

项目三

三相可控整流电路

任务一 了解整流电镀电路的工作原理

在电镀、电解等行业要求电源具有自动换相的功能,而且不仅要求电源设备具有稳压、稳流的功能,还要求电源设备操作简便、运行可靠、自动化程度高。

图 3-1 是自动换向电镀电源电路图,电镀工艺要求电源输出的直流电压在 $6\sim 48\text{V}$,直流电流可从几十安到几千安至几万安。其主电路采用两组反并联的晶闸管整流器,共用一台双反星带平衡电抗器的整流变压器。电源控制系统主要由触发调节单元、信号变换及故障保护单元、以 PLC 为核心的脉冲逻辑切换单元及继电器控制等部分组成。

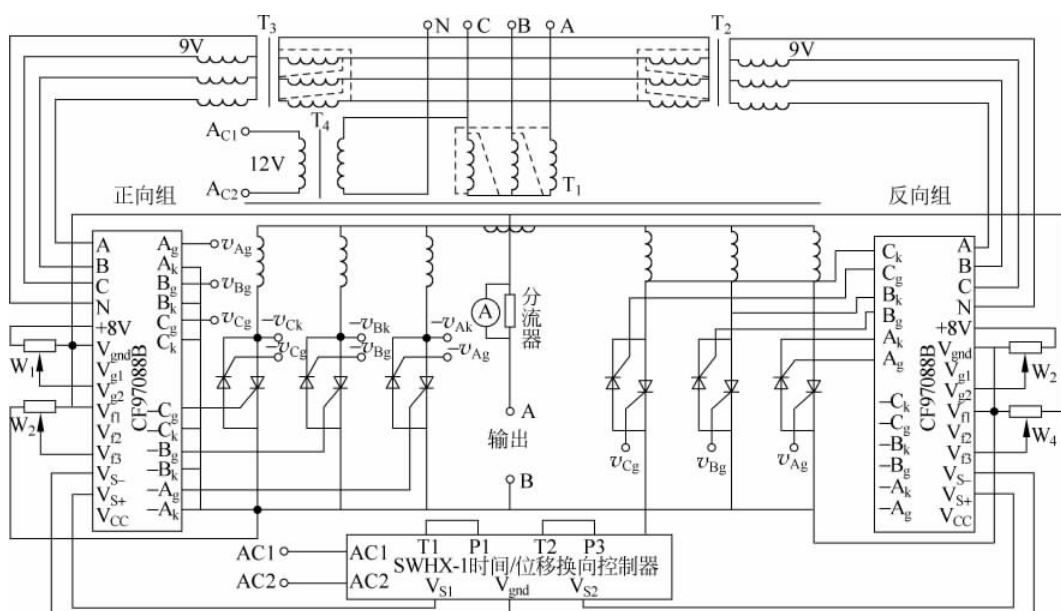


图 3-1 自动换向电镀电源电路图

当设备容量较大、输出电压脉动要求较小、对控制的快速性有要求时,多采用三相可控整流电路。

知识点：

- (1) 掌握三相半波可控整流电路电阻性负载、电感性负载的工作原理与波形分析。
- (2) 掌握三相桥式全控可控整流电路电阻负载、电感负载的工作原理与波形分析。
- (3) 理解可控整流电路的应用范围,根据直流用电设备的要求正确选择电路元器件参数。

技能点：

- (1) 掌握三相可控整流电路的调试步骤与方法,能够准确调试和使用晶闸管变流装置。
- (2) 能够对三相可控整流电路不同负载情况下,波形特点与参数关系作全面分析。
- (3) 能够排查和修复三相可控整流电路的一般常见故障。

任务二 三相半波可控整流电路学习与实践

一、任务描述

三相可控整流电路的形式有三相半波、三相全控桥、三相半控桥等电路,它们都可视为三相半波电路以不同方式的串联和并联而成。

二、知识学习

(一) 电阻性负载

三相半波可控整流电路如图 3-2(a) 所示。TR 为三相整流变压器,晶闸管 VT_1 、 VT_3 、 VT_5 分别与变压器的 U、V、W 三相相连,三只晶闸管的阴极接在一起经负载电阻 R_d 与变压器的中性线相连,它们组成共阴极接法电路。

