

# 基于 MATLAB 语言及 SIMULINK 仿真环境的 CM 矢量控制系统研究<sup>3</sup>

成 立 刘国海 侯俊锋 张际先  
(江苏理工大学)

摘 要: 使用当前先进的 MATLAB 语言及 SIMULINK 环境, 对农村中大量使用的拖动风机与水泵类负载运行的笼型感应电动机(CM)矢量控制系统, 进行了建模和仿真。仿真结果表明, 该系统具有与直流电动机相仿的优良调速性能。这与理论分析结果相吻合, 因而是可行的。

关键词: 仿真; 矢量控制系统; 建模; PWM 逆变器

近 10 年来, 对普遍使用的 CM 调速性能的研究及推广应用, 一直是国内外电气工程师们竭力解决的课题。随着电力电子技术和电气控制技术的发展和, 在交流调速领域新技术应用方面取得了急剧的进展<sup>[1,2]</sup>。文献[3,4]研究了各种次谐波法开关策略 PWM 逆变器—CM 传动系统的性能。文献[5]论述了优化阶梯波 PWM 逆变器—CM 调速系统的数字仿真和性能试验。文献[6]则作出了农用风机与水泵的劈零矢量 PWM 逆变器的调速试验。以上各种开关策略或控制技术各有所长, 性能不一。它们形成的交流调速系统还不能与直流电动机相媲美。文章运用 CM 矢量控制技术, 通过坐标变换, 把 CM 的定子电流分解为励磁分量和转矩分量, 用来分别控制磁链和转矩, 就可以获得与直流电动机相仿的调速性能。

## 1 矢量控制系统建模

### 1.1 CM 电气模型

为分析简明、清楚起见, 忽略电机磁饱和与铁损现象, 这样 CM 电气模型近似为线性。将 CM 用静止两轴( $d2q$  轴) 或同步两轴( $de2qe$  轴) 表示为

$$i_{ds} = \frac{R_s L_m i_{ds} - X_{Lm} i_{dr} - R_r L_m i_{dr} - X_{Lm} i_{qr} - L_r M_s}{A} \quad (1)$$

$$i_{qs} = \frac{X_{Lm} i_{ds} + R_s L_r i_{qs} + X_{Lm} i_{dr} - R_r L_m i_{qr} - L_r M_s}{A} \quad (2)$$

$$i_{dr} = - \frac{R_s L_m i_{ds} - X_{Lm} L_s i_{qs} - R_r L_s i_{dr} - X_{Lm} L_s i_{qr} - L_m M_s}{A} \quad (3)$$

$$i_{qr} = - \frac{X_{Lm} L_m i_{qr} + R_s L_m i_{qs} + X_{Lm} L_s i_{dr} - R_r L_s i_{qr} - L_m M_s}{A} \quad (4)$$

$$T_e = \frac{3}{2} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) \quad (5)$$

式(1)~(5)中,  $A = L_m^2 - L_s L_r$ ;  $i_{ds}$ ,  $i_{qs}$ ,  $i_{dr}$ ,  $i_{qr}$  分别为  $d$ 、 $q$  轴定、转子电流;  $M_s$ ,  $M_r$  是  $d$ 、 $q$  轴的定子电压;  $T_e$  为电磁转矩;  $L_s$ ,  $L_r$  和  $L_m$  依次为定、转子自感及其互感; 而  $R_s$ ,  $R_r$  则为 CM 的定、转子电阻。上述电动机参数顶置“3”, 表示取了标么值, 下同。

### 1.1.2 CM 机械模型

为了便于控制, 从 CM 电气模型中分离出 CM 的机械模型, 电机转速  $X_r$  和负载转矩  $T_l$  为

$$\dot{X}_r = \frac{1}{J} (T_e - T_l) dt \quad (6)$$

$$T_l = T_{max} \begin{pmatrix} X_r \\ X_{max} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中  $J$ ——转动惯量;  $T_{max}$ ——最大额定转矩;  $X_{max}$ ——最大额定转速。

