

普通高等教育 $\frac{\text{电气工程}}{\text{自动化}}$ 系列规划教材

电力电子电机控制 系统仿真技术

洪乃刚 编著



机械工业出版社

本书以电机控制系统为主线介绍 MATLAB 仿真,介绍了 MATLAB/Simulink 仿真平台和模型库,以及按电路和系统结构图建立仿真模型的方法。内容包括控制系统的计算机辅助分析,电力电子电路和交直流调速系统的建模和仿真。书中模型覆盖了自动控制原理、电机和拖动,以及电力电子技术和电力拖动控制系统等课程内容。本书可作为电气工程、自动化等专业和其他电类专业教材,也可供研究生和工程技术人员学习参考。

本书提供电子课件、全部电路和系统模型,请到 <http://www.cmpedu.com> 本书相关页面上下载。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力电子电机控制系统仿真技术/洪乃刚编著.
—北京:机械工业出版社,2013.8
普通高等教育 电气工程 自动化 系列规划教材
ISBN 978-7-111-42876-3

I. ①电… II. ①洪… III. ①电机-控制系统-系统
仿真-高等学校-教材 IV. ①TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 127699 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:于苏华 责任编辑:于苏华

版式设计:常天培 责任校对:程俊巧

封面设计:张 静 责任印制:张 楠

北京京丰印刷厂印刷

2013 年 8 月第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·15.25 印张·374 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-42876-3

定价:29.80 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010)68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010)88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

电力电子和电机拖动控制是电类专业的主要课程，现代电机控制是集电力电子、电机和微处理器控制于一体的复杂系统，电力电子电路和电机的种类多，控制要求不同，为学习、研究、设计和应用都增加了难度。建立在计算机辅助设计基础上的现代仿真技术不需要真实的仪器和设备，在计算机上设计系统并演示系统的运行，不仅对课程学习很有帮助，而且是研究设计的重要手段，掌握仿真技术，将仿真引入教学，对教学改革和创新能力培养有很大意义。

自从《电力电子和电力拖动控制系统的 MATLAB 仿真》和《电力电子、电机控制系统的建模和仿真》两本书出版以来，受到了教师、学生和科技人员的关注，但是这两本科技图书主要是反映电力电子和电力拖动控制系统仿真方面做的一些工作，而且缺少习题和 PPT 课件，不适宜作为教材使用。因此笔者编写了这本教材，希望能为仿真技术在教学中的推广应用发挥更好的作用。

现代自动化的内涵极其丰富，数字控制、网络信息技术改变了自动化的面貌，MATLAB 模型库也在不断更新，现在有关 MATLAB 的论著已经很多。本书从电气工程、自动化专业的教学要求出发，结合教学中的一条主线——电机和拖动控制介绍仿真技术，精选了仿真模型，内容覆盖自动控制原理、电机和拖动，以及电力电子技术和电力拖动控制等课程的仿真应用。

本书第 1 章 MATLAB 及其在自动控制理论中的应用，在 MATLAB 的基础上结合自动控制原理课程介绍了用 MATLAB 命令以传递函数描述系统，画系统根轨迹、伯德图等方法，使学生通过实例学习 MATLAB 命令，也为控制系统提供了计算机辅助分析方法。第 2 章 Simulink 环境和结构图仿真，重点介绍了 MATLAB/Simulink 仿真平台和模型库，以及在 Simulink 仿真平台上根据系统结构图调用模块建立系统仿真模型的方法。结构图是表达控制系统最简洁的方式，使用 Simulink 模块仿真是很实用的技术。第 3 章电力电子模块及其应用介绍了 Simulink 模型库的电力电子模块和变流电路仿真，主要介绍了晶闸管整流电路和直流斩波电路的建模和仿真，关于电力电子逆变器将在第 6 章中结合交流电动机调速介绍。第 4 章变压器和电机模块及其应用中的实例结合了电机和拖动课程内容。第 5 章直流调速、第 6 章交流调速和第 7 章矢量控制是电力拖动控制系统课程的主要内容，涵盖了该课程主要系统的建模。用模型分析和设计系统，将现代仿真技术引入教学是教学创新的一项举措。仿真使复杂的原理变得直观，可以直接反映系统组成部分的功能和控制的效果，是教和学的有益助手，掌握这项技术也可为了研究和设计创造良好的条件。

本书提供电子课件和书中全部电路和系统模型，模型在 MATLAB7.1 版基础上设计制作，与新版 MATLAB 基本兼容，模型名与书中图号对应，如 Fig2x31.mdl 即是第 2 章图 2.31 的模型，在 MATLAB 上打开模型，设置模块参数后就可以运行，书中还提供了模型参考参数，方便读者使用。为了避免重复，减少篇幅，本书对涉及的电路和系统原理仅作扼要说明，重点在仿真上，对电路和系统的详细分析可参考有关教材。关于何时开设该课程，笔者

建议可与自动控制原理和电机拖动等课并行开设，根据教学计划选讲一定章节，使学生尽早掌握仿真方法，之后其他系统的仿真可以布置学生自学进行。章晋武、董德智、谢达伟、丁文鹏、徐杰、汤代斌、蔡公华及郝隆等同志为本书模型做过许多工作，在此深表感谢。

洪乃刚 于安徽工业大学

目 录

前言

第 1 章 MATLAB 及其在控制理论中的应用	1
1.1 计算机仿真与 MATLAB	1
1.2 MATLAB 环境	2
1.2.1 MATLAB 主菜单	3
1.2.2 MATLAB 工具栏	4
1.2.3 MATLAB 命令窗口	5
1.2.4 MATLAB 工作间	5
1.3 MATLAB 计算基础	6
1.3.1 常量和变量	6
1.3.2 数组和矩阵的表示和赋值	7
1.3.3 MATLAB 的算术运算	8
1.3.4 MATLAB 的关系运算	8
1.3.5 MATLAB 的逻辑运算	8
1.3.6 MATLAB 的特殊运算符	8
1.3.7 MATLAB 常用函数	9
1.4 MATLAB 程序设计基础	9
1.4.1 表达式、表达式语句和赋值语句	10
1.4.2 流程控制语句	10
1.5 其他 MATLAB 常用命令	12
1.6 MATLAB 的绘图功能	12
1.6.1 图形窗口	12
1.6.2 二维曲线绘图命令 plot	16
1.6.3 三维曲线和曲面	20
1.7 MATLAB 在控制理论中的应用	21
1.7.1 传递函数表示方法	21
1.7.2 求特征方程的根和根轨迹	22
1.7.3 控制系统频域分析	25
1.8 调速系统传递函数分析	27
1.8.1 典型系统分析	27
1.8.2 直流转速闭环控制系统分析	30
本章小结	34
习 题	34
第 2 章 Simulink 环境和结构图仿真	36
2.1 Simulink 系统仿真环境	37
2.1.1 Simulink 环境的进入	37
2.1.2 Simulink 窗口菜单命令	38

2.2 模型库浏览器	40
2.2.1 Simulink 模型库的打开	41
2.2.2 模块的基本操作	42
2.3 Simulink 仿真步骤和模型建立	45
2.3.1 Simulink 仿真步骤	45
2.3.2 模型的保存和调用	48
2.4 Simulink 的仿真算法	48
2.4.1 可变步长类算法	49
2.4.2 固定步长类算法	50
2.5 示波器的使用和数据保存	50
2.5.1 示波器的参数	51
2.5.2 图形缩放	52
2.5.3 浮动示波器	53
2.6 建立子系统模块	53
2.6.1 建立子系统	53
2.6.2 子系统模型的封装	55
2.7 Simulink 在调速系统中的应用	55
2.7.1 PI 调节器建模和特性研究	55
2.7.2 直流转速控制系统动态结构图仿真	60
本章小结	63
习 题	63
第3章 电力电子模块及其应用	65
3.1 电力电子器件模型	66
3.1.1 二极管模型	66
3.1.2 晶闸管模型	67
3.1.3 可关断晶闸管模型	68
3.1.4 电力场效应晶体管模型	68
3.1.5 绝缘栅双极型晶体管模型	69
3.1.6 理想开关模型	70
3.2 桥式电路模块	70
3.2.1 三相桥式不控整流电路模块	70
3.2.2 三相桥式可控整流电路模块	71
3.2.3 通用桥式电路模块	72
3.2.4 三电平变流器模块	74
3.3 驱动模块	74
3.3.1 同步六脉冲发生器	75
3.3.2 PWM 脉冲发生器	76
3.4 晶闸管整流电路仿真	77
3.4.1 单相半波整流电路仿真	77
3.4.2 单相桥式整流电路仿真	80
3.4.3 三相桥式整流电路仿真	84
3.5 直流 PWM 斩波器仿真	85
3.5.1 直流降压斩波器设计	85

3.5.2 直流升压斩波器设计	87
3.5.3 Cuk 升降压斩波电路仿真	90
本章小结	92
习题	92
第4章 变压器和电机模块及其应用	94
4.1 变压器模型	94
4.1.1 单相变压器	94
4.1.2 单相多绕组变压器	95
4.1.3 三相变压器	96
4.1.4 互感线圈	97
4.1.5 变压器模型应用	98
4.2 直流电机模型	100
4.2.1 直流电机模型结构	100
4.2.2 直流电动机模块的使用	102
4.3 交流异步电机模型	106
4.3.1 三相交流异步电机模型	107
4.3.2 异步电动机特性仿真	109
4.4 交流同步电机模型	113
4.4.1 基本型同步机模型	113
4.4.2 同步电动机模型使用举例	116
4.5 永磁同步电机	121
4.5.1 正弦波永磁电机模型	121
4.5.2 梯形波永磁电机模型	122
本章小结	123
习题	124
第5章 直流调速系统仿真	125
5.1 晶闸管-直流电动机系统模型	125
5.1.1 晶闸管直流开环调速系统模型	125
5.1.2 系统模型参数设置	127
5.1.3 仿真和系统分析	129
5.1.4 谐波分析	132
5.2 转速闭环控制的直流调速系统仿真	134
5.2.1 ASR 采用比例调节器	135
5.2.2 ASR 采用比例-积分调节器	136
5.2.3 带电流截止负反馈的转速闭环调速系统	136
5.3 转速电流双闭环控制直流调速系统仿真	139
5.3.1 按直流双闭环系统动态结构图的仿真	140
5.3.2 使用 SimPowerSystems 模块的直流双闭环系统仿真	142
5.4 直流可逆调速系统建模和仿真	144
5.4.1 直流 PWM 斩波调压可逆调速系统原理	144
5.4.2 PWM 控制模块设计	146
5.4.3 PWM 斩波可逆系统模型和参数	147
5.4.4 双极式控制 PWM 可逆系统仿真	149

5.4.5 受限单极式可逆调速系统仿真	151
5.4.6 转速电流闭环控制直流 PWM-M 可逆系统仿真	152
本章小结	156
习题	156
第 6 章 交流电动机调速系统仿真	157
6.1 SPWM 变频器-异步电动机系统	157
6.1.1 SPWM 变频器-异步电动机系统模型	157
6.1.2 SPWM 变频器-异步电动机系统仿真	158
6.2 恒压频比控制的异步电动机调速系统	162
6.2.1 恒压频比变频调速系统的组成	162
6.2.2 恒压频比控制调速系统模型	162
6.2.3 恒压频比控制调速系统仿真	164
6.3 绕线式异步电动机调速系统	166
6.3.1 绕线式异步电动机串电阻调速系统仿真	166
6.3.2 绕线式异步电动机串级调速系统仿真	167
6.4 永磁同步电动机调速系统仿真	172
6.4.1 梯形波永磁同步电动机调速原理	172
6.4.2 梯形波永磁同步电动机调速系统建模	173
6.4.3 梯形波永磁同步电动机调速系统仿真	175
本章小结	177
习题	177
第 7 章 交流电动机矢量控制系统仿真	178
7.1 三相坐标系/二相坐标系的变换	178
7.1.1 坐标系变换原理	178
7.1.2 坐标系变换模块和使用	179
7.2 异步电动机磁链观察	182
7.2.1 转子磁链的电流模型	182
7.2.2 转子磁链的电压模型	184
7.2.3 转子磁链模型仿真	184
7.3 转差频率控制异步电动机矢量控制系统建模和仿真	187
7.3.1 转差频率控制原理	187
7.3.2 转差频率控制系统模型	188
7.3.3 模型参数和仿真	189
7.4 带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统仿真	191
7.4.1 带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统原理	191
7.4.2 电流滞环控制型逆变器	192
7.4.3 带转矩内环的转速、磁链闭环矢量控制系统建模和仿真	195
7.5 正弦波永磁同步电动机矢量控制系统仿真	198
7.5.1 正弦波永磁同步电动机矢量控制原理	198
7.5.2 正弦波永磁同步电动机矢量控制系统组成和仿真	198
本章小结	201
习题	201
附录	202

附录 A Simulink 模型库	202
附录 B 电力系统模型库	219
参考文献	233

第3章 电力电子模块及其应用

电力电子器件是组成电力电子电路的主要元件，MATLAB/Simulink/SimPower Systems 模型库中包含了常用的电力电子器件模块、整流逆变等电路模块以及相应的驱动控制模块（参见附录二）。电力电子模块可以反映电力电子器件的开关和单向导电性能，这些性能是传递函数模型难以表示的，传递函数仅反映了电力电子器件的放大和控制滞后特性，因此使用这些模块仿真电力电子电路能更真实地反映电路的实际工作情况。

在 MATLAB6.5 以前版本的模型库中，电力电子器件和电路模块的输入和输出端使用有方向的信号接点“>”，输入只能与输出相连接，在 MATLAB7.0 以后的版本中，电力系统模型使用了物理模块（The Physical Modeling Blocks），其特点是模块的电路接点用“□”表示，没有输入与输出的区分，不仅使电路连接方便，而且电流可以双向通过，这符合电路的实际情况，但是驱动信号仍然使用信号接点“>”。因此在 MATLAB6.1 环境中建立的电力电子模型要在 MATLAB6.5 之后版本上运行时，需要将 Version 2 电力系统模型库模块转换为 Version 3 版本的物理模块，转换的方法是使用 psbupdate 函数，在 MATLAB 命令窗口中键入：

```
>>psbupdate('name of the Model to convert') % 键入需转换的模型名
```

之后回车，命令执行后：

1) 以 powerlib 模块代替了原 Version 2 的 powerlib2 模块，模块的输入和输出接点变为“□”。

2) 以电路连线代替了原 Simulink 的信号连线，一些特殊的线，如分支模块的连线需要重新连接。

3) psbupdate 命令会将变换的模型以“原文件名 + updated”保存。

MATLAB 电力电子器件模型使用的是简化的宏模型，它只要求元器件的外特性与实际器件特性基本相符，而没有考虑元器件内部的细微结构，属于系统级模型。这与 SPICE 中的电子元器件模型不同，SPICE 的元件模型较详细、复杂，属于器件级模型。虽然 MATLAB 的电力电子器件模型较为简单，但是它消耗的系统资源较少，用于含电力电子器件的系统仿真时，出现仿真不收敛的几率较小。

