

# 三相异步电机转向、调速控制仿真

16711094 李翰韬

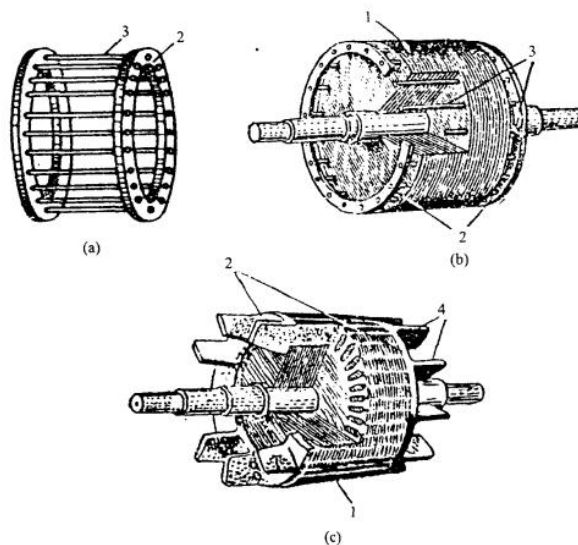
## 一、三相异步电机简介

交流电机可以分异步电机和同步电机两大类。“异步”是指电机在固定电网频率下，转子的转速随负载大小而变，即转速与电网频率无严格不变的关系。“同步”是指电机转子以恒定的转速旋转，即转速与电网频率保持严格不变的关系。

异步电机主要作电动机用。在工农业生产中，如中小型轧钢设备、矿山机械、起重运输机械、各种机床、水泵和农副产品加工机械等都采用三相异步电动机来驱动。日常生活中一些电气设备大量应用单相异步电动机。在交流电源系统的飞机上，三相异步电动机广泛地应用到燃油和滑油系统（燃油泵、滑油泵）、冷却系统（风扇）、操纵系统（驱动舵面、襟翼、副翼等）以及其它各种机构中。

异步电动机结构简单可靠、价格低廉、相对质轻、体积小、机械特性硬、但调速复杂。

异步电动机主要由静止的定子和旋转的转子组成。三相异步电动机在定子上嵌有对称的三相绕组（空间互差  $120^\circ$  电角，绕组匝数、截面积等均相同）。它的转子多采用笼型绕组。笼型绕组是由安放在转子铁心槽内的裸导条和两端的端环连接而成，见图绕组的材料有铜和铝两种。除笼型外还有绕线型。绕线型转子绕组与定子绕组相似，做成对称三相绕组，在内部接成 Y 形（也有  $\Delta$  形），三根引出线分别接在滑环上分别引出，正常运行时，在外边予以短接。



上图为笼型异步电机转子示意图。

在自动控制元件课程中，我们学习了三相异步电机的基本模型和参数知识。而若是想真正地应用三相异步电机，这些知识是远远不够的，还需要对三相异步电机进行建模与仿真。

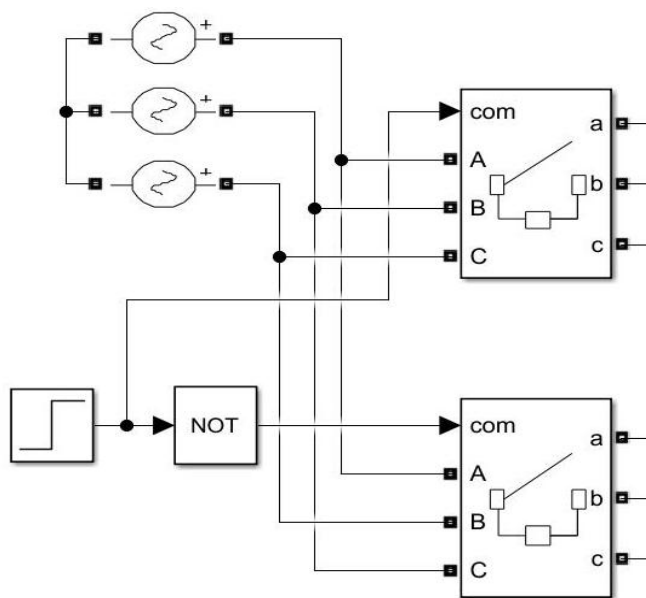
本文意在対三相异步电机的控制过程进行仿真，并验证课程中学习的知识。三相异步电机的控制包括启动、制动、正反转和调速。启动、制动两方面课程中并没有过多提及，且与课程内容关联度不高，便不在此提及。

故本文主要在正反转控制以及调速控制尝试仿真。

## 二、三相异步电机正反转控制

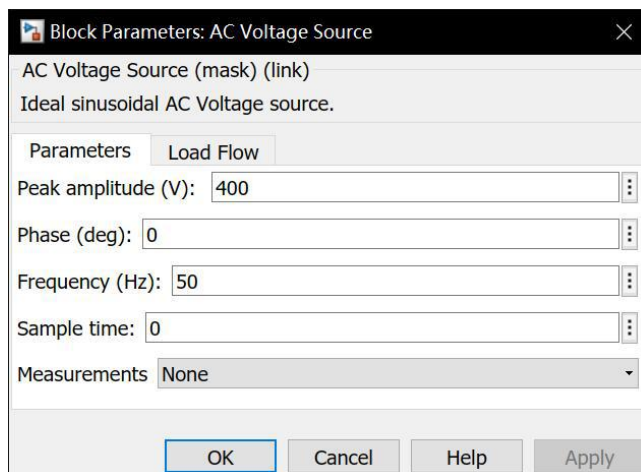
为研究三相异步电机正反转控制，本文在 Simulink 中对仿真模型进行建模。在建模过程中，可以发现本次仿真的难点在于如何在 Simulink 中对于电源反相进行自动控制。

为实现改变电流相序，本文使用两个三相断路器分别接入异步电动机定子三相绕组，通过控制阶跃信号在某时刻的接通，用非门实现电源线路选择，实现电流相序的改变。



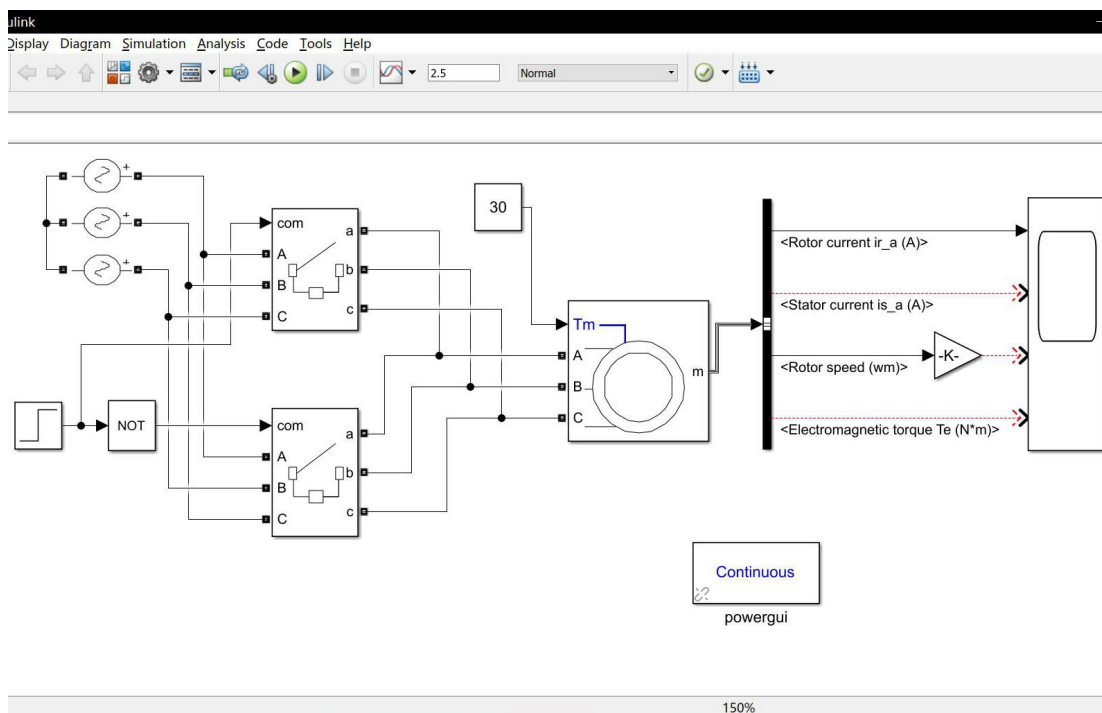
上图展示的是三相异步电机正反转控制模型中的信号源模块。

其中三相电源使用三个 AC Voltage Source 模块实现。幅值 Amplitude 设置为 400，频率 Frequency 设置为 50，初始相位 Phase 从上至下分别设置为 0、120、-120，下图展示的是第一个模块的参数设置。



