

## 第 2 章

1、与信息电子电路中的二极管相比，电力二极管具有怎样的结构特点才使得其具有耐受高压和大电流的能力？

答:1) 电力二极管大都采用垂直导电结构，使得硅片中通过电流的有效面积增大，显著提高了二极管的通流能力。

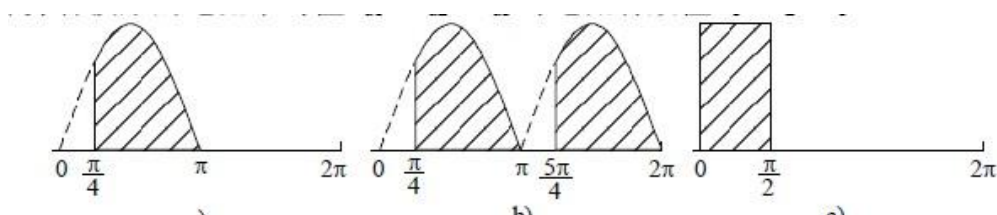
2) 电力二极管在P区和N区之间多了一层低掺杂N区，也称漂移区。低掺杂N区由于掺杂浓度低而接近于无掺杂的纯半导体材料即本征半导体，由于掺杂浓度低，低掺杂N区就可以承受很高的电压而不被击穿。

3) 由于电导调制效应，使得PN结在流过正向电流较大时，电导率大大增加，可以维持较低的压降，为1V左右。使得二极管在通流能力增大时可以减小损耗。

2、使晶闸管导通的条件是什么？

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

4. 图 2-27 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) 
$$I_{d1} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{2\pi} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} + 1 \right) \approx 0.2717 I_m$$
$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\pi} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{2} \sqrt{\frac{3}{4} + \frac{1}{2\pi}} \approx 0.4767 I_m$$

b) 
$$I_{d2} = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\pi} I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{\pi} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} + 1 \right) \approx 0.5434 I_m$$
$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\pi} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{\sqrt{2} I_m}{2} \sqrt{\frac{3}{4} + \frac{1}{2\pi}} \approx 0.6741 I_m$$

c) 
$$I_{d3} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_m d(\omega t) = \frac{1}{4} I_m$$
$$I_3 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_m^2 d(\omega t)} = \frac{1}{2} I_m$$

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  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ ,由普通晶闸管的分析可得,  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$  是器件临界导通的条件。 $\alpha_1 + \alpha_2 > 1$ ,两个等效晶体管过饱和而导通;  $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$ ,不能维持饱和导通而关断。

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

1) GTO 在设计时  $\alpha_2$  较大,这样晶体管  $V_2$  控制灵敏,易于 GTO 关断;

2) GTO 导通时的  $\alpha_1 + \alpha_2$  更接近于 1,普通晶闸管  $\alpha_1 + \alpha_2 \geq 1.15$ ,而 GTO 则为  $\alpha_1 + \alpha_2 \approx 1.05$ ,GTO 的饱和程度不深,接近于临界饱和,这样为门极控制关断提供了有利条件;

3) 多元集成结构使每个 GTO 元阴极面积很小,门极和阴极间的距离大为缩短,使得  $P_2$  极区所谓的横向电阻很小,从而使从门极抽出较大的电流成为可能。

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<br>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 3 章

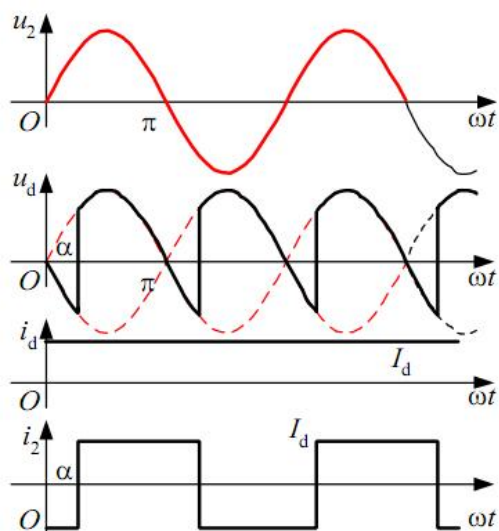
3. 单相桥式全控整流电路,  $U_2=100\text{V}$ , 负载中  $R=2\Omega$ ,  $L$  值极大, 当  $\alpha=30^\circ$  时,

要求: ①作出  $u_d$ 、 $i_d$ 、和  $i_2$  的波形;