开关特性是电力电子器件的主要特性，MATLAB 电力电子器件模型主要描述电力电子器件的开关特性，并且不同电力电子器件模型都具有相似的模型结构，如图 3.1 所示。图中模型由可控开关 SW、电阻 R_{on} 、电感 L_{on} 、直流电压源 V_f 的串联电路和开关逻辑控制单元组成，不同电力电子器件的区别主要在开关逻辑不同，开关逻辑决定了各种器件的开关特征。模型中的电阻 R_{on} 和直流电压源 V_f 分别用来反映电力电子器件的导通电阻和导通时的门槛电压。串联电感限制了器件开关过程中的电流升降速度，模拟器件导通或关断时的动态过程。MATLAB 电力电子器件模型一般都没有考虑器件关断时的漏电

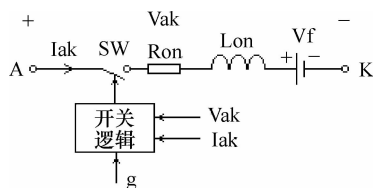


图 3.1 电力电子器件模型

流，这方面 SPICE 模型更细致。

电力电子器件必须连接在电路中使用，也就是要有电流的回路，但是器件的驱动仅仅取决于门极信号的有无，没有电压型和电流型驱动的区别，也不需要形成驱动回路，这是 MATLAB 电力电子器件模型与其他 SPICE 模型的不同之处。尽管模型与实际器件工作有差异，但是也使 MATLAB 电力电子器件模型在与控制模块连接时变得方便。

电力电子器件在使用时一般都并联有缓冲电路，因此在 MATLAB 电力电子器件模型中也已经并联了简单的 RC 串联缓冲电路，缓冲电路的 RC 值可以在参数表中设置，更复杂的缓冲电路则需要另外建立。

MATLAB 的电力电子器件模型中含有电感，因此有电流源的性质，在没有连接缓冲电路时不能直接与电流源或电感相连接，也不能开路工作。含电力电子模型的电路或系统仿真时，仿真算法一般采用刚性积分算法，如 ode15、ode23，这样可以得到较快的仿真速度。

电力电子器件的模块上一般都带有一个测量端 m，通过 m 端可以观测元器件的电压和电流，不仅使检测方便，而且可以为选择元件的耐压值和电流值提供依据。

3.1 电力电子器件模型

3.1.1 二极管模型

二极管图标如图 3.2 所示，它是不控的单向导电型二端半导体器件，二极管的仿真模型同图 3.1，只是模型中开关 SW 采用二极管控制逻辑。当二极管承受正向电压时（ $V_{ak} > 0$ ）二极管导通，当二极管电流下降到零（ $I_{ak} = 0$ ）或承受反向电压时（ $V_{ak} \leq 0$ ）二极管关断。二极管的伏安特性如图 3.3 所示。二极管模型的参数见表 3.1。

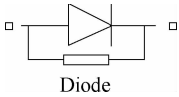


图 3.2 二极管图标

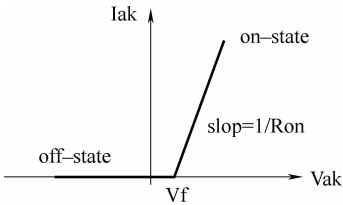


图 3.3 二极管伏安特性

表 3.1 二极管参数

参 数	单 位
导通电阻 R_{on}	Ω (欧姆)
电 感 L_{on}	H (亨利)
正向电压 V_f	V (伏特)
初始电流 I_c	A (安培)
缓冲电阻 R_s	Ω (欧姆)
缓冲电容 C_s	F (法拉)

在二极管参数设置中，当取电感参数为“0”时电阻不能同时取“0”，当电阻参数取“0”时电感参数也不能同时取“0”。在设置了门槛电压 V_f 时，只有当二极管正向电压大于 V_f 后，二极管才能导通。在参数对话框中有初始电流一栏，设置初始电流可以使电路在非零状态下开始仿真。但是初始电流设置是有条件的，首先是二极管电感参数大于 0，其次是仿真电路的其他储能元件也设定了初始值，设定所有其他相关储能元件的初始值是很麻烦

的，所以一般都取初始电流为“0”，使电路在零状态下开始仿真。

模型二极管已并联有 RC 缓冲电路，在缓冲电阻值设为“inf”、缓冲电容设为“0”时，二极管则取消了缓冲电路部分。如果在缓冲电阻不为“0”时，设缓冲电容为“inf”，则是纯电阻的缓冲电路。

MATLAB 中的二极管没有普通二极管、电力二极管、快恢复二极管等的区分，统一为一个模型，不同二极管只能在参数设置上略有不同。

3.1.2 晶闸管模型

晶闸管是可控整流电路的常用元件，在模型库中晶闸管模型有两种（见图 3.4），一种是较详细的模型，其模型名为 Detailed Thyristor，它的可设置参数较多；另一种是简化的模型，模型名为 Thyristor，它的参数较少。晶闸管模型的伏安特性如图 3.5 所示，晶闸管模型在晶闸管承受正向电压（ $V_{ak} > 0$ ），且门极有正的触发脉冲信号（ $g > 0$ ）时导通。触发脉冲的宽度要使阳极电流 I_{ak} 能大于设定的晶闸管擎住电流 I_l ，晶闸管才能正常导通，否则在导通过程中，阳极电流还小于擎住电流时，若门极信号为零（ $g = 0$ ），则晶闸管仍要转向关断。导通的晶闸管在阳极电流下降到零（ $I_{ak} = 0$ ），或者晶闸管承受反向电压时关断，但是晶闸管承受反向电压的时间应大于设置的关断时间 T_q ，否则尽管门极信号为零，晶闸管还可能导通，因为关断时间是表示晶闸管内载流子复合的时间，是晶闸管阳极电流减少为零后到晶闸管能再次施加正向电压而不会误导通的一段时间间隔。

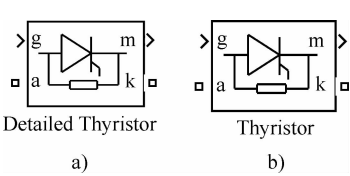


图 3.4 晶闸管图标
a) 复杂模型 b) 普通模型

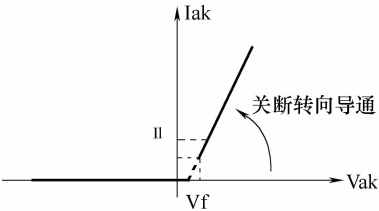


图 3.5 晶闸管模型的伏安特性

晶闸管模型的导通和关断与实际的物理晶闸管有差别，一是只要门极信号大于零，同时满足正向电压条件，晶闸管就能导通；二是阳极电流下降到零（ $I_{ak} = 0$ ）后晶闸管才能关断，而不是阳极电流下降到维持电流以下晶闸管就关断。

晶闸管的简单模型没有擎住电流和关断时间这两项参数，因此在较复杂的电路仿真中使用较为方便。关于初始电流、缓冲电阻和缓冲电容的设置要求与二极管相同。

双击模型图标则弹出模型参数对话框，在对话框中可以设置的晶闸管参数见表 3.2。

表 3.2 晶闸管模型参数

参 数	单 位	备 注	参 数	单 位	备 注
导通电阻 Ron	Ω（欧姆）		关断时间 Tq	s（秒）	普通模型没有
内部电感 Lon	H（亨利）		初始电流 Ic	A（安培）	
正向电压 Vf	V（伏特）		缓冲电阻 Rs	Ω（欧姆）	
擎住电流 Il	A（安培）	普通模型没有	缓冲电容 Cs	F（法拉）	

对含晶闸管模型的电路进行仿真时，仿真算法宜采用 ode23tb 或 ode15s。

3.1.3 可关断晶闸管模型

可关断晶闸管（GTO）与普通晶闸管的区别是可以通过门极信号在任何时间使导通的晶闸管关断。但是 MATLAB 的可关断晶闸管模型在导通和关断的控制要求上与实际的晶闸管有较大不同，可关断晶闸管模型在管子承受正向电压，且门极信号大于零（ $g > 0$ ）时导通，在门极信号等于零（ $g = 0$ ）时关断。实际的可关断晶闸管一旦导通后门极信号可以为零，管子仍保持导通状态，而关断时需要门极有足够的反抽电流才能关断。模型的关断过程分为两段，一段是下降时间 T_f ，一段是电流的拖尾时间 T_t 。在电流的下降时间内电流减小到关断时电流的 10%，再经过一段拖尾时间，电流才下降为零，电流的下降时间和拖尾时间可以在参数中设置。可关断晶闸管的图标和开关特性分别如图 3.6 和图 3.7 所示，模型的参数见表 3.3。

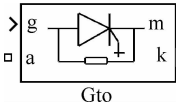


图 3.6 GTO 图标

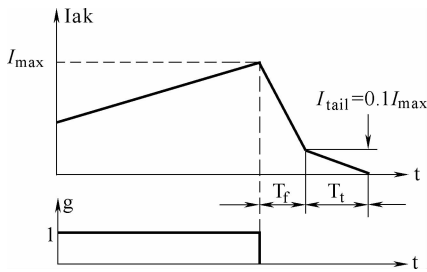


图 3.7 GTO 开关特性

表 3.3 可关断晶闸管模型参数

参 数	单 位
导通电阻 R_{on}	Ω (欧姆)
内部电感 L_{on}	H (亨利)
正向电压 V_f	V (伏特)
电流 10% 下降时间 T_f	s (秒)
电流拖尾时间 T_t	s (秒)
初始电流 I_c	A (安培)
缓冲电阻 R_s	Ω (欧姆)
缓冲电容 C_s	F (法拉)

可关断晶闸管模型也已经并联了 RC 缓冲电路，缓冲电路的设置与二极管模型相同。对带可关断晶闸管模型的电路进行仿真时，仿真算法同样宜采用 ode23tb 或 ode15s。

3.1.4 电力场效应晶体管模型

电力场效应晶体管（MOSFET）具有开关频率高、导通压降小等特点，在电力电子电路中使用广泛。场效应晶体管一般有结型和绝缘栅型两种，MATLAB 的场效应晶体管模型并不区分这两种模型，也没有 P 沟道和 N 沟道之分，它仅仅反映了场效应晶体管的开关特性，是场效应晶体管通用的宏模型。电力场效应晶体管模型的图标和外特性分别如图 3.8 和图 3.9 所示，模型的参数见表 3.4。

场效应晶体管模型在门极信号为正（ $g > 0$ ），且漏极电流 $I_d > 0$ 时导通，在门极信号为零时关断。场效应晶体管模型上反并联了一个二极管，因此在外特性上，正向导通状态的导通电阻是 R_{on} ，而外特性中的反向导通是二极管导通，导通电阻是二极管的电阻 R_d 。

参数中的缓冲电阻和缓冲电容的设置与二极管相同。

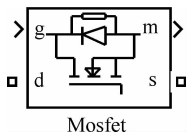


图 3.8 MOSFET 图标

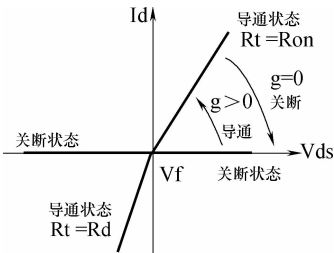


图 3.9 MOSFET 外特性

表 3.4 电力场效应晶体管模型参数

参 数	单位
导通电阻 Ron	Ω (欧姆)
导通电感 Lon	H (亨利)
寄生二极管电阻 Rd	Ω (欧姆)
寄生二极管正向电压 Vf	V (伏特)
初始电流 Ic	A (安培)
缓冲电阻 Rs	Ω (欧姆)
缓冲电容 Cs	F (法拉)

3.1.5 绝缘栅双极型晶体管模型

绝缘栅双极型晶体管（IGBT）结合了场效应晶体管和电力晶体管的优点，具有驱动功率小、开关速度快、通流能力强的特点，目前已经成为中小功率电力电子设备的主导器件。IGBT 模型有两种，一个是并联缓冲电阻和电容的模型（图 3.10a），一个是反并联二极管的模型（见图 3.10b）。绝缘栅双极型晶体管模型的外特性如图 3.11 所示。模型参数见表 3.5。

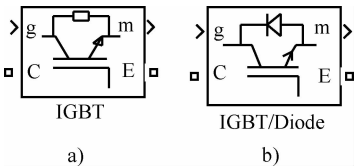


图 3.10 IGBT 图标
a) 图标 1 b) 图标 2

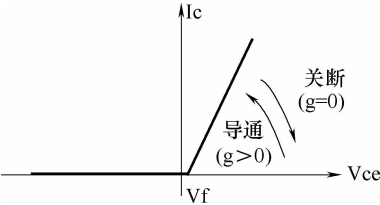


图 3.11 IGBT 外特性

表 3.5 IGBT 模型参数

参 数	单位	备注
导通电阻 Ron	Ω (欧姆)	带反并联二极管模型仅有导通电阻、缓冲电阻和缓冲电容三项参数
导通电感 Lon	H (亨利)	
正向电压 Vf	V (伏特)	
电流 10% 下降时间 Tf	s (秒)	
电流拖尾时间 Tt	s (秒)	
初始电流 Ic	A (安培)	
缓冲电阻 Rs	Ω (欧姆)	
缓冲电容 Cs	F (法拉)	

IGBT 模型在集射极间电压为正（ $V_{ce} > 0$ ），且有门极信号（ $g > 0$ ）时导通；即使集射极间电压为正（ $V_{ce} > 0$ ），但是门极信号为零（ $g = 0$ ），IGBT 也关断。如果 IGBT 集射极间电压为负（ $V_{ce} < 0$ ），则管子处在关断状态，但实际 IGBT 因为内部已并联了反向二极管，所以在 IGBT 集射极间电压为负时也反向导通。

IGBT 模型的开关特性如图 3.12 所示。IGBT 在关断时，包括电流下降和电流拖尾两段时间，在下降时间内电流减小到关断前的 10%，再经过一段电流的拖尾时间，IGBT 才完全关断。IGBT 的电流下降时间和拖尾时间可以在参数对话框中设置。

有 RC 缓冲电路的 IGBT 模型，缓冲电阻和电容的设置与其他器件相同。

3.1.6 理想开关模型

理想开关（Ideal Switch）是 MATLAB 特设的一种电子开关，其图标和伏安特性分别如图 3.13 和图 3.14 所示。理想开关的特点是开关受门极控制，开关导通时电流可以双向通过。理想开关的模型比较简单，它仅由开关 SW 和电阻 Ron 组成，SW 由开关逻辑控制。当门极信号 $g=0$ 时，无论开关受正向还是反向电压，开关都关断；当门极信号 $g>0$ 时，无论开关受正向还是反向电压，开关都导通。在门极触发时开关动作是瞬时完成的。理想开关模型的参数设置见表 3.6。其初始状态一栏，如果起动仿真时开关应是接通状态，则设为“0”；如果起动仿真时开关应是断开的，则设为“1”。缓冲电阻和电容的设置与前面相同。