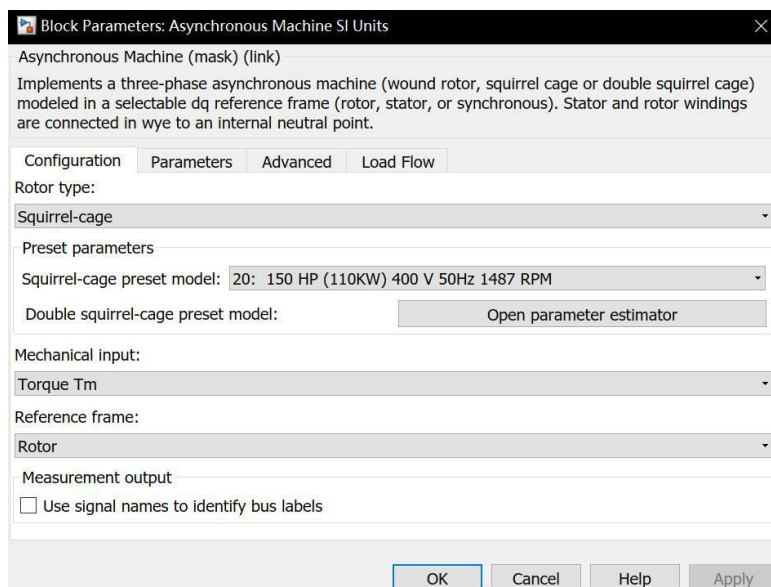
信号选择模块使用一个阶跃信号源配合两个三相断路器，实现通过阶跃信号的变化，使电源反相。

下图为三相异步电机正反转模型图。



信号源上升时间设为 1，意为在电动机正向转动 1s 后，将正向电源关断，反向电源接通。系统使用模块包括：

- ①. 模型环境(Powergui)  
参数为默认值。
- ②. 三相电源模块(AC Voltage Source)  
参数上文已介绍。
- ③. 两个三相断路器(Three-Phase Breaker)  
参数为默认值。
- ④. 三相交流电动机(Asynchronous Machine SI Units)  
预设模型选择 20:150HP(110kW) 400V 50Hz 1487RPM，设置界面如下。



⑤. 逻辑运算(Logical Operator)

选择非门 NOT。

⑥. 常数(Constant)

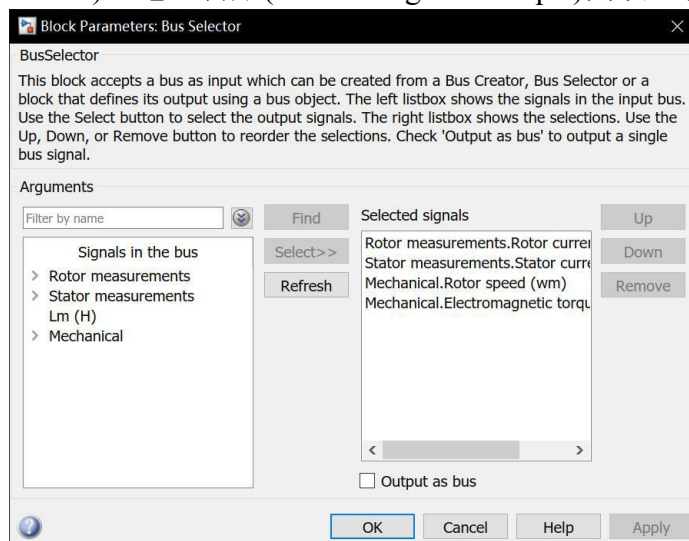
常数为 30。

⑦. 增益(Gain)

增益为  $\frac{30}{\pi}$ ，即输入  $30/\pi$ 。

⑧. 信号分配器(Bus selector)

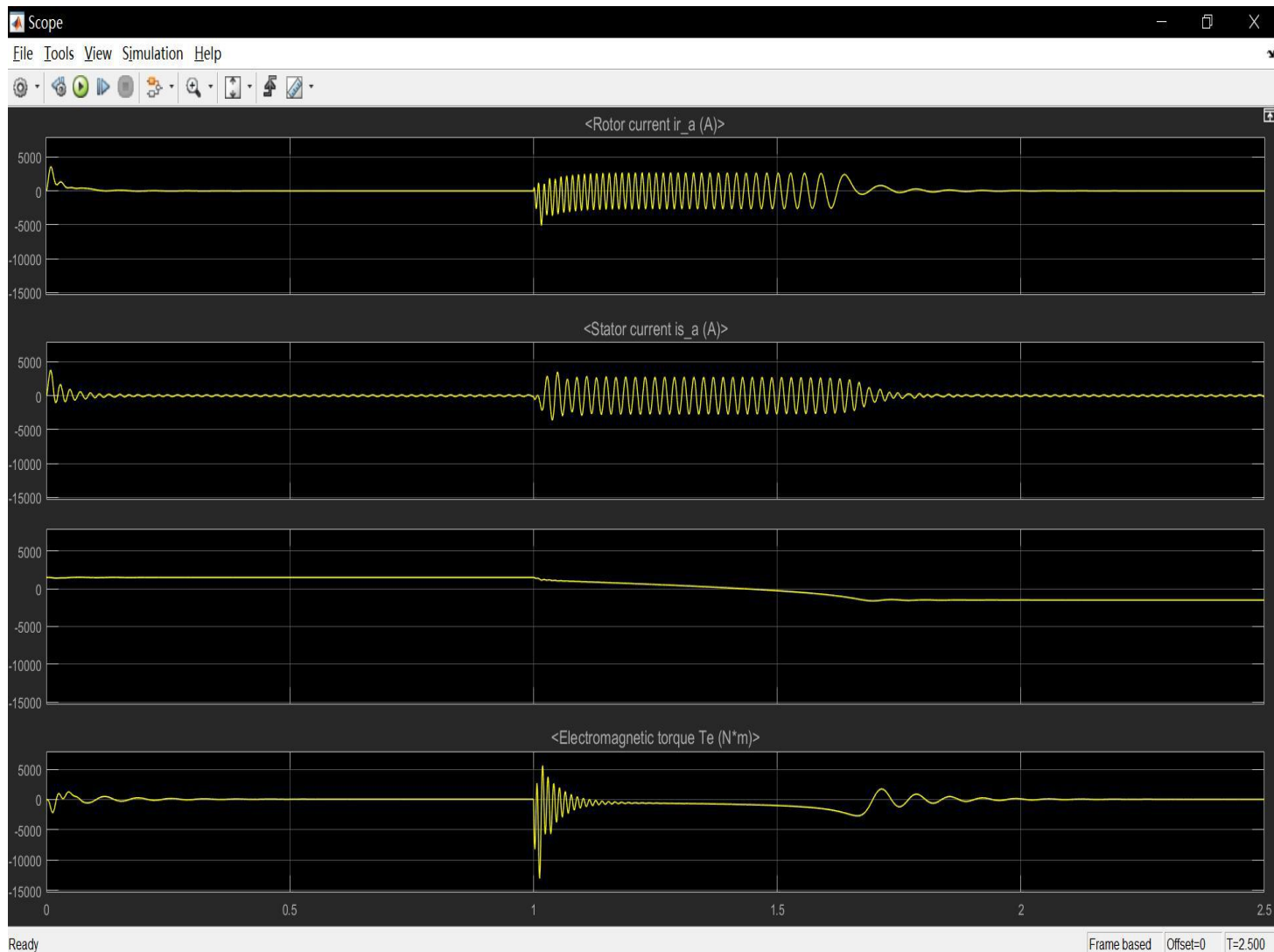
信号分配器输出信号选择定子电流(Rotor current)、转子电流(Stator current)、转速(Rotor speed/Wm)、电磁转矩(Electromagnetic torque)四项，设置界面如下：



⑨. 示波器 Scope

模型建立完毕后，设置仿真参数。设置模型的仿真解法 Solver 为 ode23s，仿真停止时间 Stop time 设置为 2.5s。启动仿真，则示波器显示图形如下图所示。





从上至下四个波形分别为转子电流波形、定子电流波形、转速波形、电磁转矩波形。

由图可知，本文中的三相异步电机正反转模型正确地在 1s 时控制电机进行转换转向，说明此模型可以达到预期效果。

从波形图中可以看出，定子电流和转子电流在三相异步电机开始正转或反转时都有一段时间的波动，随后趋于平稳。转速波形在 1s 时迅速下降，经过约 0.75s 的时间，由正转完全变换为反转。电磁转矩波形在正反转开始从波动趋向平稳。