1. 电路工作原理与波形分析

整流变压器的二次侧相电压有效值为 U_2 表示为

$$u_U = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t$$

$$u_V = \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t - 2\pi/3)$$

$$u_W = \sqrt{2}U_2 \sin(\omega t + 2\pi/3)$$

三相中哪一相所接的晶闸管可被触发导通,取决于三只晶闸管各自所接的 u_U 、 u_V 、 u_W 中哪一相电压瞬时值最高,则该相所接晶闸管可能被触发导通,而另外两管则承受反向电压而阻断。

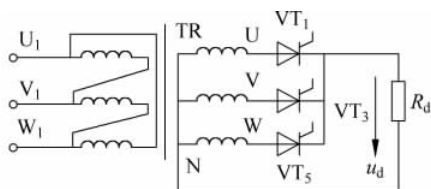
下面分析当控制角 α 不同时,整流电路的工作原理。

当控制角 $\alpha=0^\circ$ 时,晶闸管 VT_1 、 VT_3 、 VT_5 相当于三个整流二极管,有如图 3-2 所示的电压波形。 $\omega t_1 \sim \omega t_3$ 期间, u_U 瞬时值最高, U 相所连的晶闸管 VT_1 可被触发导通,输出电压 $u_d = u_U$, V 相和 W 相所接 VT_3 、 VT_5 承受反向线电压而阻断; $\omega t_3 \sim \omega t_5$ 期间, u_V 瞬时值最高, VT_3 可被触发导通,输出电压 $u_d = u_V$, VT_1 、 VT_5 承受反向线电压而阻断; $\omega t_5 \sim \omega t_7$ 期间, u_W 瞬时值最高, VT_5 导通,输出电压 $u_d = u_W$, VT_1 、 VT_3 承受反向线电压而阻断。依次循环,每管导通 120° ,三相电源轮流向负载供电,负载电压 u_d 为三相电源电压正半周包络线,脉动频率为 150Hz。

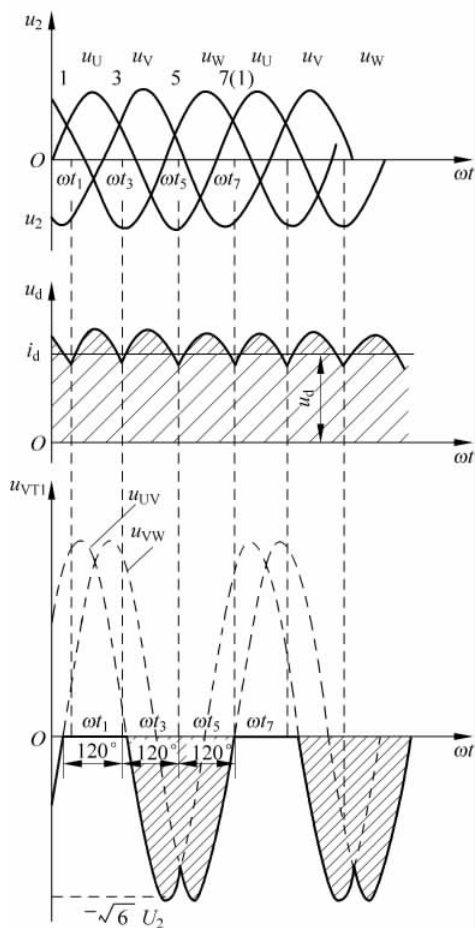
在图 3-2(b) 中 ωt_1 、 ωt_3 、 ωt_5 所对应的 1、3、5 三个点,称为自然换相点,分别是三只晶闸管轮换导通的起始点。当 $\alpha=0^\circ$ 时,晶闸管 VT_1 上的电压波形如图 3-2(b) 所示,在

$\omega t_1 \sim \omega t_3$ 期间导通,管压降为零;在 $\omega t_3 \sim \omega t_5$ 期间,VT₃ 导通,VT₁ 承受反相线电压 u_{UV} ;在 $\omega t_5 \sim \omega t_7$ 期间,VT₅ 导通,VT₁ 承受反向线电压 u_{UW} 。