### 1.1.3 矢量控制器模型

在矢量控制器建模时, 可直接从 CM 电气模型中获得它的定子电流、转速和转子位置等物理量。转子转差用转子位置所在的转差速率进行积分求得。把转差加到所测出的转子位置数值上, 就可得到磁通的位置。描述转差位置的微分方程式如下

收稿日期: 1999209203

<sup>3</sup> 江苏省应用基础研究项目

成 立, 副教授, 镇江市 江苏理工大学电气信息学院, 212013

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{R_r}{L_r} (L_m i_{dse} - \beta) \quad (8)$$

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{L_m R_r}{\beta L_r} i_{qse} \quad (9)$$

将已算出的转差率积分后所得到的角度  $H$ ，与转子的滞后转差角  $H$  相加，就可得到实际转子的磁通位置  $H$ 。计算  $H$  的公式如下

$$H = \int \omega_r dt \quad (10)$$

用已得出的磁通位置  $H$ ，以及正交单位矢量  $\cos H$  和  $\sin H$ ，就可将定子电流从静止系变换到同步系中，其计算公式如下

$$\begin{aligned} i_{des} &= i_{ds} \cos H + i_{qs} \sin H \\ i_{qes} &= -i_{ds} \sin H + i_{qs} \cos H \end{aligned} \quad (11)$$

定子电压的计算是通过使用时间上连续的比例积分器来完成的，其计算公式如下

$$\begin{aligned} M_{es} &= \left( \frac{G_1}{s} + G_2 \right) (i_{des} - i_{dse}) \\ M_{qs} &= \left( \frac{G_1}{s} + G_2 \right) (i_{qes} - i_{qse}) \end{aligned} \quad (12)$$

式中  $G_1, G_2$ ——分别为比例积分器的积分常数和比例系数， $G_1/s$  分母上的“ $s$ ”为拉普拉斯算子。用以下公式就可将定子电压从同步系转换到静止系中

$$\begin{aligned} M_s &= M_{es} \cos H - M_{qs} \sin H \\ M_r &= -M_{es} \sin H + M_{qs} \cos H \end{aligned} \quad (13)$$

使用  $S$  函数  $m$  文件可以实现时间上连续的矢量控制。在此通过式 (8) ~ (13)，将  $m$  文件放置于  $SMULNK$  的  $S$  函数块中。矢量控制器模块的输入参数为定子电流、转速、转矩、磁通和转子电阻估测值；输出参数是：驱动电机的定子电压、矢量控制器的转子电阻估测值和旋转系下的定子电流值。图 1 为一个完整的  $CM$  矢量控制系统的  $SMULNK$  方框图。

### 114 脉宽调制(PWM)逆变器模型

为了便于将使用 PWM 逆变器与使用矢量控制器所作出的仿真结果相比较，本系统中设置了 PWM 模型，见图 1 中的“PWM 模型”部分。

### 115 转子电阻辨识模型

对于确定转子电阻值的参数辨识算法，本文采用的是扩展的卡尔曼算法(EKF)。这种算法不仅能估算出定、转子的直、交轴电流，而且能将估算出的转子电阻，在运行点上线性化，从而得到线性差值模

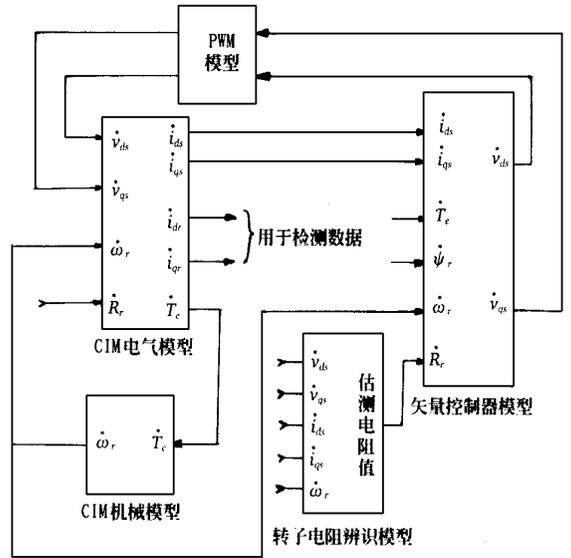


图 1  $CM$  矢量控制系统仿真框图

Fig 1 Block diagram of the vector controlled  $CM$  system simulation

型。这样转子电阻参数(现为状态)就与其它状态一起倍增。这一新的状态空间模型如下

$$\begin{aligned} x(k+1) &= f[x(k), u(k)] + w_1(k) \\ y(k) &= Cx(k) + w_2(k) \end{aligned} \quad (14)$$