四个波形所示的结果与课程中所学习的理论知识相符合，说明此模型建模基本成功。



### 三、三相异步电机调速控制

在交流电动机中，同步电动机和异步电动机的调速应用得特别广泛。

根据查阅资料所知，同步电动机的调速，靠改变其供电电压的频率来改变其同步转速，调速方式比较单一；异步电动机的调速方式则比较灵活，而且系统中的负载大部分是异步电动机。

异步电动机转速的表达式为：

$$n = n_1(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s)$$

上述式中， $n$  为转子转速， $n_1$  为同步转速， $s$  为转差率， $f_1$  为同步频率， $p$  为极对数。分析转速表达式可以看出，三相异步电动机的调速方式，大致可以分为以下几种类型：

- ①. 改变转差率  $s$  调速，包括降低电源电压、绕线式异步电动机转子回路串电阻等。
- ②. 改变旋转磁通势同步转速调速，包括改变定子绕组极对数、改变供电电源频率等。
- ③. 双馈调速，包括串级调速，属于改变理想空载转速的一种调速方法。
- ④. 利用转差离合器调速。

以上几种调速方式各有优缺点：

- ①. 变极调速只能成倍变化，是有级调速；
- ②. 改变定子端电压调速在低转速时，电动机效率低，温升高；
- ③. 串电阻调速的缺点是效率低；
- ④. 只有变频调速，可以比较好地克服这些缺点，它还具备以下优点：从基频向下调速，为恒转矩调速方式；从基频向上调速，近似为恒功率调速方式；调速范围大，转速稳定性好；运行时  $s$  小，效率高；频率  $f_1$  可以连续调节，变频调速为无极调速。

故一般的三相异步电机调速一般选择变频调速。目前，异步电机变频调速的常用的控制策略大致有以下几种：

- ①. 转速开环恒压频比控制（恒  $U/f$  控制）策略。
- ②. 基于转子磁链定向的矢量控制策略。
- ③. 基于定子磁链恒定的直接转矩控制策略。
- ④. 无速度传感器的矢量控制策略。

上面四种控制方法中，恒  $U/f$  控制时开环控制，是应用较多的一种，主要应用于对速度精度要求不高的场合或负载变动不大的场合；后三种则应用于对速度精度要求较高的场合。

在低压电气应用领域，电力电子器件的发展已经能很好地满足变频调速的要求，但在高压领域，由于电力电子器件的电压耐贵、开关损耗和开关频率的限制，单只电力电子器件还难于实现对高压幅值和频率的灵活调整。

根据变换环节的不同，高压变频调速系统可分为以下两类：“交-交”型和“交-直-交”型。

“交-交”型变频器，能够把固定频率的交流电源直接变换成频率连续可调的交流电源，由于其没有中间直流环节，故变换效率高。

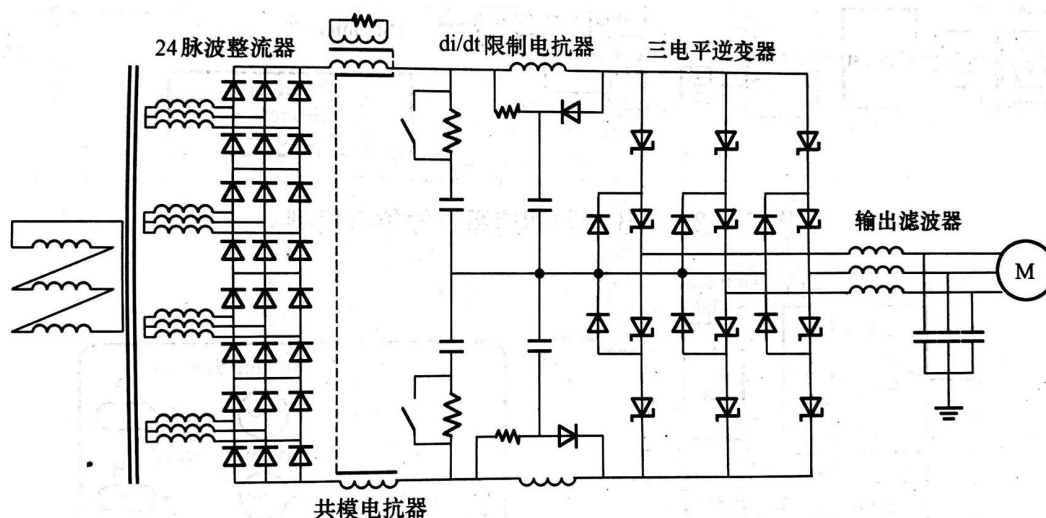
“交-直-交”变频器，首先需要把固定频率的交流电源整流为直流，再将直流逆变为频率连续可调的交流电源，其输入端可以选择采用隔离变压器或进线电抗器，整流部分可以采用二极管整流或 PWM 可控整流，逆变部分则通常采用 PWM 逆变器。由于它具有输出频率变化范围大、功率因数高、谐波易于消除等优点，“交-直-交”变换结构，是目前高压变频调速系统应用的主流。

本文将尝试以二极管箝位式高压变频器为例，对高压“交-直-交”变频系统进行建模和仿真研究。

高压变频系统由主电路和控制电路构成。

主电路包括整流器、中间直流环节、逆变器。控制电路常由运算电路、检测电路、控制信号的输入、输出电路和驱动电路几部分构成，其主要任务是完成对逆变器的开关控制以及完成各种保护功能。

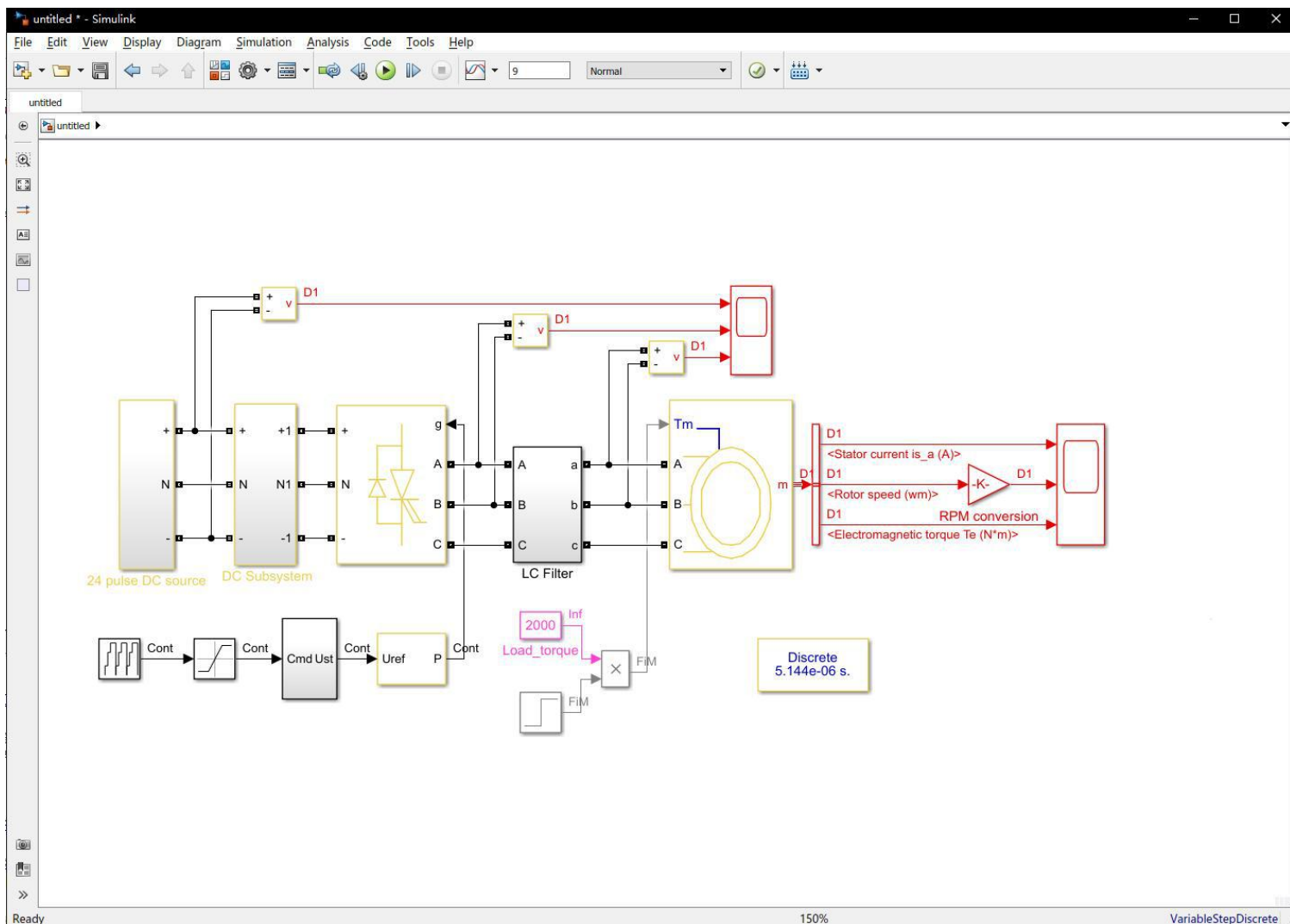
经查阅资料，下图是一种经常被应用的典型高压变频器拓扑结构，它采用了 24 脉波整流、中心点箝位的三电平逆变结构。



