

电力电子技术

第四版

课后习题答案

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

第 1 章 电力电子器件

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 。

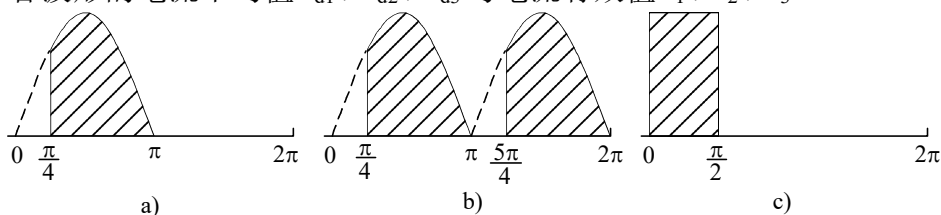


图 1-43 晶闸管导电波形

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

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

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

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

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

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

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

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

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 α_1 和 α_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 α_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。

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

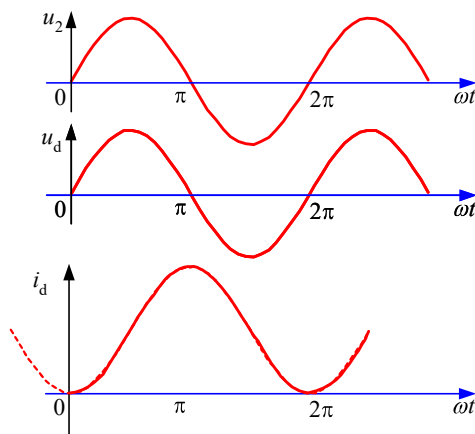
解: $\alpha=0^\circ$ 时, 在电源电压 u_2 的正半周期晶闸管导通时, 负载电感 L 储能, 在晶闸管开始导通时刻, 负载电流为零。在电源电压 u_2 的负半周期, 负载电感 L 释放能量, 晶闸管继续导通。因此, 在电源电压 u_2 的一个周期里, 以下方程均成立:

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

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

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{\sqrt{2}U_2}{\omega L} (1 - \cos \omega t) \\ I_d &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sqrt{2}U_2}{\omega L} (1 - \cos \omega t) d(\omega t) \\ &= \frac{\sqrt{2}U_2}{\omega L} = 22.51(\text{A}) \end{aligned}$$

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:

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

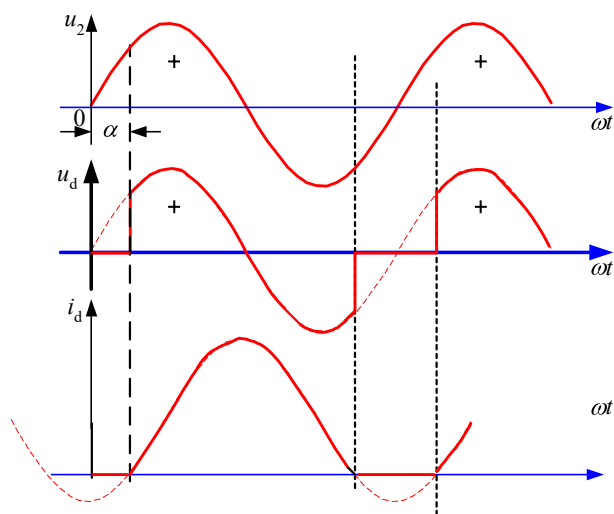
考虑初始条件: 当 $\omega t=60^\circ$ 时 $i_d=0$ 可解方程得:

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

其平均值为

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{5\pi}{3}} \frac{\sqrt{2}U_2}{\omega L} \left(\frac{1}{2} - \cos \omega t \right) d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}U_2}{2\omega L} = 11.25(A)$$

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 $2\sqrt{2}U_2$ 。

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，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。