式中列向量  $x(k) = [i_{ds}(k) \ i_{qs}(k) \ i_{dr}(k) \ i_{qr}(k) \ R_r]^T$  是将状态矩阵与参数矩阵结合而得到的， $f[x(k), u(k)]$  是非线性状态函数， $w_1(k), w_2(k)$  分别为过程干扰和测量干扰。式(14)的输出矩阵  $C$  及线性插值模型  $F(k)$ ，依次为

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$F(k) = \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \Big|_{x(k), u(k)} \quad (16)$$

有关 EKF 的等式如下

$$K(k) = F(k)P(k)C^T [CP(k)C^T + R]^{-1} \quad (17)$$

$$\hat{x}^d(k+1) = f[\hat{x}^d(k), u(k)] + K(k)[y(k) - C\hat{x}^d(k)] \quad (18)$$

$$\begin{aligned} P(k+1) &= F(k)P(k)F(k)^T + Q \\ &\quad - K(k)[CP(k)C^T + R]K(k)^T \end{aligned} \quad (19)$$

式中矩阵

$$F(k) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12}X_r(k) & a_{13}X_s(k) & a_{14}X_r(k) & a_{13}X_s(k) \\ 2a_{12}X_r(k) & a_{11} & 2a_{14}X_r(k) & a_{13}X_s(k) & a_{13}X_s(k) \\ a_{31} & a_{32}X_r(k) & 1 + a_{33}X_s(k) & a_{34}X_r(k) & a_{33}X_s(k) \\ 2a_{32}X_r(k) & a_{31} & 2a_{34}X_r(k) & 1 + a_{33}X_s(k) & a_{33}X_s(k) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

对于静止系的感应电动机模型, 矩阵  $F(k)$  中的参数定义为

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= 1 + \frac{R L_r t_s}{A}, a_{12} = \frac{-L_m^2 t_s}{a_0}, \\
 a_{13} &= \frac{-L_m t_s}{A}, a_{14} = \frac{-L_m L_r t_s}{A} \\
 a_{31} &= \frac{-R L_m t_s}{A}, a_{32} = \frac{L L_m t_s}{A}, a_{33} = \frac{L_s t_s}{A}, a_{34} = \frac{L L_r t_s}{A}
 \end{aligned} \tag{21}$$

式(17) ~ (21) 中各电机参数未顶置“3”, 是为简洁起见, 事实上仿真时是用标么值输入的。式(19) 中  $P(k)$  是状态估测误差的协方差矩阵,  $P(0) = P_0$  是初始状态  $x(0)$  的误差协方差矩阵,  $K(k)$  是卡尔曼增益矩阵,  $Q$  是过程协方差矩阵(假设在统计时过程干扰和传感器干扰为独立)。矩阵  $P(k)$  的初始值  $P_0$  和式(17~ 19) 中的  $Q$  以及  $R$  的值如下所示

$$P_0 = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} 5e29 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5e29 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5e29 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5e29 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5e28 \end{bmatrix} \tag{22}$$

$$R = \begin{bmatrix} 5e24 & 0 \\ 0 & 5e24 \end{bmatrix} \tag{23}$$

## 2 矢量控制系统仿真

### 211 基于 MATLAB 的 SMULNK 的仿真

在 SMULNK 仿真模型中, 每一个模块都有一些共同的特征, 如图 2 所示。



图2 仿真模块的共同特征

Fig 2 The common feature of SMULNK models

状态向量之间的数学关系可以用以下的方程式表示为

$$\begin{aligned}
 y &= f_0(t, x, u) && \text{(输入)} \\
 x_{dk+1} &= f_u(t, x, u) && \text{(更新)} \\
 x_c &= f_d(t, x, u) && \text{(导数)}
 \end{aligned} \tag{24}$$