除此之外，变频器的输出侧还必须配置输出滤波器(本模型中用 LC 滤波器)，才能用于普通的笼型电机。

分析完高压变频调速系统后，使用 Simulink 对其尝试建模。

该模型包括了 24 脉波直流电源(24 pulse DC Source)、中间直流环节(DC Subsystem)、三电平逆变器(Three-Level Inverter)、输出滤波器(LC Filter)、三相异步电机(Motor)、电机信号分配器(Bus selector)以及相关的控制单元

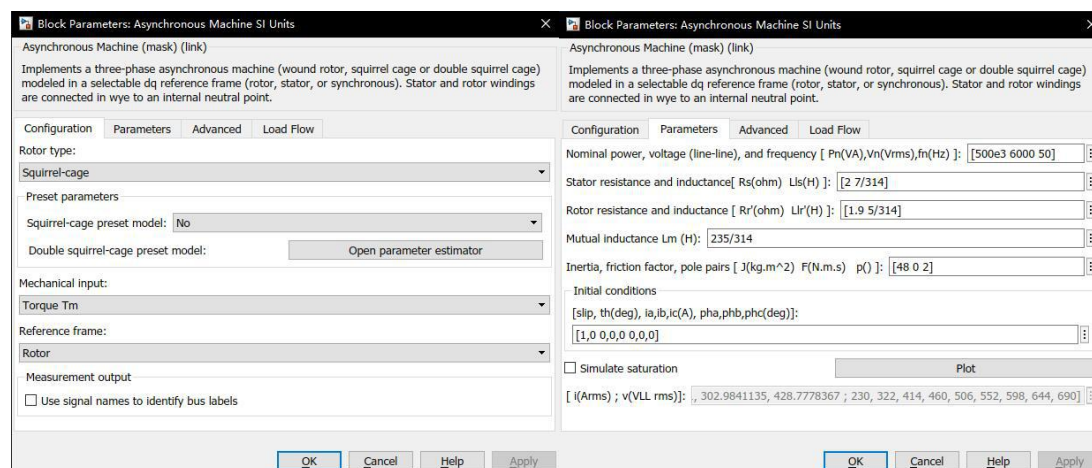


下图为高压变频调速系统的仿真模型。

所示模型的构建方法以及模块简介如下：

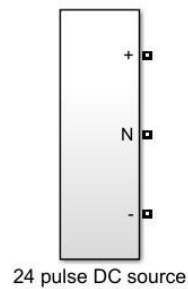
### ①. 三相异步电机

本高压变频调速模型中的异步电机选用 Y-400-4 鼠笼式感应电机。电机额定参数为： $P_e=500\text{kW}$ ， $U_e=6\text{kV}$ ， $I_e=54\text{A}$ ， $n=1450\text{rpm}$ ，功率因素  $\cos\varphi=0.87$ ， $\eta=94.3\%$ ；其额定转矩为  $T_e=3293\text{N}\cdot\text{m}$ ，启动转矩为  $0.83T_e$ 。模型使用元件库中的 Asynchronous Machine SI Units 异步电机模块，其属性参数设置如下图所示。

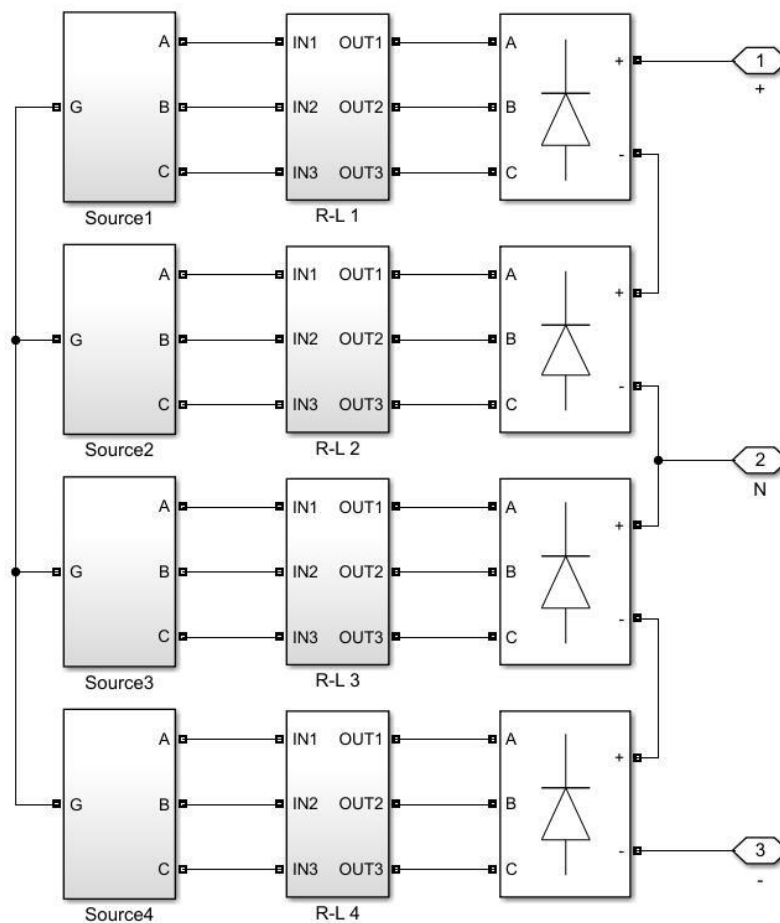




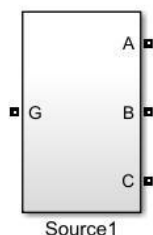
②. 24 脉波直流电源:



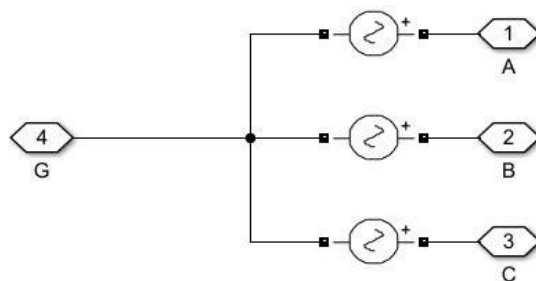
在 Simulink 的模块库中，并没有封装好的 24 脉波直流电源，也没有封装好的 24 脉波整流变压器。所以，本模型中的 24 脉波直流电源是利用理想电源自己封装的。本电源由四组三相理想电源、等效内阻抗和四组三相不控整流桥组成。下图是子系统内部结构：



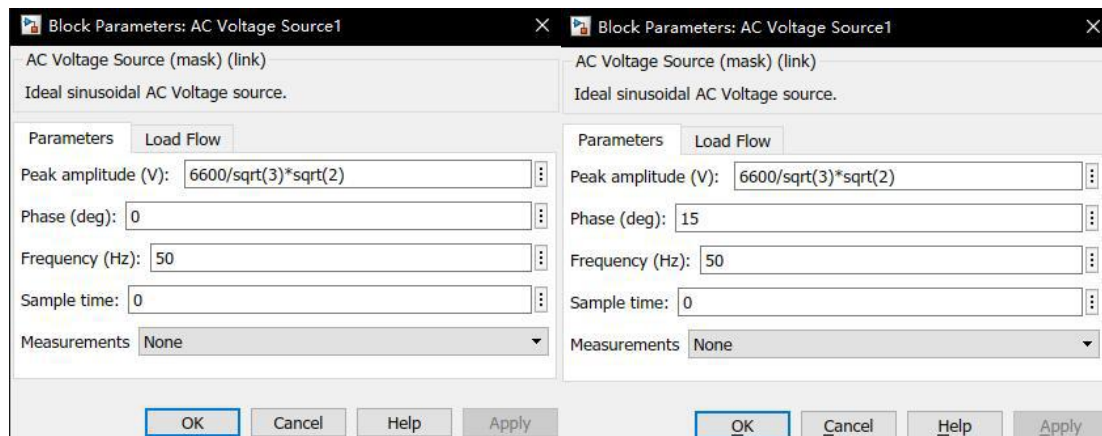
### (1) 四组三相理想电源:



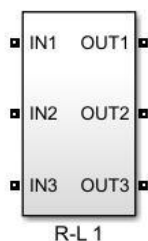
三相理想电源采用 AC Voltage Source 模块构建，其中每个子系统内部参数与上文中三相异步电机正反转模型中电源类似。除幅值不同外，正反转模型中三相电源基准相位为 0，而这四个子系统中基准相位由上至下分别为 0、15、30、45。子系统内部结构图如下：



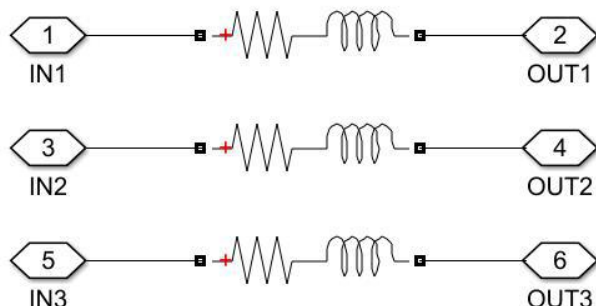
其中 AC Voltage Source 参数设置如下图所示，本图为由上至下第一组和第二组理想电源中 0 相位的 AC Source。



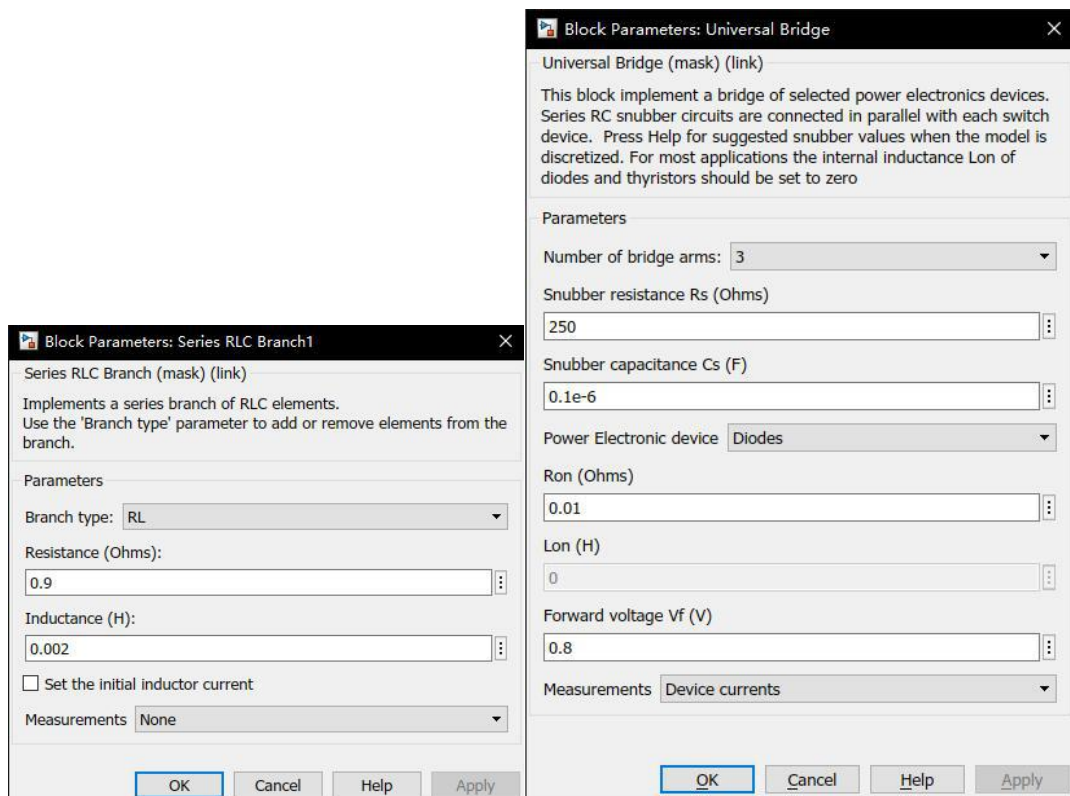
### (2) 电源内阻:



四组三相电源的等效内阻采用串联 RLC 支路(Series RLC Branch)模块构建。子系统内部结构图如下图所示：



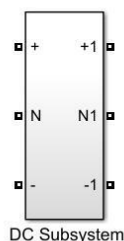
四组三相电源等效内阻中 12 个 RLC 支路的参数设置全部相同，参数设置如左下图所示：



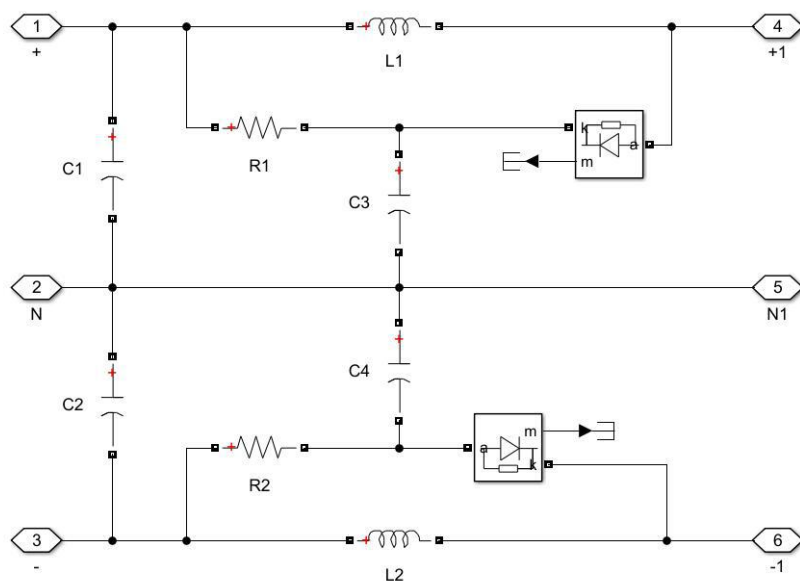
### (3) 整流桥：

四组整流桥，全部采用通用桥(Universal Bridge)模块，并设置它为二极管不控(Diodes)整流桥，参数一致，参数图如右上图所示。

### ③. 中间直流环节



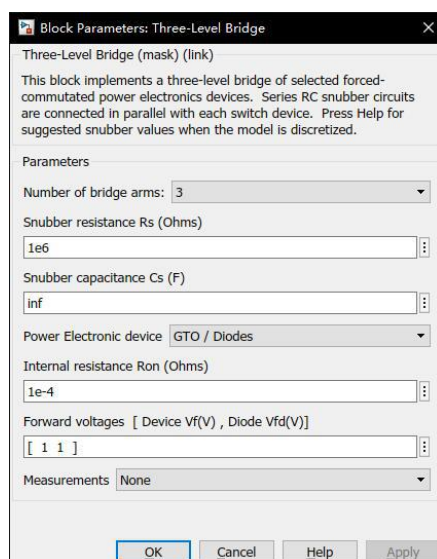
中间直流环节也是一个需要自己封装的子系统，其内部结构如下图所示。



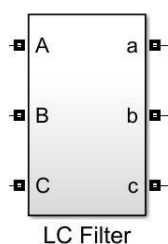
其中包括直流滤波电容(C1、C2)、di/dt 限制电路(L1、L2、R1、R2)、箝位二极管和箝位电容(C3、C4)。图中电阻、电感和电容都是采用串联 RLC 支路模块。其中  $C1=C2=960\text{e-}6$ ,  $C3=C4=10\text{e-}6$ ,  $L1=L2=15\text{e-}6$ ,  $R1=R2=0.5\Omega$ 。

