

## 七、思考题

查找资料，自行设计一种晶闸管特性测试电路，并记录在表 1-12 中。

表 1-12 思考题分析记录表

项 目	结 论
测试电路	
测试方法与步骤	

## 实训 2 单相半波可控整流电路仿真实践

### 一、实训目的

- 能使用 MATLAB 进行单相半波可控整流电路模型的搭建和仿真。
- 通过对单相半波可控整流电路进行仿真，初步了解输出波形与触发脉冲的关系。

### 二、实训内容

- 单相半波可控整流电路带电阻负载的仿真。
- 单相半波可控整流电路带阻感负载的仿真。

### 三、实训步骤

(1) 在 MATLAB 界面找到 SIMULINK (快捷图标为  ) 并打开，创建一个空白的 SIMULINK 仿真文件，并打开 Library Browser。用 SIMULINK 搭建单相半波可控整流电路的仿真电路图，并记录搭建模型图及仿真模型图的过程。

① 建模：根据表 1-13 中的模块名称，在搜索框中搜索需要的模块，并将它放置在文档合适的位置，用导线连接形成建模图，如图 1-55 所示。

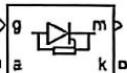
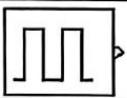
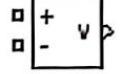


单相半波可控整流  
电路 MATLAB 仿真



示波器编辑

表 1-13 主要模块和作用

模 块 名 称	模 块 外 形	作 用
AC Voltage Source (交流电压源模块)		提供一个交流电压源，相当于变压器的二次侧电源
Thyristor (晶闸管模块)		作为可控开关器件
Pulse Generator (脉冲信号发生器模块)		产生脉冲信号，控制晶闸管的通断
Voltage Measurement (电压测量模块)		检测电压的大小
Scope (示波器模块)		观察输入信号、输出信号的仿真波形
Demux (信号多路分解模块)		将总线信号分解后输出
Series RLC Branch (负载串联模块)		电路所带的串联负载

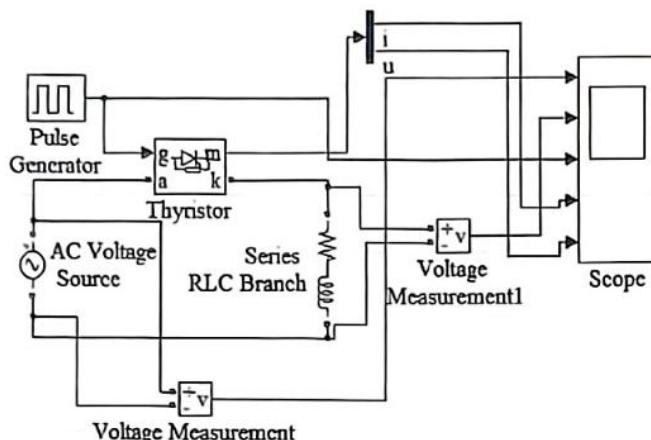


图 1-55 单相半波可控整流电路建模图

注意：不同版本的 MATLAB 的模块所在的组别不同，寻找路径也不同，但模块名称和外形相同，通过搜索寻找模块最便捷。在放置模块时可通过 **Ctrl+R** 组合键旋转模块。有的版本的 MATLAB 的 Series RLC Branch 的外形会根据所选负载性质的改变而改变。

② 模块参数设置：双击相关模块，根据表 1-14 修改模块的参数。另外，不同版本的 MATLAB 的参数设置界面有所不同，应根据具体情况进行操作。

表 1-14 主要模块的参数设置

模 块 名 称	参 数 设 置
AC Voltage Source	将 Peak amplitude (幅值) 设置为 220，将 Phase (初相位) 设置为 0，将 Frequency (频率) 设置为 50
Thyristor	默认值
Pulse Generator	将 Amplitude (幅值) 设置为 1，将 Period (周期) 设置为 1/50，将 Pulse delay (脉宽百分比) 设置为 20，将 Phase delay (控制角) 设置为 $\alpha/(360*50)$
Voltage Measurement	默认值
Scope	将 Number of axes (轴数) 设置为 5
Demux	将 Number of outputs (输出端口数) 设置为 2
Series RLC Branch	将 Branch type (负载类型) 设置为 R，将 Resistance (电阻) 设置为 1，将 Inductance (电感) 设置为 0，将 Capacitance (电容) 设置为 inf

