

SABER 与控制系统仿真

1. 应用背景

1.1 为什么要使用控制系统仿真

对于 SABER 强大的电路仿真功能我们已经有所了解，在模块电路中，我们的反馈控制方法通常比较简单，一般就是一些电阻和电容的组合，但是对更为复杂的控制模式，控制参数的定义难以用模拟电路组合实现，指标间的对应关系也不直观，应用控制系统仿真，便于直观理解以便优化指标，便于转化到数字实现（DSP），而且可以实现一些复杂的控制方式（例如三相系统中常用的静止和旋转的坐标变换）

1.2 SABER 在控制系统仿真的优势和制约

优势：SABER 作为混合仿真系统，可以兼容模拟，数字，控制量的混合仿真，便于在不同层面上分析和解决问题，其他仿真软件不具备这样的功能。

制约：不支持离散系统的频域分析，以及状态方程的分析方法。

1.3 控制系统仿真应用范围

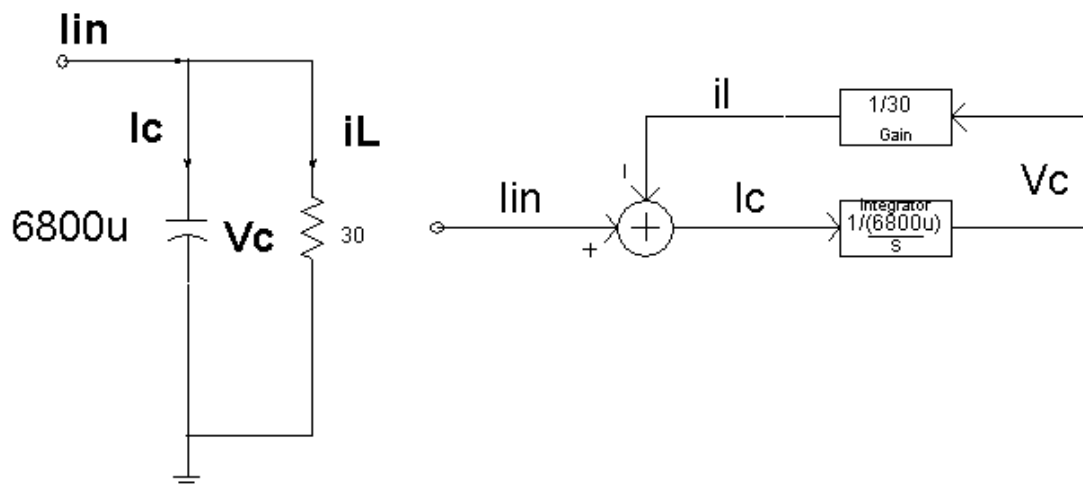
主要应用在变频器，UPS，以及未来的数字化电源系统的控制算法设计部分。

2. 基本方法

2.1 控制流原则

在控制系统仿真中用到的模型有两个特点：

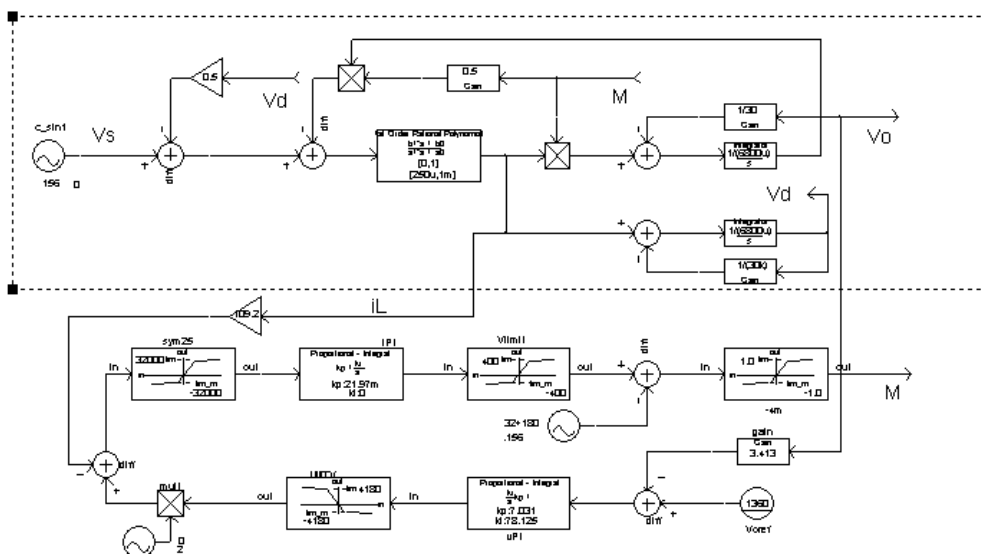
- 1、它们都是无量纲的数值，不论电流，电压，速度，角度，在进行控制系统仿真之前都必须转化为无量纲的数字，因为对于控制处理机构而言，它只关心分析对象的数学行为，这是为了进行统一的分析。
- 2、信号流向是单相的，必须从一个模型的输出（out）口流入到另外一个模型的输入端口，不能颠倒。而模拟电路器件的端口是不区分类别的，信号可以从端口流出也可以流入，只有正负号不同。为了解释这个问题，我们看一个例子如下。



上图中左边和右边分别是一个RC并联电路在电路仿真和控制系统仿真中的描述，在控制系统中用一个积分环节表示电容，对于电路中的电容模型，我们可以以电压或者电流任何一个作为输入量求解另外一个，而在控制系统一旦确定模型方式，输入量就唯一确定，在该例子中选用积分环节，则输入只能是电流才能够描述电容行为，输入如果是电压量，则描述的就是一个电感了。这也说明控制系统的模型具有普遍的应用性。

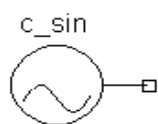
2. 2 基本模型类别

首先我们以一个例子来看看控制系统中常用的有哪些模型：



这是一个双环控制的半桥PFC的控制模型仿真图，图中用虚线框住的部分为主电路等效，下面部分为控制电路等效。其中包含模型如下：

2. 2. 1 信号源模型： 如图所示



amplitude: 156
frequency: 50
phase: 0

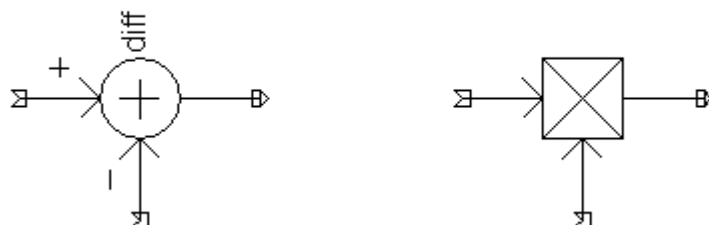
控制系统仿真中的信号源类型（例如正弦，三角）以及赋值方法与电路仿真中一样，不同的是两点：

它只有一个输出端口，必须接到其他模型的输入端口，

它无量纲，可以描述各种同样数学行为的物理量，比如正弦信号可以是电压也可以是电流。

2. 2. 2 信号结合模型:

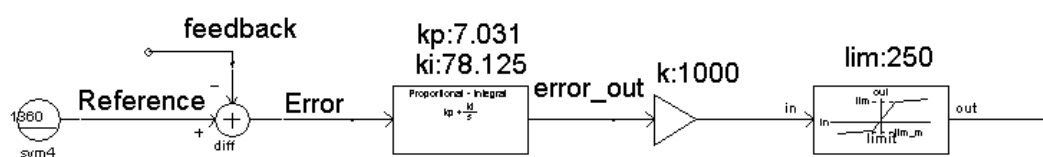
控制系统中最常见的就是对于信号进行比较，并对比较结果进行处理。在这个例子中有以下模型



左边的信号比较，右边的是信号相乘，这可能是控制系统分析中用的最多的两种型号结合方式，信号比较用于误差信号生成（和基准信号比较），信号相乘用于调制（PFC 中的乘法器），SABER 还提供了用于坐标变换的正弦信号结合，以后会介绍。

2. 2. 3 误差信号处理模型:

这是 SABER 控制系统仿真中的核心部分，对于连续系统，和离散系统有不同类别，后面将以实例逐步介绍，这里先由下图简单说明一下



图中右边的方框是一个 PI 调节器的模型，我们可以定义器比例和积分参数。SABER 还提供了微分滞后，以及由多项式定义的传递函数模型。那个三角形是代表增益控制，以上属于线性控制。最右边的是限幅函数，用于防止控制信号的溢出，属于非线性控制。

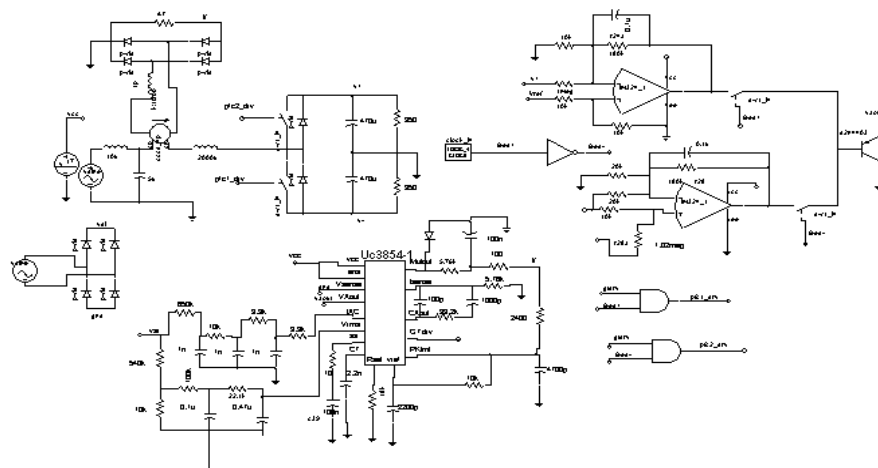
2. 2. 4 接口模型:

在控制系统和模拟系统混合仿真的时候实现信号类型转换，后面介绍。

以上这些模型，均可以在器件模型库的“控制系统—>连续函数”部分查找

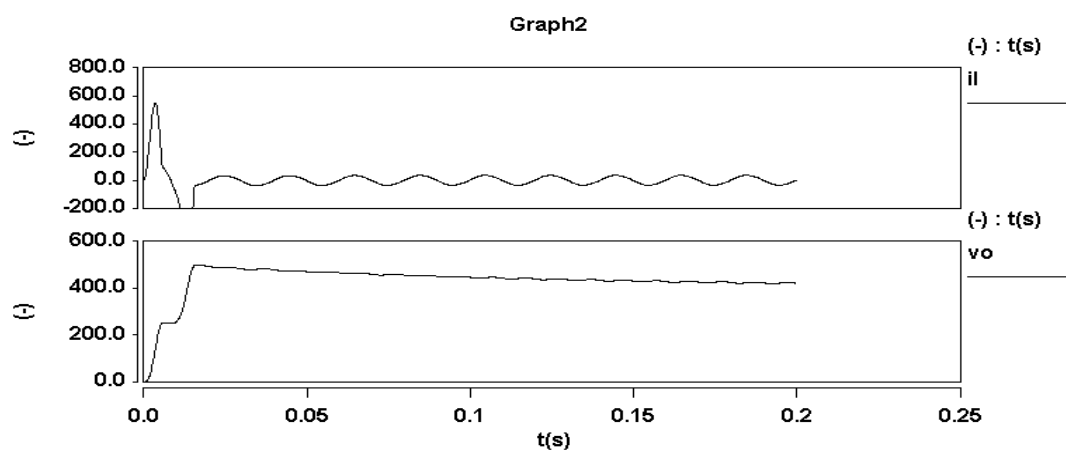
2. 3 基本仿真方法

应用控制系统模型仿真有什么好处呢？我们以其对应的模拟电路为例，见下图：



这是一个 UC3854 控制的半桥 PFC，运用控制系统平均模型的电路，有以下好处

2. 3. 1 在不影响分析对象的前提下速度大大提高

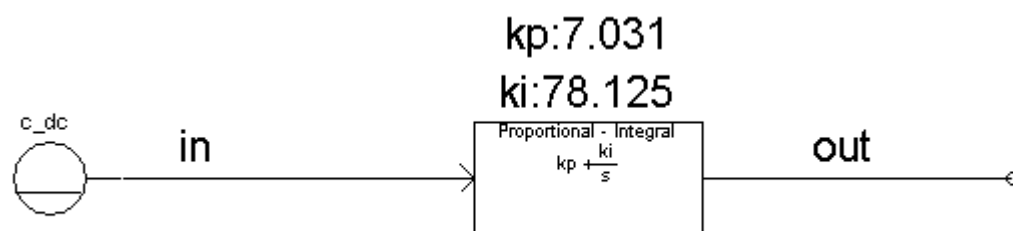


上图是我们运用控制系统模型仿真的电感电流和输出电压，与模拟电路仿真结果基本一致，（由于是平均线性模型，也会有差异，例如纹波特性），但是速度只有模拟电路仿真的 1/1000。