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

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：

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

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：

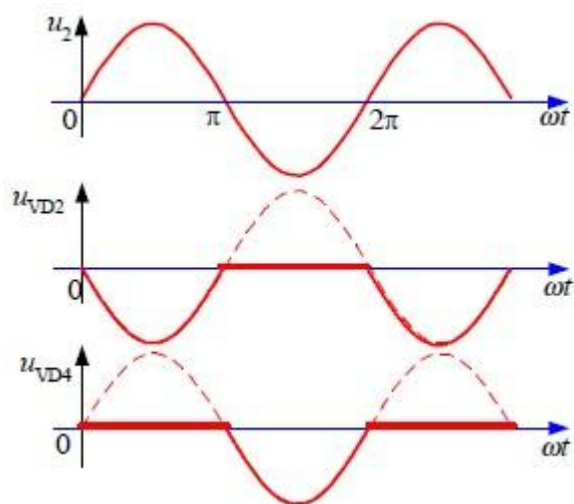
$$I_N = (1.5 \sim 2) \times 27.57 / 1.57 = 26 \sim 35 \text{ (A)}$$

具体数值可按晶闸管产品系列参数选取。

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。

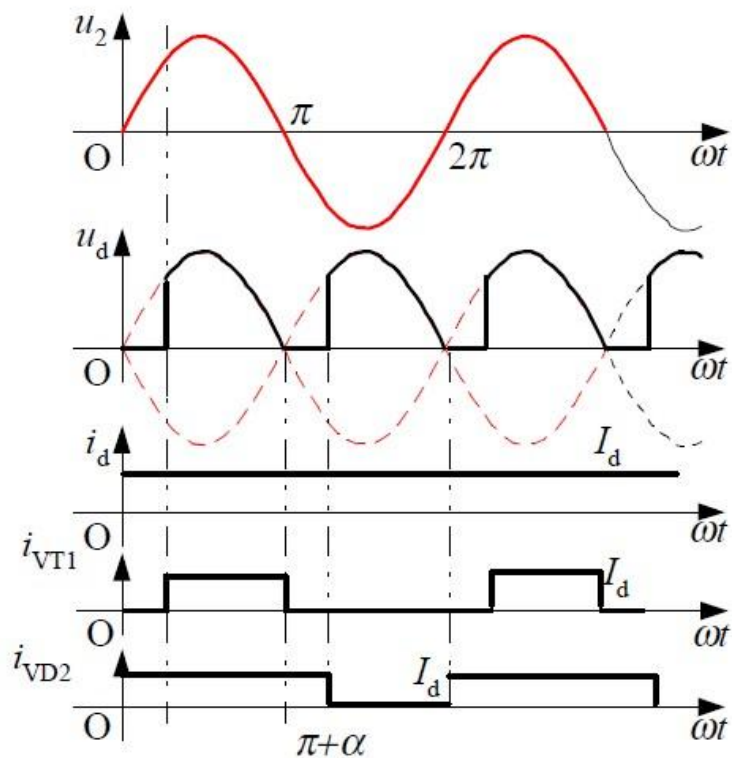
解：注意到二极管的特点：承受电压为正即导通。因此，二极管承受的电压不会出现正的部分。在电路中器件均不导通的阶段，交流电源电压由晶闸管平衡。

整流二极管在一周内承受的电压波形如下：



6、晶闸管串联的单相半控桥（桥中VT1、VT2为晶闸管），电路如图3-12所示， $U_2=100\text{V}$ ，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：

$$U_d = \frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos(\pi / 3)}{2} = 67.5 \text{ (V)}$$

负载电流的平均值为：

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

流过晶闸管 VT<sub>1</sub>、VT<sub>2</sub> 的电流有效值为：

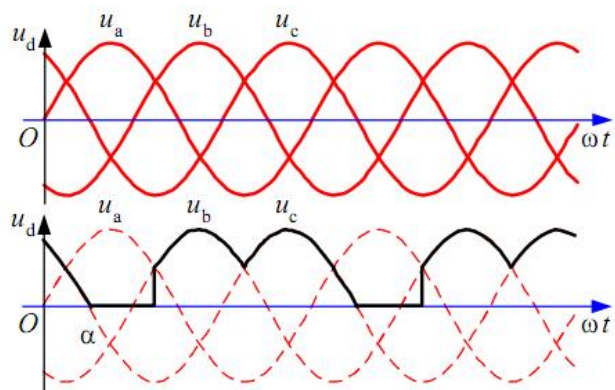
$$I_{VT} = \sqrt{\frac{1}{3}} I_d = 19.49 \text{ (A)}$$