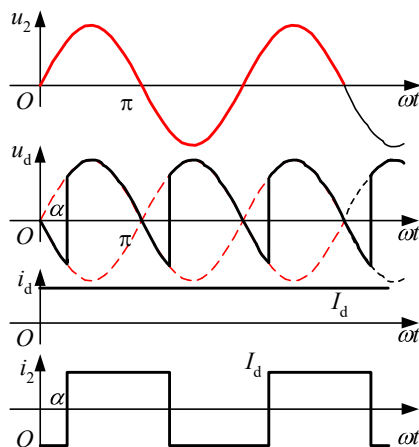
3. 单相桥式全控整流电路， $U_2=100V$ ，负载中 $R=2\Omega$ ， L 值极大，当 $\alpha=30^\circ$ 时，要

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：

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

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：

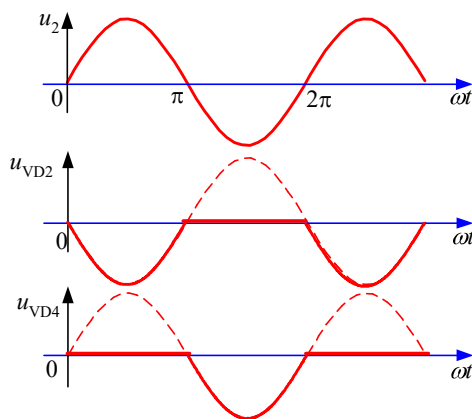
$$I_N = (1.5 \sim 2) \times 27.57 / 1.57 = 26 \sim 35 \text{ (A)}$$

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。

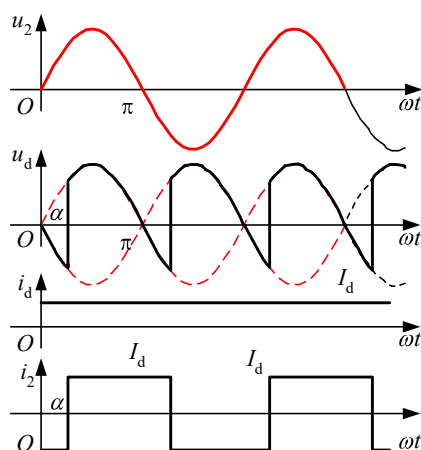
整流二极管在一周内承受的电压波形如下：



5. 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, 反电势 $E=60\text{V}$, 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

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

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

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

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:

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

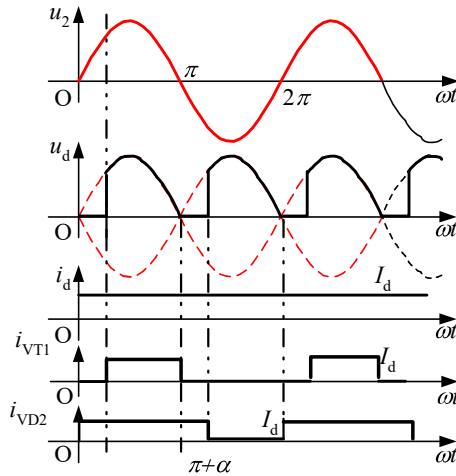
晶闸管的额定电流为:

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

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:

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

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_1 、 VT_2 的电流有效值为:

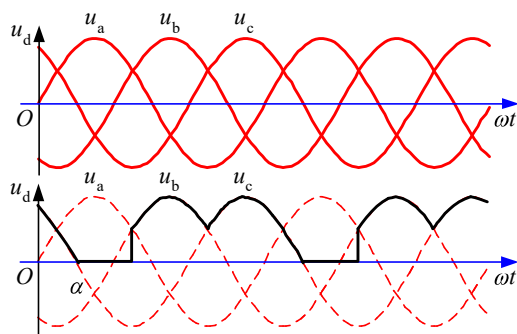
$$I_{VT} = \sqrt{\frac{1}{3}} I_d = 19.49 \text{ (A)}$$

流过二极管 VD_3 、 VD_4 的电流有效值为:

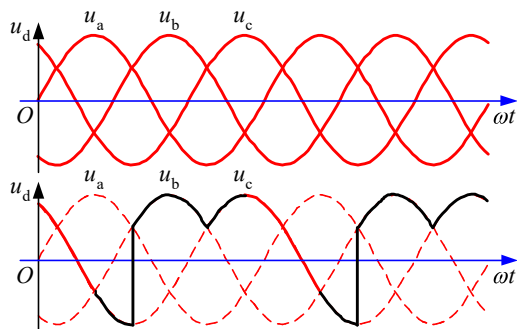
$$I_{VD} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d = 27.56 \text{ (A)}$$

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：



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？

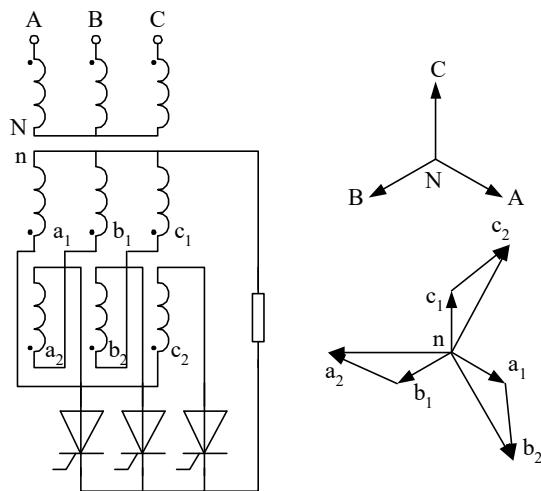


图 2-60 变压器二次绕组的曲折接法及其矢量图

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° ）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° 。

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 α ，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？

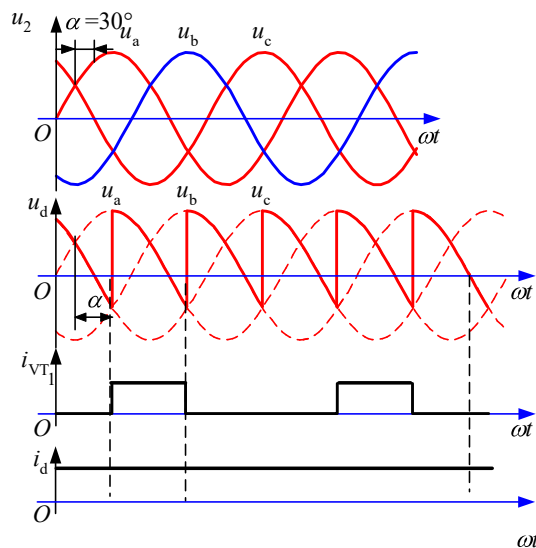
答：相差 180° 。

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

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

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

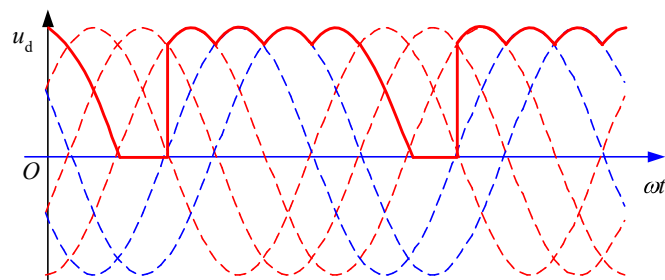
$$I_{dT} = I_d / 3 = 11.7 / 3 = 3.9 \text{ (A)}$$