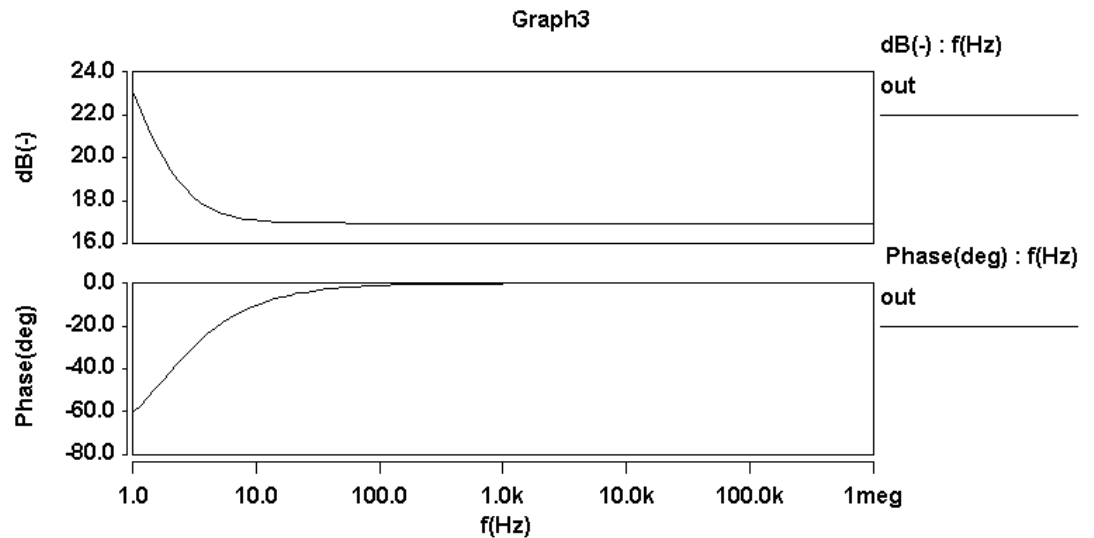
2. 3. 2 分析对象明确，便于频域分析

控制系统仿真对象是控制参数优化，速度的提高对于选择不同参数反复优化很有好处。由于忽略了与控制无关环节的影响，查找问题也容易定位。我们知道，开关电源是强非线性系统，是无法直接分析其频域特性的，而转化为控制系统模型，我们可以对其进行频域分析。L

例如对下图的 PI 调节器



其频域分析结果如下：



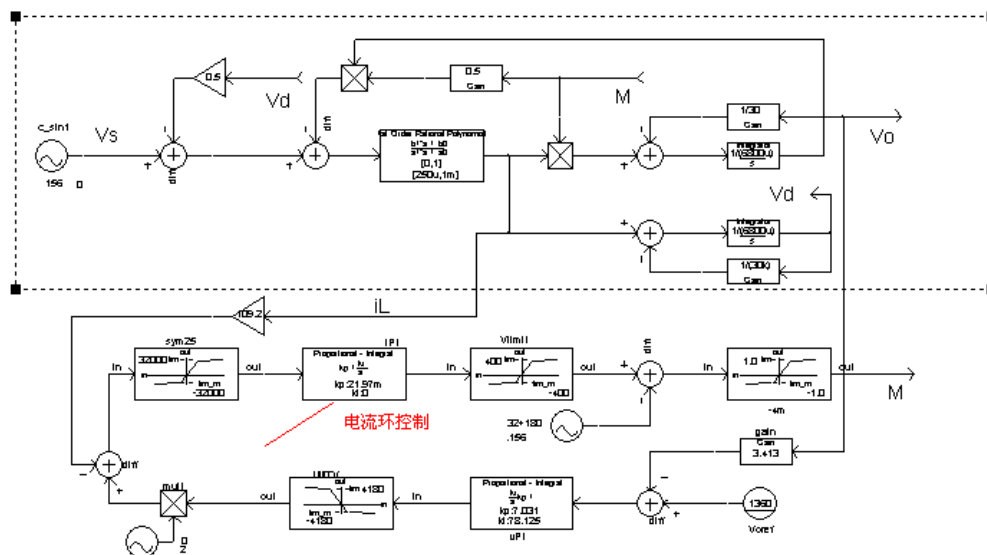
对于带反馈，串联等更为复杂的控制环节，也有同样方法。

3. 应用实例与分析方法

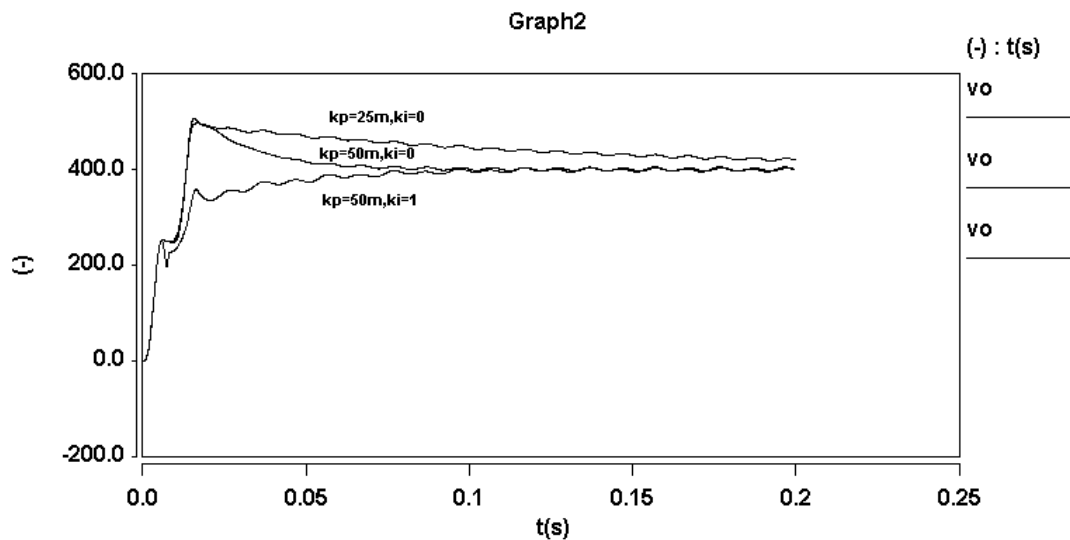
本章主要以一些实例，介绍如何根据设计需要，选择适当的控制系统仿真模型以及方法，并继续介绍一些常用模型。

3. 1 平均模型仿真

还是以半桥 PFC 为例，如下图



首先要明确的是：既然是控制系统仿真，那么分析的主要对象应该是系统的环路控制参数以及它们对于系统受控指标性能的影响。举例来说，我们需要了解电流内环 PI 调节参数对于输出电压的影响，仿真则改变控制模型（图中红线处）中的 K_p, K_i ，仿真得到如下结果，可以看出不同 PI 参数组合的对于输出电压稳定时间和过冲的影响。



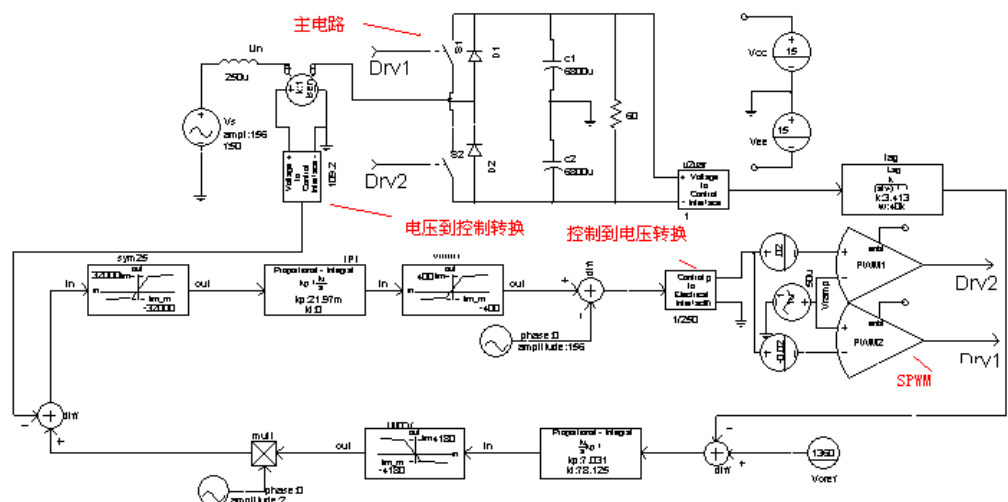
3. 2 混合系统仿真

平均模型仿真好处很多，但是也有一些制约因素，说明如下：

回路建模难度较大：功率电路部分的主回路等效控制模型（图中虚线框内）模准确与否对于仿真结果很关键，通常做法是建立状态方程的基础上画出其控制模型，过程与 MatLab 类似。但是这要求对于拓扑和控制理论都有较好的理解，一般做法是查找相关文献资料。不过一些不是很常用的拓扑，建模还是有一定难度的。