流过二极管 VD<sub>3</sub>、VD<sub>4</sub> 的电流有效值为：

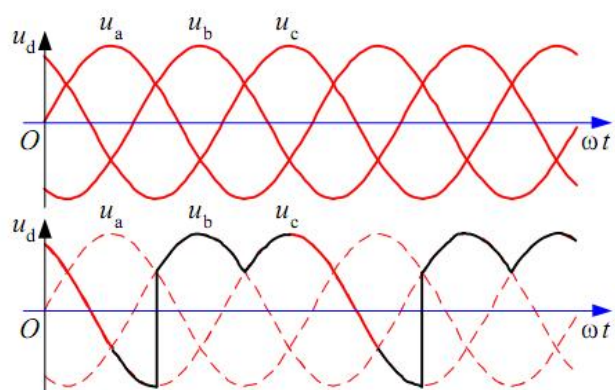
$$I_{VD} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = 27.56 \text{ (A)}$$

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

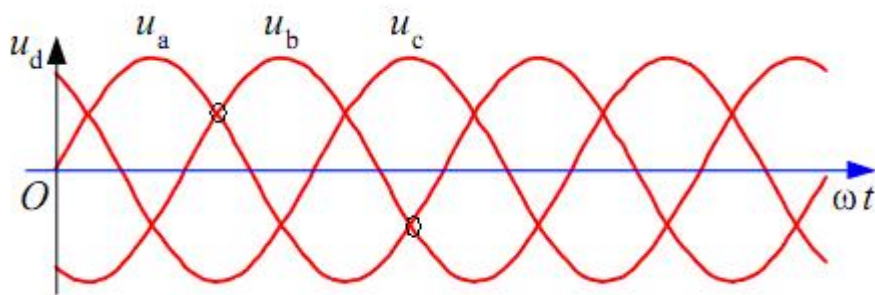


当负载为电感时， $u_d$  的波形如下：



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？

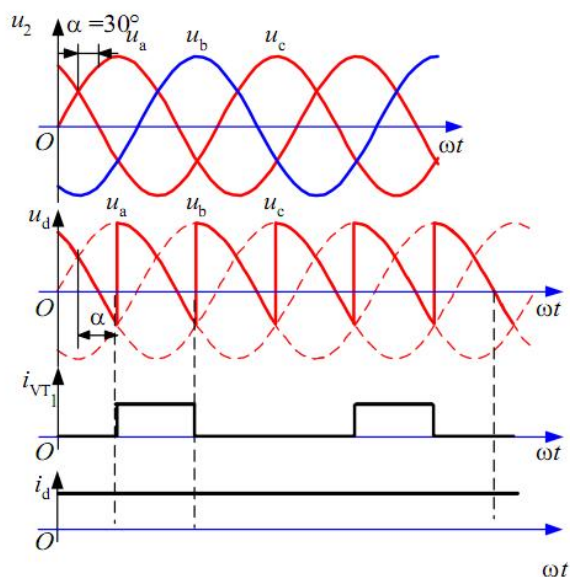
答：三相半波整流电路的共阴极接法与共阳极接法，a、b 两相之间换相的自然换相点不是同一点。它们在相位上相差 $180^\circ$ 。



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

- ① 画出  $u_d$ 、 $i_d$  和  $i_{VT1}$  的波形；
- ② 计算  $U_d$ 、 $I_d$ 、 $I_{dT}$  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

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

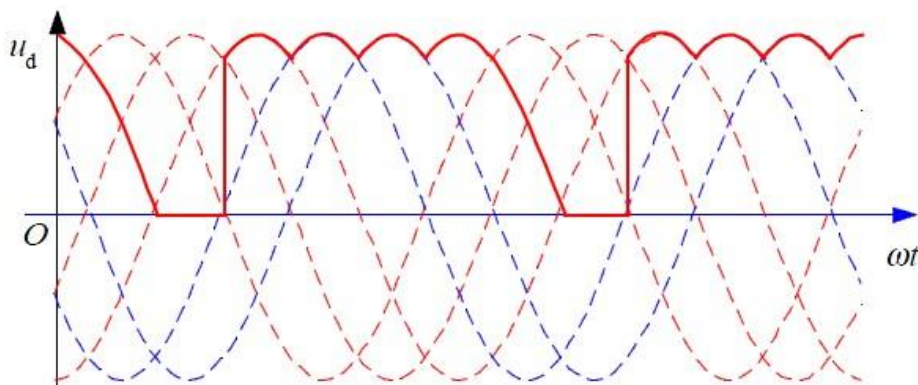
$$I_d = U_d / R = 58.5 / 5 = 11.7 \text{ (A)}$$