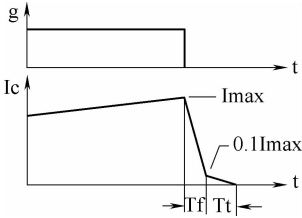


图 3.12 IGBT 的开关特性

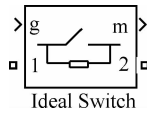


图 3.13 理想开关图标

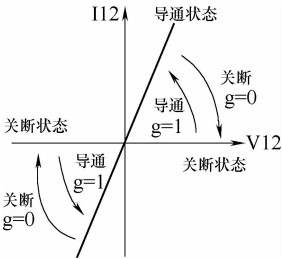


图 3.14 理想开关伏安特性

表 3.6 理想开关模型参数

参 数	单 位
导通电阻 Ron	Ω （欧姆）
初始状态	导通“0”，关断“1”
缓冲电阻 Rs	Ω （欧姆）
缓冲电容 Cs	F（法拉）

理想开关在仿真中可以作为断路器使用，设计适当的门极驱动，也可以作为简单的半导体开关如 GTO、MOSFET 等用于电流斩波控制。

3.2 桥式电路模块

桥式变流电路是最常用的电路，MATLAB 模型库提供了不控的和可控的两种三相桥式整流电路模型，以及功能更强的通用模块，但有的 7.0 版本模型库中整流桥模型还用用的是旧模块，使用时需要将它转换为带电路接口的模块。

3.2.1 三相桥式不控整流电路模块

三相桥式不控整流电路由六个二极管按桥式连接组成，如图 3.15 所示。它有三个输入端，分别是 A、B、C，用于连接三相电源或整流变压器的三相输出；它的两个输出端 K 和 A 输出整流后的直流电压，其中 K 端为“+”，A 端为“-”。模型参数见表 3.7。不控整

流电路模型实际设置的是二极管参数，其中 RC 缓冲电路的设置也与二极管相同。

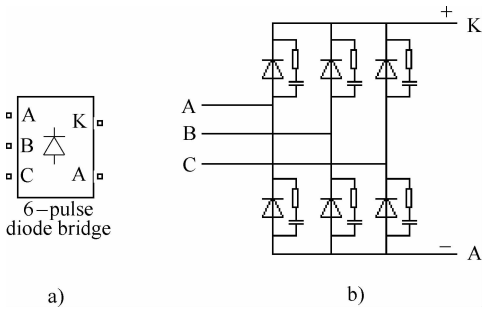


图 3.15 三相不控桥模块
a) 图标 b) 电路

表 3.7 三相桥式不控整流电路参数

参 数	单 位
二极管通态电阻	Ω (欧姆)
二极管通态电感	H (亨利)
正向电压	V (伏特)
缓冲电阻	Ω (欧姆)
缓冲电容	F (法拉)

3.2.2 三相桥式可控整流电路模块

三相桥式可控整流电路由六个晶闸管作桥式连接而成，其图标和电路如图 3.16 所示。使用时，模块的 A、B、C 三个输入端连接三相电源或三相变压器的二次侧；它的两个输出端 K 和 A 输出整流后的直流电压，其中 K 端为“+”，A 端为“-”。模块的脉冲输入端 pulses 用于接入晶闸管的触发信号，三相桥式可控整流电路模块有专用的触发模块，这将在 3.3 小节（驱动模块）中介绍。

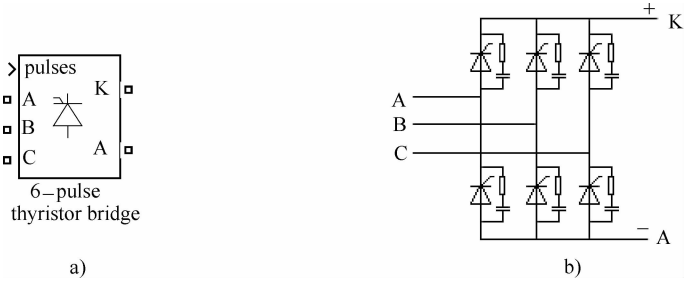


图 3.16 三相桥式可控整流电路和图标
a) 图标 b) 三相桥式可控整流电路

三相桥式可控整流电路模块是由六个单个晶闸管模块连接的分支电路，如图 3.17a 所示，模块上没有留出测量的端口，在分支电路中已经将晶闸管的测量端封闭，这在需要观察晶闸管的电压和电流时很不方便。为了便于观测晶闸管的电压和电流，可以对模型略作修改，方法如下：单击选中的可控整流模块，在 Edit 菜单下选中 Look under mask，则可调出图 3.17a 所示的整流电路模型，如要观测某一晶闸管的电流电压，则将该晶闸管模型测量端的“山”字形封口删除，换接上分支电路的输出端口即可，如图 3.17b 所示。修改后的三相桥式可控整流电路图标上增加了测量端，使用此测量端可以观测指定的晶闸管承受的电压和电流。

在晶闸管三相可控整流模块中可设置的参数有晶闸管的通态电阻和通态电感，以及缓冲电阻和电容（见表 3.8），缓冲电阻和缓冲电容的设置要求与前相同。

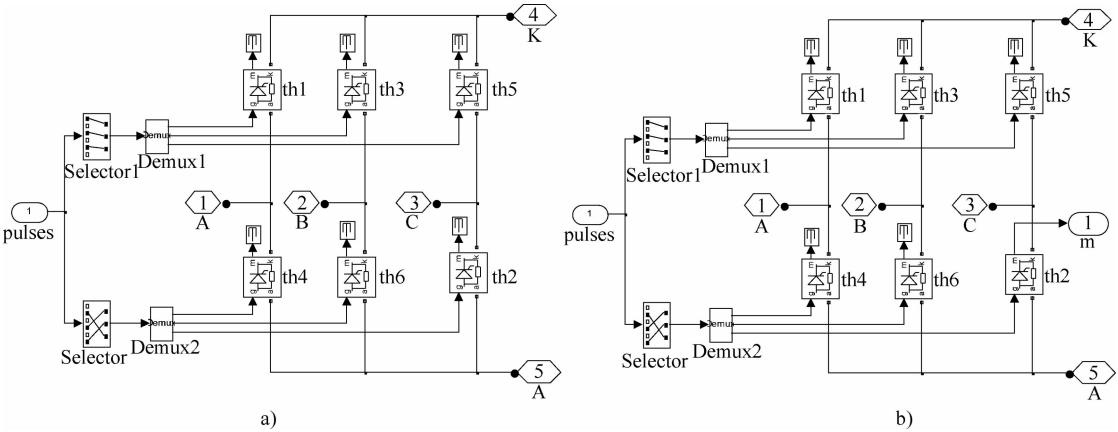


图 3.17 三相桥式整流模块分支模型
a) 三相桥式整流电路模型 b) 晶闸管 th5 引出测量端

表 3.8 三相桥式可控整流模块参数

晶闸管参数	单位	晶闸管参数	单位
导通电阻	Ω (欧姆)	缓冲电阻	Ω (欧姆)
导通电感	H (亨利)	缓冲电容	F (法拉)

3.2.3 通用桥式电路模块

通用桥式电路模块 (Universal Bridge) 是一个功能很强的特殊模块，模块图标如图 3.18 所示，它既可以用于整流也可用于逆变，且桥臂数和开关器件都可以选择。单击通用桥模块图标，弹出图 3.19 所示的模块对话框。在对话框中，第 1 栏是选择模块桥臂的相数，有三种相数可供选择，选择“1”是半桥式电路，选择“2”是单相桥式电路，选择“3”是三相桥式电路；对话框的第 4 栏选择变流器使用的电力电子开关种类，有 MATLAB 模型库的六种开关可以选择，即二极管、晶闸管、GTO、MOSFET、IGBT 和理想开关。开关器件的参数、缓冲电阻和电容同样可在对话框中选择。缓冲电路和开关器件的参数设定与单个电力电子器件开关参数的设定相同，不过通用模块中可设置的参数较少。如果在最后一栏选择了测量项则可以用多路测量仪 multimeter 观测开关器件的电压和电流波形。

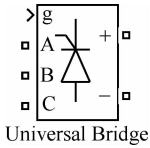


图 3.18 通用桥模块图标

通用桥模块在选择晶闸管器件时，电路结构和器件编号如图 3.20 所示，在选择 GTO、MOSFET、IGBT 和理想开关时，电路结构和器件编号如图 3.21 所示。两种情况下器件的编号顺序不同，而模块驱动脉冲输入端的输入脉冲是与器件的编号顺序相对应的，对一个桥臂的半桥电路，驱动脉冲顺序是 Q_1 、 Q_2 ，对 2 个桥臂的单相桥电路，驱动脉冲顺序是 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 ；对 3 个桥臂的三相桥电路，驱动脉冲顺序是 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 、 Q_6 。对于自关断器件，模块已在其上反并联了续流二极管。

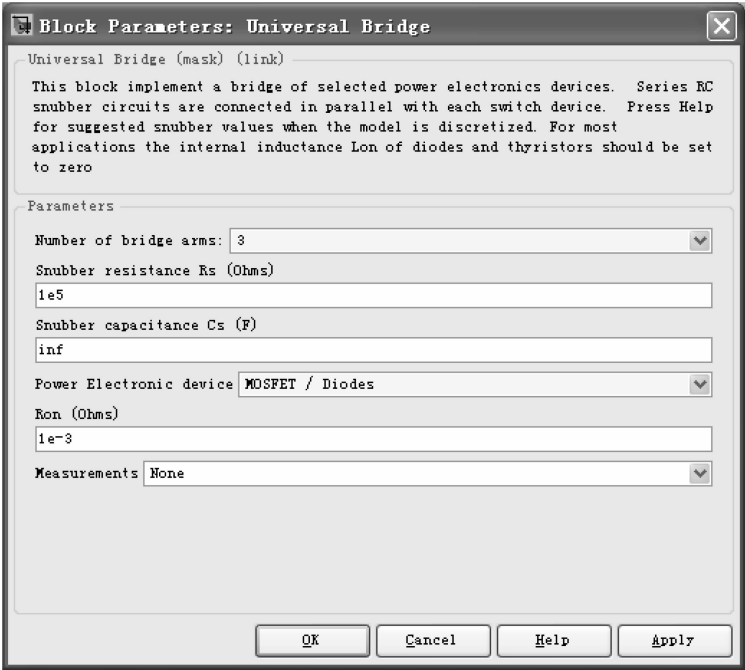


图 3.19 通用桥模块对话框

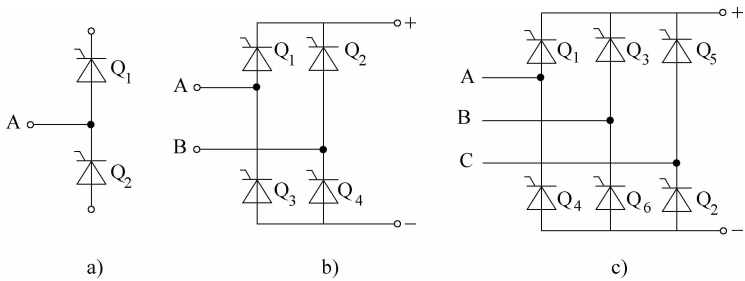


图 3.20 通用桥晶闸管类器件电路结构

a) 半桥 b) 单相桥 c) 三相桥

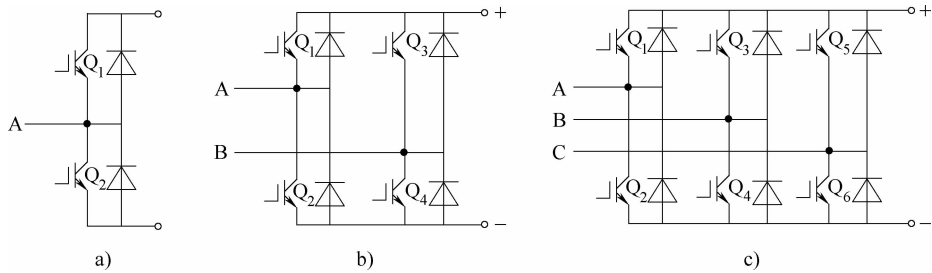


图 3.21 通用桥可关断类器件电路结构

a) 半桥 b) 单相桥 c) 三相桥

3.2.4 三电平变流器模块

三电平变流器模块（Three-Level Bridge）的电路结构如图 3.22 所示，在图 3.23 所示的模块对话框中，开关器件有 GTO、MOSFET、IGBT 和理想开关四种可以选择，变流器的相数也可以在对话框中设定。如果选定的是 GTO、MOSFET、IGBT 器件，电路结构如图 3.22a 所示，变流器每相由四个开关组成，每相有三种工作状态。选用理想开关时，电路结构如图 3.22b 所示。在模块图标 g 端输入驱动脉冲的顺序为 Q_{1a} 、 Q_{2a} 、 Q_{3a} 、 Q_{4a} 、 Q_{1b} 、 Q_{2b} 、 Q_{3b} 、 Q_{4b} 、 Q_{1c} 、 Q_{2c} 、 Q_{3c} 、 Q_{4c} 。但对于采用理想开关时的三电平电路，脉冲 Q_1 驱动开关 SW_1 ，脉冲 Q_4 驱动开关 SW_2 ，脉冲 Q_2 和 Q_3 经过“与门”驱动开关 SW_3 。

