

[第1章 绪 论](#)

[第2章 电力电子器件](#)

[第3章 整流电路](#)

[第4章 逆变电路](#)

[第5章 直流—直流变流电路](#)

[第6章 交流—交流变流电路](#)

[第7章 PWM控制技术](#)

[第8章 软开关技术](#)

[第9章 电力电子器件应用的共性问题](#)

[第10章 电力电子技术的应用](#)

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它具有耐受高电压和大电流的能力？

答：为了建立承受高电压和大电流的能力，电力二极管具体的半导体物理结构具有如下不同于信息电子电路二极管之处：

（1）电力二极管大都是垂直导电结构，而信息电子电路中的二极管一般是横向导电结构。垂直导电结构使得硅片中通过电流的有效面积增大，可以显著提高二极管的通流能力；

（2）电力二极管在P区和N区之间多了一层低掺杂N区，由于掺杂浓度低，低掺杂N区就可以承受很高的电压而不致被击穿，因此低掺杂N区越厚，电力二极管能够承受的反向电压就越高；

（3）电力二极管的电导调制效应使得电力二极管在正向电流较大时压降仍然很低。

2. 使晶闸管导通的条件是什么？

答：使晶闸管导通的条件为：

晶闸管阳极承受正向电压，同时在门极加正向触发电压，才能使其导通。门极所加正向触发脉冲的最小宽度，应能使阳极电流达到维持通态所需要的最小阳极电流。

3. 维持晶闸管导通的条件是什么？怎样才能使晶闸管由导通变为关断？

答：（1）维持晶闸管导通的条件为：

晶闸管在导通情况下，只要有一定的正向阳极电压，不论门极电压如何，晶闸管保持导通。

（2）使晶闸管由导通变为关断的方法：

去掉阳极所加正向电压，加反压或使其电流低于维持电流时，晶闸管由导通变为关断。

4. 图2-1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 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 。

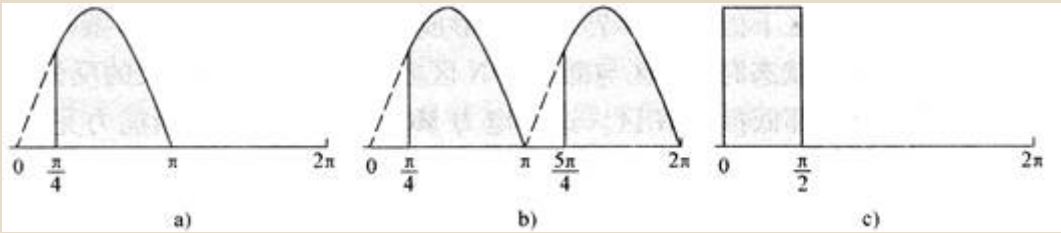


图2-1 晶闸管导电波形

解：（1）图a）中电流平均值和有效值为

$$I_{d1} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/4} I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{2\pi} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} + 1 \right) \approx 0.2717 I_m$$
$$I_1 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/4} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{I_m}{2} \sqrt{\frac{3}{4} + \frac{1}{2\pi}} \approx 0.4767 I_m$$

（2）图b）中电流平均值和有效值为

$$I_{d2} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/4} I_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{I_m}{\pi} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} + 1 \right) \approx 0.5434 I_m$$
$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/4} (I_m \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = \frac{\sqrt{2} I_m}{2} \sqrt{\frac{3}{4} + \frac{1}{2\pi}} \approx 0.6742 I_m$$

（3）图c）中电流平均值和有效值为

$$I_{d3} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_m d(\omega t) = 0.25 I_m$$
$$I_3 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_m^2 d(\omega t)} = 0.5 I_m$$

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

解：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

$$I_{m1} \approx \frac{I}{0.4767} \approx 329.35$$

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

$$I_{m2} \approx \frac{I}{0.6742} \approx 232.90$$

$$I_{d2} \approx 0.5434 I_{m2} \approx 126.56$$

$$I_{m3}=2 I = 314$$

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

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

答：GTO能够自行关断，而普通晶闸管不能的原因是GTO与普通晶闸管在设计和工艺方面有以下几点不同：

- （1）在设计器件时使得 $\alpha_2$ 较大，这样晶体管 $V_2$ 控制灵敏，使得GTO易于关断；
- （2）使得导通时的 $\alpha_1 + \alpha_2$ 更接近于1，这样使GTO导通时饱和程度不深，更接近于临界饱和，从而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基区所谓的横向电阻很小，从而使从门极抽出较大的电流成为可能。

7. 与信息电子电路中的MOSFET相比，电力MOSFET具有怎样的结构特点才具有耐受高电压和大电流的能力？

答：电力MOSFET应具有以下结构特点才具有耐受高电压和大电流的能力：

- （1）垂直导电结构：源极和漏极位于基区两侧，基区面积大，可增大电流容量；
- （2）N<sup>-</sup>漂移区：N区加入低掺杂N<sup>-</sup>漂移区，提高耐压；
- （3）漏极安装于硅片底部，可提高耐压特性。

8. 试分析IGBT和电力MOSFET在内部结构和开关特性上的相似与不同之处。

答： IGBT和电力MOSFET在内部结构和开关特性上的比较分析

（1）相似处：

IGBT 的驱动原理和MOSFET 基本相同，是一种场控器件。只需控制输入极N-沟道MOSFET，所以具有高输入阻抗特性。当MOSFET 的沟道形成后，从P+基极注入到N-层的空穴，对N-层进行电导调制，减小N-层的电阻，使IGBT在高电压时，也具有低的通态电压。

（2）不同处：

IGBT比电力MOSFET在背面多一个P+注入区，IGBT开关速度小，开关损耗少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。

9. 试列举典型的宽禁带半导体材料。基于这些宽禁带半导体材料的电力电子器件在哪些方面性能优于硅器件？

答：（1）典型的宽禁带半导体材料有：

金刚石、碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）等。

（2）基于宽禁带半导体材料的电力电子器件在以下性能方面优于硅器件：

- ① 具有更高的耐受高电压的能力；
- ② 低得多的通态电阻；
- ③ 更好的导热性能和热稳定性；
- ④ 更强的耐受高温和射线辐射的能力。

10. 试分析电力电子集成技术可以带来哪些益处。功率集成电路与集成电力电子模块实现集成的思路有何不同？

答：（1）电力电子集成技术可以带来的益处有：

- ① 缩小装置体积；
- ② 降低成本；
- ③ 提高可靠性；
- ④ 更重要的是，对工作频率较高的电路，还可以大大减小线路电感，从而简化对保护和缓冲电路的要求。

（2）功率集成电路与集成电力电子模块实现集成的思路的不同之处为：

- ① 功率集成电路是将电力电子器件与逻辑、控制、保护、传感、检测、自诊断等信息电子电路制作在同一芯片上；
- ② 集成电力电子模块是将电力电子器件与其控制、驱动、保护等所有信息电子电路封装在一起。

11. 试列举你所知道的电力电子器件，并从不同的角度对这些电力电子器件进行分类。目前常用的全控型电力电子器件有哪些？

答：（1）电力电子器件分类：

① 按能被控制电路信号控制的程度可以分为：

- a. 半控型器件；
- b. 全控型器件；
- c. 不可控器件。

② 按加在电力电子器件控制端和公共端间信号的性质可以分为：

- a. 电流驱动型；
- b. 电压驱动型。

③ 按电力电子器件内部电子和空穴两种载流子参与导电的情况可以分为：

- a. 单极型器件：只有一种载流子参与导电；
- b. 双极型器件：有电子和空穴两种载流子参与导电；
- c. 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。

(2) 目前常用的全控型电力电子器件有：

- ① 门极可关断晶闸管 (GTO)；
- ② 电力晶闸管 (GTR)；
- ③ 电力场效应晶体管 (MOSFET)；
- ④ 绝缘栅双极晶体管 (IGBT)。

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  $\alpha=0^\circ$  和  $60^\circ$  时的负载电流  $I_d$ ， 并画出  $u_d$  与  $i_d$  波形。

解：（1）当  $\alpha=0^\circ$  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，有下方程

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

考虑到初始条件：当  $\omega t=0$  时，  $i_d=0$ ，可得方程

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

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

$u_d$  与  $i_d$  的波形如图3-1所示

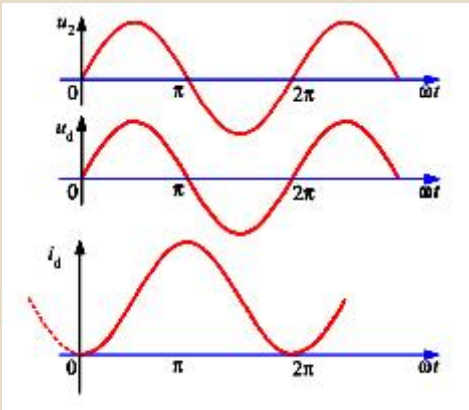


图3-1  $\alpha=0^\circ$  时，  $u_d$  与  $i_d$  的波形图

（2）当  $\alpha=60^\circ$  时

在  $u_2$  正半周期  $60^\circ\sim180^\circ$  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  $180^\circ\sim300^\circ$  期间释放，因此在  $u_2$  一个周期中，  $60^\circ\sim300^\circ$  期间有以下微分方程

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

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

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

其平均值为

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

此时  $u_d$  与  $i_d$  的波形如图3-2所示

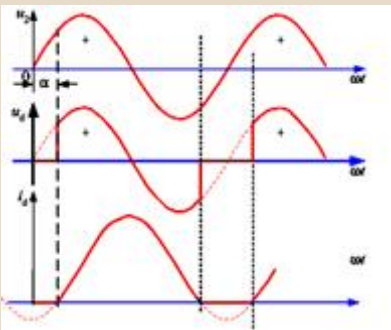


图3-2  $\alpha=60^\circ$  时，  $u_d$  与  $i_d$  的波形图

2. 图3-3为具有变压器中心抽头的单相全波可控整流电路中，问该变压器还有直流磁化问题吗？试说明：

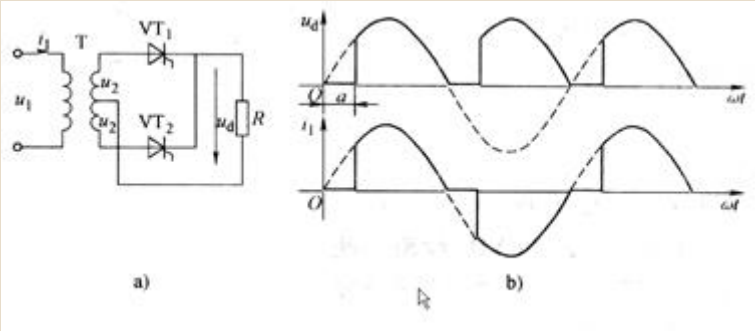


图3-3 单相全波可控整流电路及波形



① 晶闸管承受的最大正反向电压为 $2\sqrt{2}U_2$ ；

② 当负载为电阻或电感时，其输出电压和电流的波形与单相全控桥时相同。

**解：**（1）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。原因如下：

因为单相全波可控整流电路变压器二次测绕组中，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。

（2）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<sub>2</sub>为例

当VT<sub>1</sub>导通时，晶闸管VT<sub>2</sub>通过VT<sub>1</sub>与2个变压器二次绕组并联，所以VT<sub>2</sub>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α相同时。

a. 对于电阻负载：

第一，0～α期间无晶闸管导通，输出电压为0；

第二，α～π期间，单相全波电路中VT<sub>1</sub>导通，单相全控桥电路中VT<sub>1</sub>、VT<sub>4</sub>导通，输出电压均与电源电压u<sub>2</sub>相等；

第三，π～π+α期间，均无晶闸管导通，输出电压为0；

第四，π+α～2π期间，单相全波电路中VT<sub>2</sub>导通，单相全控桥电路中VT<sub>2</sub>、VT<sub>3</sub>导通，输出电压等于－u<sub>2</sub>。

b. 对于电感负载：

第一，α～π+α期间，单相全波电路中VT<sub>1</sub>导通，单相全控桥电路中VT<sub>1</sub>、VT<sub>4</sub>导通，输出电压均与电源电压u<sub>2</sub>相等；

第二，π+α～2π+α期间，单相全波电路中VT<sub>2</sub>导通，单相全控桥电路中VT<sub>2</sub>、VT<sub>3</sub>导通，输出波形等于－u<sub>2</sub>。

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， $U_2 = 100\text{V}$ ，负载中 $R = 2\Omega$ ，L值极大，当α=30°时，要求：

① 画出u<sub>d</sub>、i<sub>d</sub>和i<sub>2</sub>的波形；

② 求整流输出平均电压U<sub>d</sub>、电流 $I_d$ 以及变压器二次电流有效值I<sub>2</sub>；

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<sub>d</sub>、i<sub>d</sub>和i<sub>2</sub>的波形图如图3-4所示

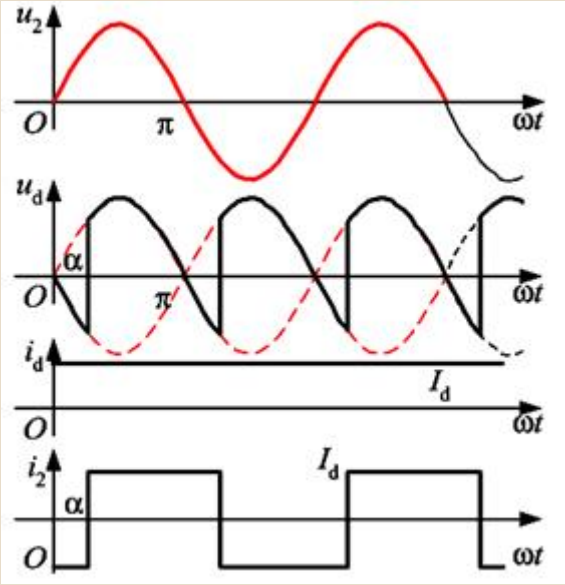


图3-4 u<sub>d</sub>、i<sub>d</sub>和i<sub>2</sub>的波形图

（2）输出平均电压U<sub>d</sub>、电流I<sub>d</sub>、变压器二次电流有效值I<sub>2</sub>分别为

$$U_d = 0.9 U_2 \cos \alpha = 0.9 \times 100 \times \cos 30^\circ = 77.94 \text{ (V)}$$

$$I_d = U_d / R = 77.94 / 2 = 38.97 \text{ (A)}$$

$$I_2 = I_d = 38.97 \text{ (A)}$$

（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期内承受的电压波形。

**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图3-5所示

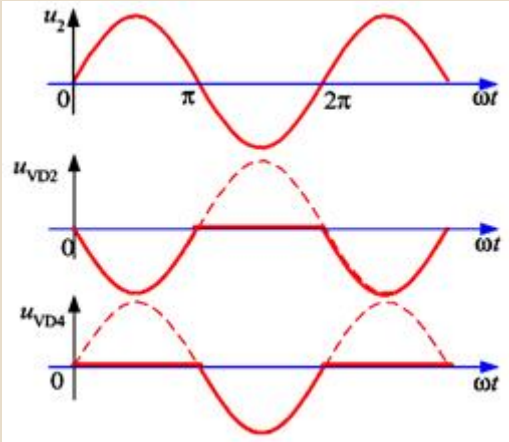


图3-5 整流二极管在一周内承受的电压波形图

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

- ① 画出  $u_d$ 、 $i_d$  和  $i_2$  的波形；
- ② 求整流输出平均电压  $U_d$ 、电流  $I_d$  以及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  $i_2$  的波形如图3-6所示

