

中频感应加热电源简介

中国最大的感应加热设备供应商：联合高频设备网：<http://www.uihm.cn/> UIHM:
<http://www.uihm.com/>

【摘要】:

1. 了解中频感应加热装置的基本原理及应用。
2. 掌握中频感应加热装置的组成、各部分电路（三相桥式整流电路、触发电路、并联谐振逆变电路、保护电路）的工作原理。
3. 掌握触发电路与主电路电压同步的概念以及实现同步的方法。
4. 了解常用的中频感应加热装置的使用注意事项。
5. 熟悉中频感应加热装置的安装、调试，简单的故障维修方法。
6. 了解三相有源逆变电路工作原理及有源逆变电路的应用

【描述】: 中频电源装置是一种利用晶闸管元件把三相工频电流变换成某一频率的中频电流的装置，广泛应用在感应熔炼和感应加热的领域。图 5-1 是常见的感应加热装置。



图 5-1 感应加热装置

【相关知识点】:

一、中频感应加热电源概述

1. 感应加热的原理

(1) 感应加热的基本原理

1831 年，英国物理学家法拉第发现了电磁感应现象，并且提出了相应的理论解释。其内容为，当电路围绕的区域存在交变的磁场时，电路两端就会感应出电动势，如果闭合就会产生感应电流。电流的热效应可用来加热。

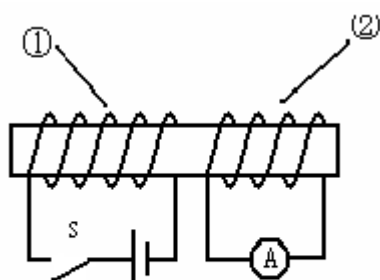


图 5-2 电磁感应

①——第一线圈 ②——第二线圈

例如如图 5-2 中两个线圈相互耦合在一起，在第一

个线圈中突然接通直流电流（即将图中开关 S 突然合上）或突然切断电流（即将图中开关 S 突然打开），此时在第二个线圈所接的电流表中可以看出有某一方向或反方向的摆动。这种现象称为电磁感应现象，第二个线圈中的电流称为感应电流，第一个线圈称为感应线圈。若第一个线圈的开关 S 不断地接通和断开，则在第二个线圈中也将不断地感应出电流。每秒内通断次数越多（即通断频率越高），则感生电流将会越大。若第一个线圈中通以交流电流，则第二个线圈中也感应出交流电流。不论第二个线圈的匝数为多少，即使只有一匝也会感应出电流。如果第二个线圈的直径略小于第一个线圈的直径，并将它置于第一个线圈之内，则这种电磁感应现象更为明显，因为这时两个线圈耦合得更为紧密。如果在一个钢管上绕了感应线圈，钢管可以看作有一匝直接短接的第二线圈。当感应线圈内通以交流电流时，在钢管中将感应出电流，从而产生交变的磁场，再利用交变磁场来产生涡流达到加热的效果。平常在 50Hz 的交流电流下，这种感生电流不是很大，所产生的热量使钢管温度略有升高，不足以使钢管加热到热加工所需温度（常为 1200℃左右）。如果增大电流和提高频率（相当于提高了开关 S 的通断频率）都可以增加发热效果，则钢管温度就会升高。控制感应线圈内电流的大小和频率，可以将钢管加热到所需温度进行各种热加工。所以感应电源通常需要输出高频大电流。

利用高频电源来加热通常有两种方法：

- ①电介质加热：利用高频电压（比如微波炉加热等）
- ②感应加热：利用高频电流（比如密封包装等）

1) 1) 电介质加热（dielectric heating）

电介质加热通常用来加热不导电材料，比如木材、橡胶等。微波炉就是利用这个原理。原理如图 5-3.：

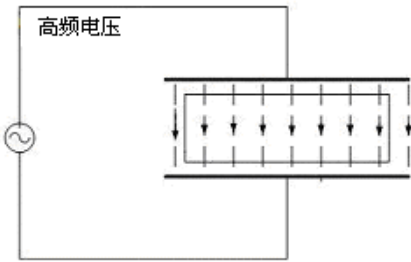
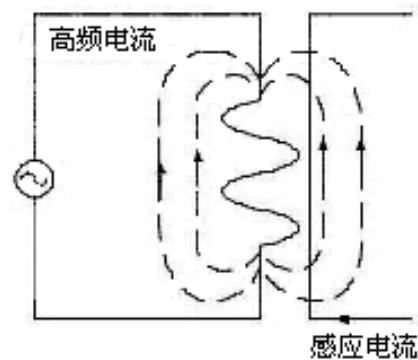


图 5-3 电介质加热示意图



当高频电压加在两极板层上，就会在两极之间产生交变的电场。需要加热的介质处于交变的电场中，介质中的极分子或者离子就会随着电场做同频的旋转或振动，从而产生热量，达到加热效果。

2) 感应加热（induction heating）

感应加热原理为产生交变的电流，从而产生交变的磁场，再利用交变磁场来产生涡流达到加热的效果。如图 5-4 。

图 5-4 感应加热示意图

示意图

(2) 感应加热发展历史

感应加热来源于法拉第发现的电磁感应现象，也就是交变的电流会在导体中产生感应电流，从而导致导体发热。长期以来，技术人员都对这一现象有较好了解，并且在各种场合尽量抑止这种发热现象，来减小损耗。比较常见的如开关电源中的变压器设计，通常设计人员会用各种方法来减小涡流损耗，来提高效率。然而在 19 世纪末期，技术人员又发现这一现象的有利面，就是可以将之利用到加热场合。来取代一些传统的加热方法，因为感应加热有以下优点：

- 1) 非接触式加热，热源和受热物件可以不直接接触
- 2) 加热效率高，速度快，可以减小表面氧化现象
- 3) 容易控制温度，提高加工精度
- 4) 可实现局部加热
- 5) 可实现自动化控制
- 6) 可减小占地，热辐射，噪声和灰尘

中频电源装置是一种利用晶闸管元件把三相工频电流变换成某一频率的中频电流的装置，主要是在感应熔炼和感应加热的领域中代替以前的中频发电机组。中频发电机组体积大，生产周期长，运行噪声大，而且它是输出一种固定频率的设备，运行时必须随时调整电容大小才能保持最大输出功率，这不但增加了不少中频接触器，而且操作起来也很繁琐。

晶闸管中频电源与这种中频机组比，除具有体积小、重量轻、噪声小、投产快等明显优点外，最主要还有下列一些优点：

1) 降低电力消耗。中频发电机组效率低，一般 80%~85%，而晶闸管中频装置的效率可达到 90%~95%，而且中频装置起动停止方便，在生产过程总短暂的间隙都可以随时停机，从而使空载损耗减小到最低限度（这种短暂的间隙，机组是不能停下来的）。

2) 中频电源的输出装置的输出频率是随着负载参数的变化而变化的，所以保证装置始终运行在最佳状态，不必像机组那样频繁调节补偿电容。

2. 中频感应加热电源的用途

感应加热的最大特点是将工件直接加热，工人劳动条件好、工件加热速度快、温度容易控制等，因此应用非常广泛。主要用于淬火、透热、熔炼、各种热处理等方面

(1) 淬火

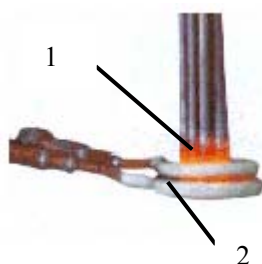


图 5-5 螺丝刀口淬火

1——螺丝刀口 2——感应线圈

淬火热处理工艺在机械工业和国防工业中得到了广泛的应用。它是将工件加热到一定温度后再快速冷却下来，以此增加工件的硬度和耐磨性。图 5-5 为中频电源对螺丝刀口淬火。

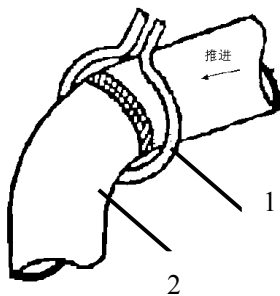


图 5-6 弯管的工作过程

1——感应线圈 2——钢管

中频电源在熔炼中的应用最感应熔炼炉，线圈用铜管绕成，里中通过中频交流电流就可以使炉化，并将液态金属再加热到所需温

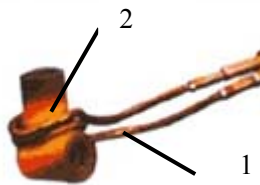


图 5-8 铜洁具钎焊

1——感应线圈 2——零件

的硬质合金车刀、洗刀、刨刀、铰刀、锯片、锯齿的焊接，及金刚石锯片、刀具、磨具钻具、刀具的焊接。其他金属材料的复合焊接，如：眼镜部件、铜部件、不锈钢锅。

3. 中频感应加热电源的组成

目前应用较多的中频感应加热电源主要由可控或不可控整流电路、滤波器、逆变器、和一些控制保护电路组成。工作时，三相工频（50Hz）交流电经整流器整成脉动直流，经过滤波器变成平滑的直流电送到逆变器。逆变器把直流电转变成频率较高的交流电流送给负载。组成框图如图 5-9 所示。

（2）透热

在加热过程中使整个工件的内部和表面温度大致相等，叫做透热。透热主要用在锻造弯管等加工前的加热等。中频电源用于弯管的过程如图 5-6 所示。在钢管待弯部分套上感应圈，通入中频电流后，在套有感应圈的钢管上的带形区域内被中频电流加热，经过一定时间，温度升高到塑性状态，便可以进行弯制了。

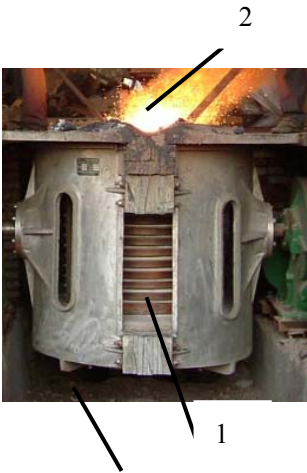


图 5-7 熔炼炉

1——感应线圈 2——金属溶液

（3）熔炼

早，图 5-7 为中频面通水冷却。线圈中的炉料加热、熔度。

（4）钎焊

钎焊是将钎焊料加热到融化温度而使两个或几个零件连接在一起，通常的锡焊

和铜焊都是钎焊。如图 5-8 是铜洁具钎焊。主要应用于机械加工、采矿、钻探、木材加工等行业使用的

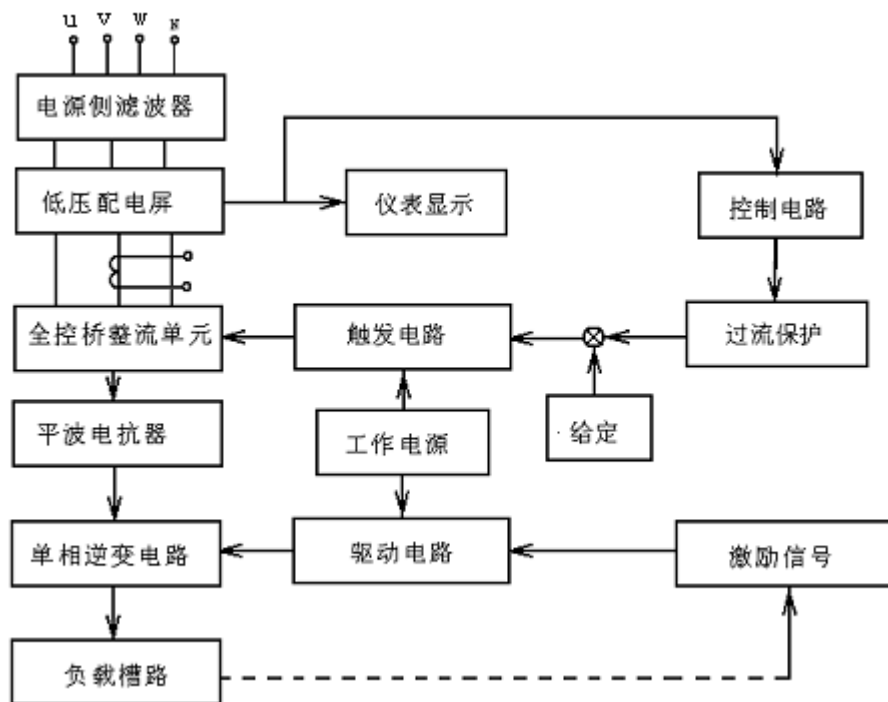


图 5-9 中频感应加热电源组成原理框图

（1）整流电路

中频感应加热电源装置的整流电路设计一般要满足以下要求：

- 1) 整流电路的输出电压在一定的范围内可以连续调节。
- 2) 整流电路的输出电流连续，且电流脉动系数小于一定值。
- 3) 整流电路的最大输出电压能够自动限制在给定值，而不受负载阻抗的影响。
- 4) 当电路出现故障时，电路能自动停止直流功率输出，整流电路必须有完善的过电压、过电流保护措施。

5) 当逆变器运行失败时，能把储存在滤波器的能量通过整流电路返回工频电网，保护逆变器。

（2）逆变电路

由逆变晶闸管、感应线圈、补偿电容共同组成逆变器，将直流电变成中频交流电给负载。为了提高电路的功率因数，需要调协电容器向感应加热负载提供无功能量。根据电容器与感应线圈的连接方式可以把逆变器分为：

- 1) 串联逆变器：电容器与感应线圈组成串联谐振电路。
- 2) 并联逆变器：电容器与感应线圈组成并联谐振电路。
- 3) 串、并联逆变器：综合以上两种逆变器的特点。

（3）平波电抗器

平波电抗器在电路中起到很重要的作用，归纳为以下几点：

- 1) 续流 保证逆变器可靠工作。
- 2) 平波 使整流电路得到的直流电流比较平滑。

3) 电气隔离 它连接在整流和逆变电路之间起到隔离作用。

4) 限制电路电流的上升率 di/dt 值, 逆变失败时, 保护晶闸管。

(4) 控制电路

中频感应加热装置的控制电路比较复杂, 可以包括以下几种: 整流触发电路、逆变触发电路、起动停止控制电路。

1) 整流触发电路

整流触发电路主要是保证整流电路正常可靠工作, 产生的触发脉冲必须达到以下要求:

- ①产生相位互差 60° 的脉冲, 依次触发整流桥的晶闸管。
- ②触发脉冲的频率必须与电源电压的频率一致。
- ③采用单脉冲时, 脉冲的宽度应该大与 90° , 小于 120° 。采用双脉冲时, 脉冲的宽度为 $25^\circ\sim 30^\circ$, 脉冲的前沿相隔 60° 。

④输出脉冲有足够的功率, 一般为可靠触发功率的 $3\sim 5$ 倍。

⑤触发电路有足够的抗干扰能力。

⑥控制角能在 $0^\circ\sim 170^\circ$ 之间平滑移动。

2) 逆变触发电路

加热装置对逆变触发电路的要求如下:

- ①具有自动跟踪能力。
- ②良好的对称性。
- ③有足够的脉冲宽度, 触发功率, 脉冲的前沿有一定的陡度。
- ④有足够的抗干扰能力。

3) 起动、停止控制电路

起动、停止控制电路主要控制装置的起动、运行、停止。一般由按钮、继电器、接触器等电器元件组成。

(5) 保护电路

中频装置的晶闸管的过载能力较差, 系统中必须有比较完善的保护措施, 比较常用的有阻容吸收装置和硒堆抑制电路内部过电压, 电感线圈、快速熔断器等元件限制电流变化率和过电流保护。另外, 还必须根据中频装置的特点, 设计安装相应的保护电路。

二、整流主电路

1. 三相半波可控整流电路

(1) 三相半波不可控整流电路

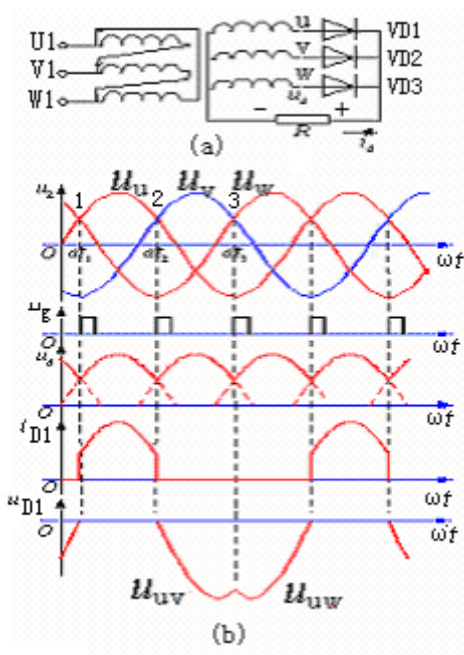


图 5—10 三相半波不可控整流电路及波形

为了更好地理解三相半波可控整流电路,我们先来看一下由二极管组成的不可控整流电路,如图 5-10(a)所示。此电路可由三相变压器供电,也可直接接到三相四线制的交流电源上。变压器二次侧相电压有效值为 U_2 ,线电压为 U_{2L} 。其接法是三个整流管的阳极分别接到变压器二次侧的三相电源上,而三个阴极接在一起,接到负载的一端,负载的另一端接到整流变压器的中线,形成回路。此种接法称为共阴极接法。

图 5—10(b)中示出了三相交流电 u_u 、 u_v 和 u_w 波形图。 u_d 是输出电压的波形, u_D 是二极管承受的电压的波形。由于整流二极管导通的唯一条件就是阳极电位高于阴极电位,而三只二极管又是共阴极连接的,且阳极所接的三相电源的相电压是不断变化的,所以哪一相的二极管导通就要看其阳极所接的相电压 u_u 、 u_v 和 u_w 中哪一相的瞬时值最高,则与该相相连的二极管就会导通。其余两只二极管就会因承受反向电压而关断。例如,在图 5—10(b)中 $\omega t_1 \sim \omega t_2$ 区间, u 相的瞬时电压值 u_u 最高。因此与 u 相相连的二极管VD1 优先导通,所以与 v 相、 w 相相连的二极管VD2 和VD3 则分别承受反向线电压 u_{vu} 、 u_{wu} 关断。若忽略二极管的导通压降,此时,输出电压 u_d 就等于 u 相的电源电压 u_u 。同理,当 ωt_2 时,由于 v 相的电压 u_v 开始高于 u 相的电压 u_u 而变为最高,因此,电流就要由VD1换流给VD2,VD1 和VD3 又会承受反向线电压而处于阻断状态,输出电压 $u_d = u_v$ 。同样在 ωt_3 以后,因 w 相电压 u_w 最高,所以VD3 导通,VD1和VD2 受反压而关断,输出电压 $u_d = u_w$ 。以后又重复上述过程。

可以看出,三相半波不可控整流电路中三个极管轮流导通,导通角均为 120° ,输出电压 u_d 是脉动的三相交流相电压波形的正向包络线,负载电流波形形状与 u_d 相同。

其输出直流电压的平均值 U_d 为

$$U_d = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{5\pi/6} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d\omega t = \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} U_2 = 1.17U_2$$

整流二极管承受的电压的波形如图 5—10 (b) 所示。以VD1为例。在 $\omega t_1 \sim \omega t_2$ 区间，由于VD1 导通，所以 u_{D1} 为零；在 $\omega t_2 \sim \omega t_3$ 区间，VD2 导通，则VD1 承受反向电压 u_{uv} ，即 $u_{D1}=u_{uv}$ ；在 $\omega t_3 \sim \omega t_4$ 区间，VD3 导通，则VD1 承受反向电压 u_{uw} ，即 $u_{D1}=u_{uw}$ 。从图中还可看出，整流二极管承受的最大的反向电压就是三相交压的峰值，即

$$U_{DM} = \sqrt{6}U_2$$

从图 5—10 (b) 中还可看到，1、2、3 这三个点分别是二极管 VD1、VD2 和 VD3 的导通起始点，即每经过其中一点，电流就会自动从前一相换流至后一相，这种换相是利用三相电源电压的变化自然进行的，因此把 1、2、3 点称为自然换相点。

(2) 三相半波可控整流电路

三相半波可控整流电路有两种接线方式，分别为共阴极、共阳极接法。由于共阴极接法触发脉冲有共用线，使用调试方便，所以三相半波共阴极接法常被采用。

1) 电路结构

将图 5—10(a)中三个二极管换成晶闸管就组成了共阴极接法的三相半波可控整流电路。如图 5—11 (a) 所示，电路中，整流变压器的一次侧采用三角形联结，防止三次谐波进入电网。二次侧采用星形联结，可以引出中性线。三个晶闸管的阴极短接在一起，阳极分别接到三相电源。

2) 电路工作原理

① $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$

$\alpha = 0^\circ$ 时，三个晶闸管相当于三个整流二极管，负载两端的电流电压波形如图 5—10 所示相同，晶闸管两端的电压波形，由 3 段组成：第 1 段，VT1 导通期间，为一管压降，可近似为 $u_{T1}=0$ 第 2 段，在VT1 关断后，VT2 导通期间， $u_{T1}=u_u-u_v=u_{uv}$ ，为一段线电压 第 3 段，在VT3 导通期间， $u_{T1}=u_u-u_w=u_{uw}$ 为另一段线电压，如果增大控制角 α ，将脉冲后移，整流电路的工作情况相应地发生变化，假设电路已在工作，W相所接的晶闸管VT3 导通，经过自然换相点“1”时，由于U相所接晶闸管VT1 的触发脉冲尚未送到，VT1 无法导通。于是VT3 仍承受正向电压继续导通，直到过U相自然换相点“1”点 30° ，晶闸管VT1 被触发导通，输出直流电压由W相换到U相，如图 5—11 (b) 所示。为 $\alpha = 30^\circ$ 时的输出电压和电流波形以及晶闸管两端电压波形：

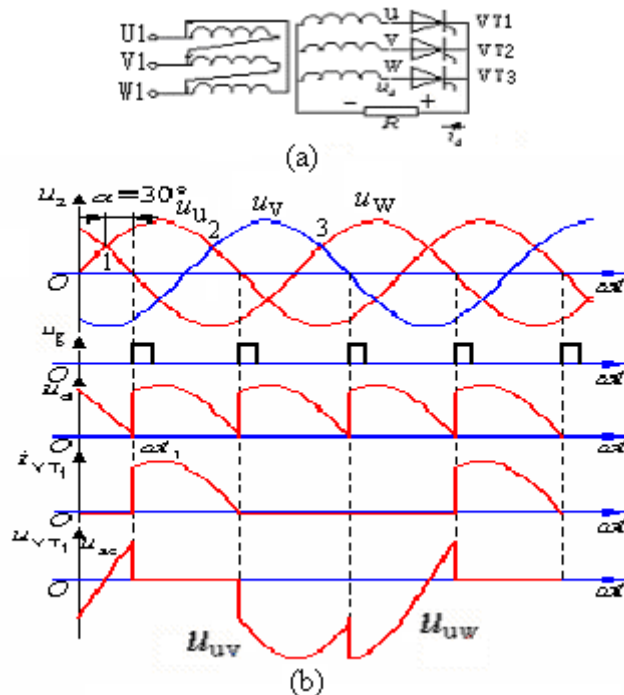


图 5-11 三相半波可控整流电路及 $\alpha = 30^\circ$ 时的波形

② $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ 。

当触发角 $\alpha \geq 30^\circ$ 时，此时的电压和电流波形断续，各个晶闸管的导通角小于 120° ，此时 $\alpha = 60^\circ$ 的波形如图 5-12 所示。

