



# 三相异步电机调速

仿真与分析

邱哲睿 2016114987 龚邻骁 2016111331

vibranium@foxmail.com

# 电机学中期报告

报告人：邱哲睿（2016114987），龚邻骁（2016111331）

## 摘要

三相异步电机在生活中主要应用于大型电机，针对不同的应用场合，人们对于电机的运行性能提出了不同的要求。为了满足各类要求，我们必须掌握电机的各类调速方式，才能够解决实际问题。

首先，软件功能实现了对三类调速方式：变极调速、变频调速、调节转差能耗调速的模拟仿真，根据所得结果进行了理论解释分析。其中，对于变压调速调速范围小的特点，我们特地分析了变压变极结合的调速方式运行特性，认为其综合了变压调速、变极调速的优点，缺点是耗资高，定子绕组接线较为复杂。

对于调速评价指标，从实际出发，本文选取电机调速时的技术指标：调速范围、稳定性、平滑性、经济性、使用负载类型等作为评价指标，在文末对各类调速方式各类指标进行了横向对比，结果较为直观。

对于模型建立及仿真，使用 MATLAB Code 控制 Simulink 数据进行拟合仿真，对比纯代码绘图结果，绘制出了正确的机械特性曲线；同时，还利用 Simulink 绘图的动态特性，得出速度随时间变化的曲线，可评价调速平滑性；再者，利用 Simulink 进行二表法测输入输出功率，得出了三相电机在不同调速方式下的运行效率；最后，为比较调速范围，统一给出在静差率  $\delta < 40\%$  条件，利用 MATLAB 求出对应静差率或最大转矩  $T_{max} = T_z$  时的曲线，便可求出最小转速，得到调速范围 D

最后，本文综合利用 MATLAB Code、Simulink 等软件，二表法测输入输出功率、Simulink 子系统设计、IGBT 控制电源频压等方法，分析了各类调速方式的运行特性，具有一定的参考意义。

## 二、调速类型

在分析前，我们应当熟悉有哪些调速方式。根据异步电动机转速表达式：

$$n = n_s(1 - s) = \frac{60f}{p}(1 - s)$$

可知，针对三个变量以此对应有三种不同的调速方式，分别为：

$$\begin{cases} f: \text{变频调速} \\ p: \text{变极调速} \\ s: \text{调节转差能耗调速} \end{cases}$$

因此，接下来对三类调速方式进行逐一分析。

## 三、变频调速模型的建立与求解

### 3.1 模型建立

对于变频调速，通常有两种细分方法。分别是：恒转矩调速法、恒功率调速法。相对于恒功率调速，恒转矩调速适用范围更为广泛，因此我们在这里研究讨论前者。

恒转矩调速代指调速前后电动机的过载能力不变，基本公式此处不再推导，简而言之有为保证恒转矩调速的负载特性，在调速过程中需做到相电压与电源频率成比例变化，且适用于基频以下调速，即：

$$U_\phi / f = C, f < 50\text{Hz}$$

因此，建立 Simulink 模型如下：

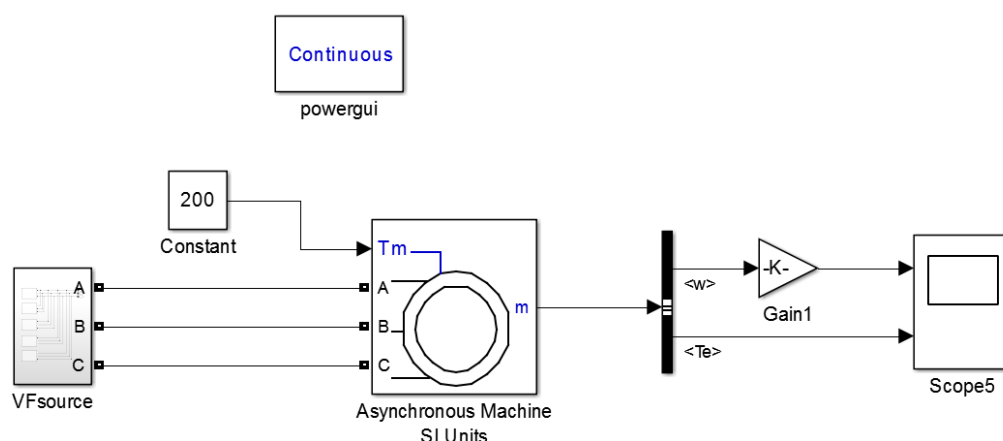


图 3-1 变频调速基本模型

下面分别说明各部分含义

#### 3.1.1 可变频变压的三相电源

实际进行变频调速时，需要电力电子元件进行 ACAC 变换，鉴于电力电子课程还未介绍该部分，我们采用多电源分时串入异步三相电机的方式进行变频。此部分运用到了电源两级子系统的设计，将 VFsource 模块展开：

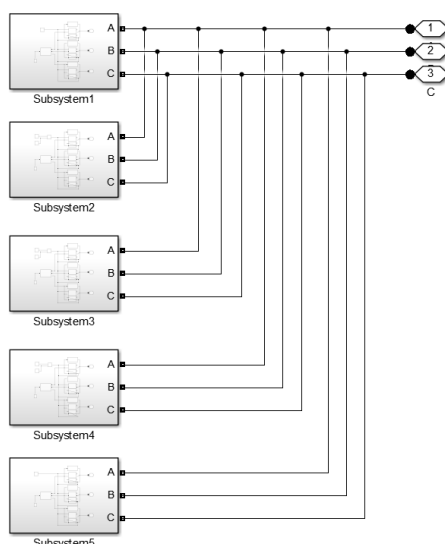


图 3-2 组合电源展开图

为了实现多级调速的仿真，总电源由五个子电源组成，不同时间接入电机。再将每一个子电源展开：

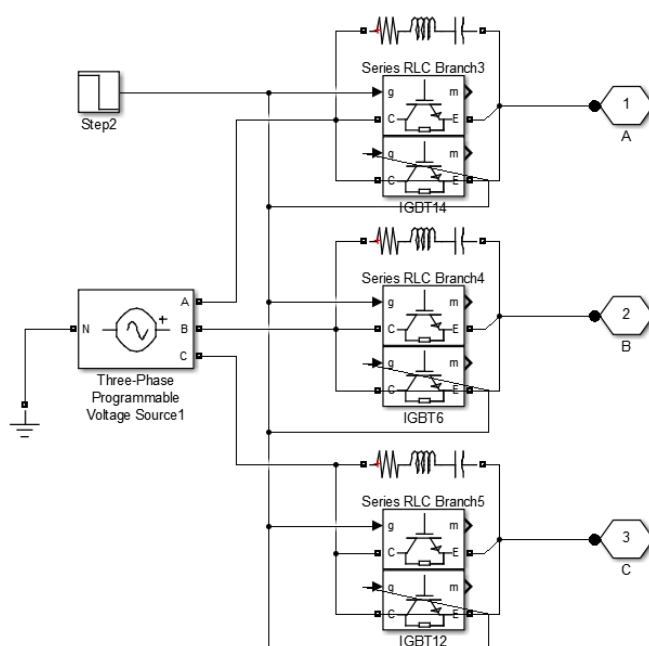


图 3-3 子电源组成

在这里使用 IGBT 开关管反向并联连接，三组开关管分别接入 A,B,C 三相电源接口，在阶跃信号接入时，IGBT 导通，该电源开始工作，其他电源此时阶跃信号停止，其他电源停止工作。

### 3.1.2 负载

在此处采用 Constant 模块连入三相异步电机转矩输入模块作为转矩输入，200 表示此时负载转矩为 200N·M。

### 3.1.3 三相异步电机

此处采用鼠笼式异步电动机，其基本原理不赘述。

3.1.4 基本参数

表 3-1 变频参数值

部分	名称	参数值
可变频压三相电源	第一级电源	400V/50Hz
	第二级电源	320V/40Hz
	第三级电源	240V/30Hz
	第四级电源	160V/20Hz
	第五级电源	80V/10Hz
三相鼠笼式异步电机	额定输出功率 $P_n$	37.3KW
	额定电压 $V_n$	400V
	电源频率 f	50Hz
	定子电阻 $R_s$	0.1Ω
	定子电感 $L_s$	0.867mH
	转子电阻 $R_r$	0.058Ω
	转子电感 $L_r$	0.867mH
	励磁电感 $L_m$	30.39mH
	转动惯量 J	0.4Kg·m^2
	转动摩擦 F	0.02187N·M·
	极对数 p	2

以上三相鼠笼式异步电机参数为 Simulink 默认设置。

3.2 模型求解

我们所期望的结果是能分析出各类调速的技术指标，则必然要先得出机械特性曲线、转速变化曲线。

由于 Simulink 仿真结果具有动态特性，用于分析速度的变化较为合适。但是，出于还需分析运行特性的要求，需要画出机械特性图，然而机械特性无法从 Simulink 中直接得到，因此在此处将 MATLAB Code 与 Simulink 结合，通过 Simulink 修改负载转速需求来得出转速 n 时对应的稳定输出转矩 T，再通过多点拟合的方式得到机械特性图。【代码见附录 1】

3.3 模型结果与分析

3.3.1.1 机械特性曲线

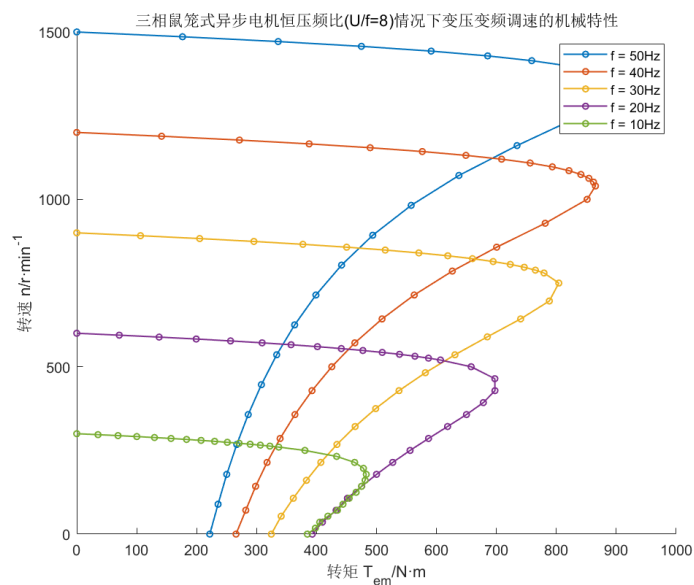


图 3-4 Simulink 仿真拟合机械特性曲线

为了检验结果的正确性，我们使用代码来直接绘制机械特性曲线，公式如下：

$$T = \frac{m_1 p}{2\pi f} \frac{(U_N)^2 \frac{r_2}{s}}{\left[ \left( r_1 + \frac{r_2}{s} \right)^2 + \left( x_1 + \frac{x_2}{s} \right)^2 \right]}$$