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

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

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

答：假设 VT1 不能导通，整流电压  $u_d$  波形如下：



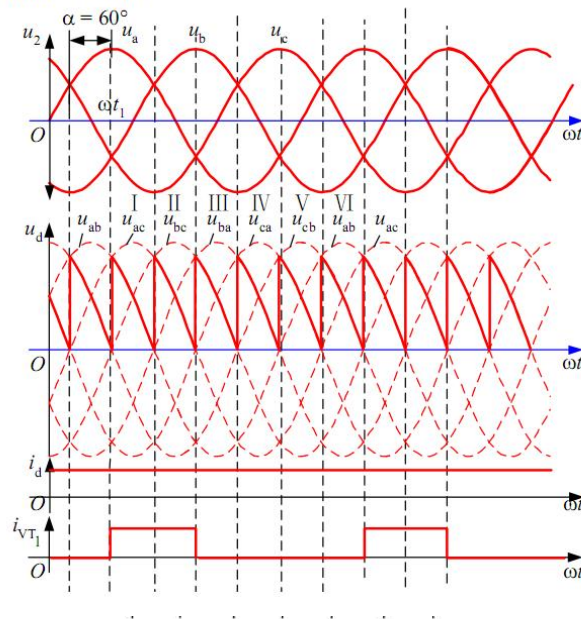


假设VT1被击穿而短路，则当晶闸管VT3或VT5导通时，将发生电源相间短路，使得VT3、VT5也可能分别被击穿。

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

- ① 画出  $u_d$ 、 $i_d$  和  $i_{VT1}$  的波形；
- ② 计算  $U_d$ 、 $I_d$ 、 $I_{dT}$  和  $I_{VT}$ 。

解：①  $u_d$ 、 $i_d$  和  $i_{VT1}$  的波形如下：



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

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

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

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

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

23. 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何主要异同？

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。

#### 24. 整流电路多重化的主要目的是什么？

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。

#### 26. 使变流器工作于有源逆变状态的条件是什么？

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  $\alpha > \pi/2$ ，使  $U_d$  为负值。

#### 29. 什么是逆变失败？如何防止逆变失败？

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。

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

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

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

## 第 4 章

1. 无源逆变电路和有源逆变电路有何不同？

答：两种电路的不同主要是：

有源逆变电路的交流侧接电网，即交流侧接有电源。而无源逆变电路的交流侧直接和负载联接。

2. 换流方式各有那几种？各有什么特点？

答：换流方式有 4 种：

器件换流：利用全控器件的自关断能力进行换流。全控型器件采用此换流方式。

电网换流：由电网提供换流电压，只要把负的电网电压加在欲换流的器件上即可。

负载换流：由负载提供换流电压，当负载为电容性负载即负载电流超前于负载电压时，可实现负载换流。

强迫换流：设置附加换流电路，给欲关断的晶闸管强迫施加反向电压换流称为强迫换流。通常是利用附加电容上的能量实现，也称电容换流。

晶闸管电路不能采用器件换流，根据电路形式的不同采用电网换流、负载换流和强迫换流 3 种方式。

3. 什么是电压型逆变电路？什么是电流型逆变电路？二者各有什么特点。

答：按照逆变电路直流侧电源性质分类，直流侧是电压源的称为逆变电路称为电压型逆变电路，直流侧是电流源的逆变电路称为电流型逆变电路

电压型逆变电路的主要特点是：

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

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

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

电流型逆变电路的主要特点是：

①直流侧串联有大电感，相当于电流源。直流侧电流基本无脉动，直流回路呈现高阻抗。

②电路中开关器件的作用仅是改变直流电流的流通路径，因此交流侧输出电流为矩形波，并且与负载阻抗角无关。而交流侧输出电压波形和相位则因负载阻抗情况的不同而不同。

③当交流侧为阻感负载时需要提供无功功率，直流侧电感起缓冲无功能量的作用。因为反馈无功能量时直流电流并不反向，因此不必像电压型逆变电路那样要给开关器件反并联二极管。

5. 三相桥式电压型逆变电路， $180^\circ$  导电方式， $U_d=100V$ 。试求输出相电压的基波幅值 $U_{UN1m}$ 和有效值 $U_{UN1}$ 、输出线电压的基波幅值 $U_{UV1m}$ 和有效值 $U_{UV1}$ 、输出线电压中5次谐波的有效值 $U_{UV5}$ 。

解：输出相电压的基波幅值为

$$U_{UN1m} = \frac{2U_d}{\pi} = 0.637U_d = 63.7(V)$$

输出相电压基波有效值为：

$$U_{UN1} = \frac{U_{UN1m}}{\sqrt{2}} = 0.45U_d = 45(V)$$

输出线电压的基波幅值为

$$U_{UV1m} = \frac{2\sqrt{3}U_d}{\pi} = 1.1U_d = 110(V)$$

输出线电压基波的有效值为

$$U_{UV1} = \frac{U_{UV1m}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{6}}{\pi}U_d = 0.78U_d = 78(V)$$