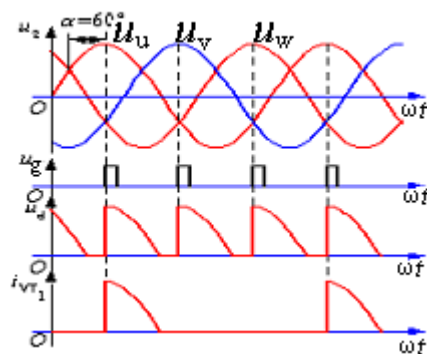


图 5-12 三相半波可控整流电路 $\alpha = 60^\circ$ 的波形

3) 基本的物理量计算

①：整流输出电压的平均值计算：

$$U_d = \frac{1}{3} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\pi} \frac{\sqrt{2}U_2}{2\pi} \sin \omega t d(\omega t) + \frac{1}{3} \int_{\frac{5\pi}{6}+\alpha}^{\pi} \frac{\sqrt{2}U_2}{2\pi} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} \left[\frac{3\sqrt{6}}{2\pi} \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) \right] = 0.675 \left[2 \cos \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) \right]$$

当 $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ 时，此时电流波形连续，通过分析可得到：

当 $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ 时，此时电流波形断续，通过分析可得到：

②：直流输出平均电流

对于电阻性负载，电流与电压波形是一致的，数量关系为：

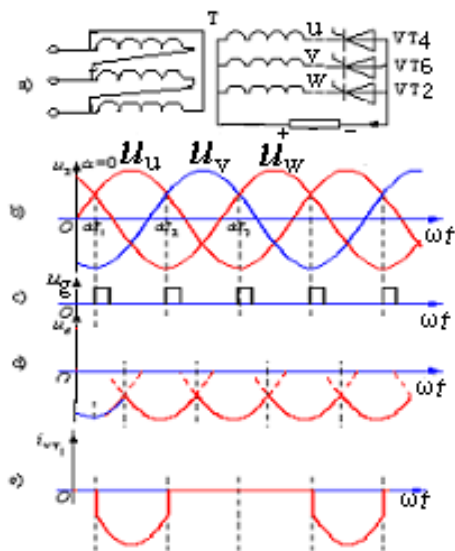
$$I_d = U_d / R_d$$

③：晶闸管承受的电压和控制角的移相范围

由前面的波形分析可以知道，晶闸管承受的最大反向电压为变压器二次侧线电压的峰值。电流断续时，晶闸管承受的是电源的相电压，所以晶闸管承受的最大正向电压为相电压的峰值即：

$$U_{RM} = \sqrt{2}U_2 \times \sqrt{3} = \sqrt{6}U_2 = 2.45U_2$$

由前面的波形分析还可以知道，当触发脉冲后移到 $\alpha = 150^\circ$ 时，此时正好为电源相电压的过零点，后面晶闸管不在承受正向电压，也就是说，晶闸管无法导通。因此，三相半波可控整流电路在电阻性负载时，控制角的移相范围是 $0 \sim 150^\circ$ 。



(3) 三相半波共阳极可控整流电路

图 5—13 三相半波共阳极可控整流电路及波形

共阳极可控整流电路就是把三个晶闸管的阳极接到一起，阴极分别接到三相交流电源。这种电路的电路及波形如图 5—13 所示，工作原理与共阴极整流电路基本一致。同样，需要晶闸管承受正向电压即阳极电位高于阴极电位时，才可能导通。所以三只晶闸管中，哪一个晶闸管的阴极电位最低，哪个晶闸管就有可能导通。由于输出电压的波形在横轴下面，即输出电压的平均值为：

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

上述两种整流电路，无论是共阴极可控整流电路还是共阳极可控整流电路，都只用三只晶闸管，所以电路接线比较简单。但是，变压器的绕组利用率较低。绕组的电流是单方向的，因此还存在直流磁化现象。负载电流要经过电源的零线。会导致额外的损耗。所以，三相半波整流电路一般用于小容量场合。

2. 三相桥式全控整流电路

(1) 电阻性负载

1) 电路组成

三相桥式全控整流电路实质上是一组共阴极半波可控整流电路与共阳极半波可控整流电路的串联，在上一节的内容中，共阴极半波可控整流电路实际上只利用电源变压器的正半周期，共阳极半波可控整流电路只利用电源变压器的负半周期，如果两种电路的负载电流一样大小，可以利用同一电源变压器。即两种电路串联便可以得到三相桥式全控整流电路，电路的组成如图 5-14 所示。

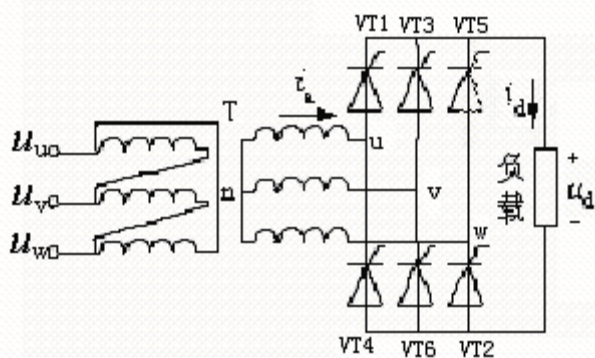


图 5-14 三相全控桥整流电路

2) 工作原理（以电阻性负载， $\alpha = 0^\circ$ 分析）

在共阴极组的自然换相点分别触发 VT1, VT3, VT5 晶闸管，共阳极组的自然换相点分别触发 VT2, VT4, VT6 晶闸管，两组的自然换相点对应相差 60° ，电路各自在本组内换流，即 VT1 VT3 VT5 VT1..., VT2 VT4 VT6 VT2，每个管子轮流导通 120° 。由于中性线断开，要使电流流通，负载端有输出电压，必须在共阴极和共阳极组中各有一个晶闸管同时导通。

$\omega t_1 \sim \omega t_2$ 期间，u相电压最高，v相电压最低，在触发脉冲作用下，VT6、VT1 管同时导通，电流从u相流出，经VT1 负载 VT6 流回v相，负载上得到u、v相线电压 u_{uv} 。从 ωt_2 开始，u相电压仍保持电位最高，VT1 继续导通，但w相电压开始比v相更低，此时触发脉冲触发VT2 导通，迫使VT6 承受反压而关断，负载电流从VT6 中换到VT2，以此类推在负载两端的波形如图 5-15 所示。

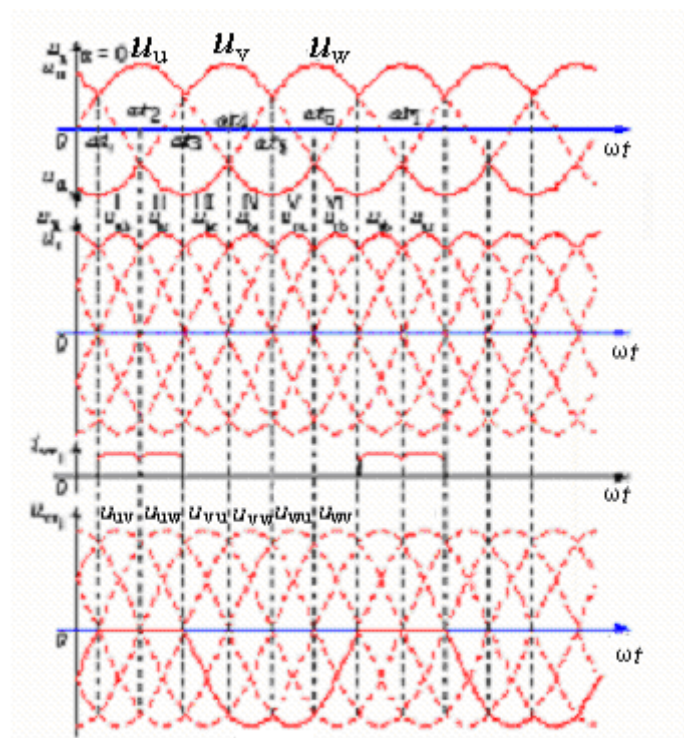


图5-15 三相全控桥整流电路 $\alpha = 0^\circ$ 的波形

导通晶闸管及负载电压如表 5-1

表 5-1

导通期间	$\omega t_1 \sim \omega t_2$	$\omega t_2 \sim \omega t_3$	$\omega t_3 \sim \omega t_4$	$\omega t_4 \sim \omega t_5$	$\omega t_5 \sim \omega t_6$	$\omega t_6 \sim \omega t_7$
导通 VT	VT1, VT6	VT1, VT2	VT3, VT2	VT3, VT4	VT5, VT4	VT5, VT6
共阴电压	u 相	u 相	v 相	v 相	w 相	w 相
共阳电压	v 相	w 相	w 相	u 相	u 相	v 相
负载电压	uv 线电压 u_{uv}	uw 线电压 u_{uw}	vw 线电压 u_{vw}	vu 线电压 u_{vu}	wu 线电压 u_{wu}	wv 线电压 u_{wv}

3) 三相桥式全控整流电路的特点

①必须有两个晶闸管同时导通才可能形成供电回路，其中共阴极组和共阳极组各一个，且不能为同一相的器件。

②对触发脉冲的要求：

按 VT1-VT2-VT3-VT4-VT5-VT6 的顺序，相位依次差 60° 共阴极组 VT1、VT3、VT5 的脉冲依次差 120° ，共阳极组 VT4、VT6、VT2 也依次差 120° 。同一相的上下两个晶闸管，即 VT1 与 VT4，VT3 与 VT6，VT5 与 VT2，脉冲相差 180° 。

触发脉冲要有足够的宽度，通常采用单宽脉冲触发或采用双窄脉冲。但实际应用中，为了减少脉冲变压器的铁心损耗，大多采用双窄脉冲。

4) 不同控制角时的波形分析：

① $\alpha=30^\circ$ 时的工作情况(波形如图 5-16)这种情况与 $\alpha=0^\circ$ 时的区别在于：晶闸管起始导

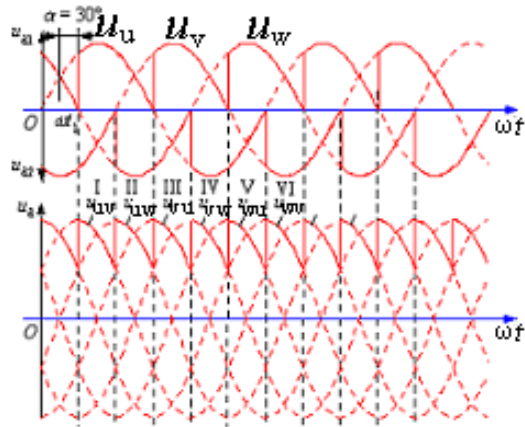


图 5—16 三相全控桥整流电路 $\alpha=30^\circ$ 的波形

通时刻推迟了 30° ，组成 u_d 的每一段线电压因此推迟 30° 从 ωt_1 开始把一周等分为 6 段， u_d 波形仍由 6 段线电压构成，每一段导通晶闸管的编号等仍符合表 5—1 的规律。变压器二次侧电流 i_a 波形的特点：在 VT_1 处于通态的 120° 期间， i_a 为正， i_a 波形的形状与同时段的 u_d 波形相同，在 VT_4 处于通态的 120° 期间， i_a 波形的形状也与同时段的 u_d 波形相同，但为负值。

② $\alpha=60^\circ$ 时的工作情况(波形如图 5-17)

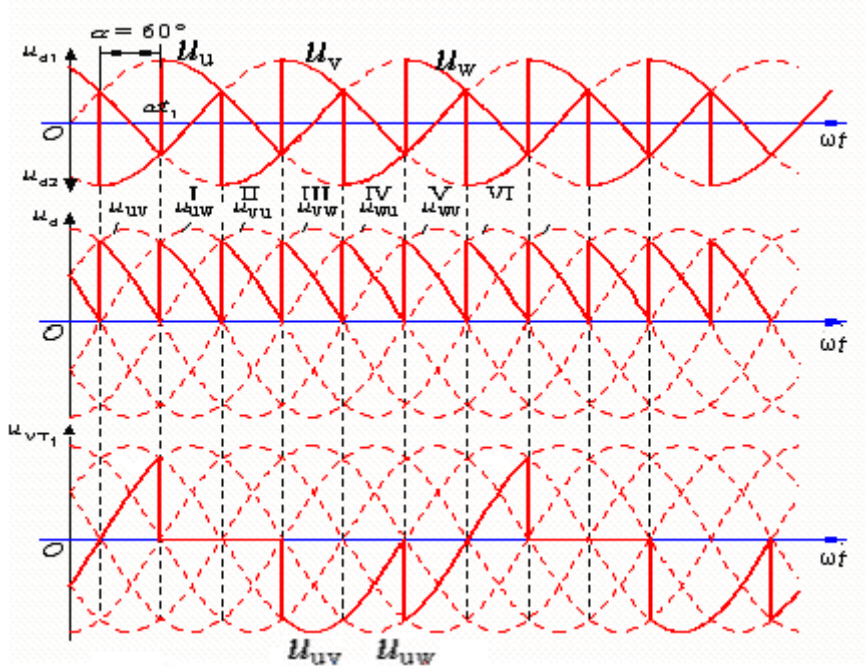


图 5—17 三相全控桥整流电路 $\alpha=60^\circ$ 的波形

此时 u_d 的波形中每段线电压的波形继续后移， u_d 平均值继续降低。 $\alpha=60^\circ$ 时 u_d 出现为零的点，这种情况即为输出电压 u_d 为连续和断续的分界点。

③ $\alpha=90^\circ$ 时的工作情况(波形如图 5-18)

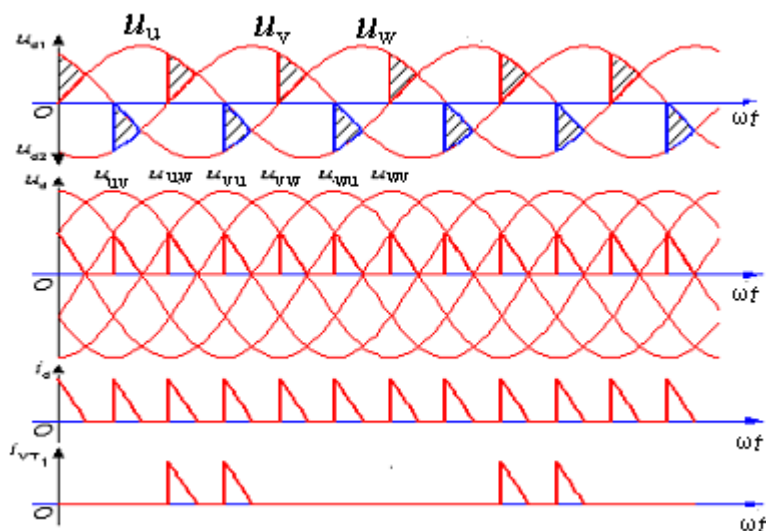


图 5-18 三相全控桥整流电路 $\alpha = 90^\circ$ 的波形

此时 u_d 的波形中每段线电压的波形继续后移， u_d 平均值继续降低。 $\alpha = 90^\circ$ 时 u_d 波形断续，每个晶闸管的导通角小于 120° 。

小结：

1. 当 $\alpha \leq 60^\circ$ 时， u_d 波形均连续，对于电阻负载， i_d 波形与 u_d 波形形状一样，也连续。
2. 当 $\alpha > 60^\circ$ 时， u_d 波形每 60° 中有一段为零， u_d 波形不能出现负值，带电阻负载时三相桥式全控整流电路 α 角的移相范围是 120° 。

(2) 电感性负载

1) 电路工作原理

① $\alpha \leq 60^\circ$ 时， u_d 波形连续，工作情况与带电阻负载时十分相似，各晶闸管的通断情况、输出整流电压 u_d 波形、晶闸管承受的电压波形等都一样。

两种负载时的区别在于：由于负载不同，同样的整流输出电压加到负载上，得到的负载电流 i_d 波形不同。阻感负载时，由于电感的作用，使得负载电流波形变得平直，当电感足够大的时候，负载电流的波形可近似为一条水平线。 $\alpha = 0^\circ$ 和 $\alpha = 30^\circ$ 波形如图 5-19 和图 5-20 所示。

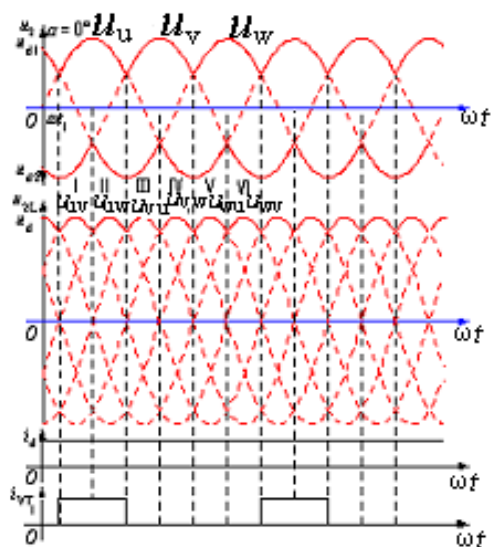


图 5-19 三相桥式全控整流电路阻感负载 $\alpha = 0^\circ$ 波形

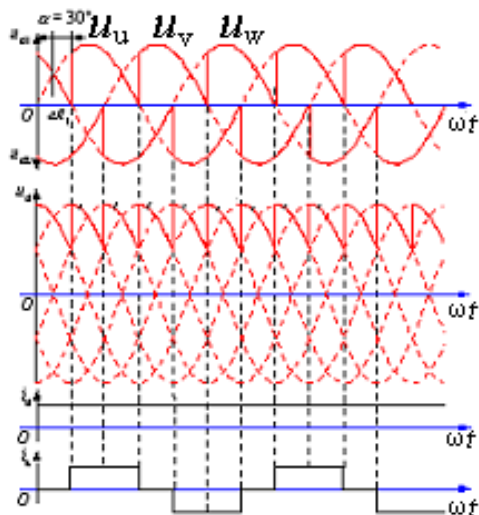


图 5-20 三相桥式全控整流电路阻感负载 $\alpha = 30^\circ$ 波形

② $\alpha > 60^\circ$ 时

阻感负载时的工作情况与电阻负载时不同，电阻负载时 u_d 波形不会出现负的部分，而阻感负载时，由于电感 L 的作用， u_d 波形会出现负的部分， $\alpha = 90^\circ$ 时波形如图 5-21 所示。可见，带阻感负载时，三相桥式全控整流电路的 α 角移相范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

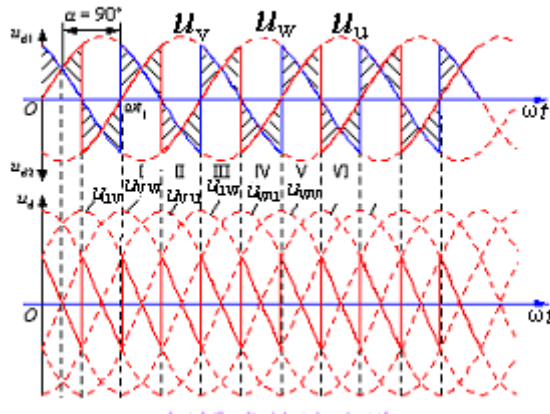


图 5—21 三相桥式全控整流电路阻感负载 $\alpha = 90^\circ$ 波形

(3) 基本的物理量计算

$$U_d = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} \frac{1}{\sqrt{3}} U_2 \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{3}{\pi} \int_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} U_2 \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{3}{\pi} U_2 \left[-\cos(\omega t) \right]_{\frac{\pi}{3}+\alpha}^{\frac{2\pi}{3}+\alpha} = \frac{3}{\pi} U_2 \left[\cos\left(\frac{\pi}{3}+\alpha\right) - \cos\left(\frac{2\pi}{3}+\alpha\right) \right]$$

1) 整流电路输出直流平均电压

①当整流输出电压连续时（即带阻感负载时，或带电阻负载 $\alpha \leq 60^\circ$ 时）的平均值为：

带电阻负载且 $\alpha > 60^\circ$ 时，整流电压平均值为：

2) 输出电流平均值为： $I_d = U_d / R$

3) 当整流变压器为采用星形接法，带阻感负载时，变压器二次侧电流波形如图 5—所示，为正负半周各宽 120° 、前沿相差 180° 的矩形波，其有效值为：

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(I_d^2 \times \frac{2}{3} \pi + (-I_d)^2 \times \frac{2}{3} \pi \right)} = \sqrt{\frac{2\pi}{3}} I_d = 0.816 I_d$$

晶闸管电压、电流等的定量分析与三相半波时一致。

二、平波电抗器的及简易设计

平波电抗器的简易设计计算步骤

平波电抗器的主要参数是额定电流和电感量，电感量的计算依据为：

- 1) 保证电流连续所需要的电感量。
- 2) 限制电流脉动所需要电感量。
- 3) 抑制环流所需要的电感量。

一般情况下，平波电抗器的计算程序如下：

- 1) 根据给定原始数据 L 和 I_d ，计算 I_{d2L} ；
- 2) 根据选用的硅钢片的磁化曲线确定 B_0 ，
- 3) 根据选用的导线的绝缘材料和冷却方式，选取电流密度。如选用自然冷却的铜导线，

取 $j=250A/cm^2$ ，

4) 按优化设计原则计算, 要求可能的情况下, 最小体积设计。

另外, 还有相对气隙, 匝数, 磁场强度以及电感量等方面。具体设计方法可以参考相关资料。

三、整流触发电路

整流电路的触发电路有很多种, 要根据具体的整流电路和应用场合选择不同的触发电路。实际中, 大多情况选用锯齿波同步触发电路和集成触发器。

1. 1. 锯齿波同步触发电路的组成和工作原理

锯齿波同步触发电路有锯齿波形成、同步移相、脉冲形成放大环节、双脉冲、脉冲封锁等环节和强触发环节等组成。可触发 200A 的晶闸管。由于同步电压采用锯齿波, 不直接受电网波动与波形畸变的影响, 移相范围宽, 在大中容量中得到广泛应用。