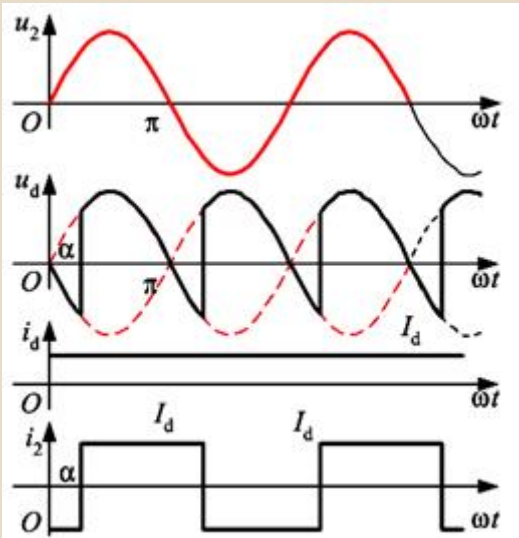


图3-6  $u_d$ 、 $i_d$  和  $i_2$  的波形图

（2）整流输出平均电压 $U_d$ 为

$$U_d=0.9U_2\cos\alpha=0.9\times200\times\cos45^\circ=127.28(A)$$

电流 $I_d$ 为

$$I_d=(U_d-E)/R=(127.28-100)/2=13.64(A)$$

变压器二次侧电流有效值 $I_2$ 分别为

$$I_2=I_d=13.64(A)$$

（3）晶闸管承受的最大反向电压为

$$\sqrt{2}U_2=200\sqrt{2}=282.8$$

流过每个晶闸管的电流的有效值为

$$I_{VT}=I_d/\sqrt{2}=9.64(A)$$

故晶闸管的额定电压为

$$U_N=(2\sim3)\times282.8=566\sim849$$

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3-7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，并画出  $u_d$ 、 $i_d$ 、 $i_{VT}$ 、 $i_{VD}$  的波形。

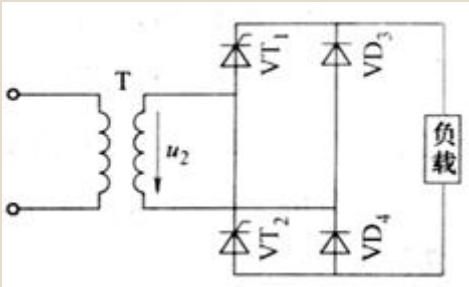


图3-7 单相桥式半控整流电路的另一种接法

解：负载电压的平均值为

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

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

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

所以，u<sub>d</sub>、i<sub>d</sub>、i<sub>VT</sub>、i<sub>D</sub>的波形如图3-8所示

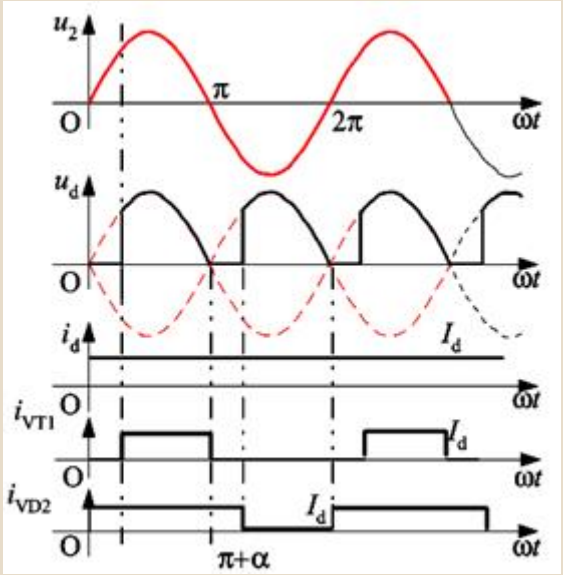


图3-8 u<sub>d</sub>、i<sub>d</sub>、i<sub>VT</sub>、i<sub>D</sub>的波形图

7. 在三相半波整流电路中，如果a相的触发脉冲消失，试画出在电阻性负载和电感性负载下整流电压 u<sub>d</sub> 的波形。

解：假设 α = 0°，当负载为电阻时，u<sub>d</sub>的波形如图3-9所示

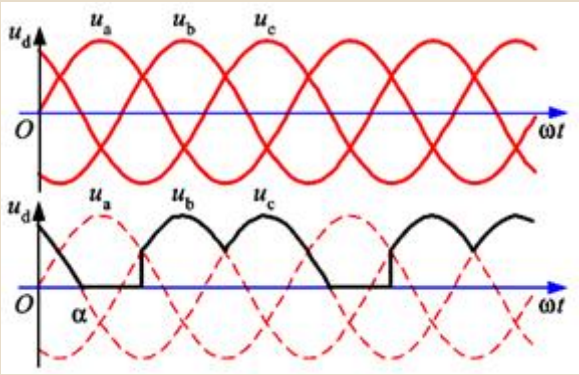


图3-9 负载为电阻时，u<sub>d</sub>的波形图

当负载为电感时，u<sub>d</sub>的波形如图3-10所示

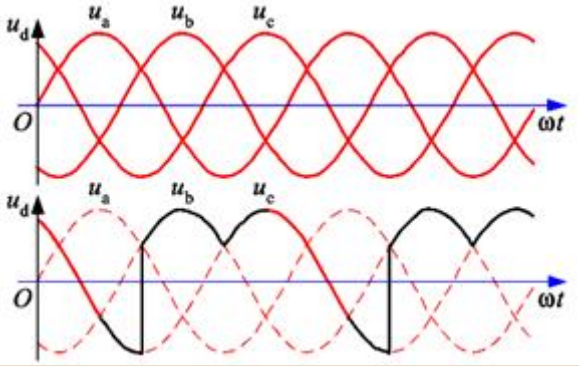




图3-10 负载为电感时， $u_d$ 的波形图

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3-11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？

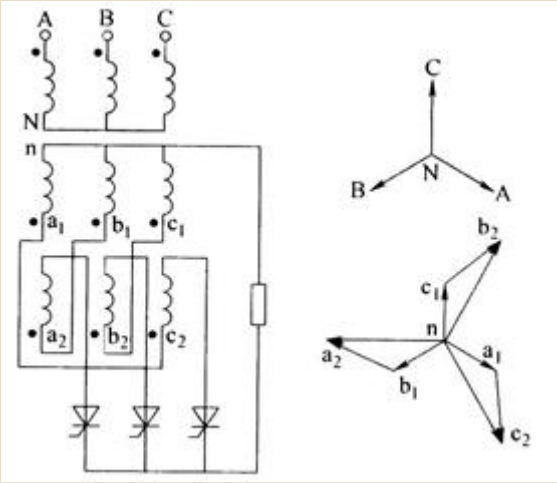


图3-11 变压器二次绕组的曲折接法及其矢量图

答：变压器铁心不会被直流磁化。原因如下：

（1）变压器二次绕组在一个周期内

- ① 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；
- ② 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；
- ③ 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。

（2）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时：

- （1）a、b两相之间换相的自然换相点不是同一点；
- （2）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：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，在相位上差 $180^\circ$ 。

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 $U_d$ 、 $I_d$ 、 $I_{dVT}$ 和 $I_{VT}$ 。

解：（1） $u_d$ 、 $i_d$ 和 $i_{VT1}$ 的波形如图3-12所示

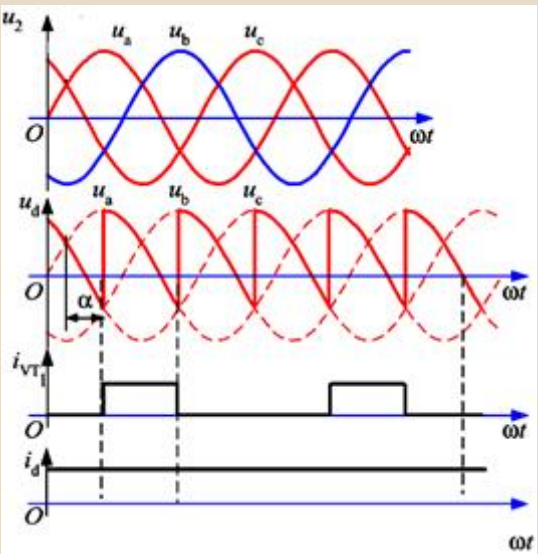


图3-12  $u_d$ 、 $i_d$ 和 $i_{VT1}$ 的波形图

（2）负载电压的平均值为

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

负载电流的平均值为

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

流过晶闸管的额定电流为

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

流过晶闸管电流的有效值为

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

12. 在三相桥式全控整流电路中，电阻性负载，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：（1）假设VT<sub>1</sub>不能导通，整流电压  $u_d$  波形如图3-13所示

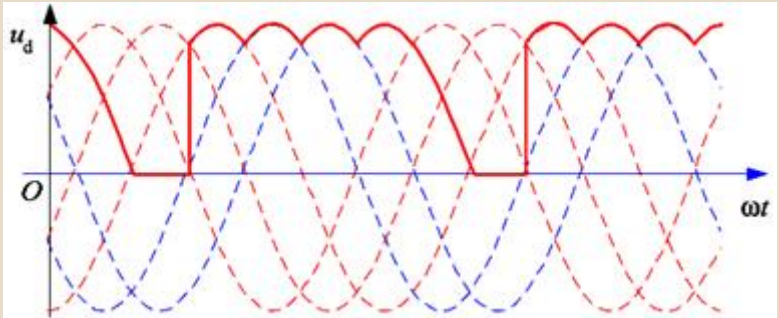


图3-13 整流电压  $u_d$  波形图

（2）假设VT<sub>1</sub>被击穿而短路，则当晶闸管VT<sub>3</sub>或VT<sub>5</sub>导通时，将发生电源相间短路，使得VT<sub>3</sub>、VT<sub>5</sub>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  $U_d$ 、 $I_d$ 、 $I_{dVT}$  和  $I_{VT}$ 。

解：（1） $u_d$ 、 $i_d$  和  $i_{VT1}$  的波形如图3-14所示

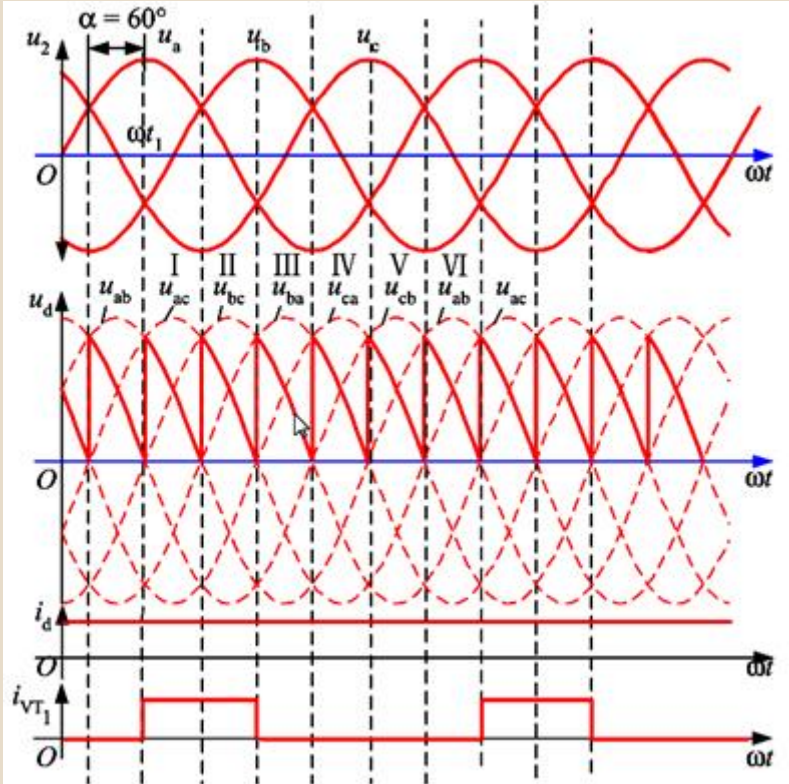


图3-14  $u_d$ 、 $i_d$  和  $i_{VT1}$  的波形图

（2）负载电压的平均值为

$$U_d=2.34U_2\cos\alpha=2.34\times100\times\cos60^\circ=117\text{ (V)}$$

负载电流的平均值为

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

流过晶闸管的额定电流为

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

流过晶闸管的电流有效值为

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

14. 单相全控桥，反电动势阻感负载， $R=1\Omega$ ， $L=\infty$ ， $E=40\text{V}$ ， $U_2=100\text{V}$ ， $L_B=0.5\text{mH}$ ，

当  $\alpha=60^\circ$  时求  $U_d$ 、 $I_d$  与  $\gamma$  的数值，并画出整流电压  $u_d$  的波形。

解：考虑  $L_B$  时，有

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

解方程组得

$$\begin{aligned}U_d&= (\pi R0.9U_2\cos\alpha+2X_BE)/(\pi R+2X_B)=44.55(\text{V}) \\ \Delta U_d&=0.455(\text{V}) \\ I_d &=4.55(\text{A})\end{aligned}$$

又有

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

得出

$$\cos(60^\circ+\gamma)=0.4798$$

换流重叠角为

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

整流电压U<sub>d</sub>的波形如图3-15所示

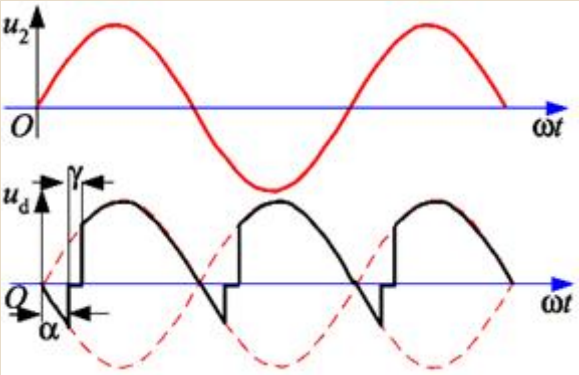


图3-15 整流电压U<sub>d</sub>的波形图

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

**解：**考虑 $L_B$ 时，有

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

解方程组得

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

又有

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

得出

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

换流重叠角为

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

$u_d$ 、 $i_{VT1}$ 和 $i_{VT2}$ 的波形如图3-16所示

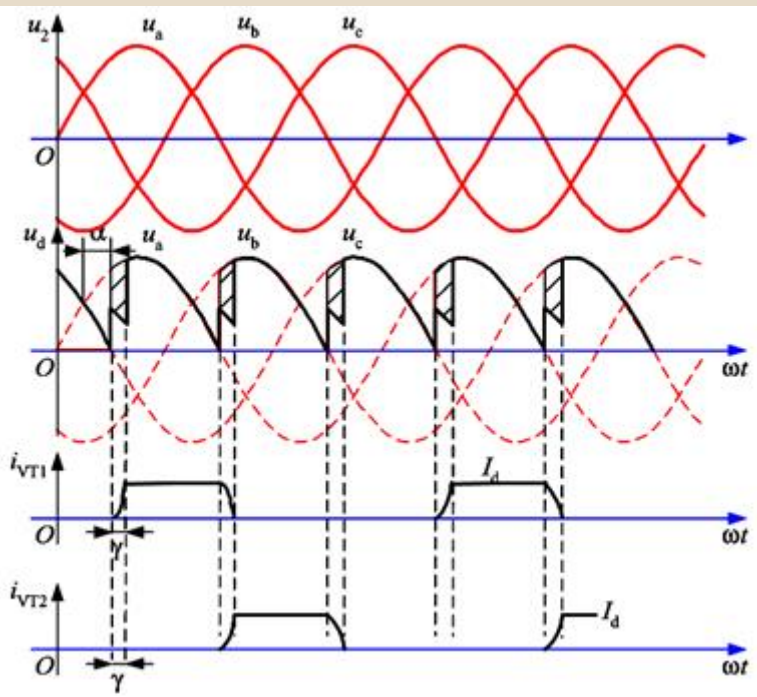


图3-16  $u_d$ 、 $i_{VT1}$ 和 $i_{VT2}$ 的波形图

16. 三相桥式不可控整流电路，阻感负载， $R=2\Omega, L=\infty, U_2=100V, X_B=0.1\Omega$ ，求  $U_d$ 、 $I_d$ 、 $I_{VD}$ 、 $I_2$  和  $\gamma$  的值并画出  $u_d$ 、 $i_{VD}$ 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

$$\begin{aligned} U_d &= 2.34U_2\cos\alpha - \Delta U_d \\ \Delta U_d &= 3X_B I_d / \pi \\ I_d &= U_d / R \end{aligned}$$