输出线电压中五次谐波 $u_{UV5}$ 的表达式为：

$$u_{UV5} = \frac{2\sqrt{3}U_d}{5\pi} \sin 5\omega t$$



$$U_{UV5} = \frac{2\sqrt{3}U_d}{5\sqrt{2}\pi} = 15.59(\text{V})$$

8. 逆变电路多重化的目的是什么？如何实现？串联多重和并联多重逆变电路各用于什么场合？

答：逆变电路多重化的目的之一是使总体上装置的功率等级提高，二是可以改善输出电压的波形。因为无论是电压型逆变电路输出的矩形电压波，还是电流型逆变电路输出的矩形电流波，都含有较多谐波，对负载有不利影响，采用多重逆变电路，可以把几个矩形波组合起来获得接近正弦波的波形。

逆变电路多重化就是把若干个逆变电路的输出按一定的相位差组合起来，使它们所含的某些主要谐波分量相互抵消，就可以得到较为接近正弦波的波形。组合方式有串联多重和并联多重两种方式。串联多重是把几个逆变电路的输出串联起来，并联多重是把几个逆变电路的输出并联起来。

串联多重逆变电路多用于电压型逆变电路的多重化。

并联多重逆变电路多用于电流型逆变电路得多重化。

## 第 5 章

2. 在图 5-1a 所示的降压斩波电路中，已知  $E=200\text{V}$ ， $R=10\ \Omega$ ， $L$  值极大， $E_M=30\text{V}$ ， $T=50\ \mu\text{s}$ ， $t_{\text{on}}=20\ \mu\text{s}$ ，计算输出电压平均值  $U_o$ ，输出电流平均值  $I_o$ 。

解：由于  $L$  值极大，故负载电流连续，于是输出电压平均值为

$$U_o = \frac{t_{on}}{T} E = \frac{20 \times 200}{50} = 80(\text{V})$$

输出电流平均值为

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

3. 在图5-1a 所示的降压斩波电路中， $E=100\text{V}$ ， $L=1\text{mH}$ ， $R=0.5\Omega$ ， $E_M=10\text{V}$ ，采用脉宽调制控制方式， $T=20\mu\text{s}$ ，当 $t_{on}=5\mu\text{s}$ 时，计算输出电压平均值 $U_o$ ，输出电流平均值 $I_o$ ，计算输出电流的最大和最小值瞬时值并判断负载电流是否连续。

解：由题目已知条件可得：

$$m = \frac{E_M}{E} = \frac{10}{100} = 0.1$$

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{0.001}{0.5} = 0.002$$

当  $t_{on}=5\mu\text{s}$  时，有

$$\rho = \frac{T}{\tau} = 0.01$$

$$\alpha\rho = \frac{t_{on}}{\tau} = 0.0025$$

由于

$$\frac{e^{\alpha\rho}-1}{e^{\rho}-1}=\frac{e^{0.0025}-1}{e^{0.01}-1}=0.249>m$$

所以输出电流连续。

此时输出平均电压为

$$U_o = \frac{t_{on}}{T} E = \frac{100 \times 5}{20} = 25 \text{ (V)}$$

输出平均电流为

$$I_o = \frac{U_o - E_M}{R} = \frac{25 - 10}{0.5} = 30 \text{ (A)}$$

输出电流的最大和最小值瞬时值分别为

$$I_{\max} = \left( \frac{1 - e^{-\alpha\rho}}{1 - e^{-\rho}} - m \right) \frac{E}{R} = \left( \frac{1 - e^{-0.0025}}{1 - e^{-0.01}} - 0.1 \right) \frac{100}{0.5} = 30.19 \text{ (A)}$$

$$I_{\min} = \left( \frac{e^{\alpha\rho} - 1}{e^{\rho} - 1} - m \right) \frac{E}{R} = \left( \frac{e^{0.0025} - 1}{e^{0.01} - 1} - 0.1 \right) \frac{100}{0.5} = 29.81 \text{ (A)}$$

5. 在图 5-2a 所示的升压斩波电路中, 已知  $E=50\text{V}$ ,  $L$  值和  $C$  值极大,  $R=20\ \Omega$ , 采用脉宽调制控制方式, 当  $T=40\ \mu\text{s}$ ,  $t_{on}=25\ \mu\text{s}$  时, 计算输出电压平均值  $U_o$ , 输出电流平均值  $I_o$ 。

