

交流电力控制电路和交交变频电路

学习目标与重点

- 掌握交流调压电路与调功电路的区别；
- 重点掌握交流调压电路的基本工作原理和波形分析方法；
- 了解变频电路的实现方法。

关键术语

双向晶闸管；有效值；管压降；变频电路

【应用导入】 路灯的节能调节方法。

传统的照明技术有很多弊端,后半夜用电设备减少,电网电压升高,路灯的照明度也升高,不仅造成电能的浪费,也使灯具的使用寿命大大降低。应用本章介绍的无触点调压方式,可以调节路灯的照明,使路灯端电压波形连续平滑。

交流-交流变流变换,即把一种形式的交流变成另一种形式的交流。在进行交流-交流变流时,可以改变相关的电压、电流、频率和相数等。只改变电压、电流或对电路的通断进行控制,而不改变频率的电路称为交流电力控制电路。5.1节和5.2节讲述交流电力控制电路。其中,5.1节讲述采用相位控制的交流电力控制电路,即交流调压电路;5.2节讲述采用通断控制的交流电力控制电路,即交流调功电路及交流无触点开关。

改变频率的电路称为变频电路。变频电路大多数不改变相数,也有少部分是改变相数的,如把单相电变为三相电,或把三相电变为单相电。变频电路有两种,分别是交交变频电路和交直交变频电路。交交变频是直接把一种频率的交流变成另一种频率或可变频率的交流,也称为直接变频电路。交直交变频先把交流整流成直流,再把直流逆变成另一种频率或可变频率的交流,这种通过直流中间环节的变频电路也称间接变频电路。本章只讲述直接变频电路,5.3节讲的是目前应用较多的晶闸管交交变频电路。

5.1 交流调压电路

如果在交流电源和负载之间,用两个晶闸管反并联后串联在交流电路中,通过对晶闸管的控制就可以控制交流电力。这种电路只改变输出的幅值,不改变交流电的频率,称为交流电力控制电路。交流调压电路是指在每半个周波内通过对晶闸管开通相位的控制,可以方便地调节输出电压的有效值。交流调功电路是以交流电的周期为单位控制晶闸管的通断,改变通态周期数和断态周期数的比,可以方便地调节输出功率的平均值。如果并不着意调节输出平均功率,而只是根据需要接通或断开电路,则称串入电路中的晶闸管为交流电力电子开关。本节讲述交流调压电路,其他交流电力控制电路在 5.2 节讲述。

交流调压电路广泛用于工业加热、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。在供用电系统中,这种电路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。如采用晶闸管相控整流电路,高电压小电流可控直流电源就需要很多晶闸管串联;同样,低电压大电流直流电源需要很多晶闸管并联,这都是十分不合理的。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。

交流调压电路可分为单相交流调压电路和三相交流调压电路。前者是后者的基础,也是本节的重点,所以首先介绍单相交流调压电路。

5.1.1 单相交流调压电路

单相交流调压电路可以用两只普通晶闸管反并联,也可以用一只双向晶闸管,后一种因其线路简单、成本低,故用得越来越多。

与整流电路一样,交流调压电路的工作情况也与负载性质有很大的关系,因此分别予以讨论。

1. 电阻负载

图 5.1 为电阻负载单相交流调压电路图及其波形。可用一只双向晶闸管代替图中的晶闸管 VT_1 和 VT_2 。在交流电源 u_1 的正半周对 VT_1 的开通角 α 进行控制,在

交流电源 u_1 的负半周对 VT_2 的开通角 α 进行控制,就可以调节输出电压。正负半周 α 起始时刻($\alpha=0$)均为电压过零时刻。在稳态情况下,应使正负半周的 α 相等。可以看出,负载电压波形是电源电压波形的一部分,负载电流(也即电源电流)和负载电压的波形相同。

