



交流-直流变换的功能是将交流电转换为直流电,谓之整流。实现整流的方法很多,直流发电机的电刷和换向器是典型的机械式整流器,现在广泛应用的整流器则是由电力电子器件组成的变换电路来实现,称为整流电路。一般整流电路由交流电源、整流器和负载三部分组成(图 3.1)。

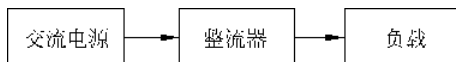


图 3.1 整流电路组成

交流电源: 在电网电压合适的时候可以直接取自电网,但是更多的是通过变压器得到。通过变压器不仅可以改变交流电压,并且有与电网隔离的作用。按交流电源的相数区分,整流器有单相整流器、三相整流器,及更多相数的整流器。

整流器: 由电力电子器件组成的实现交流-直流变换的基本电路。按使用的电力电子器件性质区分,有不控整流器和可控整流器等。

负载: 整流电路的负载是各种各样的,常见的工业负载如果按性质区分,主要有电阻性 R 负载、电阻电感性 RL 负载、反电动势 E 负载等。其中属于电阻性负载的典型应用有白炽灯、电焊、电解电镀、电阻炉等。阻感性负载有电磁铁、直流电机和同步电机的励磁绕组等。反电动势负载主要有蓄电池和直流电动机的电枢等。

本章主要介绍单相和三相可控整流电路的工作原理,不控整流电路可以视为可控整流的特例。重点将分析在不同负载下整流器的工作状态和波形,以及整流输出电压、电流与控制角的关系。在分析中一般忽略电力电子器件的管压降和漏电流,并且要注意电力电子器件的导通和关断条件,以及在不同负载下各种整流器波形的特点和比较。

3.1 单相可控整流电路

将单相交流电变换为直流的电路称为单相整流电路,采用可控电力电子器件的整流电路可以调节直流输出电压的大小,因此称为可控整流电路。本节主要介绍晶闸管器件组成的可控整流电路。晶闸管的特点是:在晶闸管承受正向电压,并且门极有正的驱动信号时晶闸管导通,一旦晶闸管导通,只要通过管子的电流不为零(低于维持电流),即使撤去驱动信号,晶闸管还继续导通,只有在晶闸管电流下降到维持电流以下或者晶闸管承受反向电压时晶闸管才关断。这一特点使晶闸管仅需要脉冲触发,并且可以利用交流电网电压换流。

3.1.1 单相半波可控整流电路

在一个开关组成的变流电路(图 1.1(a))中,开关元件采用晶闸管,即组成了晶闸管单相半波可控整流电路。单相半波可控整流电路虽然简单,但是它包含了整流电路的许多基本概念,这里主要介绍电阻和电感两种负载的工作情况。为了叙述方便,按惯例,以英文小写字母 u 、 i 表示电压、电流的瞬时值,以大写字母 U 、 I 表示交流电压、电流的有效值和直流电压、电流的平均值。

1. 电阻性负载

晶闸管单相半波整流电路电阻负载电路如图 3.2(a)所示。图中整流电路由整流变压器 T 供电。

1) 电路工作原理

设变压器副边电压 $u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$ (图 3.2(b)),在电压 u_2 的正半周 $0 \sim \pi$ 区间里(图 3.2(c)),晶闸管承受正向电压,如果在这范围里给晶闸管门极施加触发脉冲(图 3.2(d)),则晶闸管导通,电阻 R 中有电流通过。在电压 u_2 的负半周 $\pi \sim 2\pi$ 区间里,晶闸管承受反向电压,负载电流也为零,晶闸管关断。因此在交流电压的一个周期里,半波整流电路的工作过程可以划分为下面几个阶段(图 3.2(e))。

阶段 1($0 \sim \omega t_1$): 晶闸管承受正向电压,但是门极没有触发脉冲,晶闸管处于关断状态,负载 R 中没有电流通过,晶闸管承受的电压是电源电压 $u_{VT} = u_2$ (图 3.2(e))。

阶段 2($\omega t_1 \sim \pi$): 在 ωt_1 时,晶闸管被触发,且由于承受正向电压,晶闸管导通,之后虽然触发脉冲消失,但是晶闸管仍保持导通状态,直到 $\omega t = \pi$ 时为止。在晶闸管的导通区间,如果忽略晶闸管导通时的管压降,则晶闸管两端电压为零 $u_{VT} = 0$,且有 $u_d = u_2$,其中 u_d 既是整流器的输出电压也是负载电阻 R 两端的电压,并且在晶闸管导通时,经过晶闸管 VT 和电阻 R ,以及变压器副边的电流为