注意：Scope 的 Number of axes 参数根据需要观测的波形数进行设置。设置控制角时，根据 Phase delay 进行设置，若需要设置  $\alpha = 30^\circ$ ，则设置  $\alpha/(360*50)$  为  $30/(360*50)$ 。

③ 系统环境参数设置：在 Simulation 菜单中选择 Simulation Parameters 命令，进行仿真参数设置。在 Simulation Parameters...对话框中设置仿真时间，将 Start time 设置为 0，将 Stop time 设置为 0.08，将 Solver (仿真算法) 设置为 ode23tb。

注意：有的版本的 MATLAB 在将 Solver 设置为 ode23tb 时会出错。若出错，则可以将其设为 auto。

④ 运行：在 Simulation 菜单中选择 Start 命令，或者单击快捷运行图标 ▶，对建好的模型进行仿真。

注意：有的版本的 MATLAB 在运行时会自动形成 powergui (电力系统分析工具)，若不能自行生成，可在运行前搜索 powergui 模块，并将它拖到建模图内。

(2) 在电阻为  $1\Omega$  的情况下，观察  $\alpha$  分别为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$  时的相关波形并将波形记录在表 1-15 中。

表 1-15 单相半波可控整流电路电阻负载下的仿真波形记录表

$\alpha$	波 形
30°	
60°	
90°	
120°	
结 论	控制角越大，输出电压_____（越大、越小）

注意：若需要对波形进行编辑，则可在 MATLAB 的命令行窗口中输入如下代码。

```
set(0,'ShowHiddenHandles','on');set(gcf,'menubar','figure');
```

运行上述代码可打开示波器的编辑窗口，在此窗口中可对波形的线型、坐标轴、标题、颜色、标注等进行设置。

(3) 将负载改为阻感负载，并增大电感，观察输出电压波形变化，并将波形记录在表 1-16 中。

表 1-16 单相半波可控整流电路阻感负载下的仿真波形记录表

$\alpha = 60^\circ$	波形（圈出输出电压拖尾部分）
电阻为 1Ω， 电感为 0.001H	
电阻为 1Ω， 电感为 1H	
结 论	电感越大，输出电压拖尾现象越_____（严重、不严重）

注意：将负载设置为阻感负载，只需要将 Series RLC Branch 的 Branch type 设为 RL，对应 Resistance 和 Inductance 设为表 1-16 中的值即可。

#### 四、实训错误分析

在表 1-17 中记录本次实训中遇见的问题与解决方案。

表 1-17 问题与解决方案

问 题	解 决 方 案
1.	
2.	
.....	

### 五、思考题

在单相半波可控整流电路的负载为阻感负载时，怎么改造电路可以使输出电压不拖尾？将分析过程和结果记录于表 1-18 中。

表 1-18 思考题建模分析记录表

项 目	结 论
改 造 方法	
建 模 图	
$\alpha = 60^\circ$ ， 电 阻 为 $1\Omega$ ， 电 感 为 $1H$ 时 的 波 形	

### 知识链接：

SIMULINK 是 MATLAB 中的一种可视化仿真工具，由美国 Mathworks 公司推出。SIMULINK 是基于模块图环境进行建模设计及多域仿真的。SIMULINK 中的电气系统工具箱具有强大的功能，能够进行电路、电机系统、电力电子系统、电力传输及自动控制理论等相关领域的仿真。它把实际工程及实验室中的元器件及设备变为符号，如电源、电阻、电机、电流表等。将这些符号连接形成电路或系统，并进行仿真实验可替代实验台实验。操作简单、安全、便捷，有效降低了实验成本，并且有助于辅助理解理论知识。

现如今世界格局瞬息万变，我国长期依赖国外仿真软件进行教育科研势必会受到牵制。在仿真系统的开发上，清华大学的赵争鸣教授推出了一套模拟电力电子开关的算法，该算法可实现对电力电子系统的仿真，但距商用软件的使用标准还有比较大的距离。未来电力电子仿真类的相关设计等工作还面临相当大的挑战，尤其在仿真算法与系统的相关设计和理论方面。我们需要助力国家实现科技强国，走在科技创新的前沿，尽快研发出具有自主知识产权的仿真软件。