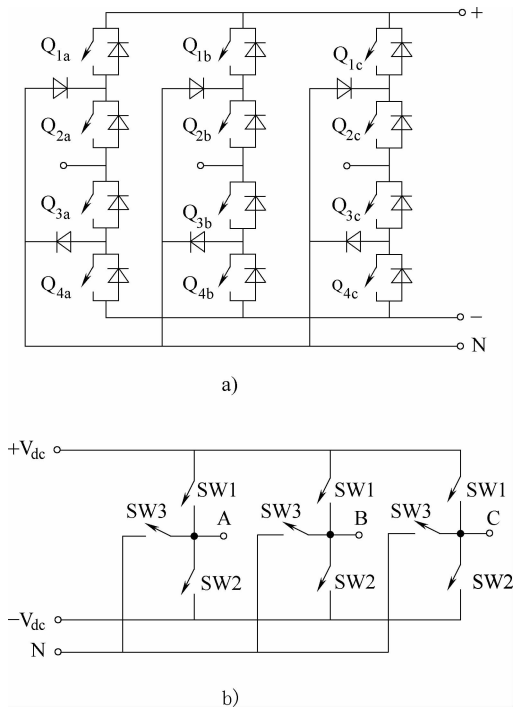


图 3.22 三电平变流器

a) 可关断器件电路 b) 可控开关电路

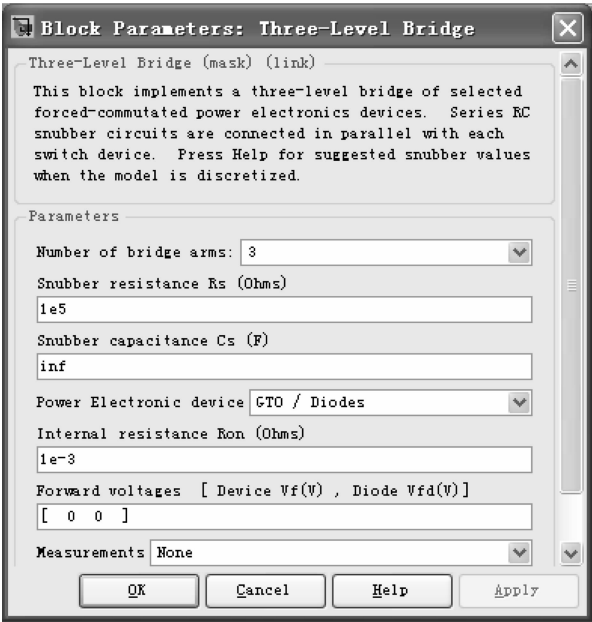


图 3.23 三电平变流器对话框

3.3 驱动模块

电力电子器件工作时都需要有正确的门极控制信号，产生控制信号的驱动电路是电力电子电路必有的组成部分，且晶闸管和其他自关断电力电子器件的驱动要求不同。因此 MATLAB 的电力系统模型库提供了两种驱动模块，一种是针对晶闸管电路的，另一种是适用于自关断器件电路的。MATLAB 电力电子器件模型的驱动要求与实际物理器件的驱动要求不同，实际物理器件的驱动要求信号有一定的强度，即要有一定的电压和电流，而模型的驱动仅仅是在于门极信号的有无，因此 MATLAB 驱动模块是原理性的宏模型。

3.3.1 同步六脉冲发生器

同步六脉冲发生器（Synchronized 6-Pulse Generator）用于产生三相桥式整流电路晶闸管的触发脉冲，在一周期内产生六个触发信号，触发信号之间的间隔是 60° 。

六脉冲发生器模块有五个输入端，一个输出端，如图 3.24 所示。输入端 alpha-deg 用于输入移相控制角的大小，控制角的单位是 “ $^\circ$ ”。控制角既可以是固定值，也可以是变化值。固定的控制角可以用常数模块来设定，变化的控制角一般由控制电路产生。

输入端 AB、BC、CA 用于接入同步信号。同步的作用是使触发器产生的触发信号与整流主电路晶闸管需要被触发的时刻相一致，并且要保证三相桥六个晶闸管按规定的顺序依次触发，因此同步信号要与晶闸管主电路的三相电源保持一定的相位关系，这一般用同步变压器来调整。六脉冲发生器产生的六相触发脉冲与输入同步电压的相位关系如图 3.25 所示。图中上方是三相同步信号 u_{AB} 、 u_{BC} 、 u_{CA} ，下面依次是 $VT_1 \sim VT_6$ 六个晶闸管的触发脉冲（图示为双脉冲触发），相邻两个晶闸管的触发相隔 60° 。

三相桥式整流电路有两种触发方式，即宽脉冲触发和双脉冲触发，可以在对话框中选择采用哪种触发方式。双击三相桥模块，弹出对话框（见图 3.26），在对话框中选中 Double pulsing，则为双脉冲触发，否则为宽脉冲触发方式。同时在对话框中还可以设定脉冲的宽度和重复频率。图 3.25 采用的是双脉冲触发方式，即在下一个晶闸管触发的同时给前一个晶闸管补一个脉冲，以保证在电流断续时，整流器上下桥臂都各有一个晶闸管同时导通。

模块的第 5 个输入端 Block 用于控制触发脉冲的输出，该端置 “0”，则有脉冲输出；置 “1”，则没有脉冲输出，整流器也不会工作。该端可以用作过电流保护和直流可逆系统中整流器的工作状态选择。

六个晶闸管触发脉冲信号由模块的输出端 pulses 输出，使用时只要将该输出端与三相桥式整流电路模块（见图 3.16a）的脉冲输入端 pulses 连接即可，对通用桥模块（见图 3.18）则与脉冲输入端 g 连接。

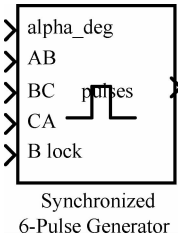


图 3.24 六脉冲发生器图标

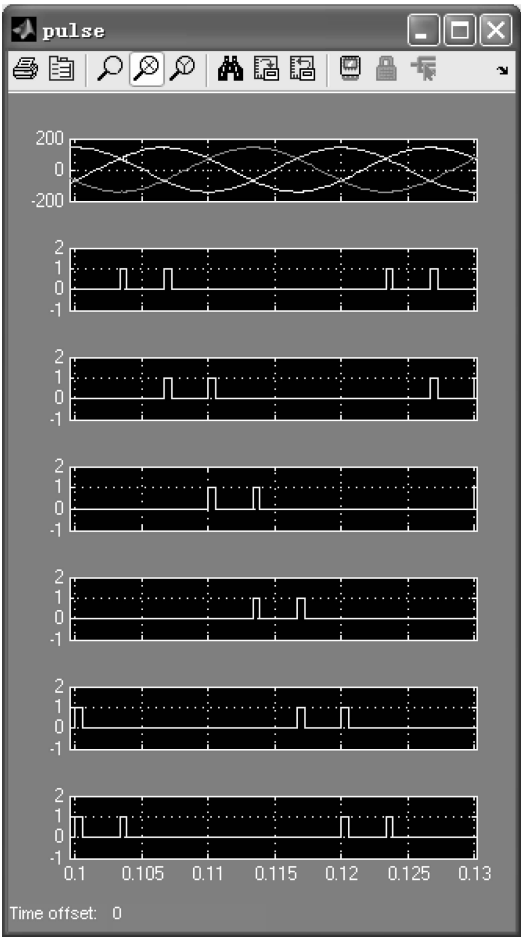


图 3.25 同步电压与触发脉冲相位关系

3.3.2 PWM 脉冲发生器

PWM 脉宽调制方式在逆变器控制中使用很普遍，并且现在在整流电路中也开始应用。

PWM 脉冲发生器 (PWM Generator) 的图标如图 3.27 所示。MATLAB 模型库提供的 PWM 脉冲发生器是一个多功能模块，它可以为 GTO、MOSFET、IGBT 等自关断器件组成的一相、二相和三相桥式变流电路提供驱动信号，并且还可以用于双三相桥式电路 (12 脉冲) 的驱动，这些可以在模块对话框中模式 (Generator Mode) 一栏选择，如图 3.28 所示。

PWM 脉冲发生器脉宽调制的原理是以三角波 (载波) 与调制波进行比较，在三角波与调制波的相交处产生脉冲的前后沿，如图 3.29 所示。三角波的频率可以在对话框中设置，且三角波的幅值固定为 ± 1 。调制波有两种产生方式，一种是由 PWM 脉冲发生器自动生成，另一种是在脉冲发生器输入端由外部输入。单击对话框的 Internal generation of modulating signal (s) (内调制信号生成) 前的方块，则选中了内调制信号生成模式，对话框中将显示调制度、输出电压频率和输出电压相位三项参数设置栏。在采用内调制信号生成模式时，调制波固定为正弦波，即 SPWM 调制方式，设置的调制度、输出电压频率和输出电压相位三项参数是内部产生的调制正弦波参数。选中内调制信号生成方式后，模块的输入端不需要连接。选择外部输入调制信号时，调制波的频率和相位则由外部输入的信号波形决定，外部输入的信号波形幅值在 ± 1 之间。

图 3.29 是一相半桥式电路采用正弦脉宽调制时的示意图。这时脉冲发生器输出两个脉冲 pulse 1 和 pulse 2，分别对应驱动一相桥 (A 相) 的上桥臂开关器件 1 和下桥臂开关器件 2，脉冲 pulse 1 和 pulse 2 是互补的 (见图 3.29b)。当在对话框中选择二相桥式电路时，脉冲发生器依次输出四个脉冲 (pulse 1、pulse 2、pulse 3、pulse 4)。当在对话框中选择三相桥式电路时，脉冲发生器依次输出六个脉冲 (pulse 1、pulse 2、pulse 3、pulse 4、pulse 5、pulse 6)，脉冲 pulse 1 和 pulse 2 用于驱动 A 相桥臂的两个开关器件，pulse 3 和 pulse 4 用于驱动 B 相桥臂的两个开关器件，pulse 5

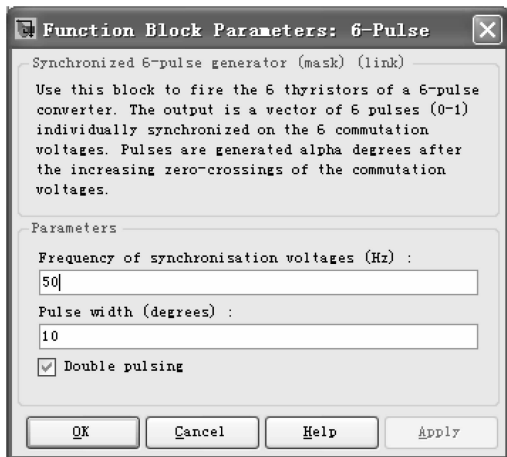


图 3.26 六脉冲发生器对话框

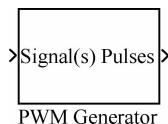


图 3.27 PWM 脉冲发生器图标

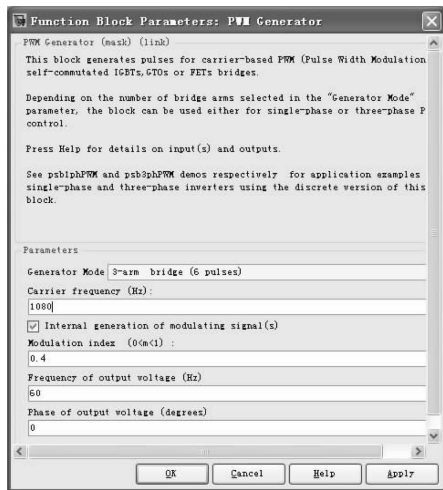


图 3.28 PWM 脉冲发生器对话框

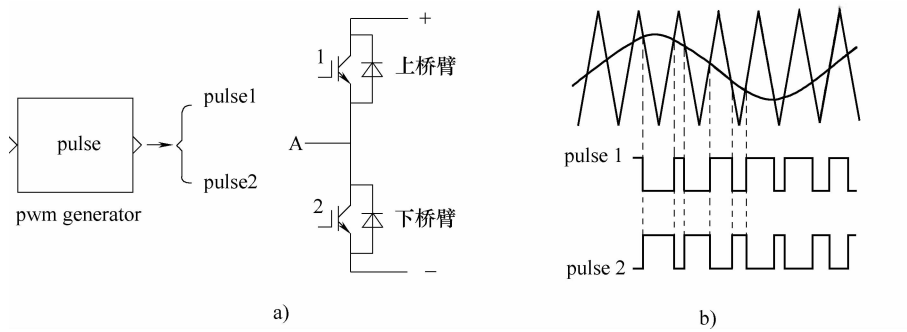


图 3.29 一相桥臂与驱动脉冲
a) 一相桥臂 b) 驱动脉冲

和 pulse 6 用于驱动 C 相桥臂的两个开关器件，且单数脉冲驱动上桥臂开关器件，双数脉冲驱动下桥臂开关器件，参见图 3.21。在使用时只需要将脉冲发生器的 pulse 输出端与通用桥模块输入端 g 相连接即可。

3.4 晶闸管整流电路仿真

整流电路的作用是将交流电变换为直流电，这是电气仪器和设备中最常见的电路。一个整流电路包括电源、整流器、触发器和负载，在仿真时电源必须采用 SimPower Systems/Electrical Sources 模型库的电源模块，Electrical Sources 模型库提供了多种直流和交流电源，其中交流电源又有单相和三相可供选择。整流器也有单相和多相电路之分，除单相半波和三相半波电路需要用单个晶闸管模块搭建外，桥式整流电路仿真使用通用桥式模块是最方便的。触发器是整流器工作的必备控制单元，模型库提供了一个同步六脉冲发生器，适用于三相桥式整流电路的驱动触发，但是经处理也可用于其他电路的驱动。下面以一个半波整流电路仿真实例介绍模块的基本使用方法，以单相桥式整流电路和三相桥式整流电路仿真实例介绍系统的建模方法并对仿真结果进行分析。

3.4.1 单相半波整流电路仿真

1. 建立模型

晶闸管单相半波整流电路原理图如图 3.30 所示，在 SimPower System 模型库中提取交流电源 (us)、晶闸管 VT 和 RLC 负载模块 Series RLC Branch 到 Simulink 仿真平台上，并连接组成整流主电路（见图 3.31），模块的提取路径见表 3.9。整流电路的电压和电流检测要使用电压检测模块 Voltage Measurement 和电流检测模块 Current Measurement，模型中用 Voltage Measurement 模块检测交流电源电压，用 Voltage Measurement1 检测直流侧电压，用 Current Measurement 模块检测直流侧电流，用平均值模块 Mean Value 计算电压和电流的平均值。因为模型库中没有单相电路专用的触发器，模型中晶闸管触发使用了三相整

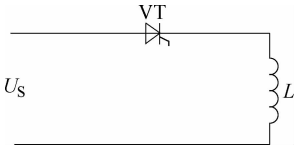


图 3.30 单相半波整流原理图

流触发模块 Synchronized 6-Pulse Generator，将发生器模块的同步信号 AB 端连接电源电压测量模块 Voltage Measurement，BC、CA 和 Block 端接“0”信号，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 。六脉冲发生器输出有六路触发脉冲，单相半波整流只有一个晶闸管，只需使用其中一路，因此将输出 pulses 信号经 Demux 模块分解，然后选择其中第六路信号用于晶闸管触发，其他五路输出可以悬空或封闭起来。模型用示波器 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 分解后分别观测。

