向电压为  $2\sqrt{2}U_2$ ;

② 当负载是电阻或电感时,其输出电压和电流的波形与单相全控桥时相同。

答:具有变压器中心抽头的单相全波可控整流电路,该变压器没有直流磁化的问题。

因为单相全波可控整流电路变压器二次侧绕组中,正负半周内上下绕组内电流的方向相反,波形对称,其一个周期内的平均电流为零,故不会有直流磁化的问题。

以下分析晶闸管承受最大反向电压及输出电压和电流波形的情况。

①以晶闸管 VT2 为例。当 VT1 导通时,晶闸管 VT2 通过 VT1 与 2 个变压器二次绕组并联,所以 VT2 承受的最大电压为  $2\sqrt{2}U_2$ 。

②当单相全波整流电路与单相全控桥式整流电路的触发角  $\alpha$  相同时,对于电阻负载:( $0 \sim \pi$ )期间无晶闸管导通,输出电压为 0; ( $\pi \sim 2\pi$ )期间,单相全波电路中 VT1 导通,单相全控桥电路中 VT1、VT4 导通,输出电压均与电源电压  $U_2$  相等; ( $2\pi \sim 3\pi$ )期间均无晶闸管导通,输出电压为 0; ( $3\pi \sim 4\pi$ )期间,单相全波电路中 VT2 导通,单相全控桥电路中 VT2、VT3 导通,输出电压等于  $-U_2$ 。

对于电感负载:( $0 \sim \pi$ )期间,单相全波电路中 VT1 导通,单相全控桥电路中 VT1、VT4 导通,输出电压均与电源电压  $U_2$  相等; ( $\pi \sim 2\pi$ )期间,单相全波电路中 VT2 导通,单相全控桥电路中 VT2、VT3 导通,输出波形等于  $-U_2$ 。

可见,两者的输出电压相同,加到同样的负载上时,则输出电流也相同。

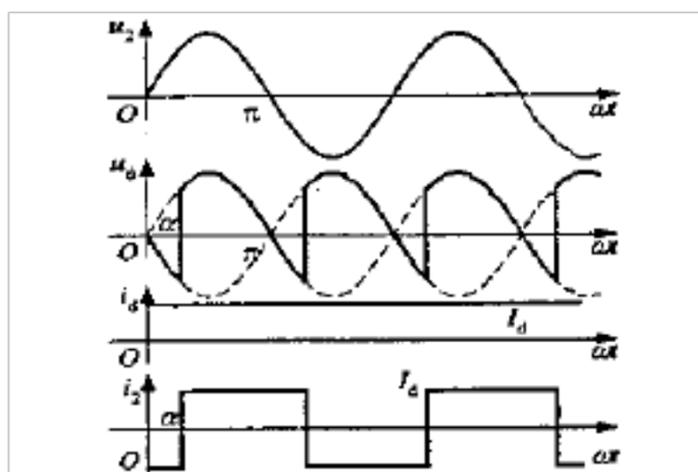
,L 值极大 当  $\alpha = 30^\circ$  时,

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

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

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

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

③晶闸管承受的最大反向电压为：

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

考虑安全裕量，晶闸管的额定电压为：

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

具体数值可按晶闸管产品系列参数选取。

流过晶闸管的电流有效值为：

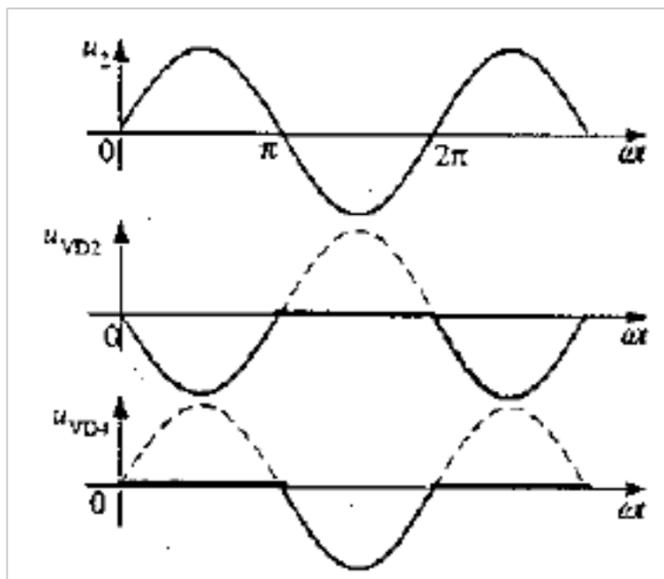
$$I_{VT} = I_d / \sqrt{2} = 27.57 \text{ (A)}$$

晶闸管的额定电流为：

$$I_N = (1.5 \sim 2) \times 27.57 / 1.57 = 26 \sim 35 \text{ (A)}$$

具体数值可按晶闸管产品系列参数选取。

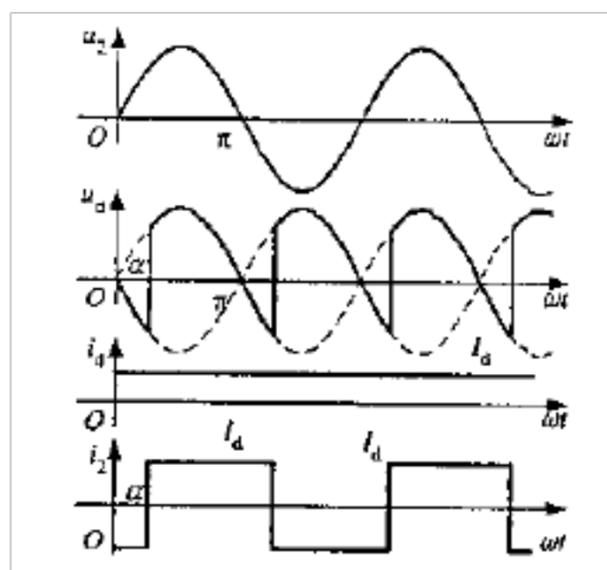
解：注意到二极管的特点：承受电压为正即导通。因此，二极管承受的电压不会出现正的部分。在电路中器件均不导通的阶段，交流电源电压由晶闸管平衡。整流二极管在一周内承受的电压波形如下：



, L 值极大, 反电势  $E=60\text{V}$ , 当时, 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  $I_d$ 、变压器二次测电流有效值  $I$  分别为：

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

$$I_d = (U_d - E) / R = (77.97 - 60) / 2 = 9 \text{ (A)}$$

$$I_2 = I_d = 9 \text{ (A)}$$

③晶闸管承受的最大反向电压为：

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

流过每个晶闸管的电流的有效值为：

$$I_{VT} = I_d / \sqrt{2} = 6.36 \text{ (A)}$$

故晶闸管的额定电压为：

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

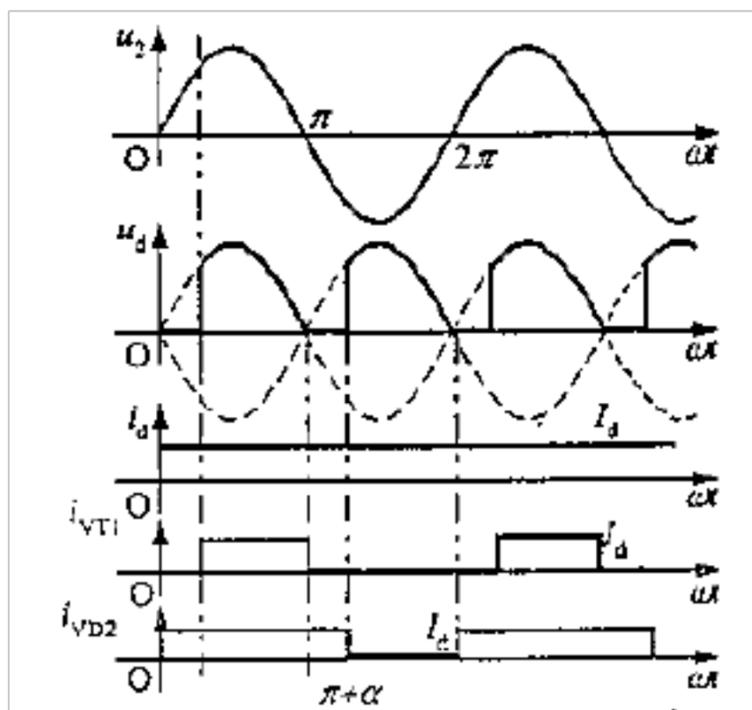
晶闸管的额定电流为：

$$I_N = (1.5 \sim 2) \times 6.36 / 1.57 = 6 \sim 8 \text{ (A)}$$

晶闸管额定电压和电流的具体取值可按晶闸管产品系列参数选取。

$U_2 = 100\text{V}$  电阻电感负载， $R=20$ ， $L$ 值很大，当  $\alpha = 60^\circ$  时求流过器件电流的有效值，并作出  $U_d$ 、 $I_d$ 、 $I_{VT}$ 、 $I_{VD}$  的波形。

解： $U_d$ 、 $I_d$ 、 $I_{VT}$ 、 $I_{VD}$  的波形如下图：



负载电压的平均值为：

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin t dt = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos(\frac{\pi}{3})}{2} = 67.59 \text{ (V)}$$

负载电流的平均值为：

$$I_d = U_d / R = 67.52 / 2 = 33.75 \text{ (A)}$$

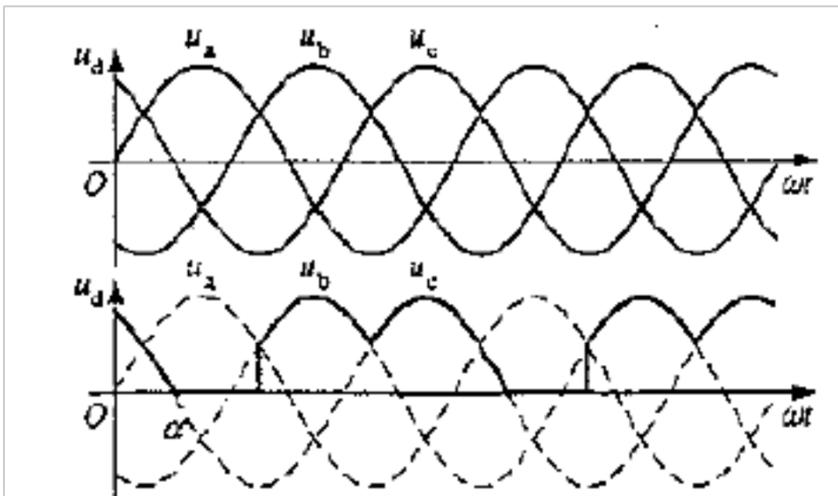
流过晶闸管 VT1、VT2 的电流有效值为：

$$I_{VT} = \sqrt{\frac{1}{3}} I_d = 19.49 \text{ (A)}$$

流过二极管 VD3、VD4 的电流有效值为：

$$I_{VD} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = 27.56 \text{ (A)}$$

