

第7章 MATLAB在电力电子变流中的应用

本章内容

电力电子器件模型；
整流电路；
逆变电路；
直流-直流变流电路；
交流-交流变流电路。

- 在MATLAB中，Simulink环境下的Simscape Electrical组件库（前身为 SimPowerSystems和 SimElectronics，可提供用于电子、机电与电力系统建模及仿真的组件库)中包含了常用的电力电子器件模型、整流电路模块、逆变电路模块以及相应的触发模块，使用这些模块可以方便地构建电力电子电路并进行仿真。
- 本章介绍常用电力电子器件的MATLAB仿真模型及其参数设置方法，以及几种常用电力电子变换电路的MATLAB仿真模型构建方法和仿真分析方法。

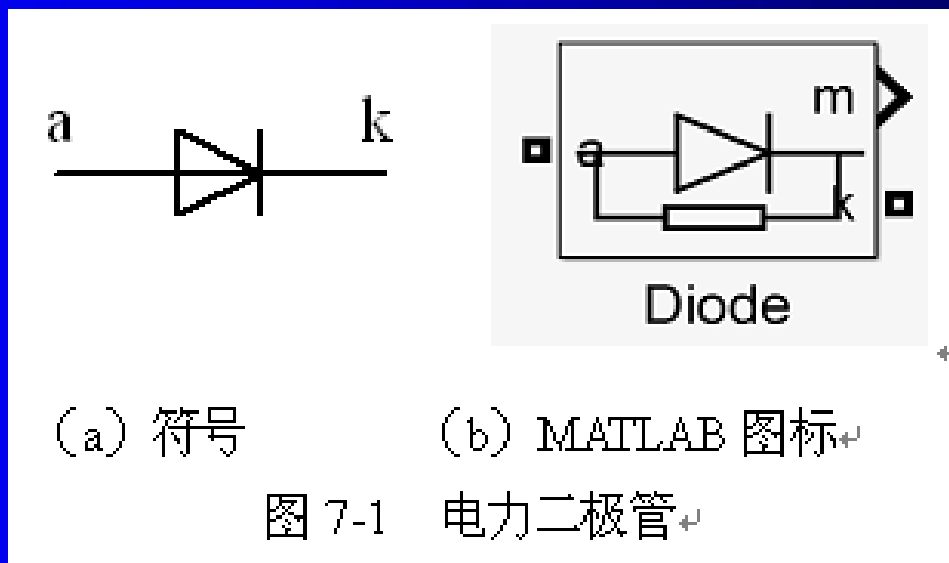
7.1 电力电子器件模型

- 电力电子器件是构成电力电子变流电路的核心单元。MATLAB电力电子器件模型使用简化的宏模型，其外特性与实际器件的特性相符，但并没有考虑器件内部的细微结构，其模型较为简单。
- 电力电子器件在使用时一般都并联有RC缓冲电路，MATLAB电力电子器件模型也已经并联了简单的RC串联缓冲电路，缓冲电路的RC值可以在参数设置对话框中设置，较复杂的缓冲电路需要另外建立。本节介绍几种常用电力电子器件的仿真模型和参数设置方法。

7.1.1 二极管

1. 二极管

- 二极管（Diode）是一种具有单向导电性的半导体器件，即正向导通，反向截止，属于不可控器件。其阳极标识符号为a，阴极标识符号为k，其符号如图7-1（a）所示。



2. 二极管仿真模型

- 在MATLAB中，二极管的仿真模型采用如图7-1（b）所示的图标，可通过参数设置来区分不同种类的二极管。由图7-1（b）中，二极管输入端为阳极a，输出端为阴极k，m为测量端子。其中，测量端子m用于测量二极管的电流和电压向量 $[I_{ak}, V_{ak}]$ 。
- 二极管仿真模型内部并联了一个Rs-Cs串联缓冲电路，当缓冲电阻设置为inf，或将缓冲电容设置为0时，则二极管模型取消缓冲电路部分；如果缓冲电阻不为0时，设置缓冲电容inf，则为纯电阻缓冲电路。

3. 二极管仿真模型参数设置

● 二极管仿真模型的参数设置对话框如图7-2所示。其主要参数有：
Resistance R_{on} (ohms)（二极管导通电阻 (Ω)）、Inductance L_{on} (H)（二极管导通电感 (H)）、Forward voltage V_f (V)（二极管正向导通压降 (V)）、Initial current I_c (A)（初始电流 (A)）、Snubber resistance R_s (ohms) 和 Snubber capacitance C_s (F)（二极管吸收电阻 (Ω) 和二极管吸收电容 (F)）。