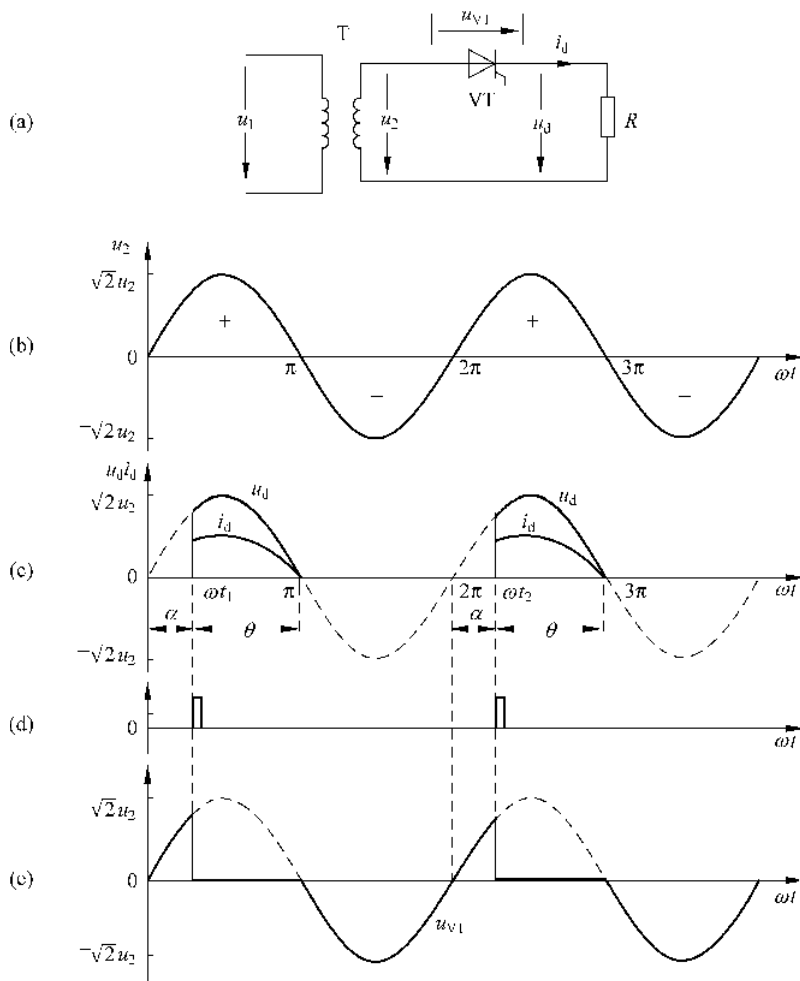


图 3.2 单相半波可控整流电路电阻负载

$$i_d = \frac{u_2}{R} = \frac{u_d}{R} = \frac{\sqrt{2}U_2 \sin \omega t}{R} \quad \alpha \leq \omega t \leq \pi \quad (3.1)$$

在 $\omega t = \pi$ 时, $u_2 = 0$, 同时回路电流 i_d 也下降为零, 晶闸管关断。

阶段 3($\pi \sim 2\pi$): 在这段区间里, 由于交流电压进入负半周, 晶闸管受反向电压并保持关断状态, 负载端电压和电流都为零, 晶闸管承受的是交流电源的负半周电压(图 3.2(e))。

在 $\omega t \geq 2\pi$ 以后的周期里, 重复上述过程, 从图 3.2(c) 可以看到, 通过晶闸管和负载电阻的电压、电流波形是只有单一方向的波动的直流电, 改变晶闸管被触发的时刻 ωt_1 , 整流器输出电压 u_d 、电流 i_d 的波形也随之变化, 其平均值也同时改变, 因此在电源正半周内, 改变晶闸管的触发时刻, 可以调节晶闸管输出直流电压

和电流的平均值。并且变压器副边电流也是相同的波动直流电,既含有直流成分也包含了交流成分,其中的直流成分容易引起变压器磁路的饱和使铁芯发热,对变压器的运行不利。

为了以后分析晶闸管电路方便,现定义以下几个术语:

(1) 控制角。即从晶闸管开始承受正向电压到对它施加触发脉冲的这段时间,通常用电角度 α 表示,其单位可以是弧度(rad)或度($^{\circ}$)。

(2) 移相和移相范围。改变控制角 α 大小的过程称为移相。移相范围是指通过移相改变控制角 α ,使整流输出电压从零到最大变化的控制角 α 变化范围。在单相半波整流电路电阻负载时,控制角的移相范围即是晶闸管承受正向电压的时间,以电角度表示为 180° ,以弧度表示为 π 。通过移相改变控制角 α 可以调整整流器输出电压和电流,这种控制方式称为相位控制,简称“相控”。

(3) 导通角。即晶闸管在一周期中导通的时间,一般用电角度 θ 表示。在单相半波整流电路电阻负载时,晶闸管的导通角与控制角和移相范围的关系是

$$\theta = 180^{\circ} - \alpha \text{ 或 } \theta = \pi - \alpha。$$

2) 参数计算

通过上述分析,可以计算单相半波可控整流电路电阻负载时,整流器输出直流电压平均值 U_d 为

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} \\ &= 0.45 U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2} \end{aligned} \quad (3.2)$$

整流输出直流电流平均值 I_d 为

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_d d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{\sqrt{2} U_2 \sin \omega t}{R} d(\omega t) = \frac{U_d}{R} \quad (3.3)$$

式中: U_2 ——交流电压的有效值。

从式(3.2)和式(3.3)可看到,在 $\alpha=0$ 时,整流电压最高,电阻上可以得到最大的电流;在 $\alpha=\pi(\alpha=180^{\circ})$ 时,整流电压为零,负载电阻的电流也为零,调节控制角 α ,可以调整整流输出电压和电流,实现可控整流。

2. 电阻-电感负载

如果在单相半波整流电路的负载侧接上电阻电感负载(图 3.3(a)),由于电感是储能元件,在电感电流增加时,电感产生的电动势($e_L = -L \frac{di_L}{dt}$)极性将阻止电流的上升;在电感电流下降时,电感电动势 e_L 的极性将阻止电流的下降(图 3.3(a)), e_L 的大小和极性与电流变化率 $\frac{di_L}{dt}$ 有关,这使电感中电流不能突变,这是电感负载的特点。

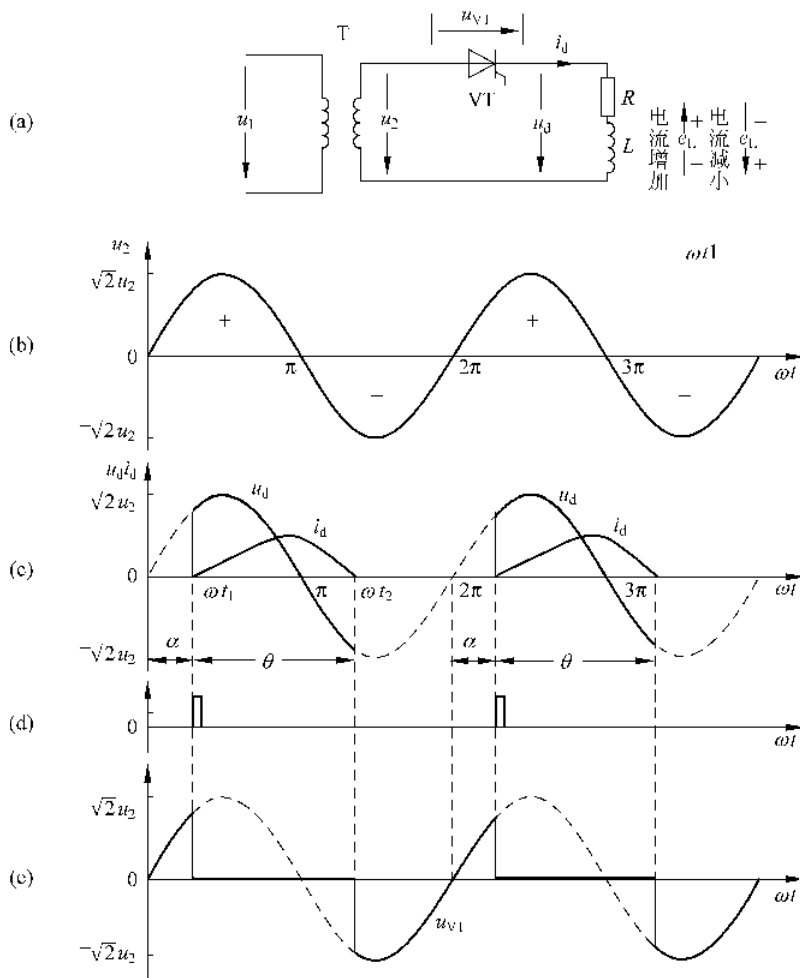


图 3.3 单相半波整流电路 RL 负载

晶闸管单相半波整流电路阻感负载时的工作过程,可以分为下面几个阶段:

阶段 1($0 \sim \omega t_1$): 交流电压 u_2 进入正半周,晶闸管承受正向电压,但是门极尚未触发,晶闸管处于关断状态,负载 RL 中没有电流通过,晶闸管承受的电压是电源电压 $u_{VT} = u_2$ (图 3.3(e))。

阶段 2($\omega t_1 \sim \pi$): 在 ωt_1 控制角为 α 时,晶闸管被触发,因为晶闸管承受正向电压,晶闸管导通。由于电感反电动势的作用,电流从零开始上升,电感开始储能。随着 u_2 的上升和下降,电流 i_d 也从 0 上升到最大值,然后开始减小。在电流减小时,电感释放储能,电感电动势 e_L 也改变极性(图 3.3(a))。到 $\omega t = \pi$ 时, $u_2 = 0$,但是电感尚有储能,电流 i_d 不为零。

阶段 3($\pi \sim \omega t_2$): 这时 u_2 进入负半周,但是晶闸管并不会随 u_2 变负而关断,

这是因为电感储能还没有释放完, 尽管 i_d 减小, 但 $\left| L \frac{di_d}{dt} \right| - |u_2| > 0$, 是电感电动势 e_L 克服了 u_2 的负半周电压, 使晶闸管仍然承受正向电压而继续导通。到 ωt_2 时, 电感储能释放完, i_d 减小为 0, 晶闸管才自动关断, 这一阶段结束。在这一阶段中, 因为晶闸管仍在导通, 忽略晶闸管的管压降, $u_d = u_2$, 因此整流输出 u_d 也随 u_2 出现了负值(图 3.3(c)), 在晶闸管导通期间晶闸管电压 $u_{VT} = 0$ 。

阶段 4($\omega t_2 \sim 2\pi$): 在这段区间内晶闸管受反向电压处于关断状态 $u_{VT} = u_2$ 。

在 $\omega t \geq 2\pi$ 以后的周期里, 重复上述过程。电感性负载时整流电路的特点是整流电压 u_d 出现负的部分, 在 u_d 与 i_d 方向相同时, 电源 u_2 输出电能, 电能一部分在电阻上消耗, 一部分由电感转化为磁场能储存起来; 在 u_d 与 i_d 方向相反时, 电感输出电能, 一部分在电阻上消耗, 一部分回馈电源 u_2 , 并经变压器送回电网。当负载角 φ ($\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R}$) 越趋近于 $\frac{\pi}{2}$, 电感储能越多, u_d 正负半周的面积就越接近相等, 平均电压 U_d 就接近 0。由于电感负载的上述特点, 在大电感时(φ 接近 $\pi/2$), 无论 α 多大, 整流输出平均电压都很小, 出现输出电压平均值很小, 但是整流电路仍有较大电流输出的矛盾。为解决此问题, 一般在单相半波整流 RL 负载的两端并联一个续流二极管。

3. 带续流二极管的单相半波整流电路

带续流二极管的单相半波整流电阻电感负载电路如图 3.4 所示。在 u_2 正半周 ωt_1 时, 触发晶闸管 VT 导通, 则 $u_d = u_2$, 负载 RL 有电流通过; 在 $\omega t \geq \pi$ 后, 因为电感电流下降, 电感电动势改变方向, 使二极管 VD 导通, 这时 VT 受 u_2 反向电压而关断, 电感 L 经二极管 VD 续流, 将电感储能能在电阻 R 中消耗。经过晶闸管和续流二极管的电流 i_{VT} , i_{VD} 分别如图 3.4(c) 和图 3.4(d) 所示。负载电压 u_d 的波形没有负半周(图 3.4(b)), u_d 波形与纯电阻负载时波形(图 3.2(c))相同, 因此整流器输出电压平均值也与电阻负载时相同。