解:假设  $\alpha = 0$ , 当负载为电阻时,  $U_d$  的波形如下:



当负载为电感时,  $U_d$  的波形如下:

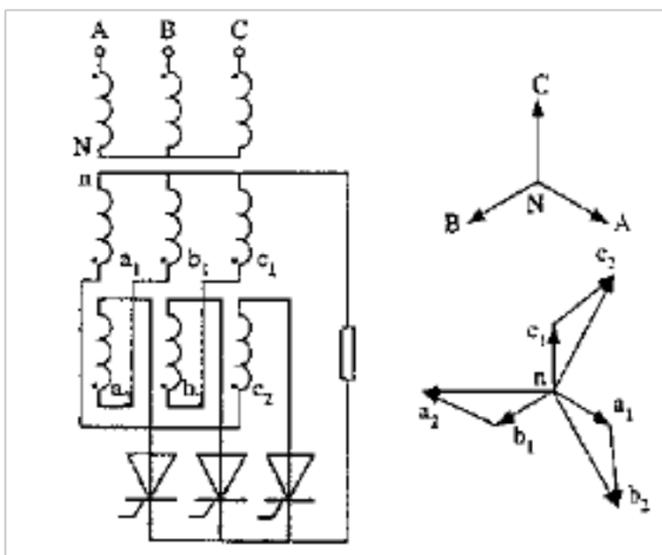
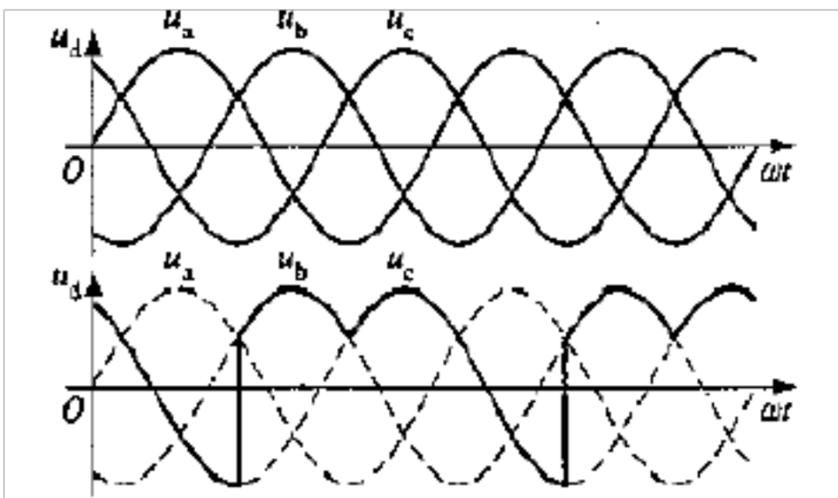


图 变压器二次绕组的曲折接法及其矢量图

答: 变压器铁心不会被直流磁化。原因如下:

变压器二次绕组在一个周期内:当  $a_1c_2$  对应的晶闸管导通时,  $a_1$  的电流向下流,  $c_2$  的电流向上流;当  $c_1b_2$  对应的晶闸管导通时,  $c_1$  的电流向下流,  $b_2$  的电流向上流;当  $b_1a_2$  对应的晶闸管导通时,  $b_1$  的电流向下流,  $a_2$  的电流向上流;就变压器的一次绕组而言,每一周期中有两段时间(各为  $120^\circ$ )由电流流过,流过的电流大小相等而方向相反,故一周期内流过的电流平均值为零,所以变压器铁心不会被直流磁化。

答:三相半波整流电路的共阴极接法与共阳极接法,  $a$   $b$  两相之间换相的自然换相点不是同一点。它们在相位上相差  $180^\circ$

,那么共阴极组的触发脉冲与共阳极组的触发脉冲对同一相来说,例如都是  $a$  相,在相位上差多少度?

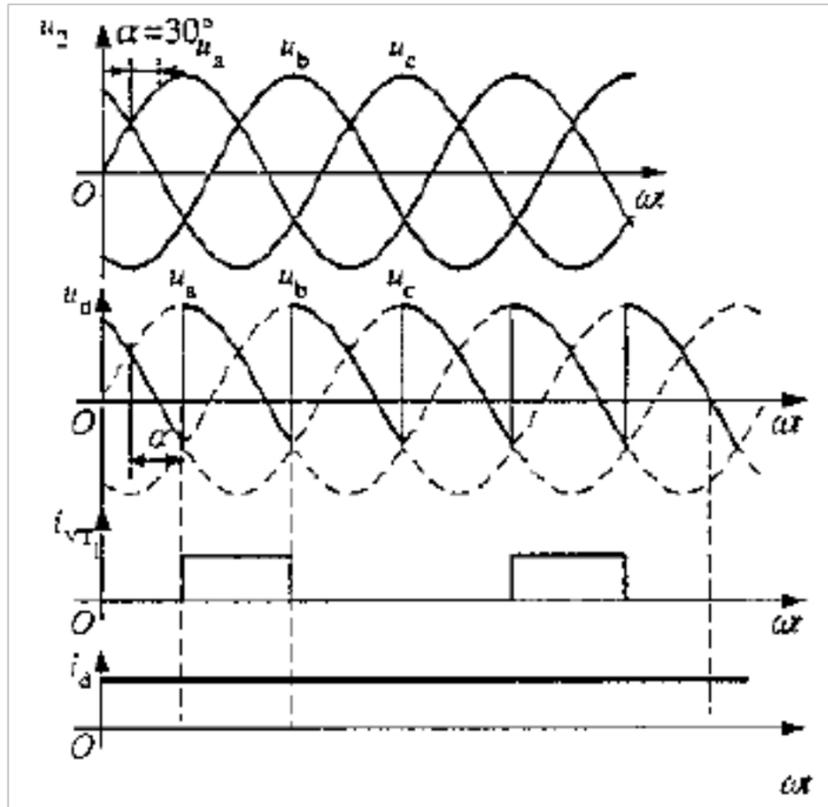
答:相差  $180^\circ$

$U_2=100V$ ,带电阻电感负载,  $R=50\ \Omega$ ,  $L$  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  $I_{VT1}$  的波形如下图:



② $U_d$ 、 $I_d$ 、 $I_{dT}$  和  $I_{VT}$  分别如下

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

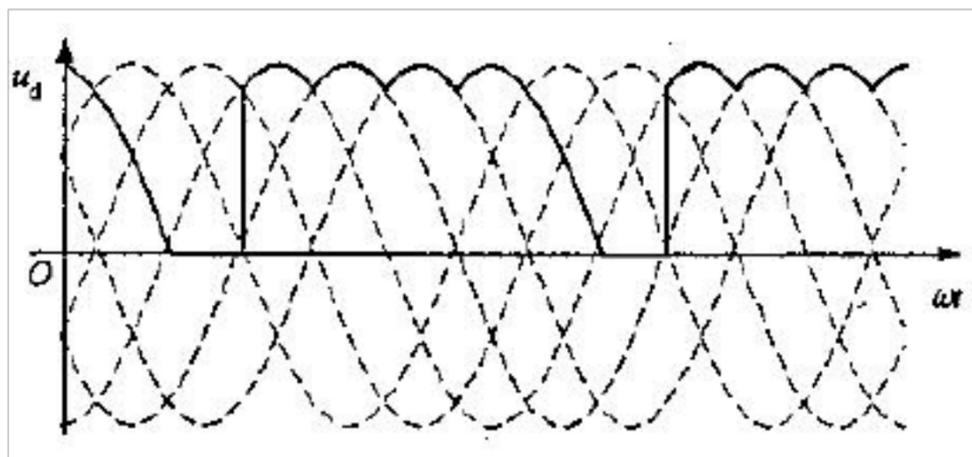
$$I_d = U_d / R = 58.5 / 5 = 11.7 \text{ (A)}$$

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

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

12.在石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  $VT1$  不能导通,整流电压波形如下:



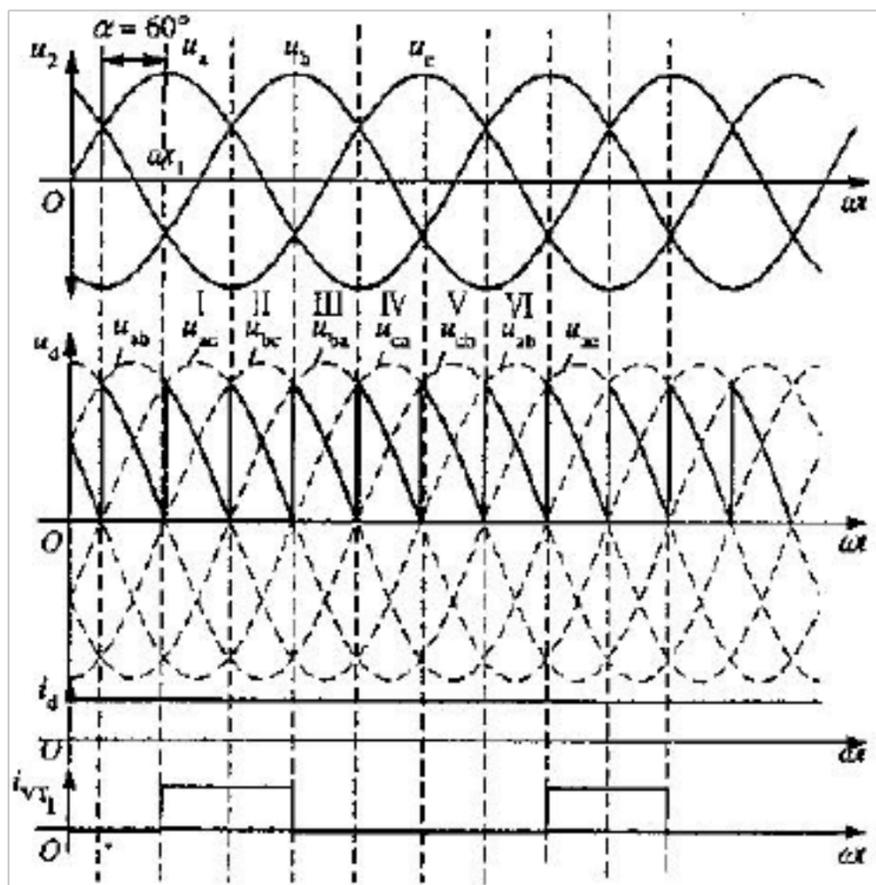
假设  $VT1$  被击穿而短路,则当晶闸管  $VT3$  或  $VT5$  导通时,将发生电源相间短路,使得  $VT3$ 、 $VT5$  也可能分别被击穿。