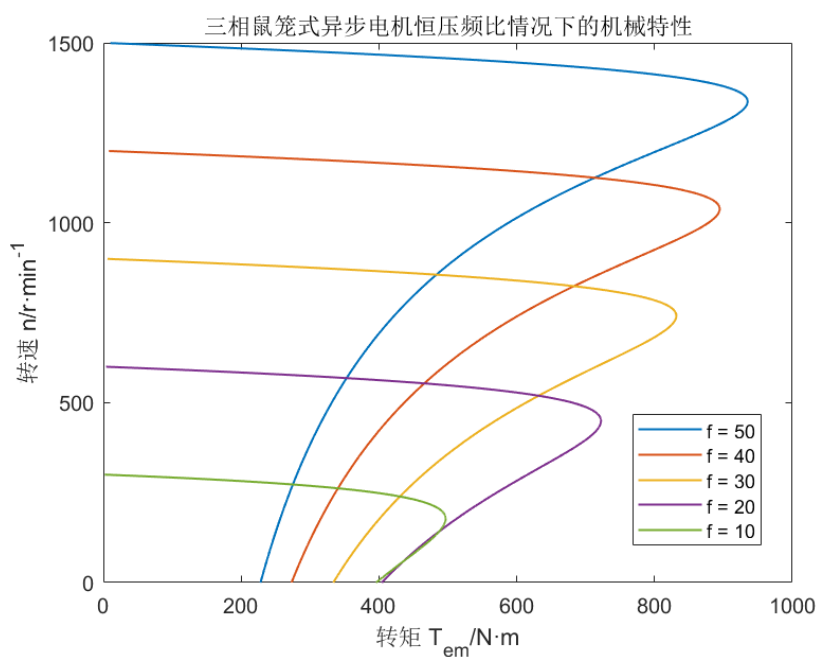


图 3-5 代码所画机械特性曲线

其中，为了检验结果正确与否，代码中参数为表 5-1 中参数。由此可见仿真结果正确。从图 3-4 中我们可以得出如下结论：

- 1) 变频调速稳定性好。可以看出在不同的频率下，其机械特性较硬，当负载有较大变化时，其转速变化较小，因此具有较高稳定性。

- 2) 适用于恒转矩负载。从图中我们看出在基频 50Hz 以下变化量较小时，最大转矩  $T_{max}$  变化不大。其实，理论上在绘制频率接近 50Hz 的曲线时，一般将定子侧电阻  $R_s$  忽略，此时会有  $T_{max}$  不变。但 Simulink 中无法忽略  $R_s$  影响，因此  $T_{max}$  有一定变化。
- 3) 不适用于大负载低速运行。在低频时，速度较低，此时  $R_s$  的影响无法忽略，导致  $T_{max}$  有较大变化，若此时位能性负载转矩较大，电机无法提供需求转矩，会导致转速下降到电机反转。

### 3.3.1.2 速度变化

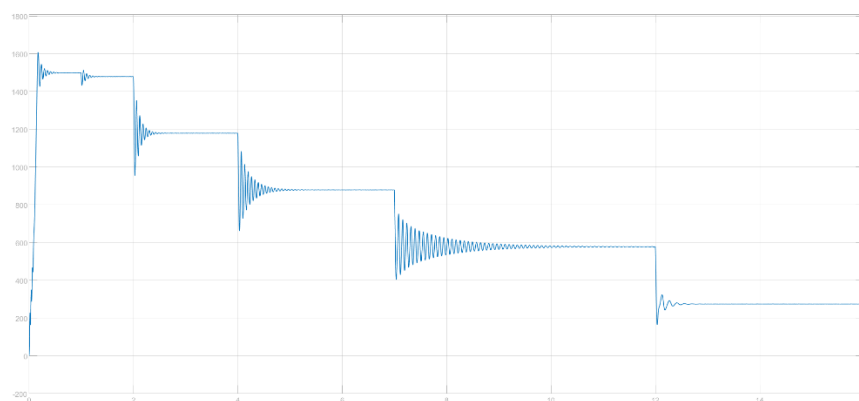


图 3-6 Simulink 仿真速度五级变化曲线

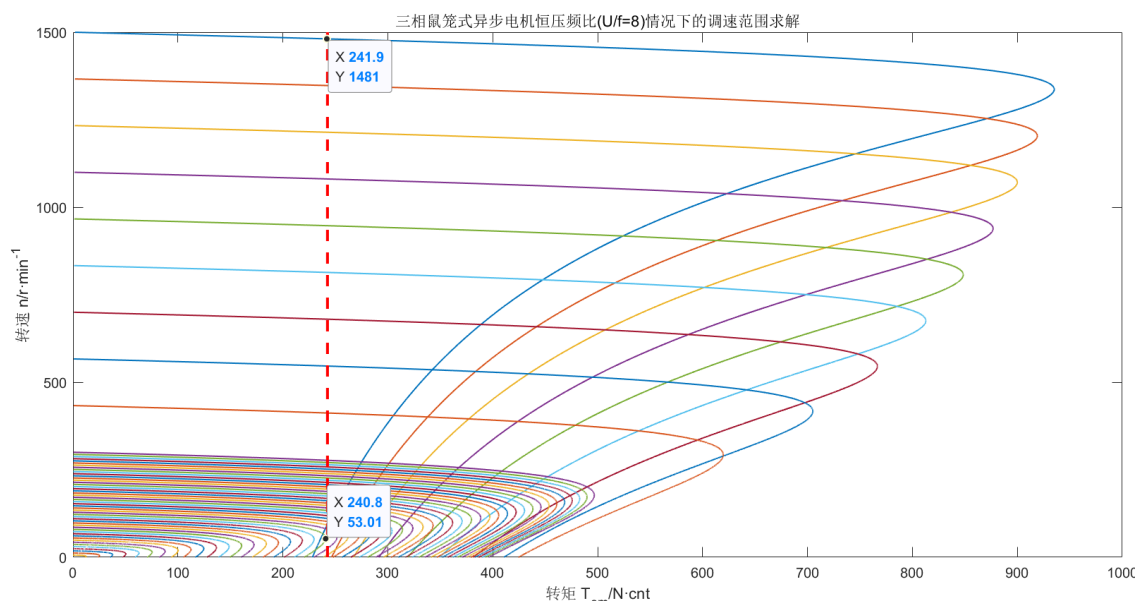


图 3-7 调速范围求解

对于求解调速范围，我们这里选取负载转矩为额定转矩  $T_n = 242 \text{ N} \cdot \text{M}$  时的调速范围。由于静差率有要求，那么必然会存在极限曲线，此时静差率恰好等于 40% 或者最大转矩  $T_{max} = T_n$  (这里暂且忽略过载能力的要求，为保证稳定性，不能在转折部分以下)，求出极限曲线以后，便可得调速范围。(频率  $f$  较低的曲线数目较多，是为了获得更准的最低速度)

从图中我们可以得到如下结论：

- 1) 变频调速可适用于多级调速。但是由于机械特性近乎平行，导致在变频压瞬间为了保证速度不变，转矩变为负值，此时加速度为负值，导致速度变化剧烈。

- 2) 调速范围大。据图 3-7，静差率 $\delta < 40\%$ 时，转速变化（1481r/min~53.01r/min），得调速范围  $D=28$ ，调速范围极大。

### 3.3.1.3 效率变化

对于效率  $\eta$ ，有公式：

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

$P_2$ 为输出功率，可直接测得。 $P_1$ 为输入功率，通过二表法测得，测功率部分接线如下。

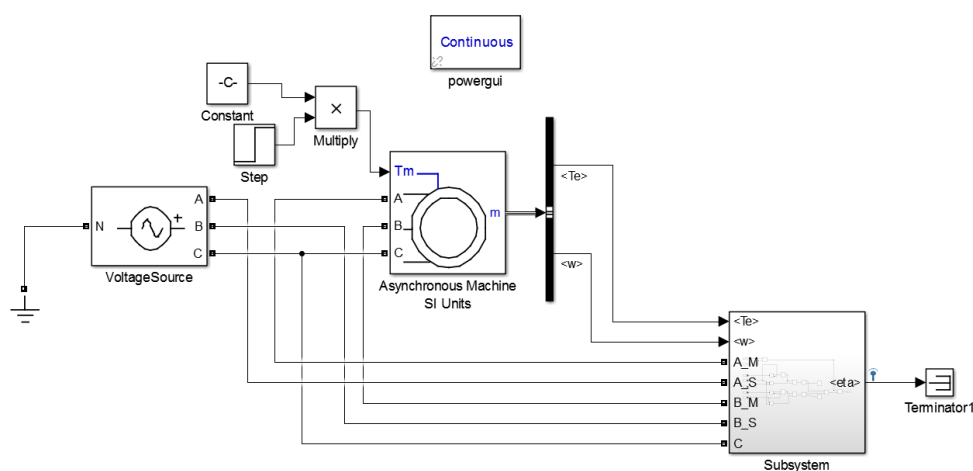


图 3-8 二表法求效率

图中使用电流表、电压表作为功率表，其测输入功率的基本原理为：

$$P_1 = \text{Re}(U_1 \bar{I}_1 + U_2 \bar{I}_2)$$

即电压乘以电流的共轭复数可得一部分功率，两部分之和的实部即为三相电源输出的有功功率。其中电压值、电流值均为线值。

输出功率为： $P_2 = T\omega$ ，再做除法便可得效率。

测效率部分展开如图：

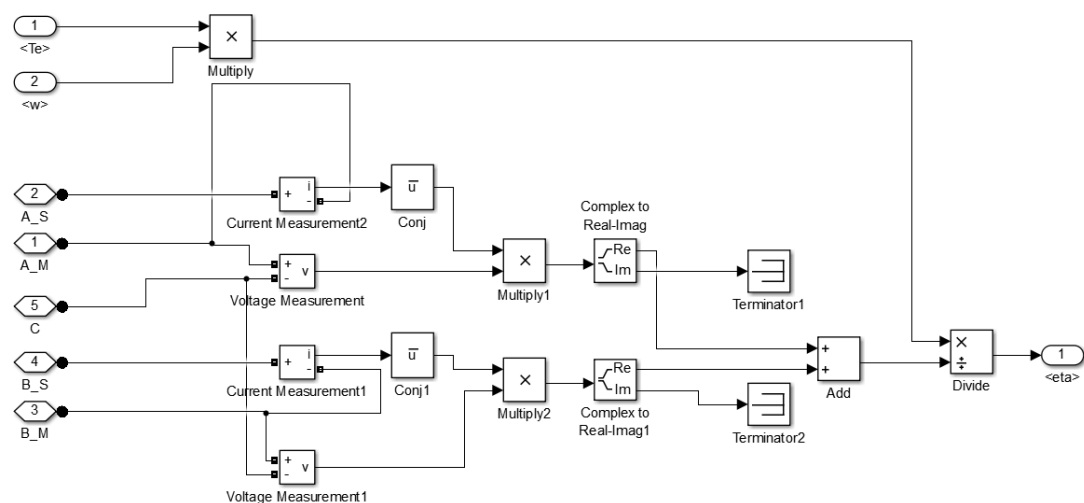


图 3-9 测效率展开图



利用代码部分控制 Simulink 获得仿真数据，最后拟合出效率曲线如下：

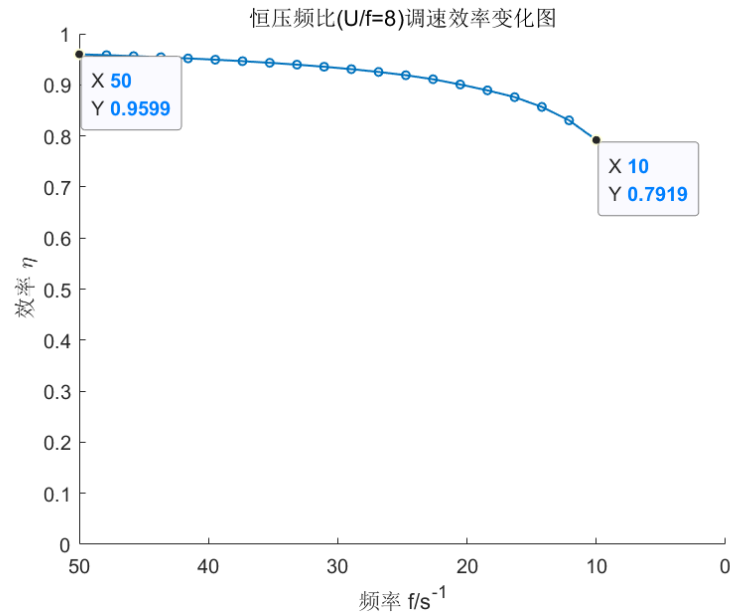


图 3-10 效率变化曲线

从中我们可以得到如下结论：

- 1) 变频调速运行效率高。在调速范围较大时，基本效率维持在 80%以上。
- 2) 变频调速耗资大。此部分无法通过仿真得到，但是其相对于其他串电阻、变压方式来说需要专门的变频电源。