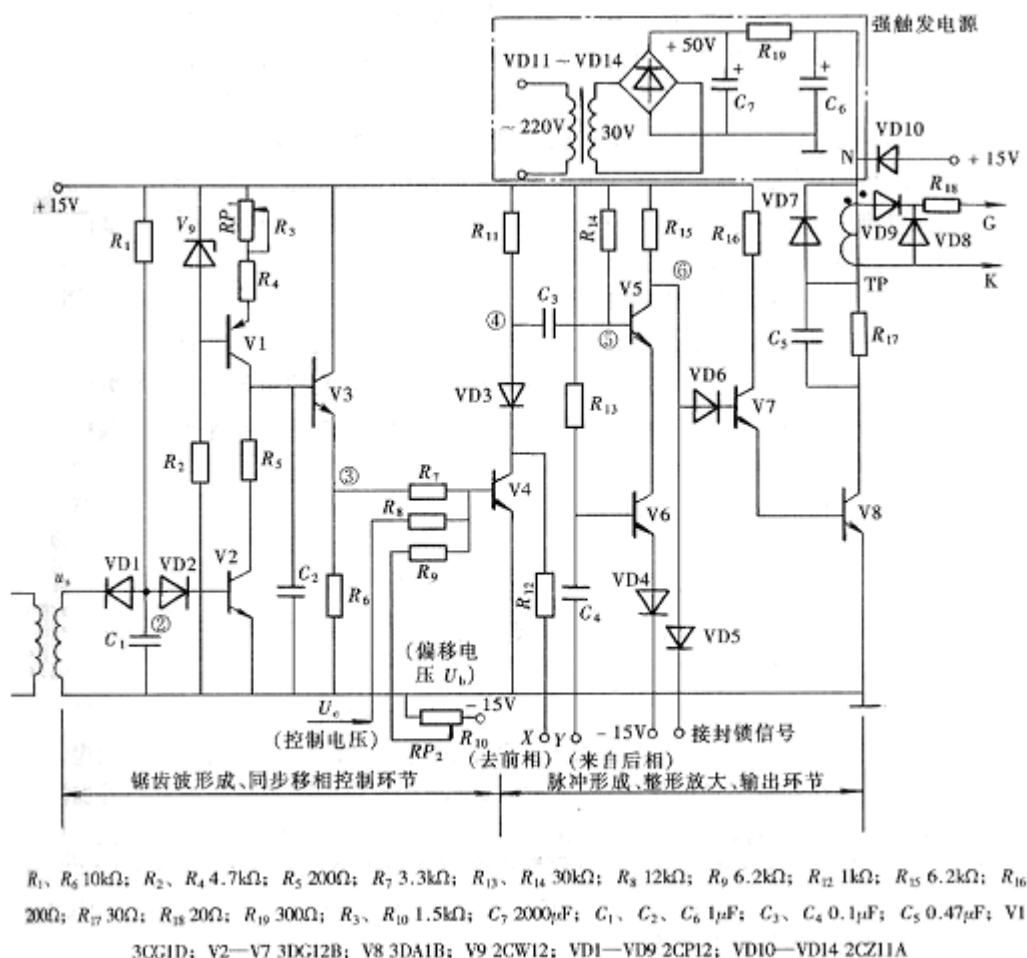


图 5-22 锯齿波同步触发电路原理图

锯齿波同步触发电路原理图如图 5-22 所示, 下面分环节介绍:

(1) 锯齿波形成和同步移相控制环节

1) 锯齿波形成

$V1, V9, R3, R4$ 组成的恒流源电路对 $C2$ 充电形成锯齿波电压, 当 $V2$ 截止时, 恒

流源电流 I_{c1} 对 C_2 恒流充电，电容两端电压为 $u_{c2} = \frac{I_{c1}}{C_2} t$

$I_{c1} = U_{v9}/(R_3 + RP_2)$ 因此调节电位器 RP_2 即可调节锯齿波斜率。

当 V_2 导通时，由于 R_4 阻值很小， C_2 迅速放电。所以只要 V_2 管周期性导通关断，电容 C_2 两端就能得到线性很好的锯齿波电压。

U_{b4} 为合成电压（锯齿波电压为基础，再叠加 U_b 、 U_c ）通过调节 U_c 来调节 α 。

2) 同步环节

同步环节由同步变压器 TS 和 V_2 管等元件组成。锯齿波触发电路输出的脉冲怎样才能与主回路同步呢？由前面的分析可知，脉冲产生的时刻是由 V_4 导通时刻决定（锯齿波和 U_b 、 U_c 之和达到 $0.7V$ 时），由此可见，若锯齿波的频率与主电路电源频率同步即能使触发脉冲与主电路电源同步，锯齿波是由 V_2 管来控制的， V_2 管由导通变截止期间产生锯齿波， V_2 管截止的持续时间就是锯齿波的脉宽， V_2 管的开关频率就是锯齿波的频率。在这里，同步变压器 TS 和主电路整流变压器接在同一电源上，用 TS 次级电压来控制 V_2 的导通和截止，从而保证了触发电路发出的脉冲与主电路电源同步。

工作时，把负偏移电压 U_b 调整到某值固定后，改变控制电压 U_c ，就能改变 u_{b4} 波形与时间横轴的交点，就改变了 V_4 转为导通的时刻，即改变了触发脉冲产生的时刻，达到移相的目的。

电路中增加负偏移电压 U_b 的目的是为了调整 $U_c = 0$ 时触发脉冲的初始位置。

(2) 脉冲形成、整形和放大输出环节

1) 当 $u_{b4} < 0.7V$ 时 V_4 管截止， V_5 、 V_6 导通，使 V_7 、 V_8 截止，无脉冲输出。

电源经 R_{13} 、 R_{14} 向 V_5 、 V_6 供给足够的基极电流，使 V_5 、 V_6 饱和导通， V_5 集电极⑥点电位为 $-13.7V$ （二极管正向压降以 $0.7V$ 、晶体管饱和压降以 $0.3V$ 计算）， V_7 、 V_8 截止，无触发脉冲输出。

④点电位： $15V$ ⑤点电位： $-13.3V$

另外： $+15V \rightarrow R_{11} \rightarrow C_3 \rightarrow V_5 \rightarrow V_6 \rightarrow -15V$ 对 C_3 充电，极性左正又负，大小 $28.3V$ 。

2)、当 $u_{b4} \geq 0.7V$ 时 V_4 导通，有脉冲输出

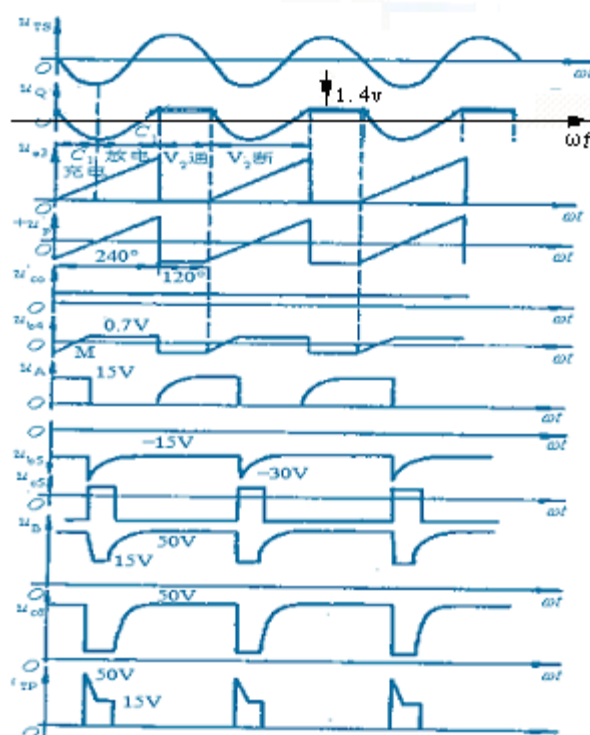
④点电位立即从 $+15V$ 下跳到 $1V$ ， C_3 两端电压不能突变，⑤点电位降至 $-27.3V$ ， V_5 截止， V_7 、 V_8 经 R_{15} 、 VD_6 供给基极电流饱和导通，输出脉冲，⑥点电位为 $-13.7V$ 突变至 $2.1V$ （ VD_6 、 V_7 、 V_8 压降之和）。

另外： C_3 经 $+15V \rightarrow R_{14} \rightarrow VD_3 \rightarrow V_4$ 放电和反充电⑤点电位上升，当⑤点电位从 $-27.3V$ 上升到 $-13.3V$ 时 V_5 、 V_6 又导通，⑥点电位由 $2.1V$ 突降至 $-13.7V$ ，于是， V_7 、 V_8 截止，输出脉冲终止。

由此可见，脉冲产生时刻由 V_4 导通瞬间确定，脉冲宽度由 V_5 、 V_6 持续截止的时间确定。所以脉宽由 C_3 反充电时间常数（ $\tau = C_3 R_{14}$ ）来决定。

(3) 强触发环节

晶闸管采用强触发可缩短开通时间,提高管子承受电流上升率的能力,有利于改善串并联元件的动态均压与均流,增加触发的可靠性。因此在大中容量系统的触发电路都带有强触发



发环节。

图中右上角强触发环节由单相桥式整流获得近 50V 直流电压作电源,在 V8 导通前,50V 电源经 R19 对 C6 充电, N 点电位为 50V。当 V8 导通时, C6 经脉冲变压器一次侧、R17 与 V8 迅速放电, 由于放电回路电阻很小, N 点电位迅速下降, 当 N 点电位下降到 14.3 V 时, VD10 导通, 脉冲变压器改由 +15 V 稳压电源供电。各点波形如图 5-23 所示。

图 5-23 锯齿波同步触发电路波形图

(4) 双脉冲形成环节

生双脉冲有两种方法: 内双脉冲和外双脉冲。

锯齿波触发电路为内双脉冲。晶体管 V5、V6 构成一个“或”门电路, 不论哪一个截止, 都会使⑥点电位上升到 2.1 V, 触发电路输出脉冲。V5 基极端由本相同步移相环节送来的负脉冲信号使 V5 截止, 送出第一个窄脉冲, 接着有滞后 60° 的后相触发电路在产生其本相第一个脉冲的同时, 由 V4 管的集电极经 R12 的 X 端送到本相的 Y 端, 经电容 C4 微分产生负脉冲送到 V6 基极, 使 V6 截止, 于是本相的 V6 又导通一次, 输出滞后 60° 的第二个脉冲。

对于三相全控桥电路, 三相电源 U、V、W 为正相序时, 六只晶闸管的触发顺序为 VT1VT2 → VT3 → VT4 → VT5 → VT6 彼此间隔 60°, 为了得到双脉冲, 一块触发电路板的 X、Y 可按图 5-24 所示方式连接。

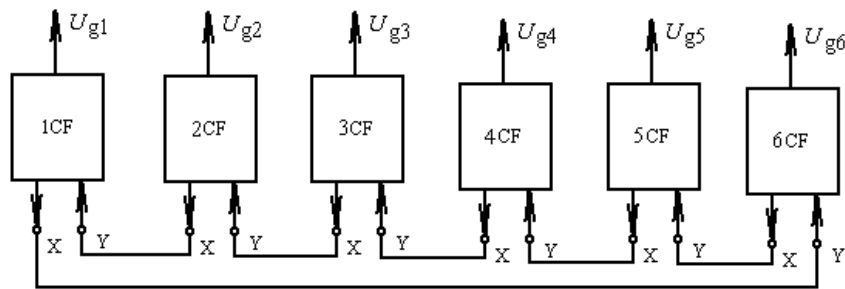


图 5-24 触发电路实现双脉冲连接的示意图

(5) 其他说明

在事故情况下或在可逆逻辑无环流系统,要求一组晶闸管桥路工作,另一组桥路封锁,这时可将脉冲封锁引出端接零电位或负电位,晶体管 V7、V8 就无法导通,触发脉冲无法输出。串接 VD5 是为了防止封锁端接地时,经 V5、V6 和 VD4 到-15V 之间产生大电流通路。

2. 集成触发器介绍

随着晶闸管变流技术的发展,目前逐渐推广使用集成电路触发器。由于集成电路触发器的应用,提高了触发电路工作的可靠性,缩小体积,简化了触发电路的生产与调试。集成触发器应用越来越广泛。正获得广泛应用的有以下几种:

(1) KC04 移相集成触发器 (还有 KJ 系列触发器)

此触发电路为正极性型电路,及控制电压增加晶闸管输出电压也增加。主要用于单相或三相全控桥装置。

其主要技术数据如下:

电源电压: DC 正负 15V。

电源电流: 正电流小于 15mA, 负电流小于 8mA

移相范围: 170°

脉冲宽度: 15° – 35° 。

脉冲幅度: 大于 13V

最大输出能力: 100mA

KC09 是 KC04 的改进型,二者可互换使用。

它与分立元件组成的锯齿波触发电路一样,由同步信号、锯齿波产生、移相控制、脉冲形成和放大输出等环节组成。

该电路在一个交流电周期内,在 1 脚和 15 脚输出相位差 180° 的两个窄脉冲,可以作为三相全控桥主电路同一相所接的上下晶闸管的触发脉冲,16 脚接 +15V 电源,。8 脚接同步电压,但由同步变压器送出的电压须经微调电位器 $1.5k\Omega$ 、电阻 $5.1k\Omega$ 和电容 $1\mu F$ 组成的滤波移相,以达到消除同步电压高频谐波的侵入,提高抗干扰能力。4 脚形成锯齿波,9 脚为锯齿波、偏移电压、控制电压综合比较输入。13、14 脚提供脉冲列调制和脉冲封锁控制端。KC04 引出脚各点波形如图 5-25 (a) 所示。

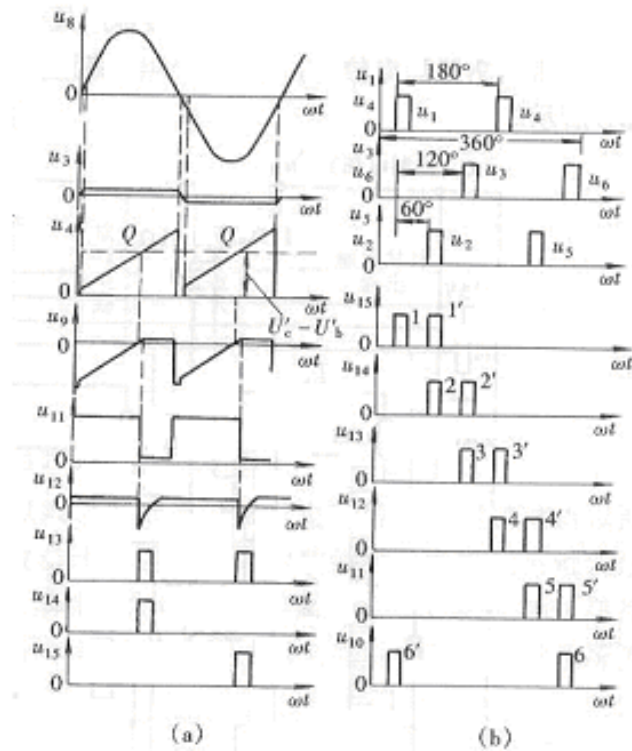


图 5—25 KC04 与 KC41C 电路各点电压波形

(2) KC41C 六路双脉冲形成器

KC41C 与三块 KC04 可组成三相全控桥双脉冲触发电路，如图 5—26 所示。把三块 KC04 触发器的 6 各输出端分别接到 KC41C 的 1~6 端，KC41C 内部二极管具有的“或”功能形成双窄脉冲，再由集成电路内部 6 只三极管放大，从 10~15 端外接的晶体管作功率放大可得到 800mA 触发脉冲电流，可触发大功率的晶闸管。KC41C 不仅具有双脉冲形成功能，还可作为电子开关提供封锁控制的功能。KC41C 各管脚的脉冲波形如图 5—25 (b) 所示。

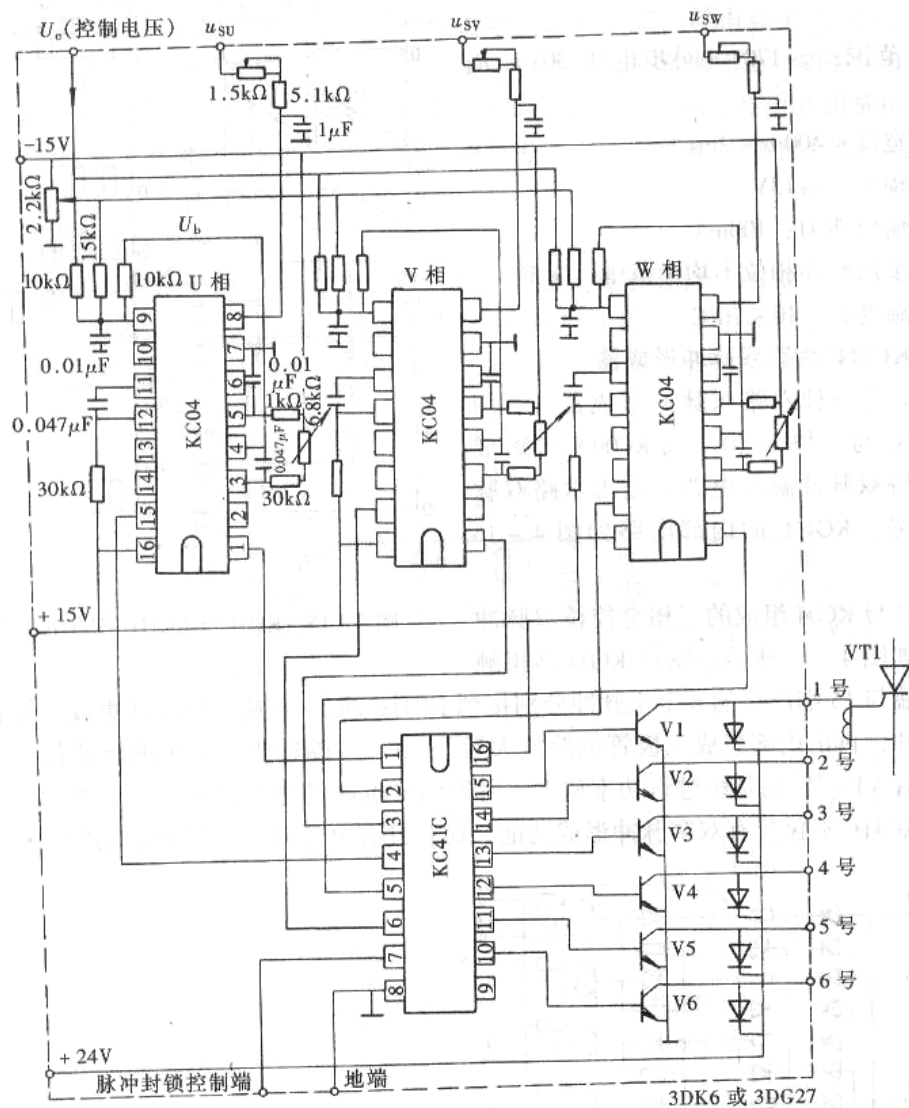


图 5-26 三相全控桥集成触发电路

四、触发电路与主电路电压的同步

制作或修理调整晶闸管装置时，常会碰到一种故障现象：在单独检查晶闸管主电路时，接线正确，元件完好；单独检查触发电路时，各点电压波形、输出脉冲正常，调节控制电压 U_c 时，脉冲移相符合要求。但是当主电路与触发电路连接后，工作不正常，直流输出电压 u_d 波形不规则、不稳定，移相调节不能工作。这种故障是由于送到主电路各晶闸管的触发脉冲与其阳极电压之间相位没有正确对应，造成晶闸管工作时控制角不一致，甚至使有的晶闸管触发脉冲在阳极电压负值时出现，当然不能导通。怎样才能消除这种故障使装置工作正常呢？这就是本节要讨论的触发电路与主电路之间的同步(定相)问题。

1. 同步的定义

前面分析可知，触发脉冲必须在管子阳极电压为正时的某一区间内出现，晶闸管才能被触发导通，而在锯齿波移相触发电路中，送出脉冲的时刻是由接到触发电路不同相位的同步电压 u_s 来定位，有控制与偏移电压大小来决定移相。因此必须根据被触发晶闸管的阳极电

压相位，正确供给触发电路特定相位的同步电压，才能使触发电路分别在各晶闸管需要触发脉冲的时刻输出脉冲。这种正确选择同步信号电压相位以及得到不同相位同步信号电压的方法，称为晶闸管装置的同步或定相。

2. 触发电路同步电压的确定

触发电路同步电压的确定包括两方面内容：

(1) (1) 根据晶闸管主电路的结构、所带负载的性质及采用的触发电路的形式，确定出该触发电路能够满足移相要求的同步电压与晶闸管阳极电压的相位关系。

(2) (2) 用三相同步变压器的不同连接方式或再配合阻容移相得到上述确定的同步电压。

下面用三相全控桥式电路带感性负载来具体分析。

如图 5—28 主电路接线，电网三相电源为 U_1 、 V_1 、 W_1 ，经整流变压器 TR 供给晶闸管桥路，对应电源为 U 、 V 、 W ，假定控制角为 0 ，则 $u_{g1} \sim u_{g6}$ 六个触发脉冲应在各自的自然换相点，依次相隔 60° 。要保证每个晶闸管的控制角一致，六块触发板 $1CF \sim 6CF$ 输入的同步信号电压 u_s 也必须依次相隔 60° 。为了得到六个不同相位的同步电压，通常用一只三相同步变压器 TS 具有两组二次绕组，二次侧得到相隔 60° 的六个同步信号电压分别输入六个触发电路。因此只要一块触发板的同步信号电压相位符合要求，那其它五个同步信号电压相位也肯定正确。那么，每个触发电路的同步信号电压 u_s 与被触发晶闸管的阳极电压必须有怎样的相位关系呢？这决定于主电路的不同形式、不同的触发电路、负载性质以及不同的移相要求。

如：对于锯齿波同步电压触发电路，NPN 型晶体管时，同步信号负半周的起点对应于锯齿波的起点，通常使锯齿波的上升段为 240° ，上升段起始的 30° 和终了的 30° 线性度不好，舍去不用，使用中间的 180° 。锯齿波的中点与同步信号的 300° 位置对应，使 $U_a=0$ 的触发角 α 为 90° 。当 $\alpha < 90^\circ$ 时为整流工作， $\alpha > 90^\circ$ 时为逆变工作。将 $\alpha = 90^\circ$ 确定为锯齿波的中点，锯齿波向前向后各有 90° 的移相范围。于是 $\alpha = 90^\circ$ 与同步电压的 300° 对应，也就是 $\alpha = 0^\circ$ 与同步电压的 210° 对应。 $\alpha = 0^\circ$ 对应于 u_u 的 30° 的位置，则同步信号的 180° 与 u_u 的 0° 对应，说明同步电压 u_s 应滞后于阳极电压 u_u 180° 。如图 5—27 所示。

3. 实现同步的方法

实现同步的方法步骤如下：

(1)：根据主电路的结构、负载的性质及触发电路的型式与脉冲移相范围的要求，确定该触发电路的同步电压 u_s 与对应晶闸管阳极电压 u_u 之间的相位关系。

(2)：根据整流变压器 TR 的接法，以定位某线电压作参考矢量，画出整流变压器二次电压也就是晶闸管阳极电压的矢量，再根据步骤 1 确定的同步电压 u_s 与晶闸管阳极电压 u_u 的相位关系，画出电源的同步相电压和同步线电压矢量。

(3)：根据同步变压器二次线电压矢量位置，定出同步变压器 TS 的钟点数的接法，然

后确定出 u_{su} 、 u_{sv} 、 u_{sw} 分别接到 VT1、VT3、VT5 管触发电路输入端；确定出 $u_{s(-u)}$ 、 $u_{s(-v)}$ 、 $u_{s(-w)}$ 分别接到 VT4、VT6、VT2 管触发电路的输入端，这样就保证了触发电路与主电路的同步。

4. 同步举例

例 三相全控桥整流电路，直流电动机负载，不要求可逆运转，整流变压器 TR 为 D，y1 接线组别，触发电路采用本书锯齿波同步的触发电路，考虑锯齿波起始段的非线性，故留出 60 度余量。试按简化相量图的方法来确定同步变压器的接线组别及变压器绕组联结法。