控制方式的影响未考虑：仍然以前图为例，在控制系统平均模型图中， M 表示控制部分的输出信号，它调节功率电路的行为实现控制目标，具体实现通常是 SPWM，这样 M 就应该理解为占空比，但是图中我们只是用它和电感电流相乘来获得输出电流，调制过程和 PWM 信号没有体现出来，中间一些因素（如信号频率，开关速度，压降）的影响也无法体现。

因此很多时候，我们会使用混合系统仿真，如下图：



和平均模型相比，控制部分是完全一致的，这里只介绍变更部分：

主回路：由平均模型换成一个半桥 BOOST 电路。

spwm 信号生成：包括三角波发生和 PWM 比较器，

接口模型：在混合系统仿真中，如何实现不同物理量的统一运算？

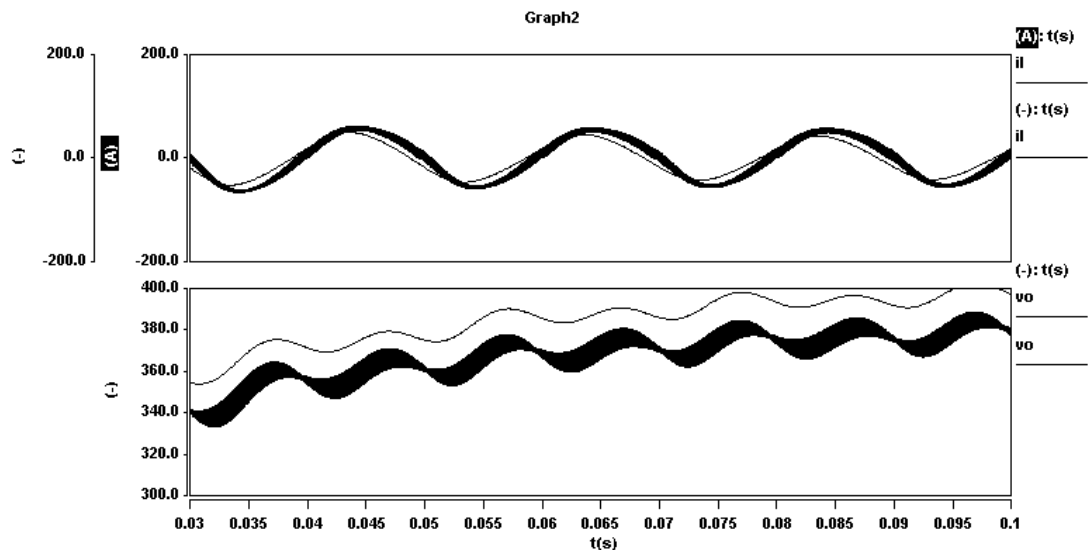
关键就是接口模型的运用，简单说明如下：



图中左边是电压到控制转换模型，把电压量转换为无量纲的控制量，此外 SABER 还提供了电流，速度，转速等其他物理量到控制的转换模型，经过转换以后各种物理量就可以统一运算了。

图中右边是控制到电压转换模型，可以理解为和上面模型的对偶，完成控制运算以后的控制量必须转换成为物理量，才能实现对模拟电路的控制。

需要注意的是模拟量的参考方向，与控制量的正负要对应。

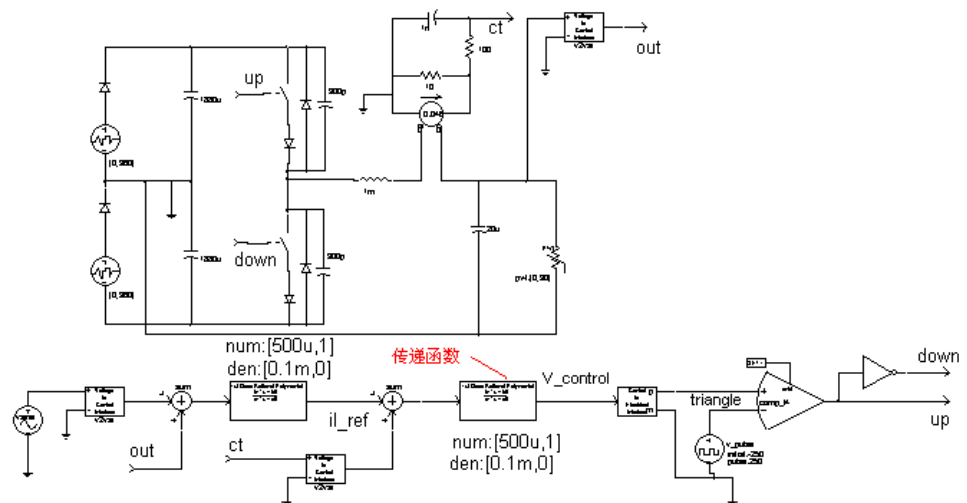


上图显示了用平均模型和混合模型仿真的电感电流以及输出电压的对比，基本上是一致的，不同的是混合模型的波形中含有因为开关行为造成的高频分量。

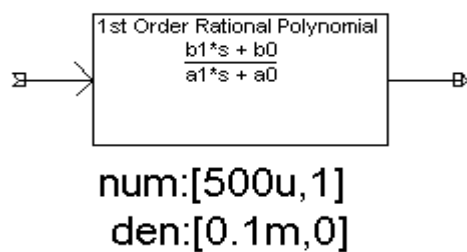
3. 3 离散系统仿真

前面介绍的是连续系统的仿真，实际中，控制经常是用 DSP 实现的，很多控制方法和概念和连续系统也有差异，一些离散系统独有的特性（如零阶保持导致的信号延时）也会对控制效果发生影响，这个时候就要用到控制系统离散仿真的模型。