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

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 VT_1 不能导通，整流电压 u_d 波形如下：



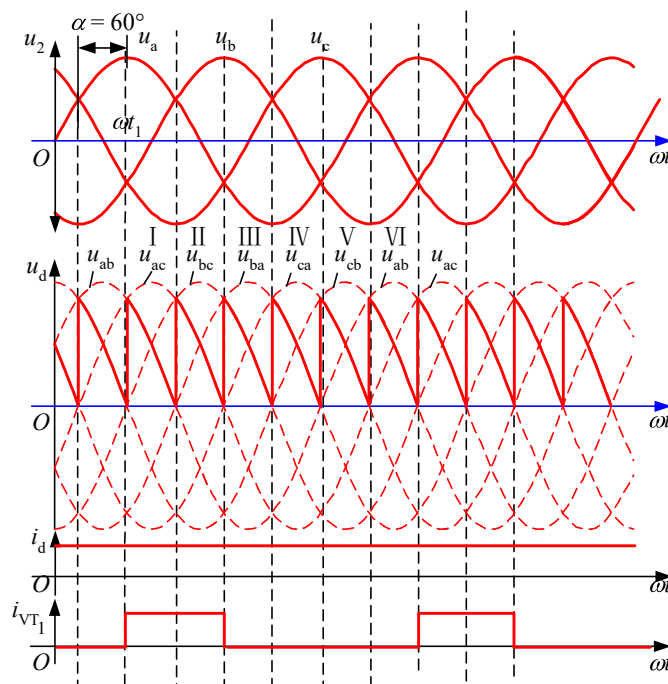
假设 VT_1 被击穿而短路，则当晶闸管 VT_3 或 VT_5 导通时，将发生电源相间短路，使得 VT_3 、 VT_5 也可能分别被击穿。

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

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

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

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

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

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 γ 的数值，并画出整流电压 u_d 的波形。

解：考虑 L_B 时，有：

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

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

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

解方程组得：

$$U_d = (\pi R 0.9U_2 \cos \alpha + 2X_B E) / (\pi R + 2X_B) = 44.55 \text{ (V)}$$

$$\Delta U_d = 0.455 \text{ (V)}$$

$$I_d = 4.55 \text{ (A)}$$

又∵

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

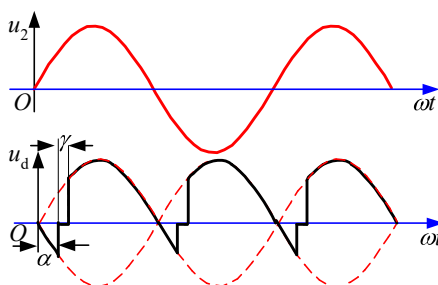
即得出

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

换流重叠角

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

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， $U_2=100\text{V}$ ， $R=1\Omega$ ， $L=\infty$ ， $L_B=1\text{mH}$ ，求当 $\alpha=30^\circ$ 时、 $E=50\text{V}$ 时 U_d 、 I_d 、 γ 的值并作出 u_d 与 i_{VT1} 和 i_{VT2} 的波形。

解：考虑 L_B 时，有：

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

$$\Delta U_d = 3X_B I_d / 2\pi$$

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

解方程组得：

$$U_d = (\pi R 1.17U_2 \cos \alpha + 3X_B E) / (2\pi R + 3X_B) = 94.63 \text{ (V)}$$