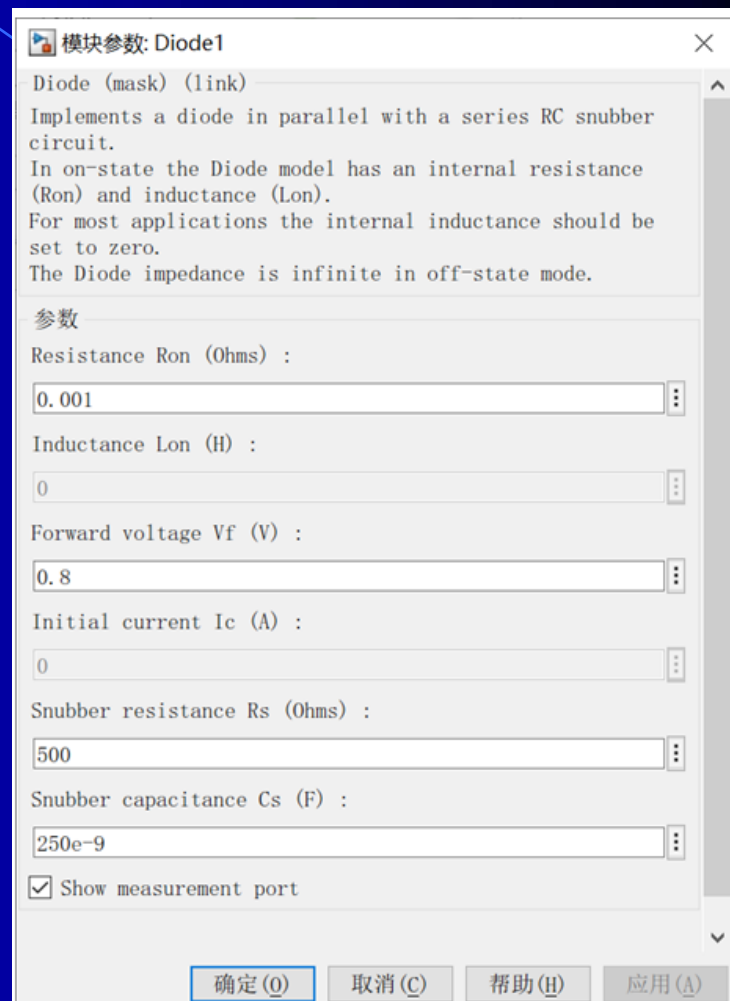
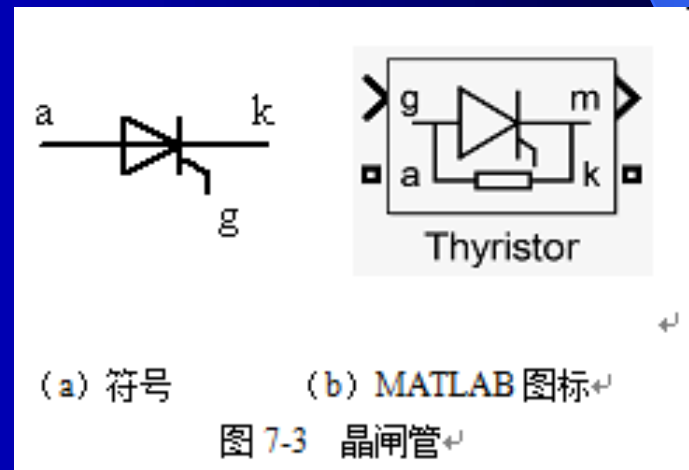


图 7-2 二极管仿真模型的参数设置

7.1.2 晶闸管

1. 晶闸管

- 晶闸管（Thyristor）是一种由门极信号控制其开通的半导体器件，属于半控型器件。其阳极、阴极、门极标识符号分别为 a、k、g，其元件符号如图7-3（a）所示。当晶闸管两端正向电压 V_{ak} 大于正向导通压降 V_f ，且门极触发脉冲为正（ $g > 0$ ）时，晶闸管导通，该触发脉冲的幅值必须大于0且有一定的持续时间，以保证晶闸管阳极电流大于擎住电流。当晶闸管阳极电流下降到0，且承受反向电压的时间大于晶闸管的关断时间 T_q 时，晶闸管关断。