当控制角 $\alpha = 15^\circ$ 时,图 3-3 所示为触发脉冲 $\alpha = 15^\circ$ 时的波形。晶闸管 VT₁ 被触发导通,输出直流电压波形由 u_W 换成 u_U ,VT₁ 的导通使晶闸管 VT₅ 承受 u_{UW} 反向电压而被强迫关断,负载电流 i_d 从 W 相换到 U 相。以此类推,负载电流 i_d 波形与 u_d 波形相似,而流过晶闸管 VT₁ 的电流 i_T 波形是 i_d 波形的 1/3。



(a) 电路图



(b) 波形图

图 3-2 三相半波可控整流电路

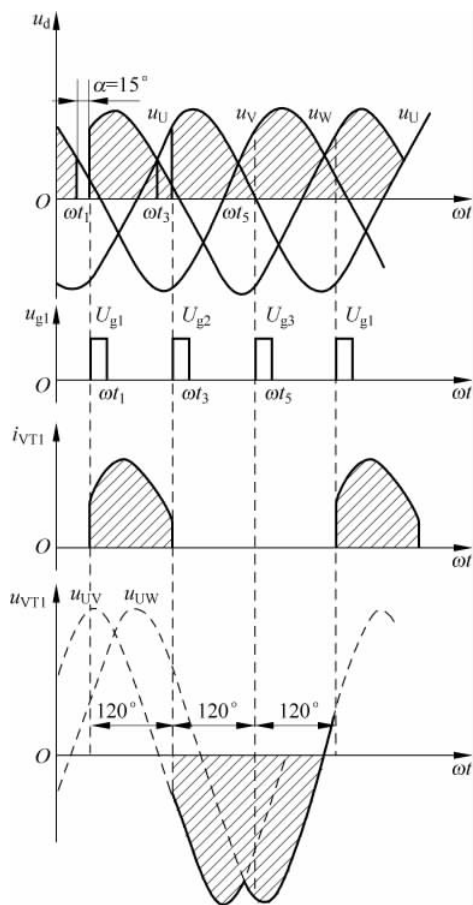


图 3-3 三相半波可控整流电路 $\alpha = 15^\circ$ 时的电路波形

当控制角 $\alpha=60^\circ$ 时,输出电压 u_d 波形及负载电流 i_d 波形将中断,三只晶闸管都在本相电源电压过零时自行关断。显然,当触发脉冲后移到 $\alpha=150^\circ$ 时,由于晶闸管已不再承受正向电压而无法导通, $U_d=0V$, 所以,三相半波可控整流电路带电阻性负载时,其移相角 α 的可调控范围是 $0^\circ\sim 150^\circ$ 。

2. 基本概念

自然换相点是各项所接晶闸管可能被触发导通的最早时刻。在此之前由于晶闸管承受反向电压,导通是不可能的,因此把自然换相点作为计算控制角 α 的起点,即该点 $\alpha=0^\circ$, 对应于 $\omega t=30^\circ$ 。

3. 参数关系

1) 连续区间 $0^\circ\leq\alpha\leq 30^\circ$ 时

$$U_d = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{6}+\alpha}^{\frac{\pi}{6}+\alpha+\frac{2\pi}{3}} \sqrt{2}U_2 \sin\omega t d(\omega t) = 1.17U_2 \cos\alpha = U_{d0} \cos\alpha \quad (3-1)$$

式中: U_{d0} 是指 $\alpha=0^\circ$ 时输出直流平均电压, $U_{d0}=1.17U_2$ 。

2) 断续区间 $30^\circ\leq\alpha\leq 150^\circ$ 时

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

负载电流平均值:

$$I_d = U_d / R_d \quad (3-3)$$

流过晶闸管的电流平均值:

$$I_{dT} = \frac{1}{3} I_d \quad (3-4)$$

晶闸管承受的最高电压:

$$U_{TM} = \sqrt{6}U_2 \quad (3-5)$$

(二) 电感性负载

1. 工作原理和波形

1) 无续流二极管

大电感负载的三相半波可控整流电路如图 3-4 所示。由于负载是大电感,所以只要输出电压平均值 U_d 不为零,晶闸管导通角均为 120° , 与控制角 α 无关。其电流波形近似为方波,如图 3-5 所示。