解 以 VT1 管的阳极电压与相应的 1CF 触发电路的同步电压定相为例。

- 1) 根据题意，要求同步电压 u_s 相位应滞后阳极电压 u_u 180°。
- 2) 根据相量图，同步变压器接线组别应为 Dyn7,Dyn1。

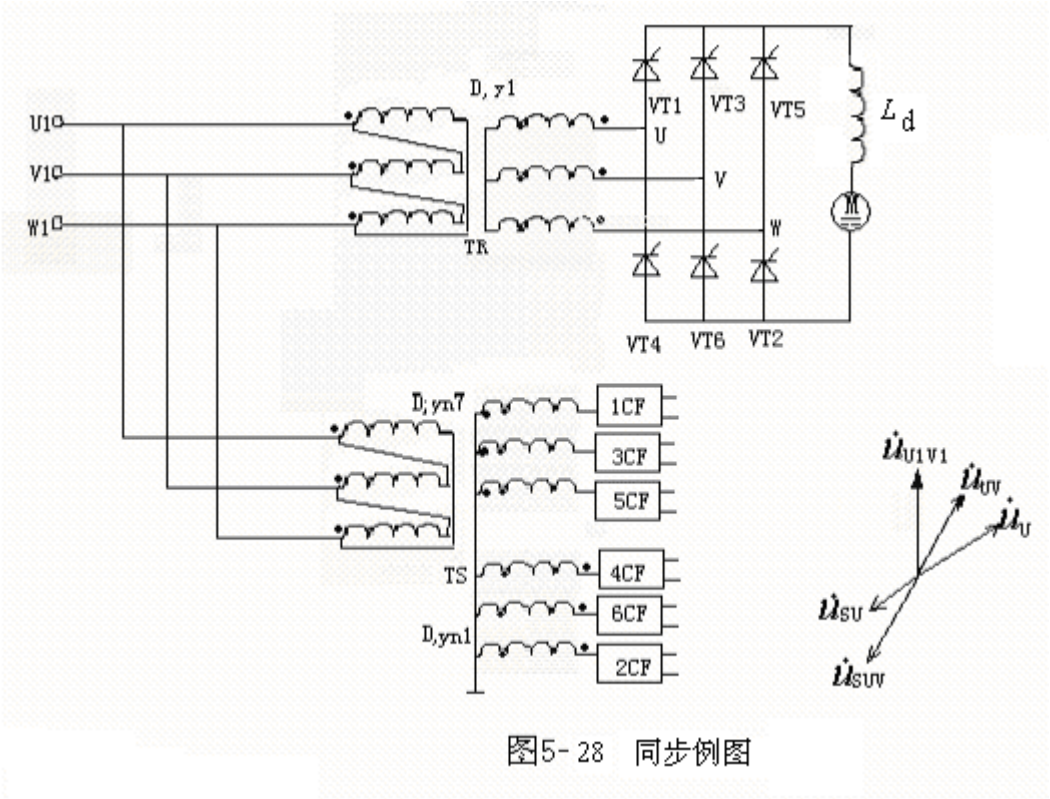


图5-28 同步例图

3) 3) 根据已求得同步变压器结线组别，就可以画出变压器绕组的结线组别，再将同步电压分别接到相应触发电路的同步电压接线端，即能保证触发脉冲与主电路的同步。

五、整流电路的保护

整流电路的保护主要是晶闸管的保护，因为晶闸管元件有许多优点，但与其它电气设备相比，过电压、过电流能力差，短时间的过电流、过电压都可能造成元件损坏。为使晶闸管装置能正常工作而不损坏，只靠合理选择元件还不行，还要设计完善的保护环节，以防不测。具体保护电路主要有以下这些：

1. 过电压保护

过电压保护有交流侧保护、直流侧保护和器件保护。过电压保护设置如图 5-29 所示。其中 H 属于器件保护，H 左边设置的是交流侧保护、H 右边设置的为直流侧保护。

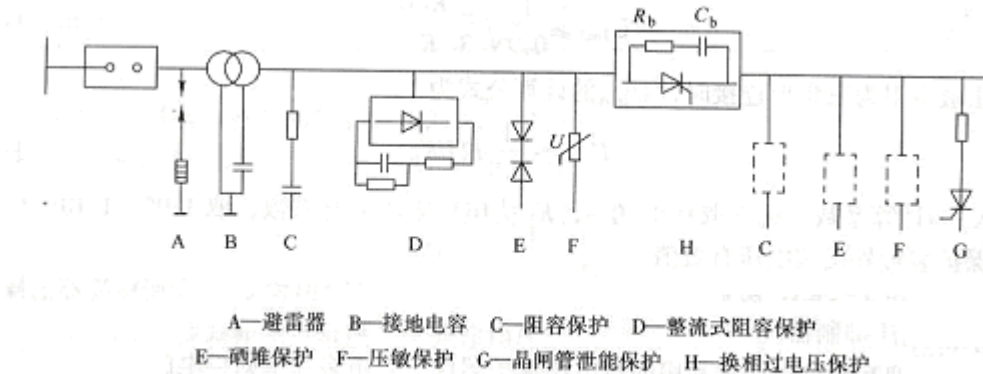


图5-29 晶闸管过电压保护设置图

（1）晶闸管的关断过电压及其保护

晶闸管关断引起的过电压，可达工作电压峰值的 5~6 倍，线路电感（主要是变压器漏感）释放能量而产生的。一般情况采用的保护方法是在晶闸管的两端并联 RC 吸收电路，如图 5-30 所示。

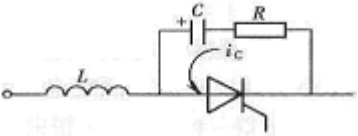


图 5-30 用阻容吸收抑止晶闸管关断过电压

（2）交流侧过电压保护

由于交流侧电路在接通或断开时感应出过电压，一般情况下，能量较大，常用的保护措施为：

1) 阻容吸收保护电路，应用广泛，性能可靠，但正常运行时，电阻上消耗功率，引起电阻发热，且体积大，对于能量较大的过电压不能完全抑制。一次根据稳压管的稳压原理，目前较多采用非线性电阻吸收装置，常用的有硒堆与压敏电阻。

2) 硒堆就是成组串联的硒整流片。单相时用两组对接后再与电源并联，三相时用三组对接成 Y 形或用六组接成 D 形。

3) 压敏电阻是由氧化锌、氧化铋等烧结而成，每一颗氧化锌晶粒外面裹着一层薄薄的氧化铋，构成象硅稳压管一样的半导体结构，具有正反向都很陡的稳压特性。

（3）直流侧过电压的保护

保护措施一般与交流过电压保护一致。

2. 过电流保护

晶闸管装置出现的元件误导通或击穿、可逆传动系统中产生环流、逆变失败以及传动

装置生产机械过载及机械故障引起电机堵转等，都会导致流过整流元件的电流大大超过其正常管子电流，即产生所谓的过电流。通常采用的保护措施如图 5—31 所示。

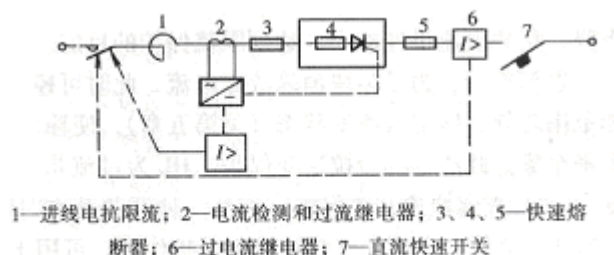


图5—31 晶闸管装置可采用的过电流保护措施

（1）在交流进线中串接电抗器（称交流进线电抗），或采用漏抗较大的变压器是限制短路电流以保护晶闸管的有效办法，缺点是在有负载时要损失较大的电压降。

（2）灵敏过电流继电器保护。继电器可装在交流侧或直流侧，在发生过电流故障时动作，使交流侧自动开关或直流侧接触器跳闸。由于过电流继电器和自动开关或接触器动作需几百毫秒，故只能保护由于机械过载引起的过电流，或在短路电流不大时，才能对晶闸管起保护作用。

（3）限流与脉冲移相保护

交流互感器 TA 经整流桥组成交流电流检测电路得到一个能反映交流电流大小的电压信号去控制晶闸管的触发电路。当直流输出端过载，直流电流 I_d 增大时交流电流也同时增大，检测电路输出超过某一电压，使稳压管击穿，于是控制晶闸管的触发脉冲左移即控制角增大，使输出电压 U_d 减小， I_d 减小，以达到限流的目的，调节电位器即可调节负载电流限流值。当出现严重过电流或短路时，故障电流迅速上升，此时限流控制可能来不及起作用，电流就已超过允许值。在全控整流带大电感负载时，为了尽快消除故障电流，可控制晶闸管的触发脉冲快速左移到整流状态的移相范围之外，使输出端瞬时值出现负电压，电路进入逆变状态，将故障电流迅速衰减到 0，这种称为拉逆变保护。

（4）直流快速开关保护

在大容量、要求高、经常容易短路的场合，可采用装在直流侧的直流快速开关作直流侧的过载与短路保护。这种快速开关经特殊设计，它的开关动作时间只有 2ms，全部断弧时间仅 25~30ms，目前国内生产的直流快速开关为 DS 系列。从保护角度看，快速开关的动作时间和切断整定电流值应该和限流电抗器的电感相协调。

（5）快速熔断器保护

熔断器是最简单有效的保护元件，针对晶闸管、硅整流元件过流能力差，专门制造了快速熔断器，简称快熔。与普通熔断器相比，它具有快速熔断特性，通常能做到当电流 5 倍额定电流时，熔断时间小于 0.02s，在流过通常的短路电流时，快熔能保证在晶闸管损坏之前，切断短路电流，故适用与短路保护场合。快熔的选择： $1.57I_{T(AV)} > I_{RD} > I_T$ （实际管子最大

电流有效值)

3. 电压与电流上升率的限制

(1)晶闸管的正向电压上升率的限制

晶闸管在阻断状态下它的 J2 结面存在着结电容。当加在晶闸管上的正向电压上升率较大时,便会有较大的充电电流流过 J2 结面,起到触发电流的作用,使晶闸管误导通。晶闸管的误导通会引起很大的浪涌电流,使快速熔断器熔断或使晶闸管损坏。

变压器的漏感和保护用的 RC 电路组成滤波环节,对过电压有一定的延缓作用,使作用于晶闸管的正向电压上升率大大地减小,因而不会引起晶闸管的误导通。晶闸管的阻容保护也有抑制的作用。

(2) 电流上升率及其限制

晶闸管在导通瞬间,电流集中在门极附近,随着时间的推移导通区面积逐渐扩大,直到整个结面导通为止。在此过程中,电流上升率应限制在通态电流临界上升率以内,否则将导致门极附近过热,损坏晶闸管。晶闸管在换相过程中,导通的晶闸管电流逐渐增大,产生换相电流上升率。通常由于变压器漏感的存在而受到限制。晶闸管换相过程中,相当于交流侧线电压短路,交流侧阻容保护电路电容中的储能很快地释放,使导通的晶闸管产生较大的 di/dt 。采用整流式阻容保护,可以防止这一原因造成过大的 di/dt 。晶闸管换相结束时,直流侧输出电压瞬时值提高,使直流侧阻容保护有一个较大的充电电流,造成导通的晶闸管 di/dt 增大。采用整流式阻容保护,可以减小这一原因造成过大的 di/dt 。

六、逆变主电路

1. 逆变的基本概念和换流方式

(1) 逆变的基本概念

将直流电变换成交流电的电路称为逆变电路,根据交流电的用途可以分为有源逆变和无源逆变。有源逆变是把交流电回馈电网,无源逆变是把交流电供给不同频率需要的负载。无源逆变就是通常说到的变频。

(2) 逆变电路的换流方式

换流实质就是电流在由半导体器件组成的电路中不同桥臂之间的转移。常用的电力变流器的换流方式有以下几种:

1) 负载谐振换流

由负载谐振电路产生一个电压,在换流时关断已经导通的晶闸管,一般有串联和并联谐振逆变电路,或两者共同组成的串、并联谐振逆变电路。

2) 强迫换流

附加换流电路,在换流时产生一个反向电压关断晶闸管。

3) 器件换流

利用全控型器件的自关断能力进行换流。

(3) 逆变电路基本工作原理

电路图和对应的波形图如图 5-32；说明几点：

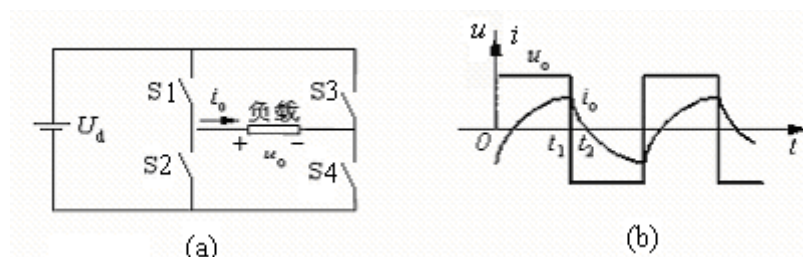


图 5-32 逆变电路原理示意图及波形图

- 1) S1、S4 闭合，S2、S3 断开，输出 u_o 为正，反之，S1、S4 断开，S2、S3 闭合，输出 u_o 为负，这样就把直流电变换成交流电。
- 2) 改变两组开关的切换频率，可以改变输出交流电的频率。
- 3) 电阻性负载时，电流和电压的波形相同。电感性负载时，电流和电压的波形不相同，电流滞后电压一定的角度。

2. 单相逆变电路

电路根据直流电源的性质不同，可以分为电流型、电压型逆变电路。

(1) 电压型逆变电路（电路图如图 5-33 所示）：电压型逆变电路的基本特点：

- 1) 直流侧并联大电容，直流电压基本无脉动。
- 2) 输出电压为矩形波，电流波形与负载有关。
- 3) 电感性负载时，需要提供无功。为了有无功通道，逆变桥臂需要并联二极管。

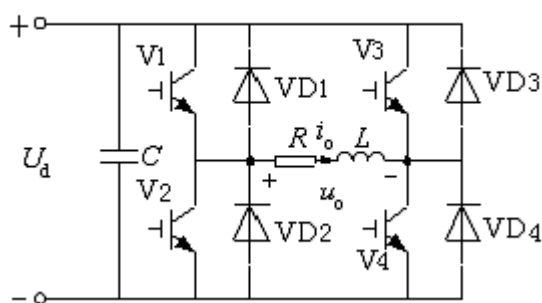


图 5-33 电压型逆变电路原理图

(2) 电流型逆变电路（电路图如图 5-34 所示）

电流型逆变电路的基本特点：

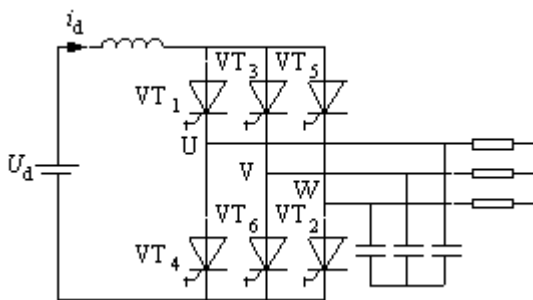


图 5-34 电流型逆变电路原理图

- 1) 直流侧串联大电感，直流电源电流基本无脉动。
- 2) 交流侧电容用于吸收换流时负载电感的能量。这种电路的换流方式一般有强迫换流和负载换流。
- 3) 输出电流为矩形波，电压波形与负载有关。
- 4) 直流侧电感起到缓冲无功能量的作用，晶闸管两端不需要并联二极管。

3. 单相电流型逆变电路

(1) 电路结构

电路原理图如图 5-35 所示：

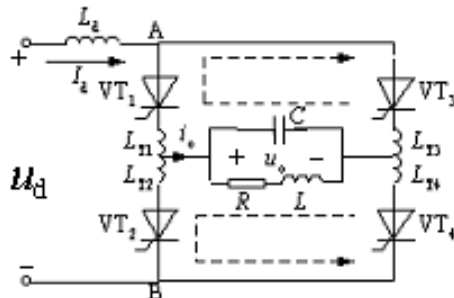


图 5-35 单相电流型逆变电路原理图

桥臂串入 4 个电感器，用来限制晶闸管开通时的电流上升率 di/dt 。

VT1~VT4 以 1000~5000Hz 的中频轮流导通，可以在负载得到中频电流。

采用负载换流方式，要求负载电流要超前电压一定的角度。负载一般是电磁感应线圈，用来加热线圈的导电材料。等效为 R 、 C 串联电路。

并联电容 C ，主要为了提高功率因数。同时，电容 C 和 R 、 L 可以构成并联谐振电路，因此，这种电路也叫并联谐振式逆变电路。

(2) 工作原理

输出的电流波形接近矩形波，含有基波和高次谐波，且谐波的幅值小于基波的幅值。波形如图 5-36 所示。

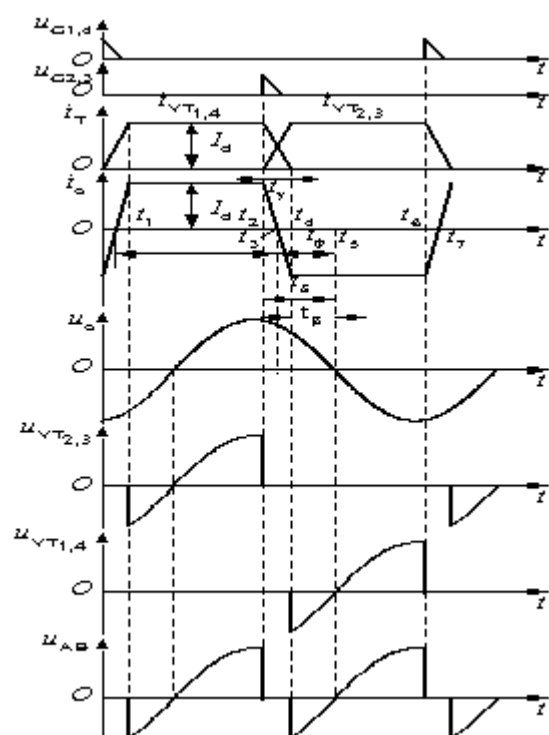


图 5—36 单相电流型逆变电路波形图

基波频率接近负载谐振的频率，负载对基波呈高阻抗。对谐波呈低阻抗，谐波在负载的压降很小。因此，负载的电压波形接近于正弦波。一个周期中，有两个导通阶段和两个换流阶段。

$t_1 \sim t_2$ 阶段，VT1，VT4 稳定导通阶段， $i_o = I_d$ ； t_2 时刻以前在电容 C 建立左正右负的电

$t_2 \sim t_4$ ： t_2 时刻触发 VT2，VT3，进入换流阶段。

L_T 使 VT1，VT4 不能立即关断，电流有一个减小的过程。VT2，VT3 的电流有一个增大的过程。

4 个晶闸管全部导通。负载电容电压经过两个并联的放电回路放电。 $L_{T1} \sim VT1 \sim VT3 \sim L_{T3} \sim C$ ，另一条： $L_{T2} \sim VT2 \sim VT4 \sim L_{T4} \sim C$ 。

$t=t_4$ 时刻, VT1, VT4 的电流减小到零而关断, 换流过程结束。 $t_4 \sim t_2$ 称为换流时间。 t_3 时刻位于 $t_2 \sim t_4$ 的中间位置。

为了可靠关断晶闸管, 不导致逆变失败, 晶闸管需要一段时间才能恢复阻断能力, 换流结束以后, 还要让 VT1, VT4 承受一段时间的反向电压。这个时间称为 $t_\beta=t_5-t_4$, t_β 应该大于晶闸管的关断时间 t_q 。

为了保证可靠换流。应该在电压 u_0 过零前 $t_\delta=t_5-t_2$ 触发 VT2, VT3。 t_δ 称为触发引前时间, $t_\delta=t_\beta+t_\gamma$, 电流 i_0 超前电压 U_0 的时间为: $t_\phi=t_\beta+0.5 t_\gamma$ 。

(3) 基本数量分析

如果不计换流时间, 输出电流的傅立叶展开式为:

$$i_o = \frac{4I_d}{\pi} \left(\sin \varphi_1 + \frac{1}{3} \sin 3\varphi_1 + \frac{1}{5} \sin 5\varphi_1 + \dots \right)$$

其中基波电流的有效值为:

$$U_o = \frac{\pi U_d}{2\sqrt{2} \cos \varphi} = 1.11 \frac{U_d}{\cos \varphi}$$

负载电压的有效值与直流输出电压的关系为:

(4) 几点说明

实际工作过程中, 感应线圈的参数随时间变化, 必须使工作频率适应负载的变化而自动调整。这种工作方式称为自励工作方式。

固定工作频率的控制方式称为他励方式。他励方式存在起动问题。一般解决的方法有: 先用他励方式, 到系统起动以后再转为自励方式; 附加预充电起动电路。

七、逆变触发电路

逆变触发电路与整流触发电路不同, 根据前边并联逆变电路的工作原理分析可知, 逆变触发电路必须满足以下要求:

①输出电压过零之前发出触发脉冲, 超前时间 $t_\delta=\varphi/\omega$ 。

②在感应炉中, 感应线圈的等效电感 L 和电阻 R 随加热时间而变化, 振荡回路的谐振频率 f_0 也是变化的, 为了保证工作过程中, $f > f_0$ 且 $f \approx f_0$ 。要求触发脉冲的频率随之自动改变。要求频率自动跟踪。

③为了触发可靠, 输出的脉冲前沿要陡, 有一定的幅值和宽度。

④必须有较强的抗干扰能力。

要满足以上要求的触发电路, 只能用自激式的, 即采用频率自动跟踪。实现的方法较多, 下面主要介绍几种常见的电路。

1. 频率自动跟踪电路

所谓自动跟踪, 是指保持负载电压 u_0 过零前产生的控制脉冲的时间不变。保持超前时

间 t_β 为恒值。图 5-37 为频率自动跟踪电路的电路原理图，图 5-38 为波形分析图。

由逆变电路的分析可知，逆变电路只要超前时间 t_β 大于熄灭角对应的时间 t_μ (忽略重叠角对应的时间)，逆变电路可以安全运行。由波形分析得到：

$$\beta = \arctan U_{2m}/U_{1m}$$

$$t_\beta = \beta/\omega \quad (\omega = 2\pi/T)$$

上式表明，若改变 U_{1m} 或 U_{2m} 的值。即可改变超前角 β 。从而改变超前时间 t_β 。在合成信号 u_s 正负半波的过零点分别产生脉冲列 u_{o1} 和 u_{o2} 。他们都超前 U_1 的零点一段时间 t_β 。用 u_{o1} 触发逆变电路的 VT2, VT4；用 u_{o2} 触发逆变电路的 VT1, VT3；负载输出电压波形近似正弦波即： $U_O = U_{om} \times \sin \omega t$