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

晶闸管的移相范围为 $0 \sim \pi$, 导通角为 $\theta = \pi - \alpha$ 。

关于该电路的电流计算一般采用工程近似的方法。即设负载电流平均值

$$I_d \approx \frac{U_d}{R} \quad (3.4)$$

则通过晶闸管电流的平均值 I_{dVT} 和有效值 I_{VT}

$$I_{dVT} = \frac{\pi - \alpha}{2\pi} I_d \quad (3.5)$$

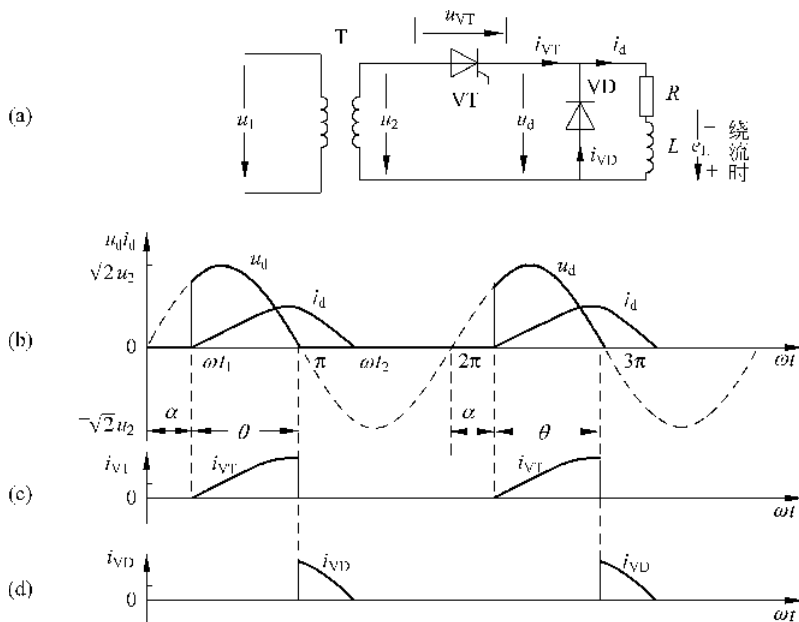


图 3.4 带续流二极管的单相半波整流电路

$$I_{VT} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} I_d^2 d(\omega t)} = I_d \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi}} \quad (3.6)$$

通过二极管电流的平均值 I_{dVD} 和有效值 I_{VD}

$$I_{dVD} = \frac{\pi + \alpha}{2\pi} I_d \quad (3.7)$$

$$I_{VD} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\pi}^{\pi+\alpha} I_d^2 d(\omega t)} = I_d \sqrt{\frac{\alpha}{2\pi}} \quad (3.8)$$

单相半波整流电路是最简单的可控整流电路,在一个周期中,整流输出电压只有一个波头,脉动大。变压器也只有半个周期有电流输出,变压器的利用率不高,并且变压器副边电流是脉动的直流电,铁芯会产生直流磁化现象,使铁芯易于发热,因此单相半波整流电路仅使用在要求不高的交直流变换场合。