解方程组得

$$U_d = 2.34U_2\cos\alpha / (1 + 3X_B / \pi R) = 223.3\text{ (V)}$$

$$I_d = 111.65\text{ (A)}$$

又有

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

即得出

$$\cos\gamma = 0.909$$

换流重叠角为

$$\gamma = 24.65^\circ$$

二极管电流有效值为

$$I_{VD} = I_d / 3 = 111.65 / 3 = 37.22\text{ (A)}$$

变压器二次测电流的有效值为

$$I_{2s} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = 91.16\text{ (A)}$$

$u_d$ 、 $i_{VD1}$ 和 $i_2$ 的波形如图3-17所示



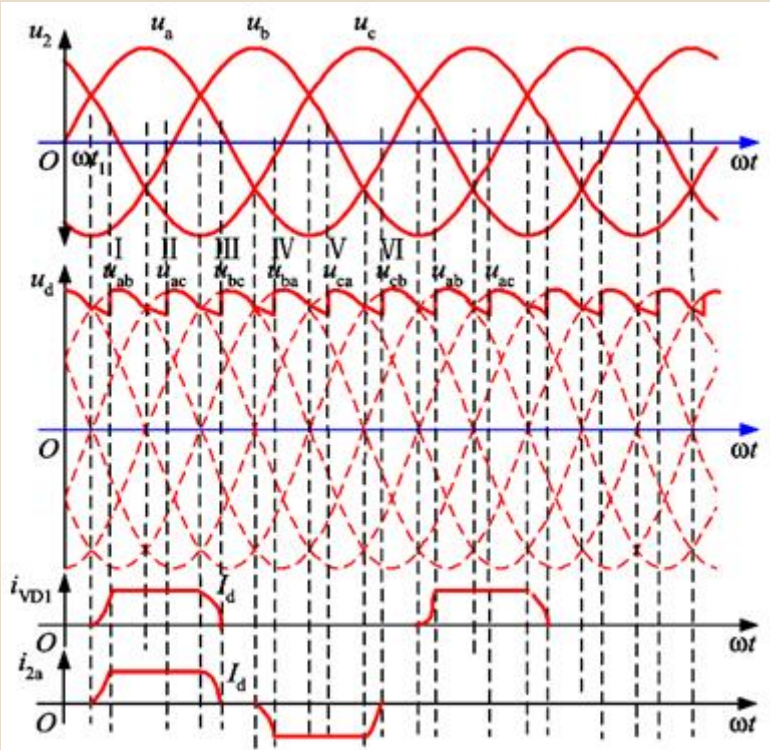


图3-17  $u_d$ 、 $i_{VD1}$ 和 $i_2$ 的波形图

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 $\gamma$ 并分别画出 $u_d$ 与 $i_{VT}$ 的波形。

解：（1）当 $L_B=0$ 时

$$U_d=2.34U_2\cos\alpha=2.34\times220\times\cos60^\circ=257.4\text{（V）}$$

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

（2）当 $L_B=1\text{mH}$ 时

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

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

$$I_d=\left(U_d-E\right)/R$$

解方程组得

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

$$I_d=44.15\text{（A）}$$

$$\Delta U_d=13.25\text{（V）}$$

又有

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

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

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

$u_d$ 、 $I_{VT1}$ 和 $I_{VT2}$ 的波形如图3-18所示



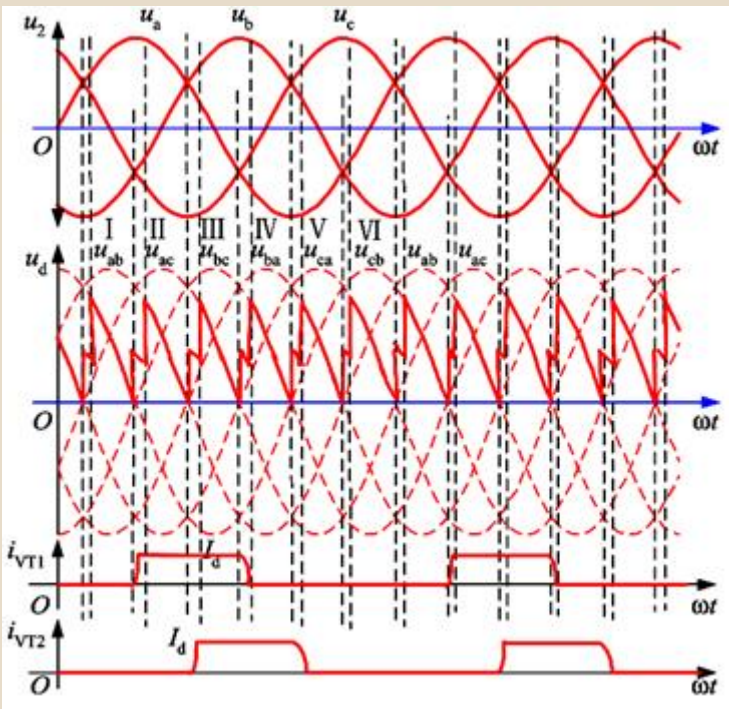


图3-18  $u_d$ 、 $i_{VT1}$ 和 $i_{VT2}$ 的波形图

18. 单相桥式全控整流电路，其整流输出电压中含有哪些次数的谐波？其中幅值最大的是哪一次？变压器二次电流中含有哪些次数的谐波？其中主要的是哪几次？

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

19. 三相桥式全控整流电路，其整流输出电压中含有哪些次数的谐波？其中幅值最大的是哪一次？变压器二次电流中含有哪些次数的谐波？其中主要的是哪几次？

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

20. 试计算第3题中  $i_2$  的3、5、7次谐波分量的有效值  $I_{23}$ 、 $I_{25}$ 、 $I_{27}$ 。

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

$$I_d=38.97\text{（A）}$$

于是可得3、5、7次谐波分量的有效值为

$$\begin{aligned} I_{23} &= 2\sqrt{2} I_d / 3\pi = 2\sqrt{2} \times 38.97 / 3\pi = 11.70(\text{A}) \\ I_{25} &= 2\sqrt{2} I_d / 5\pi = 2\sqrt{2} \times 38.97 / 5\pi = 7.02\text{（A）} \\ I_{27} &= 2\sqrt{2} I_d / 7\pi = 2\sqrt{2} \times 38.97 / 7\pi = 5.01\text{（A）} \end{aligned}$$

21. 试计算第13题中  $i_2$  的5、7次谐波分量的有效值  $I_{25}$ 、 $I_{27}$ 。

解：第13题中，电路为三相桥式全控整流电路，且已知

$$I_d=23.4\text{（A）}$$

由此可计算出 5 次和 7 次谐波分量的有效值为

$$\begin{aligned} I_{25} &= \sqrt{6} I_d / 5\pi = \sqrt{6} \times 23.4 / 5\pi = 3.65\text{（A）} \\ I_{27} &= \sqrt{6} I_d / 7\pi = \sqrt{6} \times 23.4 / 7\pi = 2.61\text{（A）} \end{aligned}$$

22. 试分别计算第3题和第13题电路的输入功率因数。

解：（1）第3题中基波电流的有效值为

$$I_1=2\sqrt{2} I_d / \pi = 2\sqrt{2} \times 38.97 / \pi = 35.1\text{（A）}$$

基波因数为

$$v=I_1 / I=I_1 / I_d=35.1 / 38.97=0.9$$

电路的输入功率因数为

$$\lambda=v \cos\alpha=0.9 \cos 30^\circ=0.78$$

（2）第13题中基波电流的有效值

$$I_1=\sqrt{6} I_d / \pi = \sqrt{6} \times 23.39 / \pi = 18.243\text{（A）}$$

基波因数为

$$\lambda=I_1 / I=I_1 / I_d=0.955$$

电路的输入功率因数为

$$\lambda=\lambda \cos \alpha =0.955 \cos 60^{\circ} =0.48$$

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<sub>2</sub>相等时，双反星形电路的整流电压平均值U<sub>d</sub>是三相桥式电路的1/2，而整流电流平均值I<sub>d</sub>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<sub>d</sub>和整流电流i<sub>d</sub>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：

- （1）一是可以使装置总体的功率容量大；
- （2）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。

25. 12脉波、24脉波整流电路的整流输出电压和交流输入电流中含哪些次数的谐波？

答：（1）在12脉波电路整流电路中

- ① 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·····）次谐波；
- ② 整流输出电压中含有12、24等即12k（k=1，2，3·····）次谐波。

（2）在24脉波整流电路中

- ① 交流输入电流中含有23次、25次、47次、49次等，即24k±1（k=1，2，3·····）次谐波；
- ② 整流输出电压中含有24、48等即24k（k=1，2，3·····）次谐波。

26. 使变流器工作于有源逆变状态的条件是什么？

答：使变流器工作于有源逆变状态的条件有两个：

- （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α>π/2，使U<sub>d</sub>为负值。

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

解：由题意可列出如下3个等式

$$U_d=2.34U_2\cos(\pi-\beta)-\Delta U_d$$

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

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

三式联立求解得

$$U_d=[2.34 \pi U_2 R \cos(\pi-\beta)+3X_BE_M] / (\pi R+3X_B)=-290.3 (V)$$

$$I_d=109.7 (A)$$

计算换流重叠角为

$$\cos \alpha -\cos (\alpha +\gamma )=2 X_B I_d / \sqrt{6} U_2=0.1279$$

$$\cos (120^{\circ}+\gamma )=-0.6279$$

$$\gamma =128.90^{\circ}-120^{\circ}=8.90^{\circ}$$

送回电网的有功功率为

$$P=\left| E_M I_d \right| -I_d^2 R=400\times 109.7-109.7^2\times 1=31.85(W)$$

28. 单相全控桥，反电动势阻感负载， $R=1\Omega, L=\infty, U_2=100V, L=0.5mH$ ，当 $E_M=-99V、\beta=60^{\circ}$ 时求 $U_d、I_d$ 和γ的值。

解：由题意可列出如下3个等式

$$U_d=0.9U_2\cos(\pi-\beta)-\Delta U_d$$

$$\Delta U_d=2X_B I_d / \pi$$

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

三式联立求解得

$$U_d = [\pi R 0.9 U_2 \cos(\pi - \beta) + 2 X_B E_M] / (\pi R + 2 X_B) = -49.91 \text{ (V)}$$

$$I_d = 49.09 \text{ (A)}$$

又有

$$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \sqrt{2} I_d X_B / U_2 = 0.2181$$

可得

$$\cos(120^\circ + \gamma) = -0.7181$$

换流重叠角为

$$\gamma = 135.9^\circ - 120^\circ = 15.9^\circ$$

29. 什么是逆变失败？如何防止逆变失败？

答：（1）逆变失败的定义：

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，这种情况称为逆变失败又称逆变颠覆。

（2）防止逆变失败的方法有：

- ① 采用精确可靠的触发电路；
- ② 使用性能良好的晶闸管，保证交流电源的质量，留出充足的换相裕量角 β 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：（1）单相桥式全控整流电路

- ① 当负载为电阻负载时，要求的晶闸管移相范围是0～180°；
- ② 当负载为电感负载时，要求的晶闸管移相范围是0～90°。

（2）三相桥式全控整流电路

- ① 当负载为电阻负载时，要求的晶闸管移相范围是0～120°；
- ② 当负载为电感负载时，要求的晶闸管移相范围是0～90°。

1. 无源逆变电路和有源逆变电路有何不同？

答：无源逆变电路和有源逆变电路的不同主要表现在：

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连接。

2. 换流方式有哪几种？各有什么特点？

答：（1）换流方式有4种：

① 器件换流；

② 电网换流；

③ 负载换流；

④ 强迫换流。

（2）不同换流方式的特点：

① 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；

② 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，它不需要器件具有门极可关断能力，也不需要为换流附加任何元件，但是不适用于没有交流电网的无源逆变电路；

③ 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；

④ 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？二者各有何特点？

答：（1）电压型逆变电路和电流型逆变电路的定义：

按照逆变电路直流测电源性质分类，直流侧是电压源的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。

（2）电压型逆变电路的主要特点：

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。

（3）电流型逆变电路的主要特点：

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过径，因此交流侧输出电流波形为矩形波，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。

4. 电压型逆变电路中反馈二极管的作用是什么？为什么电流型逆变电路中没有反馈二极管？

答：（1）电压型逆变电路中反馈二极管的作用为：

在电压型逆变电路中，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。当输出交流电压和电流的极性相同时，电流经电路中的可控开关器件流通，而当输出电压电流极性相反时，由反馈二极管提供电流通路。

（2）电流型逆变电路中没有反馈二极管的原因是：

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

5. 三相桥式电压型逆变电路，180° 导电方式，U<sub>d</sub>＝100V。试求输出相电压的基波幅值U<sub>UN1m</sub>和有效值U<sub>UN1</sub>、输出线电压的基波幅值U<sub>UV1m</sub>和有效值U<sub>UV1</sub>、输出线电压中5次谐波的有效值U<sub>UV5</sub>。

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<sub>UV5</sub>的表达式为

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

其有效值为

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

6. 并联谐振式逆变电路利用负载电压进行换相，为保证换相应满足什么条件？

答：并联谐振式逆变电路利用负载电压进行换相，为保证换相应满足什么条件是：

假设在t时刻触发VT<sub>2</sub>、VT<sub>3</sub>使其导通，负载电压u<sub>o</sub>就通过VT<sub>2</sub>、VT<sub>3</sub>施加在VT<sub>1</sub>、VT<sub>4</sub>上，使其承受反向电压关断，电流从VT<sub>1</sub>、VT<sub>4</sub>向VT<sub>2</sub>、VT<sub>3</sub>转移，触发VT<sub>2</sub>、VT<sub>3</sub>时刻t必须在u<sub>o</sub>过零前并留有足够的裕量，才能使换流顺利完成。

7. 串联二极管式电流型逆变电路中，二极管的作用是什么？试分析换相过程。

答：（1）二极管的主要作用有：

- ① 一是为换流电容器充电提供通道，并使换流电容的电压能够得以保持，为晶闸管换流做好准备；
- ② 二是使换流电容的电压能够施加到换流过程中刚刚关断的晶闸管上，使晶闸管在关断之后能够承受一定时间的反向电压，确保晶闸管可靠关断，从而确保晶闸管换流成功。