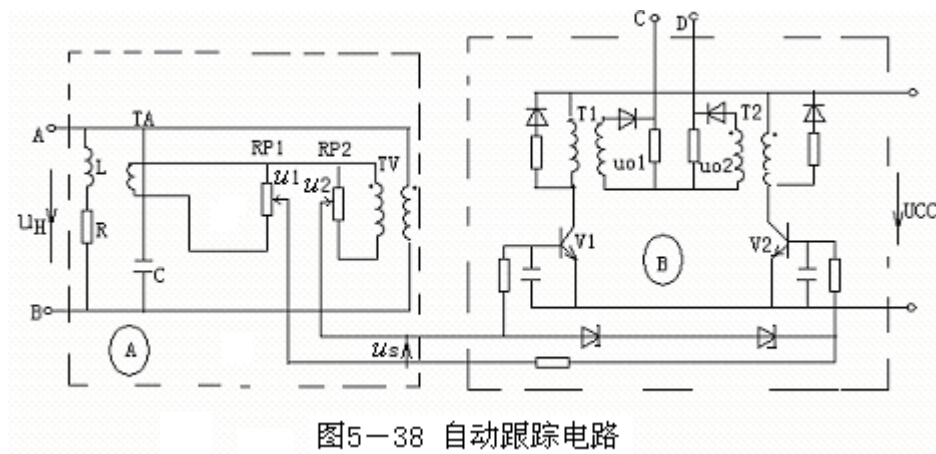


图5-38 自动跟踪电路

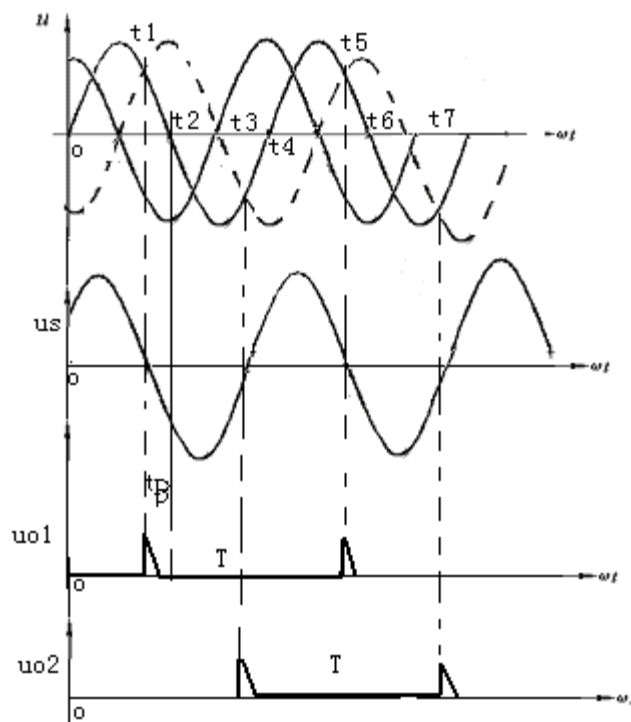


图 5—38 自动跟踪波形

上式表明，信号 U_1 可以取自负载电压 U_0 。 U_2 可用电流互感器的负载电位器 RP1 的端压得到。图中的 A 部分，TV 是电压互感器，TA 是电流互感器。适当调节 RP1，RP2 的位置，可以获得需要的 t_β 值。而 RP1，RP2 的位置一旦确定， t_β 值维持不变。图中的 B 部分，是脉冲形成电路，将正弦信号 U_s 转换为两列相位互差 180° 的脉冲 u_{o1} 和 u_{o2} 。脉冲经过后续电路的整形和功率放大后，可以作为逆变电路晶闸管的出发信号。

2. 定角控制电路

如图 5-40 所示，通过接在负载两端的中频信号变压器取得负载电压信号 $\dot{U}_H$ U_H ，用 $\dot{U}_H$ 产生超前脉冲。图中 $\dot{U}_H$ 在电位器产生的电压波形为中频半波整流波形。分压后还是半波波形，只是幅值减小。 U_R 通过 VD3 对电容 C 充电。充电到 U_R 的峰值后，VD3 截止。C 两端的电压与电位器的电压相等。所以，从 B 点开始，C 要通过二极管 VD4—晶体管 V1 的基极—射极—R 放电。晶体管 V1 在 B 点开始导通并饱和。到 C 放电完毕。晶体管 V1 恢复截止。在晶体管 V1 的集电极形成脉冲电压 U_C 。把 U_C 整形放大后，可用来触发晶闸管。

只要改变分压比，调节电位器 R，就可以将 Φ 整定到需要的值。由于 Φ 的大小决定于分压比，与逆变器的工作频率无关，一旦确定， Φ 就不随工作频率 f 改变，所以叫定角控制。

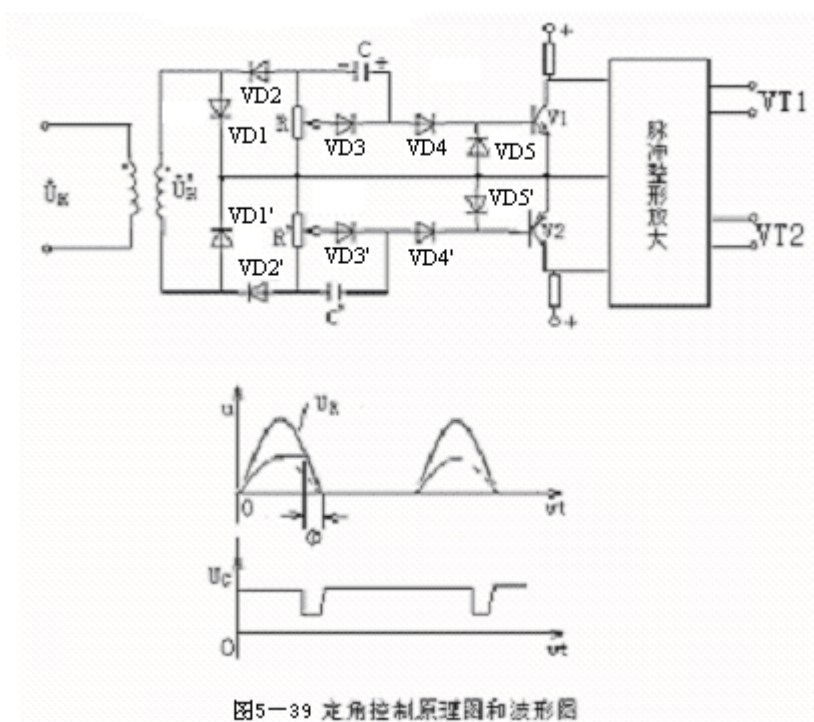


图5-39 定角控制原理图和波形图

八、逆变电路的起动与保护

1. 并联逆变器的起动

如前所述，由于需要频率自动跟随，所以逆变器工作于自激状态，逆变触发脉冲的控制信号取自负载。当逆变器尚未投入运行时，无从获得控制信号，如何建立第一组逆变触发脉冲，以起动逆变器，是逆变器可靠地由起动转到稳定运行，这就是逆变器的起动问题。此外，逆变器在起动以后，一般都能够适应任何实际负载，而在起动时则不然，因此也有的把起动问题归结为负载适应性问题。

并联逆变器的起动方法很多，基本上可分为两类：他激起动（共振法）和自激起动（阻尼振荡法）。

（1）他激起动

他激起动是先让逆变触发器发出频率与负载谐振回路的谐振频率相近的脉冲，去触发逆变桥晶闸管，使负载回路逐渐建立振荡，待振荡建立后，就由他激转成自激工作。采用这种方法的线路简单，只需一可调频多谐振振荡器和他激——自激转换电路，因而可降低装置的造价。但工作中，必须预知负载的谐振频率，并且在跟换负载时，要重新校正起动频率，使之和负载谐振频率相近。这种起动方式较适于作为同频带宽的负载（谐振频率 Q 值低的负载）起动用。一般，对 $Q \leq 2$ 的负载最适用。对于 Q 值高，即通频带窄，共振区小的负载，将要求更精确校正起动频率，若 Q 值高高使得共振区小得和逆变器起动时的引前角可以比拟时，逆变器就不能起动。原因是他激起动时，负载两端的电压是从零逐渐建立起来的，所以起动时的 di/dt 很小，换流能力差，需要较大的引前角才能起动。

（2）自激起动

自激起动是预先给负载谐振频率回路中的电容器（或电感）充上能量然后在谐振电路中产生阻尼振荡，从而使逆变器起动。此法线路复杂，起动设备较庞大，但特别适于负载回路 Q 值高的场合。尤其使用于熔炼负载，因为熔炼负载的品质因数 Q 值比较高，预先电的能量消耗慢，振荡衰减慢，容易起动，如果 Q 值太低，则预充电的能量消耗太快，振荡衰减太快，起动就困难。

为了提高装置的自激起动能力，可以提高触发脉冲形成电路的灵敏度，加大起动电容器的电容量和能量，以及想法在起动过程中使整流器输出的直流能量及时通过逆变器补充到负载谐振电路中去。下面举例加以说明。

（3）起动线路

图 5-40 所示为目前应用较普遍、效果也较好的起动线路。

该线路由 VT_q 、 L_q 和 C_q 等元件组成阻尼振荡的能源供给电路。在起动逆变器之前，先由工频电源经整流后，通过 R_q 给 C_q 充电（极性如图所示），充电电压最高可为逆变器的直流电源电压。起动时，触发给 VT_q ， C_q 就会通过谐振回路放电，在谐振回路中引起振荡。 C_q 的容量越大，充电电压越高。振荡就越强。谐振回路的振荡电压经变换，形成触发脉冲去触发逆变桥晶闸管，使之起动并转入稳定运行状态。

由 C_q 放电激起的是阻尼振荡，特别是 Q 值低的谐振回路，振荡衰减很快，必须要在头一、二个衰减波内发出触发脉冲。为此，要求逆变触发器具有足够高的灵敏度；另外，为防止振荡衰减，应在逆变桥晶闸管触发后，立即从直流电源取得能量，去补充谐振回路的能量消耗。但在直流电源端串联着大的滤波电抗器 L_d ，惯性很大，电流只能由零逐渐增大，这样由整流器向逆变器输送能量就需要一定的时间，为缩短这一滞后时间，本线路中装设了由

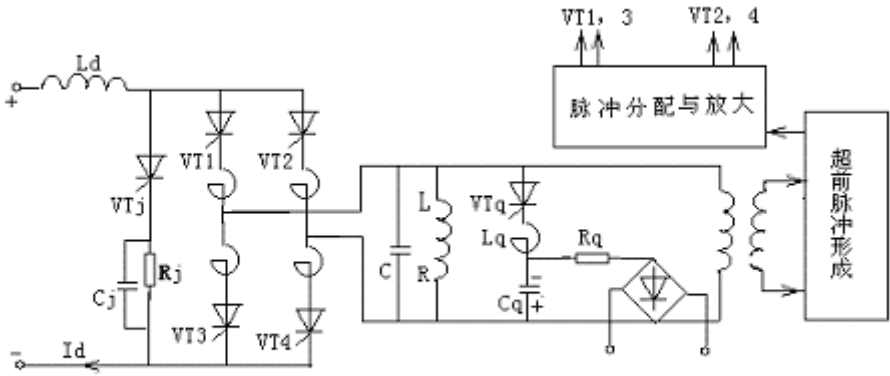


图 5-40 并联逆变器的启动电路

VT_j 、 R_j 、 C_j 组成的预磁化电路。在起动逆变器之前，先触发 VT_j ，让滤波电抗器流过电流 I_{dj} 。使之预先磁化，一旦逆变器起动，电抗器中已建立的电流就会由于 VT_j 的关断，被迫流向逆变器，及时地给负载谐振回路补充能量，以保持衰减振荡波幅不致降低，而提高起动的可靠性。预磁化电流 I_{dj} 的大小，决定于直流电源和 R_j 。

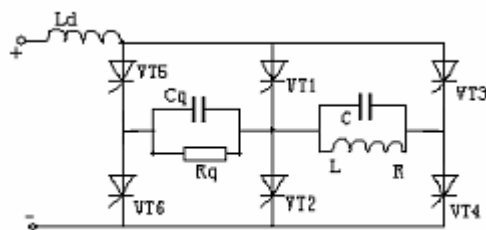


图 5-41 附加并联启动电路

一般取 $I_{dj} = (0.2 \sim 0.8) I_d$ ，谐振回路 Q 值高的取小值。反之则取大值。 I_{dj} 太大有可能引起过流保护误动作，否则大一点有利于起动。当逆变器触发后， C_q 上的电压会使逆变桥直流侧电压瞬时下降到零，甚至变负，这时 C_j 上充的电压就会迫使 VT_j 自动关断。逆变器起动以后，振荡回路进入负半波时， VT_q 也会被迫关断。因此，起动完毕，起动用的辅助元件都会自动从回路中切除。

起动过程如下：接通整流器、个控制回路和 C_q 的预充电回路的电源后。触发 VT_j 建立 I_{dj} 。触发 VT_q 激起振荡。此后，即自动触发 $VT1$ 、 $VT3$ ，使 VT_j 关断，触发 $VT2$ 、 $VT4$ ，迫使 VT_q 关断。到此。起动过程结束，装置进入正常运行状态。

(4) 附加并联起动线路

如图 5-41 所示，有 $VT5$ 、 $VT6$ 、电阻 R_q 、电容器 C_q 组成辅助并联线路，此线路的容量比逆变器中的都小。起动开始后的最初几个周期，由电源电路驱动外侧的两对晶闸管工作。换言之，交替触发 $VT3$ 、 $VT5$ 和 $VT2$ 、 $VT6$ ，晶闸管 $VT1$ 、 $VT4$ 暂时处于关断状态。按照这种工作方式，在临界起动期间，串联的起动电容器 C_q 使电路具有充分的换向能力。这样，当并联补偿负载回路中建立了足够电流的时候，只要在周期中的适当时刻，触发主逆变器中相应的晶闸管，起动电路就会自动地退出工作，逆变器随即固定于最终工作状态，交替地触发 $VT1$ 、 $VT3$ 和 $VT2$ 、 $VT4$ 。

电阻 R_q 的作用有二：一是在进行前述起动以前，先触发 $VT1$ 、 $VT6$ 或 $VT5$ 、 $VT4$ （只触发一次），是滤波电抗器流过预磁化电流，调节 R_q 即可改变预磁化电流的大小；二是进入起动状态后，不管逆变器的工作频率如何，电阻 R_q 总能使 C_q 两端电压限定在某已知值上，因此，起动电路基本上不受工作频率的干扰。

此线路适用于一切实际负载，其工作频率可达 1.5 千赫左右。

(5) 他激到自激的转换

图 5-42 所示为他激起动线路。

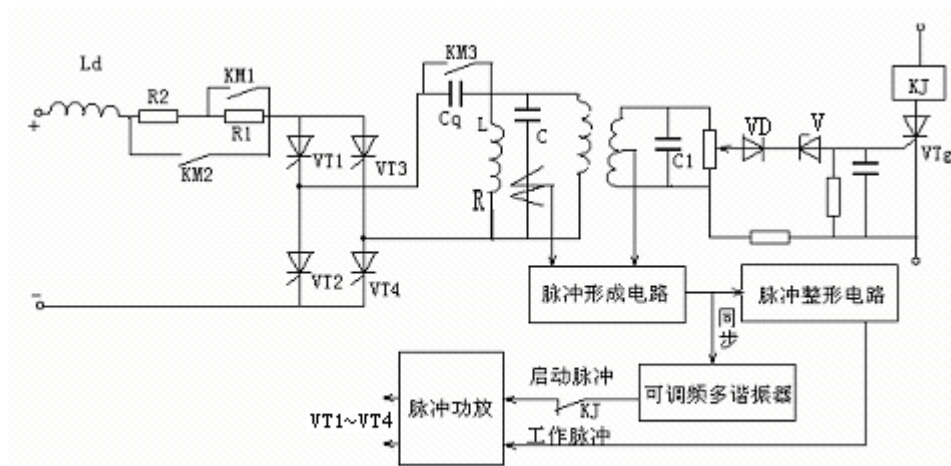


图 5-42 他激启动和转换电路

起动时，接通直流电源后，首先由频率可调的多谐振荡器产生脉冲，触发逆变桥臂的晶闸管进行他激起动。负载回路的振荡一经建立，负载回路的中频电流电压信号就通过电流互感器和电压互感器输至频率自动跟随系统，按电流电压信号交角形式，由脉冲形成电路产生相位互差 180° 的两组脉冲。这两组脉冲分成两路，一路去强迫多谐振荡器与之同步，另一路进入脉冲整形电路。多谐振荡器的经同步的输出脉冲和脉冲整形电路输出的脉冲同时进入脉冲功放电路，由功放电路输出脉冲去触发逆变器的晶闸管。在系统稳定运行时，即中频电压幅值达到一定值后， VT_g 被触发导通，KJ 得电吸合，便将多谐振荡器的电源和输出切断，多谐振荡器停止工作，逆变桥晶闸管便单独由脉冲形成电路形成的脉冲，经整形、放大后去触发。

请注意，有他激到自激的转换时刻不是任意的，必须避开正常触发脉冲的时限。如果转换时刻正好是他激发出脉冲的时刻，则此脉冲便会漏掉，串联电容 C_q 上就要继续充电，电压增高一倍，可能造成系统过压。所以转换时刻必须选在他激脉冲之前，这点只要装设稳压管就可做到。因为在 VD 两端的中频电压信号是正弦曲线，稳压管 V 的导通最晚时刻是 90° ，而他激脉冲不可能在 U_{VD} 信号 90° 处发生，一般总在 90° 以后才出现。事实上，V 则总在 90° 之前导通，即转换信号总在 90° 之前发生，所以两者不会碰头。当然，用继电器控制转换时刻是不准确的，应该用晶体管开关线路来控制。

线路中，R1 和 R2 是起动时的限流电阻，起动完毕就应切除。值得强调指出，他激起动的多谐振荡器的工作频率小、必须低于起动时（冷态或热态）的负载回路的谐振频率，否则频率自动跟随写用所测信号形成的脉冲就不可能使多谐振荡器同步，从而使逆变器触发脉冲紊乱，引起逆变失败。

当然，如果不采用脉冲形成电路的输出脉冲去强迫可调频多谐振荡器同步，而是由他激直接切换到自激，则起动时，让多谐振荡器的频率高于固有多振频率率 $15\sim 30\%$ 会更好些。

(6) 零起动方式

将整流器直流输出电压从零开始逐渐升高，并辅之以他激方式触发逆变晶闸管，待电压

达一定高度, 频率跟随系统能正常工作后, 即把他激触发回路切除, 转用频率自动跟随系统工作, 这就是所谓的零起动方式。在此方式下, 负载回路不再需要预先用外加直流电源提供能量激起振荡, 而是直接由逆变器提供能量。只要在他激中频信号源频率大于负载的固有振荡频率的某一范围内, 逆变器输入端直流电压便会慢慢上升, 起动即能完成。当然, 在起动过程中, 随着负载变化, 他激触发频率也应作相应改变, 否则起动就不易成功。这种方式的优点是起动方便, 较易成功, 即使失败, 也不致引起大的冲击电流, 因为电压是从零开始逐渐升高的。

2. 逆变电路起动失败原因分析

实际中, 有很多因素引起逆变起动的失败, 主要有以下几个方面:

(1) 起动电路能量不够

起动的初始阶段, 负载电路依靠电容 C_S 的储能。电容 C_S 的储能较小, 负载电压减幅振荡。导致超前信号电路的输入信号太弱而无输出脉冲, 起动失败。可以适当增加电容 C_S 的值和提高 U_{DO} 。

(2) 直流端能量补充太慢

直流侧串联有大电感 L_d , 起动时电流的增长速度比较缓慢。不能对逆变电路及时输送足够的能量。导致起动失败。

(3) 逆变桥换相失败

带重负载起动时, 由于电压低、电流大、叠流期延长而使晶闸管无法关断, 换相失败而导致无法起动。为了防止这种情况发生, 可以采用 t_β 自动调节的方式。起动时自动调节 t_β 的给定值。

【选学内容】:

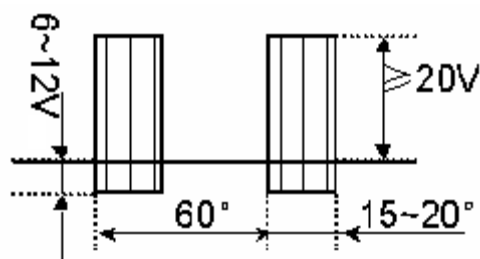
一、中频感应加热装置的调试

中频感应加热装置的调试是安装完以后使用以前的必不可少的一项工作, 调试时对调试者要求熟练掌握加热装置的工作原理, 能在调试过程中, 对异常现象及时准确处理。防止损坏设备和出现人身安全事故。调试大概分为整流电路、逆变电路部分调试, 下面分别介绍:

1. 整流电路的调试

整流电路的调试可以分为三部分: (1) 整流控制电路调试; (2) 整流部分小功率调试; (3) 整流部分大功率调试。

调试需准备的工具: 一台 20M 示波器, 若示波器的电源线是三芯插头时, 注意“地线”千万不能接, 示波器外壳对地需绝缘, 仅使用一踪探头, 示波器的 X 轴、Y 轴均需校准。若无高压示波器探头, 应用电阻做一个分压器, 以适应 600V 电压的测量。一个 $\leq 500\ \Omega$ 、 $\geq 500W$ 的电阻性负载。



5-43 整流电路输出脉冲波形

调试前，先把平波电抗器的一端断开或断开逆变电路末级的输出线，使逆变桥晶闸管无触发脉冲。在整流桥输出端接入一个约 1~2KW 的电阻性负载。控制板上的激磁 微调电位器顺时针旋至灵敏最高端，调试过程中发生短路时，可以提供过流保护。控制板上的电源开关均拨在 ON 位置。用示波器做好测量整流桥输出直流电压波形的准备，把面板上的“给定”电位器逆时针旋到最小。

(1) 整流控制电路调试

断开主交吸合线圈，使整流主回路无法受电，接通控制电源。断开中间继电器常闭触点图处的任意一根线，解除整流继电器封锁。旋转功率调节电位器，用示波器观察 6 路功放输出脉冲波形，其波形应符合图 5-43 要求：该脉冲为双窄列脉冲，窄脉冲宽度为 $15^\circ \sim 20^\circ$ ，（内含 2~4 个列脉冲），正峰大于 20V，反峰在 6~12V 之间，前沿间隔 60° ，前沿陡度 $90^\circ \sim 120^\circ$ 。各路脉冲应干净、整齐、没有杂波，将功率调节电位器在最大值与最小值之间来回转动，功放脉冲应左右移动，在移动过程中，前沿间隔应保持 60° 。检查整流晶闸管上的脉冲，脉冲形状同上图，脉冲必须为正极性。正峰幅值大于 4V，主板功放脉冲必须与指定的晶闸管号一一对应。

(2) 整流部分小功率调试

送上三相电源（可以不分相序），检查是否有缺相报警指示，若有，可以检查进线电压是否缺相。把面板上的“给定”电位器顺时针旋大，直流电压波形应该几乎全放开。再把“给定”电位器旋到最小，调节电路板上微调电位器，使电流电压波形全关闭，移相角约 120° 。输出直流波形在整个移相范围内应该是连续平滑的。接线如图 5-44 所示：