从图 3-5 中可以看出,由于电感 L_d 的作用,当 $\alpha>30^\circ$ 后 u_d 波形出现负值,只要电感量足够大,晶闸管导通才能维持到下一相晶闸管被触发导通为止,使之承受反向线电压而被强迫关断。 u_d 波形出现负面积,但只要正面积能大于负面积,其整流输出电压平均值总是大于零,电流 i_d 可连续平稳。当触发脉冲后移到 $\alpha\geq 90^\circ$ 后, u_d 波形的正负面积相等,输出电压平均值为零,大电

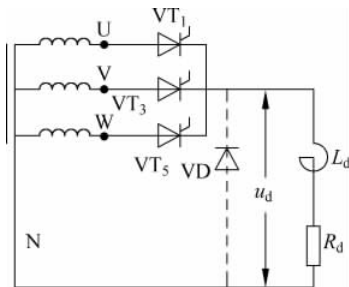


图 3-4 大电感负载的三相半波可控整流电路

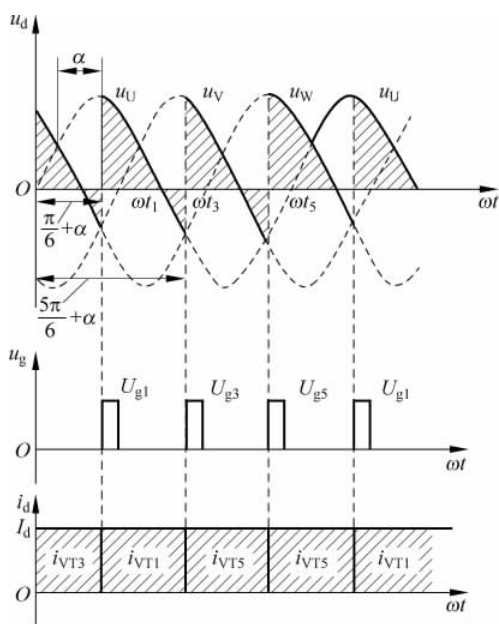


图 3-5 三相半波可控整流电路大电感负载波形

感负载不接续流管时,其移相范围 $\alpha = 0^\circ \sim 90^\circ$ 。

2) 接续流二极管

为了扩大移相范围并使负载电流 i_d 平稳,可在电感负载两端并接续流二极管 VD,由于续流管的作用, u_d 的波形不出现负值,与电阻性负载 u_d 波形相同,如图 3-6 所示。

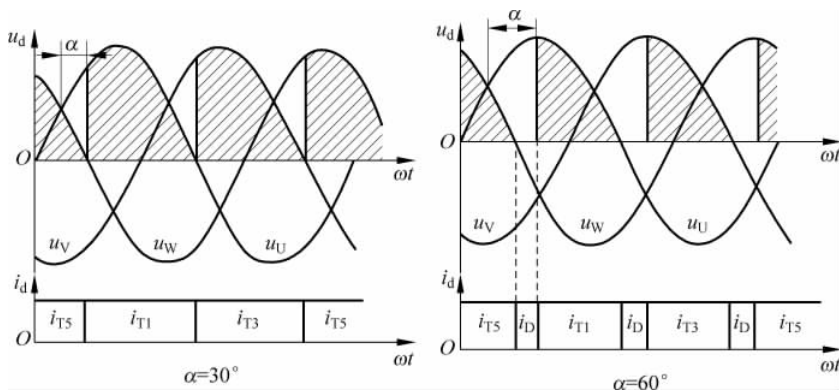


图 3-6 大电感负载接续流二极管波形

由图 3-6 可知,当 $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ 时,电源电压均为正值, u_d 波形连续,续流管不起作用;当 $30^\circ < \alpha \leq 150^\circ$ 时,电源电压出现过零变负时,续流管及导通为负载电流提供续流回路,晶闸管承受反向电源相电压而关断。 u_d 波形断续但不出现负值。

2. 三相半波共阳极可控整流电路

将三只晶闸管的阳极连接在一起,而三个阴极分别接到三相交流电源,这种接法称为

共阳极接法,如图 3-7 所示。由于三只晶闸管 VT_2 、 VT_4 、 VT_6 的阳极连接在一起并等电位,可把三只晶闸管的阳极固定在同一块大散热器上,散热效果好,安装也方便。