## 实训 3 单相桥式全控整流电路仿真实践

### 一、实训目的

- 学会使用 MATLAB 进行单相桥式全控整流电路模型的搭建和仿真。
- 通过对单相桥式全控整流电路进行仿真，掌握该电路的波形，并通过该仿真验证波形分析方法的正确性。

### 二、实训内容

- 单相桥式全控整流电路带电阻负载的仿真。
- 单相桥式全控整流电路带阻感负载的仿真。

### 三、实训步骤

(1) 在新建的空白 SIMULINK 仿真文件中, 用 SIMULINK 搭建单相桥式全控整流电路的仿真电路图, 记录过程。

① 建模: 具体模块和作用见 1.7 节的实训 2, 新增一个 Current Measurement (电流测量模块), 用来测量回路中的电流大小, 模块外形为 。单相桥式全控整流电路建模图如图 1-56 所示。



单相桥式全控整流  
电路 MATLAB 仿真

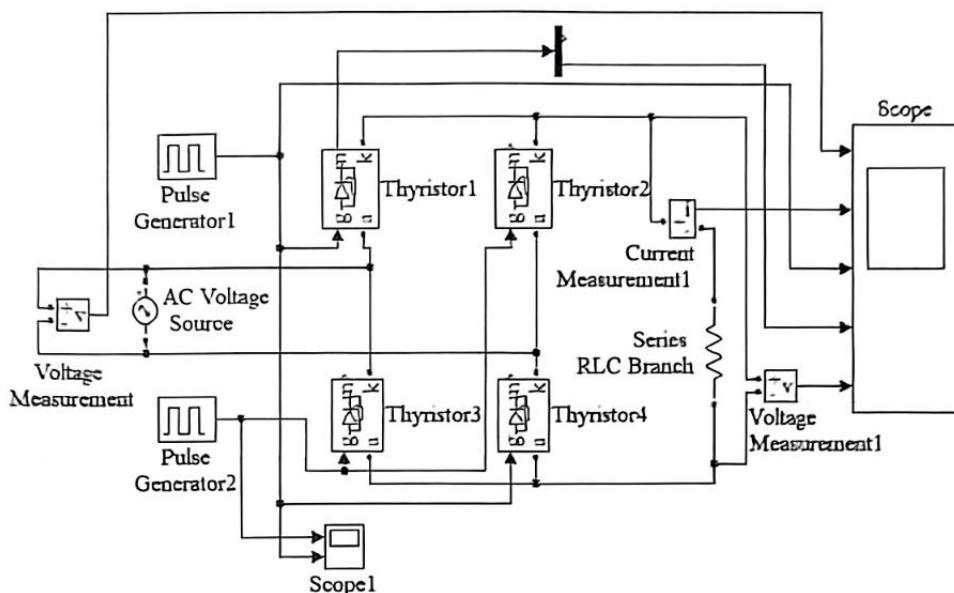


图 1-56 单相桥式全控整流电路建模图

② 模块参数设置: 具体内容见 1.7 节的实训 2。在单相桥式全控整流电路中 Thyristor1、Thyristor4 是一对晶闸管, Thyristor2、Thyristor3 是另一对晶闸管, 两对晶闸管的触发脉冲相差  $180^\circ$ 。如果将 Thyristor1、Thyristor4 的 Pulse Generator1 的 Phase delay 设置为  $\alpha/(360*50)$ , 就将 Thyristor2、Thyristor3 的 Pulse Generator2 的 Phase delay 设置为  $\alpha/(360*50)+0.01$ 。

③ 系统环境参数设置: 具体内容见 1.7 节的实训 2。

④ 运行: 具体内容见 1.7 节的实训 2。

(2) 在电阻为  $1\Omega$  的情况下, 观察  $\alpha=30^\circ$ 、 $\alpha=60^\circ$ 、 $\alpha=90^\circ$ 、 $\alpha=120^\circ$  时的相关波形并将波形记录在表 1-19 中。

表 1-19 单相桥式全控整流电路电阻负载下的仿真波形记录表

$\alpha$	波 形
$30^\circ$	
$60^\circ$	
$90^\circ$	

填表

$\alpha$	波形
$120^\circ$	

注意：若需要对波形进行编辑，可在 MATLAB 的命令行窗口中输入如下代码。

```
set(0,'ShowHiddenHandles','on');set(gcf,'menubar','figure');
```