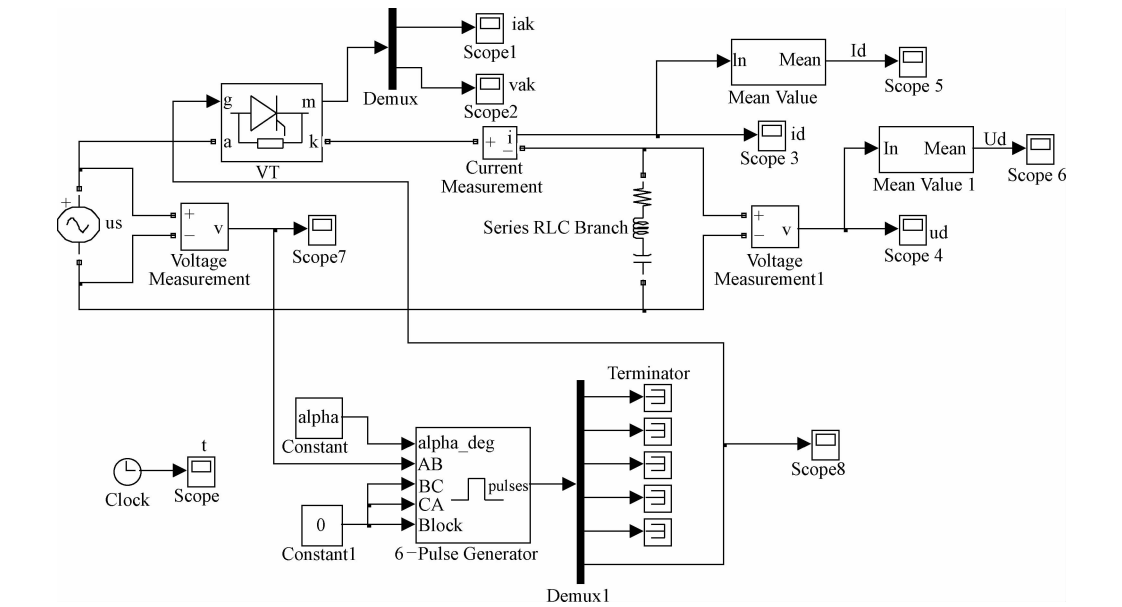


图 3.31 单相半波整流电路模型

表 3.9 单相半波整流电路模型使用模块路径

模块名	提取路径
交流电压源 us	SimPower Systems/ Electrical Sources/AC Voltage Source
晶闸管 VT	SimPower Systems/ Power Electronics/Detailed Thyristor
触发器 6-Pulse Generator	SimPower Systems /Extra Library/Control/Synchronized 6-Pulse Generator
示波器 Scope	Simulink/Sink/Scope
控制角给定 Constant	Simulink/Commonly Used Block /Constant
时钟 Clock	Simulink/Sources/Clock
信号分解 Demux	Simulink/Signals Routing /Demux
负载 Series RLC Branch	SimPower Systems/Elements/Series RLC Branch
电流检测 Current Measurement	SimPower Systems /Measurements/Current Measurement
电压检测 Voltage Measurement	SimPower Systems /Measurements/Voltage Measurement
平均值计算 Mean Value	SimPower Systems/Extra Library/Mean Value

2. 模型仿真

(1) 模块参数

晶闸管模块使用模块蕴含的参数，Series RLC Branch 模块可以根据需要选择电阻或阻感等组合，电源、触发器和负载参数见表 3. 10。

表 3. 10 单相半波整流模块参数

模 块 名	主要参数名	设置参数值
交流电压源 us	Peak amplitude (V)	220 * sqrt (2)
	Frequency (Hz)	50
触发器 6-Pulse Generator	Frequency (Hz)	50
	Amplitude	1
	Pulse width (degrees)	1
	Double Pulsing	未选
负载 Series RLC Branch	电阻负载	R = 2Ω
	电感负载	L = 10mH
平均值计算 Mean value	Averaging period (s)	0. 02
控制角给定 Constant	0 ~ 180°	

(2) 仿真参数

仿真时间：0 ~ 0. 2s，仿真算法：ode45。

3. 仿真和分析

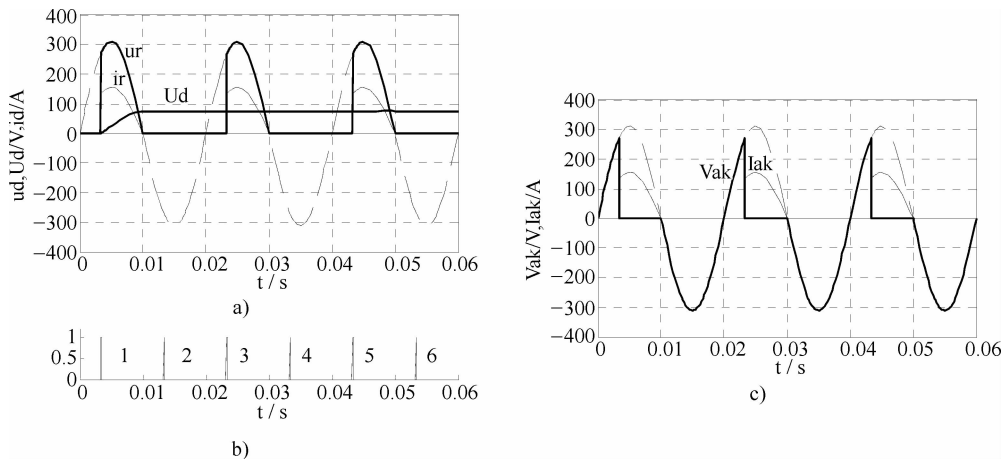
【例 3. 1】 用图 3. 31 模型观察单相半波整流电路在电阻和纯电感负载时的工作情况。

(1) 电阻负载

在图 3. 31 模型上打开负载模块 Series RLC Branch 对话框，在 Branck type 栏中选择，并设 R = 2Ω，在 Constant 模块中设定 alpha = 60°，启动仿真，仿真结果如图 3. 32 所示，图中波形用 plot () 命令绘制，命令如下：

```
>>Plot (t, us, t, ud, t, id, t, Ud)           % 电阻电压、电流和电压平均值波形
>>Plot (t, pulse)                             % 触发脉冲波形
>>Plot (t, vak, t, iak)                       % 晶闸管电压电流波形
```

图 3. 32a 为整流器输出电压 ud，电流 id 和整流电压平均值 ud 的波形，在电源的正半周时 (0 ~ 0. 01s)，触发器发出第一个脉冲使晶闸管导通，如图 3. 32b 所示，负载电压 ud = us，电流 id = us/R；在 0. 01s 时，电源电压 us = 0，电流 id = 0，晶闸管关断。在触发器产生第二个脉冲时，电压 us 在负半周 (0. 01 ~ 0. 02s)，晶闸管受反向电压不能导通。电源电压的第二、三周期，晶闸管工作情况与第一周期相同。图 3. 32c 是晶闸管两端电压 vak 和电流 iak 的波形，在晶闸管导通区间电压近似为零，晶闸管关断时所承受的电压为交流电源电压。从波形可见晶闸管承受的最大反向电压为电源电压的峰值，即 $\sqrt{2} \times 220V = 311V$ ，因为晶闸

图 3.32 $\alpha = 60^\circ$ 电阻负载的波形a) 负载电压电流波形 b) 控制角 $\alpha = 60^\circ$ c) 晶闸管电压, 电流波形

管与负载串联, 所以通过晶闸管的电流与负载电流相同。图 3.33 是 α 分别为 0° 、 90° 、 120° 的工作情况, 比较这些电压波形可以看到, 随控制角增加, 整流器输出电压减小, 晶闸管控制角的移相范围为 $0 \sim 180^\circ$ 。整流电压仿真值与计算值的比较见表 3.11, 可以看出仿真与计算结果相符, 通过仿真可以采用波形方式观察整流电路各部分的工作情况, 这对电路的设计和分析都是很有用的。

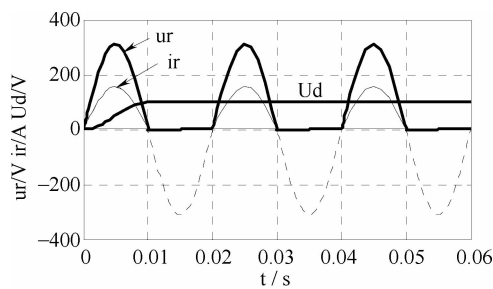
(2) 电感负载

将 Series RLC Branch 模块参数设为 $L = 10\text{mH}$, 重新启动仿真可得单相半波整流器在电感负载时的工作波形, 如图 3.34 所示, 与图 3.33 电阻负载波形相比, 电感两端电压 u_d 的波形出现“+”和“-”, 在纯电感时 u_d 波形的正负半周面积相同, 即 u_d 的平均值为零, 为了使纯电感负载时电压不为零, 一般需要在负载两端并联续流二极管。随控制角增加, 晶闸管的导通时间减小, 电流 i_d 减小。在 u_d 波形的正半周, 电压和电流的方向相同, 电感储存电能; 在电压波形的负半周, 电压和电流的方向相反, 电感释放储能。在一个周期中电感释放和储存的能量相同, 单相半波整流电路电感负载控制角的移相范围为 $0 \sim 180^\circ$ 。

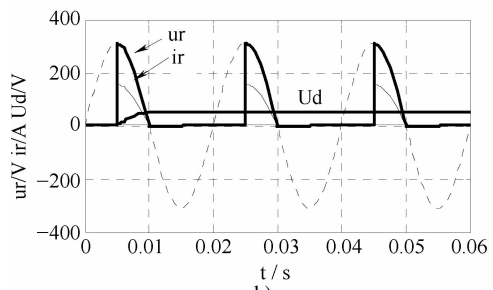
3.4.2 单相桥式整流电路仿真

1. 单相桥式整流电路模型

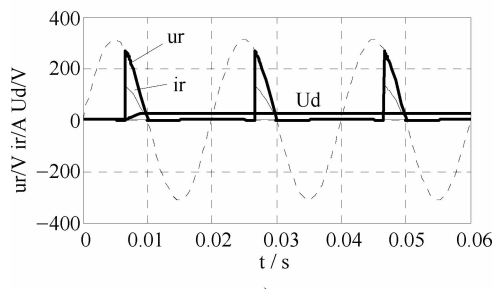
单相桥式整流电路模型可以用四个晶闸管模块连接组成, 也可以使用通用桥模块 (Universal Bridge), 当然使用 Universal Bridge 最方便。图 3.35 是采用通用桥模块构建的单相桥式整流电路模型, 在 Universal Bridge 设置 (见图 3.19) 中选择相数为 2, 电力电子器件为 thyristor。Universal Bridge 的交流侧 A、B 端连接电源模块 us, 直流侧连接负载模块 Series RLC Branch。整流电路触发也使用三相同步六脉冲发生器 (Synchronized 6-Pulse Generator), 发生器同步信号端连接和控制角设定与单相半波电路模型 (见图 3.31) 相同, 对于输出端, 单相桥式整流需使用其中两路, 选择第 3、6 路信号重新组合, 然后经 Mux 模块综合后作为整流模块的触发信号。用示波器观察整流器的输出电压、电流波形。模型中主要模块的提取路径见表 3.12。



a)

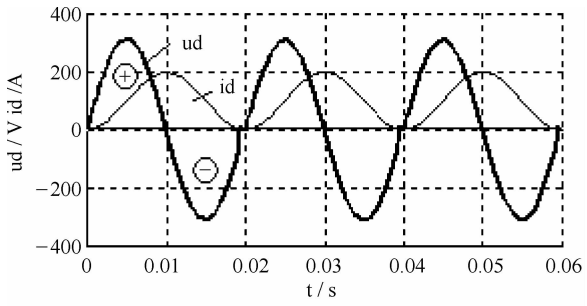


b)

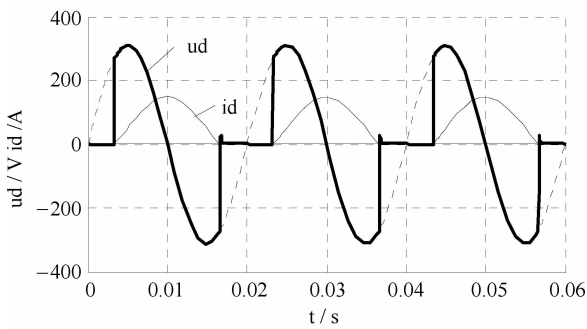


c)

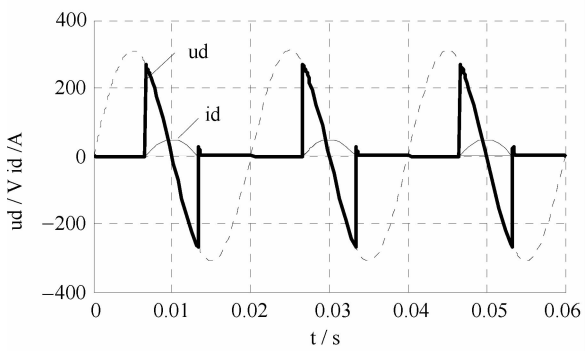
图 3.33 不同控制角时整流电压
和电流波形（电阻负载）
a) $\alpha = 0^\circ$ b) $\alpha = 90^\circ$ c) $\alpha = 120^\circ$



a)



b)



c)

图 3.34 不同控制角时电压和
电流波形（电感负载）
a) $\alpha = 0^\circ$ b) $\alpha = 60^\circ$ c) $\alpha = 120^\circ$

表 3.11 整流电压仿真值与计算值的比较

控制角 $\alpha/(^{\circ})$	整流输出电压 平均值 U_d/V	计算值 $U_d = 0.45U_2 \frac{1 + \cos\alpha}{2}$ ($U_2 = 220V$)	误 差
0	99.00	99.00	0
30	92.49	92.37	0.12
60	74.30	74.25	0.05
90	49.20	49.50	0.30
120	24.65	24.75	0.10
150	6.57	6.63	0.06

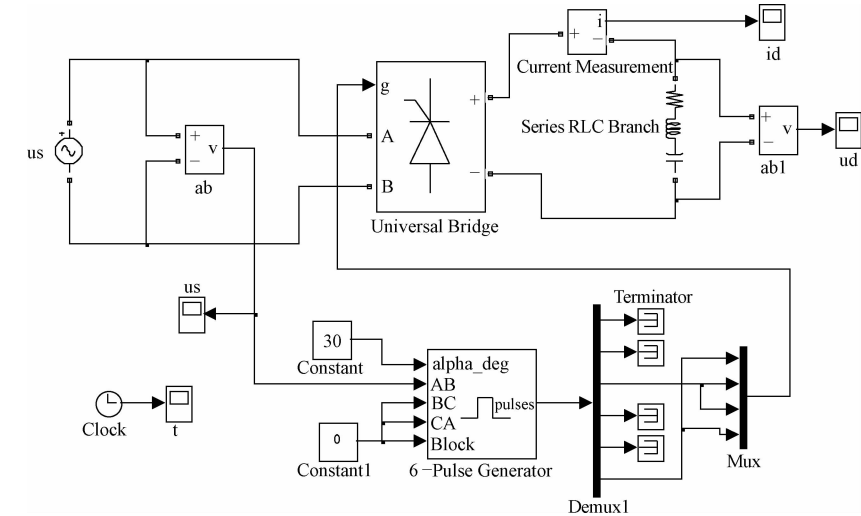


图 3.35 单相桥式整流电路模型

表 3.12 单相桥式整流电路模型主要模块提取路径

模 块 名	提 取 路 径
交流电压源 us	SimPower Systems/ Electrical Sources/AC Voltage Source
通用桥模块 Universal Bridge	SimPower Systems/ Power Electronics/Detailed Thyristor
脉冲发生器 6-Pulse Generator	SimPower Systems/Extra Library/Control/Synchronized 6-Pulse Generator
信号分解 Demux	Simulink/Commonly Used Block /Demux
信号综合 Mux	Simulink/Commonly Used Block /Mux
常数模块 Constant	Simulink/Commonly Used Block /Constant
RLC 负载 Series RLC Branch	SimPower Systems/Elements/Series RLC Branch
电流检测 Current Measurement	SimPower Systems /Measurements/Current Measurement
电压检测 Voltage Measurement	SimPower Systems /Measurements/Voltage Measurement