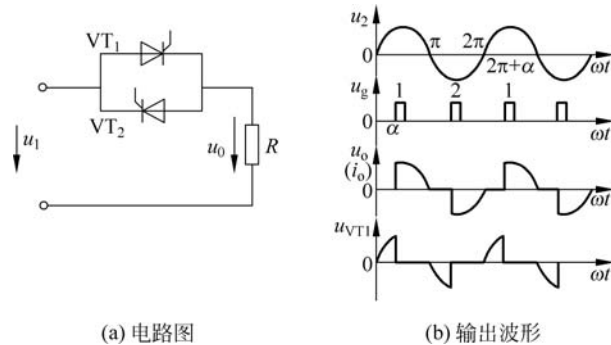


图 5.1 电阻负载单相交流调压电路图及其波形

上述电路在控制角为 α 时,负载电压的有效值为 U_o 、负载电流的有效值为 I_o 、晶闸管电流的有效值为 I_{VT} 和电路的功率因数 λ 为

$$U_o = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}U_1 \sin\omega t)^2 d(\omega t)} = U_1 \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (5-1)$$

$$I_o = \frac{U_o}{R} \quad (5-2)$$

$$I_{VT} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \left(\frac{\sqrt{2}U_1 \sin\omega t}{R} \right)^2 d(\omega t)} = \frac{U_1}{R} \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right)} \quad (5-3)$$

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{U_o I_o}{U_1 I_o} = \frac{U_o}{U_1} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (5-4)$$

从图 5.1 及以上各式可以看出, α 的移相范围为 $0 \leq \alpha \leq \pi$ 。 $\alpha=0^\circ$ 时,相当于晶闸管一直接通,输出电压为最大值, $U_o=U_1$,功率因数 $\lambda=1$ 。随着 α 的增大, U_o 逐渐降低。直到 $\alpha=\pi$ 时, $U_o=0$,功率因数 $\lambda=0$ 。随着 α 的增大,输入电流滞后于电压且发生畸变, λ 也逐渐降低。

2. 阻感负载

电路图及其波形如图 5.2 所示。

设负载的阻抗角为 $\varphi = \arctan(\omega L/R)$ 。如果用导线把晶闸管完全短接,稳态时负载电流应是正弦波,其相位滞后于电源电压 u_1 的角度为 φ 。在用晶闸管控制时,很

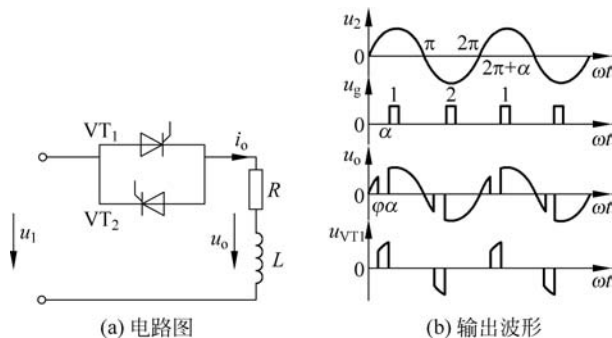


图 5.2 阻感负载单相交流调压电路及其波形

显然只能进行滞后控制,使负载电流更为滞后,而无法使其超前。为了方便,把 $\alpha=0^\circ$ 的时刻仍定在电源电压过零的时刻,显然阻感负载下稳态时 α 的移相范围应为 $\varphi \leq \alpha \leq \pi$ 。

阻抗负载时 α 的移相范围为 $\varphi \leq \alpha < \pi$ 。但 $\alpha < \varphi$ 时,并非电路不能工作,下面分析这种情况。

当 $\varphi \leq \alpha < \pi$ 时, VT_1 和 VT_2 的导通角 θ 均小于 π , α 越小, θ 越大; $\alpha = \varphi$ 时, $\theta = \pi$ 。当 α 继续减小,例如在 $0 \leq \alpha < \varphi$ 的某一时刻触发 VT_1 ,则 VT_1 的导通时间将超过 π ;到 $\omega t = \pi + \alpha$ 时刻触发 VT_2 时,负载电流 i_o 尚未过零, VT_1 仍在导通, VT_2 不会立即开通;直到 i_o 过零后,如 VT_2 的触发脉冲有足够的宽度而尚未消失(参见图 5.2), VT_2 就会开通。因为 $\alpha < \varphi$, VT_1 提前开通,负载 L 被过充电,其放电时间也将延长,使得 VT_1 结束导电时刻大于 $\pi + \varphi$,并使 VT_2 推迟开通, VT_2 的导通角当然小于 π 。