,  $L$  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

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

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

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

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

,  $L = 1 \text{ mH}$ ,  $E = 40 \text{ V}$ ,  $U_2 = 100 \text{ V}$ ,  $L_B = 0.5 \text{ mH}$ , 当  $\alpha = 60^\circ$  时, 求  $U_d$ 、 $I_d$  与  $I_{VT1}$  的数值, 并画出整流电压  $U_d$  的波形。

解: 考虑  $L_B$  时, 有:

$$U_d = 0.9U_2 \cos \alpha - \Delta u_d$$

$$\Delta u_d = 2X_B I_d$$

$$I_d = (U_d - E) / R \quad \text{解方程组得:}$$

,  $L = 1 \text{ mH}$ ,  $E = 50 \text{ V}$ , 求当  $\alpha = 30^\circ$  时,  $E = 50 \text{ V}$  时  $U_d$ 、 $I_d$ 、 $I_{VT1}$  和  $I_{VT2}$  的值并作出  $U_d$  与  $I_{VT1}$  和  $I_{VT2}$  的波形。

解: 考虑  $L_B$  时, 有:

$$U_d = 1.17U_2 \cos \alpha - \Delta u_d$$

$$\Delta u_d = 3X_B I_d / 2$$

$$I_d = (U_d - E) / R$$

解方程组得:

$$U_d = (R + 1.17U_2 \cos \varphi) / (R + 3X_B) = 94.63(V)$$

$$\Delta U_d = 6.7(V)$$

$$I_d = 44.63(A)$$

又因为:

$$\cos \varphi = \cos(\alpha) + 2I_d X_B / \sqrt{6} U_2$$

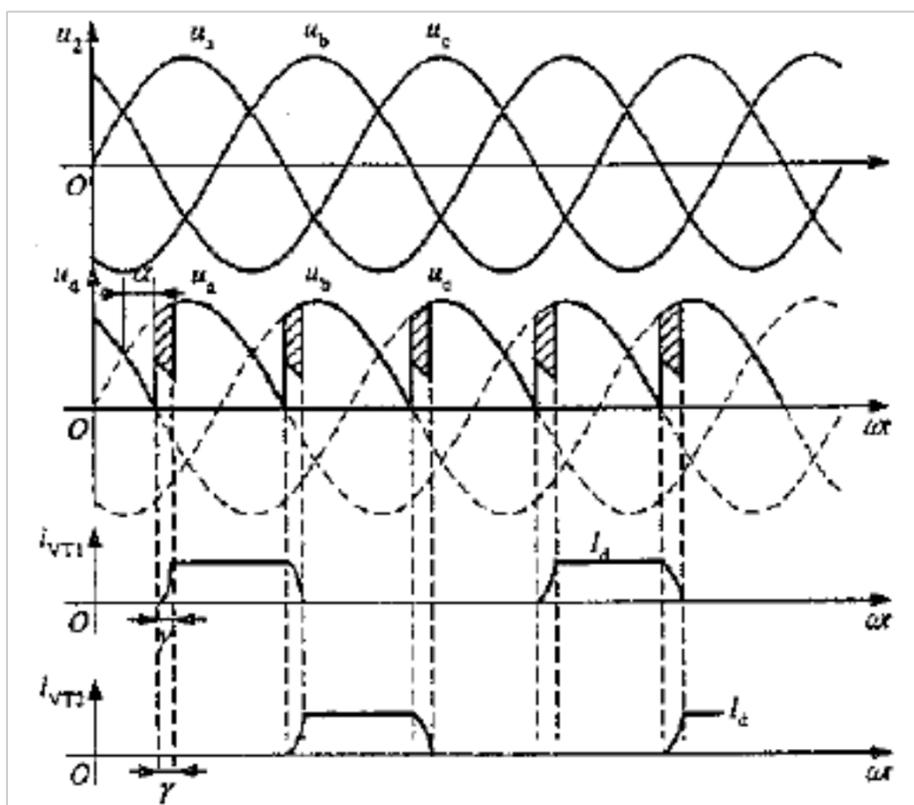
即得出

$$\cos(30^\circ + \varphi) = 0.752$$

换流重叠角

$$\gamma = 41.28^\circ - 30^\circ = 11.28^\circ$$

$U_d$  与  $I_{VT1}$  和  $I_{VT2}$  的波形如下:



答:单相桥式全控整流电路,其整流输出电压中含有  $2K$  ( $K=1, 2, 3, \dots$ )次谐波,其中幅值最大的是 2 次谐波。变压器二次侧电流中含有  $2K+1$  ( $K=1, 2, 3, \dots$ )次即奇次谐波,其中主要的有 3 次、5 次谐波。

答:三相桥式全控整流电路的整流输出电压中含有  $6K$  ( $K=1, 2, 3, \dots$ )次的谐波,其中幅值最大的是 6 次谐波。变压器二次侧电流中含有  $6K+1$  ( $K=1, 2, 3, \dots$ )次的谐波,其中主要的是 5、7 次谐波。

23, 25, 27

解:在第 3 题中已知电路为单相全控桥,其输出电流平均值为

$$I_d = 38.99(A)$$

于是可得:

$$I_{23} = 2\sqrt{2}I_d/3 = 2\sqrt{2} \times 38.99/3 = 11.7(A)$$

$$I_{25} = 2\sqrt{2}I_d/5 = 2\sqrt{2} \times 38.99/5 = 7.02(A)$$

$$I_{37} = 2\sqrt{2}I_d/3 = 2\sqrt{2} \times 38.99/7 = 5.01(A)$$

答:带平衡电抗器的双反星形可控整流电路与三相桥式全控整流电路相比有以下异同点:

①三相桥式电路是两组三相半波电路串联,而双反星形电路是两组三相半波电路并联,且后者需要用平衡电抗器;

②当变压器二次电压有效值  $U_2$  相等时,双反星形电路的整流电压平均值  $U_d$  是三相桥式电路的  $1/2$  而整流电流平均值  $I_d$  是三相桥式电路的 2 倍。

③在两种电路中,晶闸管的导通及触发脉冲的分配关系是一样的,整流电压  $U_d$  和整流电流  $I_d$  的波形形状一样。

答:整流电路多重化的目的主要包括两个方面,一是可以使装置总体的功率容量大,二是能够减少整流装置所产生的谐波和无功功率对电网的干扰。

答:12脉波电路整流电路的交流输入电流中含有 11次、13次、23次、25次等即  $12K-1$  ( $K=1, 2, 3, \dots$ ) 次谐波,整流输出电压中含有 12、24 等即  $12K$  ( $K=1, 2, 3, \dots$ ) 次谐波。

24 脉波整流电路的交流输入电流中含有 23 次、25

2.25 某一电阻负载,要求输出直流电压  $U_d=0 \sim 24V$ ,最大负载电流  $I_d=30A$ 。采用单相半波可控整流电路。用 220V 直接供电或用变压器降压到 60V 供电。计算两种方案下,不考虑完全裕量时,晶闸管的导通角  $\theta$ ,额定电流  $I_N$ ,额定电压  $U_N$ ,电源的功率因数和电源容量。

解:①  $U_2=220V$  时

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

$$\cos \alpha = \frac{2U_d}{0.45U_2} - 1 = \frac{2 \times 24}{0.45 \times 220} - 1 = -0.5$$

$$\alpha = 120^\circ \quad \theta = 180^\circ - 120^\circ = 60^\circ$$

电流平均值  $I_d=30A$   $R_d = \frac{U_d}{I_d} = \frac{24}{30} = 0.8$

电流有效值  $I = \frac{U}{R_d} = \frac{U_2}{R_d} \sqrt{\frac{\sin 2\alpha}{4}} = \frac{220}{0.8} \sqrt{\frac{\sin 120^\circ}{4}} = 83A$

次、47次、49次等,即  $24K-1$  ( $K=1, 2, 3, \dots$ ) 次谐波,整流输出电压中含有 24、48 等即  $24K$  ( $K=1, 2, 3, \dots$ ) 次谐波。

答:条件有二:

①直流侧要有电动势,其极性须和晶闸管的导通方向一致,其值应大于变流电路直流侧的平均电压;

②要求晶闸管的控制角  $\alpha > \frac{\pi}{2}$  使  $U_d$  为负值。

答:逆变运行时,一旦发生换流失败,外接的直流电源就会通过晶闸管电路形成短路,或者使变流器的输出平均电压和直流电动势变为顺向串联,由于逆变电路内阻很小,形成很大的短路电流,称为逆变失败或逆变颠覆。

