

第二章 单相可控整流电路

习题与思考题解

2-1. 什么是整流？它是利用半导体二极管和晶闸管的哪些特性来实现的？

解：整流电路是一种 AC/DC 变换电路，即将交流电能变换为直流电能的电路，它是利用半导体二极管的单向导电性和晶闸管是半控型器件的特性来实现的。

2-2. 某一电热装置（电阻性负载），要求直流平均电压为 75V，电流为 20A，采用单相半波可控整流电路直接从 220V 交流电网供电。计算晶闸管的控制角 α 、导通角 θ 、负载电流有效值，并选择晶闸管。

解：(1) 整流输出平均电压

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t)$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \left(\frac{1 + \cos \alpha}{2} \right) \approx 0.45 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

$$\cos \alpha = \frac{2U_d}{0.45U_2} - 1 = \frac{2 \times 75}{0.45 \times 220} - 1 = 0.5152$$

则 控制角 $\alpha \approx 60^\circ$ 导通角 $\theta = \pi - \alpha = 120^\circ$

(2). 负载电流平均值

$$I_d = \frac{U_d}{R} = 20(A)$$

则 $R = U_d / I_d = 75 / 20 = 3.75 \Omega$

负载电流有效值 I ，即为晶闸管电流有效值 I_{V1} ，所以

$$I = I_{V1} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left(\frac{\sqrt{2} U_2}{R} \sin \omega t \right)^2 d(\omega t)} = \frac{U_2}{R} \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{2\pi}} = 37.6(A)$$

(3). 当不考虑安全裕量时

$$I_{V1} = k_{fe} I_{VEAR} = 1.57 I_{VEAR}$$

则晶闸管通态平均电流 $I_{VEAR} = I_{V1} / 1.57 = 37.6 / 1.57 = 23.9(A)$

晶闸管可能承受的最大正反向电压为

$$\sqrt{2} U_2 = \sqrt{2} \times 220 \approx 311(V)$$

所以，可选择额定通态平均电流为 30A、额定电压为 400V 的晶闸管。

按裕量系数 2，可选择额定通态平均电流为 50A、额定电压为 700V 的晶闸管。

2-3. 带有续流二极管的单相半波可控整流电路, 大电感负载保证电流连续。试证明输出

整流电压平均值 $U_d = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} \frac{1+\cos\alpha}{2}$, 并画出控制角为 α 时的输出整流电压 u_d 、晶闸管承受电压 u_{V1} 的波形。

解:

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t)$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \left(\frac{1+\cos\alpha}{2} \right) \approx 0.45U_2 \frac{1+\cos\alpha}{2}$$

控制角为 α 时的输出整流电压 u_d 、晶闸管承受电压 u_{V1} 的波形参阅教材 P31 中的图 2-3 (b)、(c)、(d) 和 (h)。

2-4. 将单相半波可控整流电路中电阻负载和电感性负载的工作原理作个比较, 找出差别, 并画出电阻负载输出电压 u_d 、电流 i_d 和晶闸管电压 u_{V1} 波形; 写出 U_d 、 I_d 计算公式。

解: 电阻性负载电路

输出电流 i_d 与输出电压 u_d 相位相同, 波形相似。晶闸管导通区间从 α 至 π , 导通角 $\theta = \pi - \alpha$ 。 u_d 波形从 α 至变压器二次电压正变负的过零点。

电感性负载电路

由于电感的储能作用, 输出电流 i_d 与输出电压 u_d 相位不相同, 电流 i_d 滞后于电压 u_d 。而且, 电流 i_d 不能随电压 u_d 突变。晶闸管导通区间从 α 开始并超过 π 过零点, 导通角 $\theta > \pi - \alpha$ 。 u_d 波形从 α 开始至变压器二次电压正变负的过零点后, 进入负半周。导通角 θ 的大小, 与负载电感值 L 有关, L 越大, 储能越多, θ 亦越大, u_d 波形进入变压器二次电压负半周的部分亦越多, 输出电压的平均值 U_d 亦下降的越多。当负载为大电感负载时, U_d 近似等于零, 此时输出平均电流 I_d 亦很小。