这种情况下 i_o 已不存在断流区,其过渡过程和带 $R-L$ 负载的单相交流电路在 $\omega t = \alpha$ ($\alpha < \varphi$)时合闸所发生的过渡过程完全相同。可以看出, i_o 由两个分量组成,第一项为正弦稳态分量,第二项为指数衰减分量。在指数分量的衰减过程中, VT_1 的导通时间逐渐缩短, VT_2 的导通时间逐渐延长。当指数分量衰减到零后, VT_1 和 VT_2 的导通时间都趋近到 π ,其稳态的工作情况和 $\alpha = \varphi$ 时完全相同。整个过程的工作波形如图 5.3 所示。

5.1.2 三相交流调压电路

根据三相联结形式的不同,三相交流调压电路具有多种形式。图 5.4(a)是星形联结,图 5.4(b)是线路控制三角形联结,图 5.4(c)是支路控制三角形联结,图 5.4(d)是中点控制三角形联结。其中图 5.4(a)和图 5.4(c)所示两种电路最常用,下面分别

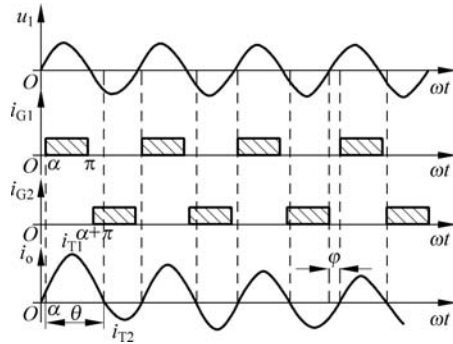


图 5.3 $\alpha < \varphi$ 时阻感负载交流调压电路工作波形

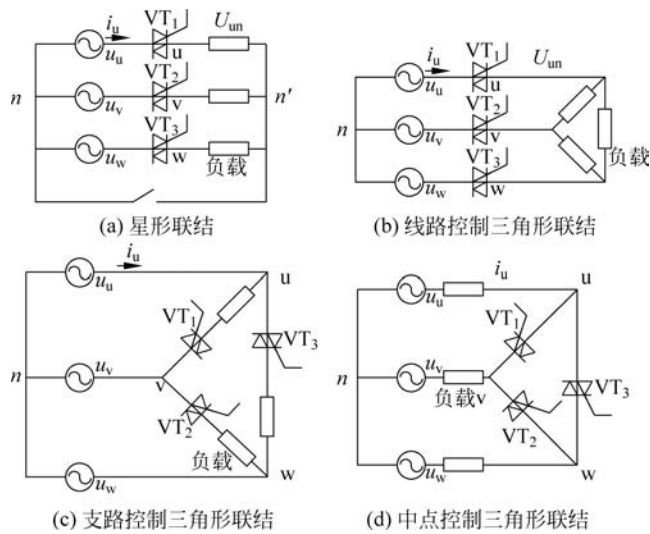


图 5.4 三相交流调压电路

简单介绍这两种电路的基本工作原理和特性。

1. 星形联结电路

如图 5.4(a)所示,这种电路又可分为三相三线 and 三相四线两种情况。三相四线时,相当于三个单相交流调压电路的组合,三相互相错开 120° 工作,单相交流调压电路的工作原理和分析方法均适用于这种电路。在单相交流调压电路中,电流中含有基波和各奇次谐波,组成三相电路后,基波和 3 的整数倍次以外的谐波在三相之间流动,不流过零线;而三相互的 3 的整数倍次谐波是同相位的,不能在各相之间流动,全部流过零线;因此零线中会有很大的 3 次谐波电流及其他 3 的整数倍次谐波电流。