以下面单相逆变器的为例，介绍如何应用离散控制系统仿真：



这是一个双环控制的逆变器，其中控制实现的关键部分是电压环和电流环的控制参数，这里是用一个**传递函数模型**表示的：如下图：

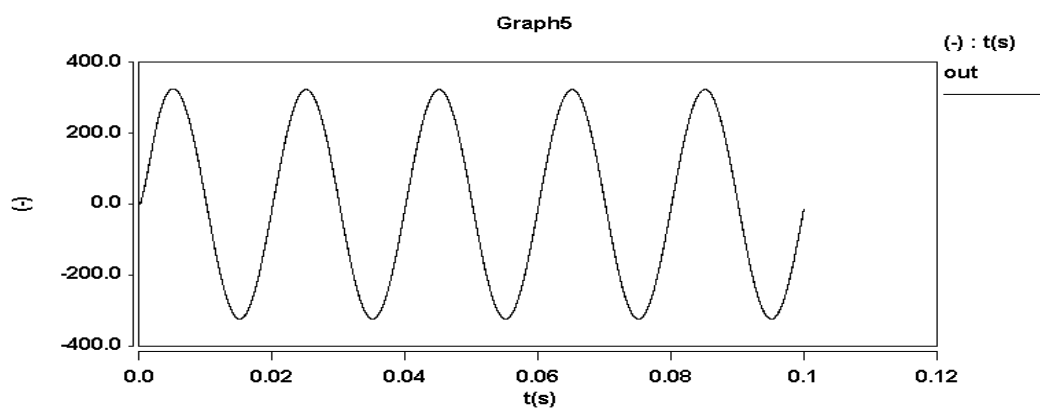


这是一个连续控制系统的通用模型，通过传递函数形式表示控制特性，可以分子分母的阶数，多项式的系数，以及增益，以图中参数为例，则传递函数表示如下：

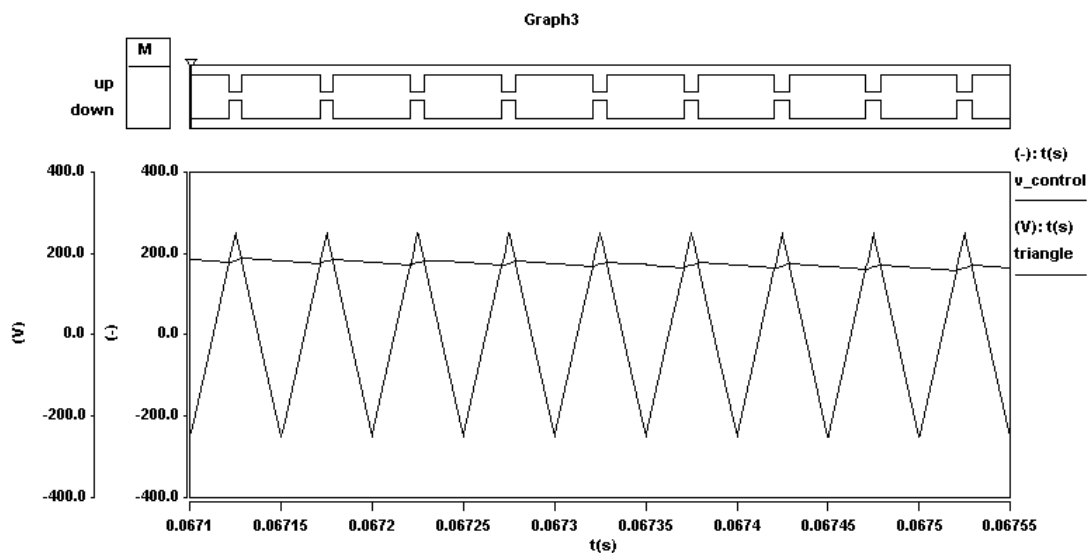
$$H(s) = (500u \cdot s + 1) / (0.1m \cdot s)$$

其它高阶的拉普拉斯传递函数定义方法类推

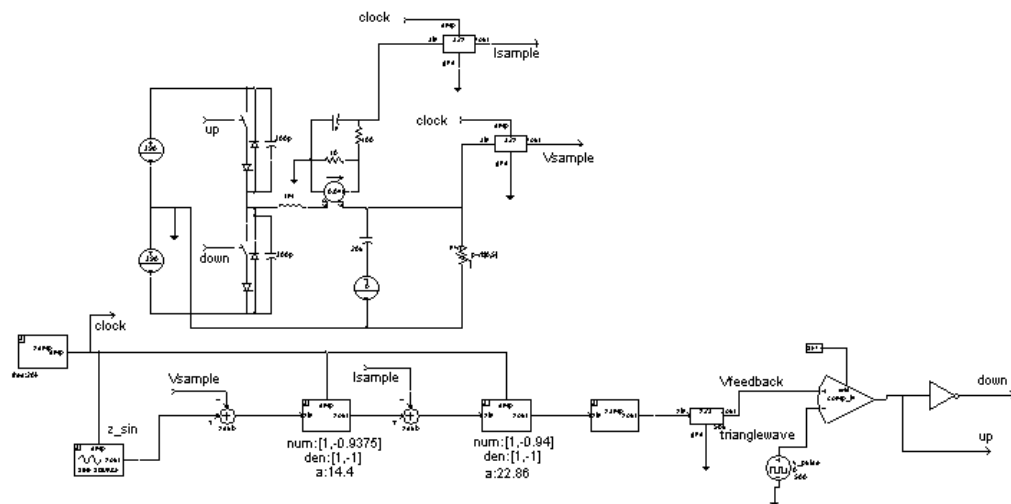
仿真结果如下
输出电压波形：



PWM 信号发生部分：

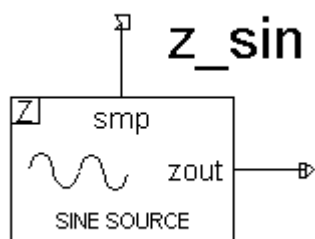


如果我们在离散系统中描述前面的逆变电路，仿真电路如下：（信号采样部分和控制部分）

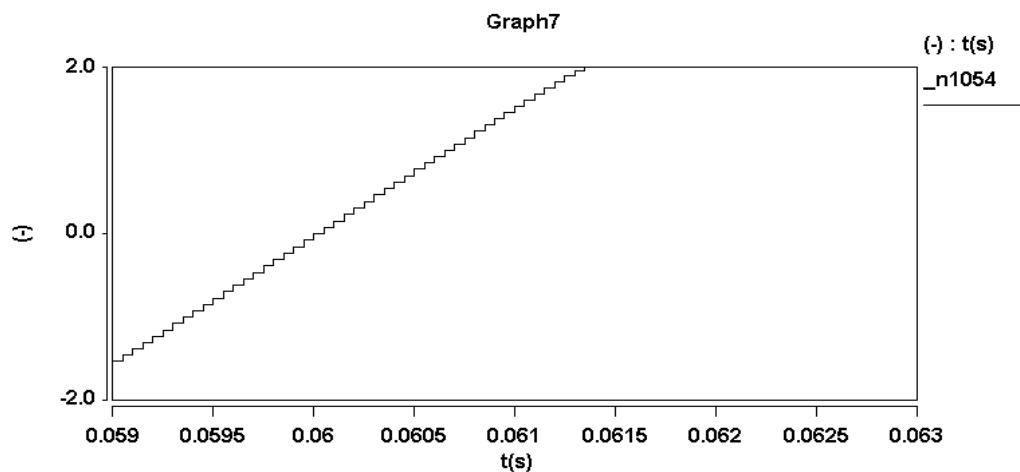


与连续系统相比，离散系统最大的特点就是信号是按照某个频率采样进行的，所以离散系统中的模型也都需要定义采样信号，可以分为以下几类

1、 信号源



离散控制系统中的信号源类型和定义方法与连续系统一致，差异在于它们都有一个采样端子，通常接到一个时钟信号的输出，定义采样频率。而他们输出波形也自然是采样形式的。以右图的正弦信号源为例，其输出如下图。（采样频率 20K，局部波形）