电阻负载输出电压 u_d 、电流 i_d 和晶闸管电压 u_{V1} 波形参阅教材 P 27 中的图 2-1。

电阻负载 U_d 、 I_d 计算公式如下:

(1) 整流输出平均电压

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{2\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t)$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \left(\frac{1+\cos\alpha}{2} \right) \approx 0.45U_2 \frac{1+\cos\alpha}{2}$$

(2). 负载电流平均值

$$I_d = \frac{U_d}{R}$$

2-5. 单相半波大电感负载可控整流电路中, 带续流二极管和不带续流二管在输出电压 u_d 和电流 i_d 、晶闸管电压 u_{V1} 和电流 i_{V1} 、续流二极管电压 u_{V2} 和电流 i_{V2} 波形上有何区别。写出带续流二极管时 u_d 、 i_d 、 i_{V1} 、 i_{V2} 的平均值和有效值计算公式。

解: 不带续流二管时, 当负载为大电感负载时, 输出电压 u_d 波形与横坐标所围的正负面积相等, U_d 近似等于零, 此时输出平均电流 I_d 亦很小。输出电压 u_d 和电流 i_d 、晶闸管电压 u_{V1} 和电流 i_{V1} 的波形参阅教材 P30 中的图 2-2。其中, i_{V1} 的波形与 i_d 的波形相同。

带续流二极管时, 由于续流二极管的作用, 晶闸管从 α 开始导通, 至变压器二次电压正变负的过零点时, 由于电感应电动势的作用使续流二极管导通, 晶闸管被迫关断, 所以, 晶闸管导通区间从 α 至 π , 导通角 $\theta = \pi - \alpha$ 。由于负载为大电感负载, 所以负载电流 i_d 脉动很小, 近似为一平行横坐标的直线, 晶闸管电流 i_{V1} 、续流二极管电流 i_{V2} 近似为正向矩形波, 导通角分别为 $\theta = \pi - \alpha$ 和 $\theta = \pi + \alpha$ 。

输出电压 u_d 和电流 i_d 、晶闸管电压 u_{V1} 和电流 i_{V1} 、续流二极管电压 u_{V2} 和电流 i_{V2} 波形参阅教材 P31 中的图 2-3。

带续流二极管时 u_d 、 i_d 、 i_{V1} 、 i_{V2} 的平均值和有效值计算公式如下:

(1) 输出电压的平均值 U_d 为

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

(2) 输出电压的有效值 U 为

$$U = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2} U_2 \sin \omega t)^2 d(\omega t)} = U_2 \sqrt{\frac{1}{4\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{2\pi}}$$

(3) 输出电流的平均值 I_d 为

$$I_d = \frac{U_d}{R}$$

(4) 输出电流的有效值 I 为

$$I = I_d = \frac{U_d}{R}$$

(5) 晶闸管的平均电流 I_{V1AR} 为

$$I_{V1AR} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} I_d d(\omega t) = \frac{\pi - \alpha}{2\pi} I_d$$

(6) 晶闸管电流的有效值 I_{V1} 为

$$I_{V1} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} I_d^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi}} I_d$$

(7) 续流二极管的平均电流 I_{V2AR} 为

$$I_{V2AR} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi+\alpha} I_d d(\omega t) = \frac{\pi + \alpha}{2\pi} I_d$$

(8) 续流二极管电流的有效值 I_{V2} 为

$$I_{V2} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi+\alpha} I_d^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{\pi + \alpha}{2\pi}} I_d$$

2-6. 有一单相桥式全控整流电路, 负载为电阻性, 要求 $\alpha = 30^\circ$ 时, $U_d = 80V$, $I_d = 7A$ 。计算整流变压器的副边电流 I_2 , 按照上述工作条件选择晶闸管。