3.1.2 单相桥式全控整流电路

晶闸管单相桥式全控整流电路如图 3.5 所示,现以电阻和阻感负载两种情况分析。

1. 电阻负载

1) 工作原理

该电路的特点是:要有电流通过负载 R ,必须有晶闸管 VT_1 和 VT_3 或 VT_2

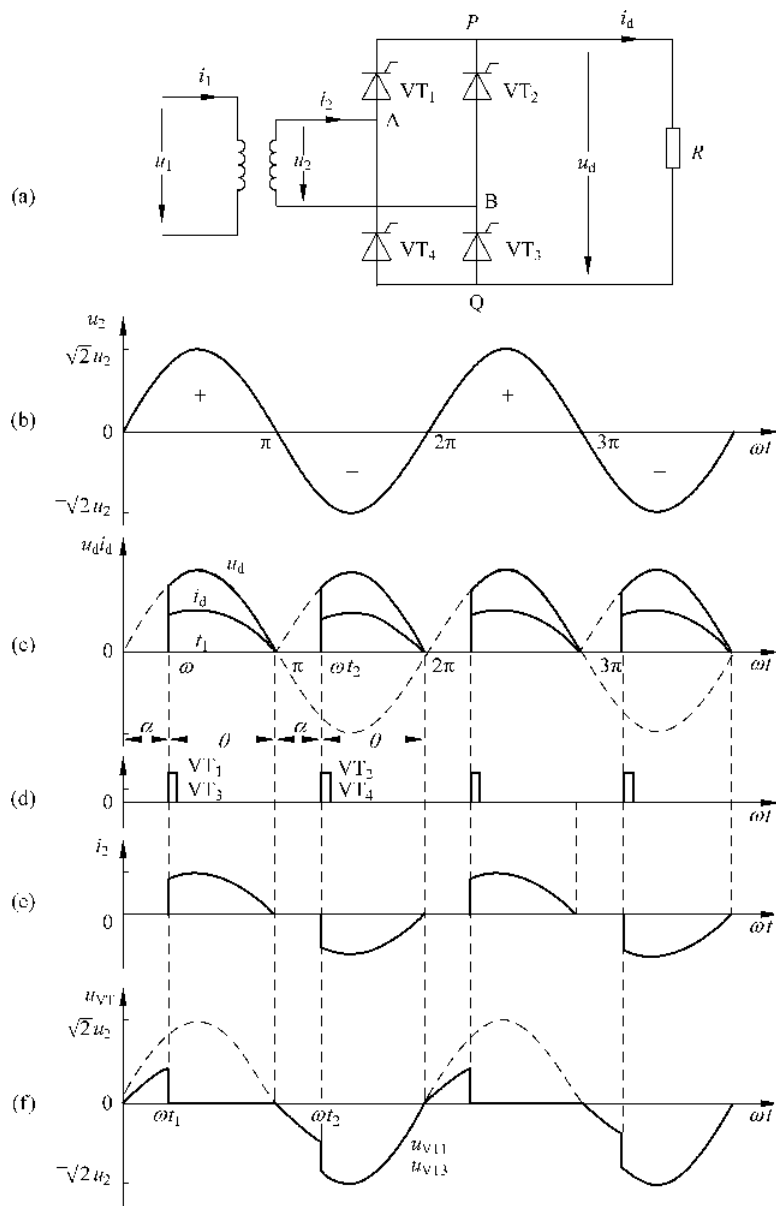


图 3.5 单相桥式整流电路(电阻负载)

和 VT_4 同时导通, 由于晶闸管的单向导电性能, 尽管 u_2 是交流, 但是通过负载 R 的电流 i_d 始终是单方向的直流电, 其工作过程可分如下几个阶段:

阶段 1 ($0 \sim \omega t_1$): 这阶段中 u_2 在正半周, A 点电位高于 B 点电位, 晶闸管 VT_1 和 VT_2 反串串联后与 u_2 连接, VT_1 承受正向电压为 $u_2/2$ (图 3.5(f)), VT_2 承受 $u_2/2$ 的反向电压; 同样 VT_3 和 VT_4 反串与 u_2 连接, VT_3 承受 $u_2/2$ 的正向电压

(图 3.5(f)), VT_4 承受 $u_2/2$ 反向电压。虽然 VT_1 和 VT_3 受正向电压,但是尚未被触发导通,负载没有电流通过,所以 $u_d=0, i_d=0$ (图 3.5(c))。

阶段 2($\omega t_1 \sim \pi$): 在 ωt_1 时同时触发 VT_1 和 VT_3 , 由于 VT_1 和 VT_3 受正向电压而导通,有电流经变压器 A 点 $\rightarrow VT_1 \rightarrow R \rightarrow VT_3 \rightarrow$ 变压器 B 点形成回路。在这段区间里, $u_d=u_2, i_d=i_{VT1}=i_{VT3}=i_2=u_d/R$ (图 3.5(c), (e))。由于 VT_1 和 VT_3 导通,忽略管压降, $u_{VT1}=u_{VT3}=0$ (图 3.5(e)), 而 VT_2 和 VT_4 承受的电压为 $u_{VT2}=u_{VT4}=u_2$ 。

阶段 3($\pi \sim \omega t_2$): 从 $\omega t=\pi$ 开始 u_2 进入了负半周, B 点电位高于 A 点电位, VT_1 和 VT_3 由于受反向电压而关断(同时通过晶闸管电流也减小为 0), 这时 $VT_1 \sim VT_4$ 都不导通, 各晶闸管承受 $u_2/2$ 的电压, 但 VT_1 和 VT_3 承受的是反向电压(图 3.5(e)), VT_2 和 VT_4 承受正向电压, 负载没有电流通过, $u_d=0, i_d=i_2=0$ 。

阶段 4($\omega t_2 \sim 2\pi$): 在 ωt_2 时 u_2 电压为负, VT_2 和 VT_4 承受正向电压, 触发 VT_2 和 VT_4 即导通, 有电流自 B 点 $\rightarrow VT_2 \rightarrow R \rightarrow VT_4 \rightarrow$ A 点, $u_d=u_2, i_d=i_{VT2, VT4}=i_2=u_d/R$ 。由于 VT_2 和 VT_4 导通, VT_1 和 VT_3 承受 u_2 的负半周电压(图 3.5(f))。至此一个周期工作完毕, 下一个周期重复上述过程, 单相桥式整流电路两次脉冲间隔为 180° 。