### ④. 三电平逆变器

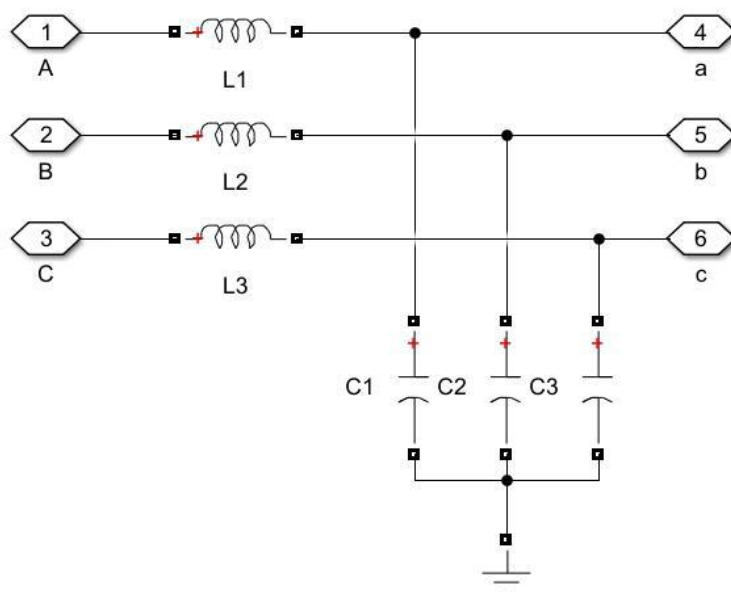
使用三电平桥(Three-Level Inverter)模块，其参数设置如下图。



## ⑤. 输出滤波器



输出滤波器需要自己封装，下图为其内部结构。



本文采用 6 个串联 RLC 支路模块封装成一个三相 LC 滤波电源。滤波器中所有电感为 2mH，所有电容为 120 $\mu$ F。

## ⑥. 电机信号分配器

信号分配器输出信号选择转子电流(Stator current)、转速(Rotor speed/Wm)、电磁转矩(Electromagnetic torque)三项，设置界面与三相异步电机正反转模型中相似。

## ⑦. 控制单元

仿真中采用了基于 U/f 控制策略的 SPWM 调制方法。控制单元由三个模块组成：

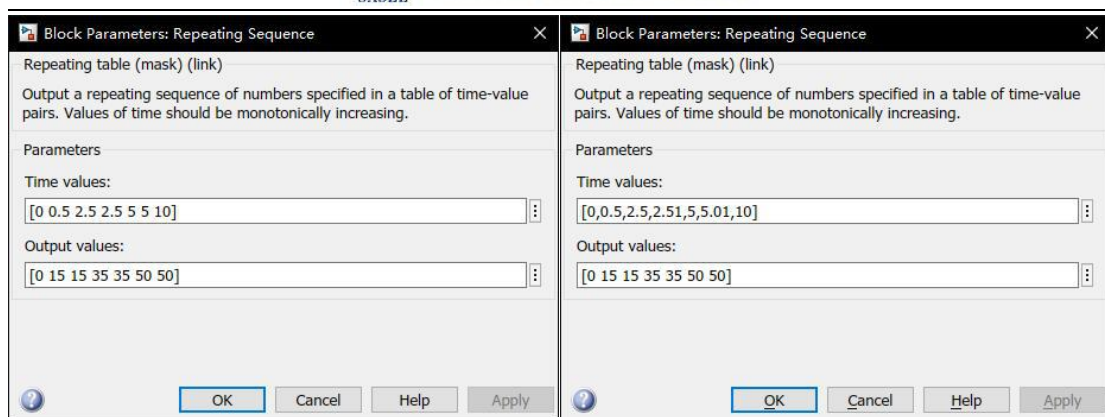
### (1) 指令发生器(Command)

指令发生器用于产生异步电机的转速（或频率）的命令值，在实际的 U/f 开环控制系统中，该指令由外部输入。在本次仿真中，为了方便，设置成在预定的时刻自动改变其指令值。

指令发生器采用可编辑信号发生器(Repeating Sequence)模块。

参数原先设置为左下图，但因程序报错无法运行，故设置为右下图。其改变几乎不影响仿真结果。





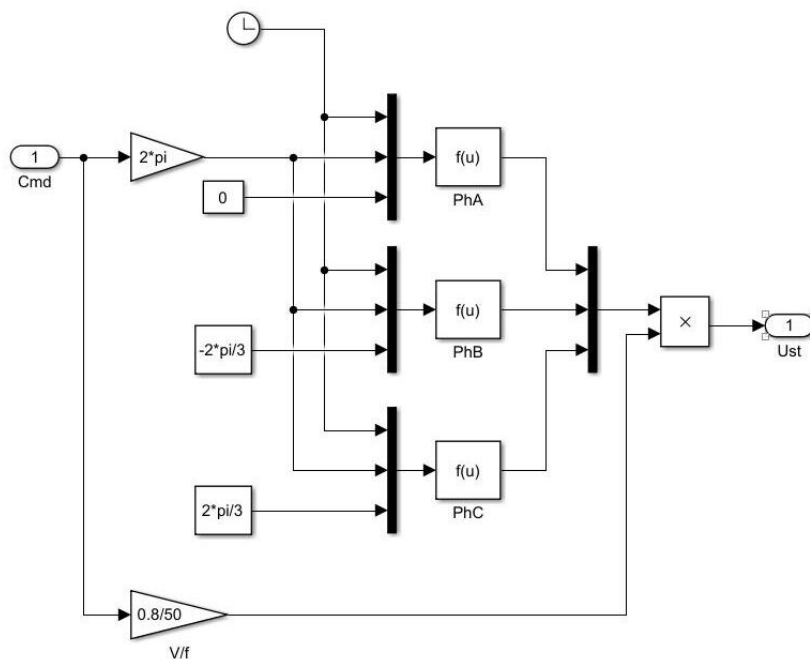
(2) Saturation 模块

参数设置: Upper limit=60, Low limit=0。

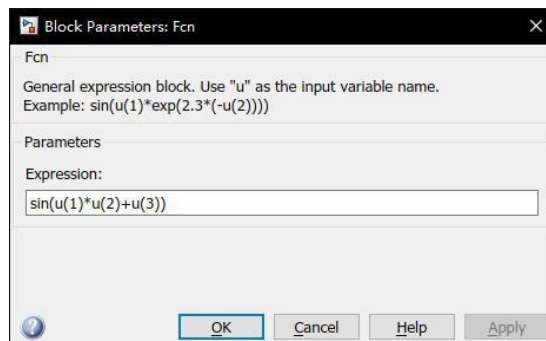
(3) 参考波发生器(Signals)



用于发出三相正弦参考波信号，其内部结构如下图所示。

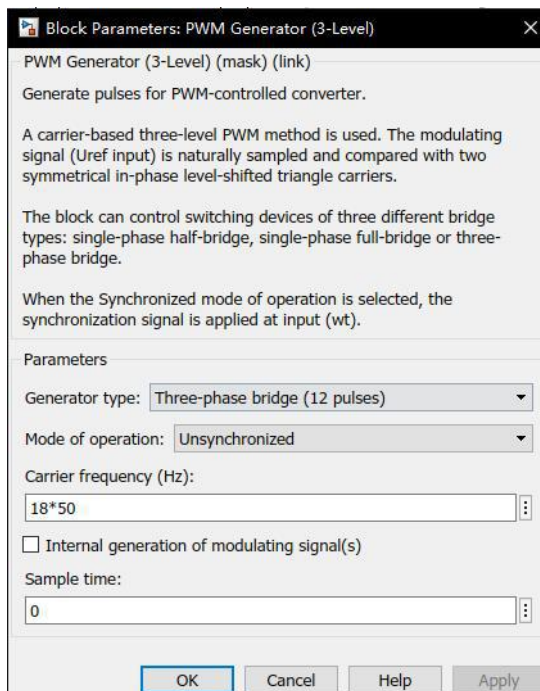


其中，三个 Fcn 模块分别产生 A、B、C 三相正弦波，其函数如图所示：



#### (4) PWM 信号发生器(PWM Generator)

PWM 信号发生器采用 3-level PWM Generator 模块，参数如下所示。



#### (5) Step 模块

将 Step time 设置为 1.5。

#### (6) Gain 模块

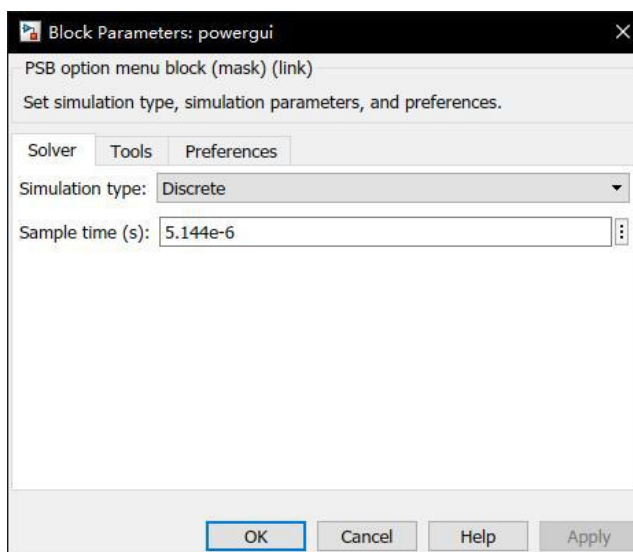
与三相异步电机正反转模型相似，增益为  $\frac{30}{\pi}$ ，即输入 30/pi。