解: $I_d = U_d / R$, 则 $R = U_d / I_d = 80 / 7 = 1.14\Omega$

$$U_d = 0.9U_2 \times (1 + \cos\alpha) / 2$$

则

$$U_2 = 95V$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_0^{\pi} \left(\frac{\sqrt{2}U_2}{R} \sin\omega t \right)^2 d\omega t} = \frac{U_2}{R} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} = 82.12 (A)$$

$$I_{V1} = \frac{I_2}{\sqrt{2}} = 58 (A)$$

$$I_{VEAR} = I_{V1} / k_{fe} = 58 / 1.57 \approx 37 (A)$$

考虑裕量系数 2,

$$2 \times 37 = 74 (A)$$

$$2\sqrt{2}U_2 = 2 \times \sqrt{2} \times 95 \approx 268.7 (V)$$

选额定电流 100A、额定电压 300V 的晶闸管。

2-7. 单相全控桥式整流电路接大电感负载, 已知 $U_2 = 100V$, $R = 10\Omega$, $\alpha = 45^\circ$ 。

(1) 负载端不接续流二极管 V4, 计算输出整流电压、电流平均值及晶闸管电流有效值。

(2) 负载端接续流二极管 V4, 计算输出整流电压、电流平均值及晶闸管、续流二极管电流有效值。画出 u_d 、 i_d 、 i_{V1} 、 i_{V4} 及变压器次级电流 i_2 的波形。

解: (1) 负载端不接续流二极管 V4 时

输出电压平均值为

$$U_d = \frac{2}{2\pi} \int_0^{\alpha+\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t (d\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha \approx 0.9U_2 \cos \alpha$$

$$= 0.9 \times 100 \times 0.707 \approx 63.7 \text{ (V)}$$

输出直流电流平均值为

$$I_d = \frac{U_d}{R} \approx 6.37 \text{ (A)}$$

晶闸管电流的有效值为

$$I_{V1} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} I_d^2 d(\omega t)} = \frac{1}{\sqrt{2}} I_d \approx 4.5 \text{ (A)}$$

(2) 负载端接续流二极管 V4 时

输出电压平均值

$$U_d = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) \approx 0.9U_2 \frac{1+\cos \alpha}{2} = 0.9 \times 100 \times 0.854 = 76.8 \text{ (V)}$$

输出直流电流平均值为

$$I_d = \frac{U_d}{R} \approx 7.68 \text{ (A)}$$

晶闸管与整流二极管电流的有效值 I_{V1} 、 I_{V2} 为

$$I_{V1} = I_{V2} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} I_d^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{\pi-\alpha}{2\pi}} I_d$$

$$= \sqrt{\frac{135}{360}} \times 7.68 = 4.70 \text{ (A)}$$

续流二极管电流的有效值 I_{V4} 为

$$I_{V4} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_0^{\alpha} I_d^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} I_d = \sqrt{\frac{45}{180}} \times 7.68 = 3.84 \text{ (A)}$$

变压器二次电流的有效值 I_2 为

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} [I_d^2 + (-I_d)^2] d(\omega t)} = \sqrt{\frac{\pi-\alpha}{\pi}} I_d$$

$$= \sqrt{2} I_{V1} = \sqrt{2} \times 4.70 = 6.65 \text{ (A)}$$

接续流二极管时的 u_d 、 i_d 、 i_{V1} 、 i_{V4} 及变压器次级电流 i_2 的波形参阅教材 P41 中的图 2-

8。

2-8. 单相桥式半控整流电路接电阻性负载, 要求输出整流电压 $0 \sim 100\text{V}$ 连续可调, 30V 以上时要求负载电流能达到 20A 。当 (1) 采用 220V 交流电网直接供电; 2) 采用变压器降压供电, 最小控制角 $\alpha_{\min}=30^\circ$, 试分析比较二种供电方式下晶闸管的导通角和电流有效值、交流侧电流有效值及电源容量。