2) 参数计算

(1) 整流输出平均电压 U_d : 由于 u_d 一个周期中有两个波头, 单相桥式整流电路输出的直流平均电压 U_d 是单相半波整流的两倍。

$$U_d = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \frac{1+\cos\alpha}{2} = 0.9U_2 \frac{1+\cos\alpha}{2} \quad (3.9)$$

在 $\alpha=0^\circ$ 时, U_d 最高, $U_d=0.9U_2$; 在 $\alpha=180^\circ$ 时, $U_d=0$, 因此控制角的移相范围为 $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ 。

(2) 整流输出平均电流 I_d :

$$I_d = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{\sqrt{2}U_2 \sin \omega t}{R} d(\omega t) = \frac{0.9U_2}{R} \frac{1+\cos\alpha}{2} = \frac{U_d}{R} \quad (3.10)$$

(3) 通过晶闸管电流的平均值 I_{dVT} 和有效值 I_{VT} :

因为 VT_1 、 VT_3 和 VT_2 、 VT_4 互相轮流导通, 因此通过每个晶闸管的平均电流是整流输出的负载平均电流 I_d 的一半。

$$I_{dVT} = \frac{1}{2} I_d \quad (3.11)$$

$$I_{VT} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left(\frac{\sqrt{2}U_2}{R} \sin \omega t \right)^2 d(\omega t)} = \frac{\sqrt{2}U_2}{R} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi-\alpha}{\pi}} \quad (3.12)$$

在求得晶闸管电流有效值 I_{VT} 后, 按发热相等的原则, 可以将 I_{VT} 折算为正弦半波的平均值, 从而选择晶闸管额定电流 I_{NVT} :

$$I_{NVT} = (1.5 \sim 2) \frac{I_{VT}}{1.57} \quad (3.13)$$

在单相桥式整流电路中,晶闸管承受的最高正向电压为 $\frac{\sqrt{2}U_2}{2}$,最高反向电压为 $\sqrt{2}U_2$,所以晶闸管的额定电压 U_{NVT} 取:

$$U_{\text{NVT}} = (2 \sim 3) \sqrt{2}U_2 \quad (3.14)$$

(4) 通过变压器副边电流的有效值 I_2 和变压器容量 S :

通过变压器副边电流 i_2 的波形如图 3.5(e),根据波形可以计算副边电流的有效值:

$$\begin{aligned} I_2 &= \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_a^\pi \left(\frac{\sqrt{2}U_2}{R} \sin\omega t \right)^2 d(\omega t)} \\ &= \frac{U_2}{R} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} = \sqrt{2} I_{\text{VT}} \end{aligned} \quad (3.15)$$

在不考虑变压器损耗时,变压器容量 $S=U_2 I_2$ 。

例 3.1 单相桥式全控整流电路接电阻负载,交流电源电压 $U_2=220\text{V}$,要求输出的直流平均电压在 $50\sim 150\text{V}$ 范围内连续可调,并且在这范围内,要求输出的直流平均电流都能达到 10A 。试计算控制角的变化范围、晶闸管的导通角和确定电源容量,并选择晶闸管。

解 由式 3.9
$$\cos\alpha = \frac{2U_d}{0.9U_2} - 1$$

在 $U_d=50\text{V}$ 时
$$\cos\alpha = \frac{2 \times 50}{0.9 \times 220} - 1 = -0.5 \quad \alpha = 120^\circ$$

在 $U_d=150\text{V}$ 时
$$\cos\alpha = \frac{2 \times 150}{0.9 \times 220} - 1 = 0.51 \quad \alpha = 59^\circ$$

控制角的调节范围为 $59^\circ \sim 120^\circ$ 。

晶闸管的导通角 $\theta=180^\circ-\alpha$,所以当输出电压从 50V 到 150V 变化时,晶闸管的导通角也从 $60^\circ \sim 121^\circ$ 变化。因为在电压的变化范围中都要求整流输出平均电流 $I_d=10\text{A}$,从式 3.10 和式 3.12 中消去 U_2/R ,可得通过晶闸管电流有效值 I_{VT} 与整流输出电压平均值 I_d 的关系为

$$I_{\text{VT}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{2I_d}{0.9(1+\cos\alpha)} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