运行上述代码可打开示波器的编辑窗口，在此窗口中可对波形的线型、坐标轴、标题、颜色、标注等进行设置。

(3) 将负载改为阻感负载，并增大电感，观察输出电压和电流波形的变化，并将波形记录在表 1-20 中。

表 1-20 单相桥式全控整流电路阻感负载下的仿真波形记录表

$\alpha = 60^\circ$	波形（圈出输出电压拖尾部分）
电阻为 $1\Omega$ ， 电感为 $0.001H$	
电阻为 $1\Omega$ ， 电感为 $1H$	
结 论	电感越大，负载侧电流越_____（平滑、不平滑）

注意：将负载设置为阻感负载的操作为，将 Series RLC Branch 的 Branch type 设为 RL，将 Resistance 和 Inductance 设为表 1-20 中的值即可。

#### 四、实训错误分析

在表 1-21 中记录本次实训中遇见的问题与解决方案。

表 1-21 问题与解决方案

问 题	解 决 方 案
1.	
2.	
.....	

#### 五、思考题

(1) 若单相桥式全控整流电路中的 Thyristor1 损坏，观察输出波形的变化，分析原因，并记录在表 1-22 中。

表 1-22 思考题 1 建模分析记录表

项 目	结 论
建模图	

续表

项 目	结 论
波形	
分析	

(2) 单相桥式全控整流电路负载侧反向并联续流二极管后, 输出电压波形有什么变化, 分析原因, 并记录在表 1-23 中。

表 1-23 思考题 2 建模分析记录表

项 目	结 论
建模图	
波形	
分析	

## 实训 4 锯齿波触发电路及单相桥式全控整流电路调试

### 一、实训目的

- 通过实训掌握同步信号为锯齿波的触发电路的工作原理、调试方法及各点波形的观测。
- 通过实训掌握单相桥式全控整流电路的工作原理、调试及波形分析方法。

### 二、实训器材

表 1-24 所示为实训器材。

表 1-24 实训器材

序 号	器 材 及 型 号	序 号	器 材 及 型 号
1	DJK01 电源控制屏	4	D42 三相可调电阻
2	DJK03-1 晶闸管触发电路	5	双踪示波器
3	DJK02 晶闸管主电路	6	万用表

### 三、实训内容

- 同步信号为锯齿波的触发电路的调试及各点波形的观察和分析。
- 单相桥式全控整流电路带电阻负载、阻感负载时的调试。

### 四、实训线路及原理

同步信号为锯齿波的触发电路 I 和同步信号为锯齿波的触发电路 II 相差  $180^\circ$ ,  $R_{P1}$  用于调节锯齿波斜率,  $R_{P2}$  用于移相,  $R_{P3}$  用于确定初始相位。同步信号为锯齿波的触发电路 I 的实训原理图如图 1-57 所示(同步信号为锯齿波的触发电路 II 的实训原理图与此相同), 波形如图 1-58 所示,