2、信号转换

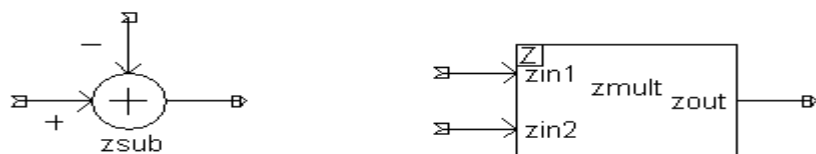
模拟到离散控制系统的转换接口模型有两个，如下图



左边是模拟系统到离散控制系统转换模型，右边是离散控制系统到模拟系统转换模型，它们的定义与用法与联系系统转换模型基本一致，只是需要定义采样信号。

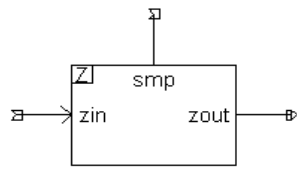
3、信号结合模型

对信号进行各种数学运算的模型



左边是信号相减，右边是信号相乘，用法与连续系统一致

4、信号处理模型



num:[1,-0.94]
den:[1,-1]
a:22.86

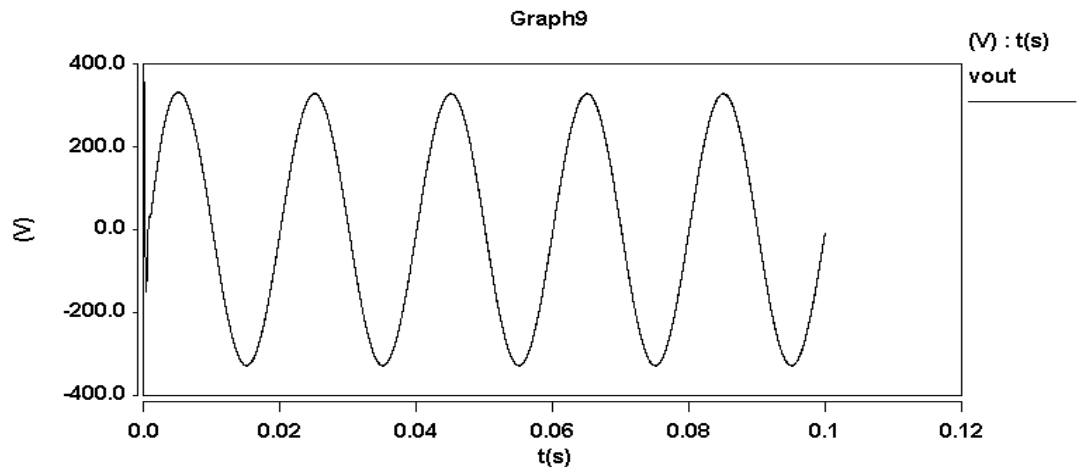
这是离散控制系统仿真中信号处理的模型，以 Z 变换多项式的方法来定义信号控制函数，以图中的模型为例，对应的传递函数是