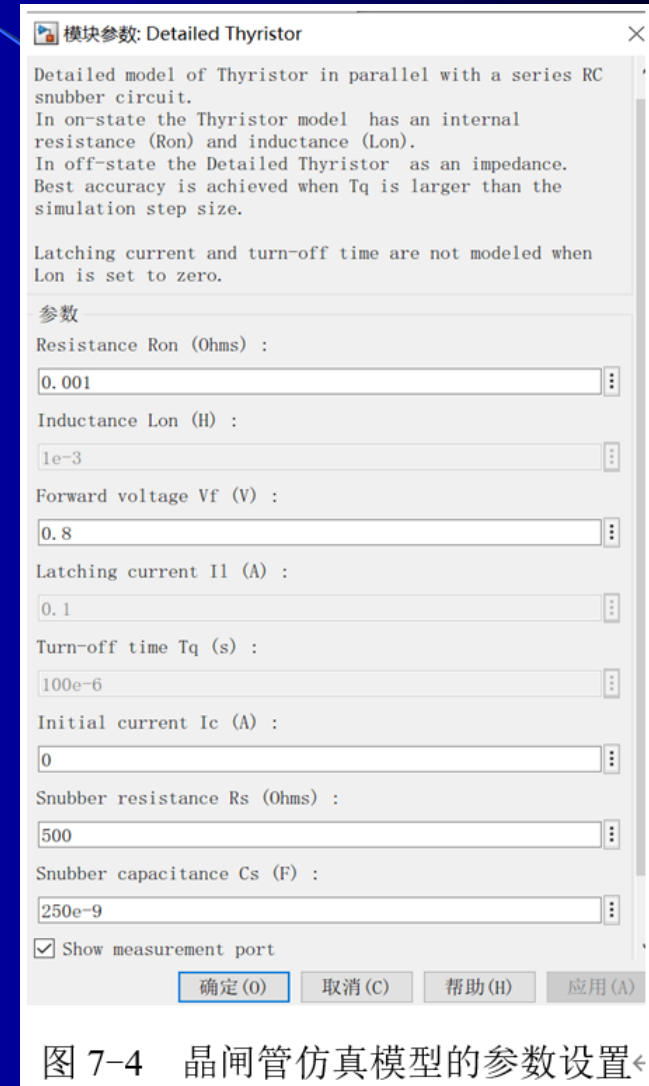


2.晶闸管的仿真模型

- 在MATLAB中，所有晶闸管的仿真模型均采用如图7-3（b）所示的图标。该模型有两个输入端和两个输出端。其中，a为阳极，b为阴极，g为门极，m为测量输出向量端[Iak, Vak]，输出晶闸管的电流和电压值。模型中晶闸管两端并联了Rs-Cs串联缓冲电路，其含义和设置方法同二极管。
- 需要说明的是，Power Electronics（电力电子器件）模块库中，提供了Detailed Thyristor（详细的晶闸管模型）和Thyristor（晶闸管模型）两种模型，二者区别在于Detailed Thyristor（详细的晶闸管模型）增加了三个参数：初始电流Ic、擎住电流I1和关断时间Tq。

3. 晶闸管仿真模型的参数设置

- 以 Detailed Thyristor（详细的晶闸管模型）为例，仿真模型的参数设置对话框如图7-4所示。其主要参数有：Resistance Ron（ohms）（晶闸管导通电阻（ Ω ））、Inductance Lon（H）（晶闸管导通电感（H））、Forward voltage Vf（V）（晶闸管正向导通压降（V））、Initial current Ic（A）（初始电流（A））、Snubber resistance Rs（ohms）和 Snubber capacitance Cs（F）（晶闸管吸收电阻（ Ω ）和晶闸管吸收电容（F））、Latching current Il（A）和 Turn-off time Tq（s）（擎住电流（A）和关断时间（s））