防止逆变失败的方法有:采用精确可靠的触发电路,使用性能良好的晶闸管,保证交流电源的质量,留出充足的换向裕量角  $\beta$  等。

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  $0 \sim 90^\circ$ 。

$$\text{额定电流 } I_N = \frac{I}{1.57} = \frac{83.4}{1.57} = 53\text{A}$$

$$\text{额定电压 } U_N = U_{dm} = \sqrt{2}U_2 = \sqrt{2} \cdot 220 = 311\text{V}$$

$$\text{功率因数 } \cos \varphi = \frac{1}{2} \sin 2\alpha = \frac{1}{2} = 0.5$$

$$\text{电源视在功率 } S_1 = U_2 I = 220 \cdot 83.4 = 18.36\text{KVA}$$

②  $U_2 = 60\text{V}$  时

$$\varphi_2 = 141^\circ \quad I_N = 33.8\text{A} \quad U_N \geq 84.2$$

$$\cos \varphi_2 = 0.71 \quad S_2 = 3.18\text{KVA}$$

2.26 阻感负载，电感极大，电阻  $R_d = 5\Omega$ ，电路为此有连续二极管的单相半控桥电路，输入电压  $U_2 = 220\text{V}$ ，当控制角  $\alpha = 260^\circ$  时，求流过晶闸管平均电流值  $I_{dT}$  有效值  $I_T$ ，流过续流二极管电流平均值  $I_{Dd}$  有效值  $I_D$

解：整流的平均电压

$$U_d = 0.9U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} = 0.9 \cdot 220 \frac{1 + \cos 60^\circ}{2} = 149\text{V}$$

$$\text{负载平均电流: } I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{149}{5} = 30\text{A}$$

$$\text{流过晶闸管电流平均值 } I_{dT} = \frac{180 - \alpha}{360} I_d = \frac{180 - 60}{360} \cdot 30 = 10\text{A}$$

$$\text{电流有效值 } I_T = \sqrt{\frac{2}{2}} I_d = 17.3\text{A}$$

$$\text{电流续流二极管电流平均值 } I_{Dd} = \frac{\alpha}{180} I_d = \frac{60}{180} \cdot 30 = 10\text{A}$$

$$\text{有效值 } I_D = \frac{2}{\sqrt{180}} I_d = 17.3\text{A}$$

2.28 单相全控桥式电路，电阻性负载，控制角  $\alpha = 60^\circ$

画出电气原理图，整流电压  $U_d$  波形图，任意晶闸管在一个周期内两端电压波形图，变压器付边电流  $i_2$  波形图，变压器付边电流  $I_2$  波形图

解：见 P47 图 2-5

2.29 三相半波可控整流电路，电压极大，电阻  $R_d = 2\Omega$ ， $U_2 = 220\text{V}$ ，当  $\alpha = 60^\circ$ ，求出按续流二极管和不按续流二极管两种电路结构下的整流电压，整流电流并选择晶闸管。

解：① 按续流二极管的时

$$U_d = 0.675 U_2 \left(1 + \cos \frac{\alpha}{3}\right)$$

$$= 0.675 \cdot 200 \left(1 + \cos \left(\frac{60^\circ}{3}\right)\right) = 135\text{V}$$

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{135}{2} = 67.5\text{A}$$

$$I_T = \sqrt{\frac{150}{360}} I_d = \sqrt{\frac{150 \cdot 60}{360}} = 67.5 \quad 33.75A$$

$$\text{晶闸管: } I_N > (1.5 \sim 2) \frac{I_T}{1.57} = 31 \sim 42A$$

$$U_N > (2 \sim 3) \sqrt{6} U_2 = 700 \sim 1000V$$

②不接续流二极管

$$U_d = 1.17 U_2 \cos 60^\circ = 117V$$

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} = \frac{117}{2} = 58.5A$$

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{3}} I_d = \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot 58.5 = 33.75A$$

$$\text{晶闸管: } I_N > (1.5 \sim 2) \frac{I_T}{1.57} = 31 \sim 42A$$

$$U_N > (2 \sim 3) \sqrt{6} U_2 = 750 \sim 1000V$$

2.30 单相半波可控整流电路中, 脉冲间隔 = ( ), 晶闸管最大导通角  $\alpha_{max}$  ( ), 晶闸管承受的  $U_{dm}$  ( ), 晶闸管可以承受的最大电压  $U_{dm} = ( )$ , 整流电压的脉动次数  $m = ( )$ ; 三相桥式可控整流电路中的  $\alpha_{max} = ( )$ ,  $U_{dm} = ( )$ ,  $m = ( )$ 。

答案: 单相:  $2\pi$ ,  $\pi$ ,  $\sqrt{2} U_2$ , 1

三相:  $\frac{2\pi}{3}$ ,  $\frac{2\pi}{3}$ ,  $\sqrt{6} U_2$ , 6

2.31 单相桥式电路中脉冲间隔 = ( ), 晶闸管最大导通  $\alpha_{max}$  ( ), 晶闸管承受的最大电压  $U_{dm} = ( )$ , 整流电压脉冲次数  $m = ( )$ ; 三相半波电路中  $\alpha_{max} = ( )$  整流电压脉动次数  $m = ( )$ ; 三相半波电路中  $\alpha_{max} = ( )$ ,  $U_{dm} = ( )$ ,  $m = ( )$ ;

答案: 单相桥式:  $2\pi$ ,  $\pi$ ,  $\sqrt{2} U_2$ , 2

三相半波:  $\frac{2\pi}{3}$ ,  $\frac{2\pi}{3}$ ,  $\sqrt{6} U_2$ , 3

2.32 电阻性负载: 单相桥式电路, 脉冲移相范围 = ( ), 电流开始断续时  $\alpha_k = ( )$ ; 三相半波电路脉冲移相范围 = ( ), 电流开始断续时  $\alpha_k = ( )$ ; 三相桥式电路脉冲移相范围 = ( ), 电流开始断续时  $\alpha_k = ( )$

答案: 单相桥式  $0 \sim \pi$ ,  $0$ ; 三相半波  $0 \sim 150^\circ$ ,  $30^\circ$ ; 三相桥式  $0 \sim 120^\circ$ ,  $60^\circ$

2.33 三相半波可控整流电路对直流电动机供电, 当  $\alpha = 60^\circ$ , 理想空载转速  $n_0 = 1000 \text{rpm}$ , 在  $\alpha = 30^\circ$  时, 理想空载转速  $n_{01} = ( )$ ;  $\alpha = 90^\circ$  时, 理想空载转速  $n_{02} = ( )$ ,  $\alpha = 120^\circ$ ,  $n_{03} = ( )$

答案:  $1000 \text{rpm}$ ,  $866 \text{rpm}$ ,  $500 \text{rpm}$

答案: p89 图 2-5b, c

$\alpha = 30^\circ$  时, 请画出电气原理图, 整流电压波形图, 脉冲序列, 晶闸管  $T_1$  在一个周期内承受电压波形图。

答案: P52 图 2-12a, 图 2-13

2.36 电路形式为三相桥式可控整流电路,负载极大,当  $\alpha = 90^\circ$  请画出电气原理图,整流电压  $U_d$  波形图,脉冲序列,晶闸管  $T_1$  在一个周期内承受电压  $U_{T1}$  波形图。

答案: P59 图 2-24

## 第 4 章 交流电力控制电路和交交变频电路

4.1 台灯由单相交流调压电路供电,设该台灯可看作电阻负载,在  $\alpha = 0$  时输出

功率为最大值,试求功率为最大输出功率的 80%, 50% 时的开通角  $\alpha$ 。

解:  $\alpha = 0$  时的输出电压最大,为

$$U_{o\max} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi (\sqrt{2}U_1 \sin t)^2 dt} = U_1$$

此时负载电流最大,为

$$I_{o\max} = \frac{U_{o\max}}{R} = \frac{U_1}{R}$$

因此最大输出功率为

输出功率为最大输出功率的 80% 时,有:

$$P_{\max} = U_{o\max} I_{o\max} = \frac{U_1^2}{R}$$

此时,

$$U_o = \sqrt{0.8} U_1$$

又由

$$U_o = U_1 \sqrt{\frac{\sin^2 \alpha}{2}}$$

晶闸管相控整流电路,高电压小电流可控直流电源就需要很多晶闸管串联;同样,低电压大电流直流电源需要很多晶闸管并联。这都是十分不合理的。采用交流调压电路在变压器一次侧调压,其电压电流值都不太大也不太小,在变压器二次侧只要用二极管整流就可以了。这样的电

答:TCR 是晶闸管控制电抗器。TSC 是晶闸管投切电容器。

二者的基本原理如下:

TCR 是利用电抗器来吸收电网中的无功功率(或提供感性的无功功率)通过对晶闸管开通角  $\alpha$  的控制,可以连续调节流过电抗器的电流,从而调节 TCR 从电网中吸收的无功功率的大小。

TSC 则是利用晶闸管来控制用于补偿无功功率的电容器投入和切除来向电网提供无功功率(提供容性的无功功率)。

二者的特点是:

TCR 只能提供感性的无功功率,但无功功率的大小是连续的。实际应用中往往配以固定电容器(FC)就可以

解得

$$\alpha = 60.54^\circ$$

同理,输出功率为最大输出功率的 50% 时,有:

$$U_o = \sqrt{0.5} U_1$$

又由

$$U_o = U_1 \sqrt{\frac{\sin^2 \alpha}{2}}$$

$$\alpha = 90^\circ$$

4.2 压电路和交流调功电路有什么区别?二者各运用于什么样的负载?为什么?

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。

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。而交流调功电路是将负载与交流电源接通几个波,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。

交流调压电路广泛用于灯光控制(如调光台灯和舞台灯光控制)及异步电动机的软启动,也用于异步电动机调速。在供用电系统中,还常用于对无功功率的连续调节。此外,在高电压小电流或低电压大电流直流电源中,也常采用交流调压电路调节变压器一次电压。如采用晶路体积小、成本低、易于设计制造。

交流调功电路常用于电炉温度这样时间常数很大的控制对象。由于控制对象的时间常数大,没有必要对交流电源的每个周期进行频繁控制。

在从容性到感性的范围内连续调节无功功率。

TSC 提供容性的无功功率,符合大多数无功功率补偿的需要。其提供的无功功率不能连续调节但在实用中只要分组合理,就可以达到比较理想的动态补偿效果。

4.4 单相交交变频电路和直派电动机传动的反并联可控整流电路有什么不同?