$$\Delta U_d = 6.7 \text{ (V)}$$

$$I_d = 44.63 \text{ (A)}$$

又∵

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

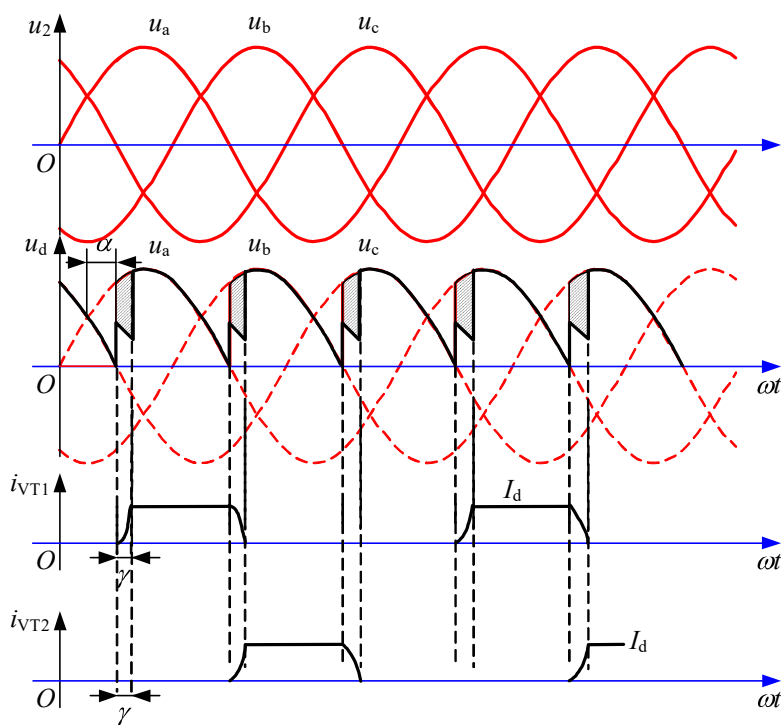
即得出

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

换流重叠角

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

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， $R=5\ \Omega$ ， $L=\infty$ ， $U_2=220\text{V}$ ， $X_B=0.3\ \Omega$ ，求 U_d 、 I_d 、 I_{VD} 、 I_2 和 γ 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：

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

$$I_d = 97.38 \text{ (A)}$$

又 $\because$

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

即得出

$$\cos \gamma = 0.892$$

换流重叠角

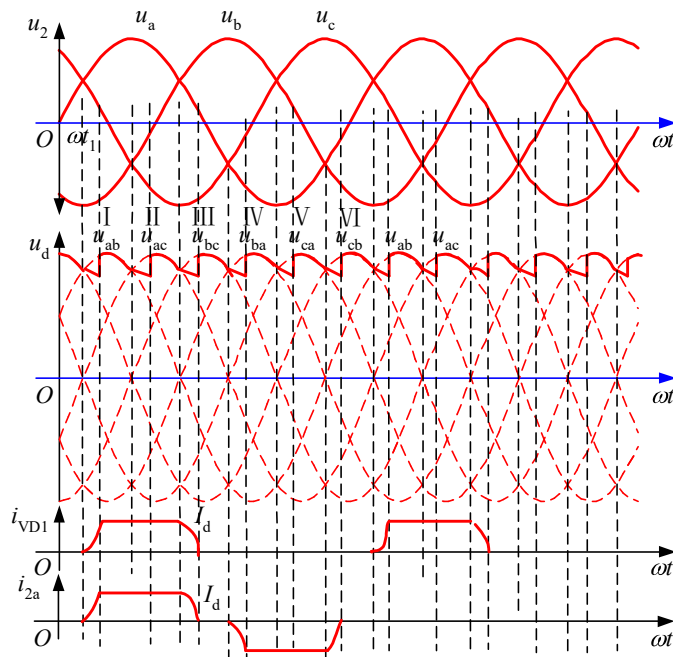
$$\gamma = 26.93^\circ$$

二极管电流和变压器二次测电流的有效值分别为

$$I_{VD} = I_d / 3 = 97.38 / 3 = 32.46 \text{ (A)}$$

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

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 γ 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