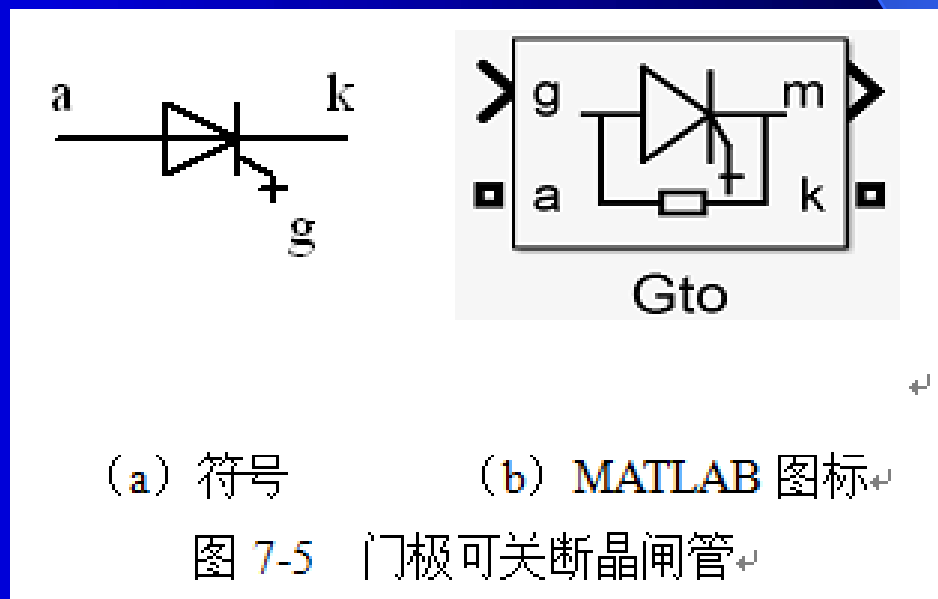
7.1.3 门极可关断晶闸管

1. 门极可关断晶闸管

- 门极可关断晶闸管（GTO）是一种由门极信号控制其开通和关断的半导体器件，属于全控型器件。其阳极、阴极、门极标识符号分别为a、k、g，其元件符号如图7-5（a）所示。当晶闸管两端正向电压 V_{ak} 大于正向导通压降 V_f ，且门极触发脉冲为正（ $g>0$ ）时，晶闸管导通；该触发脉冲的幅值必须大于0且有一定的持续时间，以保证晶闸管阳极电流大于擎住电流。当门极信号为0或负时，GTO电流 I_{ak} 开始衰减，且电流衰减过程被近似分为两段。当门极信号变为0后，电流 I_{ak} 开始从最大值 I_{max} 减小到 $I_{max}/10$ 所经过的时间为下降时间 T_f ； I_{ak} 从 $I_{max}/10$ 下降到0所需要的时间为拖尾时间 T_t ，当电流 I_{ak} 变为0时，GTO完全关断。

2.GTO仿真模型

- GTO在MATLAB中的仿真模型的图标如图7-5 (b) 所示。该模型有两个输入端和两个输出端。其中，a 为阳极，b为阴极，g为门极，m为测量输出向量端 [Iak, Vak]，输出晶闸管的电流和电压值。模型中 GTO两端并联了Rs-Cs串联缓冲电路，其含义和设置方法同二极管。



3. GTO仿真模型的参数设置

GTO仿真模型的参数设置对话框如图7-6所示。其主要参数有其主要参数有：Resistance R_{on} (ohms) (GTO导通电阻 (Ω))、Inductance L_{on} (H) (GTO导通电感 (H))、Forward voltage V_f (V) (GTO正向导通压降 (V))、Initial current I_c (A) (初始电流 (A))、Snubber resistance R_s (ohms) 和 Snubber capacitance C_s (F) (GTO吸收电阻 (Ω) 和 GTO吸收电容 (F))

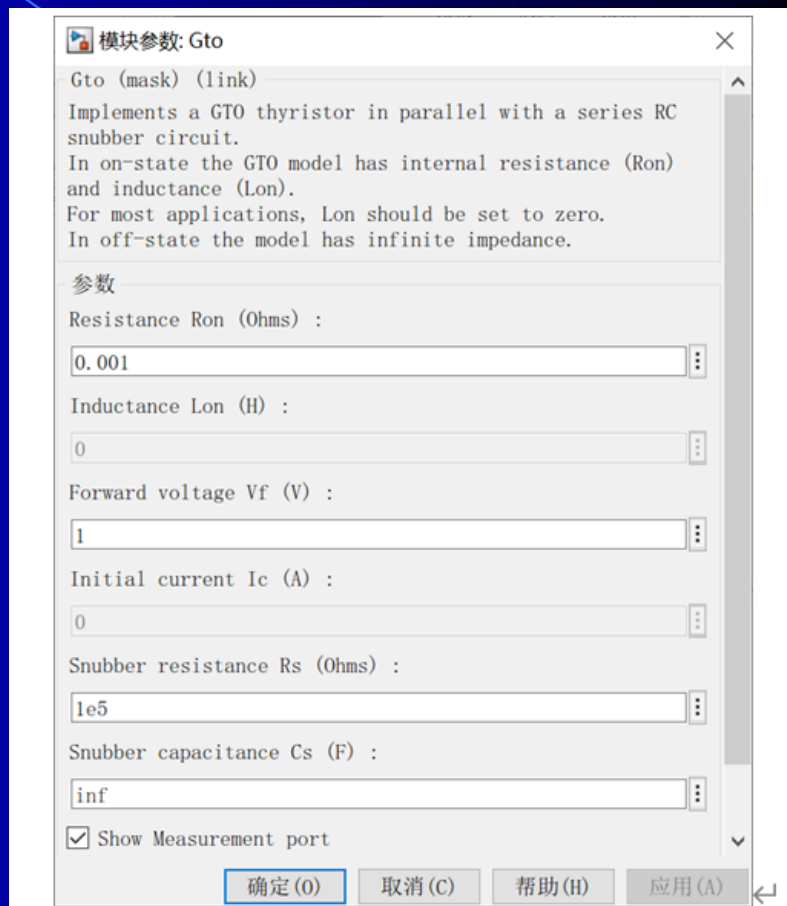


图 7-6 门极可关断晶闸管仿真模型的参数

7.1.4 绝缘栅双极晶体管

1. 绝缘栅双极晶体管

- 绝缘栅双极晶体管（IGBT）是一种由栅极信号控制其开通和关断的半导体器件，属于全控型器件。IGBT也是三端器件，具有集电极c，发射极e，栅极g，其元件符号如图7-7（a）所示。当IGBT集电极c和发射极e大于正向导通压降 V_f ，且栅极施加正信号（ $g > 0$ ）时，IGBT导通；当栅极信号为0（ $g = 0$ ）时，IGBT关断。