## 四、变极调速模型的建立与求解

### 4.1 模型建立

变极调速需特殊的变极设备，来改变三相异步电机的绕组串接方式，由于 Simulink 无法改变绕组接法，因此用等效改变参数值来设置。

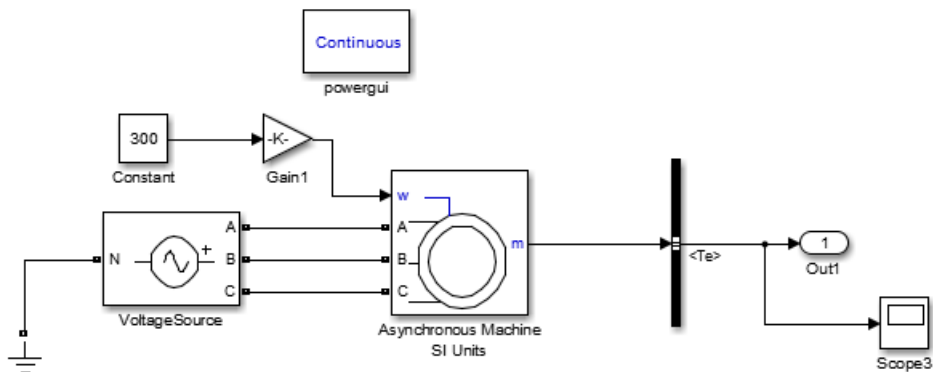


图 4-1 变极调速 Simulink 图

其基本组成部分较变频调速更为简单，因此不再对各部分进行赘述。

但是在此处需要额外说明的是，在变极调速时，需要区别的是两种改变联结的方法对于参数的改变，参数设置及改变如下：

表 4-1 变极调速参数及变化

部分	名称	原参数值	$\Delta$ 联结变 YY 联结	Y 联结变 YY 联结
三相电源	有效电压 $V_n$	400V	400V	400V
	频率 $f$	50Hz	50Hz	50Hz
三相绕线式异步电机	额定输出功率 $P_n$	37.3KW	<b>43.07KW</b>	37.3KW
	额定电压 $V_n$	400V	<b>230V</b>	400V
	电源频率 $f$	50Hz	50Hz	50Hz
	定子电阻 $R_s$	0.1 $\Omega$	<b>0.025<math>\Omega</math></b>	<b>0.025<math>\Omega</math></b>
	定子电感 $L_s$	0.867mH	<b>0.217mH</b>	<b>0.217mH</b>
	转子电阻 $R_r$	0.058 $\Omega$	<b>0.014<math>\Omega</math></b>	<b>0.014<math>\Omega</math></b>
	转子电感 $L_r$	0.867mH	<b>0.0217mH</b>	<b>0.0217mH</b>
	励磁电感 $L_m$	30.39mH	<b>7.59mH</b>	<b>7.59mH</b>
	转动惯量 $J$	0.4Kg·m <sup>2</sup>	0.4Kg·m <sup>2</sup>	0.4Kg·m <sup>2</sup>
	转动摩擦 $F$	0.02187N·M·	0.02187N·M·	0.02187N·M·
	极对数 $p$	2	<b>1</b>	<b>1</b>

其中，加粗内容为改变的参数，由于三角形联结改为两星形联结其相电压对于为原来的  $1/\sqrt{3}$  倍，各定子、转子部分电阻值、电感值均为原  $1/4$ 。

## 4.2 模型求解

模型求解的方法与变频调速方法相同，依然是采用 Simulink 代替代码求解，计算出不同转速时对应的稳定的转矩，再通过代码拟合求出曲线。【代码见附录 2】

## 4.2 模型结果与分析

### 4.2.1 机械特性曲线

代码部分绘制曲线遵从以下方程

三角形联结：

$$T = \frac{m_1 p}{2\pi f} \frac{(U_N)^2 \cdot \frac{r_2}{s}}{\left[\left(r_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + \left(x_1 + \frac{x_2}{s}\right)^2\right]}$$

Y 联结：

$$T = \frac{m_1 p}{2\pi f} \frac{\left(\frac{U_N}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot \frac{r_2}{s}}{\left[\left(r_1 + \frac{r_2}{s}\right)^2 + \left(x_1 + \frac{x_2}{s}\right)^2\right]}$$

YY 联结：

$$T = \frac{m_1 p}{4\pi f} \frac{\left(\frac{U_N}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot \frac{r_2}{4s}}{\left[\left(\frac{1}{4}r_1 + \frac{r_2}{4s}\right)^2 + \left(\frac{1}{4}x_1 + \frac{x_2}{4s}\right)^2\right]}$$

从而绘制出机械特性曲线：

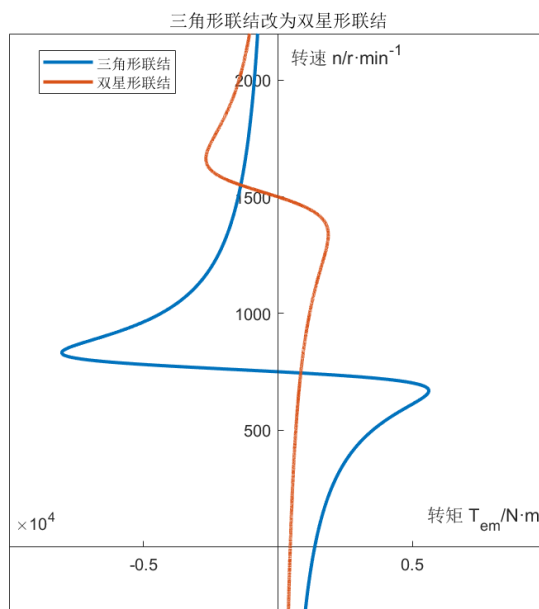


图 4-2  $\Delta - YY$  联结变极调速机械特性 MATLAB Code 绘制曲线

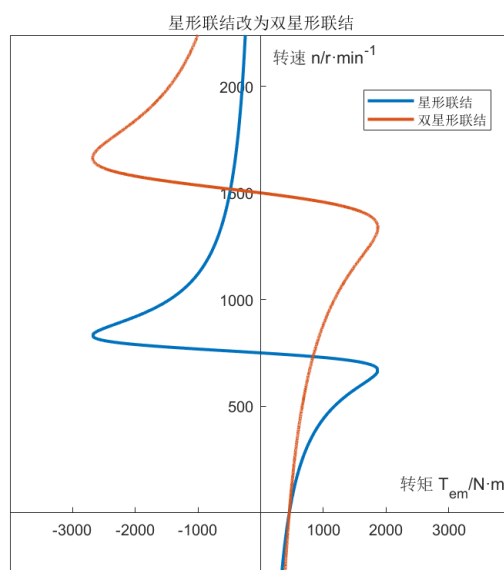


图 4-3 Y - YY 联结变极调速机械特性 MATLAB Code 绘制曲线

从图我们可以推出如下结论：

- 1) 变极调速稳定性高。从图中可以看出，在低速或者高速时，机械特性曲线较硬，稳定性较高。
- 2)  $\Delta$ 联结变 YY 联结调速适用于恒转矩调速负载。从左图可以看出，最大转矩 $T_{max}$ 基本不变，具有较好的过载能力。
- 3) 调速平滑性不佳。对于一般的变极调速，可以通过定子上装入独立绕组来实现，但是一般不超过两组，因此，一般最多为两级调速，所以调速平滑性不高。

#### 4.2.2 速度随时间变化

由于 Simulink 中无法自动改变极对数  $p$ ，因此只能利用 MATLAB Code 将不同联结方式的速度变化曲线连接。在这里第二个极对数的初始运行状态为第一个极对数的末运行状态，从而实现变极调速。但是会与实际情况存在误差，比如在改变联结瞬间，由于数据的缺失，上升的直线可能有误差。

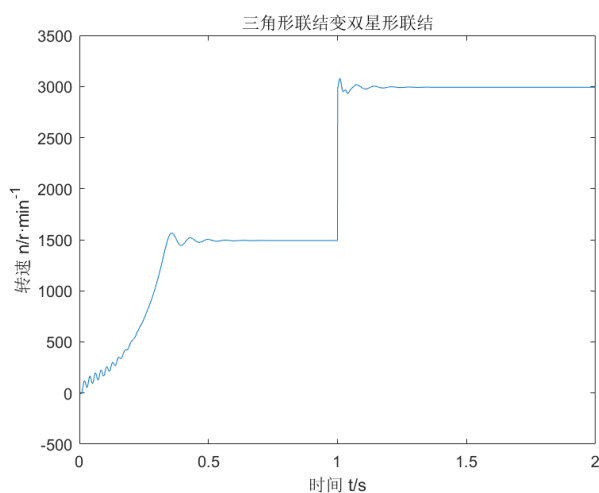


图 4-4  $\Delta - YY$  联结变极调速速度变化曲线

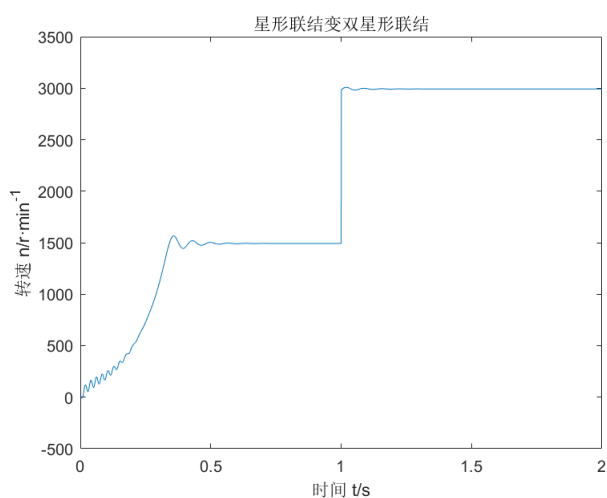


图 4-5 Y - YY 联结变极调速速度变化曲线

由图可知：

- 1) 在变极前后，两种方式稳定的运行速度比值在 2 左右，说明变极调速稳定性强，机械特性硬，才会有两条机械特性曲线相互平行，符合实际。
- 2) 变极调速调节时间少，但耗资较高，需要专门的换绕组线的装置才可实现多级平滑调速。