答:单相交交变频电路和直流电动机传动的反并联可控整流电路的电路组成是相同的,均由两组反并联的可控整流电路组成。但两者的功能和工作方式不同。

单相交交变频电路是将交流电变成不同频率的交流电,通常用于交流电动机传动,两组可控整流电路在输出交流电压一个周期里,交替工作各半个周期,从而输出交流电。

而直流电动机传动的反并联可控整流电路是

将交流电变为直流电,两组可控整流路中哪一组工作并没有像交交变频电路那样的固定交替关系,而是由电动机工作状态的需要决定。

答:一般来讲,构成交交变频电路的两组变流电路的脉波数越多,最高输出频率就越高。当交交变频电路中采用常用的6脉波三相桥式整流电路时,最高输出频率不应高于电网频率的 $1/3 \sim 1/2$ 。当电网频率为50Hz时,交交变频电路输出的上限频率为20Hz左右。

当输出频率增高时,输出电压一周期所包含的电网电压段数减少,波形畸变严重,电压波形畸变和由此引起的电流波形畸变以及电动机的转矩脉动是限制输出频率提高的主要因素。

4.6 交交变频电路的主要特点和不足是什么?其主要用途是什么?

答:交交变频电路的主要特点是:

只用一次变流效率较高;可方便实现四象限工作;低频输出时的特性接近正弦波。

交交变频电路的主要不足是:

接线复杂 如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;受电网频率和变流电路脉波数的限制,输出频率较低;输出功率因数较低;输入电流谐波含量大,频谱复杂。

主要用途:500千瓦或1000千瓦以下的大功率、低转速的交流调速电路,如轧机主传动装置、鼓风机、球磨机场合。

因数;能量可双向流动,适用于交流电动机的四象限运行;不通过中间直流环节而直接实现变频,效率较高。

矩阵式交交变频电路的主要缺点是:所用的开关器件为18个,电路结构较复杂,成本较高,控制方法还不算成熟;输出输入最大电压比只有0.866,用于交流电机调速时输出电压偏低。

因为矩阵式变频电路有十分良好的电气性能,使输

4.10 三相三线制交流调压电路,电阻负载,开通角  $\alpha = ( \quad )$ ; 其中当电路处于三个晶闸管导通和两个晶闸管导通交替状态的时,  $\theta_1 = ( \quad )$ , 每个晶闸管导通时间  $\theta_1 = ( \quad )$ ; 当电路处于任一时刻都是两个晶闸管导通时  $\theta_2 = ( \quad )$ , 晶闸管的导通时间  $\theta_2 = ( \quad )$ ; 当电路处于两个晶闸管导通的和无晶闸管导通的交替状态时  $\theta_3 = ( \quad )$ , 晶闸管的导通时间  $\theta_3 = ( \quad )$

答案:  $0 \sim 150$ ;  $0 \sim 60, 180 \sim$ ;  $60 \sim 90, 120$ ;  $90 \sim 150, 300 \sim 2$

4.20 单相交流调压电阻负载,移相角  $\alpha_1 = ( \quad )$ ,电阻感负载,移相范围  $\alpha_2 = ( \quad )$

答案:  $0 \sim$ ,  $\sim$

4.21 降压斩波电路,如图:P101图3-1

VT的开关周期是  $T = \frac{1}{300}$  s,导通时间  $\frac{T}{3}$ ,  $E = 100$  V,  $L = 50$  mH,  $R = 1$

求:负载  $U_o$ ,  $I_o$ , 流过UT和VD的电流  $I_{dT}$ ,  $I_{dD}$ ;输入功率和负载功率  $P_i$ ,  $P_R$

解:  $X = L \cdot 2 \cdot fL \cdot 2 \cdot 300 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 65.9 \quad X \cdot R$

$$U_d = \frac{T_2 T_{on}}{T} = \frac{100}{3} = 33.3V, \quad I_d = \frac{U_d}{R} = \frac{33.3}{1} = 33.3A$$

答:三相交交变频电路有公共交流母线进线方式和输出星形联结方式两种接线方式。

两种方式的主要区别在于:

公共交流母线进线方式中,因为电源进线端公用,所以三组单相交交变频电路输出端必须隔离。为此,交流电动机三个绕组必须拆开,共引出六根线。

而在输出星形联结方式中,因为电动机中性点和变频器中性点在一起;电动机只引三根线即可,但是因其三组单相交变频器的输出联在一起,其电源进线必须隔离,因此三组单相交变频器要分别用三个变压器供电。

答:在三相交交变频电路中采用梯形波控制的好处是可以改善输入功率因数。

因为梯形波的主要谐波成分是三次谐波,在线电压中,三次谐波相互抵消,结果线电压仍为正弦波。在这种控制方式中,因为桥式电路能够较长时间工作在高输出电压区域(对应梯形波的平顶区),  $\alpha$ 角较小,因此输入功率因数可提高15%左右。

4.9. 试述矩阵式变频电路的基本原理和优缺点。为什么说这种电路有较好的发展前景?

答:矩阵式变频电路的基本原理是:

对输入的单相或三相交流电压进行斩波控制,使输出成为正弦交流输出。

矩阵式变频电路的主要优点是:输出电压为正弦波;输出频率不受电网频率的限制;输入电流也可控制为正弦波且和电压同相;功率因数为1,也可控制为需要的功率;输出电压和输入电流均为正弦波,输入功率因数为1,且能量双向流动,可实现四象限运行;其次,和目前广泛应用的交直交变频电路相比,虽然多用了6个开关器件,却省去直流侧大电容,使体积减少,且容易实现集成化和功率模块化。随着当前器件制造技术的飞速进步和计算机技术的日新月异,矩阵式变频电路将有很好的发展前景。

$$I_{dT} = \frac{1}{T} \int_0^T i_T dt = \frac{I_d}{3} = 11.1A$$

$$I_{dD} = \frac{1}{T} \int_0^T I_D dt = \frac{2}{3} I_d = 22.2A$$

$$P_i = \frac{1}{T} \int_0^T E i_T dt = \frac{E}{T} \int_0^T i_T dt = E I_{dT} = 100 \times 11.1 = 1.11KW$$

$$P_R = U_d I_a = 33.3 \times 33.3 = 1.11KW$$

4.22 单相交流调压，阻感负载， $U_F = 220V$ ， $L = 5.5mH$ ， $R = 1$

求：移相角  $\alpha = ?$  最大负载电流有效值  $I = ?$  最大输出功率  $P_{max} = ?$  功率因数  $\cos \phi = ?$

解：(1)  $\arctan \frac{UL}{R} = \arctan \frac{220 \times 5.5 \times 10^{-3}}{1} = 60^\circ$

所以  $\alpha = 60^\circ$  时， $\phi = 180^\circ$

(2) 时，电流连续，电流最大

$$I = \frac{U_1}{Z} = \frac{220}{\sqrt{1^2 + (5.5 \times 10^{-3})^2}} = 110A$$

(3)  $P = U_1 I_1 \cos \phi = U_1 I_2 \cos \phi = 220 \times 110 \times \cos 60^\circ = 12.1KW$

1,  $U_0$ ,  $I_0$ ,  $U_{VT}$  的波形

解：见 P113 图 4-2

4.25 电路，负载电流  $i_0$  和负载电压  $U_0$  如下图所示，请填出 P 组，N 组在不同时间内的工作状态

在 0 到  $t_1$  期间，P 组工作在 ( ) 状态，N 组工作在 ( ) 状态；

在  $t_1$  到  $t_2$  期间，P 组工作在 ( ) 状态，N 组工作在 ( ) 状态；

在  $t_2$  到  $t_3$  期间，P 组工作在 ( ) 状态，N 组工作在 ( ) 状态；

在  $t_3$  到  $t_4$  期间，P 组工作在 ( ) 状态，N 组工作在 ( ) 状态；

答案：整流，阻断；逆变，阻断；阻断，整流；阻断，逆变

# 目 录

第 1 章	电力电子器 件 .....	1
第 2 章	整流电 路 .....	4
第 3 章	直流斩波电 路 .....	20
第 4 章	交流电力控制电路和交交变频电路 .....	26
第 5 章	逆变电 路 .....	31
第 6 章	PWM 控制技 术 .....	35
第 7 章	软开关技 术 .....	40
第 8 章	组合变流电 路 .....	42

1. 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  $u_{GK} > 0$ 。

2. 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。

3. 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  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 。

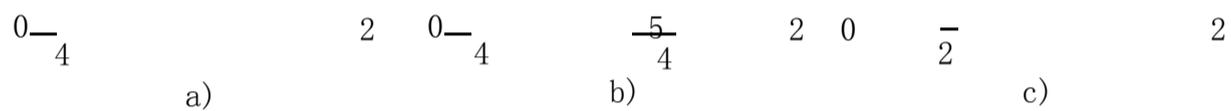


图 1-43 晶闸管导电波形

解：a) 
$$I_{d1} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{4}} I_m \sin t \, dt = \frac{I_m}{2} \left[ -\cos t \right]_0^{\frac{\pi}{4}} = \frac{I_m}{2} \left( 1 - \frac{\sqrt{2}}{2} \right) = 0.4767 I_m$$

b) 
$$I_{d2} = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{3\pi}{4}} I_m \sin t \, dt = \frac{I_m}{\pi} \left[ -\cos t \right]_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{3\pi}{4}} = \frac{I_m}{\pi} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} \right) = 0.674 I_m$$

c) 
$$I_{d3} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} I_m \sin t \, dt = \frac{I_m}{2\pi} \left[ -\cos t \right]_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} = \frac{I_m}{2\pi} (1 - (-1)) = \frac{1}{\pi} I_m$$

4. 上题中如果不考虑安全裕量,问 100A 的晶闸管能送出的平均电流  $I_{d1}$ 、 $I_{d2}$ 、 $I_{d3}$  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：额定电流  $I_{T(AV)} = 100A$  的晶闸管，允许的电流有效值  $I = 157A$ ，由上题计算结果知

$$\begin{aligned}
 \text{a)} \quad & I_{m1} = \frac{I}{0.4767} = 329.35, & I_{d1} &= 0.2717 I_{m1} = 89.48 \\
 \text{b)} \quad & I_{m2} = \frac{I}{0.6741} = 232.90, & I_{d2} &= 0.5434 I_{m2} = 126.56 \\
 \text{c)} \quad & I_{m3} = 2 I = 314, & I_{d3} &= \frac{1}{4} I_{m3} = 78.5
 \end{aligned}$$