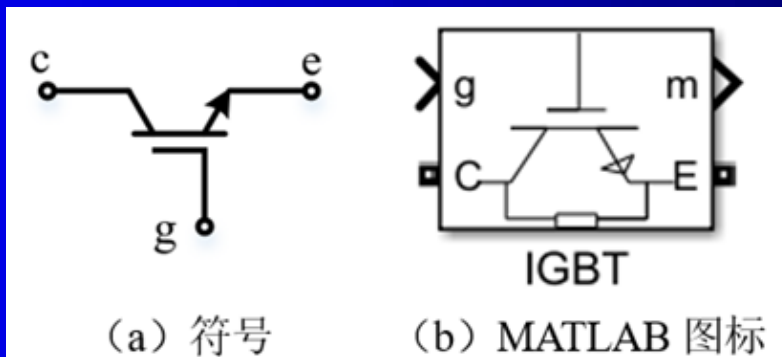


图 7-7 绝缘栅双极晶体管

2. IGBT仿真模型

- IGBT在MATLAB中的仿真模型的图标如图7-7（b）所示。该模型有两个输入端和两个输出端。其中，c为集电极，e为阴极，g为门极，m为测量输出向量端[I_{ce} , V_{ce}]，输出IGBT的电流和电压值。模型中GTO两端并联了Rs-Cs串联缓冲电路，其含义和设置方法同二极管。
- 需要说明的是，Power Electronics（电力电子器件）模块库中，提供了IGBT（没有反并联续流二极管）和IGBT/Diode（反并联续流二极管）两种模型。

3. IGBT仿真模型的参数设置

以没有反并联续流二极管IGBT为例，IGBT仿真模型的参数设置对话框如图7-8所示。其主要参数有：Resistance Ron (ohms) (IGBT导通电阻 (Ω))、Inductance Lon (H) (IGBT导通电感 (H))、Forward voltage Vf (V) (IGBT正向导通压降 (V))、Initial current Ic (A) (初始电流 (A))、Snubber resistance Rs (ohms) 和 Snubber capacitance Cs (F) (IGBT吸收电阻 (Ω) 和吸收电容 (F))

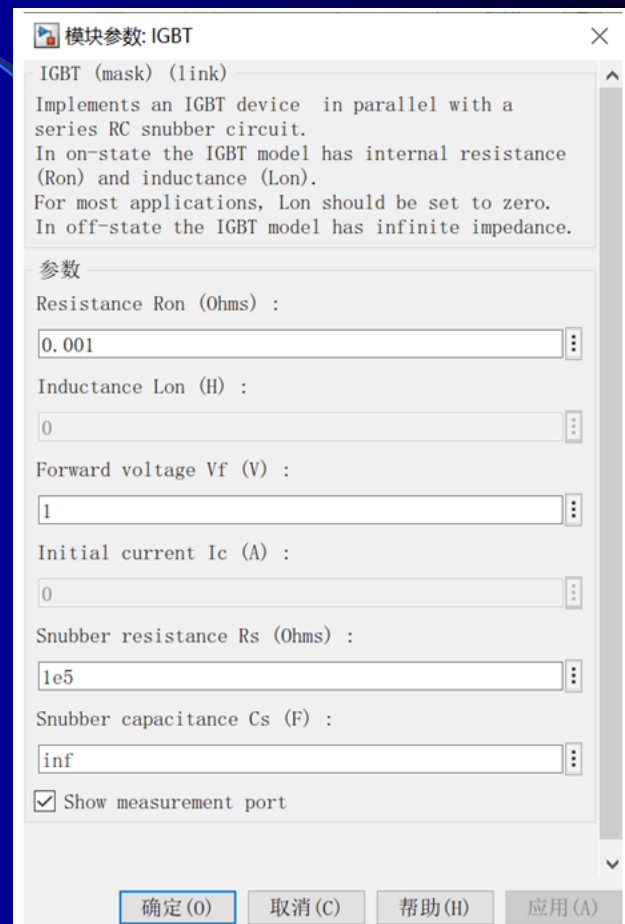


图 7-8 IGBT 仿真模型的参数设置

7.2 整流电路

- 整流电路就是将交流电能变为直流电能供给直流用电设备。常用的整流器包括单相整流器和三相整流器，都可以使用Simscape Electrical组件库中的二极管、晶闸管、GTO或IGBT等器件模型构建仿真电路模型。三相整流器还可以采用通用电桥（Universal Bridge）模块和同步6脉冲发生器(Pulse Generator(Thyristor,6-Pulse))模块来构建三相整流电路。本节主要介绍常用的单相和三相整流电路的仿真。