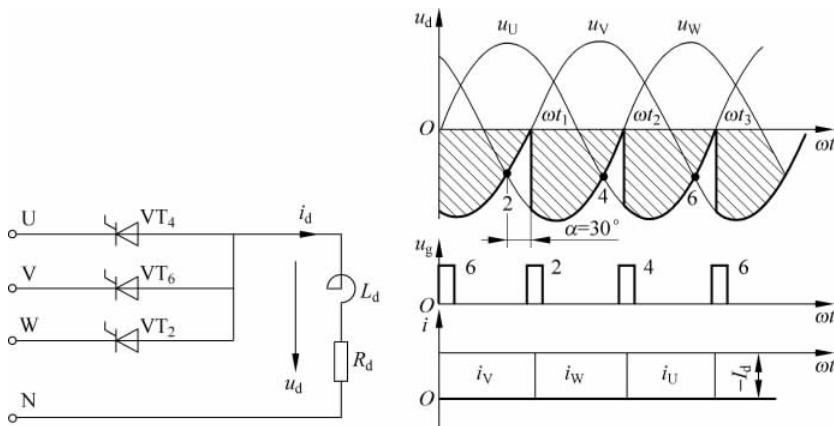


图 3-7 共阳极接法的三相半波可控整流电路

共阳极接法电路与共阴极接法电路一样,都是在晶闸管阳极电位高于阴极电位时才能被触发导通。所以, VT_2 、 VT_4 、 VT_6 在电源相电压负半周时工作,自然换相点分别为 2、4 及 6。所以大电感负载时共阳极三相半波可控整流输出电压平均为

$$U_d = -1.17U_2 \cos \alpha = -U_{d0} \cos \alpha$$

式中:负号表示变压器中性线为 U_d 的正端,三个连接在一起的阳极为负端。电路各电量计算与共阴极接法相同。

3. 参数关系

1) 无续流二极管

(1) 输出电压平均值 U_d

$$U_d = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6+\alpha}^{5\pi/6+\alpha} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t) = 1.17U_2 \cos \alpha = U_{d0} \cos \alpha \quad (3-6)$$

(2) 负载电流平均值

$$I_d = U_d / R_d \quad (3-7)$$

(3) 流过晶闸管的电流平均值 I_{dT} 、有效值 I_T 以及承受的最高电压 U_{TM} 分别为

$$I_{dT} = \frac{1}{3}I_d, \quad I_T = \sqrt{\frac{1}{3}}I_d, \quad U_{TM} = \sqrt{6}U_2 \quad (3-8)$$

2) 接续流二极管

(1) 负载电压平均值 U_d 和电流平均值 I_d

当 $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ 时:

$$U_d = 1.17U_2 \cos \alpha = U_{d0} \cos \alpha$$

当 $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ 时:

$$\begin{aligned} U_d &= 3 \times 0.45U_2 \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) \right] / 2 \\ &= 0.675U_2 \left[1 + \cos \left(\frac{\pi}{6} + \alpha \right) \right] \end{aligned} \quad (3-9)$$

(2) 负载电流

$$I_d = U_d / R_d \quad (3-10)$$

(3) 晶闸管电流平均值 I_{dT} 、有效值 I_T 及晶闸管承受的最高电压值 U_{TM}

当 $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ 时:

$$I_{dT} = \frac{1}{3} I_d, \quad I_T = \sqrt{\frac{1}{3}} I_d, \quad U_{TM} = \sqrt{6} U_2 \quad (3-11)$$

当 $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$ 时:

$$I_{dT} = \frac{150^\circ - \alpha}{360^\circ} I_d, \quad I_T = \sqrt{\frac{150^\circ - \alpha}{360^\circ}} I_d, \quad U_{TM} = \sqrt{6} U_2 \quad (3-12)$$

(4) 续流管电流平均 I_{dD} 、有效值 I_D 及承受的最高电压 U_{DM} ($30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$)

$$I_{dD} = \frac{\alpha - 30^\circ}{120^\circ} I_d, \quad I_D = \sqrt{\frac{\alpha - 30^\circ}{120^\circ}} I_d, \quad U_{DM} = \sqrt{6} U_2 \quad (3-13)$$