5. 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  $\beta_1$  和  $\beta_2$ ，由普通晶闸管的分析可得， $\beta_1 + \beta_2 = 1$  是器件临界导通的条件。 $\beta_1 + \beta_2 > 1$ ，两个等效晶体管过饱和而导通； $\beta_1 + \beta_2 < 1$ ，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  $\beta_2$  较大，这样晶体管  $V_2$  控制灵敏，易于 GTO 关断；
- 2) GTO 导通时的  $\beta_1 + \beta_2$  更接近于 1，普通晶闸管  $\beta_1 + \beta_2 = 1.15$  而 GTO 则为  $\beta_1 + \beta_2 = 1.05$  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。

6. 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。

7. 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。

8. 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  $VD_s$  从  $C_s$  分流，使  $du/dt$  减小，抑制过电压。

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

解：对 IGBT、GTR、GTO 和电力 MOSFET 的优缺点的比较如下表：

器 件	优 点	缺 点
IGBT	开关速度高，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 2 章 整流电路

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

解:  $\alpha=0$  时, 在电源电压  $u_2$  的正半周期晶闸管导通时, 负载电感  $L$  储能, 在晶闸管开始导通时刻, 负载电流为零。在电源电压  $u_2$  的负半周期, 负载电感  $L$  释放能量, 晶闸管继续导通。因此, 在电源电压  $u_2$  的一个周期里, 以下方程均成立:

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

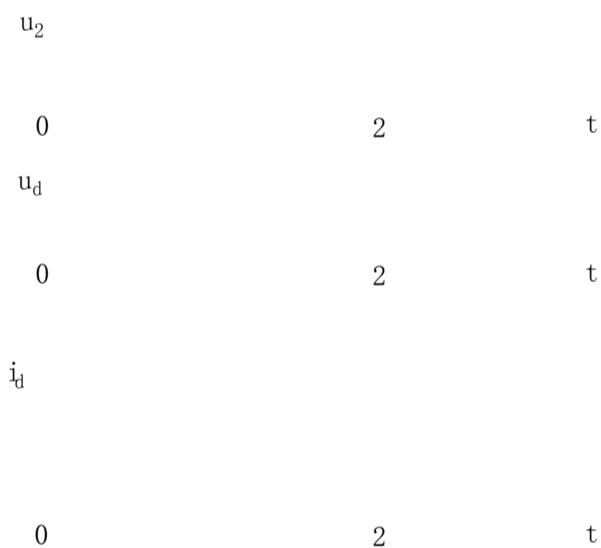
考虑到初始条件: 当  $t=0$  时  $i_d=0$  可解方程得:

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

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

$$= \frac{2U_2}{L} = 22.51 \text{ (A)}$$

$u_d$  与  $i_d$  的波形如下图:



当  $\alpha=60^\circ$  时, 在  $u_2$  正半周期  $60^\circ \sim 180^\circ$  期间晶闸管导通使电感  $L$  储能, 电感  $L$  储藏的能量在  $u_2$  负半周期  $180^\circ \sim 300^\circ$  期间释放, 因此在  $u_2$  一个周期中  $60^\circ \sim 300^\circ$  期间以下微分方程成立:

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

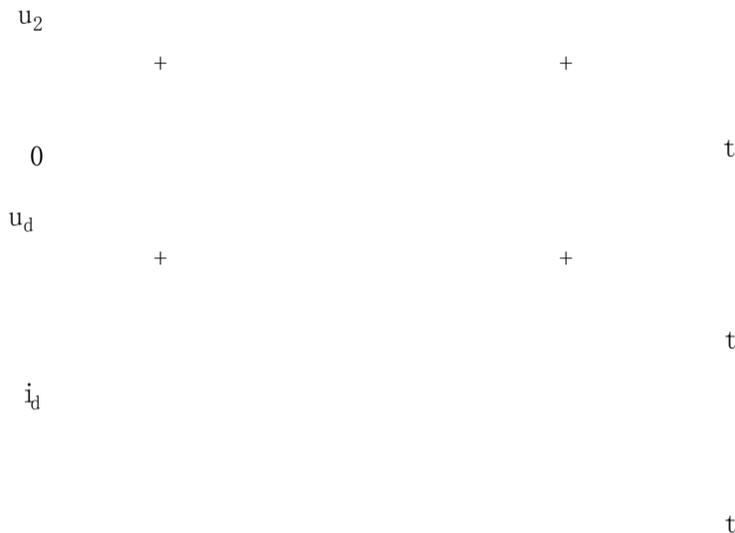
考虑初始条件: 当  $t=60^\circ$  时  $i_d=0$  可解方程得:

$$i_d = \frac{2U_2}{L} \frac{1}{2}$$

其平均值为

$$I_d = \frac{1}{2} \frac{2U_2}{L} = 11.25 \text{ (A)}$$

此时  $u_d$  与  $i_d$  的波形如下图：



2. 图 2-9 为具有变压器中心抽头的单相全波可控整流电路，问该变压器还有直流磁化问题吗？试说明：①晶闸管承受的最大反向电压为  $2U_2$ ；②当负载是电阻或电感时，其输出电压和电流的波形与单相全控桥时相同。

答：具有变压器中心抽头的单相全波可控整流电路，该变压器没有直流磁化的问题。

因为单相全波可控整流电路变压器二次绕组中，正负半周内上下绕组内电流的方向相反，波形对称，其一个周期内的平均电流为零，故不会有直流磁化的问题。

以下分析晶闸管承受最大反向电压及输出电压和电流波形的情况。

① 以晶闸管  $VT_2$  为例。当  $VT_1$  导通时，晶闸管  $VT_2$  通过  $VT_1$  与 2 个变压器二次绕组并联，所以  $VT_2$  承受的最大电压为  $2U_2$ 。

② 当单相全波整流电路与单相全控桥式整流电路的触发角  $\alpha$  相同时，对于电阻负载：  
 ( $0 \sim \alpha$ ) 期间无晶闸管导通，输出电压为 0；  
 ( $\alpha \sim \pi$ ) 期间，单相全波电路中  $VT_1$  导通，单相全控桥电路中  $VT_1$ 、 $VT_4$  导通，输出电压均与电源电压  $u_2$  相等；  
 ( $\pi \sim \pi + \alpha$ ) 期间，均无晶闸管导通，输出电压为 0；  
 ( $\pi + \alpha \sim 2\pi$ ) 期间，单相全波电路中  $VT_2$  导通，单相全控桥电路中  $VT_2$ 、 $VT_3$  导通，输出电压等于  $u_2$ 。

对于电感负载：  
 ( $\alpha \sim \pi + \alpha$ ) 期间，单相全波电路中  $VT_1$  导通，单相全控桥电路中  $VT_1$ 、 $VT_4$  导通，输出电压均与电源电压  $u_2$  相等；  
 ( $\pi + \alpha \sim 2\pi + \alpha$ ) 期间，单相全波电路中  $VT_2$  导通，单相全控桥电路中  $VT_2$ 、 $VT_3$  导通，输出波形等于  $u_2$ 。

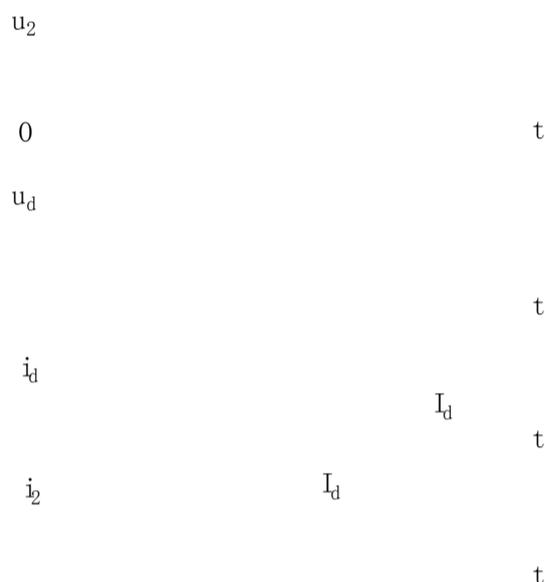
可见，两者的输出电压相同，加到同样的负载上时，则输出电流也相同。

3. 单相桥式全控整流电路,  $U_2=100V$ , 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

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

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

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

③晶闸管承受的最大反向电压为:

$$2 U_2 = 100 \times 2 = 141.4 \text{ (V)}$$

考虑安全裕量, 晶闸管的额定电压为:

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

具体数值可按晶闸管产品系列参数选取。

流过晶闸管的电流有效值为:

$$I_{VT} = I_d / \sqrt{2} = 27.57 \text{ (A)}$$

晶闸管的额定电流为:

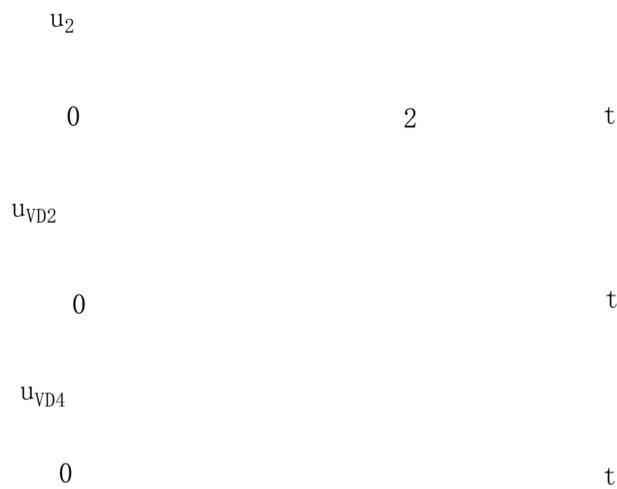
$$I_N = (1.5 \sim 2) \times 27.57 = 26 \sim 35 \text{ (A)}$$