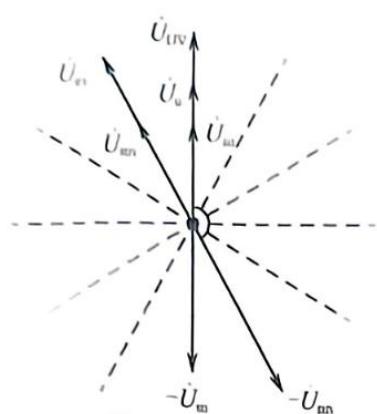


图 2-51 整流、同步电压矢量图

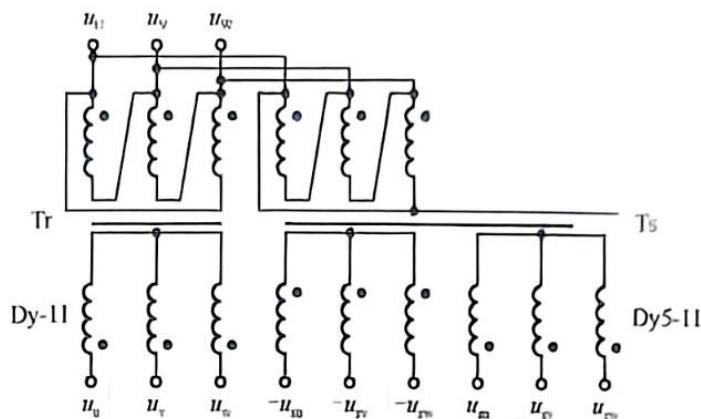


图 2-52 同步变压器的接法

表 2-2 晶闸管与阳极电压、同步电压的关系

晶闸管	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>
阳极电压	+u <sub>u</sub>	-u <sub>v</sub>	+u <sub>v</sub>	-u <sub>u</sub>	+u <sub>w</sub>	-u <sub>v</sub>
同步电压	-u <sub>eu</sub>	+u <sub>ew</sub>	-u <sub>ev</sub>	+u <sub>eu</sub>	-u <sub>ew</sub>	+u <sub>ev</sub>

即同步变压器采用 Dy5-11 接法。

为防止电网电压波形畸变对触发电路产生干扰，需要对同步电压进行 RC 滤波，当 RC 滤波器滞后角为 60° 时，同步变压器的同步电压滞后晶闸管的阳极电压 120°。若主电路整流变压器仍为 Dy-11 联结，采用上述例题的分析思路，可知同步变压器为 Dy3-9 接法。

## 2.8 实训提高

### 实训 1 三相半波可控整流电路仿真实践

#### 一、实训目的

- 学会使用 MATLAB 进行三相半波可控整流电路模型的搭建和仿真。
- 通过对三相半波可控整流电路的仿真掌握该电路的波形。

#### 二、实训内容

- 三相半波可控整流电路带电阻负载的仿真。
- 三相半波可控整流电路带阻感负载的仿真。

#### 三、实训步骤

(1) 在 MATLAB 界面中找到 SIMULINK(快捷图标为 )并打开，创建一个空白的 SIMULINK 仿真文件，并打开 Library Browser。用 SIMULINK 搭建三相半波可控整流电路的仿真电路图，记录搭建模型图及仿真模型图的过程。

① 建模：根据表 2-3 中的模块名称，在搜索框中搜索需要的模块，并将它放置在文档合适的位置，用导线连接形成建模图，如图 2-53 所示。

表 2-3 主要模块和作用

模块名称	模块外形	作用
AC Voltage Source		用来提供一个交流电压源，相当于变压器的二次侧电源
Thyristor		作为可控开关器件

续表

模块名称	模块外形	作用
Voltage Measurement		检测电压的大小
Scope		观察输入信号、输出信号的仿真波形
Demux		将总线信号分解后输出
Series RLC Branch		电路所需的串联负载
Current Measurement		测量回路中的电流大小
Constant (常数模块)		设定电路中的系数
Three-Phase V-I Measurement (三相电压-电流测量模块)		测量三相回路中的电压和电流
Synchronized 6-Pulse Generator (同步 6 脉冲触发器模块)		输出相隔 60° 的六路双窄脉冲
Ground (地模块)		模拟地