（2）换相过程分析

- ① 以VT<sub>1</sub>和VT<sub>3</sub>之间的换流为例，给VT<sub>3</sub>施加触发脉冲，由于换流电容C<sub>13</sub>电压的作用，使VT<sub>3</sub>导通，而VT<sub>1</sub>被施以反向电压而关断。直流电流I<sub>d</sub>从VT<sub>1</sub>换到VT<sub>3</sub>上，C<sub>13</sub>通过VD<sub>1</sub>、U相负载、W相负载、VD<sub>2</sub>、VT<sub>2</sub>、直流电源和VT<sub>3</sub>放电。因放电电流恒为I<sub>d</sub>，故称恒流放电阶段；
- ② 在C<sub>13</sub>电压u<sub>C13</sub>下降到零之前，VT<sub>1</sub>一直承受反压，只要反压时间大于晶闸管关断时间t<sub>q</sub>，就能保证可靠关断。u<sub>C13</sub>降到零之后在U相负载电感的作用下，开始对C<sub>13</sub>反向充电。如忽略负载中电阻的压降，则在u<sub>C13</sub>=0时刻后，二极管VD<sub>3</sub>受到正向偏置而导通，开始流过电流，两个二极管同时导通，进入二极管换流阶段；
- ③ 随着C<sub>13</sub>充电电压不断增高，充电电流逐渐减小，到某一时刻充电电流减到零，VD<sub>1</sub>承受反压而关断，二极管换流阶段结束；
- ④ 之后，进入VT<sub>2</sub>、VT<sub>3</sub>稳定导通阶段。

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：（1）逆变电路多重化的目的为：

- ① 使总体上装置的功率等级提高；
- ② 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。

（2）实现逆变电路多重化的方法：

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：

- ① 串联多重，串联多重是把几个逆变电路的输出串联起来；
  - ② 并联多重，并联多重是把几个逆变电路的输出并联起来。
- （3）串联多重和并联多重逆变电路的使用场合：
- ① 电路多用于电压型逆串联多重逆变变电路的多重化；
  - ② 并联多重逆变电路多用于电流型逆变电路得多重化。

9. 多电平逆变电路主要有哪几种形式？各有什么特点？

答：（1）多电平逆变电路主要有以下三种形式：

- ① 飞跨电容型逆变电路；
  - ② 中点嵌位型逆变电路；
  - ③ 单元串联型逆变电路。
- （2）不同形式多电平逆变电路的特点：
- ① 飞跨电容型逆变电路：电容器件使用多，而且需控制电容上电压，应用较少；
  - ② 中点嵌位型逆变电路：输出电压谐波小，晶闸管承受的电压减小，使用于高压大容量场合；
  - ③ 单元串联型逆变电路：其组成中每个全桥逆变电路都有一个独立的直流电源，因此输出电压的串联可不用变压器，串联单元越多，输出电压越高，波形也更接近正弦波。



1．简述图5-1所示的降压斩波电路的工作原理。

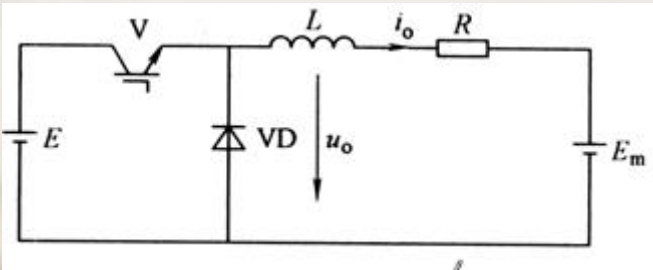


图5-1 所示的降压斩波电路

答：降压斩波器的工作原理是：

（1）在一个控制周期中，控制V导通一段时间 $t_{on}$ ，由电源E向L、R、M供电，在此期间， $u_o=E$ ，负载电流 $i_o$ 按指数曲线上升；

（2）然后控制V关断一段时间 $t_{off}$ ，此时电感L通过二极管VD向R和M供电， $u_o=0$ 。一个周期内的平均电压为

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

（3）其中输出的电压平均值 $U_o$ 最大为E，减小占空比 $\alpha$ ， $U_o$ 随之减小。故输出电压 $U_o$ 小于电源电压E，起到降压的作用。

2．在图5-1所示的降压斩波电路中，已知 $E=200V$ ， $R=10\Omega$ ，L值极大， $E_m=50V$ ，采用脉宽调制方式，当 $T=40\mu s$ ， $t_{on}=20\mu s$ 时，计算输出电压平均值 $U_o$ 和输出电流平均值 $I_o$ 。

解：由于L值极大，故负载电流连续，于是输出电压平均值为

$$U_o=\frac{t_{on}}{T}E=\frac{20}{40}\times 200=100(V)$$

输出电流平均值为

$$I_o=\frac{U_o-E_M}{R}=\frac{100-50}{10}=5(A)$$

3．在图5-1所示的降压斩波电路中， $E=100V$ ， $L=1mH$ ， $R=0.5\Omega$ ， $E_m=20V$ ，采用脉宽调制控制方式， $T=20\mu s$ ，当 $t_{on}=10\mu s$ 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

$$m=\frac{E_M}{E}=\frac{20}{100}=0.2$$

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

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

$$\alpha\rho=\frac{t_{on}}{\tau}=0.005$$

由于

$$\frac{e^{\alpha\rho}-1}{e^{\rho}-1}=\frac{e^{0.005}-1}{e^{0.01}-1}=0.499>m$$

所以，输出电流连续。

此时，输出平均电压为

$$U_o=\frac{t_{on}}{T}E=\frac{10\times 100}{20}=50(V)$$

输出平均电流为

$$I_o=\frac{U_o-E_M}{R}=\frac{50-20}{0.5}=60(A)$$

输出电流的最大和最小值瞬时值分别为

$$I_{\max}=\left(\frac{1-e^{-\alpha\rho}}{1-e^{-\rho}}-m\right)\frac{E}{R}=\left(\frac{1-e^{-0.005}}{1-e^{-0.01}}-0.1\right)\frac{100}{0.5}=80.3(A)$$

$$I_{\min}=\left(\frac{e^{a\rho}-1}{e^{\rho}-1}-m\right)\frac{E}{R}=\left(\frac{e^{0.005}-1}{e^{0.01}-1}-0.1\right)\frac{100}{0.5}=79.8\text{ (A)}$$

4. 简述图5-2所示升压斩波电路的基本工作原理。

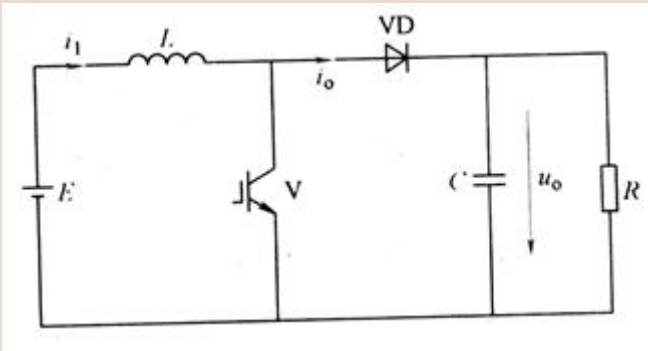


图5-2 所示升压斩波电路

**答：**（1）假设电路中电感L值很大，电容C值也很大。当V处于通态时，电源E向电感L充电，充电电流基本恒定为I<sub>1</sub>，同时电容C上的电压向负载R供电，因C值很大，基本保持输出电压为恒值U<sub>o</sub>。设V处于通态的时间为t<sub>on</sub>，此阶段电感L上积蓄的能量为EI<sub>1</sub>t<sub>on</sub>；

（2）当V处于断态时E和L共同向电容C充电并向负载R提供能量。设V处于断态的时间为*t<sub>off</sub>*，则在此期间电感L释放的能量为*(U<sub>o</sub>－E)I<sub>1</sub>t<sub>off</sub>*。当电路工作于稳态时，一个周期T中电感L积蓄的能量与释放的能量相等，即

$$EI_1t_{on}=(U_o-E)I_1t_{off}$$

化简得

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

式中，*T / t<sub>off</sub> ≥ 1*，输出电压高于电源电压，故称该电路为升压斩波电路。

5. 在图5-2所示的升压斩波电路中，已知E=50V， L 值和C值极大，R=25 Ω，采用脉宽调制控制方式，当T=50 μ s， t<sub>on</sub>=20 μ s时，计算输出电压平均值U<sub>o</sub>和输出电流平均值I<sub>o</sub>。

**解：**输出电压平均值为

$$U_o=\frac{T}{t_{off}}E=\frac{50}{50-20}\times 50=83.33\text{ (V)}$$

输出电流平均值为

$$I_o=\frac{U_o}{R}=\frac{83.33}{25}=3.333\text{ (A)}$$

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：**（1）升降压斩波电路的基本原理是：

① 当可控开关V处于通态时，电源E经可控开关V向电感L供电使其贮存能量，此时电流为i<sub>1</sub>，电容C维持输出电压基本恒定并向负载R供电。此后，控制V关断，电感L中贮存的能量向负载释放，电流为i<sub>2</sub>。负载电压极性为上负下正，与电源电压极性相反，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<sub>2</sub>。负载电压极性为上负下正，与电源电压极性相反；

② 稳态时，一个周期T内电感L两端电压u<sub>L</sub>对时间的积分为零，即电感积蓄的能量与释放的能量相等。

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

当V处于通态期间，u<sub>L</sub>=E；而当V处于断态期间，u<sub>L</sub>=－u<sub>o</sub>。于是有

$$\begin{aligned}EI_1t_{on}&=(U_o-E)I_1t_{off}\\E\cdot t_{on}&=U_o\cdot t_{off}\end{aligned}$$

所以，输出电压为

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

改变占空比a，输出电压U<sub>o</sub>既可以比电源电压E高，也可以比电源电压E低。当0<a<1/2时为降压，当1/2<a<1时为升压，因此将该电路称作升降压斩波电路。

（2）Cuk斩波电路的基本原理

① 当V处于通态时，E－L<sub>1</sub>－V回路和R－L<sub>2</sub>－C－V回路分别流过电流。当V处于断态时，E－L<sub>1</sub>－C－VD回路和R－L<sub>2</sub>－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，相当于开关S在A、B两点之间交替切换；

② 假设电容C很大使电压u<sub>C</sub>的脉动足够小时，当开关S合到B点时，B点电压u<sub>B</sub>=0，A点电压u<sub>A</sub>=-u<sub>C</sub>；相反，当S合到A点时，u<sub>B</sub>=u<sub>C</sub>，u<sub>A</sub>=0。因此，B点电压u<sub>B</sub>的平均值为 $U_s = \frac{t_{off}}{T} U_c$ （U<sub>C</sub>为电容电压u<sub>c</sub>的平均值），又因电感L<sub>1</sub>的电压平均值为零，所以 $E = U_s = \frac{t_{off}}{T} U_c$ 。另一方面，A点的电压平均值为 $U_A = -\frac{t_{on}}{T} U_c$ ，且L<sub>2</sub>的电压平均值为零，按照输出电压U<sub>o</sub>的极性，有 $U_o = \frac{t_{on}}{T} U_c$ 。于是可得出输出电压U<sub>o</sub>与电源电压E的关系为

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

（ 3 ）升降压斩波电路和Cuk斩波电路的比较

- ① 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；
- ② 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，没有阶跃变化，有利于对输入和输出进行滤波。

7. 试绘制Sepic斩波电路和Zeta斩波电路的原理图，并推导其输入输出关系。

解：（ 1 ）Sepic斩波电路

- ① 原理图如图5-3所示。

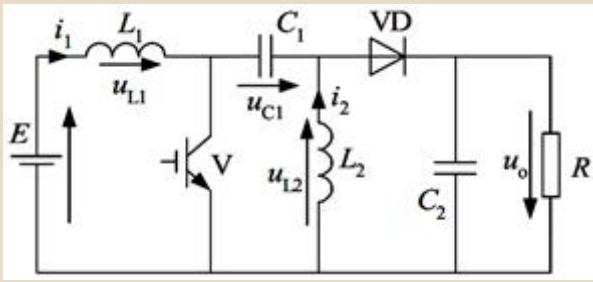


图5-3 Sepic斩波电路原理图

② Sepic斩波电路输入输出关系

在V导通t<sub>on</sub>期间

$$u_{L1} = E$$

$$u_{L2} = u_{C1}$$

在V关断 $t_{off}$ 期间

$$u_{L1} = E - u_o - u_{C1}$$

$$u_{L2} = -u_o$$

当电路工作于稳态时，电感L<sub>1</sub>、L<sub>2</sub>的电压平均值均为零，则下面的式子成立

$$E t_{on} + (E - u_o - u_{C1}) t_{off} = 0$$

$$u_{C1} t_{on} - u_o t_{off} = 0$$

由以上两式即可得出

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

（ 2 ）Zeta斩波电路

- ① 原理图如5-4所示。

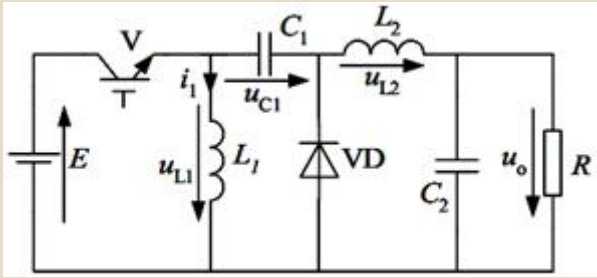


图5-4 Zeta斩波电路原理图

② Zeta斩波电路输入输出关系

在V导通t<sub>on</sub>期间

$$u_{L1} = E$$

$$u_{L2} = E - u_o - u_{C1}$$

在V关断 $t_{off}$ 期间

$$u_{L1}=u_{C1}$$

$$u_{L2}=-u_o$$

当电路工作于稳态时，电感 $L_1$ 、 $L_2$ 的电压平均值均为零，则满足

$$Et_{on}+u_{C1}t_{off}=0$$

$$(E-u_o-u_{C1})t_{on}-u_ot_{off}=0$$

由以上两式即可得出

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

8．分析图5-5所示电流可逆斩波电路，并结合图5-6的波形，绘制出各个阶段电流流通的路径并标明电流方向。

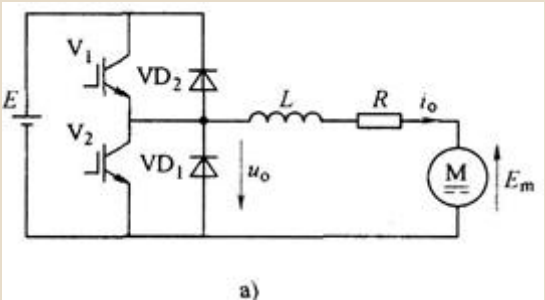


图5-5 所示电流可逆斩波电路

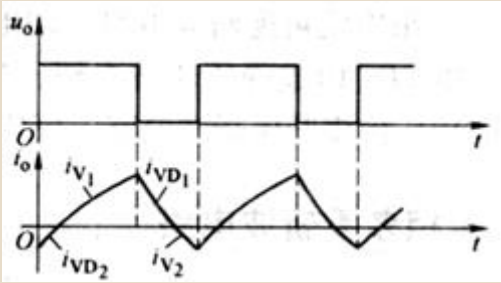


图5-6 所示电流可逆斩波电路波形

答：（1）电流可逆斩波电路分析

- ①  $V_1$ 和 $VD_1$ 构成降压斩波电路，由电源向直流电动机供电，电动机为电动运行，工作于第1象限；
- ②  $V_2$ 和 $VD_2$ 构成升压斩波电路，把直流电动机的动能转变为电能反馈到电源，使电动机作再生制动运行，工作于第2象限。