三、仿真实践

下面介绍三相半波可控整流电路系统的建模方法,并对仿真结果进行分析。

(一) 模型的建立

晶闸管三相半波可控整流电路电阻电感负载仿真模型如图 3-8 所示,电路模型将三个晶闸管模块封装成三相半波可控整流器子系统,三相电源连接到 U_A 、 U_B 、 U_C ,触发脉冲矢量信号连接到脉冲输入端 U_g ;可控整流器的输出 N 端连接负载, VT_1 、 VT_3 和 VT_5 分别是三只晶闸管的电压、电流参数输出端,根据需要可以观察晶闸管工作时的波形。三相半波可控整流器子系统如图 3-9 所示,三只晶闸管的阳极 A 分别与三相输入电源相接,晶闸管的阴极 K 通过 T 型端子连接,形成共阴极接法,脉冲矢量信号 U_g 通过多路信号选择模块(Selector),将六路脉冲中的第 1 路、第 3 路、第 5 路连接至 VT_1 、 VT_3 和 VT_5 的脉冲端 g,从而实现晶闸管的触发导通。模型中晶闸管的触发使用了三相整流同步六脉冲触发模块 Synchronized 6-Pulse Generator,发生器模块的同步信号 AB、BC、CA 端分别连接电压测量模块 Voltage Measurement,用以提供脉冲发生器的三相同步信号,Block 端接“0”信号,脉冲发生器的 alpha-deg 端连接常数模块 Constant,用常数模块设定控制角 α 。三相电源的相电压波形同样由电压测量模块得到,并与三路晶闸管脉冲通过信号组合模块(Mux)合成后,在示波器 Scope4 上进行观察。

整流电路的电压和电流检测还是使用电压检测模块和电流检测模块,模型中 Voltage Measurement1 检测整流后输出的直流电压,Current Measurement 模块检测整流后输出直流电流,通过示波器 Scope 观察电压、电流的波形并记录,晶闸管模块 VT 的 m 端有电流和电压两路信号,需要用信号分解器 Demux 模块分解后分别观测,模块的提取路径见表 3-1。