## 五、转子电路串电阻调速模型的建立与求解

### 5.1 模型建立

转子电路串电阻电路模型建立较为简单。在此处只需对电阻部分进行多级设置，其他部分不变。

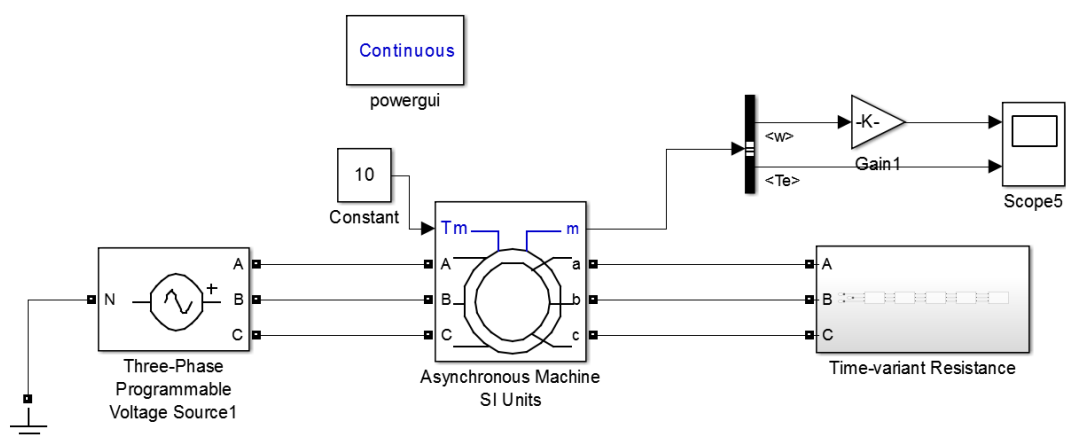


图 5-1 转子回路串电阻 Simulink 模型

其他部分在前文已经说明，在此处仅说明多级电阻部分。

#### 5.1.1 多级电阻

多级电阻的设置采用前文多级变频电源的思想，设立多电阻串联，通过设立 Step 阶跃信号来控制 IGBT 电路的通断进而判断该部分电阻是否接入，未接入时等效为一根导线，即减少电阻；接入时相当于传入电阻。电阻子部分图展开如下：

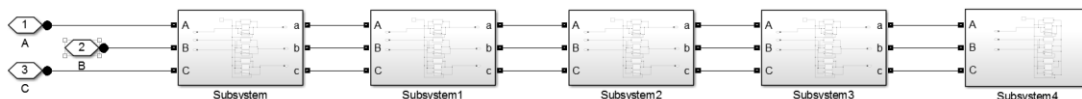


图 5-2 电阻一级子部分展开图

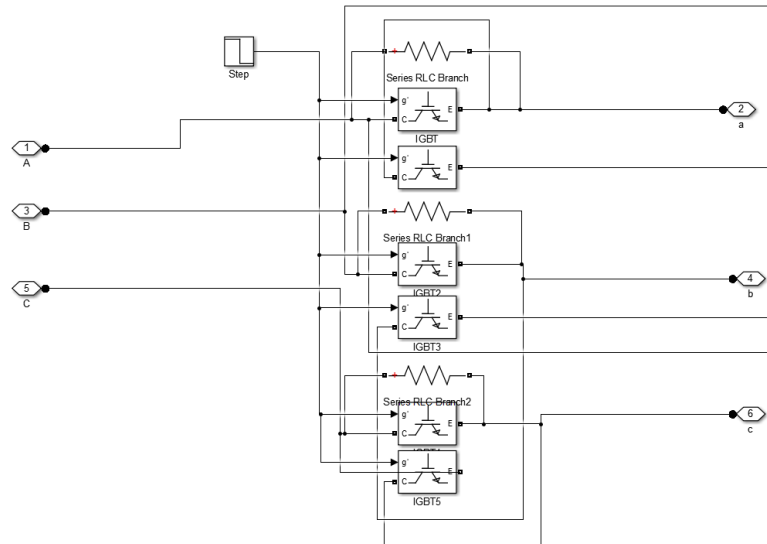


图 5-3 电阻二级子部分展开图

### 5.1.2 参数设置

表 5-1 串电阻调速参数设置

部分	名称	参数值
三相电源	有效电压 $V_n$	400V
	频率 f	50Hz
三相绕线式异步电机	额定输出功率 $P_n$	37.3KW
	额定电压 $V_n$	400V
	电源频率 f	50Hz
	定子电阻 $R_s$	$0.1\Omega$
	定子电感 $L_s$	0.867mH
	转子电阻 $R_r$	$0.058\Omega$
	转子电感 $L_r$	0.867mH
	励磁电感 $L_m$	30.39mH
	转动惯量 J	$0.4\text{Kg}\cdot\text{m}^2$
	转动摩擦 F	$0.02187\text{N}\cdot\text{M}\cdot$
	极对数 p	2
转子回路串入多级电阻	第一级电阻 $R_1$	$1\Omega$
	第二级电阻 $R_2$	$2\Omega$
	第三级电阻 $R_3$	$3\Omega$
	第四级电阻 $R_4$	$4\Omega$

## 5.2 模型求解

对于该调速方法，基本求解思路与前文相同。利用 MATLAB Code 来控制 Simulink 的仿真，从而可以得到不同串入电阻值的数据点，再经过拟合便可得机械特性曲线。【代码见附

录 3】

5.3 模型结果与分析

5.3.1 机械特性曲线

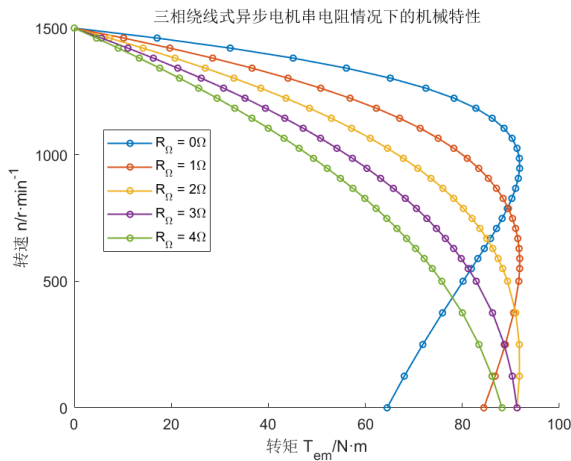


图 5-4 串电阻调速 Simulink 仿真图

为了检验结果的正确性，我们使用代码来直接绘制机械特性曲线，公式如下：

$$T = \frac{m_1 p}{2\pi f} \frac{(U_N)^2 \cdot \frac{r_2}{s}}{\left[ \left( r_1 + \frac{r_2 + r_\Omega}{s} \right)^2 + \left( x_1 + \frac{x_2}{s} \right)^2 \right]}$$

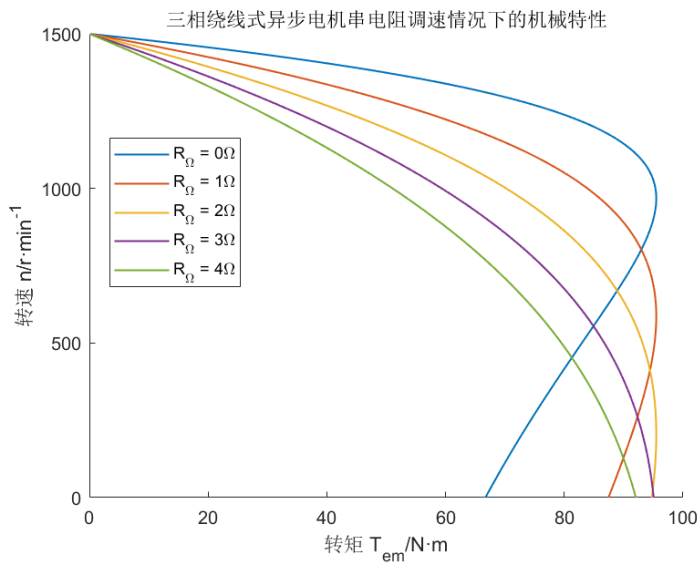


图 5-5 串电阻调速 MATLAB Code 仿真图

将 Simulink 仿真图与代码计算公式所得图对比，可知机械特性曲线仿真拟合正确。从图中我们可以得到以下结论：

- 1) 串电阻调速稳定性差。从图中可以看出，机械特性随着电阻阻值的增大逐渐变软，可见

稳定性不高。

- 2) 串电阻调速适用于恒转矩调速负载。可以看出，最大转矩 $T_{max}$ 基本不变，具有较好的过载能力。

### 5.3.2 速度变化曲线

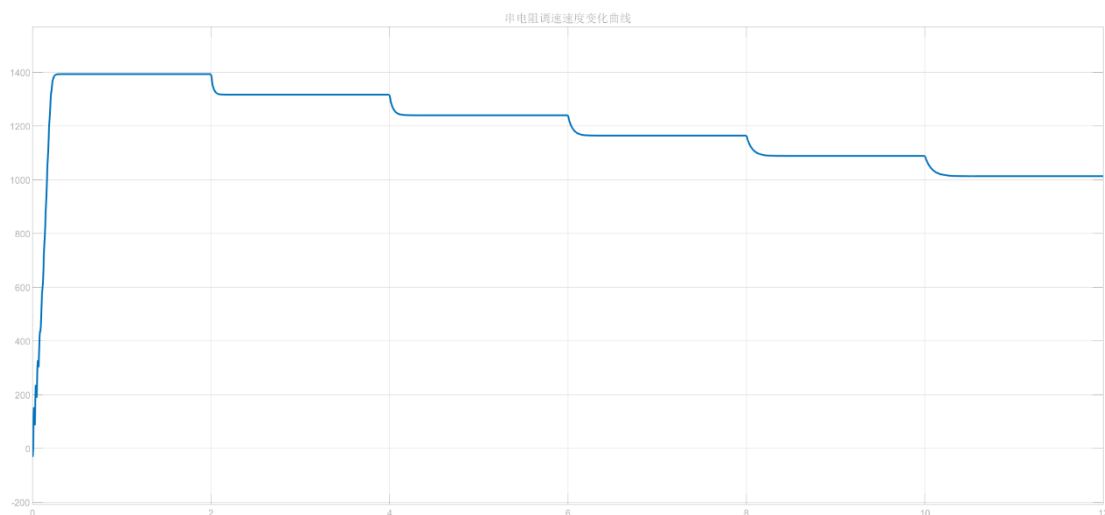


图 5-6 串电阻调速速度变化曲线

从变化曲线可以看出，串电阻调速可以实现平滑调速。相对于变频调速来说，串电阻调速时间较短，且可以实现多级调速。

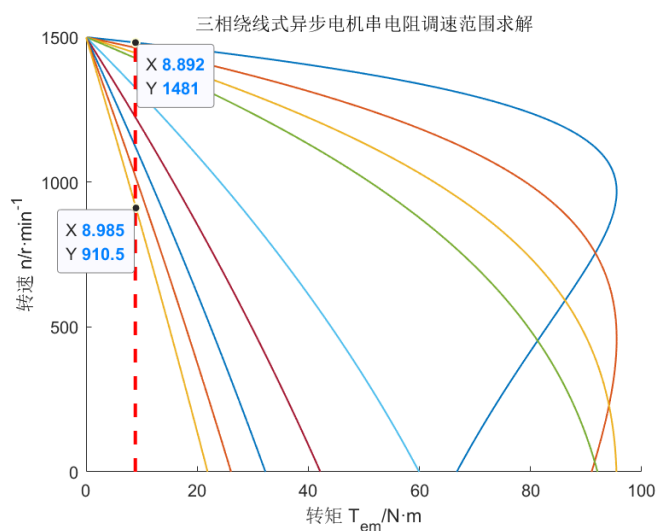


图 5-7 串电阻调速调速范围求解

在这里，为了后续便于横向比较，依然设置静差率 $\delta < 40\%$ 来考察调速范围 $D$ 。基本计算方式与前文相同，最后得到调速范围（1481r/min~910r/min），得 $D=1.63$ ，调速范围很小。