解: (1) 采用 220V 交流电网直接供电时

$$U_d = 0.9U_d \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

当输出平均电压 U_d 为 100V 时

则
$$\cos \alpha = \frac{2U_d}{0.9U_2} - 1 = \frac{2 \times 100}{0.9 \times 220} - 1 \approx 0.0101$$

$$\alpha_{\min} \approx 90^\circ$$

当输出平均电压 U_d 为 30V 时

则
$$\cos \alpha = \frac{2U_d}{0.9U_2} - 1 = \frac{2 \times 30}{0.9 \times 220} - 1 \approx -0.6970$$

$$\alpha_{\max} \approx 134^\circ$$

导通角 $\theta = \pi - \alpha$, 所以晶闸管导通角 $\theta = 90^\circ \sim 46^\circ$ 。

要求在此导通角范围之内, 均能输出 20A 负载电流, 故应在最小 θ 即最大 α_{\max} 时, 计算晶闸管电流有效值和变压器二次电流有效值。

$I_d=20\text{A}$, 则晶闸管平均电流 $I_{V1AR} = I_d / 2 = 10\text{A}$

当 $\alpha = 134^\circ = 134\pi / 180 = 0.7444\pi$ 时

波形系数为

$$K_{f1} = \frac{\sqrt{\pi \sin 2\alpha + 2\pi(\pi - \alpha)}}{\sqrt{2}(1 + \cos \alpha)} \approx 3.22$$

晶闸管电流的有效值为

$$I_{V1} = K_{f1} I_{V1AR} = 3.22 \times 10 = 32.2 \text{ (A)}$$

交流侧电流的有效值为

$$I_2 = \sqrt{2} I_{V1} \approx 45.5 \text{ (A)}$$

交流电源容量为

$$S_2 = I_2 U_2 = 45.5 \times 220 = 10010\text{VA} \approx 10.01\text{KVA}$$

2) 采用变压器降压供电时

$$U_d = 0.9 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

当 $\alpha_{\min} = 30^\circ$ 时, 输出电压为 100V, 则变压器二次电压为

$$U_2 = \frac{2U_d}{0.9(1 + \cos \alpha)} = \frac{2 \times 100}{0.9(1 + \cos 30^\circ)} \approx 119 \text{ (V)}$$

当 $U_d = 30\text{V}$ 时的最大控制角 α_{\max} 为

$$\cos \alpha_{\max} = \frac{2U_d}{0.9U_2} - 1 = \frac{2 \times 30}{0.9 \times 119} - 1 \approx 0.4398$$

$$\alpha_{\max} \approx 116^\circ$$

晶闸管导通角 $\theta = \pi - \alpha$, 则 $\theta = 150^\circ \sim 64^\circ$

要求在此导通角范围之内, 均能输出 20A 负载电流, 故应在最小 θ 即最大 α_{\max} 时, 计算晶闸管电流有效值和变压器二次电流有效值。

$I_d = 20\text{A}$, 则晶闸管平均电流 $I_{V1AR} = I_d / 2 = 10\text{A}$

当 $\alpha = 116^\circ = 116\pi / 180 = 0.6444\pi$ 时

波形系数为

$$K_{f1} = \frac{\sqrt{\pi \sin 2\alpha + 2\pi(\pi - \alpha)}}{\sqrt{2}(1 + \cos \alpha)} = 2.69$$

晶闸管电流的有效值

$$I_{V1} = K_{f1} I_{V1AR} = 2.69 \times 10 = 26.9 \text{ (A)}$$

变压器二次电流的有效值

$$I_2 = \sqrt{2} I_{V1} = 38.0 \text{ (A)}$$

变压器二次容量

$$S_2 = I_2 U_2 = 38.0 \times 119 = 4522\text{VA} \approx 4.52\text{KVA}$$

可见, 在可控整流电路输出较低电压时, 采用变压器供电有利于降低所用晶闸管的额定电流和额定电压, 以及交流电源的容量。因为采用变压器供电可使可控整流电路在较小控制角 α 和较低的变压器二次电压下运行。

2-9. 单相桥式半控整流电路, 由 220V 经变压器供电, 负载为大电感性并接有续流二极管。要求输出整流电压 20~80V 连续可调, 最大负载电流为 20A, 最小控制角 $\alpha_{\min} = 30^\circ$ 。试计算晶闸管、整流管、续流二极管的电流平均值、有效值以及变压器容量。