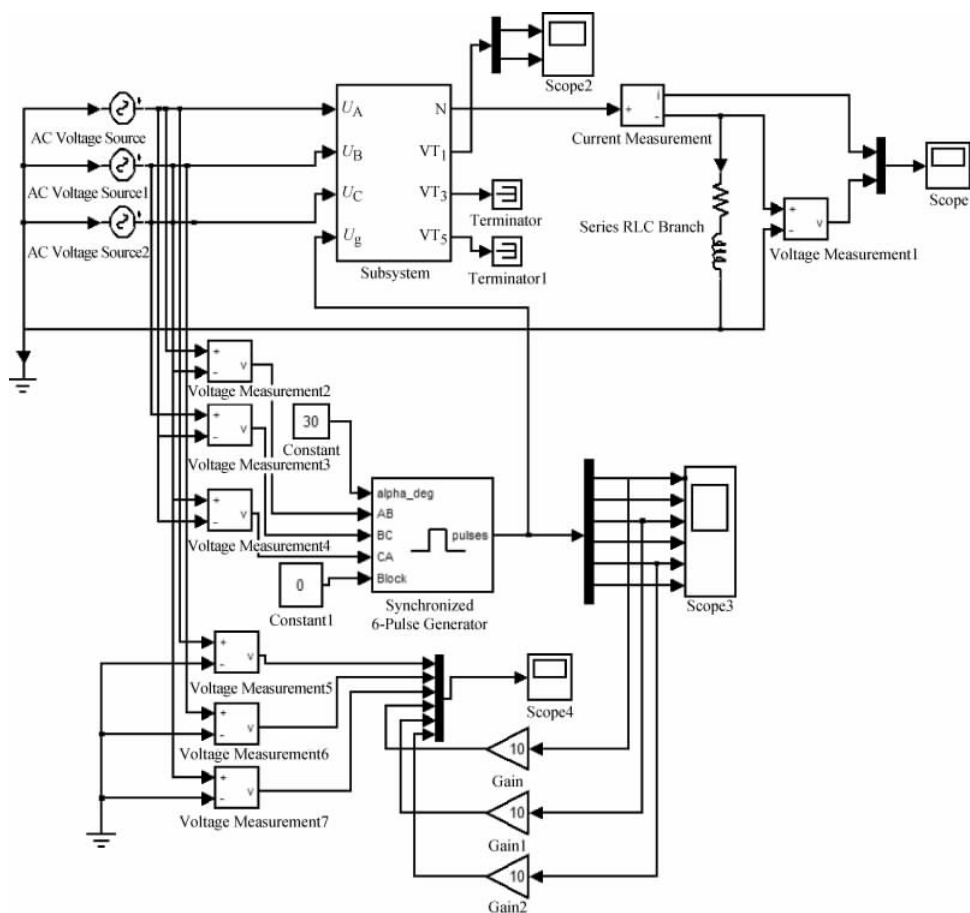


图 3-8 晶闸管三相半波可控整流电路电阻电感负载仿真模型

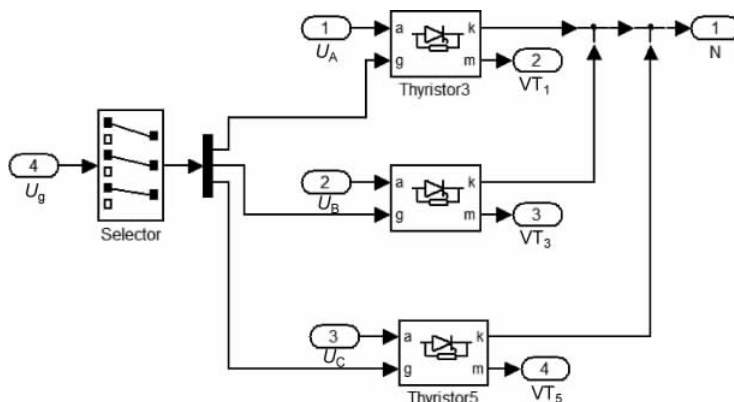


图 3-9 三相半波可控整流器子系统仿真模型

表 3-1 三相半波可控整流电路模块提取路径

模 块 名	提 取 路 径
交流电源 US	SimPower systems/electrical/AC voltage source
晶闸管 VT	SimPower systems/power electronics/detailed thyristor
触发器 6-Pulse Generator	SimPower systems/extra library/synchronized 6-pulse generator
示波器 Scope	Simulink/sink/scope
控制角给定 Constant	Simulink/commonly used block/constant
信号分解 Demux	Simulink/signals routing/demux
信号汇合 Mux	Simulink/signals routing/mux
负载 Series RLC Branch	SimPower systems/elements/series RLC branch
电压检测 Voltage Measurement	SimPower systems/measurements/voltage measurement
电流检测 Current Measurement	SimPower systems/measurements/current measurement
多路信号选择模块 Selector	Simulink/signals routing/selector
常数模块 Gain	Simulink/math operations/gain
终端模块 Terminator	Simulink/sink/terminator

(二) 模型仿真

1. 模块参数

晶闸管模块、示波器模块使用默认的参数,负载 Series RLC Branch 模块可以根据需要选择电阻性或电感性负载,电源、六脉冲触发器和负载等主要参数如表 3-2 所示。

表 3-2 三相半波可控整流电路模块参数

模 块 名	主 要 参 数	设 定 值
交流电源 US	Peak amplitude(V)	$220 * \text{sqrt}(2)$
	Frequency(Hz)	50
	Phase(deg)	0° (U 相)、 -120° (V 相)、 120° (W 相)
触发器 6-Pulse Generator	Frequency(Hz)	50
	Amplitude	1
	Pulse width(degrees)	10
负载 Series RLC Branch	电阻性负载(Ω)	2
	电感性负载(H)	0.7
控制角给定 Constant	$0^{\circ} \sim 180^{\circ}$	0°
多路信号选择 Selector	Input port width	6
	Elements	1、3、5