具体数值可按晶闸管产品系列参数选取。

4. 单相桥式半控整流电路, 电阻性负载, 画出整流二极管在一周内承受的电压波形。

解: 注意到二极管的特点: 承受电压为正即导通。因此, 二极管承受的电压不会出现正的部分。在电路中器件均不导通的阶段, 交流电源电压由晶闸管平衡。

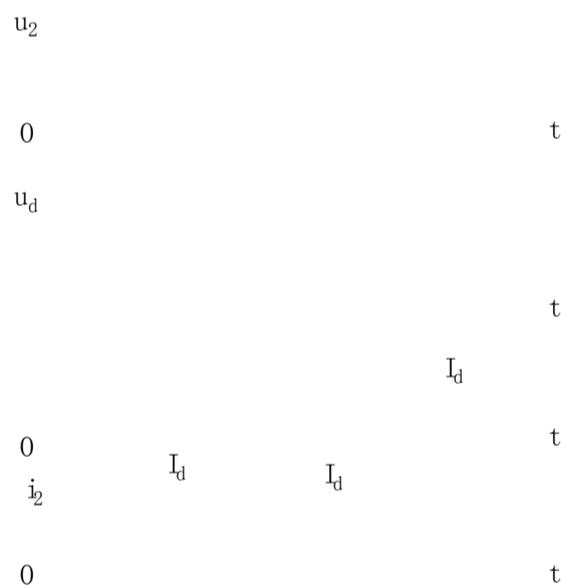
整流二极管在一周内承受的电压波形如下:



5. 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  $u_d$ 、 $i_d$  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

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

$$I_d = \frac{U_d - E}{R} = \frac{77.97 - 60}{2} = 9 \text{ (A)}$$

$$I_2 = I_d = 9 \text{ (A)}$$

③ 晶闸管承受的最大反向电压为：

$$2 U_2 = 2 \times 100 = 200 \text{ (V)}$$

流过每个晶闸管的电流的有效值为：

$$I_{VT} = I_d / \sqrt{2} = 6.36 \text{ (A)}$$

故晶闸管的额定电压为：

$$U_N = (2 \sim 3) \times 6.36 = 12.7 \sim 19.1 \text{ (V)}$$

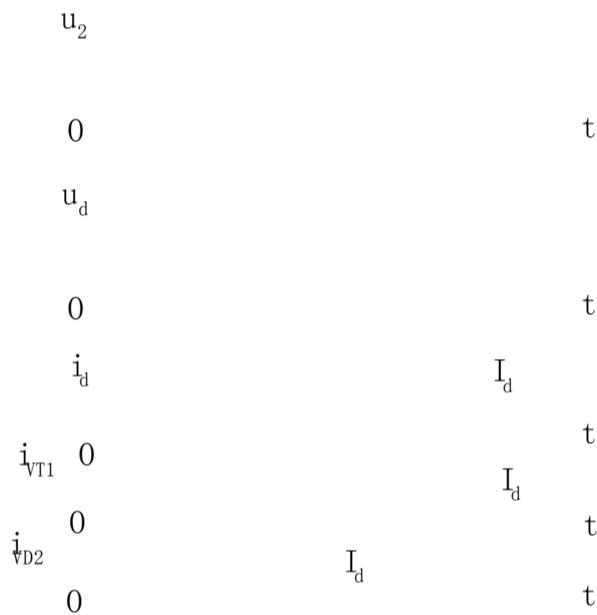
晶闸管的额定电流为：

$$I_N = (1.5 \sim 2) \times 36\% = 6 \sim 8 \text{ (A)}$$

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。

6. 晶闸管串联的单相半控桥（桥中  $VT_1$ 、 $VT_2$  为晶闸管），电路如图 2-11 所示， $U_2=100V$ ，电阻电感负载， $R=2 \Omega$ ， $L$  值很大，当  $\alpha=60^\circ$  时求流过器件电流的有效值，并作出  $u_d$ 、 $i_d$ 、 $i_{VT}$ 、 $i_D$  的波形。

解：  $u_d$ 、 $i_d$ 、 $i_{VT}$ 、 $i_D$  的波形如下图：



负载电压的平均值为：

$$U_d = \frac{1}{3} \int_{\alpha}^{\pi} 2U_2 \sin t dt = 0.19 U_2 \frac{1 + \cos(\pi/3)}{2} = 67.5 \text{ (V)}$$

负载电流的平均值为：

$$I_d = U_d / R = 67.5 / 2 = 33.75 \text{ (A)}$$

流过晶闸管  $VT_1$ 、 $VT_2$  的电流有效值为：

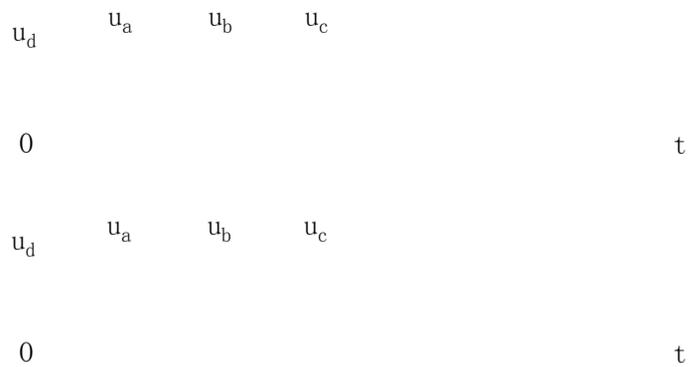
$$I_{VT} = \frac{1}{3} I_d = 19.49 \text{ (A)}$$

流过二极管  $VD_3$ 、 $VD_4$  的电流有效值为：

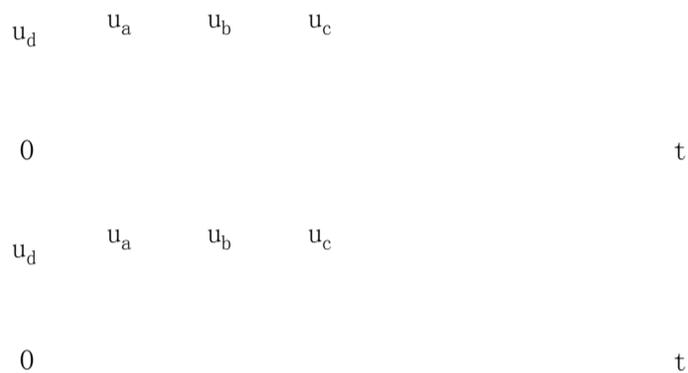
$$I_{VD} = \frac{2}{3} I_d = 22.5 \text{ (A)}$$

7. 在三相半波整流电路中，如果 a 相的触发脉冲消失，试绘出在电阻性负载和电感性负载下整流电压  $u_d$  的波形。

解：假设  $\alpha=0$ ，当负载为电阻时， $u_d$  的波形如下：



当负载为电感时， $u_d$  的波形如下：



8. 三相半波整流电路，可以将整流变压器的二次绕组分为两段成为曲折接法，每段的电动势相同，其分段布置及其矢量如图 2-60 所示，此时线圈的绕组增加了一些，铜的用料约增加 10%，问变压器铁心是否被直流磁化，为什么？

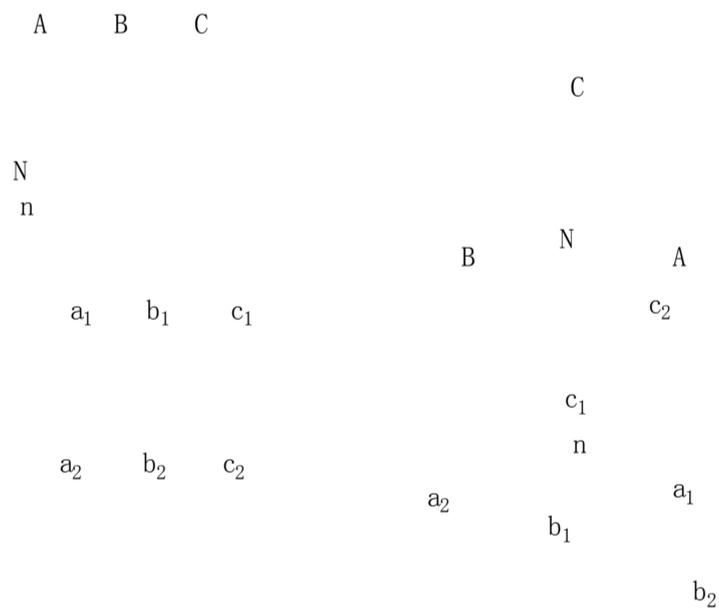


图 2-60 变压器二次绕组的曲折接法及其矢量图

答：变压器铁心不会被直流磁化。原因如下：

变压器二次绕组在一个周期内：当  $a_1c_2$  对应的晶闸管导通时， $a_1$  的电流向下流， $c_2$  的电流向上流；当  $c_1b_2$  对应的晶闸管导通时， $c_1$  的电流向下流， $b_2$  的电流向上流；当  $b_1a_2$  对应的晶闸管导通时， $b_1$  的电流向下流， $a_2$  的电流向上流；就变压器的一次绕组而言，每一周期中有两段时间（各为  $120^\circ$ ）由电流流过，流过的电流大小相等而方向相反，故一周期

内流过的电流平均值为零，所以变压器铁心不会被直流磁化。

9. 三相半波整流电路的共阴极接法与共阳极接法，a、b 两相的自然换相点是同一点吗？如果不是，它们在相位上差多少度？

答：三相半波整流电路的共阴极接法与共阳极接法，a、b 两相之间换相的自然换相点不是同一点。它们在相位上相差  $180^\circ$ 。

10. 有两组三相半波可控整流电路，一组是共阴极接法，一组是共阳极接法，如果它们的触发角都是  $\alpha$ ，那末共阴极组的触发脉冲与共阳极组的触发脉冲对同一相来说，例如都是 a 相，在相位上差多少度？

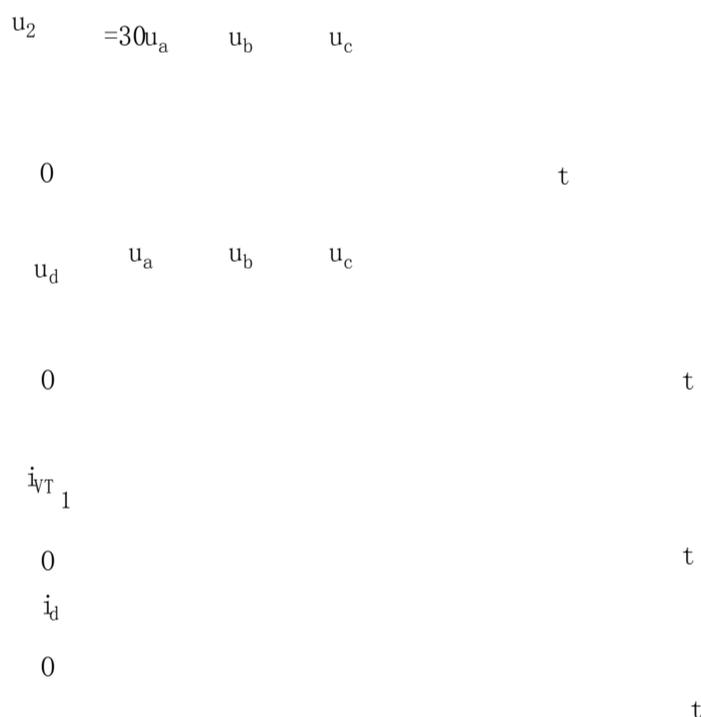
答：相差  $180^\circ$ 。

11. 三相半波可控整流电路， $U_2=100V$ ，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  $i_{VT1}$  的波形如下图：