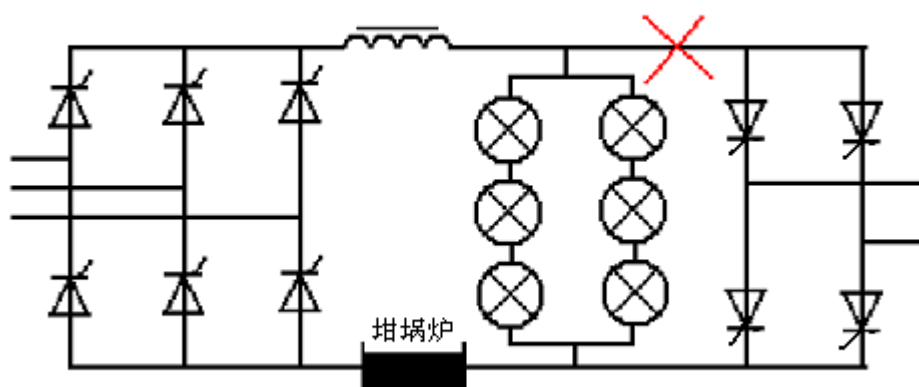


图 5-44 小功率调试接线图

(3) 整流部分大功率调试

将上图中的灯泡换成 $0.5\sim 2\Omega$ 大功率电阻, (具体值有设备的容量决定) 除掉电路的保险丝, 恢复三相主电路。电路如图 5-45 所示。

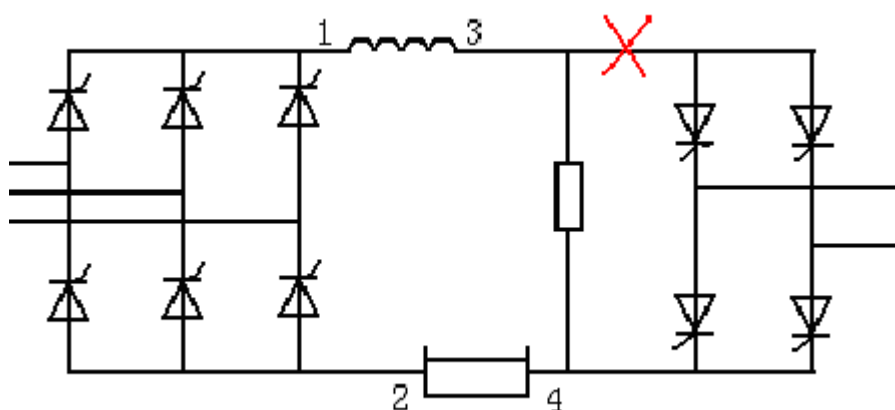


图 5-45 大功率调试接线图

1) 将直流电路电流调到 $50\sim 100\text{A}$, 测量电流, 电压互感器的输出是否正常。检查电阻两端的电压波形, 该波形为整流电路输出波形, 波形大小整齐, 无毛刺干扰波形。

2) 整定负偏置: 将直流输出电压调节为 $1/2$ 额定电流的大小, 调整过电流保护旋钮, 使过电流保护装置动作。此时的电压应该为负值, 若为正值, 应该调节偏置电位器, 使其为负值。再将功率电位器调到最大值。使直流负的电压达到最大值, 然后就锁定不动。否则可能烧坏快速熔断器或晶闸管等元件。

3) 过流负偏置调整完以后, 继续加大电流到 1.2 倍额定电流, 调整过流保护电位器, 使其动作两次。使过流值稳定, 过电流整定完毕。

2. 逆变部分的调试

首先应校准频率表。用示波器测逆变触发脉冲的它激频率 (它激频率可以通过频率电位器来调节), 调节频率表的微调电位器, 使频率表的读数与测得的值一致。

起振逆变器。调节控制板上的频率微调电位器，使其略高于槽路的谐振频率，它激、自激微调电位器旋在中间位置。把面板上的“给定”电位器顺时针稍微旋大，这时它激频率开始扫描，逆变桥进入工作状态，当起动成功后，控制板上电压指示灯会熄灭。可以把给定电位器旋大、旋小反复操作，这样它激信号也反复扫描。若不起振可调整中频变压器的相位。此步骤的调试，亦可使控制板的 2、3 路电源开关处于 OFF 位置，此时加上了重复起动功能，电压环也投入工作。

逆变起振后，可进行逆变引前角的整定工作，把逆变电源控制开关打在 ON 位置，调节中频电压微调电位器，使中频电压与直流电压比为 1.2 左右。再把逆变电源控制开关打在 OFF 位置，调节中频电压微调电位器，使中频电压与直流电压的比为 1.5 左右（或更高），此项调试工作可在较低的中频电压下进行。注意：必须先调 1.2 倍关系，再调 1.5 倍关系，否则顺序反了，会出现互相牵扯的问题。

在轻负载下整定电压外环。控制板上的电源开关 3 开关拨在 OFF 位置，中频电压微调电位器顺时针旋至最大，把“给定”电位器顺时针旋大，逆变桥工作。继续把“给定”电位器顺时针旋至最大，逆时针调节中频电压微调电位器，使输出的中频电压达到额定值。在这项调试中，可见到阻抗调节器起作用的现象，即直流电压不再上升，而中频电压却能继续随“给定”电位器的旋大而上升。

具体调试步骤如下：

(1) 逆变控制电路的调试

断电检查逆变晶闸管和 RC 吸收回路的是否正常、可靠，接线有无错误。调频输入回路和负载回路是否正常。如果一切正常，将功率假负载按图 5-46 接线。

这样可以限制逆变失败或短路电流的蔓延。确保调试的安全。防止损坏晶闸管元件。

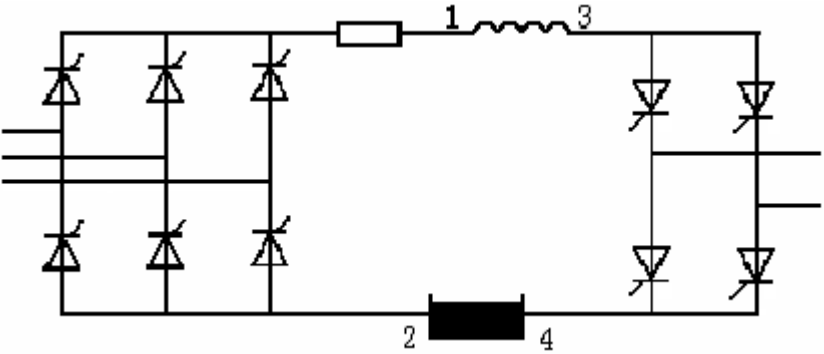


图 5-46 逆变电路调试主电路接线图

(2) 逆变脉冲的检查

断开主交线圈的接线，利用工频变压器的多余的一组 5V 电压，送到逆变的输入端作为检测信号，用示波器观察脉冲波形，应该如图 5-47 所示：

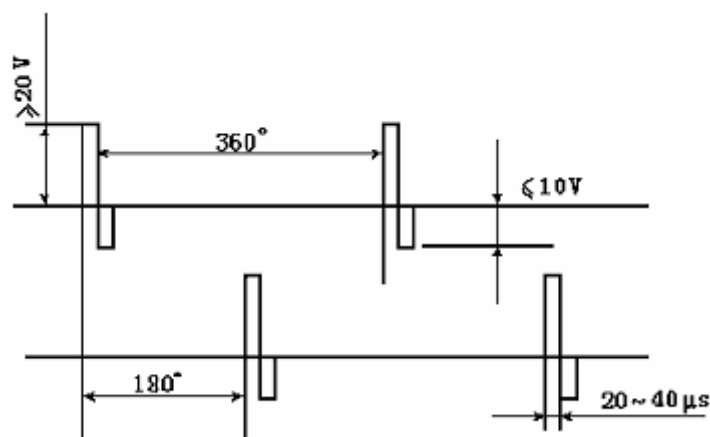
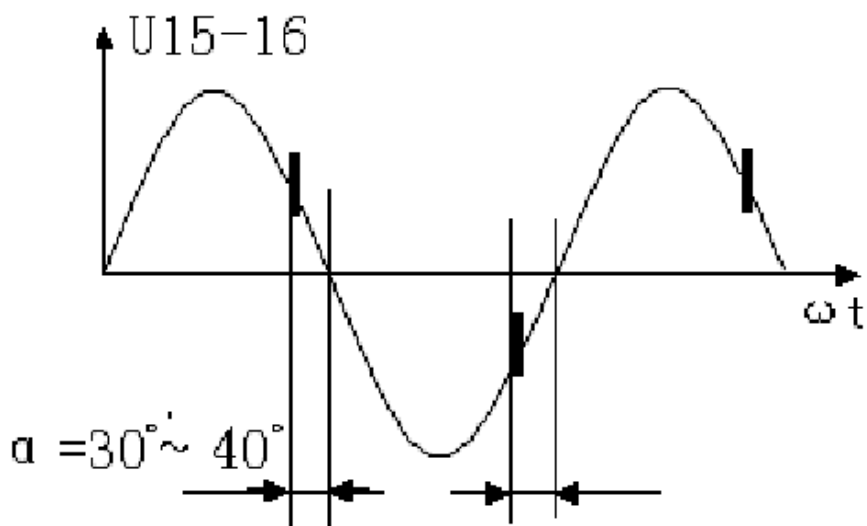


图 5-47 逆变电路输出脉冲波形

检查逆变晶闸管的脉冲，幅值应该大于 4V，前沿的陡堵为 90° - 120° ，全部的脉冲应该整齐，没有毛刺干扰。在主板取下一组接线，检查另一组的脉冲是否与晶闸管一一对应。两通道的脉冲不能串扰。确认逆变脉冲正常后。恢复主交线圈，拆除检测输入信号，准备逆变运行调试。

(3) 逆变电路小功率调试

把功率电位器调到最小位置，接通控制电源和按下主交“逆变接通”按钮，小心旋转控制电位器按钮。使直流输出电流在 100A 左右。用示波器观察逆变输出波形，如果出现波形，波形应如图 5-48 所示：



在

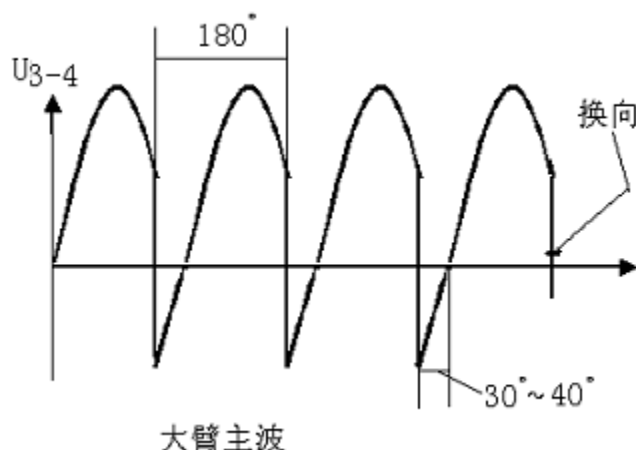
图 5-48 逆变

电路输出波形图

逆变输出的波形中，半个周波有一个缺口，这个缺口称为换相点。换相点一定要出现在顶点的右边，不能出现在顶点的左边或顶点的位置。如果出现在顶点的左边，说明电流或电压的反馈量的极性接错。这样很容易烧坏晶闸管。调试的时候一定要注意。一旦出现这种情况，应立即停机并且改变反馈量的极性。（反馈量的极性接错，一般是启不动）。控制角 α 一般选在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 之间，如果控制角 α 太小，给晶闸管的关断时间太小，可能造成逆变

的失败。如果控制角 α 太大，晶闸管所承受的 di/dt 太大，也可能造成损坏晶闸管。所以控制角 α 一定要选择适当，控制角 α 一般选在 $30^\circ \sim 40^\circ$ 之间为最好。确定逆变波形正常以后，提高电压到 300V，观察各电压、电流表的读数是否正常。试运行 5 分钟以后，停机检查 RC 吸收回路，此时的电阻 R 应该有点发热。

(4) 重载起动试验



确认上述情况正常以后，再次开机，用示波器观察逆变的输入波形，正确的波形应该如图 5-49 所示：

图 5-49 大臂主波波形

大臂波形很重要，调试者应该认真观察，波形应该整齐一致、波形光滑、稳定可靠，没有抖动和毛刺干扰。换相点应该在同一水平线。只有确认大臂波形正常以后，才可以进行重载起动试验。

将坩埚炉放于炉中，起动逆变装置。进一步观察中频波形和大臂波形。特别注意起动时候的控制角 α 的变化，此时，换相点向过零点移动，会造成控制角 α 变小。此时应电流分量，否则可能会造成起不动或逆变失败。重复进行重载起动试验，成功率在 95% 以上，才可以进行以下操作：

过电压、截压整定，拆除大功率负载，将坩埚取出。放入少量炉料进行试运行。将中频电压升高到 780V 左右。调整过电压电位器使过电压保护装置动作。确认保护装置正常以后，再次起动，使装置在 750V 电压做截压运行 30 分钟。如果一切正常可以进行以下操作。

(5) 试运行调试

再次将坩埚放入炉内。放开截流保护，重新启动，将直流电流拉到过电流保护值。其过电流保护值应该接近整定的过电流保护值。将功率电位器调到零位。按故障解除按钮，重新启动逆变电路，将直流电流拉到过电流保护值，在整定截流保护值到原来值。一切正常，按正常生产工艺加工一炉。在运行过程中，密切注意表的读数，电抗器的响声。中频声。密切注意大臂波形。中频突然加料时，应该运行稳定可靠。

二、中频感应加热装置的常见故障处理

晶闸管中频电源设备，因为电路的特点和设备运行的需要，与工频电源设备的安装相

比较，有一些特殊之处。因此，在安装之前，工作者一定要仔细阅读产品说明书，并注意其安装要点。以下几点更是必须加以特别注意的。

1. 安装注意事项

(1) 主电路对地绝缘问题

设备电源直接取自三相工频电网，没有变压器隔离，主电路中的各点对地都必须确保有足够的绝缘，当我们外接测量仪表仪器时，这一点也是至关重要的。例如，用示波器测量主电路，滤波器外壳与测量探头的地线是相通的。如果通入示波器的电源不采用隔离变压器隔离，测量时就会造成短路事故。尤其容易受到忽视的是补偿电容的绝缘问题。补偿电容外壳也是带电部分，不能接地。否则也会造成短路，危及设备安全。

(2) 中频电源的布置问题

中频电流与工频电流相比频率高得多，输电线的感抗较大。在电流很大时，感抗压降相当可观，对其工作影响很大，中频电流的邻近效应很明显。所以中频电源线的布置应本着两线间距要尽量小，线的长度要尽量短，反馈电铜排要立着这三条原则。

中频输电线相当于匝数为 1 的电感线圈，要减小其电感，必须减小两根导线所包围的面积。所以输电线要尽量短，距离要尽量小。尤其是振荡回路的无功电流很大。甚至达到中频电源输出电流的十倍以上。所产生的感抗压降是很可观的。所以，安装时要特别注意使用使补偿电容尽量靠近感应电炉。

由于邻近效应的结果，中频输电线的电流集中于其内表面。水平放置的馈电铜有效导电面积大大小于竖直安放的铜排，导线电阻大，电流密度高，将会引起损耗增大和导线过热。所以，尤其是振荡回路的馈电线，不但不宜用圆导线，而且要尽量采用宽一些但不必太厚的铜排垂直安装。

(3) 冷却系统的安装考虑

中频感应装置晶闸管、补偿电容、感应电炉都是采用水冷的方式。为保证充分的冷却，设备中装有水压继电器进行保护。可是，如果说发生水冷管道堵塞现象，虽然水压很高，冷却效果就很差了。因此，冷却水应从明水漏斗流出，以随时检查水流流量及水压。

(4) 设备抗干扰的考虑

设备里最敏感、易受干扰的部分是逆变自动调频的信号部分。它的误动作意味着逆变晶闸管的误导通，会造成直流短路。而中频电压互感器和中频电流互感器安装位置往往离控制柜甚远。信号传输线较长，因此最好采用屏蔽线，这两根信号线则应绞在一起，远离电源线。以减少干扰。

2. 中频感应装置运行前检查

晶闸管中频电源安装完毕后，必须进行认真的检查、调试才能投入使用。检查主要包括以下几方面：1) 外观检查；2) 器件检查；3) 控制系统检查；4) 主电路通电检查；5) 负载试运行。

(1) 外观检查

设备的外观检查，除了对导线的连接正确与否和电源相序以及设备外部形态进行检查外，还应特别注意一些焊接线有无脱落、接线端正排联结螺钉有无松动、有无碎片铁断线造成电容器外壳碰地、导电沟及电缆坑中是否有金属杂物。另外，还要注意电容器有无鼓胀、漏油现象。接通冷却水系统，检查水压是否合乎要求，水路各接头有无漏水现象，是否每股冷却水路都畅通等。

(2) 器件检查

设备器件检查的内容主要是检查主电路的晶闸及阻容保护。对晶闸管导通性能的检查可以采用简易电路进行检查。

(3) 控制系统检查

控制系统的检查可以按照以下的顺序进行：①稳压电源的检查；②整流触发脉冲（脉冲宽度、移相范围、触发能力）的检查；③过电流、过电压保护电路的检查；④截流截压电路的检查；⑤逆变触发脉冲的检查；⑥起动波形的检查；⑦继电器控制电路的检查。

①稳压电源的检查 检查控制系统之前，应注意工频电网电压不得大于 420V，不得小于 340V。然后，合上设备总电源开关，再合上控制电源开关，这时，从印制电路板箱的仪表上可读得各电压数值，它们应当是：

偏移电压（V1）6~7V，充电电压（V2）25~26V，整流触发电压（V3）20V，逆变触发电压 20V。

②脉冲宽度的检查：本设备的整流触采用宽脉冲，检查脉冲的宽度是很重要的一项重要内容，在没有示波器的情况下，使用万用表也可以检查脉冲的宽度。脉冲变压器一次侧输出一个周期的宽度是四分之一。因此，万用表上测得的一次侧脉冲电压为 $18V/4=4.5V$ 左右时，脉冲的宽度是合适的，如果某一触发的脉冲宽度不对，可调节脉宽电位器，使其达到要求。

③脉冲移相范围的检查：手动合上起动接触器，调节给定电位器 RP，当 RP 旋到电低电压位置时，整流器应输出零电压，对应的触发角 $\alpha=90^\circ$ 。从而可知，晶体管 V2 和每个周期导电时间约为 120° ，占总时间的 $1/3$ ，万用表在 R6 上量得的压降应为 $20V/3=6.6V$ 。当电位器 RP 调到最大电压位置时，整流器输出最大电压，对应的触发电压就为 $3/4*20V=15V$ 。如果 150° 逆变时的移相角不对，可调节偏移电压来达到。如果调节 RP 时移相范围不对，则可调节的电位器同步电位器、偏置电位器达到。首先，将 RP 触点调到最低点，对应于零电压输出，调偏置电位器 RP3 使之达到 $\alpha=90^\circ$ ，然后，将 RP 触点调到最高点，对应于最高电压输出，调偏置电位器的微调使之达到 $\alpha=0^\circ$ 。

④脉冲触发晶闸管的能力：脉冲能否触发晶闸管与脉冲是否送到了晶闸管有关，也与晶闸管性能是否正常有关。我们只须利用简易电路来检查晶闸管是否导通即可（不用其触发信号）。当 9V 电源正向加在晶闸管上时，晶闸管会因触发电路送来的脉冲而导通，电珠

发亮。注意此时主电路接触器切不可合闸送电。

⑤过电压、过电流保护电路的检查:是利用模拟过电流、过电压信号加入保护电路,检查其“拉逆变”的保护能力并整定保护电路的动作参数。

⑥截流截压电路的检查:截流截压电路的检查,是通过将模拟电流,电压信号加入电路,检查其截流截压能力,并初步整定截流电路的动作参数来进行的,而截流能力则是通过观察电流、电压信号使触发延迟均匀移相来实现的。与过电流过电压电路的检查方法相类似的主电路中过流继电器的常闭点仍用纸片隔开,利用自耦调压器串联合适的电阻向上方的输入端加入模拟信号。调节给定电位器 RP1,使电流达到 0.6A,触发延迟角相位开始前移,当电流从 0.6A 变化到 1.2A 时,移相角应大于 30° ,即 R6 的电压降幅度应在 1.7V 以上。当电压信号从右下方电压输入端加入时,调节中频电电位器,使电压达到 24V 时,触发延迟角相位开始前移,当电压从 24V 变化到 5V 时,移相角应大于 30° ,与过电流过电压保护电路的检查一样,试验时应将有关电流互感器、电压互感器的拆除。

⑦逆变触发脉冲的检查:逆变触发的输入信号来自负载电路,由于负载电路尚未起动,不能工作于自动调频状态,这时对逆变触发电路的检查仅仅是判断脉冲形成和逆变触发两个电路能不能正常工作,其输出脉冲能不能触发逆变晶闸管。

将 1000Hz 振荡器接通电源,仔细一些可以听到振荡器工作的尖叫声,将脉冲电路的转换开关倒向“他激”位置,1000Hz 信号送入脉冲输出可从两个方面来判断。第一,逆变稳压电源的电流表的读数明显增大,第二,利用万用表的毫伏档,在逆变脉冲变压器上可以测出逆变触发脉冲的有无。

⑧继电器控制电路的检查:继电器控制电路的检查,是根据产品使用说明书及电路原理图,检查它们的动作顺序,联锁关系是否正确,尤其要检查水压继电器在欠水压时的保护动作是否可靠。中频电压继电器的动作要在试车时才能检查,此时可按动使闭合。以检查其联锁关系是否正常。检查有无外部连线错误、连线松动、接触器不良等现象。

(5) 主电路通电检查

主电路通电检查主要是针对整流电路而言。对于逆变电路,因为它工作于振荡状态,不可能接模拟负载,因而对它的通电检查只能放在负载运行中进行。整流电路的检查是以电阻作模拟负载进行的。它分为电压试验和电流试验两项内容。

①电压试验 电压试验时,将逆变电路从主电路中断开,在主回路的引流电阻 RP 上加串 300Ω 、1A 的电阻作为整流电路的负载。按下按钮起动按钮,使主接触器接通交流电网,用纸片隔开过流继电器的常闭点,电压给定电位器 RP 能调节整流电压从低到高均匀变化。并能达到满电压输出,这一试验是在通电的条件下检查整流器的移相控制功能。

②电流试验 仍能断开逆变器,以 1Ω 生铁电阻作主回路的模拟负载,生铁电阻应浸入水中进行水冷,并注意到此负载对地的绝缘。接通整流电路之前,首先要接上冷却水,以保证晶闸管整流电路的可靠冷却,慢慢调节给定 RP,使 U_d 逐渐上升。注意检查滤波电

抗此时有无异常的不规则的响声和振动。并在整流器实际电流 $I_d=300A$ 的数值下整定电流保护动作。截流电流的数值应接上 2Ω 水冷电阻，并使 U_d 在 $500V$ 左右时调节过流电位器进行整定，其动作值为 $I_d=250A$ 。

(6) 负载运行

负载试运行包括逆变回路空载起动，逆变回路重新起动和实际负载运行三项内容，其实验方法如下：

①逆变回路空载运行 这项试验在感应炉空炉的情况下进行，起动时，调直流电压为 $200\sim 400V$ ，如果起动时立即出现过电流保护动作，应考虑到：1) 功率因数电位计是否调节器到了最低位置；2) 起动电路的电流、电压极性是否正确，并通过空载实验，检查中频建立继电器是否动作正确。此时，在连续 10 次起动无误后，按中频工况调节电压电位器 RP2 将过电压保护动作值整定到 $825V$ ，截压动作整定到 $750V$ 。