在 $\alpha=59^\circ$
$$I_{\text{VT}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{2 \times 10}{0.9(1+\cos 59^\circ)} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2 \times 59^\circ + \frac{180^\circ - 59^\circ}{180^\circ}} = 9.4\text{A}$$

$\alpha=120^\circ$
$$I_{\text{VT}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{2 \times 10}{0.9(1+\cos 120^\circ)} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2 \times 120^\circ + \frac{180^\circ - 120^\circ}{180^\circ}} = 13.9\text{A}$$

从上式可以看到,负载平均电流相同时,控制角越大,导通角越小,通过晶闸管的电流有效值越大,因此本题选择晶闸管时,应该按电压较低,控制角较大时情况计算晶闸管额定电流

$$I_{\text{NVT}} = (1.5 \sim 2) \frac{I_{\text{VT}}}{1.57} = (1.5 \sim 2) \frac{13.9}{1.57} = 13.3 \sim 17.7(\text{A})$$

晶闸管额定电压

$$U_{\text{NVT}} = (2 \sim 3) \sqrt{2} U_2 = (2 \sim 3) \sqrt{2} \times 220 = 622 \sim 933 (\text{V})$$

变压器副边电流

$$I_2 = \sqrt{2} I_{\text{VT}} = \sqrt{2} \times 13.9 = 19.7 \text{ A}$$

电源容量

$$S = U_2 I_2 = 220 \times 19.7 \approx 4.3 \text{ kVA}$$

2. 电阻电感负载

1) 工作原理

单相桥式全控整流电阻电感负载电路如图 3.6(a) 所示。下面分电感较小和电感较大两种情况分析。

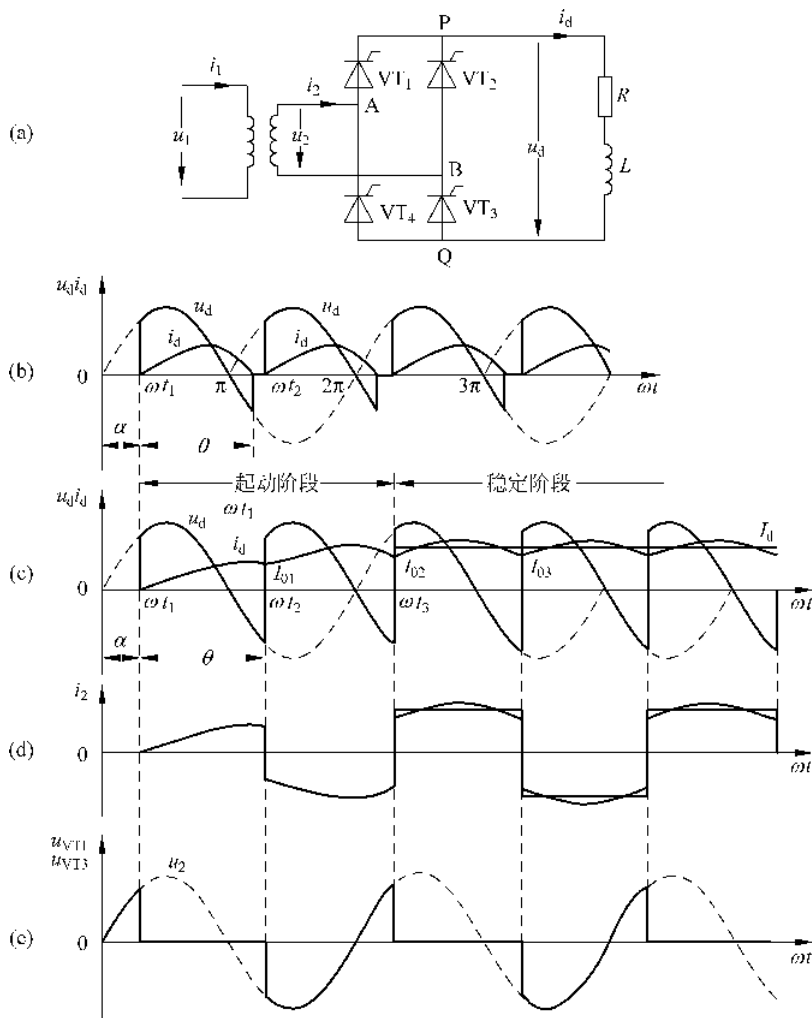


图 3.6 单相桥式整流电路(阻感负载)