解: 1、在最小控制角 α_{\min} 和最大整流输出电压时, 计算变压器二次电压 U_2

$$U_2 = \frac{2U_d}{0.9(1+\cos\alpha)} = \frac{2 \times 80}{0.9(1+\cos 30^\circ)} \approx 95.3 \text{ (V)}$$

2、在最小整流输出电压时计算出最大控制角 α_{\max}

当 $U_d=20\text{V}$ 时的最大控制角 α_{\max} 为

$$\cos\alpha_{\max} = \frac{2U_d}{0.9U_2} - 1 = \frac{2 \times 20}{0.9 \times 95.3} - 1 \approx -0.5336$$

则

$$\alpha_{\max} = 122^\circ$$

3、在最不利的条件下，计算各器件的电流有效值和变压器二次有效值 I_2 ，因为晶闸管、整流管、续流二极管电流有效值涉及管芯的发热和合理选择器件的电流额定容量。变压器二次电流 I_2 涉及变压器容量的选择，这些量的计算必须以电路运行中的最大值为基础，以保证器件和设备的安全运行。

晶闸管与整流二极管电流的平均值 I_{V1AR} 、 I_{V2AR} 与有效值 I_{V1} 、 I_{V2}

其最大值出现在 $\alpha_{\min}=30^\circ$ 时，所以

$$I_{V1AR} = I_{V2AR} = \frac{\pi - \alpha}{2\pi} I_d = \frac{150^\circ}{360^\circ} \times 20 = 8.3 \text{ A}$$

$$I_{V1} = I_{V2} = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi}} I_d = \sqrt{\frac{150^\circ}{360^\circ}} \times 20 = 12.9 \text{ A}$$

续流二极管电流的平均值 I_{V4AR} 与有效值 I_{V4}

其最大值出现在 $\alpha_{\max}=122^\circ$ 时，所以

$$I_{V4AR} = \frac{\alpha}{\pi} I_d = \frac{122^\circ}{180^\circ} \times 20 = 13.6 \text{ A}$$

$$I_{V4} = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} I_d = \sqrt{\frac{122^\circ}{180^\circ}} \times 20 = 16.5 \text{ A}$$

变压器二次电流的有效值 I_2

其最大值出现在 $\alpha_{\min}=30^\circ$ 时，所以

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} [I_d^2 + (-I_d)^2] d(\omega t)} = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}} I_d = \sqrt{2} I_{V1} = 18.2 \text{ A}$$

则变压器二次容量

$$S_2 = I_2 U_2 = 18.2 \times 95.3 = 17345 \text{ VA} \approx 1.7 \text{ KVA}$$

2-10. 单相桥式全控整流电路和单相桥式半控整流电路接大电感负载，负载两端并接续流二极管的作用是什么？两者的作用是否相同？

解：单相桥式全控整流电路大电感负载整流输出平均电压为

$$U_d = \frac{2}{2\pi} \int_0^{\alpha+\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t (d\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 \cos \alpha \approx 0.9U_2 \cos \alpha$$

其负载两端并接续流二极管是为了使交流电源电压进入负半周时，由续流二极管续流，使晶闸管关断，提高整流输出电压的平均值。整流输出平均电压为

$$U_d = 0.9U_d \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

单相桥式半控整流电路接大电感负载，负载两端并接续流二极管的作用是为了避免失控现象的发生，保证整流电路的安全运行。整流输出平均电压亦为

$$U_d = 0.9U_d \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

2-11. 单相可控整流电路供电给电阻负载或蓄电池充电（反电势负载），在控制角 α 相同，负载电流平均值相等的条件下，哪一种负载晶闸管的额定电流值大一些？为什么？

解：反电动势负载电路中晶闸管的额定电流大一些。因为当控制角为 α 时，电阻性负载时，晶闸管的导通角 $\theta = \pi - \alpha$ 。

而反电动势式负载时，当 α 小于不导电角 δ 时， $\theta = \pi - 2\delta$ ；当 α 大于不导电角 δ 时，晶闸管的导通角 $\theta = \pi - \alpha - \delta$ 。

所以，反电动势负载时的波形系数 K_{r1} 大于电阻性负载时的波形系数 K_{r2} 。当负载电流平均值相等的条件下，反电动势负载时的晶闸管电流的有效值大于电阻性负载时的晶闸管电流的有效值。因此，反电动势负载晶闸管的额定电流大一些。