解: 输出电压平均值为:

$$U_o = \frac{T}{t_{off}} E = \frac{40}{40 - 25} \times 50 = 133.3 \text{ (V)}$$

输出电流平均值为:

$$I_o = \frac{U_o}{R} = \frac{133.3}{20} = 6.667 \text{ (A)}$$

6. 试分别简述升降压斩波电路和 Cuk 斩波电路的基本原理, 并比较其异同点。

答: 升降压斩波电路的基本原理: 当可控开关  $V$  处于通态时, 电源  $E$  经  $V$  向电感  $L$  供电使其贮存能量, 此时电流为  $i_1$ , 方向如图 5-4 中所示。同时, 电容  $C$  维持输出电压基本恒定并向负载  $R$  供电。此后, 使  $V$  关断, 电感  $L$  中贮存的能量向负载释放, 电流为  $i_2$ , 方向如图 5-4 所示。可见, 负载电压极

性为上负下正，与电源电压极性相反。

稳态时，一个周期  $T$  内电感  $L$  两端电压  $u_L$  对时间的积分为零，即

$$\int_0^T u_L dt = 0$$

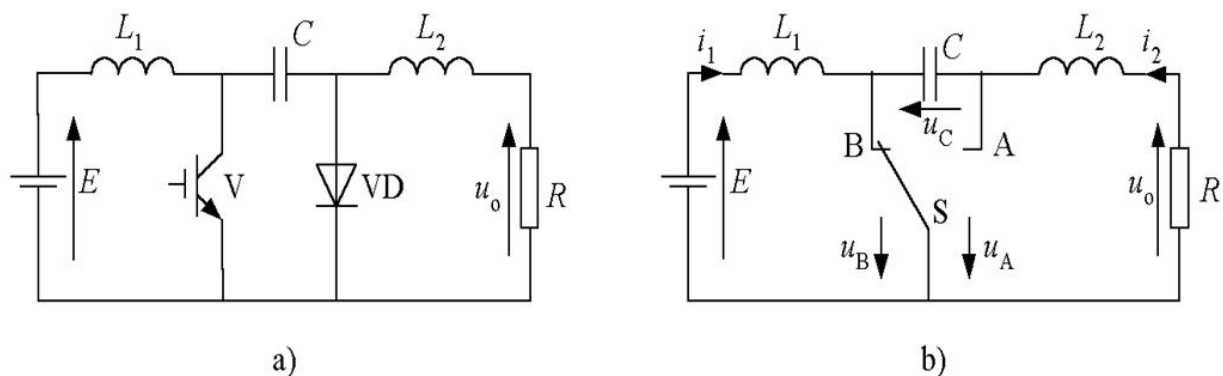
当  $V$  处于通态期间， $u_L = E$ ；而当  $V$  处于断态期间， $u_L = -u_o$ 。于是：

$$E \cdot t_{\text{on}} = U_o \cdot t_{\text{off}}$$

所以输出电压为：

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

改变导通比  $\alpha$ ，输出电压既可以比电源电压高，也可以比电源电压低。当  $0 < \alpha < 1/2$  时为降压，当  $1/2 < \alpha < 1$  时为升压，因此将该电路称作升降压斩波电路。



Cuk 斩波电路的基本原理：当  $V$  处于通态时， $E-L_1-V$  回路和  $R-L_2-C-V$  回路分别流过电流。当  $V$  处于断态时， $E-L_1-C-VD$  回路和  $R-L_2-VD$  回路分别流过电流。

输出电压的极性与电源电压极性相反。该电路的等效电路如图 5-5b 所示，相当于开关  $S$  在  $A$ 、 $B$  两点之间交替切换。

假设电容  $C$  很大使电容电压  $u_C$  的脉动足够小时。当开关  $S$  合到  $B$  点时,  $B$  点电压  $u_B=0$ ,  $A$  点电压  $u_A=-u_C$ ; 相反, 当  $S$  合到  $A$  点时,  $u_B=u_C$ ,  $u_A=0$ 。因此,  $B$  点电压  $u_B$  的平均值为  $U_B = \frac{t_{\text{off}}}{T} U_C$  ( $U_C$  为电容电压  $u_C$  的平均值), 又因电感  $L_1$  的电压平均值为零, 所以  $E = U_B = \frac{t_{\text{off}}}{T} U_C$ 。另一方面,  $A$  点的电压平均值为  $U_A = -\frac{t_{\text{on}}}{T} U_C$ , 且  $L_2$  的电压平均值为零, 按图 3-5b 中输出电压  $U_o$  的极性, 有  $U_o = \frac{t_{\text{on}}}{T} U_C$ 。于是可得出输出电压  $U_o$  与电源电压  $E$  的关系:

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

两个电路实现的功能是一致的, 均可方便的实现升降压斩波。与升降压斩波电路相比, Cuk 斩波电路有一个明显的优点, 其输入电源电流和输出负载电流都是连续的, 且脉动很小, 有利于对输入、输出进行滤波。

## 第 6 章

1. 一调光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  $\alpha$ 。

补充:  $\alpha=30^\circ$  时, 输出功率占最大功率百分比?