7.2.1 单相半波可控整流电路

1. 电气原理结构图

单相半波可控整流电路原理图如图7-9所示

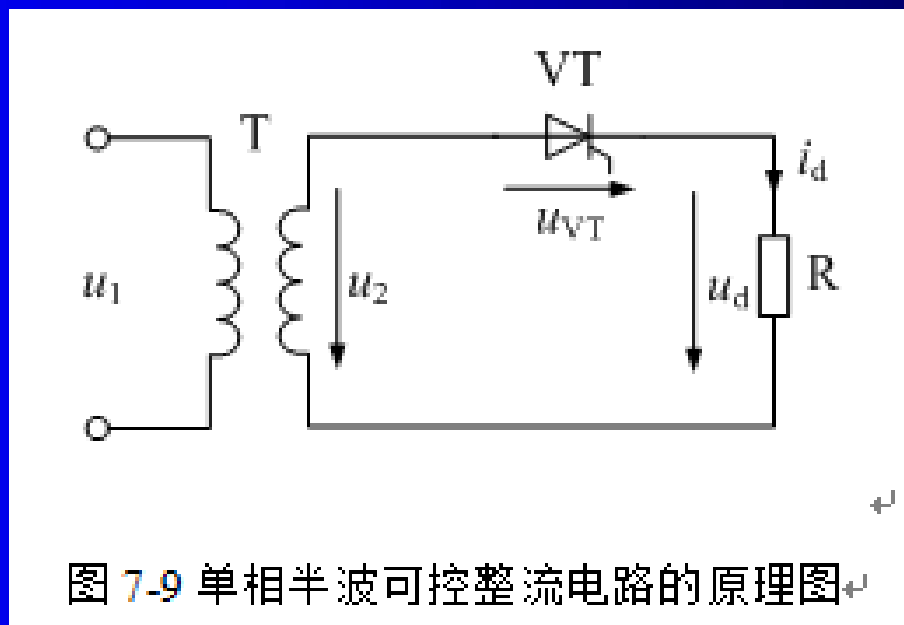


图 7-9 单相半波可控整流电路的原理图

2. 仿真模型及参数设置

- 在Simulink环境下，根据图7-9所示的原理图，采用Simscape Electrical组件库搭建的单相半波可控整流电路的仿真模型如图7-10所示。仿真模型主要由交流电压源、晶闸管、脉冲信号发生器、负载电阻构成。




图 7-10 单相半波可控整流电路仿真模型

3. 系统仿真参数设置及仿真结果

在Simulink模型窗口中单击菜单调试/诊断/Simulink诊断，弹出如图7-11所示的系统仿真参数设置对话框。



图 7-11 系统仿真参数设置对话框

- 根据MATLAB帮助系统给出的建议，对于含有二极管、晶闸管、GTO、IGBT等元件的电路仿真系统而言，为提高运算精度和运算速度，应采用适合于刚性问题的算法，比如ode23tb，并将相对容差设定为 $1e-4$ 。本例题将仿真开始时间设置为0，停止时间Stop time设置为0.1。其他参数为默认值。
- 在Simulink模型窗口中单击仿真菜单栏的运行  按钮，系统开始仿真。仿真结果如图7-12所示。