当 $\alpha = 90^\circ$ 时, 零线电流甚至和各相电流的有效值接近。在选择线径和变压器时必须注意这一问题。

下面分析三相三线带电阻负载时的情况。任一相在导通时必须和另一相构成回路, 因此和三相桥式全控整流电路一样, 会有两个晶闸管构成电流流通路径, 所以应采用双脉冲或宽脉冲触发。三相的触发脉冲应依次相差 120° , 同一相的两个反并联晶闸管触发脉冲应相差 180° 。因此, 和三相桥式全控整流电路一样, 触发脉冲顺序也是 $VT_1 \sim VT_6$, 依次相差 60° 。

当采用不可控器件二极管后可以看出, 相电流和相电压同相位, 且相电压过零时二极管开始导通, 把相电压过零点定为开通角 α 的起点。三相三线电路中, 两相间导通时是靠线电压导通的, 而线电压超前相电压 30° , 因此 α 角的移相范围是 $0^\circ \sim 150^\circ$ 。

在任一时刻, 晶闸管导通情况分为两种情况, 一种是三相中各有一个晶闸管导通, 这时负载相电压就是电源相电压; 另一种是两相中各有一个晶闸管导通, 另一相不导通, 这时导通相的负载相电压是电源线电压的一半。根据任一时刻导通晶闸管的个数以及半周内电流是否连续, 可将 $0^\circ \sim 150^\circ$ 的移相范围分为如下三段:

(1) 当 $0^\circ \leq \alpha < 60^\circ$ 时, 电路处于三个晶闸管导通与两个晶闸管导通的交替状态, 每个晶闸管导通角度为 $180^\circ - \alpha$ 。但 $\alpha = 0^\circ$ 时是一种特殊情况, 一直是三个晶闸管导通。

(2) 当 $60^\circ \leq \alpha < 90^\circ$ 时, 任一时刻都是两个晶闸管导通, 每个晶闸管的导通角度为 120° 。

(3) 当 $90^\circ \leq \alpha < 150^\circ$ 时, 电路处于两个晶闸管导通与无晶闸管导通的交替状态, 每个晶闸管的导通角度为 $300^\circ - 2\alpha$, 而且这个导通角度被分割为不连续的两部分, 在半周内形成两个断续的波头, 各占 $150^\circ - \alpha$ 。

α 分别为 30° 、 60° 和 120° 时 a 相负载上的电压波形及晶闸管导通区间情况如图 5.5 所示, 分别作为这三段移相范围的典型示例。因为是电阻负载, 所以负载电流(也即电源电流)波形与负载相电压波形一致。

从电流波形中可以看出其含有很多谐波。进行傅里叶分析后可知, 其中所含谐波的次数为 $6k \pm 1 (k = 1, 2, \dots)$, 这与三相桥式全控整流电路交流侧电流所含谐波的次数完全相同, 也是谐波的次数越低, 其含量越大。与单相交流调压电路相比, 这里没有 3 的整数倍次谐波, 因为在三相对称时, 它们不能流过三相三线电路。

可参照电阻负载和前述单相阻感负载时的分析方法对阻感负载的情况进行分析,

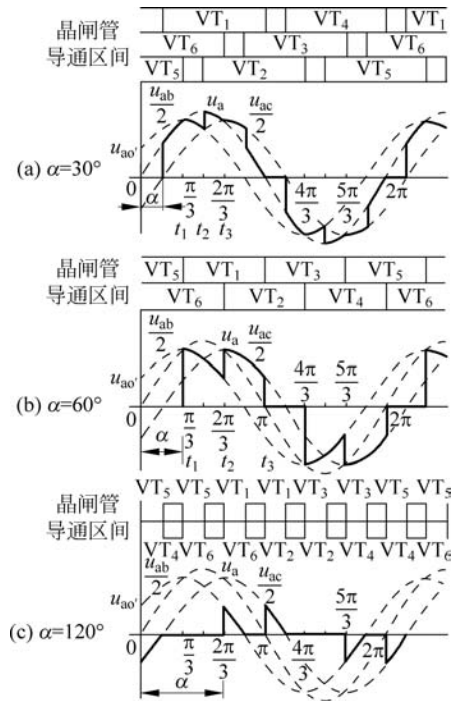


图 5.5 不同 α 角时负载相电压波形

只是情况更复杂一些。 $\alpha = \varphi$ 时,负载电流最大且为正弦波,相当于晶闸管全部被短接时的情况。一般来说,电感大时,谐波电流的含量小一些。