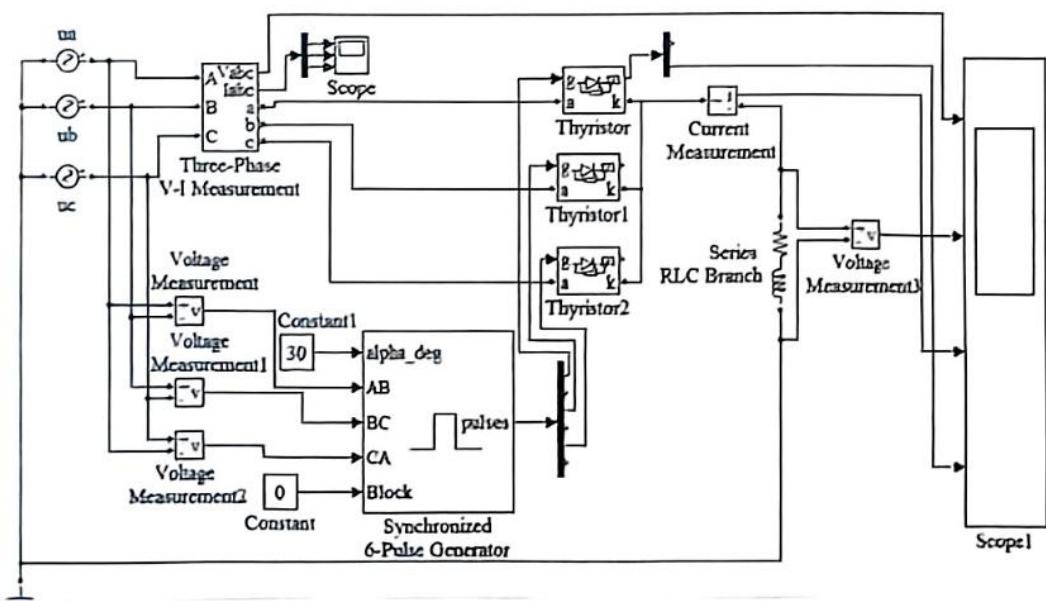


图 2-53 三相半波可控整流电路建模图

注意：不同版本的 MATLAB 的模块所在的组别不同，寻找路径也不同，但是模块名称和模块外形相同，搜索寻找模块最便捷。在放置模块时可通过 Ctrl+R 组合键旋转模块。有的版本的 MATLAB，对于 Series RLC Branch 的外形会根据所选负载性质的改变而改变。

② 模块参数设置：双击相关模块，根据表 2-4 修改模块的参数。另外，不同版本的 MATLAB 的参数设置界面不同，可根据具体情况设置。

表 2-4 主要模块的参数设置

模块名称	参数设置	
AC Voltage Source	$u_a$	将 Peak amplitude 设置为 220；将 Phase 设置为 0；将 Frequency 设置为 50
	$u_b$	将 Peak amplitude 设置为 220；将 Phase 设置为 -120；将 Frequency 设置为 50
	$u_c$	将 Peak amplitude 设置为 220；将 Phase 设置为 -240；将 Frequency 设置为 50
Thyristor	默认值	
Voltage Measurement	默认值	
Scope	将 Scope 的 Number of axes 设置为 3；将 Scope1 的 Number of axes 设置为 4	
Demux	将 Number of outputs 设置为 2（另外 2 个分别为 3 和 6）	
Series RLC Branch	将 Branch type 设置为 R；将 Resistance 设置为 1；将 Inductance 设置为 0；将 Capacitance 设置为 inf	
Current Measurement	默认值	
Constant	将接 Synchronized 6-Pulse Generator 的 BLOCK 端的 Constant 设为 0（若设为大于 0 的数，则 Synchronized 6-Pulse Generator 被封锁，不可使用）；将接 Synchronized 6-Pulse Generator 的 alpha_deg 端的 Constant 设为 $\alpha$	
Three-Phase V-I Measurement	将 Voltage measurement 设置为 phase-to-ground	
Synchronized 6-Pulse Generator	将 Frequency of synchronization voltages（同步电网频率）设置为 50；将 Pulse width（脉宽）设置为 10	

注意：Scope 的 Number of axes 参数根据需要观测的波形数进行设置。在设置控制角时，对 Synchronized 6-Pulse Generator 的 alpha\_deg 端进行设置。例如，设置  $\alpha = 30^\circ$ ，将与 alpha\_deg 端相连的 Constant 设为 30。

③ 系统环境参数设置：在 Simulation 菜单中选择 Simulation Parameters 命令，进行仿真参数设置。在 Simulation Parameters...对话框中设置仿真时间，将 Start time 设置为 0，将 Stop time 设置为 0.08，将 Solver 设置为 ode23tb。

注意：有的版本的 MATLAB 在将 Solver 设置为 ode23tb 时会出错。若出错，则可以将其设为 auto。

④ 运行：在 Simulation 菜单中选择 Start 命令，或者单击快捷运行图标 ▶，对建好的模型进行仿真。

注意：有的版本的 MATLAB 在运行时会自动形成 powergui，若不能自行生成，可在运行前搜索 powergui 模块，并将它拖到建模图内。

(2) 在电阻为  $1\Omega$  的情况下，观察在  $\alpha$  分别为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$  时的相关波形，并记录波形于表 2-5 中。

表 2-5 三相半波可控整流电路电阻负载下的仿真波形记录表

$\alpha$	波 形
0°	
30°	
60°	
90°	
120°	
$\alpha$ 的移相范围为 [ ]	