### 5.3.3 效率变化曲线

效率的计算公式

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$



$P_2$ 为输出功率，可直接测得。 $P_1$ 为输入功率，通过二表法测得，测功率、效率与图 3-8、3-9 基本一致，不再赘述。

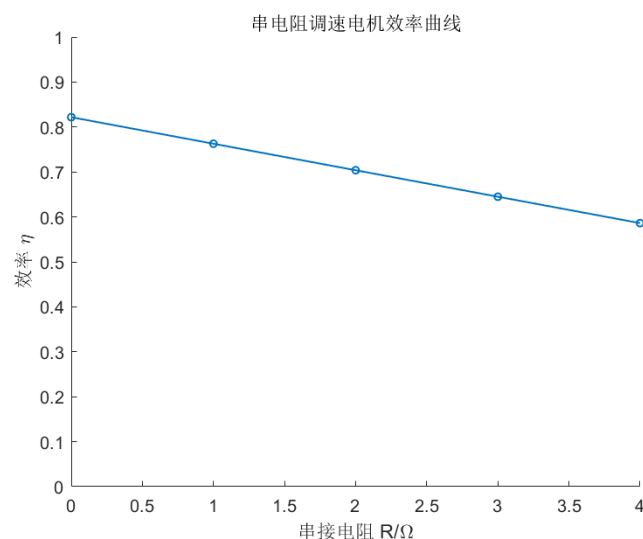


图 5-8 串电阻效率变化曲线

从图中我们可以得到:

- 1) 串电阻调速效率较低。随着电阻的增大，由 $\Delta P = I^2 R$ 知：更多的能量将消耗在电阻部分，效率降低，相对于变频调速来说，效率较低。
- 2) 串电阻调速耗资较少。此处仅定性分析，串电阻调速不需复杂的控制电路，相对于变频调速来说，耗资更少。

## 六、变压调速模型的建立与求解

### 6.1 模型建立

理论上,变压调速需要电力电子原件进行控制,但在 Simulink 中可以通过设置三相可编程电源直接实现变压。Simulink 图如下：

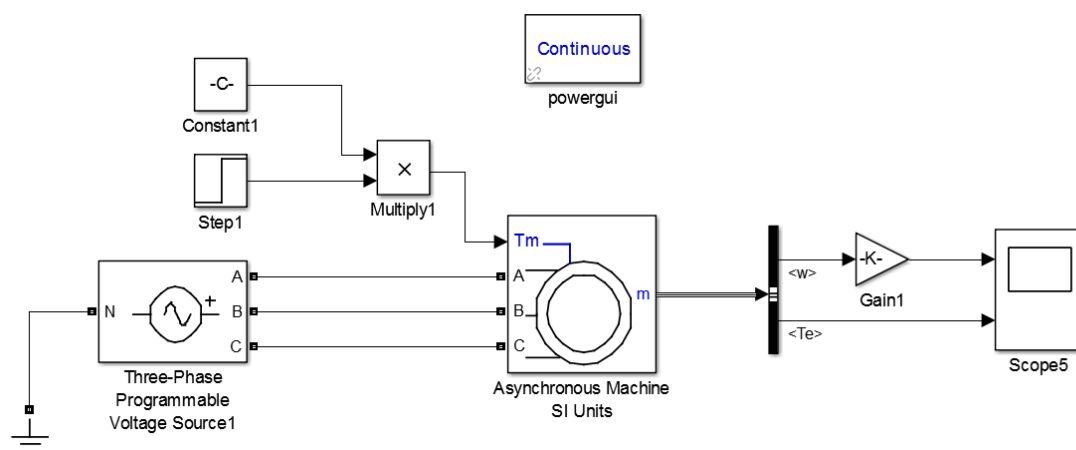


图 6-1 变压调速 Simulink 仿真图

基本组成部分与前文相同，此处仅说明三相可编程电源的设置。

### 6.1.1 三相可编程电源

对于实现变压，在内部可设置幅值随时间变化（Time variation of Amplitude），其变化方式为台阶式变化（Table of time-amplitude pairs）

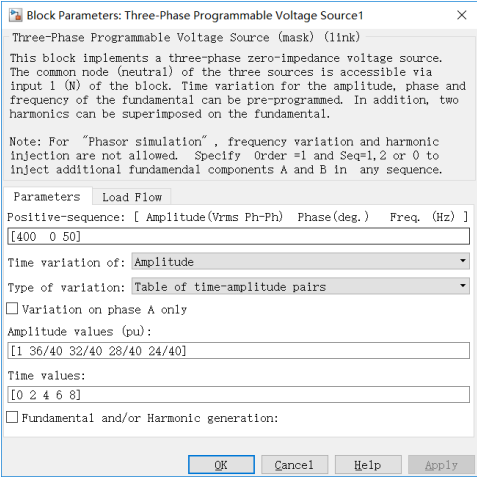


图 6-2 三相可编程电源设置

可理解为在第 0S 接入 400V 电压，第 2S 接入 360V 电压，第 4S 接入 320V 电压，第 6S 接入 280V 电压，第 8S 接入 240V 电压。

### 6.1.2 参数设置

表 6-1 变电压调速参数设置

部分	名称	参数值
可编程三相电源	第一级电压	400V/50Hz
	第二级电压	360V/50Hz
	第三级电压	320V/50Hz
	第四级电压	280V/50Hz
	第五级电压	240V/50Hz
三相鼠笼式异步电机	额定输出功率 $P_n$	37.3KW
	额定电压 $V_n$	400V
	电源频率 f	50Hz
	定子电阻 $R_s$	0.1Ω
	定子电感 $L_s$	0.867mH
	转子电阻 $R_r$	0.058Ω
	转子电感 $L_r$	0.867mH
	励磁电感 $L_m$	30.39mH
	转动惯量 J	0.4Kg·m <sup>2</sup>
	转动摩擦 F	0.02187N·M·
	极对数 p	2

## 6.2 模型求解

对于该调速方法，基本求解思路与前文相同。利用 MATLAB Code 来控制 Simulink 的仿真，从而可以得到不同电压值的数据点，再经过拟合便可得机械特性曲线。【代码见附录 4】

## 6.3 模型结果与分析

### 6.3.1 机械特性曲线

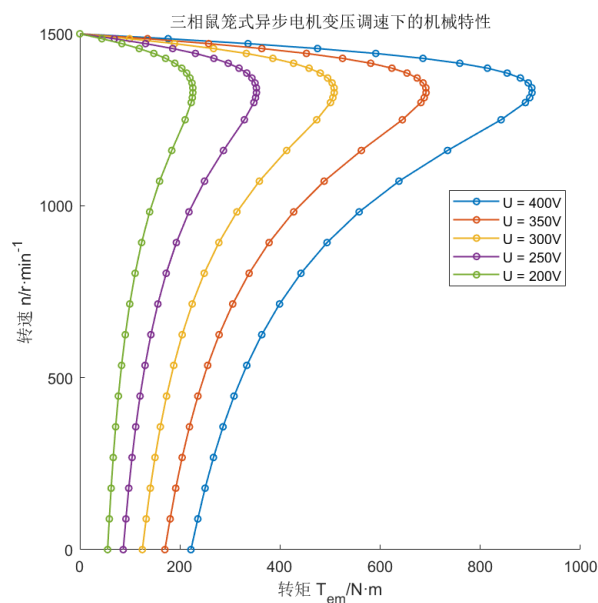


图 6-3 调压调速 Simulink 仿真机械特性曲线

利用代码根据公式直接绘出机械特性，公式如下：

$$T = \frac{m_1 p}{2\pi f} \frac{(U_N)^2 \cdot \frac{r_2}{s}}{\left[ \left( r_1 + \frac{r_2}{s} \right)^2 + \left( x_1 + \frac{x_2}{s} \right)^2 \right]}$$

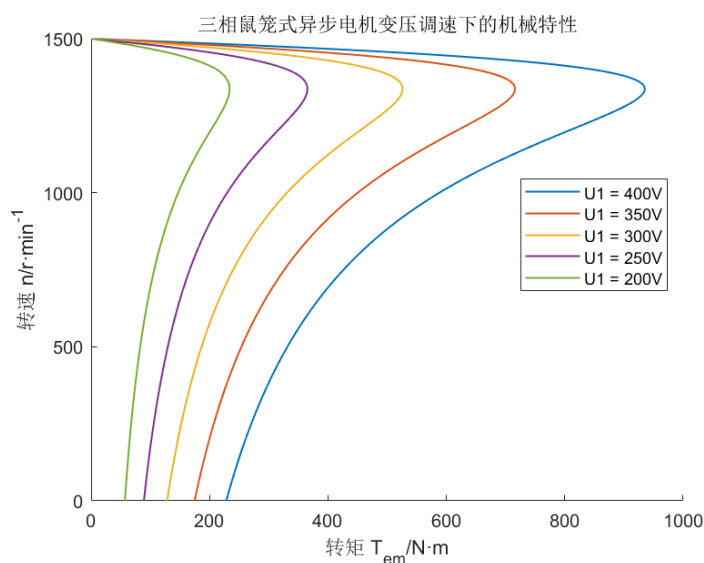


图 6-4 调压调速 MATLAB Code 仿真机械特性曲线

将 Simulink 仿真图与代码计算公式所得图对比，可知机械特性曲线仿真拟合正确。从图中我们可以得到以下结论：

- 1) 调电压调速稳定性差。从图中可以看出，机械特性随着电压值的增大逐渐变软，可见稳定性不高。
- 2) 调电压调速适用于通风机类型负载。可以看出，最大转矩 $T_{max}$ 随着  $U$  的减小而减小，不适用与恒转矩负载。且当转速低于最低转速 $n_{min}$ 时，电机将不能稳定运转。但是这一特性又可运用于通风机型负载，当转矩降低时，其产生的风速即旋转速度也将减小，在人为机械特性与负载转矩特性的交点仍可稳定运行，调速范围显然能够增大。

### 6.3.2 速度变化曲线

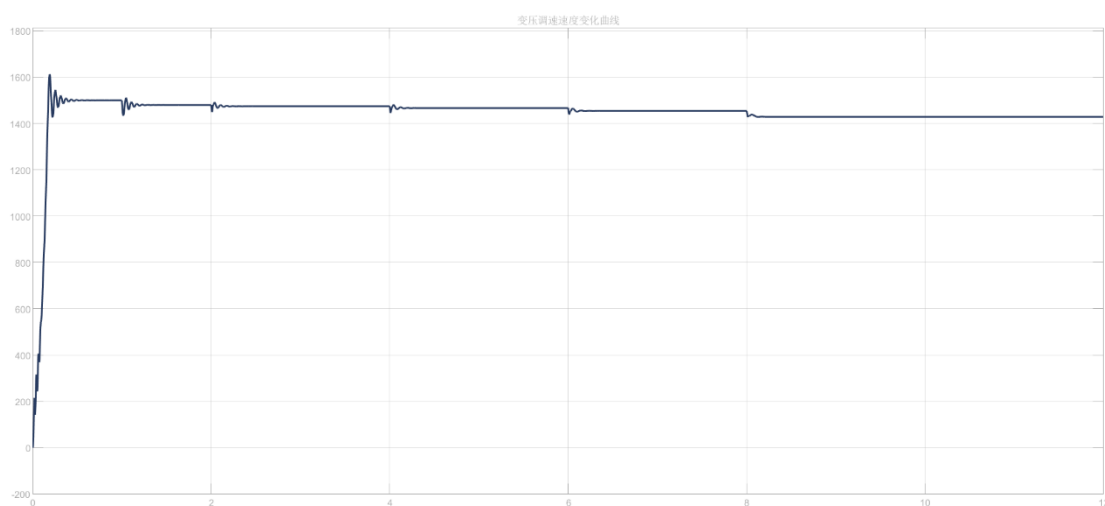


图 6-5 变电压调速速度随时间变化曲线

由图可知：

- 1) 在位能性负载转矩时，变电压调速调节时间较短，且可直接看出调速范围较小（在 Simulink 仿真中尝试将电压调至 200V 以下时，出现电机反转的情况，说明该电压对应的最大转矩 $T_{max} < T_z$ ，调速范围小），说明机械特性较软，这也与 6.3.1 分析一致。

