

$$I_2 = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}} I_d = \sqrt{\frac{180^\circ - 30^\circ}{180^\circ}} \times 20 \text{ A} = 18.3 \text{ A}$$

则

$$S = U_2 I_2 = 95.3 \times 18.3 \text{ V} \cdot \text{A} = 1\,744 \text{ V} \cdot \text{A}$$

2.2 三相相控整流电路

当负载容量较大时,若采用单相相控整流电路,将造成电网三相电压的不平衡,影响其他用电设备的正常运行,因此必须采用三相相控整流电路。三相整流电路分为三相半波、三相桥式整流电路两大类,实际中由于三相全桥式整流电路具有输出电压脉动小、脉动频率高、网侧功率因数高以及动态响应快的特点,因此它在中、大功率领域中获得了广泛的应用。但是三相半波相控整流电路是基础,其分析方法对研究其他整流电路(包括双反星形相控整流电路和十二脉波相控整流电路)非常有益。

2.2.1 三相半波相控整流电路

1. 电阻性负载

带电阻性负载的三相半波相控整流电路如图 2.2.1(a)所示。图中将 3 个晶闸管的阴极连在一起接到负载端,这种接法称为共阴接法(若将 3 个晶闸管的阳极连在一起,则称为共阳接法),3 个阳极分别接到变压器二次侧,变压器为 Δ/Y 接法。共阴接法时触发电路有公共点,接线比较方便,应用更为广泛。下面分析共阴接法电路的工作原理。

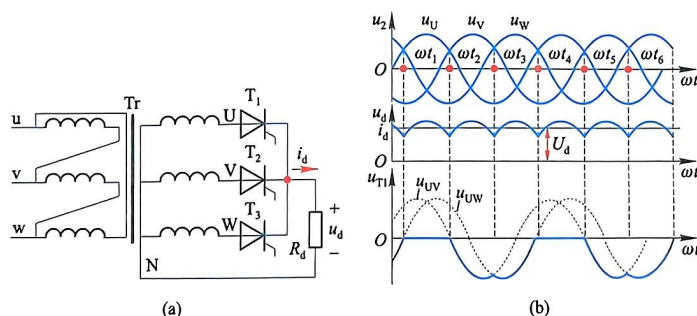


图 2.2.1 带电阻性负载的三相半波相控整流电路及其工作波形 ($\alpha = 0^\circ$)

在 $\omega t_1 \sim \omega t_2$ 期间, U 相电压比 V、W 相都高,如果在 ωt_1 时刻触发晶闸管 T_1 导通,负载上得到 U 相电压 u_U 。在 $\omega t_2 \sim \omega t_3$ 期间, V 相电压最高,若在 ωt_2 时刻触发 T_2 导通,负载上得到 V 相电压 u_V ,与此同时 T_1 因承受反压而关断。若在 ωt_3 时刻触发 T_3 导通,负载上得到 W 相电压 u_W ,并关断 T_2 。如此循环下去,输出的整流电压 u_d 是一个脉动的直流电压,它是三相交流相电压正半周的包络线,在三相电源的一个周期内有三次脉动。输出电流 i_d 、晶闸管 T_1 两端电压 u_{T1} 的波形如图 2.2.1(b)所示。

从图 2.2.1(b)可知 ωt_1 、 ωt_2 和 ωt_3 时刻距相电压波形过零点 30° 电角度,它是各相晶闸管能被正常触发导通的最早时刻,在该点以前,对应的晶闸管因承受反压而不能触发导通,所以把它称为自然换流点。在三相相控整流电路中,把自然换流点作为计算控制角 α 的起点,即该处 $\alpha = 0^\circ$ (注意:这与单相相控整流电路是不同的)。很明显图 2.2.1(b)所示为三相半波相控整流电路在 $\alpha = 0^\circ$ 时的输出电压波形。

教学课件:
三相相控
整流电路

动画:

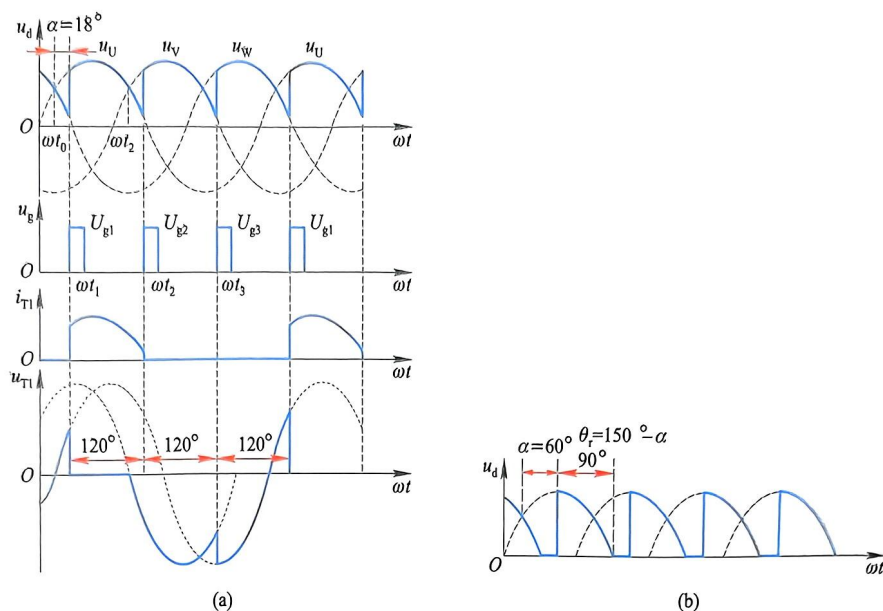
三相桥式不控整
流电路工作原理
与波形分析(电
阻性负载)



动画:

三相桥式不控整
流电路工作原理
与波形分析(阻
容性负载)



图 2.2.2 三相半波相控整流 $\alpha = 18^\circ, 60^\circ$ 时的波形图

若增大控制角,输出电压的波形发生变化。当 $\alpha = 18^\circ$ 时,输出电压 u_d 波形对应的触发脉冲 u_g 如图 2.2.2(a) 所示,各相触发脉冲的间隔为 120° 。假设在 $\omega t = 0$ 时电路已在运行, W 相 T_3 导通,当经过自然换流点 ωt_0 时由于 U 相 T_1 没有触发,不能导通, T_3 仍承受正压继续导通。直到 ωt_1 ($\alpha = 18^\circ$) 时, T_1 被触发导通,才使 T_3 承受反压而关断,负载电流从 W 相换到 U 相。以后各相如此依次轮流导通,任何时候总有一个晶闸管处于导通状态,所以输出电流 i_d 保持连续。

逐步增大控制角 α ,整流输出电压将逐渐减小。当 $\alpha = 30^\circ$ 时, u_d, i_d 波形临界连续。继续增大 α ,当 $\alpha > 30^\circ$ 时,输出电压和电流波形将不再连续。图 2.2.2(b) 所示是 $\alpha = 60^\circ$ 时的输出电压波形。若控制角 α 继续增大,整流输出电压继续减小,当 $\alpha = 150^\circ$ 时,整流输出电压就减小到零。

综上所述,可以得出如下结论:

① 当 $\alpha \leq 30^\circ$ 时,负载电流连续,每个晶闸管的导电角均为 120° ;当 $\alpha > 30^\circ$ 时,输出电压和电流波形将不再连续。

② 在电源交流电路中不存在电感情况下,晶闸管之间的电流转移是在瞬间完成的。

③ 负载上的电压波形是相电压的一部分。

④ 晶闸管处于截止状态时所承受的电压是线电压而不是相电压。

⑤ 整流输出电压的脉动频率为 $3 \times 50 \text{ Hz} = 150 \text{ Hz}$ (脉波数 $m = 3$)。

若 U 相电源输入相电压 $u_{2U} = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t$, V、W 相相应滞后 120° , 则有如下数量关系:

① 当 $\alpha = 0^\circ$ 时,整流输出电压平均值 U_d 最大。增大 α , U_d 减小,当 $\alpha = 150^\circ$ 时, $U_d = 0$ 。所以带电阻性负载的三相半波相控整流电路的 α 移相范围为 $0 \sim 150^\circ$ 。

② 当 $\alpha \leq 30^\circ$ 时,负载电流连续,各相晶闸管每周轮流导通 120° ,即导通角 $\theta_r = 120^\circ$ 。输出电压平均值为

$$U_d = \frac{3}{2\pi} \int_{\alpha+\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}+\alpha} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 1.17 U_2 \cos \alpha \quad (0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ) \quad (2.2.1)$$