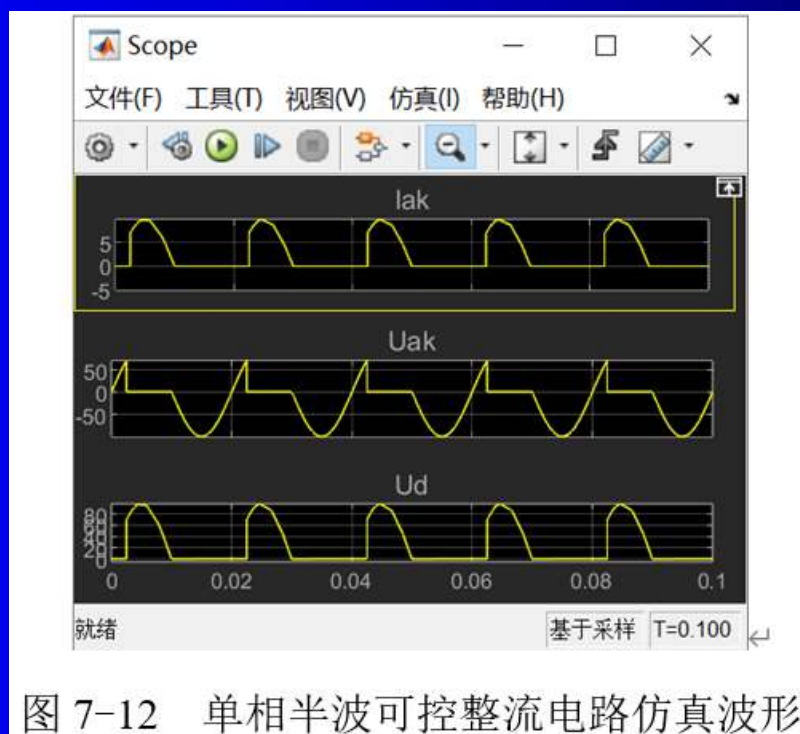


图 7-12 单相半波可控整流电路仿真波形

7.2.2 三相桥式全控整流电路

1. 电气原理结构图

- 三相桥式全控整流电路的原理图如图7-13所示。

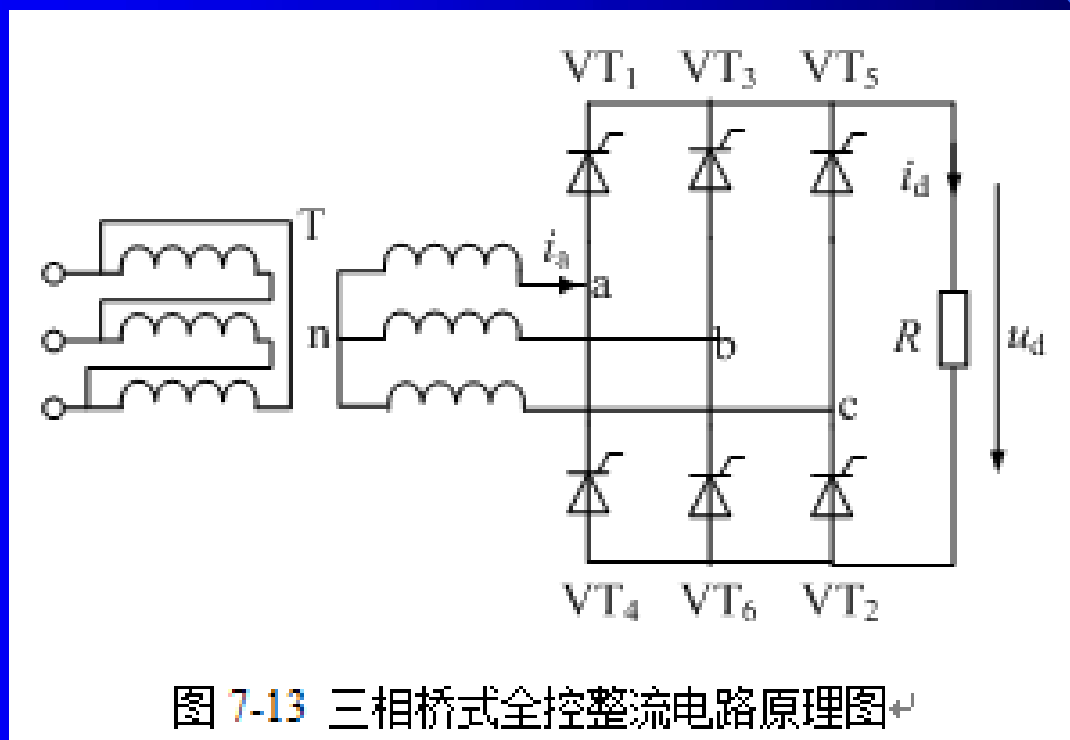


图 7-13 三相桥式全控整流电路原理图

2. 整流桥仿真模型

- 整流桥是交-直流变换的核心单元。MATLAB中已经设计了一个名称为Universal Bridge (Simscape /Electrical/Specialized Power Systems/Power Electronics /Universal Bridge)的通用桥模块，如图7-14所示。