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

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

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

解方程组得：

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

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

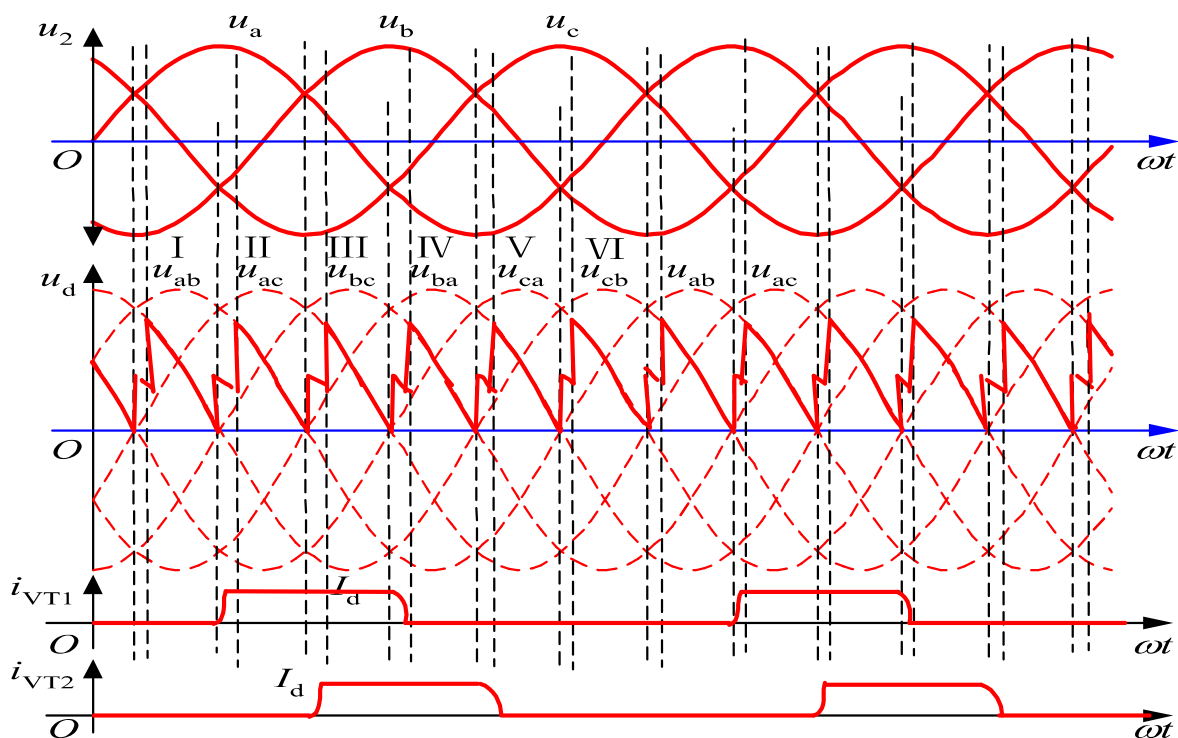
$$\Delta U_d = 13.25 \text{ (V)}$$

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

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

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

u_d 、 I_{VT1} 和 I_{VT2} 的波形如下：



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？变压器二次侧电流中含有哪些次数的谐波？其中主要的是哪几次？

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 $2k+1$ ($k=1、2、3\dots\dots$) 次即奇次谐波，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？变压器二次侧电流中含有哪些次数的谐波？其中主要的是哪几次？

答：三相桥式全控整流电路的整流输出电压中含有 $6k$ ($k=1、2、3\dots\dots$) 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 $6k\pm 1$ ($k=1、2、3\dots\dots$) 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

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

于是可得：

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

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

$$I_{27} = 2\sqrt{2} I_d / 7\pi = 2\sqrt{2} \times 38.99 / 7\pi = 5.01 \text{ (A)}$$

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：

$$I_{25} = \sqrt{6} I_d / 5\pi = \sqrt{6} \times 23.4 / 5\pi = 3.65 \text{ (A)}$$

$$I_{27} = \sqrt{6} I_d / 7\pi = \sqrt{6} \times 23.4 / 7\pi = 2.61 \text{ (A)}$$

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：

$$I_1 = 2\sqrt{2} I_d / \pi = 2\sqrt{2} \times 38.99 / \pi = 35.1 \text{ (A)}$$

基波因数为

$$\nu = I_1 / I = I_1 / I_d = 35.1 / 38.99 = 0.9$$

电路的输入功率因数为：

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

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

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

电路的输入功率因数为：

$$\lambda = \nu \cos \alpha = 0.955 \cos 60^\circ = 0.48$$

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_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。

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：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 $12k \pm 1$ 、 $(k=1, 2, 3 \dots)$ 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 次、47 次、49 次等，即 $24k \pm 1$ ($k=1, 2, 3 \dots$) 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。

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。

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

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

$$I_d = 109.7 \text{ (A)}$$

由下式可计算换流重叠角：

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

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

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

送回电网的有功功率为

$$P = |E_M I_d| - I_d^2 R = 400 \times 109.7 - 109.7^2 \times 1 = 31.85 \text{ (W)}$$

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

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

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

又:

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

即得出

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

换流重叠角

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

29. 什么是逆变失败? 如何防止逆变失败?