- 2) 变压调速可适用于多级调速，提升调速平滑性。如果有合适的电压可平滑调节的供电设备，那么可平滑调节异步电机的转速。

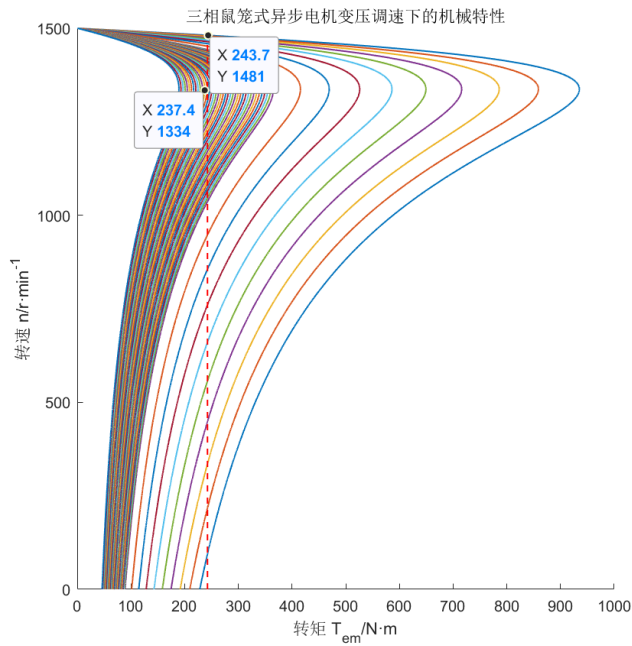


图 6-6 变电压调速调速范围求解

在这里，为了便于横向比较，依然设置静差率 $\delta < 40\%$ 来考察调速范围D。基本计算方式与前文相同，最后得到调速范围（1481r/min~1334r/min），得 $D=1.11$ ，调速范围很小。

### 6.3.3 效率变化曲线

效率计算方式、测量方式与前文一致。可得多级调压下的效率曲线为：

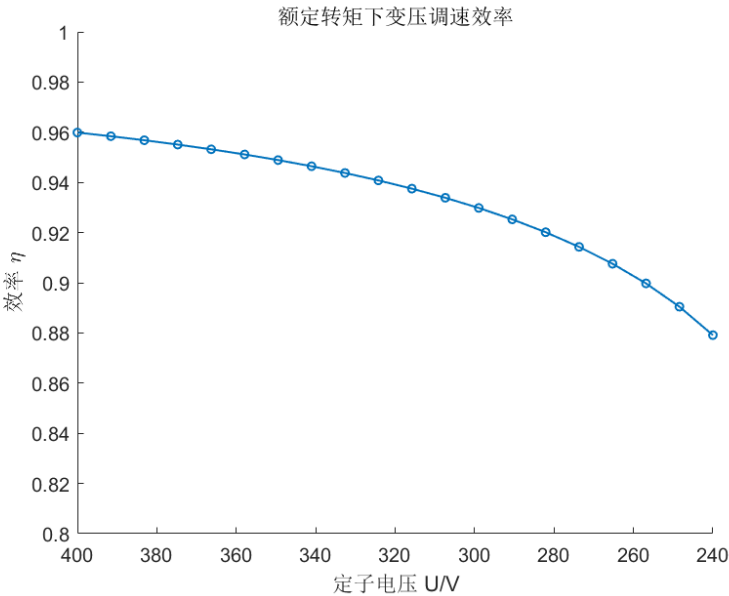


图 6-7 变电压调速效率变化曲线

由图可知，改变定子电压对效率带来的影响并不大，相对于变频、串电阻调速方式来说，其效率更高。

## 6.4 变极变压结合机械特性

为了改善单独采用变压调速时的平滑性不高、稳定性较弱等问题，在这里，我们还额外研究且绘制了多速电动机（ $2p=4、6、10$ ）在变极变压时的机械特性。

考虑到 Simulink 仿真时无法对极数、定子侧电阻 $R_s$ 、定子侧电感 $L_s$ 、三相电源电压 $U$ 同时改变，因此在这里仅用 MATLAB Code 带入如下公式进行绘制【代码见附录 5】：

$$T = \frac{m_1 p}{4\pi f} \frac{\left(\frac{U_N}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot \frac{r_2}{4s}}{\left[\left(\frac{1}{4}r_1 + \frac{r_2}{4s}\right)^2 + \left(\frac{1}{4}x_1 + \frac{x_2}{4s}\right)^2\right]}$$

此处为 YY 联结的机械特性公式，变压仅改变 $U_N$ ，对于公式整体没有影响。

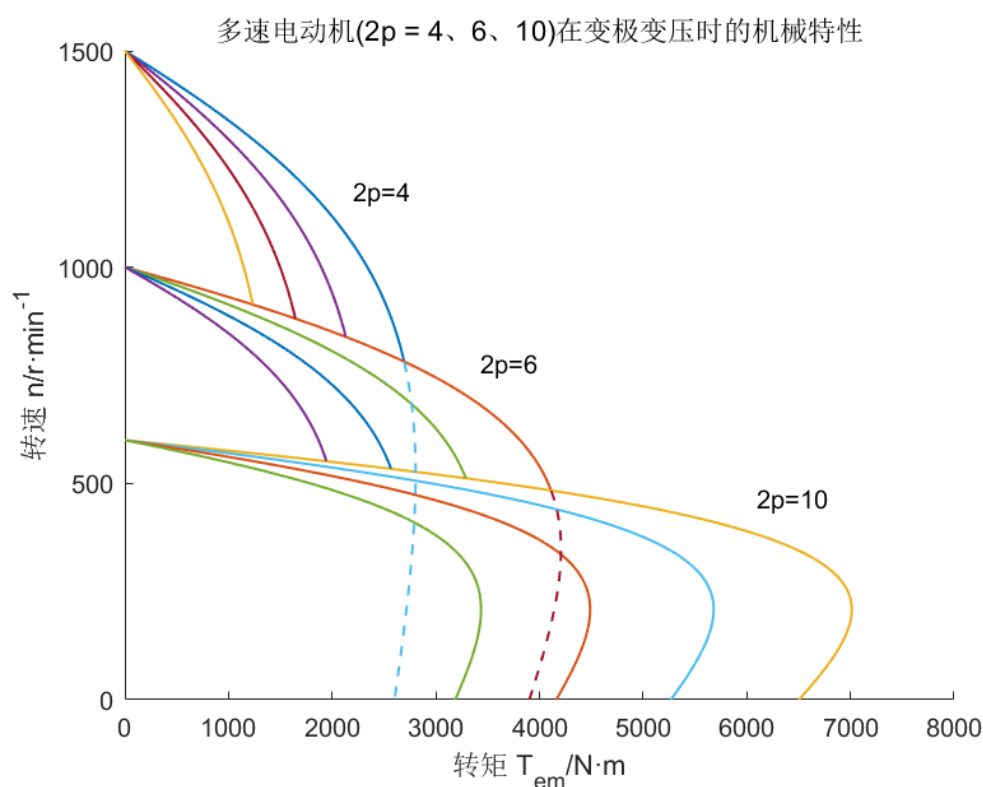


图 6-8 多速电动机（ $2p=4、6、10$ ）在变极变压时的机械特性

由图可知：

- 1) 变极变压调速稳定性好。此方式利用了变极调速机械特性较硬的特点，改善了变压调速的稳定性。
- 2) 变极变压调速更适用于多级平滑调速。利用变压调速可多级调速的特点，改善了变极调速因为变极设备限制而调速平滑性不高的缺点。
- 3) 变极变压调速耗资大。此方式需要控制装置及定子绕组接线比较复杂。

## 七、调速方式特性总结

综合以上各类调速方式，结合前文分析的调速特性，总结如下表：

表 7-1 各类调速方式特性对比

	变频调速	变极调速	转子串电阻调速	变压调速	变压变极调速
调速稳定性	很高	较高	差	一般	较高
调速范围 D	很大，28	较大	小，1.63	小，1.1	很大
调速平滑性	较好，但调节时间略长	差	较好，可便捷适用于多级调速。调节时间短	较好，可适用于多级调速；调节时间长	较好，可平滑调节
调速经济型	效率高 (>80%) 耗资大	效率较高 耗资大	效率低 (80%~60%) 耗资小	效率高 (96%~88%) 耗资一般	效率高 耗资大
适用负载	基频以下调速适用恒转矩负载	$\Delta$ -YY 适用恒转矩负载；Y-YY 适用恒功率负载	恒转矩负载	通风机类型负载	通风机类型负载 恒转矩负载 恒功率负载

## 八、附录

### 8.1 变频调速附录

#### 8.1.1 求机械特性曲线，MATLAB Code 控制 Simulink

```

hd = load_system('VVVF_TN');
set_param(hd,'FastRestart','on')
pt_num = 30;
line_num = 5;
Tem = zeros(line_num,pt_num);
f = [50,40,30,20,10];
line_num = size(f,2);
figure(1);hold on;title('三相鼠笼式异步电机恒压频比(U/f=8)情况下变压变频调速的机械特性')
xlabel('转矩 T_{em}/N·m');ylabel('转速 n/r·min^{-1}');legend
for j = 1:line_num
    N_max = 60*f(j)/2;
    N = horzcat(linspace(0,N_max*(5/6),15),linspace(N_max*((5/6)+1/30),N_max,15));
    str_f = ['f',num2str(400*f(j)/50),' 0 ',num2str(f(j)),''];
    set_param('VVVF_TN/VoltageSource','PositiveSequence',str_f)

```

```

for i = 1:pt_num
    tic
    str = num2str(N(i));
    set_param('VVVF_TN/Constant','Value',str)
    simOut = sim('VVVF_TN');
    Tem(j,i) = sum(simOut.logout{1}.Values.Data)/10000;
    count_sims = sprintf('\n 已生成第%d 根图线的第%d 个数据点',j,i);
    disp(count_sims)
    toc
end
plot(Tem(j,:),N,'-o','LineWidth',1,'MarkerSize',4,'DisplayName',['f = ',num2str(f(j)),'Hz'])
end
set_param(hd,'FastRestart','off')
save_system(hd)
beep