2. 模型仿真

【例 3.2】 观察单相桥式整流电路，电源电压 $us = 220V$ ，频率为 $50Hz$ ，负载分别为电阻负载（电阻 $R = 2\Omega$ ），阻感负载（电阻和电感串联， $R = 0.5\Omega$ ， $L = 10mH$ ），电容负载（电容 $C = 5\mu F$ ），控制角分别为 60° 和 90° 时整流器输出电压和电流波形。

按题目要求,分别在模型中的电源、负载和控制角模块中输入参数,仿真算法取 ode45。

电阻负载 $R = 2\Omega$ 时，整流器输出电压、电流波形如图 3.36 所示，从波形可以看出，单

相桥式整流电路在电源一周期中电压、电流比半波电路多了一个波头，因此整流电压和电流都增加一倍。

阻感负载时，整流器输出电压和电流波形如图 3.37 所示，电压有负值，并且在 $\alpha = 90^\circ$ 时正负半周面积相同， $u_d = 0$ ，控制角移相范围为 $0 \sim 90^\circ$ 。阻感负载时整流器输出电流波形连续，在起动时因为电感开始储能，所以电流有上升过程。在 $\alpha = 90^\circ$ 、 $u_d = 0$ 时实际还有电流，不过电流比较小。

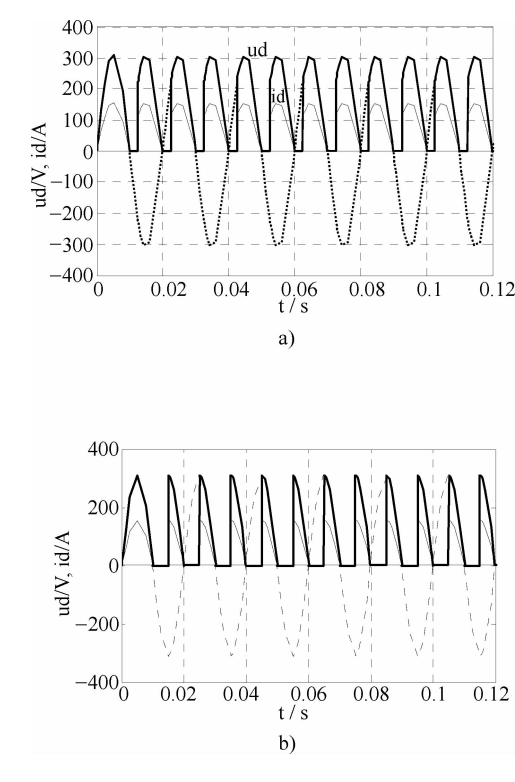


图 3.36 单相桥式整流电路
电阻负载时电压、电流波形
a) $\alpha = 60^\circ$ b) $\alpha = 90^\circ$

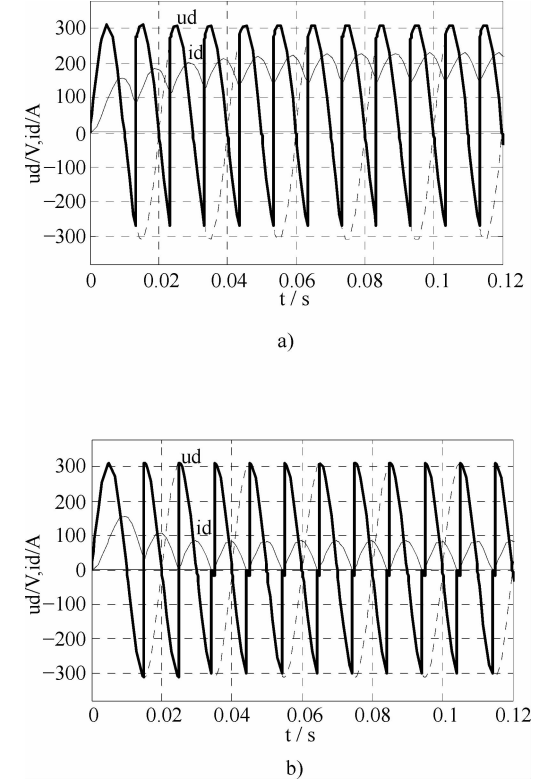


图 3.37 单相桥式整流电路
阻感负载时电压、电流波形
a) $\alpha = 60^\circ$ b) $\alpha = 90^\circ$

电容负载时，整流器输出电压和电流波形如图 3.38 所示，起动时电容迅速充电到电源电压峰值 310V，在 $0 \sim 0.075\text{s}$ 之间，因为电容电压高于晶闸管触发时 ($\alpha = 60^\circ$) 的电源电压，晶闸管虽有触发但不能导通，因此 i_d 为零； 0.075s 时因为电容电压 u_d 下降，电压已低于晶闸管触发时的电源电压，晶闸管导通出现了电流，不过电流很小，为了在图形上显示，将电流放大了 1000 倍。

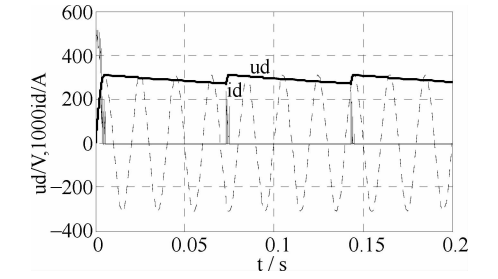


图 3.38 电容负载时电压、电流波形 ($C = 5\mu\text{F}$
 $\alpha = 60^\circ$) 单相桥式整流电路

3.4.3 三相桥式整流电路仿真

三相桥式整流电路模型与单相桥式整流模型基本相同，都使用通用桥式电路模块 Universal Bridge 和六脉冲发生器 (Synchronized 6-Pulse Generator)，与单相桥式整流电路模型不同之处仅在于电源为三相，Universal Bridge 模块相数设置为 3，构建的模型如图 3.39 所示。模型中为了减少检测电路，采用了多路信号检测仪 Multimeter 来观测三相电源电压、整流器输出电压和电流，以及整流器晶闸管的电压和电流波形。多路信号检测仪模块在 SimPower Systems /Measurements/Multimeter 路径下。多路信号检测仪的使用方法是，首先在电源模块、桥式电路模块和 RLC 模块的参数框 Measurements 栏中选择测量参数。图 3.40a 所示为 RLC 模块的参数框，Measurements 栏中有四种选择，其中 None 为不选，还有电压、电流、电压和电流的选择，选择后电压或电流信号就可以进入多路信号检测仪 Multimeter 的列表中。

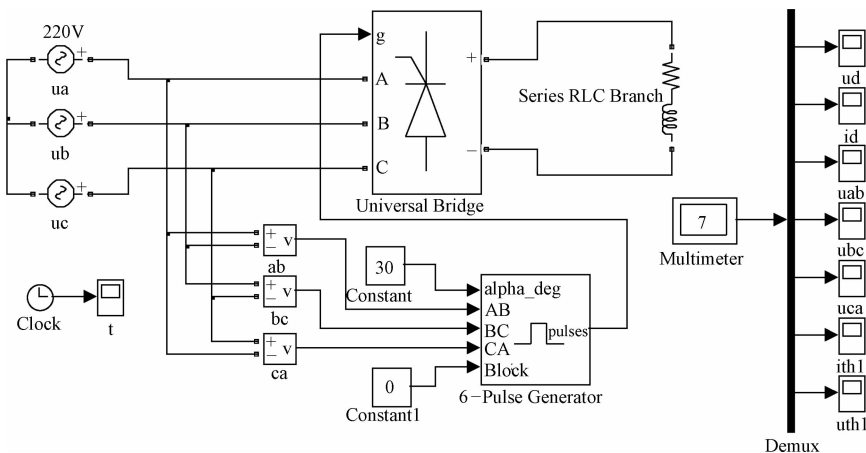


图 3.39 三相桥式整流电路模型

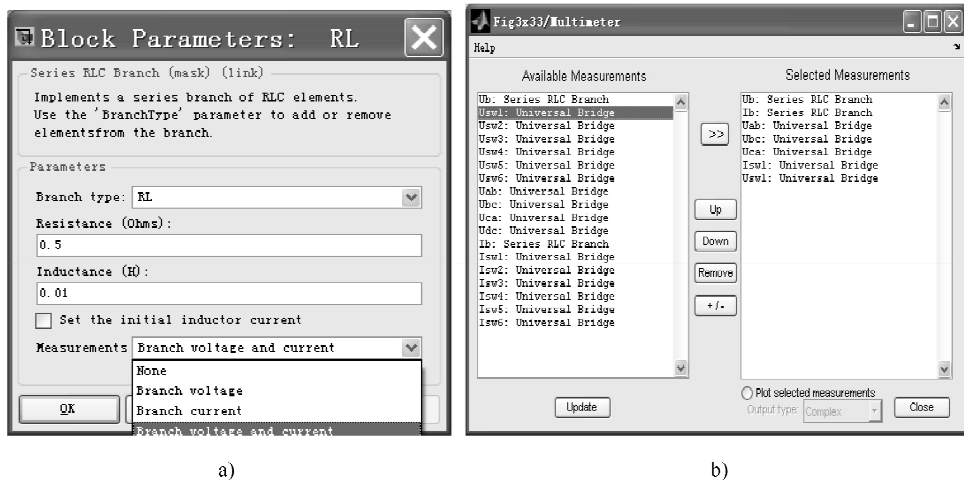


图 3.40 多路信号检测

a) 选择测量参数 b) 多路信号检测仪对话框

单击 Multimeter 模块弹出的对话框（如图 3.40b 所示），对话框 Available Measurements 栏下是可选择的信号，选择其中一个并单击中间的“>>”，则该信号列入右边 Selected Measurements 表中，Selected Measurements 表中的信号是多路信号检测仪的输出信号，输出信号经 Demux 分解后可以用示波器等仪器观测。如果在右边 Selected Measurements 表中选中一项，单击中间的“Remove”框，则可以卸载该项信号。

【例 3.3】 仿真三相晶闸管整流器， $U_s = 220\text{V}$ ， $f_s = 50\text{Hz}$ ， $R = 2\Omega$ ， $L = 10\text{mH}$ ， $\alpha = 30^\circ$ 。
在三相电源和负载模块中输入参数后，启动仿真得到三相整流器输出电压和电流波形（见图 3.41），电压在电源的一周期内有六个波头，波动较单相整流减小，电流的脉动也很小。图 3.42 是整流器晶闸管的电压和电流波形。通过晶闸管的电流接近矩形波，在电压波形中画出了六相线电压波形（虚线），与晶闸管电压（实线）比较，晶闸管承受的最高电压是线电压峰值，根据晶闸管的电压和电流可以选择晶闸管的型号。

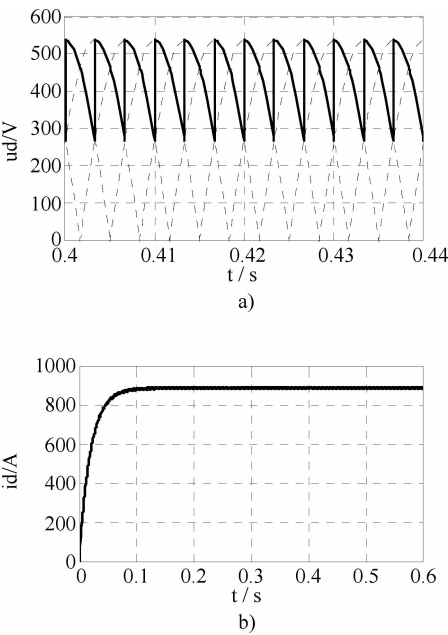


图 3.41 三相整流器电压和电流波形 $\alpha = 30^\circ$
a) 输出电压 b) 输出电流

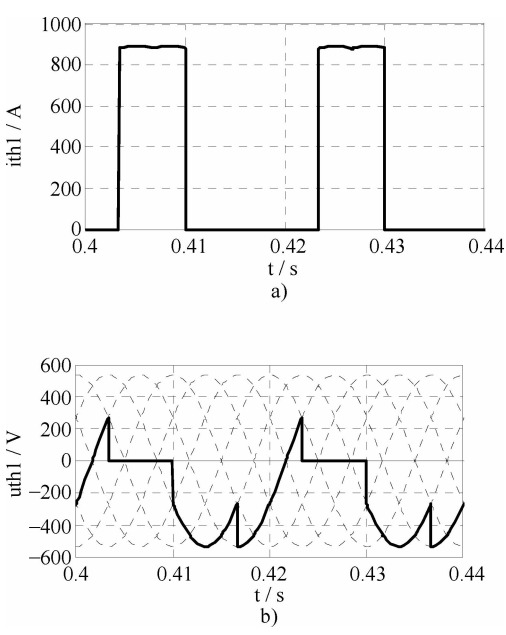


图 3.42 三相整流器晶闸管电压和电流 $\alpha = 30^\circ$
a) 通过晶闸管的电流 b) 晶闸管两端电压

3.5 直流 PWM 斩波器仿真

直流斩波器（DC Chopper）用于调整直流电源电压，它有多种类型，这里主要介绍降压变换器（Buck）、升压变换器（Boost）和升降压变换器（Cuk）的仿真，其他直流变换器的仿真也可以用同样的方法进行。

3.5.1 直流降压斩波器设计

直流降压斩波器（Buck Chopper）用于降低直流电压，使负载侧电压可以在低于电源电

压的范围内调节，其原理电路如图 3.43 所示。在开关器件 VT 导通时从电源 E 有电流经电感 L 向负载供电；在 VT 关断时，电感经负载和二极管 VD 释放储能，并维持负载电流。调节开关器件 VT 的通断周期，可以调整负载侧输出电压和电流的大小。负载侧输出电压的平均值为：

$$U_R = \frac{t_{on}}{T}E = \alpha E$$

图 3.43 直流降压斩波器原理图

式中， T 为 VT 开关周期； t_{on} 为 VT 导通时间； α 为占空比。

降压斩波器主电路的设计除要选择开关器件和二极管外，还需要确定调制脉冲的频率、占空比和电感 L 等参数，这些都是很复杂的，不仅需要计算，还要通过实验来确定，但是用仿真却很方便。降压斩波器的仿真模型如图 3.44 所示，其中主要模块提取路径见表 3.13。在模型中开关器件采用了 IGBT，也可以用 MOSFET 等，使用 MOSFET 时要注意 MOSFET 的寄生二极管，在不需要反向导通时，要串联一个二极管阻断 MOSFET 的反向通路。IGBT 的驱动信号由脉冲发生器 Pulse 产生，设定脉冲发生器的脉冲周期和脉冲宽度可以调节脉冲占空比。模型中的示波器用于观察电路中各部分的电压和电流波形。