②逆变回路满载起动时，此时，在感应炉内放置坩埚钢模作重模拟负载进行起动。起动时，调直流电压至 $200\sim 400V$ ，反复起动 10 次，允许起动失败一次，然后，按中频工况整定过电流、截流值。过电流动作值整定在 $300A$ ，截流值整定在 $250A$ 。

③实际负载试验 上述实验完成后，在感应炉内可装些棒料进行实际负载运行。首先，要对新筑的炉衬进行长时间的烘炉，以延长使用寿命，并考虑系统的工作性能，然后，调电压，使中频功率达到 $100KW$ ，经过 $30min$ 试运行后，即可继续加料进行正式运行。

(7) 补充说明

设备在检查、调试和投入运行时，尚有以下两个问题需要加以补充说明。

各稳压电源电流表读数的辅助判断功能 设备正常运行时，各稳压电源的电流表读数也有一定的范围。它们应当是：

偏移电流 (A1)	$10\sim 20mA$
充电电流 (A2)	$20\sim 40\text{ mA}$
整流触发电流 (A3)	$1\sim 1.3A$
逆变触发电流 (A4)	$100\sim 300\text{ mA}$

逆变电路开始工作后，逆变触发电流增加到上述数值。在加热过程中，随着负载参数的变化，电路工作频率发生变化，逆变触发电流也会随着发生变化。例如，当频率升高时，每处逆变触发电路的发生的脉冲数增加，逆变触发电流的数值也会加大。

3. 常见故障分析

通过晶闸管中频电源装置的常见故障现象，介绍设备的故障分析方法：

(1) 无整流电压

当工频电压已加在设备上，起动时无整流输出电压，其原因往往存在于控制电路中，根据电路的工作原理可以知道，产生整流输出电压的条件是整流晶闸管上有移相触发脉冲，其相位应移到 $\alpha=0^\circ\sim 90^\circ$ 之间。由于整流晶闸管与触发器有关，而触发器是由五块

芯片组装而成的，脉冲的形成是由 KJ004 完成的，KJ004 不可能同时的损坏。例如，没有整流触发电流，触发脉冲不能移相等，这往往是给定电压被钳位在零电压附近所造成的。当电位器 RVH、RP，继电器 K1 不动作，晶闸管 VT3 被击穿和晶闸管 VT2、VT1 被击穿而使 VT3 导通时，都可能产生这样的故障，而 K1 不动作的原因除继电器损坏外，水压继电器没有动作，KM1 联锁触头不好等都可能是原因，工作者可逐一进行检查分析。

（2）整流电压调不高

整流电压调不高的结果是系统输出功率低，严重时还会造成晶闸管损坏，所以发生此故障时要立即停止运行。检查故障原因，切不可勉强继续工作。

当外加工频电源正常时，整流器六个桥臂晶闸管都轮流导电，触发脉冲移相到 $\alpha = 0^\circ$ 时，整流电压还未达到满电压。整流电压调不高，一定是上述几个条件没有同时得到满足。

1) 当有晶闸管开路或快速熔断器烧断时，整流电压调不高。若此时仍在额定电流下工作，其它几个桥臂的电流负担过大，对器件寿命不利。

2) 移相脉冲触发延迟角调不到 $\alpha = 0^\circ$ ，整流输出电压调不高，若电压给定电位器调正确的话，则往往是截流截压电路产生了输出，使 α 角移不到零度，所以电压调不高。截流截压电位器整定值太低，会产生负载时电压调不高的现象。若空载时电压都调不高，则有可能是截流截压电路有元器件的损坏及焊点不良所致。例如晶体管直通，穿透电流太大等，都可能产生这样的故障。

3) 某一臂晶闸管触发电路故障，或晶闸管性能变劣而不能触发导通，也会造成输出电压调不高。这可以通过检查触发电路是否有合适的脉冲输出，此脉冲是否送到晶闸管上，晶闸管是否能导通来判断。

（3）整流电路不稳定

整流电压不稳定的现象表现为直流电压表不规则地摆动，这往往与不规则因素的影响有关。例如。空载时直流电压表就发生了不规则的摆动，其原因可能是触发电路虚焊。使晶闸管通电不通而造成的。如空载时直流电压表不发生摆动。逆变器工作后出现电压不稳定现象则往往是中频的干扰造成使整流晶闸管中高频电压作用下发生正向转折是负载时电压不稳定的一个重要原因。无论是什么原因造成整流电压缺相、不平衡时，往往伴有电抗器 L 发生振动和很大杂音现象。

（4）逆变电路无法起动

设备投入运行的关键性一步，在于逆变起动成功，逆变电路无法起动这一现象，在设备故障中占有很大的比例，一般逆变起动失败的故障现象主要有：逆变电路电表无反应，整流电压正常；逆变电路有瞬时反应，电流发生过电流保护动作。整流电压降到零；逆变电路有瞬时反应，过电压保护作用，整流电压降到零。下面分别讨论其原因：

1) 起动时逆变电路电表无反应，整流电压正常。根据前面的分析可知，逆变起动时首先由起动晶闸管反起动电容 CQ 预先充好的电压投入负载回路，引起第一个振荡，现

由自动调频装置检测这个振荡，并发生信号触发逆变晶闸管。若逆变电路无反应，则可能是：起动电路没有动作；CQ 电压太低甚至为零，没有开成足够强烈的第一次振荡，自动调频电路检测不到这个振荡；自动调频电路故障，无逆变触发脉冲输出；形成了第一次振荡，逆变晶闸管也已导通，但整流电路能量补充不足，振荡减幅最终停止。下面分别讨论上列原因：

①起动电路没有动作，其故障原因有继电器电路的原因，起动电路元器件的原因，可分别进行检查；

②产生 CQ 电压太低甚至为零的原因，与 KM2 触点接触不好，整流二极管损坏等因素有关，可以用万用表进行检查；如果电容 CQ 充电足够，但检测不到起动时的衰减振荡波，则与主回路短路有关。应检查有无金属掉在输电铜母线之上，有无电容发生了击穿，感应炉是否因泄漏造成感应圈短路等；

③自动调频电路的故障可用 1000Hz 他激电源进行检查，若他激工作正常，则应检查自动调频信号的传输线有无断线，接触是否良好等现象；

④整流电路与逆变电路之间接有滤波电感，限制了整流输出能量的增长速度。为满足起动时逆变电路对能量补充的需要，滤波电感之后接有引流电阻 RP，若此电阻开路，则整流电路在起振时能量输出太小，中频振荡因能量补充不足而逐渐衰减到零。

2) 起动时逆变电路电表有瞬时反就应，随后电路发生过电流保护动作，逆变电路电表有瞬时反应，说明电路的中频电压已短时建立，但电路中有故障，故发生了过电流保护动作。产生这种现象原因不在于逆变起动电路，而在于起动以后振荡不能维持，可能由下列情况引起：电路中的不完全短路；过电流保护动作整定值或截流动作整定值过低；一臂逆变晶闸管不导通；起动时 T 太小；存在干扰时，都会发生上述现象。下面分别讨论上列原因：

①主电路不完全短路时，起动和第一次振荡能够产生，但随着振荡电压的增加，不完全短路点会击穿而变成完全短路，产生大电流，过电流保护动作，这往往与主电路对地绝缘不好有关；

②起动逆变电路时，起动电流比较大，如果截流动作整定值太低，整流电路因截流作用而使电压降低，输往逆变电路的能量不足发补充电路损耗，起动失败，逆变晶闸管没有关断时，保护装置在起动电流的作用下出现保护动作，电路无法起动，这种情况往往在重载起动时；

③一臂逆变晶闸管不导通时，相当于功率因数很低的工作情况，起动电流也很大，产生过电流保护动作。这种现象可通过检查逆变晶闸管的导通情况来判断。并可根据逆变电源输出电流的大小来辅助分析。当此电流仅为正常值一半时，可断定逆变触发电路有半边电路无脉冲输；

④起动时间 T 不够也会引起逆变电路短路。起动时，电流很大，故换流时间 t_r 较长，

因此需要增加 t_r ，以保证足够的晶闸管关断时间，如果起动未将调功率因数的电位器 RV 调到最大电阻位置，而使 T 增加不够，则可能由于逆变晶闸管换流时未能恢复反向阻断特性而误导通，也会产生短路；

⑤存在干扰，也是起动失败的原因之一，为了增加系统的干扰力，脉冲形成电路接入电容 C3、C4，在实际应用中，若干扰太大，可将这两个电容值适当的增加，并考虑自动调频信号线采用屏蔽线。起动时发生过电压保护动作，有时压敏电阻和阻容电路有火花产生，进行逆变保护时发生过电压保护动作，这种现象说明了电路发生了严重的过电压，逆变电路的电压无法释放，经滤波电抗进入整流电路，使压敏电阻上的电压很大，起动时整流电压很低。若感应电炉接在电路上，系统是会发生这种现象的。若感应电炉短路，负载电路只存在电容。起动电容向负载投入电能后，电路不发生振荡，若逆变晶闸管在被触发，滤波电感中的能量再向电容充电，势必产生高电压，引起过电压保护动作，并造成整流电路硒片的过电压击穿。另外，逆变主电路发生短路时，也可能出现阻容放电的现象。

【扩展内容】:

一、三相有源逆变电路

常用的有源逆变电路，除单相全控桥电路外，还有三相半波和三相全控桥电路等。三相有源变电路中，变流装置的输出电压与控制角 α 之间的关系仍与整流状态时相同，即

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha$$

逆变时 $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ ，使 $U_d < 0$ 。

1. 三相半波有源逆变电路

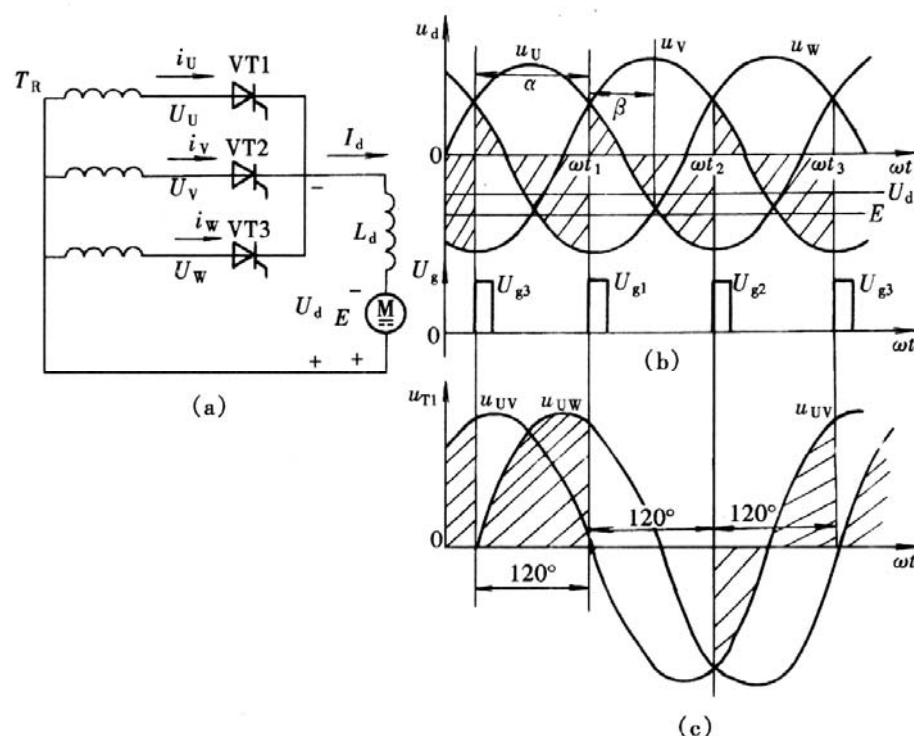


图 5-50 三相半波有源逆变电路

(a) 电路 (b) 输出电压波形 (c) 晶闸管两端电压波形

图 5-50 所示为三相半波有源逆变电路。电路中电动机产生的电动势 E 为上负下正，令控制角 $\alpha > 90^\circ$ ，以使 U_d 为上负下正，且满足 $|E| > |U_d|$ ，则电路符合有源逆变的条件，可实现有源逆变。逆变器输出直流电压 U_d (U_d 的方向仍按整流状态时的规定，从上至下为 U_d 的正方向) 的计算式为：

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha = -U_{d0} \cos \beta = -1.17 U_2 \cos \beta \quad (\alpha > 90^\circ)$$

式中， U_d 为负值，即 U_d 的极性与整流状态时相反。输出直流电流平均值为

$$I_d = \frac{E - U_d}{R_\Sigma}$$

式中， R_Σ 为回路的总电阻。电流从 E 的正极流出，流入 U_d 的正端，即 E 端输出电能，经过晶闸管装置将电能送给电网。

下面以 $\beta = 60^\circ$ 为例对其工作过程作一分析。在 $\beta = 60^\circ$ 时，即 ωt_1 时刻触发脉冲 U_{g1} 触发晶闸管 VT1 导通。即使 u_U 相电压为零或负值，但由于有电动势 E 的作用，VT1 仍可能承受正压而导通。则电动势 E 提供能量，有电流 I_d 流过晶闸管 VT1，输出电压波形 $u_d = u_u$ 。然后，与整流时一样，按电源相序每隔 120° 依次轮流触发相应的晶闸管使之导通，同时关断前面导通的晶闸管，实现依次换相，每个晶闸管导通 120° 。输出电压 u_d 的波形如图 5-50 (b) 所示，其直流平均电压 U_d 为负值，数值小于电动势 E 。

图 5-50 (c) 中画出了晶闸管 VT1 两端电压 u_{T1} 的波形。在一个电源周期内，VT1 导通 120° 角，导通期间其端电压为零，随后的 120° 内是 VT2 导通，VT1 关断，VT1 承受线电压 u_{UV} ，再后的 120° 内是 VT3 导通，VT1 承受线电压 u_{UW} 。由端电压波形可见，逆变时晶闸管两端电压波形的正面积总是大于负面积，而整流时则相反，正面积总是小于负面积。只有 $\alpha = \beta$ 时，正负面积才相等。

下面以 VT1 换相到 VT2 为例，简单说明一下图中晶闸管换相的过程。在 VT1 导通时，到 ωt_2 时刻触发 VT2，则 VT2 导通，与此同时使 VT1 承受 U、V 两相间的线电压 u_{UV} 。由于 $u_{UV} < 0$ 。故 VT1 承受反向电压而被迫关断，完成了 VT1 向 VT2 的换相过程。其它管的换相可由此类推。

2. 三相全控桥有源逆变电路

图 5-51 所示为三相全控桥带电动机负载的电路，当 $\alpha < 90^\circ$ 时，电路工作在整流状态，当 $\alpha > 90^\circ$ 时，电路工作在逆变状态。两种状态除 α 角的范围不同外，晶闸管的控制过程是

一样的,即都要求每隔 60° 依次轮流触发晶闸管使其导通 120° ,触发脉冲都必须是宽脉冲或双窄脉冲。逆变时输出直流电压的计算式为

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha = -U_{d0} \cos \beta = -2.34 U_2 \cos \beta \quad (\alpha > 90^\circ)$$

图 5-51 为 $\beta=30^\circ$ 时三相全控桥直流输出电压 u_d 的波形。共阴极组晶闸管 VT1、VT3、VT5 分别在脉冲 U_{g1} 、 U_{g3} 、 U_{g5} 触发时换流,由阳极电位低的管子导通换到阳极电位高的管子导通,因此相电压波形在触发时上跳;共阳极组晶闸管 VT2、VT4、VT6 分别在脉冲 U_{g2} 、 U_{g4} 、 U_{g6} 触发时换流,由阴极电位高的管子导通换到阴极电位低的管子导通,因此在触发时相电压波形下跳。晶闸管两端电压波形与三相半波有源逆变电路相同。

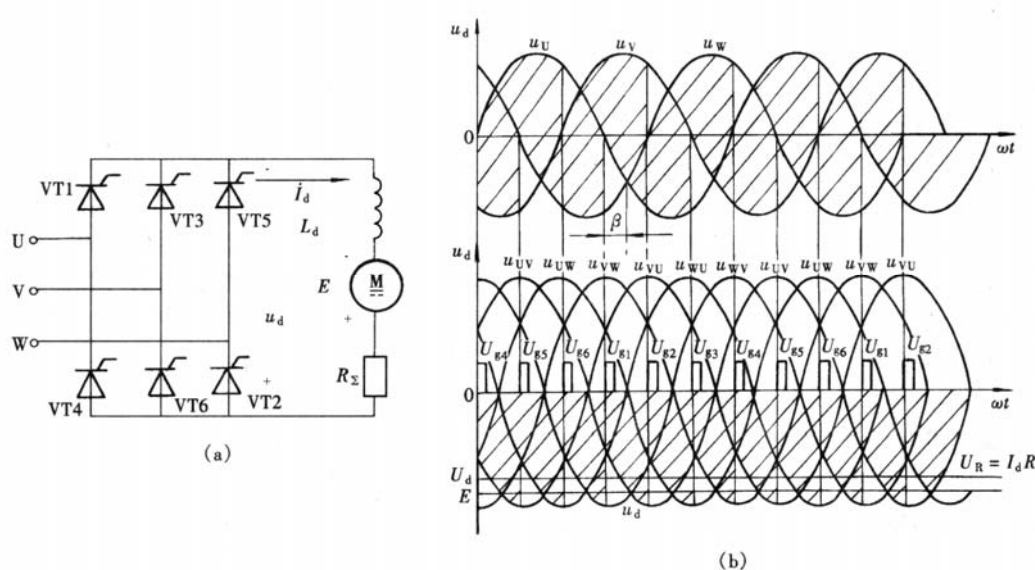


图 5-43 三相全控桥式有源逆变电路

(a) 电路 (b) $\beta=30^\circ$ 时三相全控桥直流输出电压波形

下面再分析一下晶闸管的换流过程。设触发方式为双窄脉冲方式。在 VT5、VT6 导通期间,发 U_{g1} 、 U_{g6} 脉冲,则 VT6 继续导通,而 VT1 在被触发之前,由于 VT5 处于导通状态,已使其承受正向电压 u_{uw} ,所以一旦触发,VT1 即可导通,若不考虑换相重叠的影响,当 VT1 导通之后,VT5 就会因承受反向电压 u_{wu} 而关断,从而完成了从 VT5 到 VT1 的换流过程,其它管的换流过程可由此类推。

应当指出,传统的有源逆变电路开关元件通常采用普通晶闸管,但近年来出现的可关断晶闸管既具有普通晶闸管的优点,又具有自关断能力,工作频率也高,因此在逆变电路中很有可能取代普通晶闸管。

二、有源逆变电路的应用

有源逆变电路有较多的应用领域，常见的有直流电机可逆拖动、绕线式交流异步电动机串级调速以及高压直流输电等方面。在这里对此加以介绍。

1. 晶闸管直流电动机可逆拖动系统

晶闸管直流电动机可逆拖动系统是指用晶闸管变流装置控制直流电动机正反转的控制系统。很多生产设备如起重提升设备、电梯、轧钢机轧辊等均要求电动机能够正反双向运转，这就是可逆拖动问题。对于直流它励电动机来说，改变电枢两端电压的极性或改变励磁绕组两端电压的极性均可改变其运转方向，这可根据应用场合和设备容量的不同要求加以选用。这里重点介绍采用两组晶闸管变流桥反并联组成的直流电动机可逆拖动系统。

另外，按照所用晶闸管变流装置组数的不同，一般又可通过两种方法实现电动机的正反转控制：一种是采用一组晶闸管变流器给电动机供电、用接触器控制电枢电压极性的电路；另一种是采用两组晶闸管变流器反极性连接组成的可逆电路。前者虽然线路简单，价格便宜，但仅适用于要求不高、容量不大的场合，后者则可用于容量大、要求过渡过程快、动作频繁的设备。本节重点介绍后者，即采用两组晶闸管变流器的可逆电路。

两组晶闸管变流器反极性连接，有两种供电方式：一种是两组变流器由一个交流电源或一个整流变压器供电，称为反并联连接；另一种是两个变流器分别由一个整流变压器的两个二次绕组供电，或由两个整流变压器供电，称为交叉连接。两种连接方式的原理相似。这里只以反并联连接的可逆电路为例加以介绍。

为了分析直流电动机可逆系统的运转状态及其与变流器工作状态之间的关系，这里首先介绍一下电动机的四象限运行图。四象限运行图是根据直流电动机的转矩(或电流)与转速之间的关系，在平面四个象限上作出的表示电动机运行状态的图。图 5—52 所示即为反并联可逆系统的四象限运行图。从图中可以看出，第一和第三象限内电动机的转速与转矩同号，电动机在第一和第三象限分别运行在“正转电动”和“反转电动”状态，第二和第四象限内电动机的转速与转矩异号，电动机分别运行在“正转发电”和“反转发电”状态。电动机究竟能在几个象限上运行，这与其控制方式和电路结构有关。如果电动机在四个象限上都能运行，则说明电动机的控制系统功能较强。

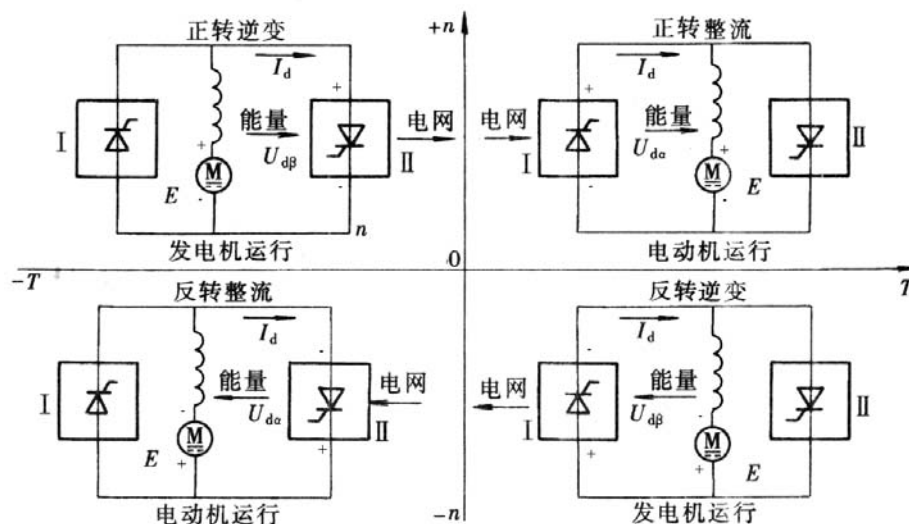


图 5-52 反并联可逆系统的四象限运行图

根据对环流的处理方法不同，反并联可逆电路又可分为几种不同的工作方式：逻辑控制无环流、配合控制有环流以及错位控制无环流工作方式等。下面对前两种方式分别加以介绍。

(1) 逻辑控制无环流可逆电路

在反并联可逆电路中，在电动机励磁磁场方向不变的前提下，由 I 组桥整流供电电动机正转，由 II 组桥整流供电电动机反转。可见，采用反并联供电可使直流电动机如图 5-52 那样运行在四个象限内。

然而必须注意，在反并联供电时，如果两组整流桥同时工作在整流状态，就会在电路中产生很大的环流。环流是只在整流变压器和两组晶闸管变流桥之间流动而不流经电动机的电流。环流一般不作有用功，环流产生的损耗可使电器元件发热，甚至还会造成短路事故，因此必须设法使变流装置不产生环流。