解:  $\alpha=0$  时的输出电压最大, 为

$$U_{\text{omax}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi (\sqrt{2}U_1 \sin \omega t)^2 d\omega t} = U_1$$

此时负载电流最大, 为

$$I_{\text{omax}} = \frac{U_{\text{omax}}}{R} = \frac{U_1}{R}$$

因此最大输出功率为

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



输出功率为最大输出功率的 80% 时，有：

$$P = 0.8P_{\text{omax}} = \frac{(\sqrt{0.8}U_1)^2}{R}$$

此时，

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

又由

$$U_o = U_1 \sqrt{\frac{\sin 2\alpha}{2\pi} + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

解得

$$\alpha = 60.54^\circ$$

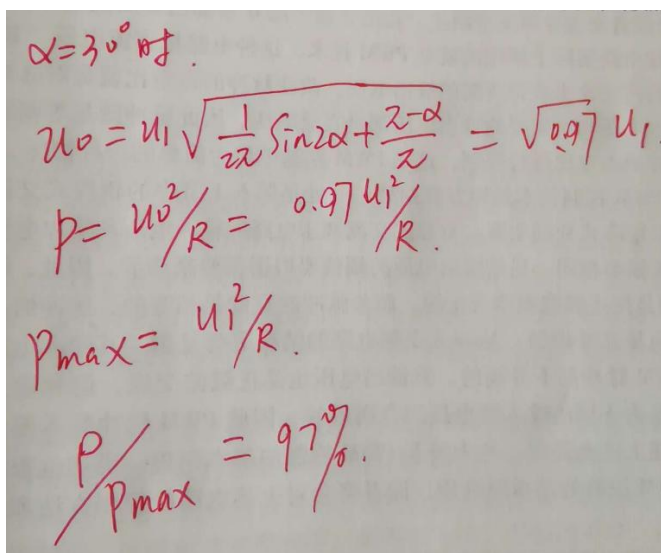
同理，输出功率为最大输出功率的 50% 时，有：

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

又由

$$U_o = U_1 \sqrt{\frac{\sin 2\alpha}{2\pi} + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$
$$\alpha = 90^\circ$$

补充：



Handwritten calculations for  $\alpha = 30^\circ$ :

$$\alpha = 30^\circ \text{ 时.}$$
$$U_o = U_1 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} = \sqrt{0.97} U_1$$
$$P = \frac{U_o^2}{R} = \frac{0.97 U_1^2}{R}$$
$$P_{\text{max}} = \frac{U_1^2}{R}$$
$$\frac{P}{P_{\text{max}}} = 97\%$$

3. 交流调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周波，再断开几个周波，通过改变接通周波数与断开周波数的比值来调节负载所消耗的平均功率。

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）及异步电动机的软起动，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。

#### 4. 交交变频电路的最高输出频率是多少？制约输出频率提高的因素是什么？

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。

5.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、球磨机等场合。

## 第 7 章

3. 单极性和双极性PWM调制有什么区别？三相桥式PWM型逆变电路中，输出相电压（输出端相对于直流电源中点的电压）和线电压SPWM波形各有几种电平？

答：三角波载波在信号波正半周期或负半周期里只有单一的极性，所得的PWM波形在半个周期中也只在单极性范围内变化，称为单极性PWM控制方式。

三角波载波始终是有正有负为双极性的，所得的PWM波形在半个周期中有正、有负，则称之为双极性PWM控制方式。

三相桥式PWM型逆变电路中，输出相电压有两种电平： $0.5U_d$ 和 $-0.5 U_d$ 。输出线电压有三种电平 $U_d$ 、0、 $- U_d$ 。

5. 什么是异步调制？什么是同步调制？两者各有何特点？分段同步调制有什么优点？

答：载波信号和调制信号不保持同步的调制方式称为异步调制。在异步调制方式中，通常保持载波频率 $f_c$  固定不变，因而当信号波频率 $f_r$ 变化时，载波比 $N$ 是变化的。

异步调制的主要特点是：

在信号波的半个周期内，PWM 波的脉冲个数不固定，相位也不固定，正负半周期的脉冲不对称，半周期内前后1/4周期的脉冲也不对称。这样，当信号波频率较低时，载波比 $N$ 较大，一周期内的脉冲数较多，正负半周期脉冲不对称和半周期内前后1/4 周期脉冲不对称产生的不利影响都较小，PWM 波形接近正弦波。