（2）各阶段器件导通情况及电流路径

- ①  $V_1$ 导通，电源向负载供电

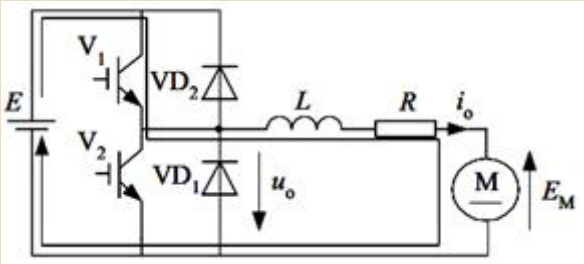


图5-7  $V_1$ 导通时电流路径

- ②  $V_1$ 关断， $VD_1$ 续流

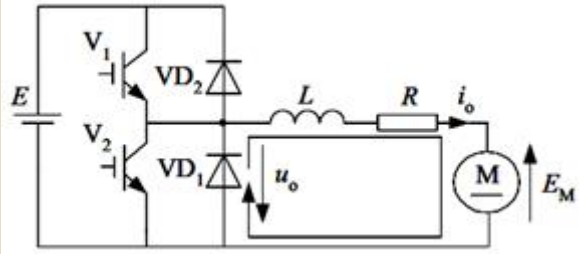


图5-8  $V_1$ 关断时电流路径

- ③  $V_2$ 导通， $L$ 蓄能

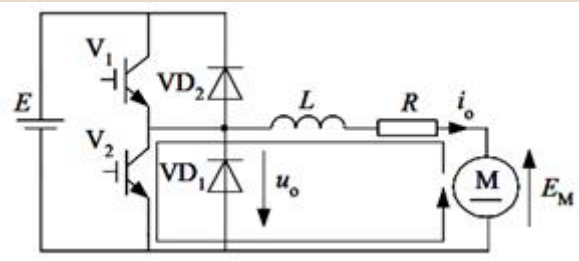


图5-9  $V_2$ 导通时电流路径

④  $V_2$ 关断， $VD_2$ 导通，向电源回馈能量

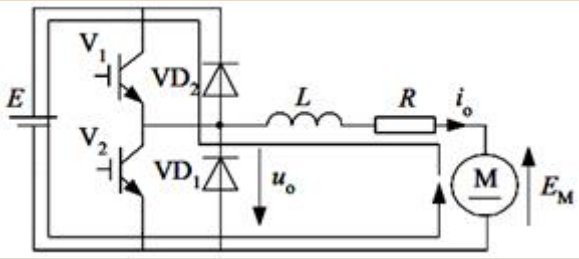


图5-10  $V_2$ 关断时电流路径

9. 对于图5-11所示的桥式可逆斩波电路，若需使电动机工作于反转电动状态，试分析此时电路的工作情况，并绘出相应的电流流通过程图，同时标明电流流向。

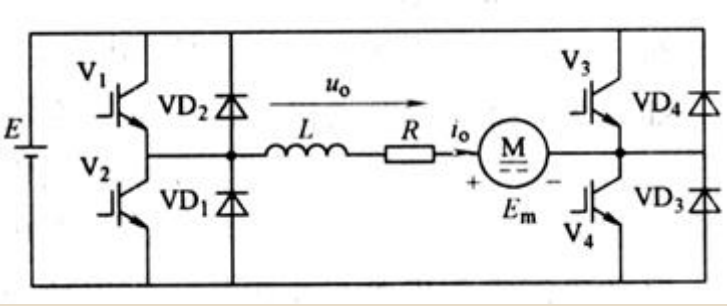


图5-11 所示的桥式可逆斩波电路

答：（1）电路分析

要使电动机工作于反转电动状态时，由 $V_3$ 和 $VD_3$ 构成的降压斩波电路工作，此时需要 $V_2$ 保持导通，与 $V_3$ 和 $VD_3$ 构成的降压斩波电路相配合。

（2）电流流通过程

① 当 $V_3$ 导通时，电源向M供电，使其反转电动，电流路径如图5-12所示。

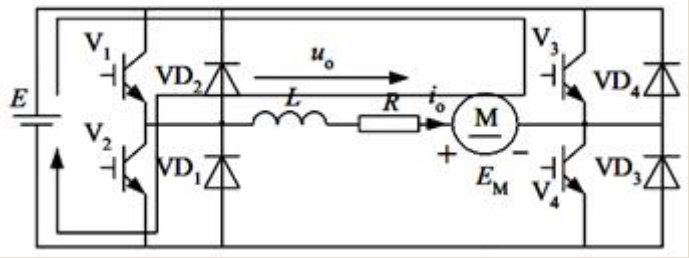


图5-12  $V_3$ 导通时电流路径图

② 当 $V_3$ 关断时，负载通过 $VD_3$ 续流，电流路径如图5-13所示。

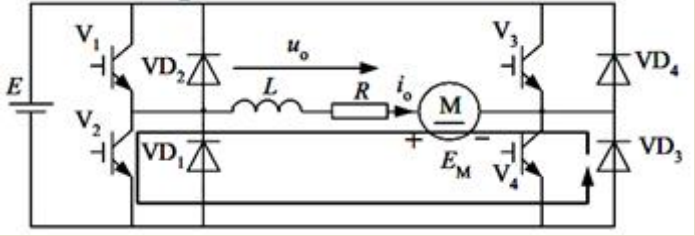


图5-13  $V_3$ 关断时电流路径图

10. 多相多重斩波电路有何优点？

答：多相多重斩波电路的优点有：

（1）多相多重斩波电路因在电源与负载间接入了多个结构相同的基本斩波电路，使得输入电源电流和输出负载电流的脉动频率提高、脉动幅度减小，谐波分量比单个斩波电路时显著减小，对输入和输出电流滤波更容易，滤波电感减小。

（2）此外，多相多重斩波电路还具有备用功能，各斩波单元之间互为备用，总体可靠性提高。

11. 试分析正激电路和反激电路中的开关和整流二极管在工作时承受的最大电压、最大电流和平均电流。

答：（1）正激电路

电路的工作过程为：当开关S开通后，变压器绕组 $W_1$ 两端的电压为上正下负。因此 $VD_1$ 处于通态， $VD_2$ 处于断态，电感L的电流逐渐增长；S关断后，电感L通过 $VD_2$ 续流， $VD_1$ 关断，L的电流逐渐下降。S关断后变压器的励磁电流经绕组 $W_3$ 和 $VD_3$ 流回电源。

开关在工作时承受的最大电压为



$$u_s=(1+\frac{N_1}{N_3})U_1$$

整流二极管在工作时承受的最大电压为

$$u_{VD1}=\frac{N_2}{N_3}U_1$$

电流连续时，输入输出电压关系为

$$u_{VD1}=\frac{N_2}{N_3}U_1$$

在负载为零的极限情况下，输入输出电压关系为

$$U_o=\frac{N_2}{N_1}U_i$$

（2）反激电路

电路的工作过程为：当开关S开通后，绕组W<sub>1</sub>的电流线性增长，电感储能增加；S关断后，绕组W<sub>1</sub>的电流被切断，变压器中的磁场能量通过绕组W<sub>2</sub>和VD向输出端释放。

开关在工作时承受的最大电压为

$$u_s=U_i+\frac{N_1}{N_2}U_o$$

整流二极管在工作时承受的最大电压为

$$u_{VD}=U_o+\frac{N_2}{N_1}U_i$$

电流连续时，输入输出电压关系为

$$\frac{U_o}{U_i}=\frac{N_2}{N_1}\frac{t_{on}}{t_{off}}$$

在负载为零的极限情况下，输入输出电压关系为

$$U_o\rightarrow\infty_i$$

这将损坏电路中的元件，因此反激电路不应工作于负载开路状态。

12．试分析全桥、半桥和推挽电路中的开关和整流二极管在工作中承受的最大电压、最大电流和平均电流。

答：（1）全桥电路

开关在工作时承受的最大电压为

$$u_s=U_i$$

整流二极管在工作时承受的最大电压为

$$u_{VD}=\frac{N_2}{N_1}U_i$$

滤波电感电流连续时，输入输出电压关系

$$\frac{U_o}{U_i}=\frac{N_2}{N_1}\frac{2t_{on}}{T}$$

滤波电感电流连续时，输入输出电压关系

$$U_o=\frac{N_2}{N_1}U_i$$

（2）半桥电路

开关在工作时承受的最大电压

$$u_s=U_i$$

整流二极管在工作时承受的最大电压

$$u_{VD}=\frac{N_2}{N_1}U_i$$

滤波电感电流连续时，输入输出电压关系

$$\frac{U_o}{U_i}=\frac{N_2}{N_1}\frac{t_{on}}{T}$$

滤波电感电流连续时，输入输出电压关系

$$U_o=\frac{N_2}{N_1}\frac{U_i}{2}$$

（3）推挽电路

开关在工作时承受的最大电压

$$u_{L1}=u_{C1}$$

整流二极管在工作时承受的最大电压

$$u_{VD}=\frac{2N_2}{N_1}U_i$$

滤波电感电流连续时，输入输出电压关系

$$\frac{U_o}{U_i}=\frac{N_2}{N_1}\frac{2t_{on}}{T}$$

滤波电感电流连续时，输入输出电压关系

$$U_o=\frac{N_2}{N_1}U_i$$

13．全桥和半桥电路对驱动电路有什么要求？

答：（1）全桥电路对驱动电路的要求：

全桥电路需要四组驱动电路，由于有两个管子的发射极连在一起，可共用一个电源，所以只需要三组电源；

（2）半桥电路对驱动电路的要求：

半桥电路需要两组驱动电路，两组电源。

14．试分析全桥整流电路和全波整流电路中二极管承受的最大电压、最大电流和平均电流。

答：两种电路中二极管承受最大电压、电流及平均电流的情况如表5-1所示。

表5-1 全桥整流电路和全波整流电路中二极管承受的最大电压、最大电流和平均电流

	最大电压	最大电流	平均电流
全桥整流	$U_m$	$I_d$	$\frac{1}{2}I_d$
全波整流	$2U_m$	$I_d$	$\frac{1}{2}I_d$

15．一台输出电压为5V、输出电流为20A的开关电源：

（1）如果用全桥整流电路，并采用快恢复二极管，其整流电路中二极管的总损耗是多少？

（2）如果采用全波整流电路，采用快恢复二极管、肖特基二极管，整流电路中二极管的总损耗是多少？如果采用同步整流电路，整流元件的总损耗是多少？

注：在计算中忽略开关损耗，典型元件参数如表5-2所示。

表5-2 典型元件参数

元件类型	型号	电压 / V	电流 / A	通态压降（通态电阻）
快恢复二极管	25CPF10	100	25	0.98V
肖特基二极管	30CPQ035	30	30	0.64V
MOSFET	IRFP048	60	70	0.018Ω

解：（1）在全桥整流电路中

总损耗为

$$4\times\frac{1}{2}U_dI_d=4\times\frac{1}{2}\times0.98\times20=39.2(W)$$

（2）在全波整流电路中

① 采用快恢复二极管时总损耗为

$$\frac{1}{2}U_dI_d=\frac{1}{2}\times0.98\times20=9.8(W)$$

② 采用肖特基二极管时总损耗为

$$I_o = \frac{U_o - E_M}{R} = \frac{100 - 50}{10} = 5(\text{A})$$

③ 采用同步整流电路时，总损耗为

$$2 \times I^2 R = 2 \times \left( \frac{\sqrt{2}}{2} \times 20 \right)^2 \times 0.018 = 7.2(\text{W})$$

1. 一调光台灯由单相交流调压电路供电，设该台灯可看成电阻负载，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%时的触发延迟角  $\alpha$ 。

解：  $\alpha = 0$  时的输出电压最大，为

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

此时负载电流最大，为

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

因此最大输出功率为

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

输出功率为最大输出功率的80%时，有

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

此时

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

由负载电压公式

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

解得

$$\alpha = 60.54^{\circ}$$

同理，输出功率为最大输出功率的50%时，有

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

由负载电压公式

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

解得

$$\alpha = 90^{\circ}$$

2. 一单相交流调压器，电源为工频220V，阻感串联作为负载，其中  $R = 0.5 \Omega$ ， $L = 2mH$ 。试求：① 触发延迟角  $\alpha$  的变化范围；② 负载电流的最大有效值；③ 最大输出功率及此时电源侧的功率因数；④ 当  $\alpha = \pi/2$  时，晶闸管电流有效值、晶闸管导通角和电源侧功率因数。

解：（1）计算触发延迟角  $\alpha$  的变化范围

负载阻抗角为

$$\varphi = \arctan \left( \frac{\omega L}{R} \right) = \arctan \left( \frac{2\pi \times 50 \times 2 \times 10^{-3}}{0.5} \right) = 0.89864 = 51.49^{\circ}$$

开通角  $\alpha$  的变化范围为

$$\varphi \leq \alpha < \pi$$

即

$$0.89864 \leq \alpha < \pi$$

（2）计算负载电流的最大有效值

负载电流满足如下微分方程式

$$L \frac{di_o}{dt} + Ri_o = \sqrt{2}U_1 \sin \omega t$$

解该方程得

$$i_o = \frac{\sqrt{2}U_1}{Z} \left[ \sin(\omega t - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{\frac{\alpha - \omega t}{\tan \varphi}} \right] \alpha \leq \omega t \leq \alpha + \theta$$

所以，当  $\alpha = \varphi$  时，负载电流最大，最大有效值为

$$I_{o\max}=\frac{U_1}{Z}=\frac{U_1}{\sqrt{R^2+(\omega L)^2}}=273.98\text{A}$$

（3）计算最大输出功率及此时电源侧的功率因数

当  $\alpha = \phi$  时，输出电压最大，此时输出功率最大，为

$$P_{o\max}=I_{o\max}^2R=\left(\frac{220}{\sqrt{R^2+(\omega L)^2}}\right)^2R=37.532(\text{KW})$$

功率因数为

$$\lambda=\frac{P_{o\max}}{U_1I_o}=\frac{37532}{220\times273.98}=0.6227$$

实际上，此时的功率因数也就是负载阻抗角的余弦，即

$$\cos\varphi=0.6227$$

（4）计算  $\alpha = \pi/2$  时，晶闸管电流有效值、晶闸管导通角和电源侧功率因数

先计算晶闸管的导通角，由公式

$$\sin(\frac{\pi}{2}+\theta-0.89864)=\sin(\frac{\pi}{2}-0.89864)e^{\frac{-\theta}{\tan\varphi}}$$

解上式可得晶闸管导通角为

$$\theta=2.375=136.1^{\circ}$$

此时，晶闸管电流有效值为

$$\begin{aligned} I_{VT}&=\frac{U_1}{\sqrt{2\pi}Z}\sqrt{\theta-\frac{\sin\theta\cos(2\alpha+\varphi+\theta)}{\cos\varphi}} \\ &=\frac{220}{\sqrt{2\pi}\times0.803}\times\sqrt{2.375-\frac{\sin2.375\times\cos(\pi+0.89864+2.375)}{\cos0.89864}} \\ &=167.0(\text{A}) \end{aligned}$$