```

### 8.1.2 求机械特性曲线，纯代码

```

tic
clc
clear all
load('ASMparameters_Sl.mat')
MC = Machines(18);
U1n = MC.V/sqrt(3);
NumPh = 3;
poles = 2*MC.ppole;
f1 = MC.f;
N_n = 1480;
r1 = MC.Rs;
r2p = MC.Rr;
X10 = MC.Lls*(2*pi*MC.f);
X20p = MC.Llr*(2*pi*MC.f);
Xm0 = MC.Lm*(2*pi*MC.f);

f = [50,40,30,20,10];
nr = zeros(2001,size(f,2));
T_em = zeros(2001,size(f,2));
for cnt = 1:size(f,2)
    ns = 120 * f(cnt)/poles;
    x1 = X10 *(f(cnt)/f1);
    x2p = X20p * (f(cnt)/f1);
    U1 = U1n *(f(cnt)/f1);
    s= 0:0.0005:1;
    nr(:,cnt)=ns*(1-s);
    T_em(:,cnt)
    =
    NumPh*poles/(4*pi)*(U1/f(cnt))^2*(f(cnt)*r2p./s./((r1+r2p./s).^2+(x1+x2p)^2));

```



```

end
plot(T_em,nr,'-','LineWidth',1)
title('三相鼠笼式异步电机恒压频比情况下的机械特性')
xlabel('转矩 T_{em}/N·m');ylabel('转速 n/r·min^{-1}');
legend('f = 50','f = 40','f = 30','f = 20','f = 10')
figure
plot(T_em,s,'-','LineWidth',1)
title('三相鼠笼式异步电机恒压频比情况下的机械特性')
xlabel('转矩 T_{em}/N·m');ylabel('转差率 s');
legend('f = 50','f = 40','f = 30','f = 20','f = 10')
ax = gca;
ax.YDir = 'reverse';

f = 50:-1:10;
nr = zeros(2001,size(f,2));
T_em = zeros(2001,size(f,2));
for cnt = 1:size(f,2)
    ns = 120 * f(cnt)/poles;
    x1 = X10 * (f(cnt)/f1);
    x2p = X20p * (f(cnt)/f1);
    U1 = U1n * (f(cnt)/f1);
    s = 0:0.0005:1;
    nr(:,cnt) = ns * (1 - s);
    T_em(:,cnt) = NumPh * poles / (4 * pi) * (U1 / f(cnt))^2 * (f(cnt) * r2p / s) / ((r1 + r2p / s).^2 + (x1 + x2p)^2);
end
figure
[X,Y] = meshgrid(f,s);
surf(X,Y,T_em,'EdgeColor','flat')
xlabel('频率 f/s^{-1}');ylabel('转差率 s');zlabel('转矩 T_{em}/N·m')
toc

```

### 8.1.2 求调速范围

```

tic
clc
clear all
load('ASMparameters_SI.mat')
MC = Machines(18);
U1n = MC.V/sqrt(3);
NumPh = 3;
poles = 2 * MC.ppole;
f1 = MC.f;
N_n = 1480;
r1 = MC.Rs;
r2p = MC.Rr;

```

```

X10 = MC.Lls*(2*pi*MC.f);
X20p = MC.Llr*(2*pi*MC.f);

line_num = 60;
intern = 10;
line1 = 10;
f = horzcat(linspace(50,intern,line1),linspace(intern,0,line_num-line1));
delta_s = 0.0001;
nr = zeros(1/delta_s+1,size(f,2));
T_em = zeros(1/delta_s+1,size(f,2));
s = 0:delta_s:1;
s = s';
for cnt = 1:size(f,2)
    ns = 120 * f(cnt)/poles;
    x1 = X10 *(f(cnt)/f1);
    x2p = X20p * (f(cnt)/f1);
    U1 = U1n *(f(cnt)/f1);
    nr(:,cnt)=ns*(1-s);
    T_em(:,cnt) =
NumPh*poles/(4*pi)*(U1/f(cnt))^2*(f(cnt)*r2p./s./((r1+r2p./s).^2+(x1+x2p)^2));
end
plot(T_em,nr,'-','LineWidth',1);hold on
title('三相鼠笼式异步电机恒压频比(U/f=8)情况下的调速范围求解')
xlabel('转矩 T_{em}/N·cnt');ylabel('转速 n/r·min^{-1}');
plot([242.533,242.533],[0,1500],'r--','LineWidth',1)

[MaxT,Id_MaxT] = max(T_em);
id = find(MaxT<242.533,1);
f_min = 10/(line_num-line1)*(line_num-id);
N_min = (1-(Id_MaxT(id)-1)*delta_s)*(60*f_min/2);
D = 1480/N_min;
fprintf('调速范围为%f\n',D)
toc
8.1.3 求运行效率
hd = load_system('VVVF_eta');
set_param(hd,'FastRestart','on')
pt_num = 20;
eta = zeros(1,pt_num);
f = linspace(50,10,pt_num);
set_param('VVVF_eta/Constant','Value','242.533')
figure(1);hold on;title('恒压频比(U/f=8)调速效率变化图')
xlabel('频率 f/s^{-1}');ylabel('效率 \eta')
xlim([0,50]);ylim([0,1])
ax = gca;

```

```

ax.XDir = 'reverse';
for i = 1:pt_num
    tic
    N_max = 60*f(i)/2;
    str_f = [' ',num2str(400*f(i)/50),' 0 ',num2str(f(i)),'];
    set_param('VVVF_eta/VoltageSource','PositiveSequence',str_f)
    simOut = sim('VVVF_eta');
    eta(i) = sum(simOut.logouts{1}.Values.Data)/10000;
    count_sims = sprintf('\n 已生成第%d 个数据点',i);
    disp(count_sims)
    toc
end
plot(f,eta,'-o','LineWidth',1,'MarkerSize',4)
set_param(hd,'FastRestart','off')
save_system(hd)
beep

```

## 8.2 变极调速附录

### 8.2.1 求机械特性曲线，纯代码

```

tic
clc
clear all
load('ASMparameters_SI.mat')
MC = Machines(18);
U1n = MC.V/sqrt(3);
NumPh = 3;
poles = 2*MC.ppole*[2 2 1];
f1 = MC.f;
N_n = 1480;
r1 = MC.Rs;
r2p = MC.Rr;
x1 = MC.Lls*(2*pi*MC.f);
x2p = MC.Llr*(2*pi*MC.f);

s = -2:0.0001:1.5;
ns = 120 * f1./poles([1,2]);
nr=ns*(1-s);
T_Y = NumPh*poles(1)/(4*pi*f1)*U1n^2*r2p./s./((r1+r2p./s).^2+(x1+x2p)^2);
T_tri = NumPh*poles(2)/(4*pi*f1)*(sqrt(3)*U1n)^2*r2p./s./((r1+r2p./s).^2+(x1+x2p)^2);

s = -0.5:0.0001:1.4;
ns = 120 * f1./poles(3);

```

```

nr_yy=ns*(1-s);
T_YY
NumPh*poles(3)/(2*4*pi*f1)*U1n^2*r2p./(4*s)./((r1/4+r2p./(4*s)).^2+(x1/4+x2p/4)^2);
figure(1)
plot(T_Y,nr(2,:),T_YY,nr_yy,'LineWidth',2)
legend('星形联结','双星形联结');title('星形联结改为双星形联结')
xlabel('转矩 T_{em}/N-cnt');ylabel('转速 n/r-min^{-1}')
ax = gca;
ax.XAxisLocation = 'origin';
ax.YAxisLocation = 'origin';
xlim([-4000,4000]);ylim([-300,2240])
figure(2)
plot(T_tri,nr(2,:),T_YY,nr_yy,'LineWidth',2)
legend('三角形联结','双星形联结');title('三角形联结改为双星形联结')
xlabel('转矩 T_{em}/N-cnt');ylabel('转速 n/r-min^{-1}')
ax = gca;
ax.XAxisLocation = 'origin';
ax.YAxisLocation = 'origin';
xlim([-10000,10000]);ylim([-300,2200])
8.2.2 求速度随时间变化曲线
load_system('PC_nt')
set_param('PC_nt','SaveFinalState','on','FinalStateName',...
'myOperPoint','SaveCompleteFinalSimState','on');
set_param('PC_nt/Asynchronous Machine SI Units','Stator','[0.1 0.000867]',...
'Rotor','[0.058 0.000867]','PolePairs','2','NominalParameters','[37300 400 50]',...
'Mechanical','[0.4 0.02187 2]','Lm','0.03039')
simOut = sim('PC_nt','StopTime','1');
data1 = simOut.logsout{1}.Values.Data;
time1 = simOut.logsout{1}.Values.Time;

set_param('PC_nt','LoadInitialState','on','InitialState',...
'simOut.myOperPoint');
set_param('PC_nt/Asynchronous Machine SI Units','Stator','[0.025 0.000217]',...
'Rotor','[0.014 0.000217]','PolePairs','1','NominalParameters','[43070 230 50]',...
'Mechanical','[0.4 0.02187 1]','Lm','0.00759')
simOut = sim('PC_nt','StopTime','2');
data1 = [data1;simOut.logsout{1}.Values.Data];
time1 = [time1;simOut.logsout{1}.Values.Time];
set_param('PC_nt','LoadInitialState','off')

set_param('PC_nt','SaveFinalState','on','FinalStateName',...
'myOperPoint','SaveCompleteFinalSimState','on');
set_param('PC_nt/Asynchronous Machine SI Units','Stator','[0.1 0.000867]',...

```

```

        'Rotor',[0.058 0.000867]','PolePairs','2','NominalParameters',[37300 400 50]','...
        'Mechanical',[0.4 0.02187 2]','Lm','0.03039')
simOut = sim('PC_nt','StopTime','1');
data2 = simOut.logouts{1}.Values.Data;
time2 = simOut.logouts{1}.Values.Time;

set_param('PC_nt','LoadInitialState','on','InitialState',...
'simOut.myOperPoint');
set_param('PC_nt/Asynchronous Machine SI Units','Stator',[0.025 0.000217]','...
        'Rotor',[0.014 0.000217]','PolePairs','1','NominalParameters',[37300 400 50]','...
        'Mechanical',[0.4 0.02187 1]','Lm','0.00759')
simOut = sim('PC_nt','StopTime','2');
data2 = [data2;simOut.logouts{1}.Values.Data];
time2 = [time2;simOut.logouts{1}.Values.Time];

```

## 8.3 转子串电阻调速附录

### 8.3.1 求机械特性曲线，MATLAB Code 控制 Simulink

```

hd = load_system('sRes_TN');
pt_num = 30;
Tem = zeros(1,pt_num);
R = [0.000001,1:1:4];
line_num = size(R,2);
figure;hold on;title('三相绕线式异步电机串电阻情况下的机械特性')
xlabel('转矩 T_{em}/N·m');ylabel('转速 n/r·min^{-1}');legend
for j = 1:line_num
    w_max = 60*50/2;
    w = horzcat(linspace(0,w_max*1/3,5),linspace(w_max*(1/3+1/30),w_max,25));
    set_param('sRes_TN/SeriesR','Resistance',num2str(R(j)))
    for i = 1:pt_num
        tic
        str = num2str(w(i));
        set_param('sRes_TN/Constant','Value',str)
        sim('sRes_TN');
        Tem(i) = sum(logouts{1}.Values.Data)/10000;
        count_sims = sprintf('\n 已生成第%d 根图线的第%d 个数据点',j,i);
        disp(count_sims)
        toc
    end
    plot(Tem,w,'-o','LineWidth',1,'MarkerSize',4,'DisplayName',['R_{\Omega} = ',num2str(j-1),'\Omega'])
end
save_system(hd)