$$H(Z) = 22.86 \cdot (1 - 0.94Z^{-1}) / (1 - Z^{-1})$$

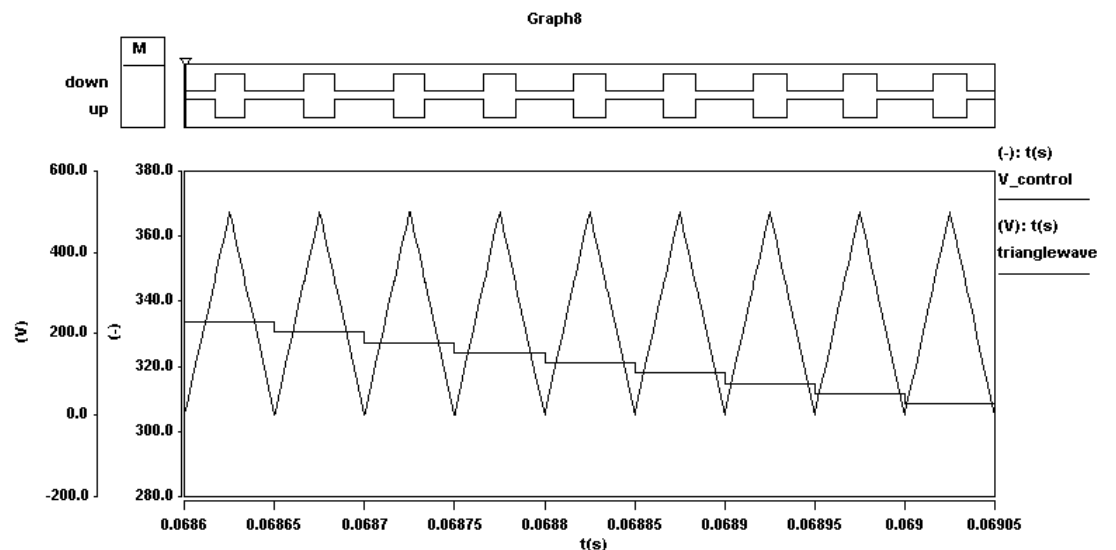
其它高阶系统类推。

因为离散信号处理与采样信号频率相关，这个模型上端就是采样信号端口，接到采样脉冲信号输出。

以上这些模型，均可以在器件模型库的“控制系统—>采样数字系统”部分查找
仿真结果如下
输出电压

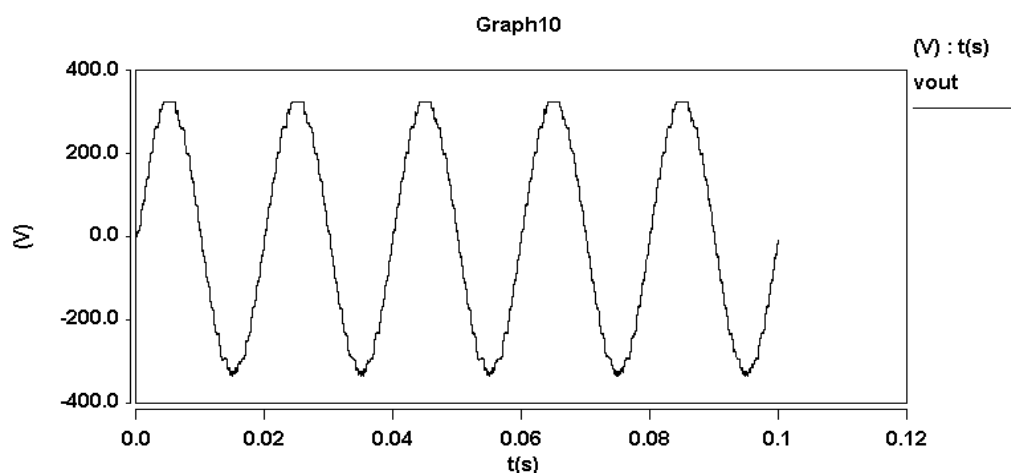


SPWM 发生部分

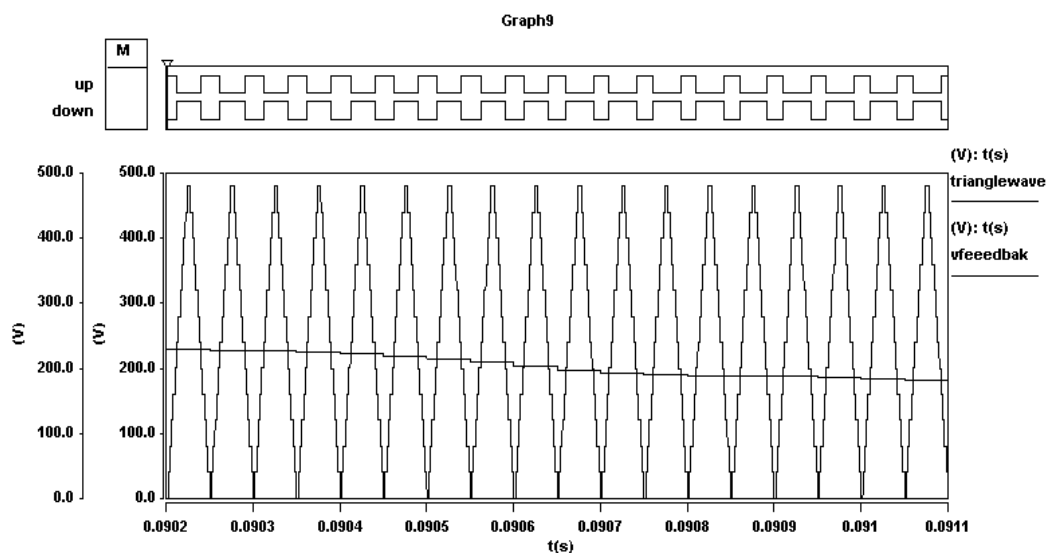


可以看到 PWM 信号是采样形式的（采样频率 20K），三角波采样频率（20Meg），这里看不出来。

如果降低三角波采样频率，例如降至 500K，仿真得到输出电压波形如下：



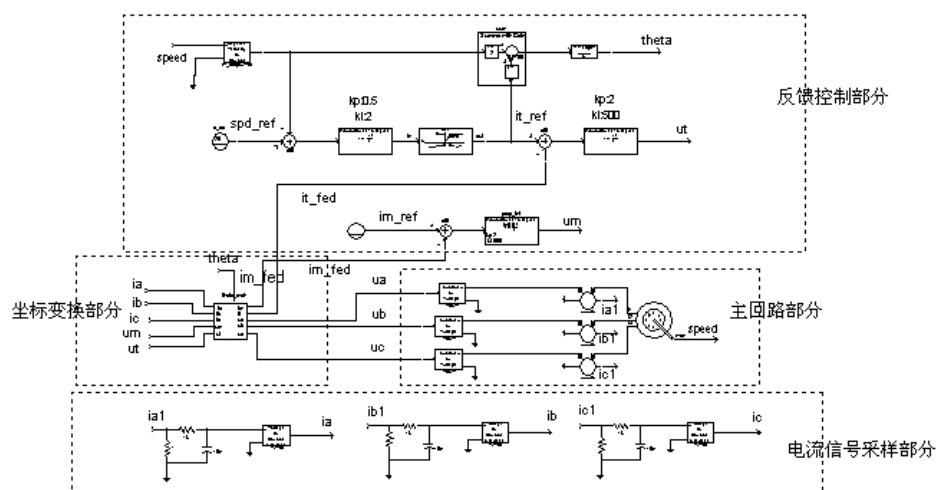
SPWM 发生部分



可以看到输出电压出现了严重畸变，这种问题是离散系统独有的，连续系统仿真是无法分析的。

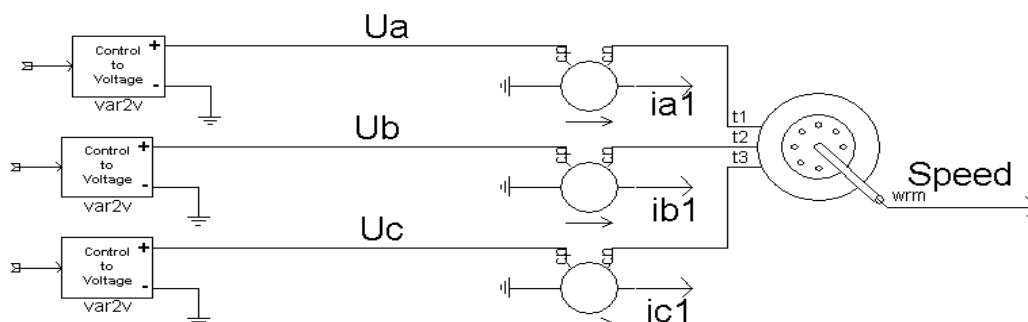
3. 4 三相系统控制仿真

象在变频器，UPS 或者其他的涉及三相电路控制中，仿真方法也是基本和前面一样，主要的问题在于三相系统控制需要坐标变换，由三相静止坐标变换到两相旋转坐标，然后和基准信号进行比较与控制，而误差放大信号再经过两相旋转到三相静止的反变换，去控制主电路的行为。我们以下面的例子来说明：



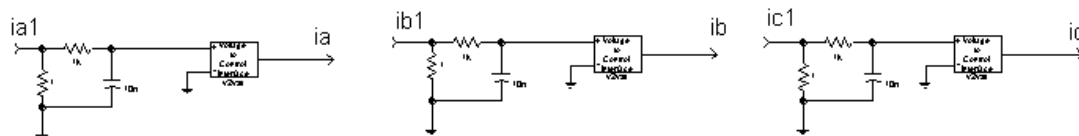
这是一个 TD3000 系列变频器的控制实现电路，图中已经用虚线框和文字表示了电路的基本结构，简单说明如下：

电路的主回路部分：



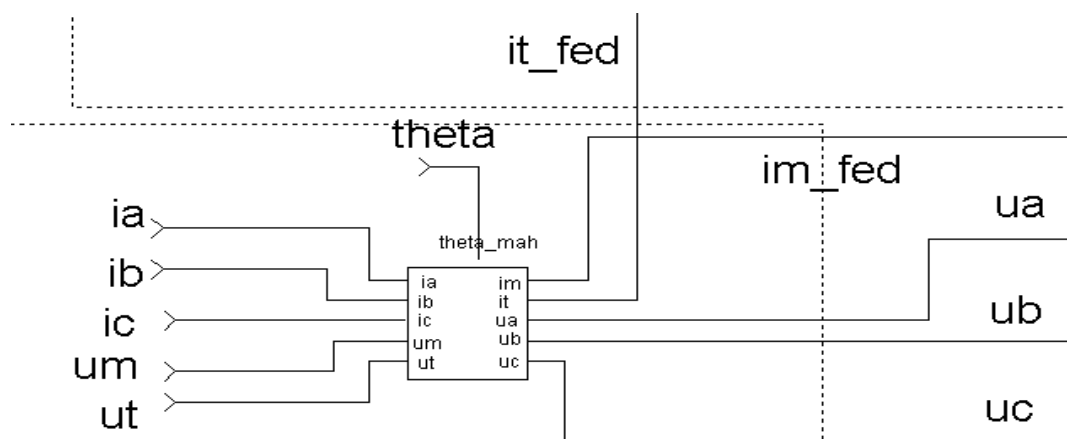
这是一个简化模型，从控制部分反馈的三相电压 U_a , U_b , U_c ，控制电机，并且完成电流采样 ($ia1, ib1, ic1$) 和速度采样(Speed)。需要注意的是图形左边的控制到模拟接口模型必不可少。当然实际中主回路一般适用的是 spwm 或者电压空间矢量控制的逆变桥来实现，这里关注于控制，简化以加快速度。