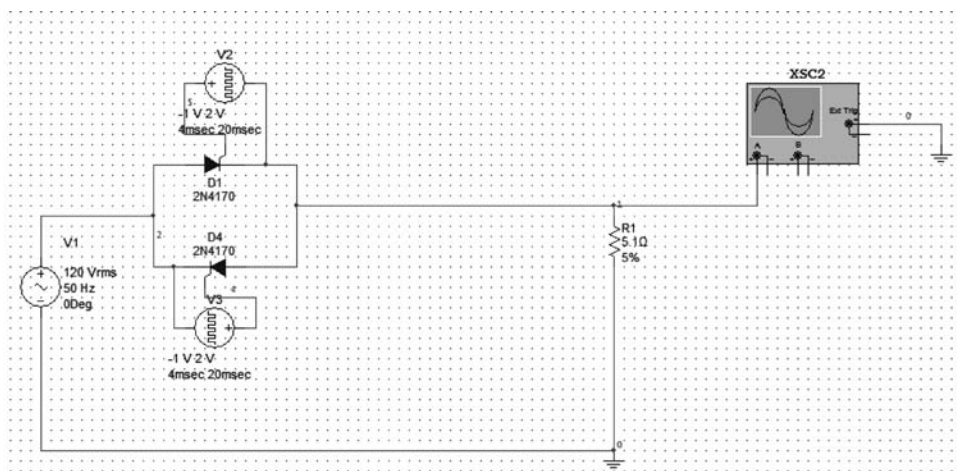
2. 支路控制三角形联结电路

支路控制三角形联结电路由三个单相交流调压电路组成,三个单相电路分别在不同的线电压的作用下单独工作。电路如图 5.4(c)所示。因此,单相交流调压电路的分析方法和结论完全适用于支路控制三角形联结三相交流调压电路。在求取输入线电流(即电源电流)时,只要把与该线相连的两个负载相电流求和就可以了。

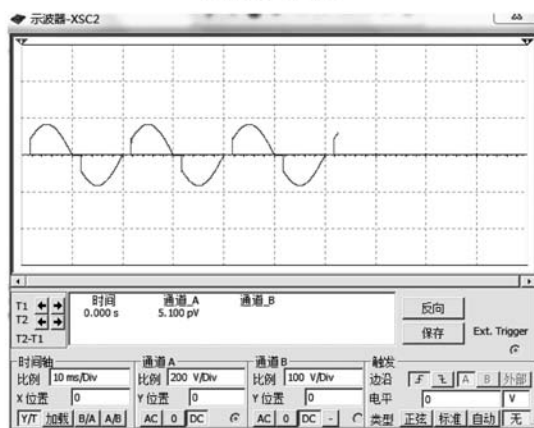
由于三相对称负载相电流中 3 的整数倍次谐波的相位和大小都相同,所以它们在三角形回路中流动,而不出现在线电流中。因此,和三相三线星形联结电路相同,线电流中所含谐波的次数也是 $6k \pm 1$ (k 为正整数)。通过定量分析可以发现,在相同负载和相同 α 角的情况下,支路控制三角形联结电路线电流中谐波含量要少于三相三线星形联结电路。