逻辑控制无环流可逆电路就是利用逻辑单元来控制变流器之间的切换过程，使电路在任何时间内只允许两组桥路中的一组桥路工作而另一组桥路处于阻断状态，这样在任何瞬间都不会出现两组变流桥同时导通的情况，也就不会产生环流。比如，当电动机正向运行时，I 组桥处于工作状态，将 II 组桥的触发脉冲封锁，使其处于阻断状态。反之，反向运行时，则 II 组桥工作，I 组桥被阻断。现对其工作过程作详细分析。

电动机正转：给 I 组变流桥加触发脉冲， $\alpha_1 < 90^\circ$ ，为整流状态；II 组桥封锁阻断。电动机为“正转电动”运行，工作在图 5-52 中的第一象限。

电动机由正转过渡到反转：在此过程中，系统应能实现回馈制动，把电动机轴上的机械能变为电能回送到电网中去，此时电动机的电磁转矩变成制动转矩。在正转运行中的电动机需要反转时，应先使电动机迅速制动，因此就必须改变电枢电流的方向，但对 I 组桥来说，电流不能反向流动，需要切换到 II 组桥。但这种切换并不是把原来工作着的 I 组桥触发脉冲封锁后，立即开通原来封锁着的 II 组桥。因为已导通的晶闸管不可能在封锁的那一瞬间立即

关断，而必须等到阳极电压降到零以后、主回路电流小于维持电流才能开始关断。因此，切换过程是这样进行的：开始切换时，将 I 组桥的触发脉冲后移到 $\alpha_1 > 90^\circ$ ($\beta_1 < 90^\circ$)。由于存在机械惯性，反电动势 E 暂时未变。这时，I 组桥的晶闸管在 E 的作用下本应关断，但由于 I_d 迅速减小，电抗器 L_d 中会产生下正上负的感应电动势，其值大于 E ，因此电路进入有源逆变状态，电抗器 L_d 中的一部分储能经 I 组桥逆变反送回电网。注意，此间电动机仍处于电动工作状态，消耗 L_d 的另一部分储能。由于逆变发生在原本工作着的变流桥中，故称为“本桥逆变”。当电流 I_d 下降到零后(I_d 通过系统中装设的零电流检测环节检测)，将 I 组桥封锁，并延时 3-10ms，待确保 I 组桥恢复阻断后，再开放 II 组桥的触发脉冲，使其进入有源逆变状态。此时电动机作“正转发电”运行，工作在第二象限，电磁转矩变成制动转矩，电动机轴上的机械能经 II 组变流桥变为交流电能回馈至电网。此间为了保持电动机在制动过程中有足够的转矩，使电动机快速减速，还应随着电动机转速的下降，不断地增加逆变角 β_{II} ，使 II 组桥路输出电压 U_{dII} 随电动势 E 的减小而同步减小，则流过电动机的制动电流 $I_d = (E - U_{dII}) / R$ 在整个制动过程中维持在最大允许值。直至转速为零时， $\beta_{II} = 90^\circ$ 。此后，继续增大 β_{II} ，使 $\beta_{II} > 90^\circ$ ，则 II 组桥进入整流状态，电动机开始反转，进入第三象限的“反转电动”运行状态。

以上就是电动机由正过渡到反转的全过程，即由第一象限经第二象限进入第三象限的过程。同样，电动机从反过渡到正转的过程是由第三象限经第四象限到第一象限的过程。

由于任何时刻两组变流器都不会同时工作，因此不存在环流，更没有环流损耗，因此，用来限制环流的均衡电抗器($L_1 \sim L_4$)也可取消。

逻辑无环流可逆电路在工业生产中有着广泛的应用。然而，逻辑无环流系统的控制比较复杂，动态性能较差。在中小容量可逆拖动中有时采用下述有环流反并联可逆系统。

(2) 有环流反并联可逆系统

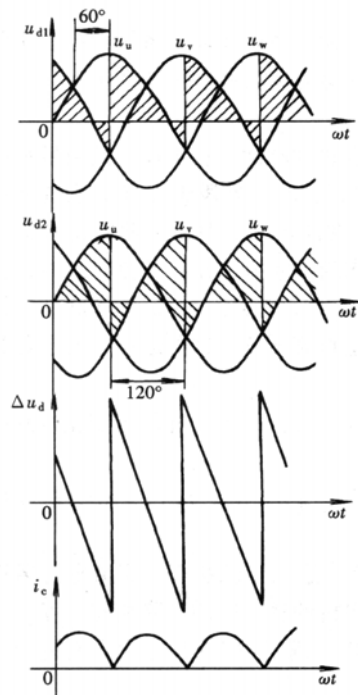


图 5-53 三相半波 $\alpha_1 = \beta_{II} = 60^\circ$ 时有环流可逆电路的波形

有环流反并联可逆系统是反并联的两组变流桥同时都有触发脉冲,在工作中两组桥都能保持连续导通状态,负载电流 I_d 的反向也是连续变化的过程,不必象逻辑无环流系统那样依据检测 I_d 的方向来确定变流桥的阻断与开通,因而动态性能较好。但由于两组桥都参与工作,因而需要防止在两组桥之间出现直流环流。这就要求当一组桥工作在整流状态时,另一组桥必须工作在逆变状态,并严格保持 $\alpha_1 = \beta_{II}$ 或 $\alpha_{II} = \beta_1$, 也就是 $\alpha_1 + \alpha_{II} = 180^\circ$ 。这样才能使两组桥的直流侧电压大小相等,极性逆串,不会产生直流环流。这种运行方式也称为 $\alpha = \beta$ 工作制的配合控制。

$\alpha = \beta$ 工作制触发脉冲的具体实施如下: 用一个控制电压 U_c 控制 I、II 两组变流桥的控制角,使它们同步的向相反的方向变化。

1) 当 $U_c = 0$ 时,两组桥的控制角相等,均为 90° , 则 $\alpha_1 = \alpha_{II} (= \beta_{II}) = 90^\circ$, 电动机转速为零。

2) 当 U_c 增大时, I 组桥的触发脉冲左移,使 $\alpha_1 < 90^\circ$, 进入整流状态,交流电源通过 I 组桥向电动机提供能量,电动机处于正转电动状态; II 组桥的触发脉冲右移相同角度,使 $\beta_{II} < 90^\circ$, (且 $\beta_{II} = \alpha_1$), 此时 II 组桥虽有输出电压 U_d , 但因不满足 $|E| > |U_d|$ 而没有逆变电流,称这种状态为待逆变状态。

3) 欲使电动机反转,只要使 U_c 减小,可使 α_1 与 β_{II} 同步增大,两组桥的直流输出电压值 U_{d1} 、 U_{d2} 立即同步减小。但由于机械惯性的作用, E 并未变化,因而有 $E > U_{d1} = U_{d2}$, E

给Ⅱ组桥施以正向电压，使Ⅱ组桥满足了有源逆变条件而导通，产生逆变电流，该桥从待逆变状态转为逆变状态，电动机电流反向，产生制动转矩，使电动机降速；Ⅰ组桥则受到 E 的反向电压作用，但不能满足 $U_d > E$ ，因而没有直流电流输出，称这种状态为待整流状态。继续增大 α_I 及 β_{II} ，并保持 E 稍大于 U_d ，则电动机在整个减速过程中能够始终产生制动转矩，从而实现快速制动。

4)当 α_I 与 β_{II} 增至 90° 时，两组变流桥的输出直流电压开始改变极性，此时电动机转速也减至零， $E=0$ ，此后Ⅰ组桥因 $\beta_I < 90^\circ$ 进入待逆变状态，Ⅱ组桥因 $\alpha_{II} < 90^\circ$ 进入整流状态，交流电源通过Ⅱ组桥向电动机供电，电动机处于反转电动状态。

同样，也可分析由反转到正转的转变过程。可见，在 $\alpha=\beta$ 工作制中，改变两组变流装置的控制角可以实现电动机的四象限运行。

严格保持 $\alpha_I = \beta_{II}$ ，虽然可使两组桥的输出电压平均值相等，即 $U_{dI} = U_{dII}$ ，避免了两组桥的直流环流，但是两组桥输出端的瞬时值 u_{dI} 与 u_{dII} 并不相等，因而会出现瞬时电压差 $\Delta u_d = U_{dI} - U_{dII}$ ，称为均衡电压或环流电压，因此在两组桥之间会引起不经过负载的脉动的环流 i_c 。 α 角不同， i_c 值也不同。在三相半波和三相桥的反并联电路中， $\alpha=\beta=60^\circ$ 时环流最大，图 5—53 给出了三相半波 $\alpha_I = \beta_{II}=60^\circ$ 时的波形情况。为了限制环流，必须串接均衡电抗器。在可逆系统中通常将环流值限制在额定直流输出电流的 3%-10%。

2. 绕线转子异步电动机的晶闸管串级调速

(1)串级调速的原理

绕线转子异步电动机可采用改变串接于转子回路附加电阻的方法进行调速。这种调速方法简单、投资少，但其调速不平滑、附加电阻耗能大。串级调速是在转子回路中引入附加电动势来实现调速的。这种方法不仅可对异步电动机进行无级调速，而且具有节能、机械特性较硬等特点。

下面分析串级调速的原理。假定异步电动机在自然机械特性上(即转子电路无附加电动势)稳定运行，电源电压和负载转矩均不变。转子电动势为 sE_{20} ，转子电流值为

$$I_2 = \frac{sE_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (sx_{20})^2}}$$

式中： E_{20} 为 $s=1$ 时转子开路相电动势； x_{20} 为 $s=1$ 时每相转子绕组的漏抗； R_2 为转子绕组电阻。

机转速。附加电动势越大，电动机转速越低。可见，实现串级调速的核心环节是要有一套产生附加电动势的装置，其所产生的附加电动势既要大小可调，又要使其频率保持与转子频率一致。这在技术上是非常复杂的。目前广泛采用的办法是把转子电动势整流为直流，再通过晶闸管有源逆变电路引入直流附加反电动势。图 5—54 即为运用这种办法的晶闸管串级调速主电路原理图。

图中，转子回路经三相桥式整流后输出直流电压 U_d 为

$$U_d = 1.35sE_{2l}$$

式中： E_{2l} 为转子开路线电动势的有效值(转速 $n=0$)； s 为电动机转差率。

串级调速系统运行时，由晶闸管组成的有源逆变器一直处于逆变工作状态，将转子能量反馈给电网，逆变电压 $U_{d\beta}$ 即为引入转子电路的反电动势。当电动机稳定运行、并忽略直流回路电阻时，整流电压 u_d 与逆变电压 $U_{d\beta}$ 大小相等、方向相反，即 $U_d = U_{d\beta}$ 。设逆变变压器 T1 的二次侧线电压为 U_{2l} ，则有

$$U_{d\beta} = 1.35U_{2l} \cos \beta = U_d = 1.35sE_{2l}$$

$$s = \frac{U_{2l}}{E_{2l}} \cos \beta$$

故有

由上式可以看出，改变逆变角 β 的数值即可改变电动机的转差率，从而达到调速的目的。逆变角的变化范围一般为 $30^\circ \sim 90^\circ$ 。

上述调速方法的核心是将逆变电压 $U_{d\beta}$ 引入转子电路，作为转子的反电动势。而逆变电压又受逆变角 β 的控制，改变 β 的大小便可改变反电动势的大小，从而改变反送交流电网的功率，同时改变了转子的转速。其具体调节过程为：首先起动电动机。对于水泵、风机类负载，接通 KM1、KM2 接触器，利用频敏变阻器起动，以限制起动电流；对于传输带、矿井提升等设备则可直接起动。电动机起动之后，断开 KM2，接通 KM3，电动机转入串级调速。当电动机稳定运行在某一转速时，有 $U_d = U_{d\beta}$ 。欲提高转速，可增大 β 角，则 $U_{d\beta}$ 减小，转子电流 I_2 增大，使电磁转矩增大，转速提高，转差率 s 减小， sE_{2l} 减小， U_d 减小，到 $U_d = U_{d\beta}$ 时电动机稳定运行在较原来高的转速上。反之，欲降低转速则减小 β 角。若要停车，可先断开 KM1，延时断开 KM3，电机即停车。

3. 高压直流输电

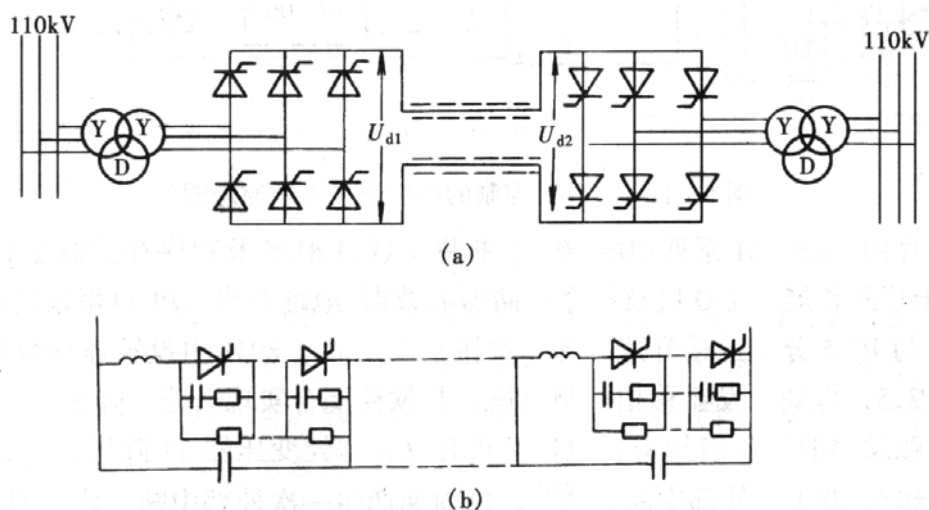


图 5—55 高压直流输电系统原理图

(a)原理图 (b)桥臂中晶闸管串联方式

高压直流输电在跨越江河、海峡的输电，大容量远距离输电，联系两个不同频率的交流电网，同频率两个相邻交流电网的非同步并联等方面，发挥着非常重要的作用。与其它输电方式相比，高压直流输电能减少输电线的能量损耗，增加电网稳定性，提高输电效益，因而得到了迅速的发展。图 5—55 为高压直流输电系统的原理图。图中，中间的直流环节未接负载，起传输功率的作用，通过分别控制两侧变流桥的工作状态就可控制电功率的流向。如左边变流桥工作于整流状态、右边变流桥工作于有源逆变状态，则系统由左边电网向右边电网输送电功率。变流桥均采用三相桥式全控电路，每个桥臂由许多只光控大功率晶闸管串联组成。由于光控晶闸管光脉冲只需 0.1ms ，因此，用光脉冲可以同时触发桥臂中这些处于不同电位的多只串联晶闸管。

思考题与习题

- 5—1 感应加热的基本原理是什么？加热效果与电源频率大小有什么关系？
- 5—2 中频感应加热炉的直流电源的获得为什么要用可控整流电路？
- 5—3 试简述平波电抗器的作用？
- 5—4 中频感应加热与普通的加热装置比较有哪些优点？中频感应加热能否用来加热绝缘材料构成的工件？
- 5—5 三相半波可控整流电路，如果三只晶闸管共用一套触发电路，如图 5—62 所示，每隔 120° 同时给三只晶闸管送出脉冲，电路能否正常工作？此时电路带电阻性负载时的移相范围是多少？

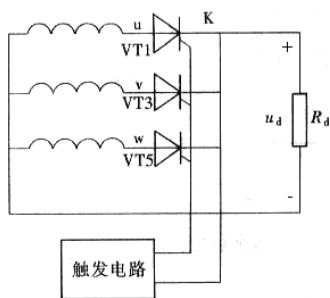


图 5—62 习题 5—5 图

5—6 三相半波可控整流电路带电阻性负载时，如果触发脉冲出现在自然换相点之前 15° 处，试分析当触发脉冲宽度分别为 10° 和 20° 时电路能否正常工作？并画出输出电压波形。

5—7 如题图 5—63 所示，熔断器 FU 能否用普通的熔断器？R、C 吸收回路的作用？电阻 R 的作用？大小怎样选择？

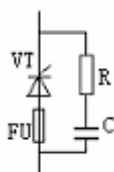


图 5—63 习题 5—7 图

5—8 图 5—64 为三相全控桥整流电路，试分析在控制角 $\alpha = 60^\circ$ 时发生如下故障的输出电压 U_d 的波形。

- (1) 熔断器 FU1 熔断。
- (2) 熔断器 FU4 熔断。
- (3) 熔断器 FU4、FU5 熔断。

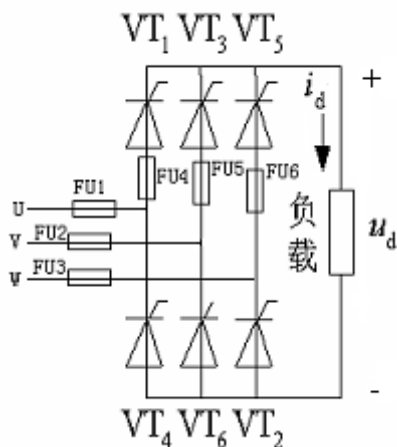


图 5—64 习题 5—8 图

5—9 三相半波可控整流电路，电阻性负载，VT1 管无触发脉冲，试画出 $\alpha = 15^\circ$ 、 $\alpha = 60^\circ$ 两种情况下输出电压和 VT2 两端电压波形。

5—10 图 5—65 为两相零式可控整流电路，直接由三相交流电源供电

- (1) (1) 画出控制角 $\alpha = 0^\circ$ 、 $\alpha = 60^\circ$ 时输出电压波形。
- (2) (2) 控制角 α 的移相范围多大？
- (3) (3) $U_{d\max} = ?$, $U_{d\min} = ?$
- (4) (4) 推导 U_d 的计算公式。

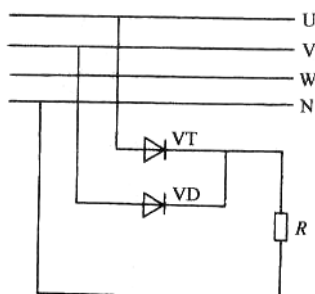


图 5—65 习题 5—10 图

5—11 三相全控桥式整流电路, $L_d=0.2H, R_d=4\Omega$, 要求 U_d 从 $0\sim 220V$ 之间变化, 试求:

- (1) (1) 不考虑控制角裕量, 整流变压器二次线电压是多少?
- (2) (2) 计算晶闸管电压、电流值, 如果电压、电流裕量取 2 倍, 选择晶闸管型号。
- (3) (3) 变压器二次电流有效值。
- (4) (4) 计算整流变压器二次容量。
- (5) (5) $\alpha = 0^\circ$ 时, 电路功率因数。
- (6) (6) 当触发脉冲距对应二次侧相电压波形原点为何处时, U_d 为零?

5—11 三相半波可控整流电路, 负载为大电感负载, 如果 U 相晶闸管脉冲丢失, 试画出 $\alpha = 0^\circ$ 时输出电压波形。

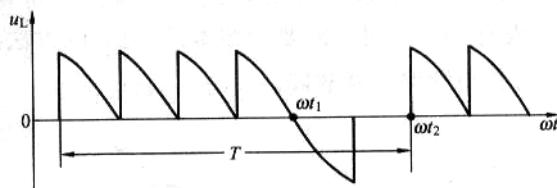
5—12 触发电路中设置的控制电压 U_c 与偏移电压 U_b 各起什么作用? 在使用中如何调整?

5—13 锯齿波同步触发电路由哪些基本环节组成? 锯齿波的底宽由什么参数决定? 输出脉宽如何调整? 输出脉冲的移相范围与哪些参数有关?

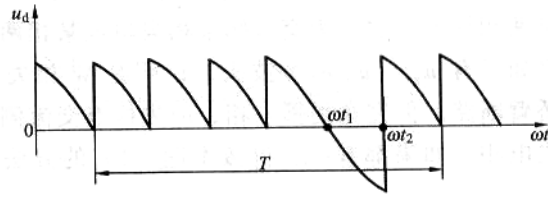
5—14 锯齿波触发电路是怎样发出双窄触发脉冲的?

5—15 如何确定控制电路和主电路相位是否一致? 触发电路输出脉冲与其所对应控制的晶闸管怎样才能相一致?

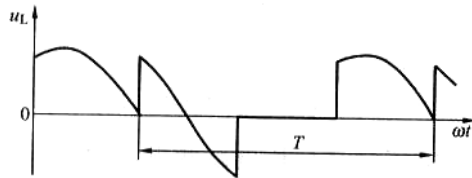
5—16 若用示波器观察三相桥式全控整流电路波形分别如图 5—66 (a) (b) (c) (d) (e) 所示, 试判断电路的故障。



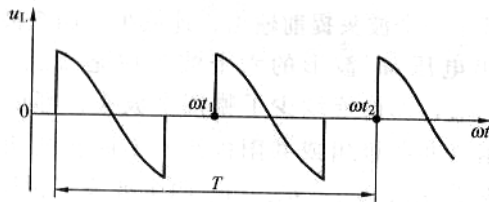
(a)



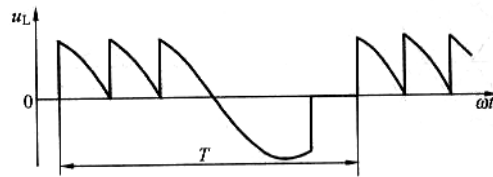
(b)



(c)



(d)



(e)

图 5-66 习题 5-16 波形

5-17 如果用示波器测出三相全控桥电感性负载输出电压波形如图 5-67 所示，试分析原因及如何解决。

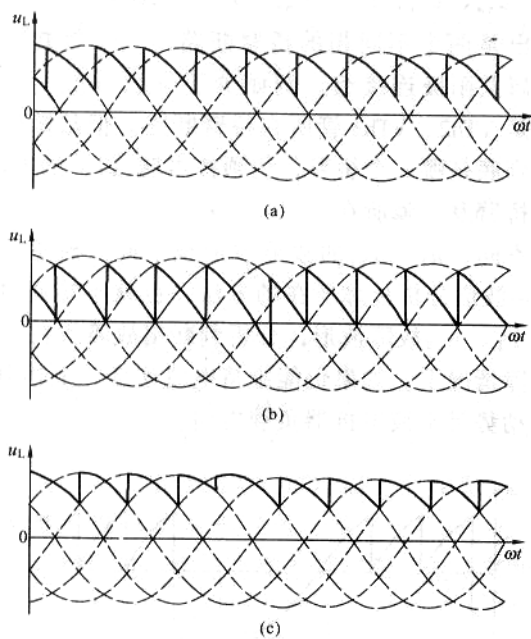


图 5—67 习题 5—17 图

- 5—18 感应加热装置中，整流电路和逆变电路对触发电路的要求有何不同？
- 5—19 同步电压为锯齿波的触发电路有何优缺点？这种电路一般有哪几部分组成？电路的输出脉冲宽度如何调整？
- 5—20 逆变电路常用的换流方式有哪几种？
- 5—21 并联谐振逆变电路的并联电容有什么作用？电容补偿为什么要过补偿一点？
- 5—22 试简述中频感应加热装置的调试步骤和方法。调试过程中注意事项。

中国最大的感应加热设备供应商： [联合高频设备网](http://www.uihm.cn/)： <http://www.uihm.cn/> UIHM: <http://www.uihm.com/>