电流采样部分：



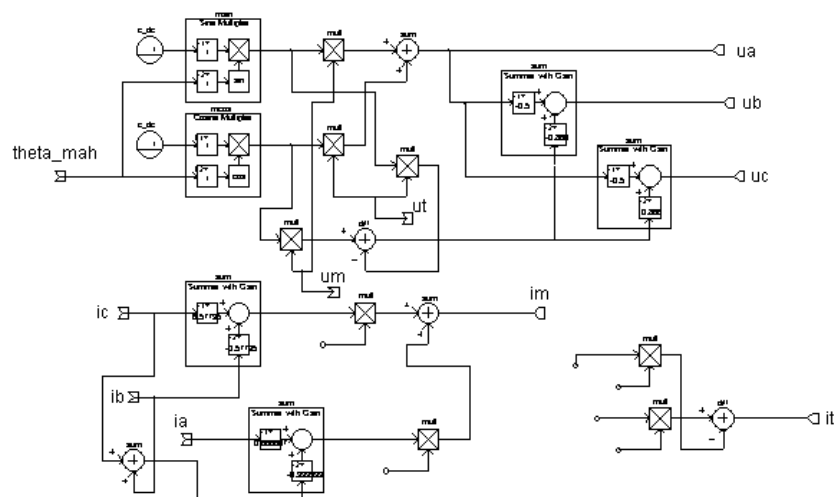
这里主要是对采样的电流信号转换为电压值，并进一步通过接口模型转换为控制量。

坐标变换部分：



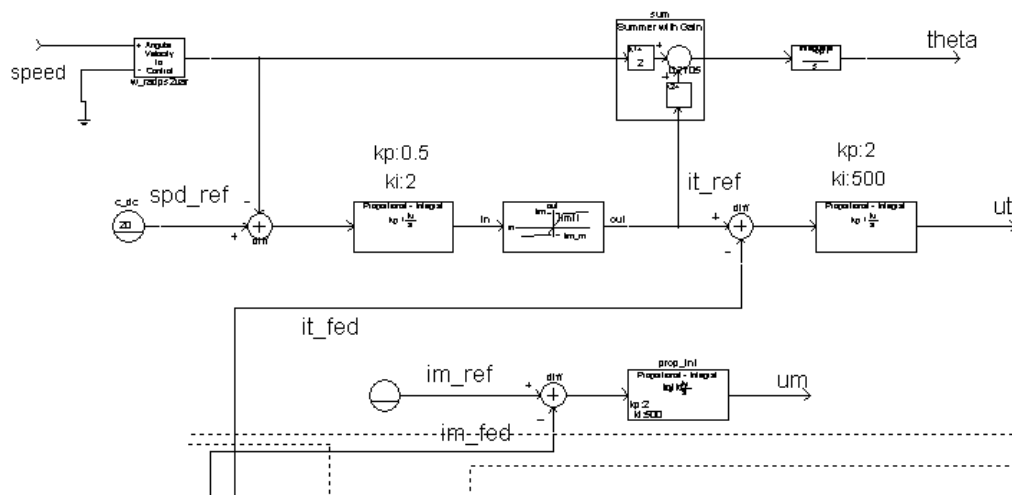
这个就是实现坐标变换的模型，它完成两个功能：1、把采样的三相电流信号(ia,ib,ic)变换成为两相旋转坐标下的励磁电流(**im_fed**)和电枢电流(**it_fed**)。2、把反馈控制的输出—两相旋转坐标下的电压信号 **um**，**ut** 转换为三相静止坐标下的电压 **ua,ub,uc**，去控制电机。

坐标变换模型内部结构如下



它是用一些信号运算的模型结合构造的，如信号乘积，相加，三角函数运算，很容易理解。因为它是不限制对象物理量，所以也可以用于其他类型的坐标变换。

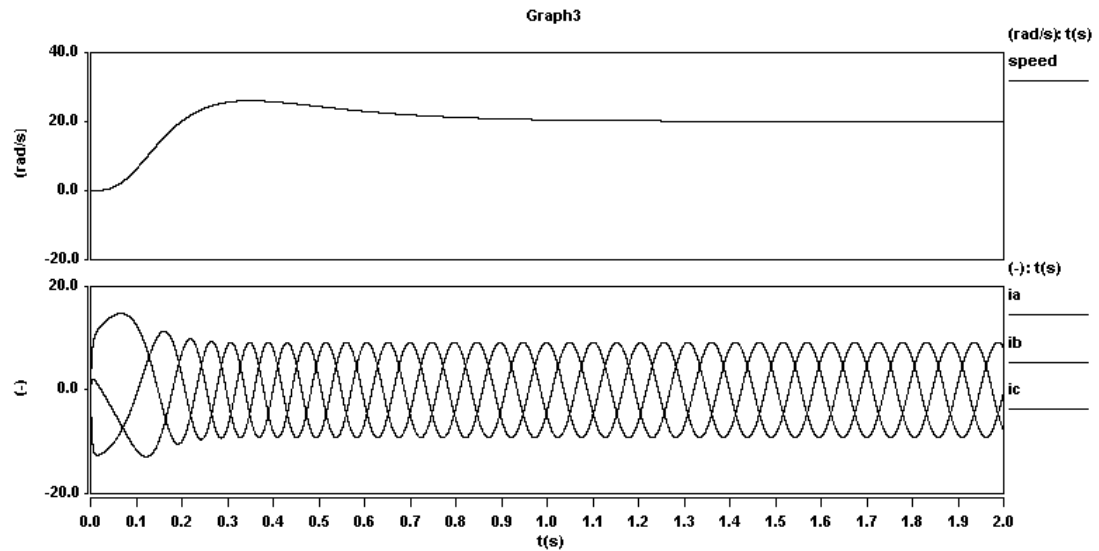
反馈控制部分



控制部分比较简单，因为是在旋转坐标下进行的，很多地方就和直流电机一致。上面是旋转角度生成，中间是速度环和电枢电流的双环控制，下面是励磁电流控制。

仿真结果如下

转速和三相电流



总结：

- 1、SABER 中控制系统仿真是一大类应用，有众多的模型和算法，合理应用这些手段，可以解决非常复杂的算法设计问题。其中重点了解的是各种接口模型，以及常用信号处理模型。本文中提到的这些模型，可以解决多数应用问题。
- 2、 控制系统仿真通常需要对于控制对象进行一定的简化，原则是不影响基本性能分析的条件下忽略对仿真目标影响小的部分。