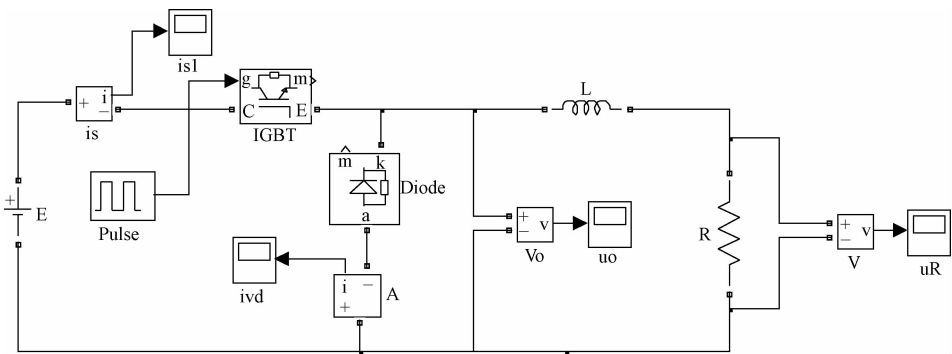


图 3.44 直流降压斩波器仿真模型

表 3.13 直流降压斩波器模块提取路径

模 块 名	提取 路径
直流电源 E	SimPower Systems/ Electrical Sources/DC Voltage Source
IGBT 模块	SimPower Systems/ Power Electronics/IGBT
MOSFET 模块	SimPower Systems/ Power Electronics/MOSFET
二极管 Diode	SimPower Systems/ Power Electronics/Diode
电感 L，电阻 R	SimPower Systems/Elements/Series RLC Branch
脉冲发生器 Pulse	Simulink/Sources/Pulse Generator
电流检测	SimPower Systems /Measurements/Current Measurement
电压检测	SimPower Systems /Measurements/Voltage Measurement
示波器	Simulink/Sinks/Scope

【例 3.4】 直流斩波器电源电压 $E = 200\text{V}$ ， $L = 10\text{mH}$ ，负载电阻 $R = 5\Omega$ ，要求输出电压在 $150 \sim 50\text{V}$ 之间可调，选择降压变换调制脉冲频率并比较输出电压波形。

1) 在模块中设置参数，电源 E 电压为 200V ，负载电阻 R 为 5Ω ，IGBT 和二极管的参数可以保持预设值。设脉冲发生器 Pulse 模块的脉冲幅值 amplitude 为 1，频率为 0.5kHz ，脉冲宽度 width 分别取 80% 、 50% 、 20% 。

2) 仿真时间设为 0.05s ，算法为 ode15s。

在 width 为 80% 时起动仿真，得到斩波器输出电压波形如图 3.45a 所示，波形中粗实线为输出电压的平均值， $U_d = 160\text{V}$ 。在 width 为 50% 时斩波器输出电压波形如图 3.45b 所示， $U_d = 100\text{V}$ 。在 width 为 20% 时斩波器输出电压波形如图 3.45c 所示， $U_d = 40\text{V}$ 。波形表明，调节脉冲宽度时斩波器输出电压在 $150 \sim 40\text{V}$ 之间变化可以满足调压要求，但是输出电压的波动较大。提高脉冲发生器调制频率，使 periode 等于 0.0002s （频率 5kHz ），重复上述过程得到斩波器输出电压波形如图 3.46 所示。可以看出，提高调制电压频率后，输出电压波动显著减小。仿真结果表明，在 IGBT 允许开关频率下，提高调制频率不仅可以使斩波器满足调压要求，而且可以使其输出电压波动减小到最小。如果在斩波器输出端并联电容 C （见图 3.47a），则可以在减小电感情况下取得脉动较小的输出电压效果。图 3.47b 是取 $C = 100\mu\text{F}$ ，电感 $L = 0.1\text{mH}$ ，调制频率为 0.5kHz ，占空比为 70% 时的输出电压波形。尽管电感减小，可输出电压脉动显著减小，输出电压更平稳，但是电压调节的响应较慢。

从以上举例可以看到，用仿真来设计电力电子电路，修改电路结构和参数很方便，可以更直观地观察设计效果。

3.5.2 直流升压斩波器设计

直流升压斩波器（Boost Chopper）用于需要提升直流电压的场合，其原理电路如图 3.48a 所示。电路中在开关 VT（IGBT）导通时，电流由电源 E 经升压电感 L 和 VT 形成回路，电感 L 的电流增加，电感储能；当 IGBT 关断时，电感产生的反电动势和直流电源电压串联后共同向负载供电，由于在 IGBT 关断时电感的反电动势和直流电源串联且电压方向相同，所以它们互相叠加，使负载侧得到高于电源的电压。二极管的作用是在 IGBT 关断时提供电容的放电回路。直流升压斩波器的输出电压为 $U_o = \frac{1}{1-\alpha}E$ ，其电感和电容值的选择同样可以通过仿真来确定。

【例 3.5】 已知直流电源 24V ，要求将电压提升到 100V ，且输出电压的脉动控制在 10% 以内，负载的等效电阻为 5Ω 。设计一个直流升压斩波器，并选择斩波频率、电感和电容参数。

仿真设计步骤：

1) 根据直流升压斩波器原理电路组织斩波器的仿真模型（见图 3.48b）。

2) 设置元器件参数。取脉冲发生器脉冲周期为 0.2ms ，脉冲占空比： $\alpha = (U_o - E)/U_o = (100 - 24)/100 = 0.76$ ，取脉冲宽度为 76% ，初选 $L = 0.1\text{mH}$ ， $C = 100\mu\text{F}$ 。

3) 设置仿真参数，设仿真时间为 0.01s ，仿真算法为 ode15。

4) 启动仿真。

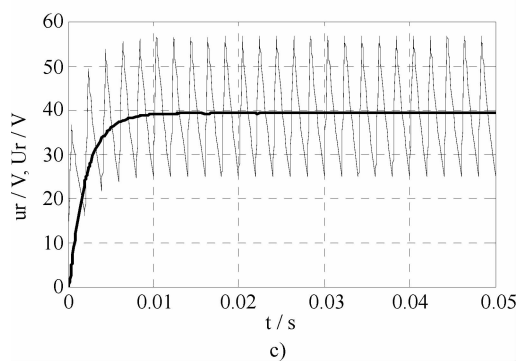
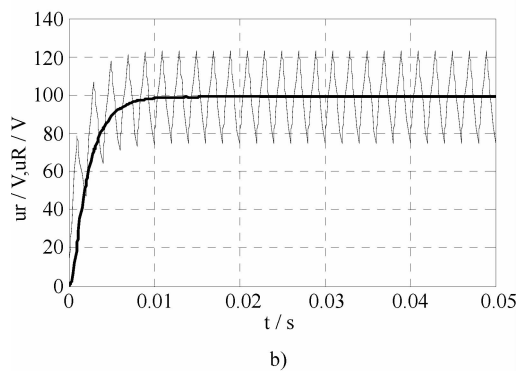
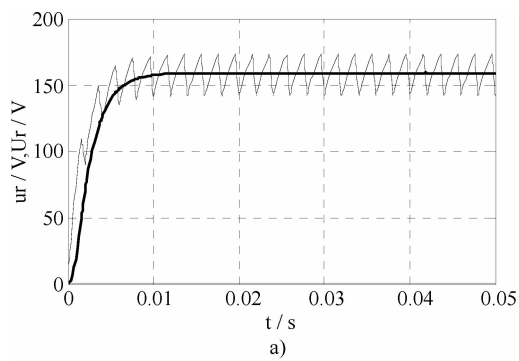


图 3.45 直流降压斩波器输出电压

a) 脉冲宽度 80% b) 脉冲宽度 50%
c) 脉冲宽度 20%

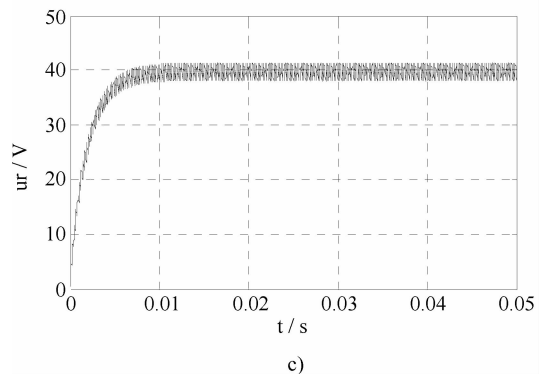
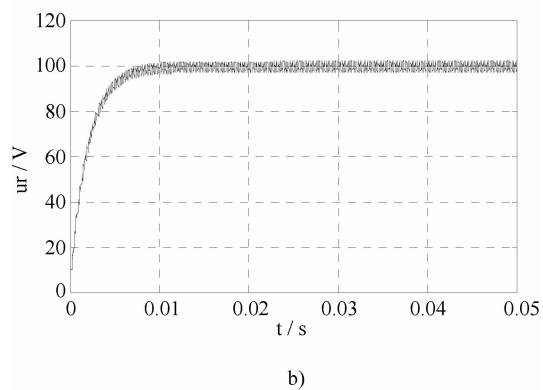
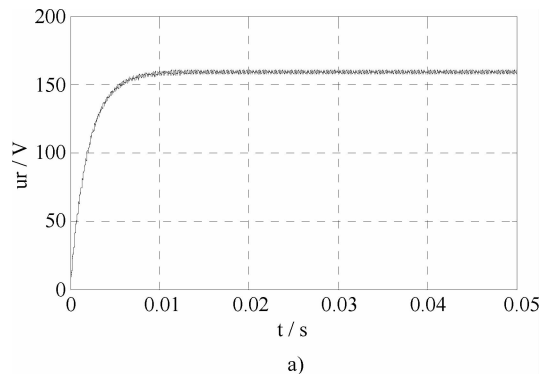


图 3.46 直流降压斩波器输出电压

a) 脉冲宽度 80% b) 脉冲宽度 50%
c) 脉冲宽度 20%

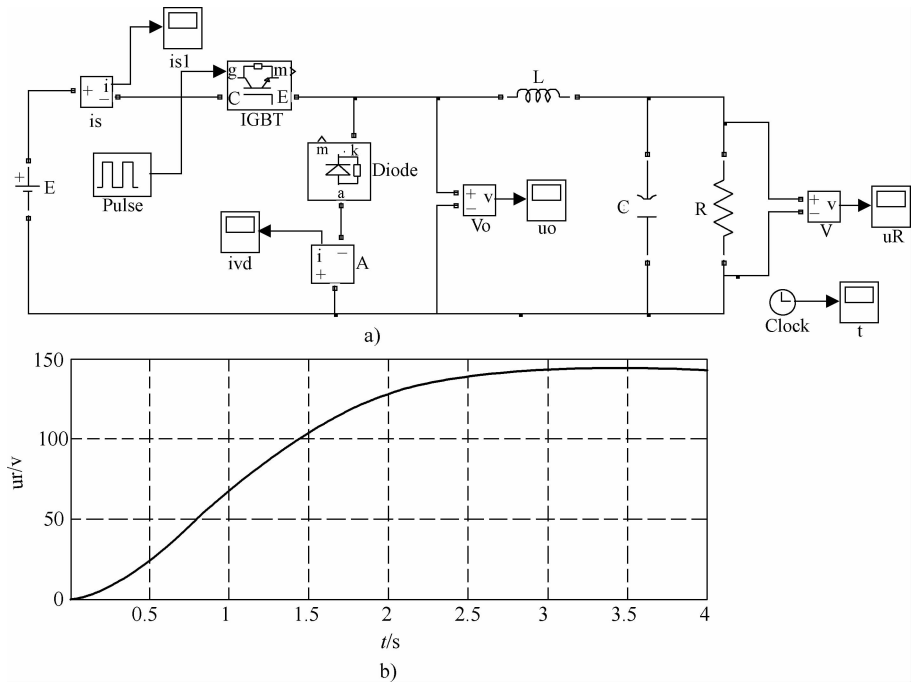


图 3.47 带输出滤波的降压斩波器仿真

a) 带电容滤波的降压斩波器模型 b) 滤波后降压斩波器输出电压波形

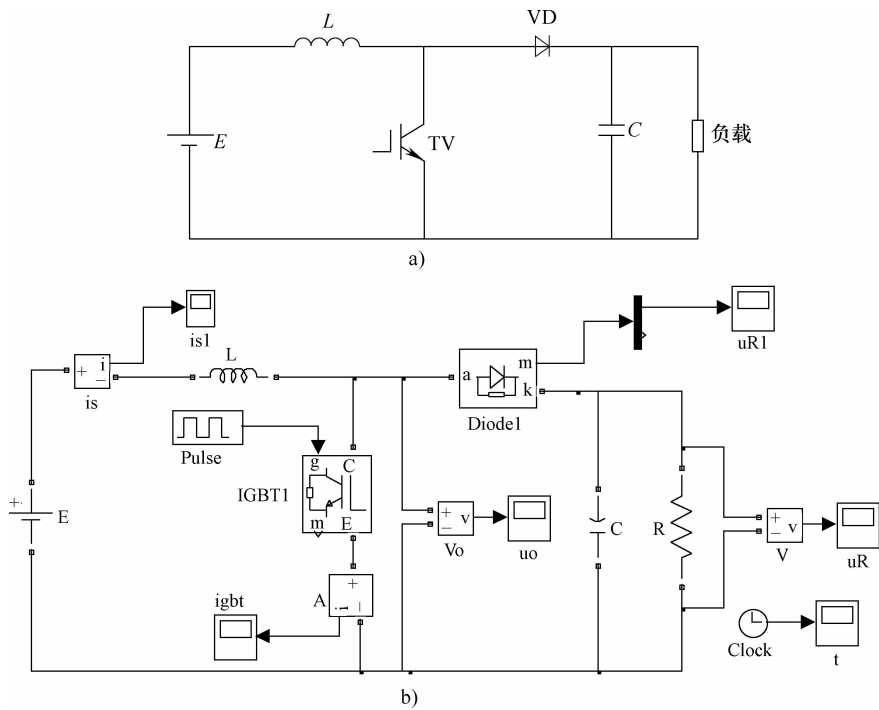


图 3.48 Boost 直流升压斩波器

a) 直流升压斩波器电路 b) 直流升压斩波器模型

从仿真波形图 3.49a 可见，选择的参数已能满足要求，输出电压达到 100V，脉动在 10% 以内。如果需要进一步减少输出电压波动，可以提高脉冲发生器调制频率，或选择多组 LC 参数进行比较以得到更满意的结果。图 3.49b 是 IGBT 两端的电压波形，从波形可见升压斩波器开关两端电压在 150V 左右，远高于电源电压 24V，在选择开关器件时要注意。