建立好仿真模型后，设置相关的仿真参数：

①. 选择算法为 ode23tb；仿真 Start time 设置为 0，Stop time 设置为 9。

②. Powergui 模块：

设置为离散化电气模型，采样时间如下图。



在所有参数都设置完毕后，随后即可开始仿真。

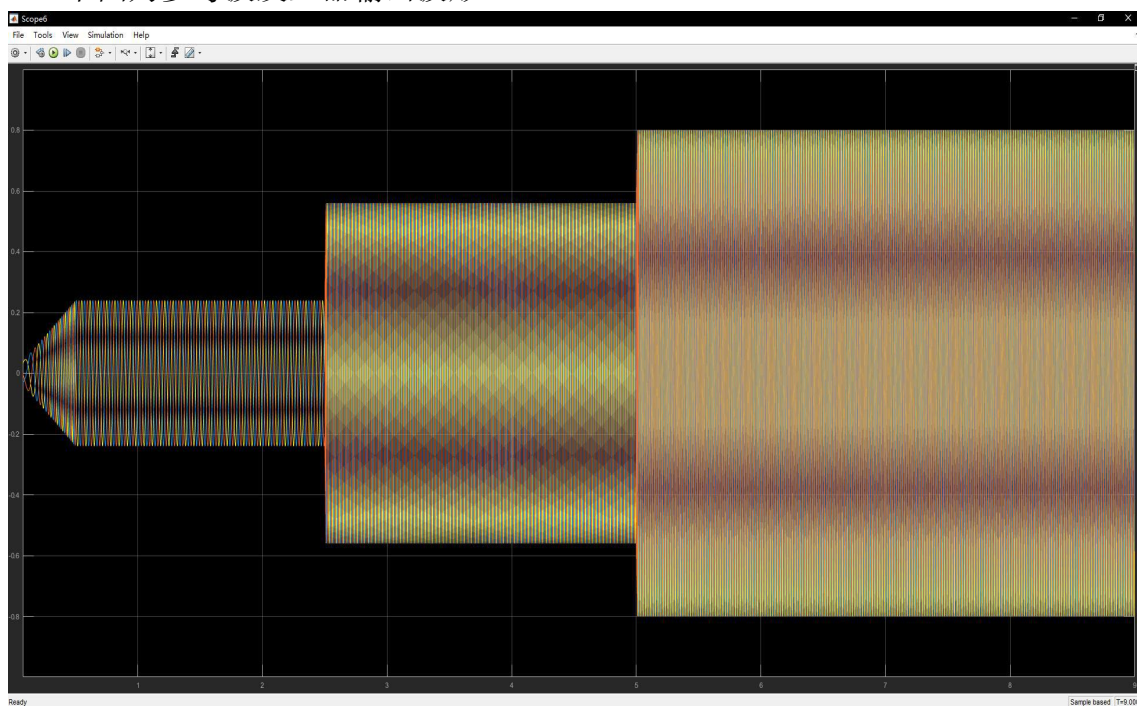
本文设置的系统工作状况如下：

- ①. 仿真开始时，异步电机空载零起升速，并稳定在 15Hz，稳定后在 1.5s 处电机带上负载。
- ②. 在 2.5s 处，频率指令突然变成 35Hz，直到 5s 处，频率指令又突变为 50Hz。

下图为指令发生器输出波形：

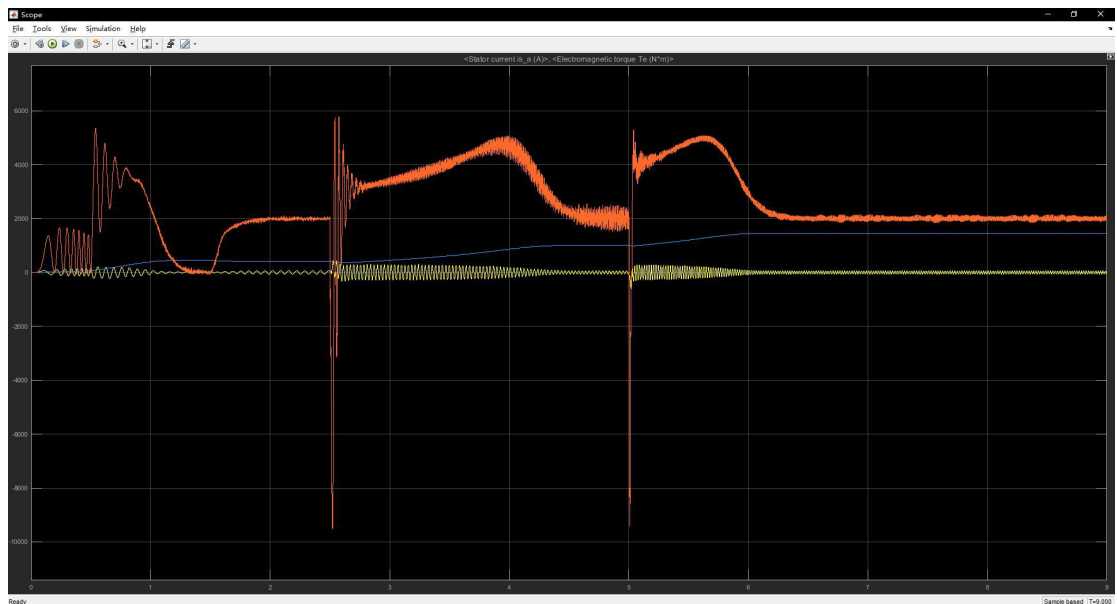
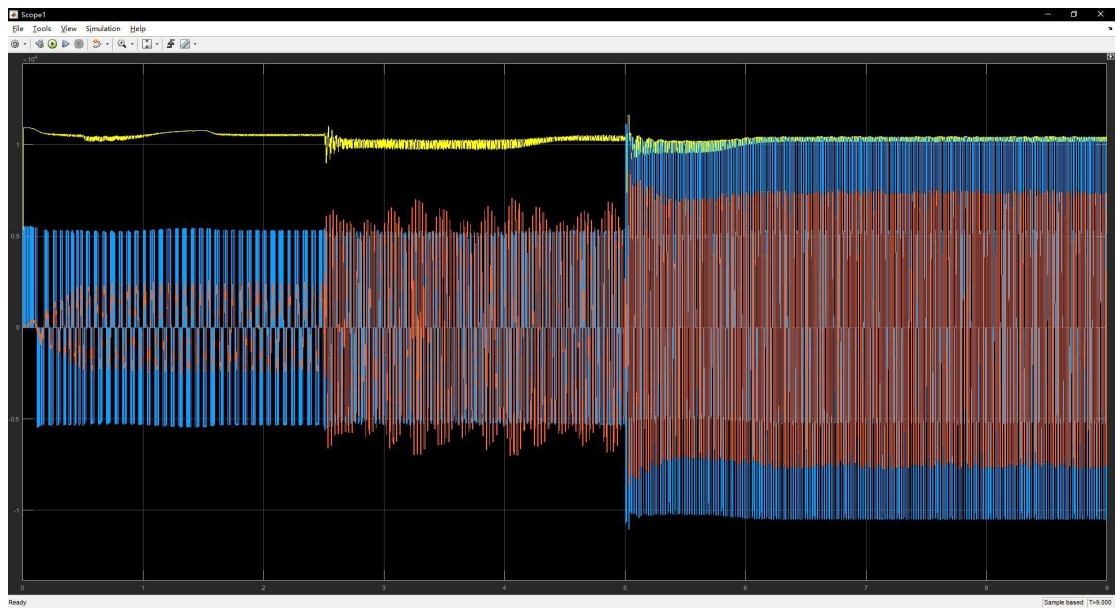