注意：若需要对波形进行编辑，则可在 MATLAB 的命令行窗口中输入如下代码。

```
set(0,'ShowHiddenHandles','on');set(gcf,'menubar','figure');
```

运行上述代码可打开示波器的编辑窗口，在此窗口中可对波形的线型、坐标轴、标题、颜色、标注等进行设置。

(3) 将负载改为阻感负载（电阻为  $1\Omega$ ，电感为  $0.1H$ ），观察在  $\alpha$  分别为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  时的相关波形，并记录波形于表 2-6 中。

表 2-6 三相半波可控整流电路阻感负载下的仿真波形记录表

$\alpha$	波 形
0°	
30°	
60°	
90°	
$\alpha$ 的移相范围为 [ ]	

注意：将负载设置为阻感负载，只需要将 Series RLC Branch 的 Branch type 设为 RL，对应 Resistance 和 Inductance 设为对应值即可。

(4) 观察三相半波可控整流电路中的 Thyristor2 损坏断路时的输出波形，并分析原因，将结果填入表 2-7。

表 2-7 晶闸管故障分析记录表

项 目	Thyristor2 损坏
建模图	
波形	
原因分析	

#### 四、实训错误分析

在表 2-8 中记录本次实训中遇见的问题与解决方案。

表 2-8 问题与解决方案

问 题	解 决 方 案
1.	
2.	
.....	

#### 五、思考题

对于三相半波可控整流电路的触发脉冲信号，除了用 Synchronized 6-Pulse Generator 来实现，还可以用什么方式实现呢？将分析记入表 2-9。

表 2-9 思考题建模分析记录表

项 目	结 论
脉冲实现方法	
建模图	
输出波形图	

## 实训 2 三相桥式全控整流电路仿真实践

### 一、实训目的

- 学会使用 MATLAB 进行三相桥式全控整流电路模型的搭建和仿真。
- 通过对三相桥式全控整流电路进行仿真掌握该电路的波形，并能通过仿真进行故障分析。
- 通过 FFT 仿真，感性认识整流电路消除谐波的方法。

### 二、实训内容

- 三相桥式全控整流电路带电阻负载的仿真。
- 三相桥式全控整流电路带阻感负载的仿真。
- 故障分析。
- 谐波分析。

### 三、实训步骤

(1) 新建一个空白 SIMULINK 仿真文件，在其中用 SIMULINK 搭建三相桥式全控整流电路的仿真电路图，记录过程。

- ① 建模：具体模块和作用见 2.8 节的实训 1。三相桥式全控整流电路建模图如图 2-54 所示。
- ② 模块参数设置：具体内容见 2.8 节的实训 1。另外，三相桥式全控整流电路需要双窄脉冲触发，在设置 Synchronized 6-Pulse Generator 的相关参数时应勾选 Double pulsing 复选框。
- ③ 系统环境参数设置：具体内容见 2.8 节的实训 1。
- ④ 运行：具体内容见 2.8 节的实训 1。