而当信号波频率增高时，载波比  $N$  减小，一周期内的脉冲数减少，PWM 脉冲不对称的影响就变大，有时信号波的微小变化还会产生 PWM 脉冲的跳动。这就使得输出 PWM 波和正弦波的差异变大。对于三相 PWM 型逆变电路来说，三相输出的对称性也变差。

载波比  $N$  等于常数，并在变频时使载波和信号波保持同步的方式称为同步调制。同步调制的主要特点是：在同步调制方式中，信号波频率变化时载波比  $N$  不变，信号波一个周期内输出的脉冲数是固定的，脉冲相位也是固定的。当逆变电路输出频率很低时，同步调制时的载波频率  $f_c$  也很低。 $f_c$  过低时由调制带来的谐波不易滤除。当负载为电动机时也会带来较大的转矩脉动和噪声。

当逆变电路输出频率很高时，同步调制时的载波频率  $f_c$  会过高，使开关器件难以承受。

此外，同步调制方式比异步调制方式复杂一些。

分段同步调制是把逆变电路的输出频率划分为若干段，每个频段的载波比一定，不同频段采用不同的载波比。其优点主要是，在高频段采用较低的载波比，使载波频率不致过高，可限制在功率器件允许的范围内。而在低频段采用较高的载波比，以使载波频率不致过低而对负载产生不利影响。

#### 6. 什么是SPWM波形的规则化采样法？和自然采样法比规则采样法有什么优点？

答：规则采样法是一种在采用微机实现时实用的PWM波形生成方法。规则采样法是在自然采样法的基础上得出的。规则采样法的基本思路是：取三角波载波两个正峰值之间为一个采样周期。使每个PWM脉冲的中点和三角波一周期的中点（即负峰点）重合，在三角波的负峰时刻对正弦信号波采样而得到正弦波的值，用幅值与该正弦波值相等的一条水平直线近似代替正弦信号波，用该直线与三角波载波的交点代替正弦波与载波的交点，即可得出控制功率开关器件通断的时刻。

比起自然采样法，规则采样法的计算非常简单，计算量大大减少，而效果接近自然

采样法，得到的SPWM波形仍然很接近正弦波，克服了自然采样法难以在实时控制中在线计算，在工程中实际应用不多的缺点。

#### 7. 单相和三相SPWM波形中，所含主要谐波频率为多少？

答：单相SPWM波形中所含的谐波频率为：

式中， $n=1,3,5,\dots$ 时， $k=0,2,4,\dots$ ； $n=2,4,6,\dots$ 时， $k=1,3,5,\dots$

在上述谐波中，幅值最高影响最大的是角频率为  $\omega_c$  的谐波分量。

三相SPWM波形中所含的谐波频率为：

式中， $n=1,3,5,\dots$ 时， $k=3(2m-1)\pm 1$ ； $m=1,2,\dots$ ；

$n=2,4,6,\dots$ 时，

在上述谐波中，幅值较高的是  $\omega_c \pm 2\omega_r$  和  $2\omega_c \pm \omega_r$ 。

#### 8. 如何提高PWM逆变电路的直流电压利用率？

答：采用梯形波控制方式，即用梯形波作为调制信号，可以有效地提高直流电压的利用率。

对于三相PWM逆变电路，还可以采用线电压控制方式，即在相电压调制信号中叠加3的倍数次谐波及直流分量等，同样可以有效地提高直流电压利用率。

#### 9. 什么是电流跟踪型PWM变流电路？采用滞环比较方式的电流跟踪型变流器有何特点？

答：电流跟踪型PWM变流电路就是对变流电路采用电流跟踪控制。也就是，



不用信号波对载波进行调制，而是把希望输出的电流作为指令信号，把实际电流作为反馈信号，通过二者的瞬时值比较来决定逆变电路各功率器件的通断，使实际的输出跟踪电流的变化。

采用滞环比较方式的电流跟踪型变流器的特点：

- ①硬件电路简单；
- ②属于实时控制方式，电流响应快；
- ③不用载波，输出电压波形中不含特定频率的谐波分量；
- ④与计算法和调制法相比，相同开关频率时输出电流中高次谐波含量较多；
- ⑤采用闭环控制。

## 第 9 章

6. 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：C 的作用是限制  $du/dt$ ，吸收关断过电压；R 的作用是当器件开通时 C 上的能量经 R 泄放；D 的作用是使 C 充电时通过 D 快速充电，放电时通过 R 限流放电。