下图为参考波发生器输出波形：

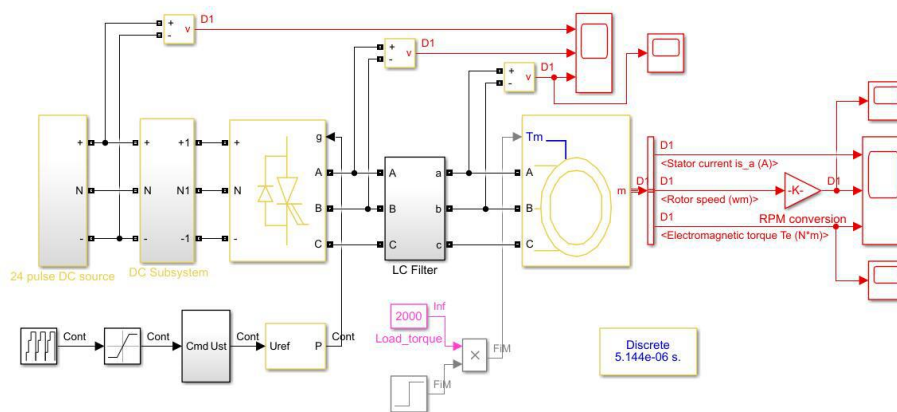


由两个波形可知，本模型设置的系统工作情况信号源输出正常。

仿真后，两个预设好的示波器波形如下：

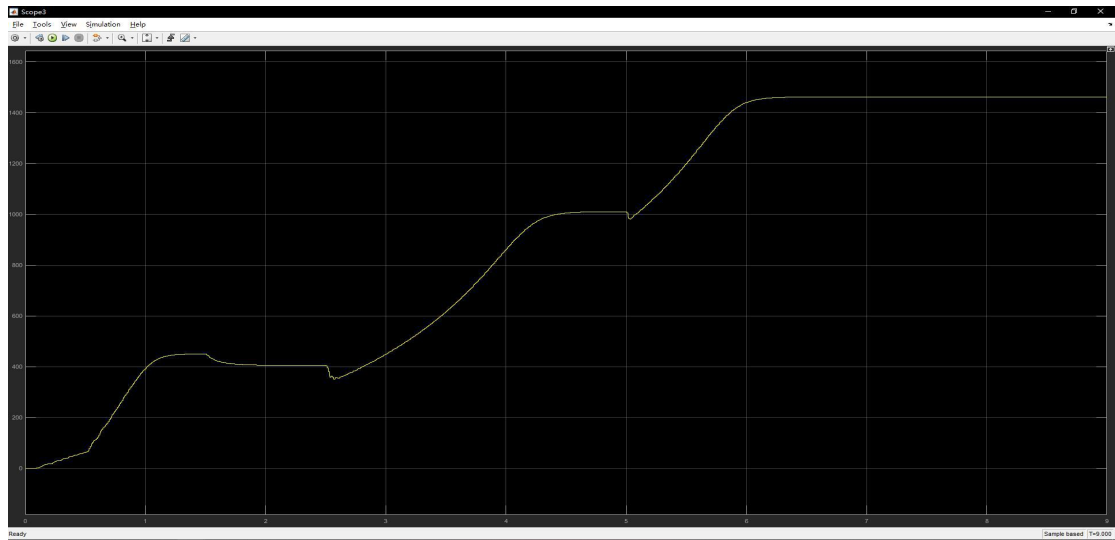


为得到量程更合适的示波器图像，在原有系统上单独设置 Scope：

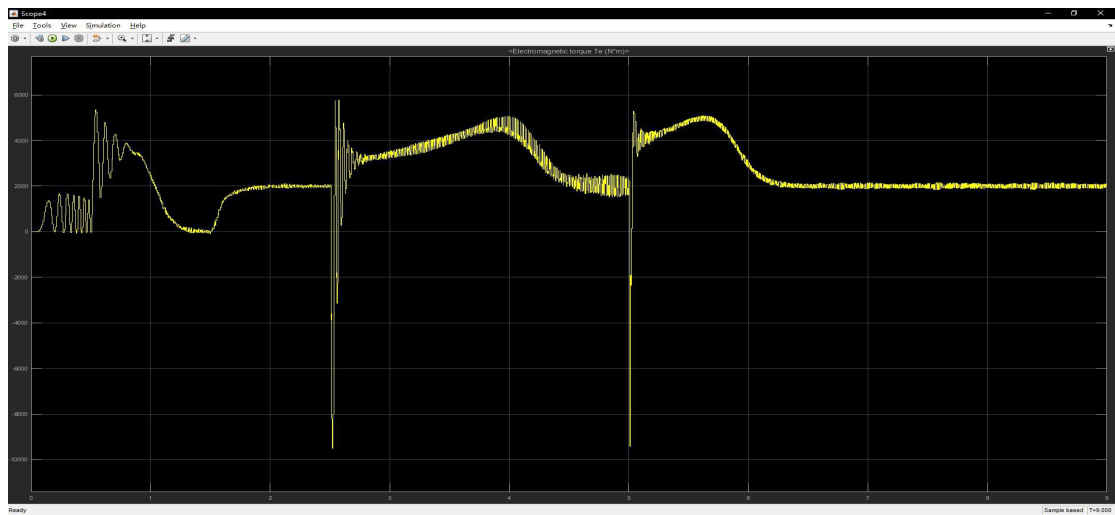


分离出有意义的仿真波形。

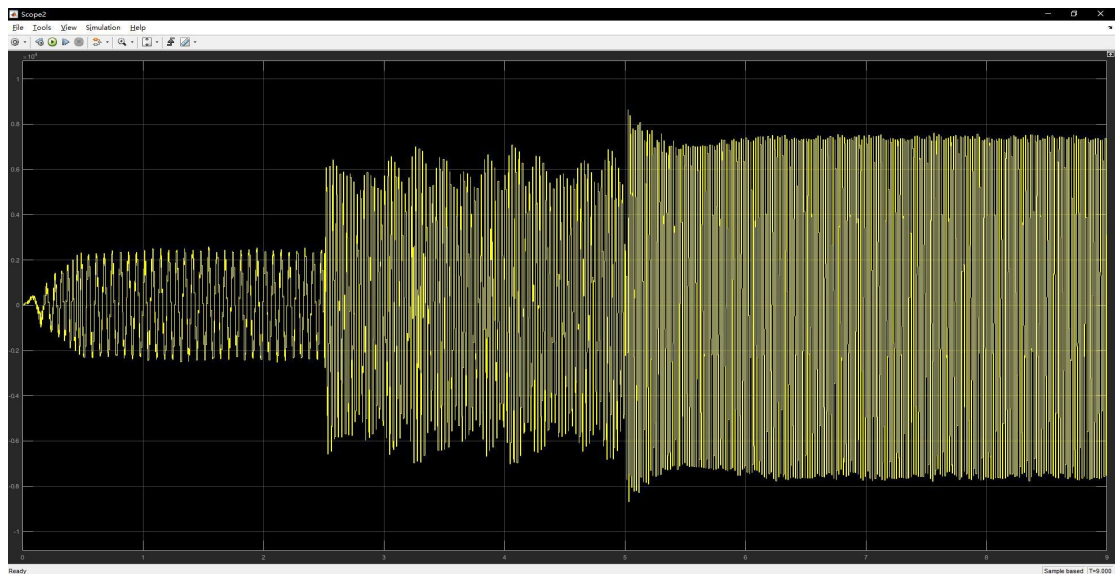
电机转速仿真波形：



电磁转矩仿真波形：



变频器输出线电压仿真波形：





从仿真波形可以看出，本文中模拟的三相异步电机模型，对于频率突变，有很好的响应。在频率突变后，变频器输出线电压突变，电磁转矩波动后趋于平稳，电机输出转速立即开始变化，经过一段恒定变化速度的变化后，达到新转速。

此现象说明本模型仿真成功。

#### 四、参考文献

- [1] 刘向群. 自动控制元件. 北京：北京航空航天大学出版社，2001.
- [2] 张森，张正亮. MATLAB 仿真技术主导实例应用教程. 北京：机械工业出版社，2004.
- [3] 陈桂明. 应用 MATLAB 建模与仿真. 北京：北京科学出版社，2001.
- [4] 曹弋. MATLAB 在电类专业课程中的应用. 北京：机械工业出版社，2016.
- [5] 李维波. MATLAB 在电气工程中的应用. 北京：中国电力出版社，2007.
- [6] 赵文承. 单元串联多电平 PWM 电压源型高压变频器的仿真研究，东北大学，2004.
- [7] 范澎. 电子电力变压器及 6kV/2500kW 变频调速系统，华中科技大学，2005.
- [8] 韩安荣. 通用变频器及其应用. 北京：机械工业出版社，2000