2. 仿真参数

仿真时间为 $0 \sim 2\text{s}$,仿真算法为 ode23tb,改善因子为 10,其他仿真参数使用参数窗口默认的参数,如图 3-10 所示。

(三) 仿真结果与分析

1. 电阻性负载

观察三相半波可控整流电路,电阻性负载 $R=2\Omega$; 控制角 $\alpha=0^{\circ}$ 整流器输出的电

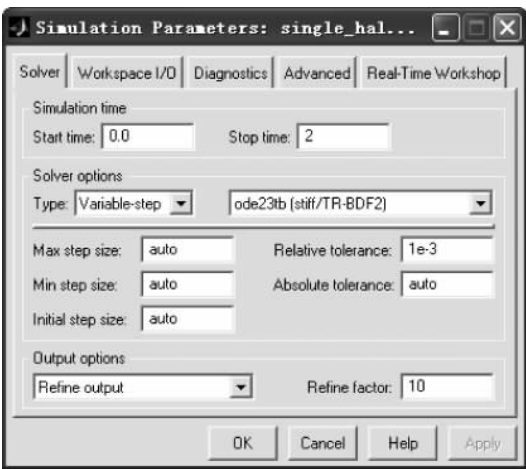


图 3-10 仿真参数窗口

压、电流波形如图 3-11 所示。从波形可以看出，三相半波可控整流电路在一个周期内，负载电压 u_d 为三相电源电压正半周包络线，三相电源轮流向负载供电，每只晶闸管导通 120° 。

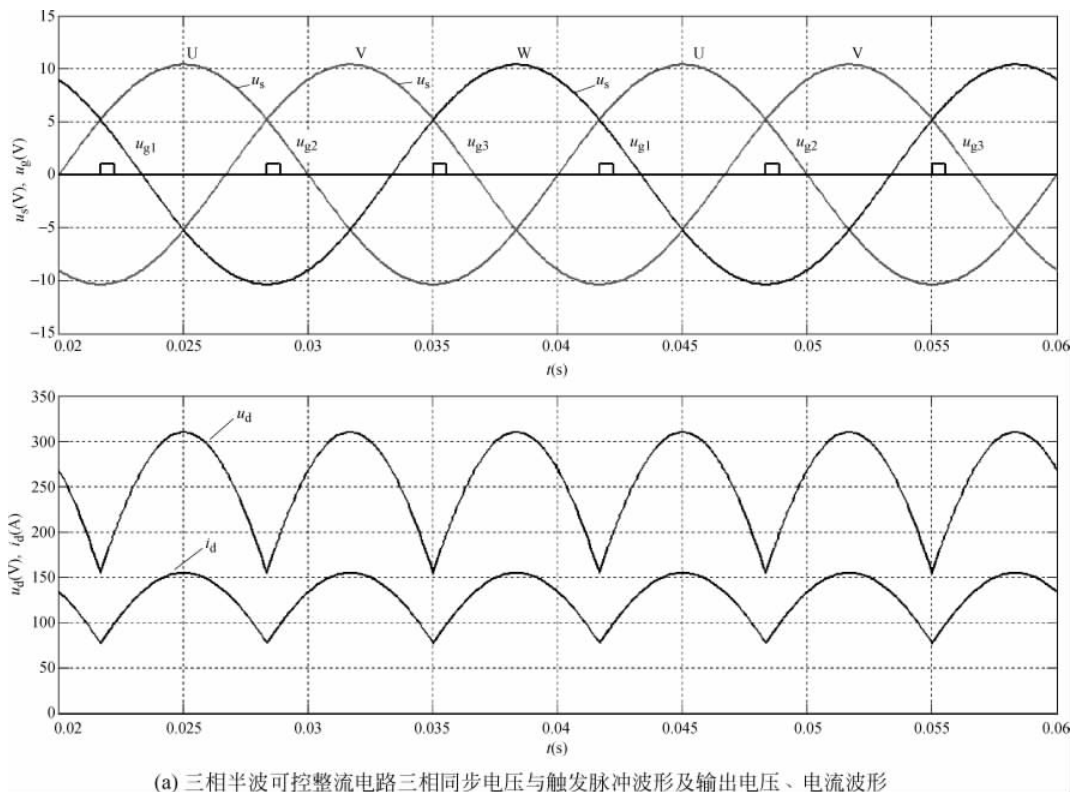


图 3-11 电阻性负载仿真波形