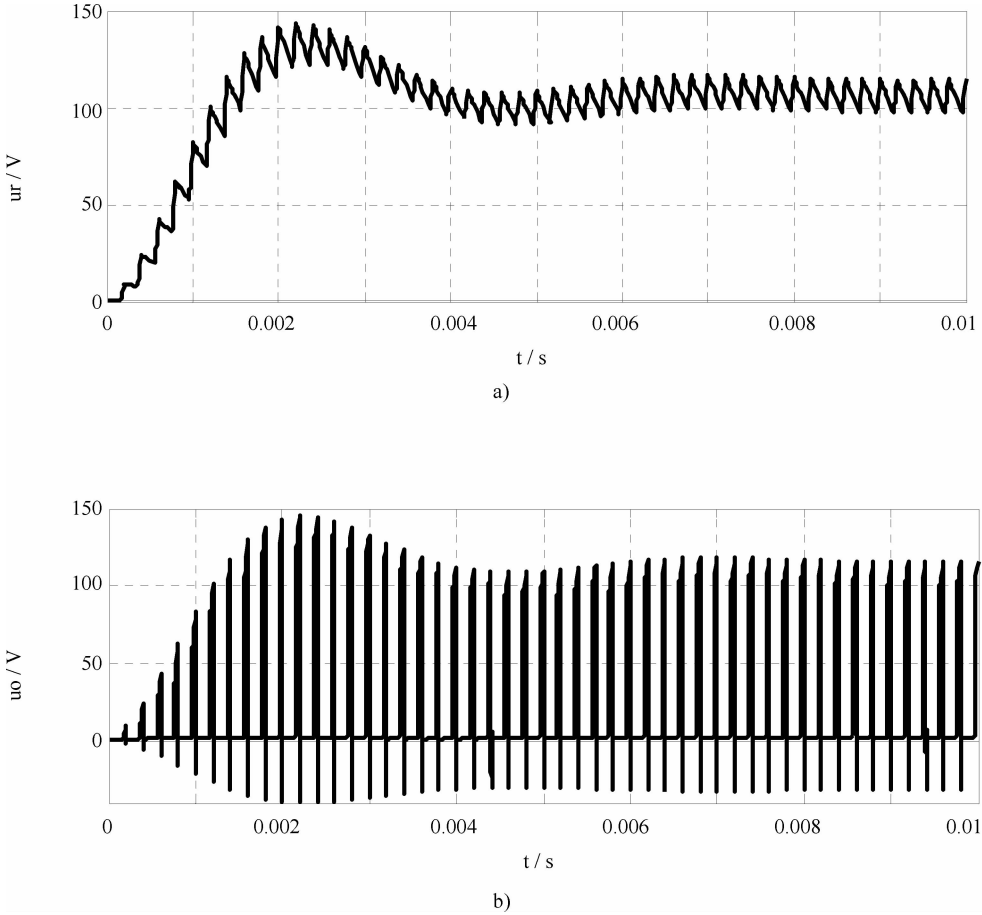


图 3.49 直流升压斩波器仿真模型及结果
a) 输出电压波形 b) IGBT 两端电压波形

3.5.3 Cuk 升降压斩波电路仿真

Cuk 电路是一种既可以用于直流升压也可以用于降压的电路，电路结构如图 3.50 所示。电路中只有一个开关器 VT，在 VT 导通时，电感 L_1 电流上升，在 VT 关断时，电源 E 和电感 L_1 的反电动势共同给电容 C_1 充电， C_1 电压可以高于电源电压 E ；在 VT 导通时，电容 C_1 同时也经 C_2 、 L_2 回路放电，在 VT 关断时，电感 L_2 将经二极管 VD 和 C_2 回路续流，

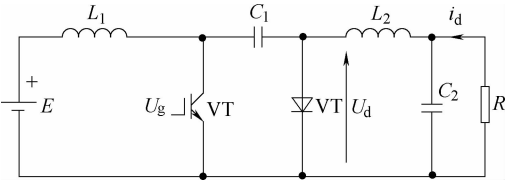


图 3.50 Cuk 升降压斩波电路

因此电容 C_2 上的电压受开关 VT 驱动脉冲占空比的控制, $U_d = \alpha U_{C1} = \frac{\alpha}{1-\alpha} E$ 。

Cuk 电路的特点是输入和输出侧都串联了电感, 电感 L_1 起升压的作用, 电感 L_2 和电容 C_2 起滤波作用, 减小负载 R 的电压和电流波动。Cuk 升降压斩波电路的仿真模型如图 3.51 所示, 模型中开关器件采用了 MOSFET, 因为 MOSFET 内部有一个寄生二极管, 因此串联了一个二极管 Diode1 以阻断寄生二极管的通路, 模块提取路径同例 3.4。

【例 3.6】 直流电源 24V, 采用 Cuk 电路使负载电压在 50 ~ 10V 间调节。模型主要参数为: $E = 24V$, $R = 5\Omega$ 。取脉冲发生器脉冲周期为 0.1ms, 仿真算法为 ode15, 分析电感参数对输出电压的影响。

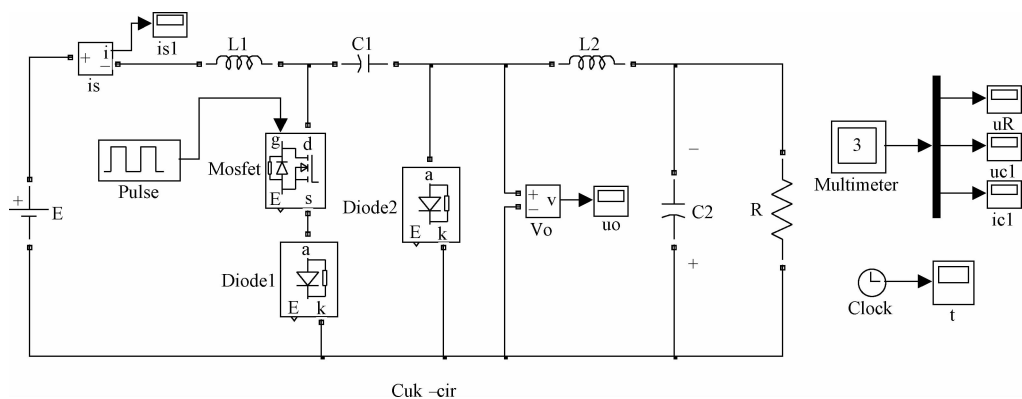


图 3.51 Cuk 升降压斩波电路模型

(1) 设定 $L_1 = 0.1mH$, $L_2 = 1mH$, $C_1 = 1\mu F$, $C_2 = 200\mu F$

图 3.52 是调制脉冲宽度分别为 10%、50%、90% 时的输出电压波形, 随调制脉冲宽度增加, 输出电压 (平均值) 分别为 10.5V、42.5V、67V。输出电压随脉冲宽度变化, 表明 Cuk 斩波电路既可降压也可以升压, 输出电压越高脉动也越大, 但是起动时的电压冲击越小。

(2) 保持 $L_2 = 1mH$, $C_1 = 1\mu F$, $C_2 = 200\mu F$, 频率为 10kHz, 脉冲调制宽度为 90% 不变

1) $L_1 = 0.01mH$ 时输出电压波形如图 3.53a 所示, 输出电压较 $L_1 = 0.1mH$ 时降低, 脉动增加, 但是起动时的冲击明显减小。

2) $L_1 = 1mH$ 时输出电压波形如图 3.53b 所示, 起动时的冲击增加很显著, 峰值可能达到万伏, 这是需要注意的。

(3) 取 $L_1 = 0.1mH$, $C_1 = 1\mu F$, $C_2 = 200\mu F$, 频率为 10kHz, 脉冲调制宽度为 90% 不变 $L_2 = 5mH$ 时输出电压波形如图 3.53c 所示, 表明适当提高 L_2 可以降低起动冲击并减小电压脉动。

用相同方法可以仿真电容参数对 Cuk 斩波电路的影响, 并为电路选择最佳的参数。

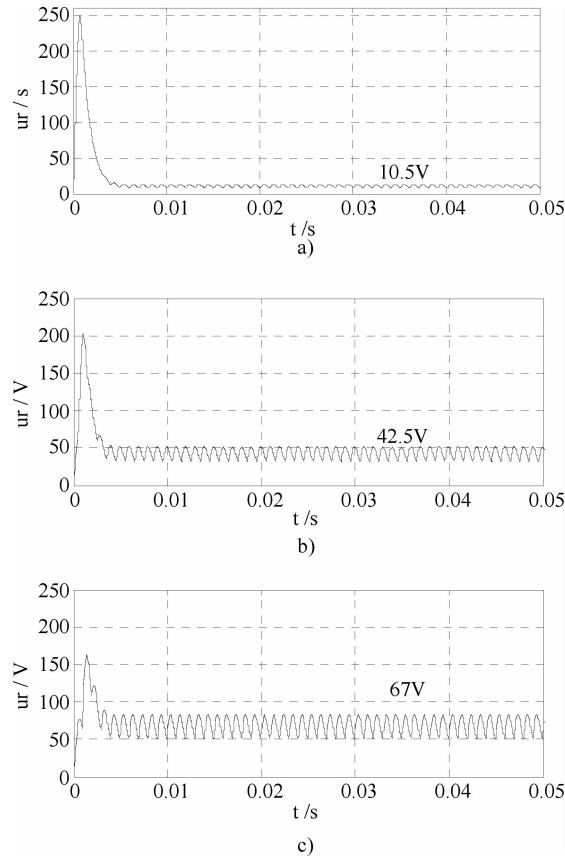


图 3.52 Cuk 斩波电路波形一

a) 脉冲调制宽度为 10% b) 脉冲调制宽度为 50% c) 脉冲调制宽度为 90%

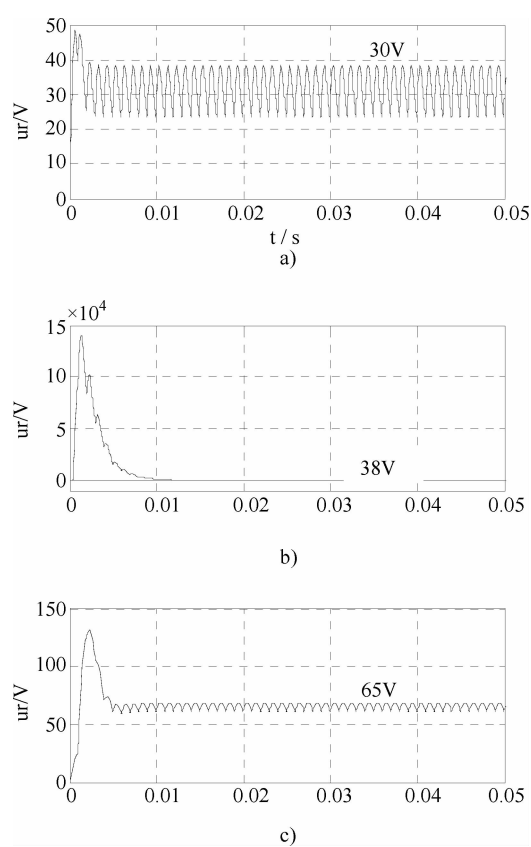


图 3.53 Cuk 斩波电路波形二

a) $L_1 = 0.01\text{mH}$, $L_2 = 1\text{mH}$ b) $L_1 = 1\text{mH}$, $L_2 = 1\text{mH}$ c) $L_1 = 0.1\text{mH}$, $L_2 = 5\text{mH}$

本章小结

本章介绍了 SIMULINK 模型库的主要电力电子模块，并以整流和斩波电路为例介绍了电力电子模块的应用，有关逆变电路的仿真将在后面介绍。由于电力电子模块是开关模型与使用传递函数模型的一阶惯性环节相比，变流电路模型仿真效果与实际工作情况更相近，仿真结果可以作为电力电子系统设计的依据。驱动是电力电子电路不可缺少的组成部分，仿真整流电路时，要注意驱动脉冲与交流电源的同步。仿真在计算机上模拟了物理电路和系统，通过波形分析了解了电路工作情况，为学习和设计创造了良好条件。建立仿真模型时，要清楚仿真的对象和仿真的目的，对电路、结构和工作原理有一定了解，并使用适当的模块建立正确的仿真模型，对仿真的结果需要进行分析 and 判读，以检查建立的模型是否正确。电路参数对设计的效果影响很大，仿真提供了参数选择的一种有效、便捷的方法。

习 题

1. 仿真如图 3.54 所示带续流二极管的单相半波整流电路电感负载时的工作情况，设 $U_{AC} = 220\text{V}$ ， L

=20mH, α 分别为 0° 、 45° 、 120° , 并将仿真结果与无续流二极管时进行比较, 观察电感的电压和电流波形有什么不同, 为什么?

2. 仿真图 3.35 所示单相桥式整流电路、 $u_s = 380V$ 。

(1) 电阻负载 $R = 2\Omega$, α 分别为 0° 、 60° 时的整流器输出电压和电流波形。

(2) 电感负载 $R = 2\Omega$, $L = 10mH$, $\alpha = 60^\circ$ 时的整流器输出电压和电流波形, 并分别观察电阻、电感的电压波形。

3. 仿真如图 3.55 所示二极管整流电路电容负载的工作状态, $u_s = 36V$, $C = 500\mu F$, $R = 0.5\Omega$, 观察电容充电和稳定状态的电压、电流波形。

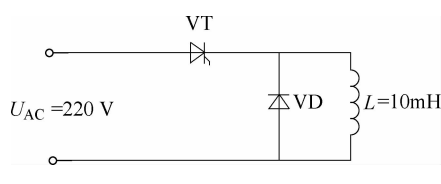


图 3.54 习题 1 图

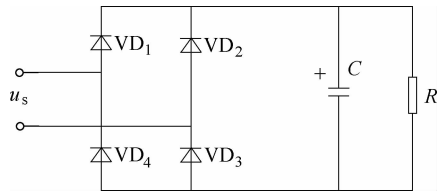


图 3.55 习题 3 图

4. 仿真三相桥式整流电路在整流器 B 相电源断线时的输出电压波形, 参数同 [例 3.3], 并与接线正常工作时的电压波形比较, 观察有什么变化。

5. 某电镀用三相桥式可控整流电源, $U_s = 127V$, 负载 $R = 0.5\Omega$ 。

(1) 仿真 α 分别为 0° 、 120° 时整流器输出电压、电流波形。

(2) 如果要使电流稳定应采取什么措施? 用仿真的结果说明。

6. 设计一个由 9V 电池供电的单片机开关电源, 负载的等效电阻为 5Ω , 要求电源输出为 5V、500mA, 电压的脉动控制在 5% 以内。仿真观察电源的电压、电流波形。

7. 设计一个直流升降压电路, 电源 $E = 6V$, 负载电阻 $R = 6\Omega$, 要求输出电压在 5 ~ 12V 之间调节, 求脉冲发生器产生脉冲宽度的变化范围, 并记录输出电压波形。