5.1.3 仿真电路

利用 Multisim 仿真单相交流调压电路, $\alpha = 20^\circ$ 时阻性负载的输出电压的波形如图 5.6 所示。



(a) 仿真电路图



(b) 输出波形

图 5.6 单相交流调压带电阻负载仿真电路图及输出电压波形

5.2 其他交流电力控制电路

交流调功电路和交流调压电路的电路形式完全相同, 只是控制方式不同。交流调功电路的控制方式是将负载与交流电源接通几个整周波, 再断开几个整周波, 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；而交流调压电路是在每个交流电源周期都对输出电压波形进行控制。调功电路常用于电炉的温度控制，因其直接调节对象是电路的平均输出功率，所以被称为交流调功电路。像电炉温度这样的控制对象，其时间常数往往很大，没有必要对交流电源的每个周期进行频繁的控制，只要以周波数为单位进行控制就足够了。通常控制晶闸管导通的时刻都是在电源电压过零的时刻，这样，在交流电源接通期间，负载电压电流都是正弦波，不对电网电压电流造成通常意义的谐波污染。

设控制周期为 M 倍电源周期，其中晶闸管在前 N 个周期导通，后 $M-N$ 个周期关断。当 $M=3$ 、 $N=2$ 时的电路波形如图 5.7 所示。可以看出，负载电压和负载电流（也即电源电流）的重复周期为 M 倍电源周期。在负载为电阻时，负载电流波形和负载电压波形相同。

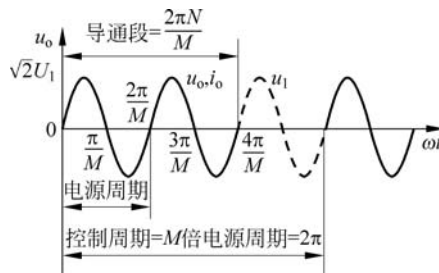


图 5.7 交流调功电路典型波形 ($M=3, N=2$)

5.3 交交变频电路

交交变频电路是把电网频率的交流电直接变换成可调频率的交流电的变流电路。因为没有中间直流环节，因此属于直接变频电路。

交交变频电路广泛用于大功率交流电动机调速传动系统，实际使用的主要是三相输出交交变频电路。

单相输出交交变频电路是三相输出交交变频电路的基础。因此本节简单介绍单相输出交交变频电路的构成、工作原理、控制方法及输入输出特性。电路如图 5.8(a) 所示，该图是单相交交变频电路的基本原理图和输出电压波形。电路由 P 组和 N 组反并联的晶闸管变流电路构成，和直流电动机可逆调速用的四象限变流电路完全相同。变流器 P 和 N 都是相控整流电路，P 组工作时，负载电流 i_o 为正，N 组工作时， i_o 为负。让两组变流器按一定的频率交替工作，负载就得到该频率的交流电。改变两组

变流器的切换频率,就可以改变输出频率 ω_o 。改变变流电路工作时的控制角 α ,就可以改变交流输出电压的幅值。

按正弦规律对 α 角进行调制,就可以使输出电压 u_o 的波形接近正弦波,波形如图 5.8(b)所示,可在 $1/2$ 周期内使正组变流器 P 的 α 角按一定的规律从 90° 逐渐减小到 0° 或某个值,然后再逐渐增大到 90° 。这样,每个控制间隔内的平均输出电压就按正弦规律从零逐渐增至最高,再逐渐减低到零,如图中虚线所示。另外 $1/2$ 周期可对变流器 N 进行同样的控制。