三相桥式全控整流  
电路 MATLAB 仿真

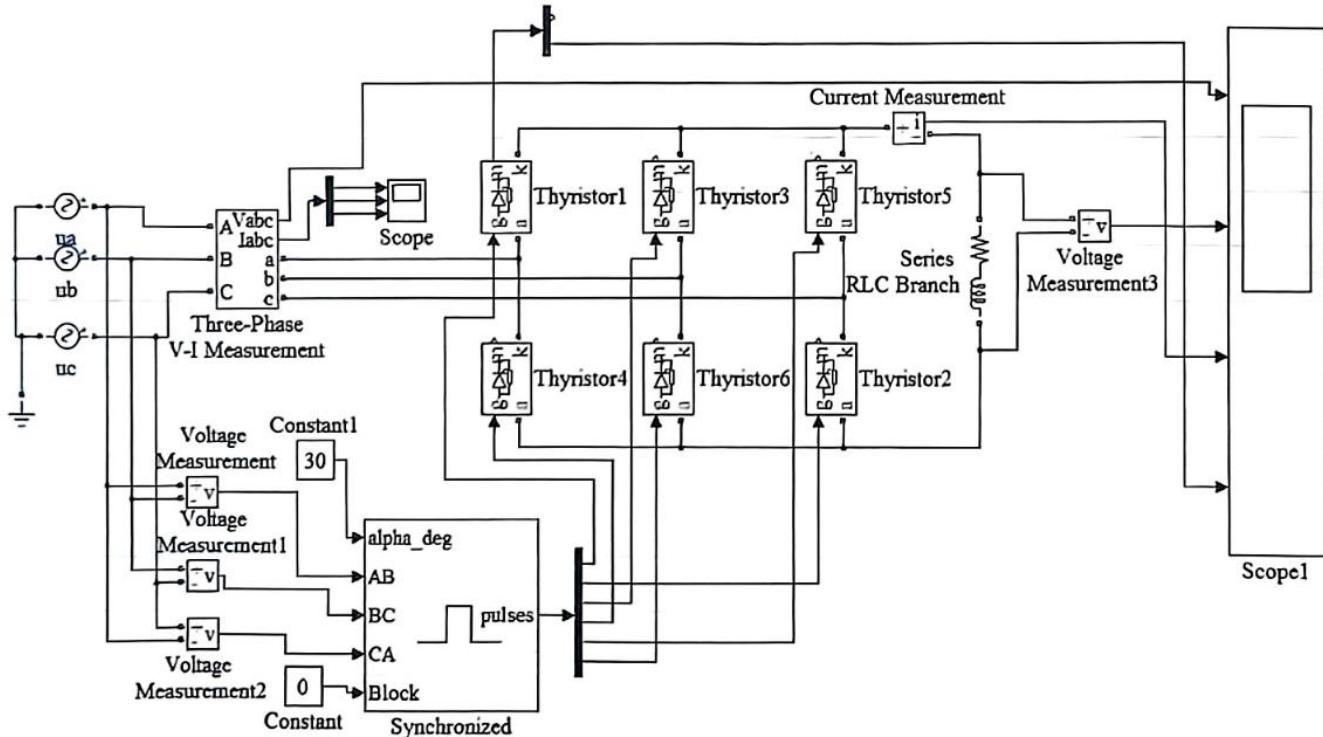


图 2-54 三相桥式全控整流电路建模图

(2) 在电阻为  $1\Omega$  的情况下，观察  $\alpha$  分别为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$  时的相关波形，并记录波形于表 2-10 中。

表 2-10 三相桥式全控整流电路电阻负载下的仿真波形记录表

$\alpha$	波 形
0°	
30°	
60°	
90°	
120°	
$\alpha$ 的移相范围为[ , ]	

注意：若需要对波形进行编辑，则可在 MATLAB 的命令行窗口中输入如下代码。

```
set(0,'ShowHiddenHandles','on');set(gcf,'menubar','figure');
```

运行上述代码可打开示波器的编辑窗口，在该窗口中可对波形的线型、坐标轴、标题、颜色、标注等进行设置。

(3) 将负载改为阻感负载（电阻为  $1\Omega$ ，电感为  $0.1H$ ），观察  $\alpha$  分别为  $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  时的相关波形，并记录波形于表 2-11 中。

表 2-11 三相桥式全控整流电路阻感负载下的仿真波形记录表

$\alpha$	波 — 形
0°	
30°	
60°	
90°	
$\alpha$ 的移相范围为[ , ]	

注意：负载为阻感负载时只需要将 Series RLC Branch 的 Branch type 设为 RL，将 Resistance 和 Inductance 设为相应的值即可。

(4) 观察三相桥式全控整流电路 Thyristor2 损坏断路时的输出波形，并分析原因，结果填入表 2-12。

表 2-12 晶闸管故障分析记录表

项 目	Thyristor2 损坏
建模图	
波形	
原因分析	

(5) 观察三相桥式全控整流电路 A 相电源缺失时的输出波形，并分析原因，结果填入表 2-13。

表 2-13 电源故障分析记录表

项 目	A 相电源缺失
建模图	
波形	
原因分析	

#### 四、实训错误分析

在表 2-14 中记录本次实训中遇见的问题与解决方案。

表 2-14 问题与解决方案

问 题	解 决 方 案
1.	
2.	
.....	

#### 五、思考题

试用 powergui 中的 FFT Analysis 选项分析单相半波可控整流电路、单相桥式可控整流电路、