```

```
beep
```

### 8.3.2 求机械特性曲线，纯代码

```
tic
```

```
clc
```

```
clear all
```

```
load('ASMparameters_Sl.mat')
```

```
MC = Machines(18);
```

```
U1n = MC.V/sqrt(3);
```

```
NumPh = 3;
```

```
poles = 2*MC.ppole;
```

```
f1 = MC.f;
```

```
r1 = 1.405;
```

```
r2p = 1.395;
```

```
X10 = 0.005839*(2*pi*MC.f);
```

```
X20p = 0.005839*(2*pi*MC.f);
```

```
ns = 120 * f1/poles;
```

```
s= 0:0.0005:1;
```

```
nr=ns*(1-s);
```

```
r_c = 0:4;
```

```
figure;hold on
```

```
T_em
```

```
NumPh*poles/(4*pi)*(U1n/f1).^2*(f1*(r2p+r_c')./s./((r1+(r2p+r_c')./s).^2+(X10+X20p)^2));
```

```
plot(T_em,nr,'-','LineWidth',1)
```

```
title('三相绕线式异步电机串电阻调速情况下的机械特性')
```

```
xlabel('转矩 T_{em}/N·m');ylabel('转速 n/r·min^{-1}');
```

```
legend('R_{\Omega} = 0\Omega','R_{\Omega} = 1\Omega','R_{\Omega} = 2\Omega','R_{\Omega} = 3\Omega','R_{\Omega} = 4\Omega')
```

```
toc
```

### 8.3.3 求调速范围 D

```
tic
```

```
clc
```

```
clear all
```

```
load('ASMparameters_Sl.mat')
```

```
MC = Machines(18);
```

```
U1n = MC.V/sqrt(3);
```

```
NumPh = 3;
```

```
poles = 2*MC.ppole;
```

```
f1 = MC.f;
```

```
r1 = 1.405;
```

```
r2p = 1.395;
```

```
X10 = 0.005839*(2*pi*MC.f);
```

```
X20p = 0.005839*(2*pi*MC.f);
```

```
ns = 120 * f1/poles;
```

```

s= 0:0.0005:1;
nr=ns*(1-s);

line_num = 10;
line1 = 4;
intern = 4;
r_c = horzcat(linspace(0,intern,line1),linspace(intern,42,line_num-line1));
figure;hold on
T_em =
NumPh*poles/(4*pi)*(U1n/f1).^2*(f1*(r2p+r_c')./s./((r1+(r2p+r_c')./s).^2+(X10+X20p)^2));
plot(T_em,nr,'-','LineWidth',1)
title('三相绕线式异步电机串电阻调速情况下的机械特性')
xlabel('转矩 T_{em}/N·m');ylabel('转速 n/r·min^{-1}');
plot([8.867,8.867],[0,1500],'r--','LineWidth',2)

```

```

toc

```

### 8.3.4 求运行效率

```

hd = load_system('sRes_eta');
pt_num = 5;
eta = zeros(1,pt_num);
R = [0.000001,1:1:4];
set_param('sRes_eta/Constant','Value','50')
figure(1);hold on;title('串电阻调速电机效率曲线')
xlabel('串接电阻 R/\Omega');ylabel('效率 \eta')
xlim([0,4]);ylim([0,1])
for i = 1:pt_num
    tic
    set_param('sRes_eta/SeriesR','Resistance',num2str(R(i)))
    sim('sRes_eta');
    eta(i) = sum(logsout{1}.Values.Data)/10000;
    count_sims = sprintf('\n 已生成第%d 个数据点',i);
    disp(count_sims)
    toc
end
plot(R,eta,'-o','LineWidth',1,'MarkerSize',4)
save_system(hd)
beep

```

## 8.4 变压调速附录

### 8.4.1 求机械特性曲线，MATLAB Code 控制 Simulink

```

hd = load_system('VVVF_TN');
set_param(hd,'FastRestart','on')

```

```

pt_num = 30;
line_num = 5;
Tem = zeros(line_num,pt_num);
f = [50,40,30,20,10];
line_num = size(f,2);
figure(1);hold on;title('三相鼠笼式异步电机恒压频比(U/f=8)情况下变压变频调速的机械特性')
xlabel('转矩 T_{em}/N·m');ylabel('转速 n/r·min^{-1}');legend
for j = 1:line_num
    N_max = 60*f(j)/2;
    N = horzcat(linspace(0,N_max*(5/6),15),linspace(N_max*((5/6)+1/30),N_max,15));
    str_f = ['f=',num2str(400*f(j)/50),' 0 ',num2str(f(j)),'];'];
    set_param('VVVF_TN/VoltageSource','PositiveSequence',str_f)
    for i = 1:pt_num
        tic
        str = num2str(N(i));
        set_param('VVVF_TN/Constant','Value',str)
        simOut = sim('VVVF_TN');
        Tem(j,i) = sum(simOut.logsout{1}.Values.Data)/10000;
        count_sims = sprintf('\n 已生成第%d 根图线的第%d 个数据点',j,i);
        disp(count_sims)
        toc
    end
    plot(Tem(j,:),N,'-o','LineWidth',1,'MarkerSize',4,'DisplayName',['f = ',num2str(f(j)),'Hz'])
end
set_param(hd,'FastRestart','off')
save_system(hd)
beep

```

#### 8.4.2 求机械特性曲线，纯代码

```

tic
clc
clear all
load('ASMparameters_SI.mat')
MC = Machines(18);
NumPh = 3;
poles = 2*MC.ppole;
f1 = MC.f;
r1 = MC.Rs;
r2p = MC.Rr;
X10 = MC.Lls*(2*pi*MC.f);
X20p = MC.Llr*(2*pi*MC.f);
ns = 120 * f1/poles;

U1 = (400:-50:200)/sqrt(3);

```



```

s= 0:0.0005:1;
nr=ns*(1-s);
figure;hold on
T_em = NumPh*poles/(4*pi)*(U1'/f1).^2*(f1*r2p./s./((r1+r2p./s).^2+(X10+X20p)^2));
plot(T_em,nr,'-','LineWidth',1)
title('三相鼠笼式异步电机变压调速下的机械特性')
legend('U1 = 400V','U1 = 350V','U1 = 300V','U1 = 250V','U1 = 200V')
xlabel('转矩 T_{em}/N·m');ylabel('转速 n/r·min^{-1}');

```

```

toc

```

### 8.4.3 求调速范围 D

```

clc
clear all
load('ASMparameters_SI.mat')
MC = Machines(18);
NumPh = 3;
poles = 2*MC.ppole;
f1 = MC.f;
r1 = MC.Rs;
r2p = MC.Rr;
X10 = MC.Lls*(2*pi*MC.f);
X20p = MC.Llr*(2*pi*MC.f);
ns = 120 * f1/poles;

line_num = 50;
intern = 250;
line1 = 10;
U1 = horzcat(linspace(400,intern,line1),linspace(intern,180,line_num-line1))/sqrt(3);
delta_s = 0.0001;
s= 0:delta_s:1;
s = s';
nr=ns*(1-s);

figure;hold on
T_em = NumPh*poles/(4*pi).*(U1/f1).^2.*(f1*r2p./s./((r1+r2p./s).^2+(X10+X20p)^2));
plot(T_em,nr,'-','LineWidth',1)
title('三相鼠笼式异步电机变压调速下的机械特性')
xlabel('转矩 T_{em}/N·m');ylabel('转速 n/r·min^{-1}');
plot([242.533,242.533],[0,1500],'r--','LineWidth',1)

[MaxT,Id_MaxT] = max(T_em);
id = find(MaxT<242.533,1);
U_min = 200+(intern-200)/(line_num-line1)*(line_num-id);
N_min = (1-(Id_MaxT(id)-1)*delta_s)*(60*f1/2);

```

```

D = 1480/N_min;
fprintf('调速范围为%f\n',D)
8.4.4 求运行效率
hd = load_system('VC_eta');
set_param(hd,'FastRestart','on')
pt_num = 20;
eta = zeros(1,pt_num);
U1 = linspace(400,240,pt_num);
set_param('VC_eta/Constant','Value','242.533')
figure(1);hold on;title('额定转矩下变压调速效率')
xlabel('定子电压 U/V');ylabel('效率 \eta')
xlim([240,400]);ylim([0.8,1])
ax = gca;
ax.XDir = 'reverse';
for i = 1:pt_num
    tic
    str_f = [' ',num2str(U1(i)),' 0 50'];
    set_param('VC_eta/VoltageSource','PositiveSequence',str_f)
    simOut = sim('VC_eta');
    eta(i) = sum(simOut.logsout{1}.Values.Data)/10000;
    count_sims = sprintf('\n 已生成第%d 个数据点',i);
    disp(count_sims)
    toc
end
plot(U1,eta,'-o','LineWidth',1,'MarkerSize',4)
set_param(hd,'FastRestart','off')
save_system(hd)
beep

```

## 8.5 变极变压结合调速附录

### 求机械特性曲线，纯代码

```

tic
clc
clear all
load('ASMparameters_Sl.mat')
MC = Machines(18);
U1n = MC.V/sqrt(3);
NumPh = 3;
poles = 2*[2,3,5];
f1 = MC.f;
N_n = 1480;
r1 = MC.Rs;

```

```

r2p = MC.Rr*6;
X10 = MC.Lls*(2*pi*MC.f);
X20p = MC.Llr*(2*pi*MC.f);
ns = 120 * f1./poles;

U1 = linspace(400,280,4);
s= 0:0.0005:1;
nr=ns'*(1-s);
T_em = zeros(3,3,2001);
figure;hold on
for j = 1:4
    for i = 1:3
        T_em(j,i,:) =
NumPh*poles(i)/(4*pi)*(U1(j)/f1).^2*(f1*r2p./s./((r1+r2p./s).^2+(X10+X20p)^2));
        end
    end
line = [squeeze(T_em(1,:,:));squeeze(T_em(2,:,:));squeeze(T_em(3,:,:));squeeze(T_em(4,:,:))];

line_p = zeros(12,1501);
for i = 1:12
    if mod(i,3)==1
        line_p(i,:) = spline(nr(1,2:end),line(i,2:end),1500:-1:0);
    elseif mod(i,3)==2
        line_p(i,:) = horzcat(NaN(1,500),spline(nr(2,2:end),line(i,2:end),1000:-1:0));
    else
        line_p(i,:) = horzcat(NaN(1,900),spline(nr(3,2:end),line(i,2:end),600:-1:0));
    end
end
line_pp = line_p;
line_pp(1,line_p(1,:)<line_p(2,:)) = nan;
line_pp(4,line_p(4,:)<line_p(2,:)) = nan;
line_pp(7,line_p(7,:)<line_p(2,:)) = nan;
line_pp(10,line_p(10,:)<line_p(2,:)) = nan;
line_pp(2,line_p(2,:)<line_p(3,:)) = nan;
line_pp(5,line_p(5,:)<line_p(3,:)) = nan;
line_pp(8,line_p(8,:)<line_p(3,:)) = nan;
line_pp(11,line_p(11,:)<line_p(3,:)) = nan;
line_xx = line_p([1,2],:);
line_xx(1,line_p(1,:)>line_p(2,:)) = nan;
line_xx(1,isnan(line_p(2,:))) = nan;
line_xx(2,line_p(2,:)>line_p(3,:)) = nan;
line_xx(2,isnan(line_p(3,:))) = nan;
figure;hold on
plot(line_pp,1500:-1:0,'-','LineWidth',1)

```

```
plot(line_xx,1500:-1:0,'--','LineWidth',1)
title('多速电动机(2p = 4、6、10)在变极变压时的机械特性')
xlabel('转矩  $T_{em}/N\cdot m$ ');ylabel('转速  $n/r\cdot min^{-1}$ ');
xlim([0,8000])
toc
```