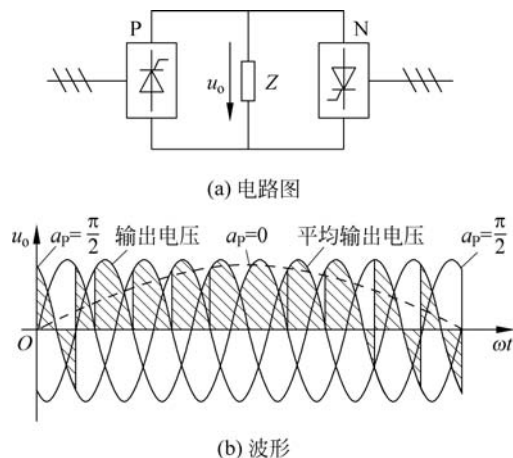


图 5.8 单相交交变频电路原理图和输出电压波形

知识拓展

固态继电器作为电子开关,其通断无机械接触部件,较普通电磁继电器工作可靠、开关速度快、无噪声与火花,加上控制电流小,能与一般的 CMOS 电路兼容。因此,在日常的电子制作与电子产品的开发中,多用固态继电器代替普通的电磁继电器。固态继电器一般由输入恒流控制部分、光电耦合器隔离部分及输出功率开关部分组成。当然,在已知输入电压变化范围不大时,可以将恒流部分省略。根据实际应用中负载供电电源是交流还是直流,在制作时可选用不同类型的光电耦合器及功率开关元件。在供电电源为直流时,光电耦合器可以选用 4N 系列(受光器件为光敏三极管),功率开关器件用晶体三极管或达林顿复合管;供电电源为交流时,光电耦合器可选用 MOC306x 系列(受光器件可被看作光控的双向触发二极管),功率开关器件用单向晶闸管或双向晶闸管,电路图如图 5.9 所示。

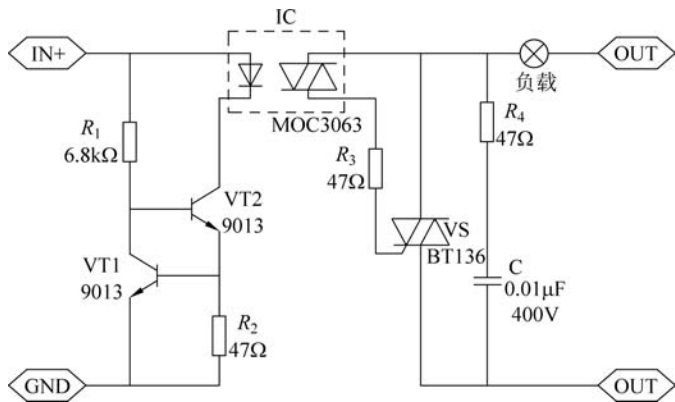
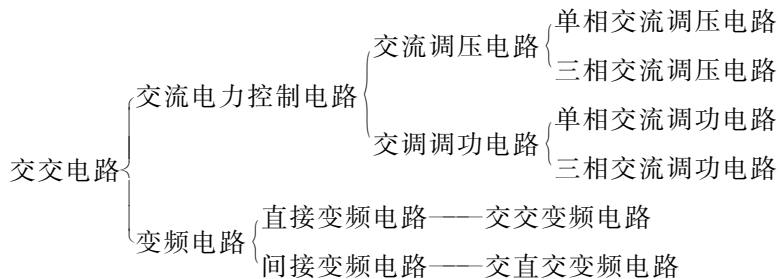


图 5.9 固态继电器的接线图

本章小结

交流-交流的变换电路,分为交流电力控制电路和变频电路。只改变电压、电流或对电路的通断进行控制,而不改变频率的电路称为交流电力控制电路,如交流调压电路和交流调功电路。改变频率的电路称为变频电路。变频电路又可分为直接变频电路和间接变频电路。

本章内容结构:



习题

一、填空题

- 双向晶闸管是一个 _____ 层结构的 _____ 个接线端的器件,相当于 _____。
- 改变频率的电路称为 _____,变频电路有交交变频电路和 _____ 电路两种形式,前者又称为 _____,后者也称为 _____。

3. 单相调压电路带电阻负载,其导通控制角 α 的移相范围为_____,随 α 的增大, U_o _____,功率因数_____。

4. 单相交流调压电路带阻感负载,当控制角 $\alpha < \varphi$ ($\varphi = \arctan(L/R)$) 时, VT_1 的导通时间_____, VT_2 的导通时间_____。

二、简答题

1. 交流调压电路和交流调功电路有什么区别?
2. 绘制在 $\alpha = 60^\circ$ 时, u_o 、 u_{VT1} 的图形。

三、计算题

某一单相交流调压器,电源为工频 220V,阻感串联作为负载,其中 $R = 0.5\Omega$, $L = 2\text{mH}$ 。试求:

- (1) 开通角 α 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 $\alpha = \varphi/2$ 时,晶闸管电流有效值、晶闸管导通角和电源侧功率因数。