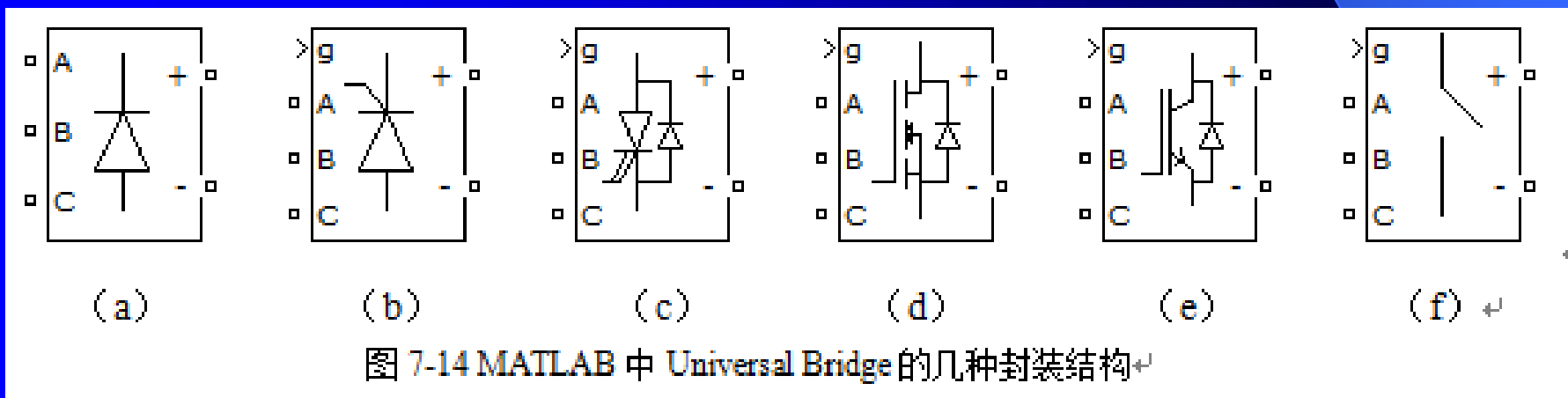


图 7-14 MATLAB 中 Universal Bridge 的几种封装结构

3. 整流桥仿真模型参数设置

以晶闸管整流桥为例，其参数设置对话框如图7-15所示。主要参数有：Number of bridge arms（整流桥模块桥臂数量）、Snubber resistance R_s (ohms) 和 Snubber capacitance C_s (F)（晶闸管吸收电阻 (Ω) 和晶闸管吸收电容 (F)）、Power Electronic device（器件类型选择）、 R_{on} (ohms)（模块导通电阻 (Ω)）、 L_{on} (H)（模块导通电感 (H)）、Forward voltage V_f (V)（模块正向导通压降 (V)）、Measurements（可通过 Multimeter（万用表）测量的物理量选项）。

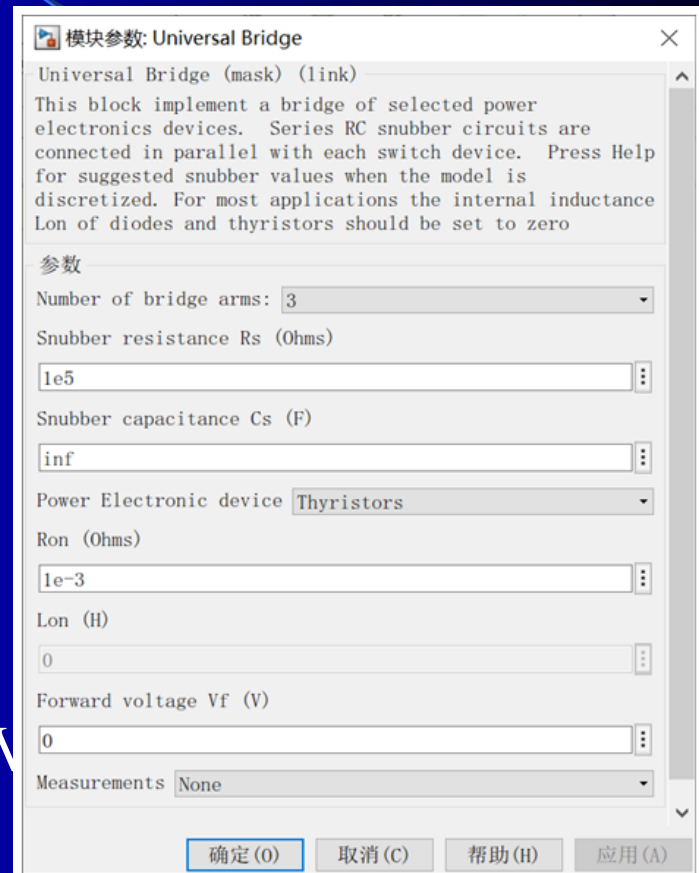


图 7-15 晶闸管整流桥的参数设置

4.同步6脉冲发生器仿真模型

- 同步6脉冲发生器模块可用于触发三相全控整流桥的6个晶闸管。同步6脉冲发生器(Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Power Electronics/Power Electronics Control/Pulse Generator(Thyristor,6-Pulse))的仿真模型如图7-16所示。
- 同步6脉冲发生器共有3个输入端和1个输出端。其中， ωt 为从锁相环同步系统中主变压器A相电压相位的输入端； α 为脉冲触发相位角 α 输入端；Block为发生器控制端，当输入为0时发生器正常工作，输入大于0时发生器不工作。

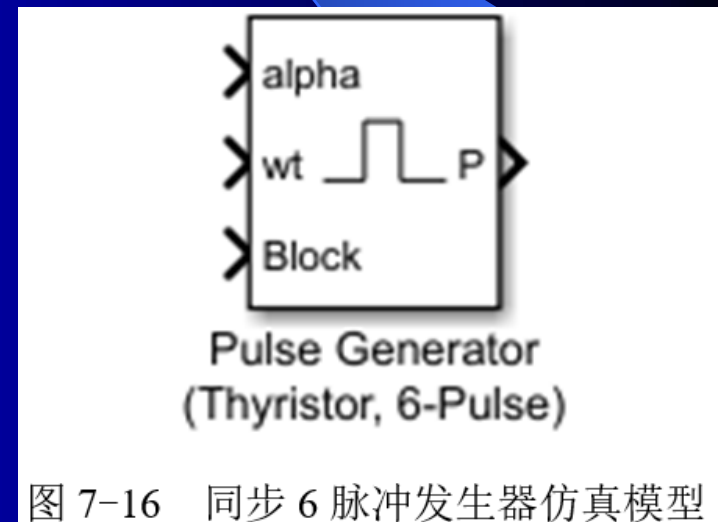


图 7-16 同步 6 脉冲发生器仿真模型

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/425010334132012001>