电源侧功率因数为

$$\lambda=\frac{I_o^2R}{U_1I_o}$$

其中

$$I_o=\sqrt{2}I_{VT}=236.1(\text{A})$$

于是可得出

$$\lambda=\frac{I_o^2R}{U_1I_o}=\frac{236.1^2\times0.5}{220\times236.1}=0.5366$$

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：（1）交流调压电路和交流调功电路的区别：

- ① 交流调压电路和交流调功电路的电路形式完全相同，二者的区别在于控制方式不同；
- ② 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；
- ③ 而交流调功电路是将负载与交流电源接通几个周波，再断开几个周波，通过改变接通周波数与断开周波数的比值来调节负载所消耗的平均功率。

（2）交流调压电路和交流调功电路运用负载类型及原因：

- ① 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。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。
- ② 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：（1）交—交变频电路的最高输出频率：

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1/3~1/2。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。

（2）制约输出频率提高的因素：

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之处是什么？其主要用途是什么？

答：（1）交—交变频电路的主要特点是：

① 只用一次变流，效率较高；

② 可方便实现四象限工作；

③ 低频输出时的特性接近正弦波。

（2）交—交变频电路的不足之处是：

① 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；

② 受电网频率和变流电路脉波数的限制，输出频率较低；

③ 输出功率因数较低；

④ 输入电流谐波含量大，频谱复杂。

（3）交—交变频电路的主要用途是：

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。

6. 三相交—交变频电路有哪两种接线方式？它们有什么区别？

答：（1）三相交—交变频电路的两种接线方式为：

① 公共交流母线进线方式；输出星形联结方式；

② 输出星形联结方式。

（2）两种接线方式的区别：

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。

7. 在三相交—交变频电路中，采用梯形波输出控制的好处是什么？为什么？

答：（1）三相交—交变频电路中，采用梯形波输出控制的好处：

可以改善输入功率因数。

（2）采用梯形波输出控制的原因：

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。

8. 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：（1）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。

（2）矩阵式变频电路的主要优点是：

① 输出电压为正弦波；

② 输出频率不受电网频率的限制；

③ 输入电流也可控制为正弦波且和电压同相；

④ 功率因数为1，也可控制为需要的功率因数；

⑤ 能量可双向流动，适用于交流电动机的四象限运行；

⑥ 不通过中间直流环节而直接实现变频，效率较高。

（3）矩阵式变频电路的缺点是：

① 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；

② 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。

（4）矩阵式变频电路具有较好的发展前景的原因：

① 矩阵式变频电路有十分良好的电气性能，使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；

② 其次，和目前广泛应用的交交变频电路相比，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。

所以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。

1. 试说明PWM控制的基本原理。

答：PWM控制的基本原理是：

（1）PWM控制就是对脉冲的宽度进行调制的技术。即通过对一系列脉冲的宽度进行调制，来等效地获得所需要波形（含形状和幅值）；

（2）在采样控制理论中有一条重要的结论：冲量相等而形状不同的窄脉冲加在具有惯性的环节上时，其效果基本相同。冲量即窄脉冲的面积。这里所说的效果基本相同，是指环节的输出响应波形基本相同。上述原理称之为面积等效原理，它是PWM控制技术的重要理论基础；

（3）以正弦PWM控制为例，把正弦半波分为N等份，就可把其看成是N个彼此相连的脉冲序列所组成的波形。这些脉冲宽度相等，都等于  $\pi /N$ ，但幅值不等，且脉冲顶部不是水平直线，而是曲线，各脉冲幅值按正弦规律变化。如果把上述脉冲列利用相同数量的等幅而不等宽的矩形脉冲代替，使矩形脉冲的中点和相应正弦波部分的中点重合，且使矩形脉冲和相应的正弦波部分面积（冲量）相等，就得到PWM波形。可以看出，各脉冲的幅值相等，而宽度是按正弦规律变化的。根据面积等效原理，PWM 波形和正弦半波是等效的。对于正弦波的负半周，也可以用同样的方法得到PWM波形。可见，所得到的PWM波形和期望得到的正弦波等效。像这种脉冲的宽度按正弦规律变化而和正弦波等效的PWM波形，也称SPWM波形。

2. 设图7-1中半周期的脉冲数为5，脉冲幅值为相应正弦波幅值的2倍，试按面积等效原理来计算各脉冲的宽度。

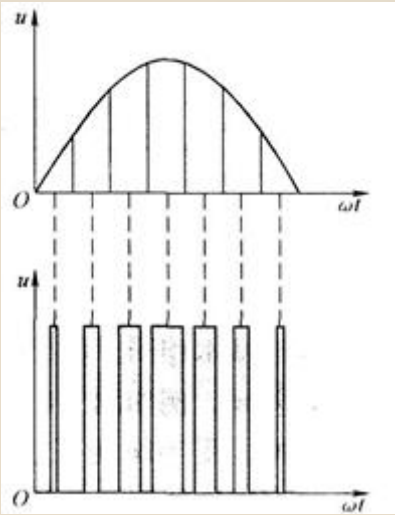


图7-1 用PWM波代替正弦半波

（a）正弦半波 （b）脉冲序列

解：将各脉冲的宽度用di（i=1，2，3，4，5）表示，根据面积等效原理可得

$$\delta_1 = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{5}} U_m \sin \omega t d\omega t}{2U_m} = -\frac{\cos \omega t}{2} \Big|_0^{\frac{\pi}{5}} = 0.09549(\text{rad}) = 0.3040(\text{ms})$$

$$\delta_2 = \frac{\int_{\frac{\pi}{5}}^{\frac{2\pi}{5}} U_m \sin \omega t d\omega t}{2U_m} = -\frac{\cos \omega t}{2} \Big|_{\frac{\pi}{5}}^{\frac{2\pi}{5}} = 0.2500(\text{rad}) = 0.7958(\text{ms})$$

$$\delta_3 = \frac{\int_{\frac{2\pi}{5}}^{\frac{3\pi}{5}} U_m \sin \omega t d\omega t}{2U_m} = -\frac{\cos \omega t}{2} \Big|_{\frac{2\pi}{5}}^{\frac{3\pi}{5}} = 0.3090(\text{rad}) = 0.9836(\text{ms})$$

$$\delta_4 = \frac{\int_{\frac{3\pi}{5}}^{\frac{4\pi}{5}} U_m \sin \omega t d\omega t}{2U_m} = \delta_2 = 0.2500(\text{rad}) = 0.7958(\text{ms})$$

$$\delta_5 = \frac{\int_{\frac{4\pi}{5}}^{\pi} U_m \sin \omega t d\omega t}{2U_m} = \delta_1 = 0.0955(\text{rad}) = 0.3040(\text{ms})$$

3. 单极性和双极性PWM调制有什么区别？在三相桥式PWM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：（1）单极性和双极性PWM调制的区别是：

单极性PWM控制方式的三角波载波在调制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；而双极性PWM控制方式的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。

（2）三相桥式PWM型逆变电路中，输出相电压和线电压SPWM波形的电平种类有：

① 输出相电压有两种电平：0. 5U<sub>d</sub>和－0. 5U<sub>d</sub>；

② 输出线电压有三种电平：U<sub>d</sub>、0、－U<sub>d</sub>。

4. 特定谐波消去法的基本原理是什么？设半个信号波周期内有10个开关时刻（不含0和  $\pi$  时刻）可以控制，可以消去的谐波有几种？

答：（1）特定谐波消去法的基本原理是：

① 首先尽量使波形具有对称性，为消去偶次谐波，应使波形正负两个半周期对称；

② 其次，为消去谐波中的余弦项，简化计算过程，使波形在正半周期前后1/4周期以  $\pi /2$ 为轴线对称。

（2）可以消去的谐波有：

考虑到上述对称性，故半周期内有5个开关时刻可以控制，利用其中的1个自由度控制基波幅值外，剩余的4个自由度可用于消除4种频率的特定谐波。

5. 什么是异步调制？什么是同步调制？二者各有何特点？分段同步调制有什么优点？

答：（1）异步调制的定义：

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。

（2）同步调制的定义：

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。

（3）异步调制的特点：

① 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；

② 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；

③ 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。因此，在采用异步调制方式时，希望采用较高的载波频率，以使在信号波频率较高时仍能保持较大的载波比。

（4）同步调制的特点：

① 在基本同步调制方式中，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；

② 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；

③ 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；

④ 同步调制方式比异步调制方式复杂一些。

（5）分段同步调制的优点：

① 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；

② 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波形的规则采样法？和自然采样法相比，规则采样法有什么优点？

答：（1）SPWM波形的规则采样法定义：

① 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；

② 规则采样法是在自然采样法的基础上得出的；

③ 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 $T_c$ 。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。

（2）和自然采样法相比，规则采样法有什么优点：

① 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；

② 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，所含主要谐波的频率是多少？

答：（1）单相SPWM波形中所含的谐波频率为

$$n\omega_c \pm k\omega_r$$

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。

（2）三相SPWM波形中所含的谐波频率为

$$n\omega_c \pm k\omega_r$$

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

$n=2, 4, 6, \dots$ 时，

$$k = \begin{cases} 6m+1 & m=0,1,\Lambda \\ 6m-1 & m=1,2,\Lambda \end{cases}$$

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：提高PWM逆变电路的直流电压利用率的方法有：

（1）不用正弦波，而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；

（2）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：（1）电流跟踪型PWM变流电路的定义：

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。

（2）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，这是各种跟踪型PWM 交流电路的共同特点。

10. 什么是PWM整流电路？它和相控整流电路的工作原理和性能有何不同？

答：（1）PWM整流电路是定义：

PWM整流电路是指采用PWM控制的整流电路，通过对PWM整流电路的适当控制，可以使其输入电流十分接近正弦波且和输入电压同相位，功率因数接近1。

（2）PWM整流电路和相控整流电路在工作原理和性能方面的不同表现为：

- ① 相控整流电路是对晶闸管的开通起始角进行控制，属于相控方式。PWM整流电路采用SPWM控制技术，为斩控方式；
- ② 相控整流电路交流输入电流中含有较大的谐波分量，且交流输入电流相位滞后于电压，总的功率因数低。PWM整流电路基本工作方式为整流，此时输入电流可以和电压同相位，功率因数近似为1；
- ③ PWM整流电路可以实现能量正反两个方向的流动，即既可以运行在整流状态，从交流侧向直流侧输送能量；也可以运行在逆变状态，从直流侧向交流侧输送能量。而且，这两种方式都可以在单位功率因数下运行；
- ④ 此外，PWM整流电路还可以使交流电流 $I_s$ 超前电压 $U_s90^\circ$ ，电路在向交流电源送出无功功率，成为静止无功功率发生器（SVG），一般不再称之为PWM整流电路了。通过对 $U_{AB}$ 幅值和相位的控制，可以使电流比电压超前或滞后任一角度 $\phi$ 。

11. 在PWM整流电路中，什么是间接电流控制？什么是直接电流控制？为什么后者目前应用较多？

答：（1）间接电流控制的定义：

间接电流控制是按照电源电压、电源阻抗电压及PWM整流器输入端电压的相量关系来进行控制，使输入电流获得预期的幅值和相位，由于不需要引入交流电流反馈，因此称为间接电流控制。

（2）直接电流控制的定义：

直接电流控制是通过求得交流输入电流指令值，再引入交流电流反馈，通过对交流电流的直接控制而使其跟踪指令电流值，因此这种方法称为直接电流控制。

（3）直接电流控制应用较多的原因：

采用滞环电流比较的直接电流控制系统结构简单，电流响应速度快，控制运算中未使用电路参数，系统鲁棒性好，因而获得了较多的应用。



1. 高频化的意义是什么？为什么提高开关频率可以减小滤波器的体积和重量？为什么提高开关频率可以减小变压器的体积和重量？

答：（1）高频化的意义是：

高频化可以减小滤波器的参数，并使变压器小型化，从而有效的降低装置的体积和重量。使装置小型化、轻量化是高频化的意义所在。

（2）提高开关频率可以减小滤波器的体积和重量的原因：

提高开关频率，周期变短，可使滤除开关频率中谐波的电感和电容的参数变小，从而减轻了滤波器的体积和重量。

（3）提高开关频率可以减小变压器的体积和重量的原因：

对于变压器来说，当输入电压为正弦波时， $U=4.44\cdot f\cdot N\cdot B\cdot S$ ，根据变压器的公式可知，当频率f提高时，可减小N、S参数值，从而减小了变压器的体积和重量。

2. 软开关电路可以分为哪几类？其典型拓扑分别是什么样的？各有什么特点？

答：（1）软开关电路的分类：

① 根据电路中主要的开关元件是零电压开通还是零电流关断，可以将软开关电路分为零电压电路和零电流电路两大类；

② 根据软开关技术发展的历程，可将软开关电路分为准谐振电路、零开关PWM电路和零转换PWM电路。

（2）软开关电路典型拓扑及特点：

① 准谐振电路：准谐振电路中电压或电流的波形为正弦半波，谐振的引入使得电路的开关损耗和开关噪声都大大下降，带来的负面问题是谐振电压峰值高，要求器件耐压必须高；谐振电流的有效值很大，电路中存在大量的无功功率的交换，造成电路的导通损耗加大；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控制方式。

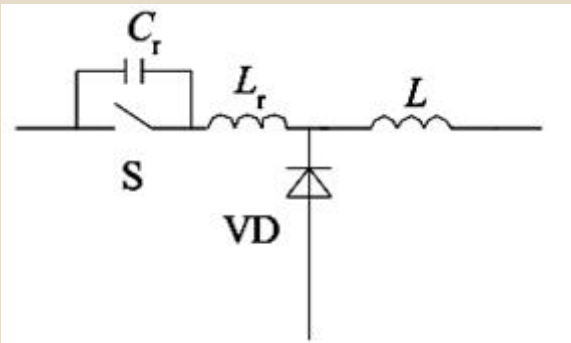


图8-1 零电压开关准谐振电路的基本开关单元

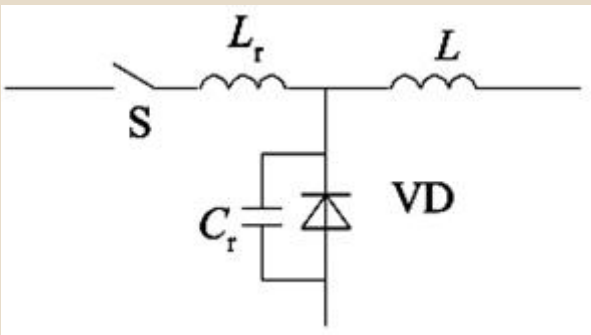


图8-2 零电流开关准谐振电路的基本开关单元

② 零开关PWM电路：这类电路中引入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。同准谐振电路相比，此电路的电压和电流基本上是方波，开关承受的电压明显降低，电路可以采用开关频率固定的PWM控制方式。