②  $U_d$ 、 $I_d$ 、 $I_{dT}$  和  $I_{VT}$  分别如下

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

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

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

$$I_{VT} = I_d / 3 = 6.75 \text{ (A)}$$

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：



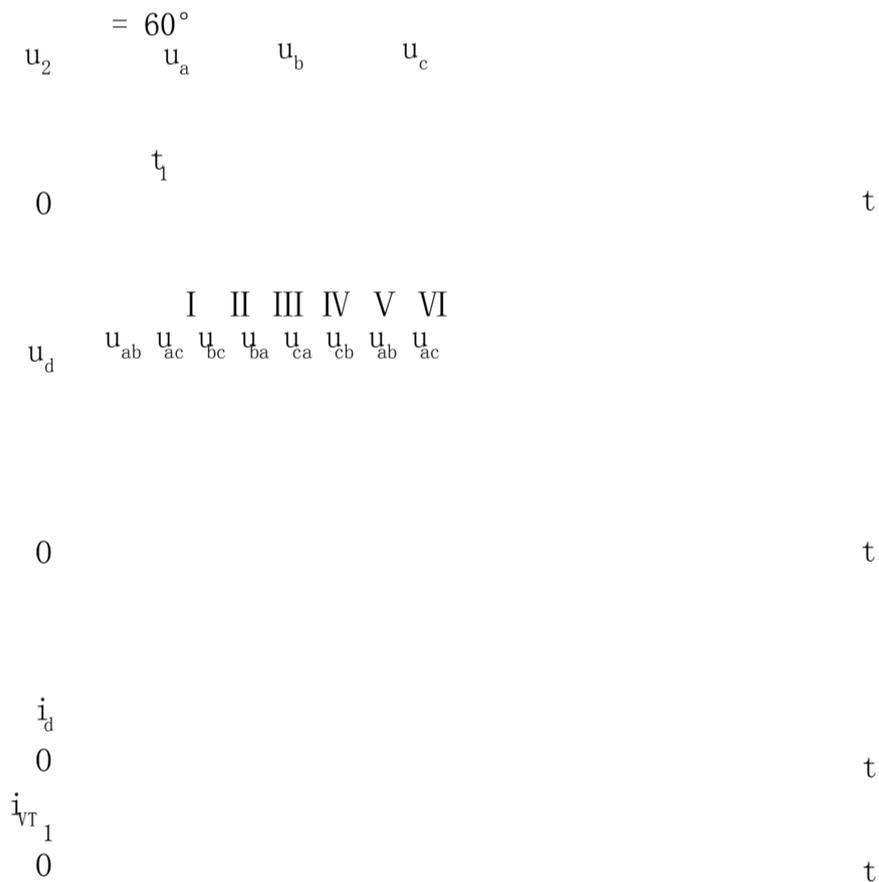
假设  $VT_1$  被击穿而短路，则当晶闸管  $VT_3$  或  $VT_5$  导通时，将发生电源相间短路，使得  $VT_3$ 、 $VT_5$  也可能分别被击穿。

13. 三相桥式全控整流电路， $U_2=100V$ ，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

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

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

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

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

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

解：考虑  $L_B$  时，有：

$$\begin{aligned} U_d &= 0.9 U_2 \cos \alpha - \Delta U_d \\ \Delta U_d &= 2X_B I_d / \pi \\ I_d &= (U_d - E) / R \end{aligned}$$

解方程组得：

$$\begin{aligned} U_d &= (R \cdot 0.9 U_2 \cos \alpha + 2X_B E) / (R + 2X_B) = 44.55 (V) \\ \Delta U_d &= 0.455 (V) \\ I_d &= 4.55 (A) \end{aligned}$$

又∵

$$\cos \mu - \cos \alpha = 2 I_d X_B / U_2$$

即得出

$$\cos \mu = \cos 60^\circ + 0.4798 = 0.9798$$

换流重叠角

$$\mu = \arccos 0.9798 = 61.33^\circ \approx 60^\circ + 1.33^\circ$$

最后，作出整流电压  $U_d$  的波形如下：



15. 三相半波可控整流电路，反电动势阻感负载， $U_2=100V$ ， $R=1\ \Omega$ ， $L=\infty$ ， $L_B=1mH$ ， $\alpha=30^\circ$  时、 $E=50V$  时  $U_d$ 、 $I_d$ 、 $\mu$  的值并作出  $u_d$  与  $i_{VT1}$  和  $i_{VT2}$  的波形。

解：考虑  $L_B$  时，有：

$$\begin{aligned} U_d &= 1.17 U_2 \cos \alpha - \Delta U_d \\ \Delta U_d &= 3X_B I_d / 2\pi \\ I_d &= (U_d - E) / R \end{aligned}$$

解方程组得：

$$\begin{aligned} U_d &= (R \cdot 1.17 U_2 \cos \alpha + 3X_B E) / (2R + 3X_B) = 94.63 (V) \\ \Delta U_d &= 6.7 (V) \\ I_d &= 44.63 (A) \end{aligned}$$

又∵

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu) = 2 I_d X_B / 6 U_2$$

即得出

$$\cos(30^\circ + \mu) = 0.752$$

换流重叠角

$$\mu = 41.28^\circ - 30^\circ = 11.28^\circ$$

$u_d$ 、 $i_{VT1}$  和  $i_{VT2}$  的波形如下：



16. 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  $\mu$  的值并作出  $u_d$ 、 $i_{VD}$  和  $i_2$  的波形。

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。

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

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

$$I_d = U_d / R$$

解方程组得：

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

$$I_d = 97.38 (A)$$

又∵

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu) = 2 I_d X_B / 6 U_2$$

即得出

$$\cos \mu = 0.892$$

换流重叠角

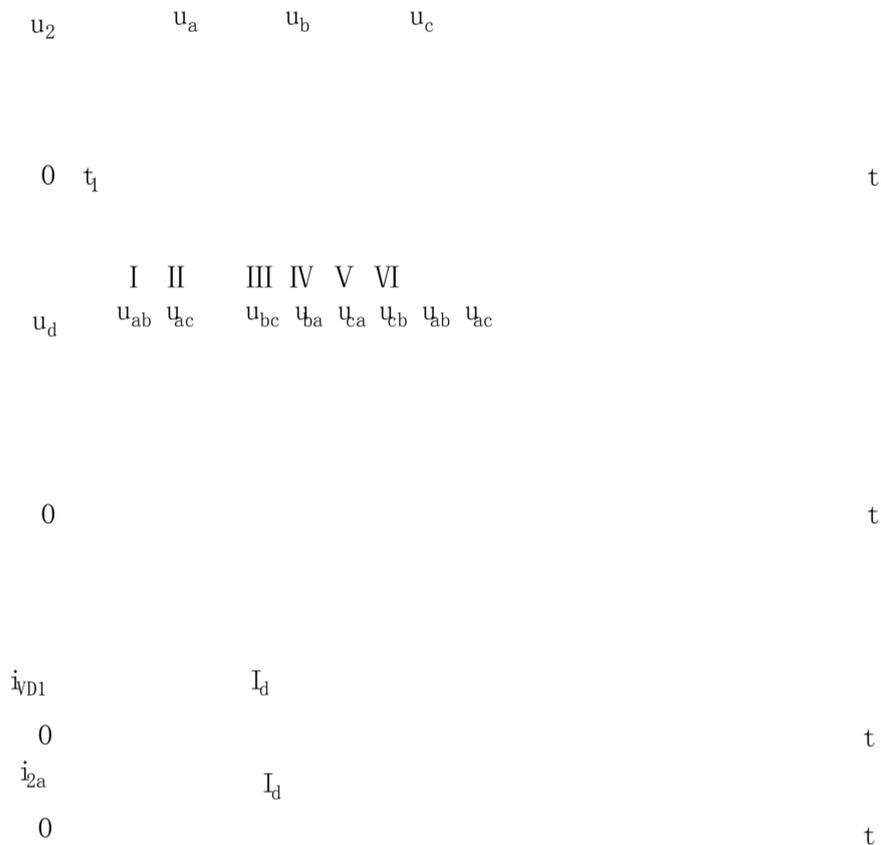
$$\mu = 26.93^\circ$$

二极管电流和变压器二次测电流的有效值分别为

$$I_{VD} = I_d / \sqrt{3} = 97.38 / \sqrt{3} = 56.16 \text{ (A)}$$

$$I_{2a} = \frac{2}{3} I_d = 79.51 \text{ (A)}$$

$u_d$ 、 $i_{VD1}$  和  $i_{2a}$  的波形如下：



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

解：①当  $L_B=0$  时：

$$U_d = 2.34 U_2 \cos \alpha = 2.34 \times 220 \times \cos 60^\circ = 257.4 \text{ (V)}$$

$$I_d = (U_d - E) / R = (257.4 - 200) / 1 = 57.4 \text{ (A)}$$

②当  $L_B=1\text{mH}$  时

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

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

$$I_d = (U_d - E) / R$$

解方程组得：

$$U_d = (2.34 U_2 R \cos \alpha + 3X_B E) / (R + 3X_B) = 244.15 \text{ (V)}$$

$$I_d = 44.15 \text{ (A)}$$

$$\Delta U_d = 13.25 \text{ (V)}$$

$$\text{又} \because \cos \gamma - \cos \alpha = 2X_B I_d / 6 U_2$$

$$\cos(60^\circ + \gamma) = 0.4485$$

$$\gamma = 63.35^\circ - 60^\circ = 3.35^\circ$$

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/958024105042007002>