式中, U_2 为整流变压器二次相电压有效值。

③ 当 $\alpha > 30^\circ$ 时, 负载电流断续, $\theta = 150^\circ - \alpha$, 输出电压平均值 U_d 为

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) \\ &= 1.17 U_2 \frac{1 + \cos(30^\circ + \alpha)}{\sqrt{3}} \quad (30^\circ < \alpha \leq 150^\circ) \end{aligned} \quad (2.2.2)$$

④ 负载电流的平均值为

$$I_d = \frac{U_d}{R_d} \quad (2.2.3)$$

流过每个晶闸管电流的平均值为

$$I_{dT} = \frac{1}{3} I_d \quad (2.2.4)$$

流过每个晶闸管电流的有效值为

$$I_T = \frac{U_2}{R_d} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{2\pi}{3} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos 2\alpha \right)} \quad (0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ) \quad (2.2.5)$$

$$I_T = \frac{U_2}{R_d} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{5\pi}{6} - \alpha + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha + \frac{1}{4} \sin 2\alpha \right)} \quad (30^\circ < \alpha < 150^\circ) \quad (2.2.6)$$

⑤ 晶闸管承受的最大反向电压为电源线电压峰值, 即 $\sqrt{6} U_2$, 最大正向电压为电源相电压, 即 $\sqrt{2} U_2$ 。

例 2.2.1 调压范围为 2~15 V 的直流电源, 采用三相半波相控整流电路带电阻负载, 输出电流小于 130 A。求:

- (1) 整流变压器二次相电压有效值;
- (2) 试计算 9 V 时的 α 角;
- (3) 选择晶闸管的型号;
- (4) 计算变压器二次侧的容量。

解: (1) 因为是电阻性负载, 且 $U_{d\max} = 15$ V, 此时可视为 $\alpha = 0^\circ$, 而

$$U_d = 1.17 U_2 \cos \alpha \quad (0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ)$$

则

$$U_2 = \frac{U_{d\max}}{1.17} = \frac{15}{1.17} \text{ V} \approx 12.8 \text{ V}$$

(2) 当 $\alpha = 30^\circ$ 时, $U_d = 1.17 U_2 \cos \alpha = 1.17 \times 12.8 \times \cos 30^\circ \text{ V} = 12.97 \text{ V}$, 因此 $U_d = 9 \text{ V}$ 时, 一定有 $\alpha > 30^\circ$, 于是

$$U_d = 1.17 U_2 \frac{1 + \cos(30^\circ + \alpha)}{\sqrt{3}} \quad (30^\circ < \alpha \leq 150^\circ)$$

$$\cos(\alpha + 30^\circ) = \frac{\sqrt{3} U_d}{1.17 U_2} - 1 = \frac{\sqrt{3} \times 9}{1.17 \times 12.8} - 1 \approx 0.04026$$

则

$$\alpha = 57.7^\circ$$

(3) 当 $\alpha = 57.7^\circ$ 时, 有

$$I_T = \frac{U_2}{R_d} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{5\pi}{6} - \alpha + \frac{\sqrt{3}}{4} \cos 2\alpha + \frac{1}{4} \sin 2\alpha \right)} \quad (30^\circ < \alpha < 150^\circ)$$

$$\approx 0.5125 \frac{U_2}{R_d}$$

则

$$I_d = 1.17 \frac{U_2}{R_d} \cdot \frac{1 + \cos(30^\circ + \alpha)}{\sqrt{3}} = 130 \text{ A}$$

故

$$I_T = 0.733 I_d = 95.34 \text{ A}$$

晶闸管的额定电流为

$$I_{T(AV)} \geq \frac{I_T}{1.57} = 60.72 \text{ A}$$

晶闸管的额定电压为

$$U_{Te} = \sqrt{6} U_2 = 31.4 \text{ V}$$

考虑裕量,选择 KP100-1 型号的晶闸管。

(4) 因为 $I_2 = I_T$

$$S_2 = 3 I_2 U_2 = 3 \times 95.34 \times 12.8 \text{ V} \cdot \text{A} \approx 3.66 \text{ kV} \cdot \text{A}$$