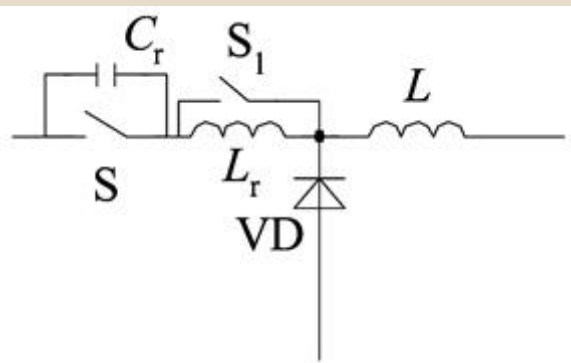


图8-3 零电压开关PWM电路的基本开关单元

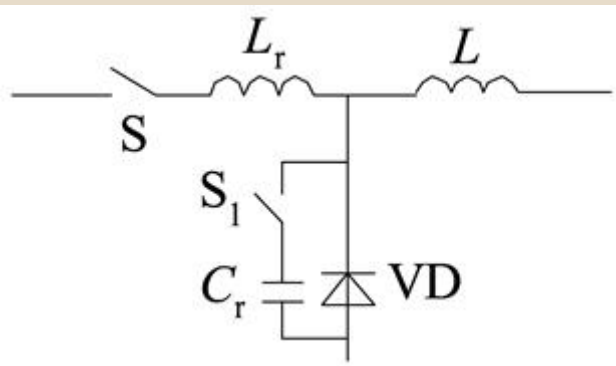


图8-4 零电流开关PWM电路的基本开关单元



③ 零转换PWM电路：这类软开关电路还是采用辅助开关控制谐振的开始时刻，所不同的是，谐振电路是与主开关并联的，因此输入电压和负载电流对电路的谐振过程的影响很小，电路在很宽的输入电压范围内和从零负载到满负载都能工作在软开关状态。而电路中无功率的交换被消减到最小，这使得电路效率有了进一步的提高。

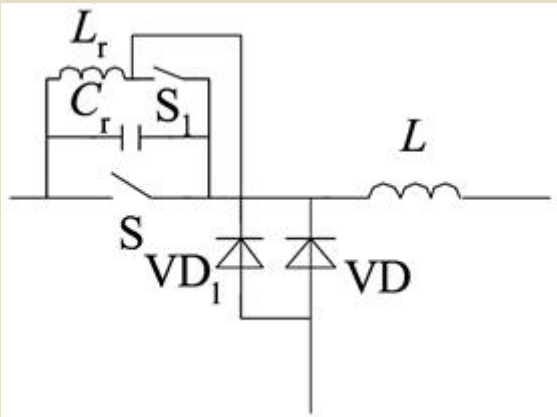


图8-5 零电压转换PWM电路的基本开关单元

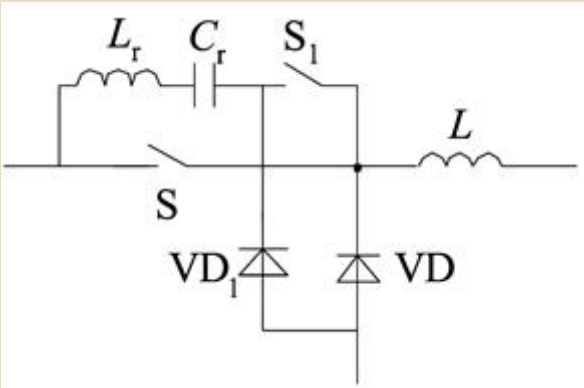


图8-6 零电流转换PWM电路的基本开关单元

3. 在移相全桥零电压开关PWM电路中，如果没有谐振电感 $L_r$ ，电路的工作状况将发生哪些改变？哪些开关仍是软开关？哪些开关将成为硬开关？

答：（1）如果没有谐振电感 $L_r$ ，电路的工作状况将发生以下改变：

如果没有谐振电感 $L_r$ ，电路中的电容 $C_{S1}$ ， $C_{S2}$ 与电感 $L$ 仍可构成谐振电路，而电容 $C_{S3}$ ， $C_{S4}$ 将无法与 $L_r$ 构成谐振回路。

（2）仍是软开关的有：

$S_1$ 、 $S_2$ 仍为软开关。

（3）变成硬开关的有：

$S_3$ 、 $S_4$ 将变为硬开关。

4. 在零电压转换PWM电路中，辅助开关 $S_1$ 和二极管 $VD_1$ 是软开关还是硬开关？为什么？

答：（1）辅助开关 $S_1$ 的开关类型：

根据硬开关的定义可知，在 $S_1$ 开通时， $u_{S1}$ 不等于零；在 $S_1$ 关断时，其上电流也不为零，因此 $S_1$ 为硬开关。

（2）二极管 $VD_1$ 的开关类型：

根据软开关的定义可知，由于电感 $L_r$ 的存在， $S_1$ 开通时的电流上升率受到限制，降低了 $S_1$ 的开通损耗。由于电感 $L_r$ 的存在，使 $VD_1$ 的电流逐步下降到零，自然关断，因此 $VD_1$ 为软开关。

1. 电力电子器件的驱动电路对整个电力电子装置有哪些影响？

答：电力电子器件的驱动电路对整个电力电子装置的影响有：

（1）电力电子器件的驱动电路是电力电子主电路与控制电路之间的接口，是电力电子装置的重要环节，对整个装置的性能有很大的影响；

（2）采用性能良好的驱动电路可使电力电子器件工作在比较理想的开关状态，可缩短开关时间，减少开关损耗，对装置的运行效率、可靠性和安全性都有着重要意义；

（3）另外，对电力电子器件或整个装置的一些保护措施也往往就将近设在驱动电路中，或者通过驱动电路来实现，这使得驱动电路的设计更为重要。

2. 为什么要对电力电子主电路和控制电路进行电气隔离？其基本方法有哪些？各自的基本原理是什么？

答：（1）对电力电子主电路和控制电路进行电气隔离的原因：

① 因为主回路通常是高电压回路，为了避免因为主回路的故障而导致控制回路串入高电压，从而确保了控制电路的安全，所以必须进行电气隔离；

② 同时，由于电力电子器件造成了大量的谐波和电磁辐射，可能会对控制电路造成不小的影响，通过电气隔离可提高控制电路的抗干扰能力，因此也需要进行电气隔离。

（2）电气隔离的基本方法：

电气隔离基本方法是在驱动电路中提供电气隔离环节，一般采用光电隔离和电磁隔离。

（3）不同隔离方法的基本原理：

① 光电隔离

光电隔离是通过输入的电信号驱动发光二极管（LED），使之发出一定波长的光，被光探测器接收而产生光电流，再经过进一步放大后输出。这就完成了电—光—电的转换，从而起到输入、输出、隔离的作用。

② 电磁隔离

电磁隔离是采用线性光耦隔离原理，将输入信号进行转换输出。实现输入、输出和工作电源三者相互隔离，特别适合与需要电隔离的设备仪表配用。

3. 对晶闸管触发电路有哪些基本要求？IGBT、GTR、GTO和电力MOSFET的驱动电路各有什么特点？

答：（1）对晶闸管触发电路应满足下列要求：

① 触发脉冲的宽度应保证晶闸管的可靠导通；

② 触发脉冲应有足够的幅度，对户外寒冷场合，脉冲电流的幅度应增大为器件最大触发电流的3~5倍，脉冲前沿的陡度也需增加，一般需达到 $1\sim 2\text{A}/\mu\text{s}$ ；

③ 所提供的触发脉冲应不超过晶闸管门极的电压、电流和功率定额，且在门极伏安特性的可靠出发区域之内；

④ 应有良好的抗干扰性能、温度稳定性及与主电路的电气隔离。

（2）IGBT驱动电路的特点：

① 驱动电路具有较小的输出电阻；

② 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。

（3）GTR驱动电路的特点：

① 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；

② 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。

（4）GTO驱动电路的特点：

① GTO要求其驱动电路提供的驱动电流的前沿的幅值和陡度要求高，且一般需要在整个导通期间施加正门极电流；

② 关断需施加负门极电流，幅值和陡度要求更高；

③ GTO一般用于大容量电路的场合，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。

（5）电力MOSFET驱动电路的特点：

① 要求驱动电路具有较小的输入电阻；

② 驱动功率小且电路简单。

4. 电力电子器件过电压的产生原因有哪些？

答：电力电子器件过电压的产生原因有外因过电压和内因过电压两类。

（1）外因过电压主要来自雷击和系统中的操作过程等外部原因，包括：

① 操作过电压：由分闸、合闸等开关操作引起的过电压，电网侧的操作过电压会由供电变压器电磁感应耦合，或由变压器绕组之间存在的分布电容静电感应耦合过来；

② 雷击过电压：由雷击引起的过电压。

（2）内因过电压主要来自电力电子装置内部器件的开关过程，包括：

① 换相过电压：由于晶闸管或与全控型器件反并联的续流二极管在换相结束后不能立刻恢复阻断能力，因而有较大的反向电流流过，使残存的载流子恢复，而当恢复了阻断能力时反向电流急剧减小，这样的电流突变会因线路电感而在晶闸管阴阳极之间或与续流二极管反并联的全控型器件两端产生过电压；

② 关断过电压：全控型器件在较高频率下工作，当器件关断时，因正向电流的迅速降低而由线路电感在器件两端感应出的过电压。

5. 电力电子器件过电压保护和过电流保护各有哪些主要方法？

答：（1）过电压保护的方法有：

- ① RC过电压抑制电路；
- ② 反向阻断式RC电路；
- ③ 雪崩二极管、金属氧化物压敏电阻、硒堆和转折二极管（BOD）等非线性元器件限制或吸收过电压。

（2）过电流保护的方法有：

- ① 电子电路作为第一保护措施；
- ② 快速熔断器仅作为短路时的部分区段的保护；
- ③ 直流快速断路器整定在电子电路动作之后实现保护；
- ④ 过电流继电器整定在过载时动作。

6. 电力电子器件缓冲电路是怎样分类的？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：（1）电力电子器件缓冲电路的分类：

① 缓冲电路又称吸收电路，可以分为关断缓冲电路和开通缓冲电路。

- a. 关断缓冲电路又称 $du/dt$ 抑制电路；
- b. 开通缓冲电路又称 $di/dt$ 抑制电路；
- c. 将关断缓冲电路和开通缓冲电路结合在一起，称为复合缓冲电路。

② 还可以用另外的分类方法：

- a. 缓冲电路中储能元件的能量如果消耗在其吸收电阻上，则被称为耗能式缓冲电路；
- b. 如果缓冲电路能将其储能元件的能量回馈给负载或者电源，则被称为馈能式缓冲电路，或称为无损吸收电路。

（2）全控型器件的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。

（3）RCD缓冲电路中各元件的作用：

- ① 开通时， $C_s$ 经 $R_s$ 放电， $R_s$ 起到限制放电电流的作用；
- ② 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。

7. 晶闸管串联使用时需要注意哪些事项？电力MOSFET和IGBT各自并联使用时需要注意哪些问题？

答：（1）晶闸管串联使用时需要注意的事项有：

晶闸管串联使用需注意均压问题，分为静态均压和动态均压两种。

① 对于静态均压，主要是由于各个器件漏电阻不同引起不均压问题。采取措施为：

- a. 首先应选用特性比较一致的器件进行串联；
- b. 同时给每个晶闸管并联均压电阻；
- c. 电阻阻值需均衡考虑，一方面使均压电阻大大小于晶闸管的漏电阻，另一方面也要避免均压电阻过小造成其上损耗过大。

② 对于动态均压，主要是由于串联器件在开通和关断过程中时间参数不一致而引起的过电压问题。采取措施为：

- a. 为各个晶闸管并联阻容电路；
- b. 各晶闸管触发开通时间差尽量小。

（2）电力MOSFET并联使用时需要注意的问题有：

- ① 电力MOSFET的通态电阻 $R_{on}$ 具有正温度系数，并联使用时具有一定的电流自动均衡的能力，因而并联使用比较容易；
- ② 注意选用通态电阻 $R_{on}$ 、开启电压 $U_T$ 、跨导 $G_{fs}$ 和输入电容 $C_{iss}$ 尽量相近的器件并联；
- ③ 电路走线和布局应尽量做到对称，散热条件也要尽量一致；
- ④ 为了更好地动态均流，有时可以在源极电路中串入小电感，起到均流电抗器的作用。

（3）IGBT并联使用时需要注意的问题有：

- ① IGBT的通态压降在1/2或1/3额定电流以下的区段具有负温度系数；
- ② 在以上的区段则具有正温度系数；
- ③ 并联使用时具有一定的电流自动均衡能力，与电力MOSFET类似，易于并联。



1. 简述晶闸管直流调速系统工作于整流状态时的机械特性基本特点。

答：晶闸管直流调速系统工作于整流状态时的机械特性基本特点分电流连续与电流断续两个区域：

① 电流连续时：

其机械特性与由直流发电机供电时的机械特性是相似的，是一组平行的直线，其斜率由于内阻不一定相同而稍有差异。调节  $\alpha$  角，即可调节电动机的转速。

② 电流断续时：

a. 电动机的理想空载转速抬高，这是电流断续时，电动机机械特性的第一个特点；

b. 在电流断续区内电动机的机械特性变软，即负载电流变化很小也可引起很大的转速变化，这是电流断续时，电动机机械特性的第二个特点；

c.  $\alpha$  大的反电动势特性，其电流断续区的范围要比  $\alpha$  小时的电流断续区大，这是由于  $\alpha$  愈大，变压器加到晶闸管阳极上的负电压时间愈长，电流要维持导通，必须要求平波电抗器储存较大的磁能，而电抗器的L为一定值的情况下，要有较大的电流  $I_d$  才行。故随着  $\alpha$  的增加，进入断续区的电流值加大，这是电流断续时，电动机机械特性的第三个特点。

2 在以采用晶闸管为主控器件的直流可逆调速系统中，为实现可逆运行，控制上需采用配合控制方法。那么什么是配合控制方案？它的主要特点是什么？

答：（1）配合控制方案的定义：

配合控制方案即  $\alpha = \beta$  工作制，在  $\alpha = \beta$  配合控制的有环流可逆系统中，电枢可逆线路中虽然没有直流平均环流，但有瞬时脉动环流，所以这样的控制系统称为有环流可逆调速系统。由于脉动环流是自然存在的，所以又称自然环流系统。

（2）配合控制方案的主要特点有：

① 对  $\alpha = \beta$  配合控制的有环流可逆系统，当系统工作时，正、反两组变流器同时输入触发脉冲，严格保证  $\alpha = \beta$  的配合控制关系，假设正组桥为整流，反组桥为逆变，即有  $\alpha_1 = \beta_2$ ， $U_{d\alpha_1} = U_{d\beta_2}$ ，且极性相抵消，两组变流器之间没有直流环流；

② 两组变流器的输出电压瞬时值不等，会产生脉动环流；

③ 为防止环流只流经晶闸管而使电源短路，必须串入环流电抗器  $L_C$  限制环流。

3. 试阐明图10-1交—直—交变频器电路的工作原理，并说明该电路有何局限性。

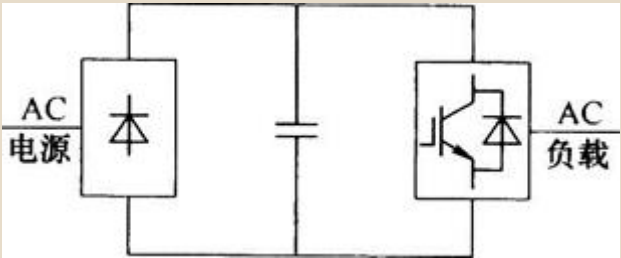


图10-1 不能再生反馈电力的电压型间接交流变流电路

答：（1）工作原理分析：

间接交流变流电路是先将交流电整流为直流电，再将直流电逆变为交流电，图10-1所示的是不能再生反馈电力的电压型间接交流变流电路。

（2）该电路的局限性：

① 该电路中整流部分采用的是不可控整流，它和电容器之间的直流电压和直流电流极性不变，只能由电源向直流电路输送功率，而不能由直流电路向电源反馈电力，这是它的一个局限；