2-12. 直流电动机负载的特点及其等效电路如何？串接平波电抗器的意义何在？

解：直流电动机反电动势负载，其等效电路为一直流反电动势和电阻串联。

由于反电势的作用，晶闸管的导通角变小，负载电流将出现断续，通常反电势负载的内阻又很小，所以输出同样的平均电流，峰值电流很大，因而电流的有效值大，要求电源的容量亦大。对于直流电动机负载，将使其机械特性变软，整流换相时产生火花。

为使负载电流连续，克服上述缺点，常在反电势负载的整流输出端串联平波电抗器，其目的是利用电感的储能作用来平衡电流的脉动和延长晶闸管的导通时间。

2-13. 串平波电抗器电动机负载与大电感负载在单相全控桥整流电路中，输出电压波形一样吗？为什么？电动机的反电动势 E_d 不起作用吗？

解：在理想的情况下，二种电路输出电压的波形是一样的。

因为平波电抗器电感量的选择原则是：在最小的负载电流 I_{dmin} （低速轻载情况下）时，保证负载电流连续，即晶闸管导电角 $\theta = 180^\circ$ 。这是在最不利情况下，为保证电流连续选择的电感 L 值，当负载电流大于 I_{dmin} 时， L 的储能增多，电流就不会不连续。当负载电流连续时，其输出电压的波形与大电感负载电路相同

电动机的反电动势 E_d 不是不起作用，串平波电抗器的反电势负载电流连续时，晶闸管导通角 $\theta = 180^\circ$ ，波形与大电感负载时相同，输出电压 U_d 交流分量几乎全部降落在电抗器上，反电势负载（例如直流电动机）上的电压脉动很小，负载电流 i_d 波形基本平直，可以近似看成为平行于横坐标的直线，晶闸管电流波形为 180° 的矩形波。所以，各种参数之间的数量关系，也与大电感负载时相同。只是由于反电势的作用，负载电流的平均值为

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

2-14. 对单相大电感性负载可控整流电路，画图说明全控桥和半控桥输出电压 u_d 、晶闸管电流 i_{V1} 和变压器二次电流 i_2 波形的差别。半控桥加续流二极管与其不加续流二极管时又有何差别？

解：单相全控桥大电感性负载可控整流电路，输出电压 u_d 、晶闸管电流 i_{V1} 和变压器二次电流 i_2 波形如教材 P37 中的图 2-6(d)、(f)、(g)、(h) 所示。晶闸管导电角为 $\theta = \pi$ ，对应桥臂对管轮流导通和关断，电流 i_{V1} 波形为 180° 的正向矩形波。变压器二次电流 i_2 波形为正负 180° 的矩形波。当 $\alpha > 0^\circ$ 时，输出电压 u_d 波形将进入交流电源的负半周。

半控桥加接续流二极管 V4 后，输出电压 u_d 和变压器二次电流 i_2 的波形与不接续流二极管 V4 时相同，如教材 P41 中的图 2-8(d)、(j) 所示。而晶闸管和整流二极管的导电角为 $\theta = \pi - \alpha$ 。图 2-8(f) 和图 2-8(i) 波形上有斜线的部分不再存在，这部分的导电功能由续流二极管 V4 来代替，如教材图 2-8(1) 所示。

不加续流二极管时，晶闸管的导通角和整流二极管的导电角为 $\theta = \pi$ ，但图 2-8(f) 和图 2-8(i) 波形上有斜线的部分对应的 α 期间，为同一桥臂的晶闸管和整流二极管续流期间。

半控桥不加续流二极管和加接续流二极管两种情况的输出电压 u_d 波形是相同的，在 α 角对应的区间，输出电压 u_d 为零。变压器二次电流 i_2 波形为正负 $\pi - \alpha$ 的矩形波，在 α 角对应的区间，由于是续流期间，变压器二次电流 i_2 为零。但接续流二极管电路，在续流期间，晶闸管和整流二极管全部关断。