答: 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 β 等。

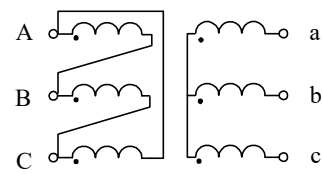
30. 单相桥式全控整流电路、三相桥式全控整流电路中, 当负载分别为电阻负载或电感负载时, 要求的晶闸管移相范围分别是多少?

答: 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 $0 \sim 90^\circ$ 。

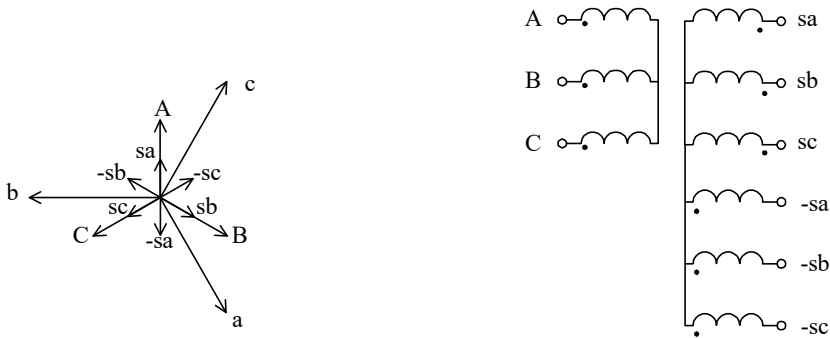
31. 三相全控桥, 电动机负载, 要求可逆, 整流变压器的接法是 D, y-5, 采用 NPN 锯齿波触发器, 并附有滞后 30° 的 R-C 滤波器, 决定晶闸管的同步电压和同步变压器的联结形式。

解：整流变压器接法如下图所示



以 a 相为例， u_a 的 120° 对应于 $\alpha=90^\circ$ ，此时 $U_d=0$ ，处于整流和逆变的临界点。该点与锯齿波的中点重合，即对应于同步信号的 300° ，所以同步信号滞后 u_a 180° ，又因为 R-C 滤波已使同步信号滞后 30° ，所以同步信号只要再滞后 150° 就可以了。

满足上述关系的同步电压相量图及同步变压器联结形式如下两幅图所示。



各晶闸管的同步电压选取如下表：

晶闸管	VT ₁	VT ₂	VT ₃	VT ₄	VT ₅	VT ₆
同步电压	$-u_{sb}$	u_{sa}	$-u_{sc}$	u_{sb}	$-u_{sa}$	u_{sc}

第3章 直流斩波电路

1. 简述图 3-1a 所示的降压斩波电路工作原理。

答：降压斩波器的原理是：在一个控制周期中，让 V 导通一段时间 t_{on} ，由电源 E 向 L、R、M 供电，在此期间， $u_o = E$ 。然后使 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 $U_o = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \times E$ 。输出电压小于电源电压，起到降压的作用。

2. 在图 3-1a 所示的降压斩波电路中，已知 $E=200V$ ， $R=10\Omega$ ， L 值极大， $E_M=30V$ ， $T=50\mu s$ ， $t_{on}=20\mu s$ ，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

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

输出电流平均值为

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

3. 在图 3-1a 所示的降压斩波电路中， $E=100V$ ， $L=1mH$ ， $R=0.5\Omega$ ， $E_M=10V$ ，采用脉宽调制控制方式， $T=20\mu s$ ，当 $t_{on}=5\mu s$ 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值瞬时值并判断负载电流是否连续。当 $t_{on}=3\mu s$ 时，重新进行上述计算。

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 $t_{on}=5\mu s$ 时，有

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

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

由于

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

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/08702106400006162>