② 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，导致电容电压升高，称为泵升电压。由于该能量无法反馈回交流电源，故电容只能承担少量的反馈能量，否则泵升电压过高会危及整个电路的安全，这是它的另一个局限。

4. 试分析图10-2交—直—交变频器电路的工作原理，并说明其局限性。

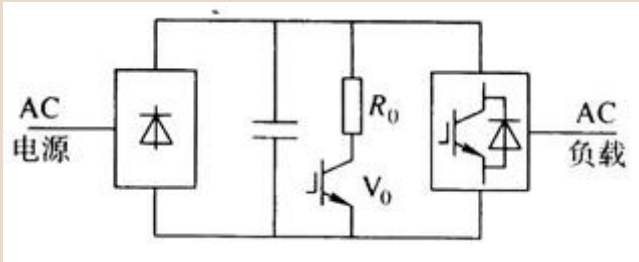


图10-2 带有泵升电压限制电路的电压型间接交流变流电路

答：（1）工作原理分析：

① 图10-2是带有泵升电压限制电路的电压型间接交流变流电路，它是在图10-1的基础上，在中间直流电容两端并联一个由电力晶体管  $V_0$  和能耗电阻  $R_0$  组成的泵升电压限制电路；

② 当泵升电压超过一定数值时，使  $V_0$  导通，把从负载反馈的能量消耗在  $R_0$  上。

（2）该电路的局限性：

其局限性是当负载为交流电动机，当交流电动机负载频繁快速加减速时，上升泵升电压限制电路中消耗的能量较多，能耗电阻  $R_0$  也需要较大功率。这种情况下，希望在制动的时把电动机的动能反馈给电网，结果反馈的能量都消耗在电阻上，不能得到利用。

5. 试说明图10-3交—直—交变频器电路是如何实现负载能量回馈的。

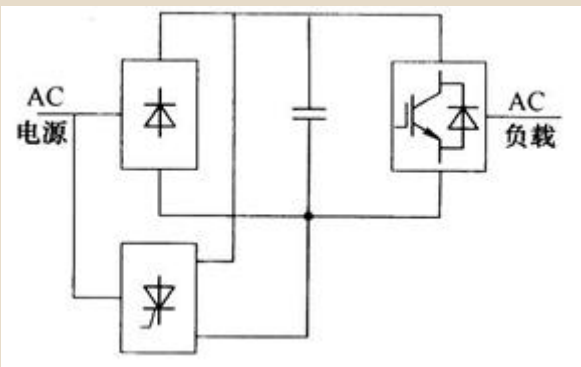


图10-3 利用可控变流器实现再生反馈的电压型间接交流变流电路

**答：**图10-3为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，它增加了一套变流电路，使其工作于有源逆变状态，以实现电动机的再生制动。当负载回馈能量时，中间直流电压上升，使不可控整流电路停止工作，可控变流器工作于有源逆变状态，中间直流电压极性不变，而电流反向，通过可控变流器将电能反馈回电网。

6. 何谓双PWM电路？其优点是什么？

**答：**（1）双PWM电路的定义：

双PWM电路为整流电路和逆变电路都采用PWM控制的间接交流变流电路。

（2）双PWM电路的优点：

- ① 双PWM电路可以使电路的输入电流均为正弦波并且与电源电压同相位，因而输入功率因数为1，并且中间直流电路的电压可以调节；
- ② 当负载为电动机时，可工作在电动运行状态，也可工作在再生制动状态；
- ③ 通过改变输出交流电压的相序可使电动机正转或反转，因此，可实现电动机四象限运行。

7. 什么是变频调速系统的恒压频比控制？

**答：**变频调速系统的恒压频比控制的概念为：

变频调速系统的恒压频比控制是为了不使电动机因频率变化导致磁饱和而造成励磁电流增大，即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。其引起功率因数和效率的降低，需对变频器的电压的频率和比率进行控制，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。

8. 何谓UPS？试说明图10-4所示UPS系统的工作原理。

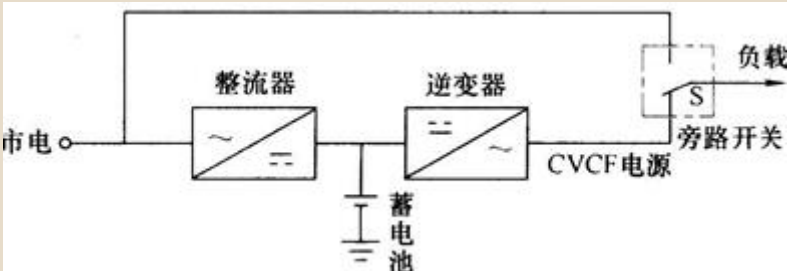


图10-4 具有旁路开关的UPS系统

**答：**（1）UPS的定义：

UPS是指当交流输入电源（习惯又称市电）发生异常或断电时，还能继续向负载供电，并能保证供电质量，使负载供电不受影响的装置，即不间断电源。

（2）图示UPS系统的工作原理为：

其基本工作原理是，当市电正常时，市电经整流器整流为直流给蓄电池充电，可以保证蓄电池电量充足。一旦市电异常乃至停电，即由蓄电池向逆变器供电，蓄电池的直流电经逆变器变换为恒频恒压交流电继续向负载供电，因此从负载侧看，供电不受市电停电影响。在市电正常时，负载也可以由逆变器供电，此时负载得到的交流电压比市电电压质量高，即使市电发生质量问题（如电压波动、频率波动、波形畸变和瞬时停电等）时，也能获得正常的恒压恒频的正弦波交流输出，并且具有稳压、稳频的性能，因此也称为稳压稳频电源。

① 图10-4所示UPS系统设置了旁路开关，可以保证市电异常或逆变器故障时负载供电的切换；

② 市电与逆变器提供的CVCF电源由转换开关S切换，若逆变器发生故障，可由开关自动切换为市电旁路电源供电；

③ 只有市电和逆变器同时发生故障时，负载供电才会中断。还需注意的是，在市电旁路电源与CVCF电源之间切换时，必须保证两个电压的相位一致，通常采用锁相同步的方法。

9. 试解释为什么开关电源的效率高于线性电源。

**答：**开关电源的效率高于线性电源的原因有：

（1）线性电源功率器件工作在线性状态，也就是说它一用起来功率器件就是一直处于工作状态，所以也就导致他的工作效率低，一般在50%~60%；

（2）而开关电源功率器件工作在开关状态（一开一关，一开一关，频率非常快，一般的平板开关电源频率在100~200KHz，模块电源在300~500KHz），这样他的损耗就小，效率也就高。

10. 提高开关电源的工作频率，会使哪些元件体积减小？会使电路中什么损耗增加？

**答：**（1）提高开关电源的工作频率，元件体积会减小的有：

开关电源的频率提高后，电路中电感和电容的数值可以降低，因而电感和电容的体积可以变小。

（2）电路中损耗会增加的有：

① 开关频率高到一定程度后，因为铜损增大，磁芯的涡流损耗也增加，IC的开关损耗增加；



②就开关管而言，主要损耗是发生在过渡过程，开关频率越高，单位时间内的开关次数越多，损耗就越大。

11. 什么是无源和有源功率因数校正？有源功率因数校正有什么优点？

答：（1）无源功率因数校正的定义：

通过在二极管整流电路中增加电感、电容等无源元件和二极管元件，对电路中的电流脉冲进行抑制，以降低电流谐波含量，提高功率因数的这种技术称为无源功率因数校正。

（2）有源功率因数校正的定义：

采用全控开关器件构成的开关电路对输入电流的波形进行控制，使之成为与电源电压同相的正弦波的这种技术称为有源功率因数校正。

（3）有源功率因数校正有以下优点：

有源功率因数校正后的总谐波含量可以降低至5%以下，而功率因数能高达0.995，彻底解决整流电路的谐波污染和功率因数低的问题，从而满足现行最严格的谐波标准，因此其应用越来越广泛。

12. 什么是单级功率因数校正？它有什么特点？

答：（1）单级功率因数校正的定义：

单级功率因数校正就是将功率因数校正电路中的开关元件与后级DC—DC变换器中的开关元件合并和复用，将两部分电路合二为一。

（2）单级功率因数校正有以下特点：

- ①开关器件数减少，主电路体积及成本可以降低；
- ②控制电路通常只有一个输出电压控制闭环，简化了控制电路；
- ③有些单级变换器拓扑中部分输入能量可以直接传递到输出侧，不经过两级变换，所以效率可能高于两级变换器。

13. 与高压交流输电相比，高压直流输电有哪些优势？高压直流输电的系统结构是怎样的？

答：（1）高压直流输电相比高压交流输电有以下优势：

- ①更有利于进行远距离和大容量的电能传输或者海底或地下电缆传输；
- ②更有利于电网联络；
- ③更有利于系统控制。

（2）高压直流输电的系统结构为：

①高压直流输电采用十二脉波换流器的双极高压直流输电线路；

②双极是指其输电线路两端的每端都由两个额定电压相等的换流器串联连接，具有两根传输导线，分别为正极和负极，每端两个换流器的串联连接点接地。这样线路的两极相当于各自独立运行，正常时以相同的电流工作，接地点之间电流为两极电流之差，正常时地中仅有很小的不平衡电流流过。当一极停止运行时，另一极以大地作回路还可以带一半负载，这样就提高了运行的可靠性，也利于分期建设和运行维护；

③单级高压直流输电系统只用一根输电导线（一般为负极），以大地或海水作为回路。

14. 试简述静止无功发生器（SVG）的基本原理。与基于晶闸管技术的SVC相比，SVG有哪些更优越的性能？

答：（1）静止无功发生器（SVG）的基本原理为：

SVG的基本原理是将桥式变流电路通过电抗器并联（或直接并联）在电网上，适当调节桥式变流电路交流侧输出电压的相位和幅值或者直接控制其交流侧电流，使该电路吸收或者发出满足要求的无功电流，从而实现动态无功补偿的目的。SVG可以等效地被视为幅值和相位均可以控制的一个与电网同频率的交流电压源。

（2）SVG优越的性能主要表现在以下几个方面：

- ①SVG具有双极性动态补偿功能（瞬间切换到补偿容性和感性，响应时间1ms），并入电网后，对电网的影响很小，不容易产生谐振；
- ②SVG相对去传统的电容补偿，在谐波很大的时候电容补偿对电容器的寿命影响很大，这样就电容器经常更换就不经济了，而SVG是有源设备，相当于一个电流源，所以影响不大；
- ③现在正处于更新换代的时期，SVG和SVC（TSC，TCR）等将取代传统的电容补偿。

15. 试简述并联型有源电力滤波器的基本原理。与传统的LC调谐滤波器相比，有源电力滤波器有哪些更优越的性能？

答：（1）并联型有源电力滤波器的基本原理为：

①检测补偿对象的电压和电流，经指令电流运算单元计算出补偿电流的指令电流信号，该信号经补偿电流发生电路放大，得出补偿电流，补偿电流与负载电流中要补偿的谐波及无功等电流抵消，最终得到期望的电源电流；

②当需要补偿负载所产生的谐波电流时，有源滤波器检测出负载电流中的谐波分量，将其反极性后作为补偿电流信号，由补偿电流发生电路产生的补偿电流以及与负载电流中的谐波成分以大小相等、方向相反，因而相互抵消，从而使电源获得期望的基波电流。

（2）有源电力滤波器优越的性能主要表现在以下几个方面：

- ①可实现动态有源滤波，全面改善电能质量；
- ②谐波补偿次数可选择，最高能滤除50次谐波；
- ③有源电力滤波器可选择同时补偿无功；
- ④具备三相不平衡补偿能力；
- ⑤具有自动限流功能，不会发生过载；
- ⑥效率高，满载损耗小；

- ⑦降低线路损耗，消除谐波引起的变压器和电机发热，实现系统大幅度节能；
- ⑧有源电力滤波器的滤波效果不受系统阻抗变化影响，并能自动抑制系统谐振；
- ⑨易于扩展和冗余设计，可最多10台并联运行。

16. 试分别列举用于电能质量控制、柔性交流输电和定制电力技术的典型电力电子装置。

答：（1）用于电能质量控制的典型电力电子装置有：

- ①用来控制无功功率的静止无功补偿器（SVC）和静止无功发生器（SVG）；
- ②用来补偿谐波的有源电力滤波器（APF）；
- ③用来补偿电压暂低的动态电压恢复器（DVR）；
- ④以及用来综合补偿多种电能质量问题的串联型电能质量控制器、并联型电能质量控制器和通用电能质量控制器（UPQC）等。

（2）用于柔性交流输电的典型电力电子装置有：

- ①静止无功补偿器和静止无功发生器；
- ②晶闸管投切串联电容器；
- ③晶闸管控制串联电容器和静止同步串联补偿器等可控串联补偿器；
- ④以及统一潮流控制器等。

（3）用于定制电力技术的典型电力电子装置有：

- ①静止无功补偿器、静止无功发生器、有源电力滤波器和动态电压恢复器等电能质量控制装置；
- ②由反并联的晶闸管构成的同态切换开关等。

17. 试简述电子镇流器的基本结构及其特点。

答：（1）电子镇流器的基本结构为：

电子镇流器的基本结构框图如图10-5所示。

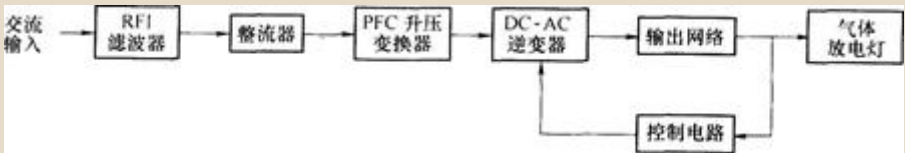


图10-5 电子镇流器结构框图

①工频市电电压在整流之前，首先经过射频干扰（RFI）滤波器滤波，RFI滤波器一般由电感和电容元件组成，用来阻止镇流器产生的高次谐波反馈到输入交流电网吧，以抑制对电网的污染和电子设备的干扰，同时也可以防止来自电网的干扰侵入到电子镇流器；

②对于高品质的电子镇流器，在其整流器与大容量的滤波电解电容器之间，往往要设置一级功率因数校正（PFC）升压型变换电路。其作用就是获得低电流谐波畸变，实现高功率因数。DC-AC逆变器的功能是将直流电压变换为高频电压；

③逆变电路采用双极型功率管、场效应晶体管（MOSFET）等全控型开关器件，开关频率一般为20~70 kHz，主要有半桥式逆变电路和推挽式逆变电路两种形式；

④高频电子镇流器的输出级电路通常采用LC串联谐振网络。

（2）电子镇流器的特点包括：

- ①能耗低、效率高；
- ②发光效率高；

③具有高功率因数，电感镇流器的功率因数一般只有0.6~0.8，而在电子镇流器中，只要采用功率因数校正电路，镇流器的功率因数很容易做到0.95以上，甚至达到0.99，这是电感整流器难以达到的；

④由于功率因数的提高，可以有效地提高供电系统和电网的利用率，改善供电质量，节约能源。除此之外，它还能在电网电压波动的情况下，保持灯功率和光输出的恒定，这也是电感镇流器所不能做到的。