其中

$$x = \begin{bmatrix} x_c \\ x_{dk} \end{bmatrix} \tag{25}$$

仿真包括: 初始化阶段和仿真阶段。在初始化阶段, 有下面 4 个步骤: 所有模块的参数被传送给 MATLAB, 以便 MATLAB 进行计算; 模块的递阶结构被展开成各个子系统模块, 并被各子系统所包含的对象所替代; 所有的模块在仿真时按照它们每步更新的先后顺序进行排序。对模块与模块之间的连接进行检查, 以确保每一个模块输出的向量维数相同。

### 212 系统仿真参数

仿真参数包括: 开始时间和结束时间; 最大和最小步长; 容许误差; 返回变量。在此仿真模型中, 电动机参数为  $R_s = 0.03; R_r = 0.03; L_s = 2.05; L_r = 2.05; L_m = 2.0$ ; 转差  $S = 0.03$ ; 惯性常数  $H = 0.67$  s。仿真算法采用 Runge2Kutta(龙格—库特)法。

### 213 系统仿真结果分析

#### 21311 未加 PWM 模块时的仿真

在仿真开始前, 先运行初始化  $m$  文件中所要输入的参数矩阵, 然后它们被放置于 SMULNK 的“from workspace”模块中。这一模块包含输入数值和相对的时间。仿真结果如图 3 所示。图中的转矩曲线在开始时有一段斜坡, 这段时间磁通在增加, 随后转矩保持不变, 则转子磁通和产生转矩的电流也保持不变。

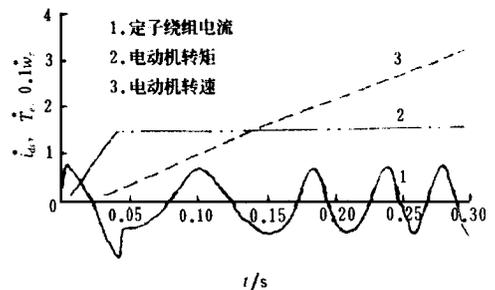


图 3 未加 PWM 模块时的仿真结果

Fig 3 Simulation result of a linear supply

#### 21312 加入 PWM 模块时的仿真

在仿真系统中, PWM 逆变器的开关频率为 5 Hz, 其峰值电压输出为 500 V。这一仿真结果(如图 4 所示)与图 3 很相似, 仿真运行中除了用 PWM 电源代替正弦电源外(在静态下, 矢量控制电动机的电流可调节, 它的电压源驱动器输出为正弦波), 其余参数均相同。

#### 21313 转子电阻辨识仿真

图 5 是 EKF 的运行结果。在这一仿真过程中,

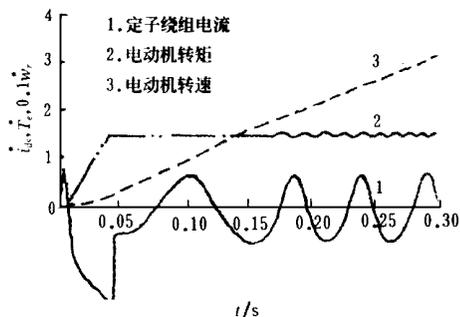


图4 加入PWM模块时的仿真结果

Fig 4 Simulation result of PWM supply

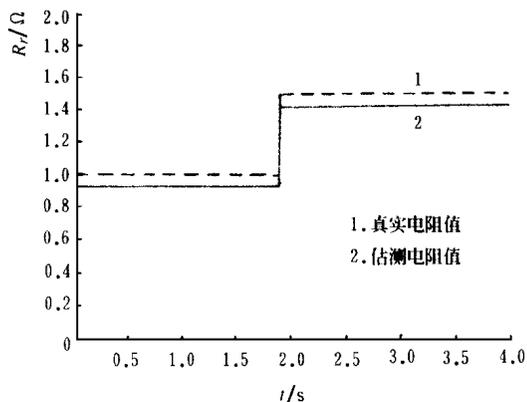


图5 EKF运行结果

Fig 5 Rotor resistance of EKF operation

EKF算法运行在10 KHz的采样频率下,由图5可见,转子电阻值从18跳变到1158,这是由于温度的变化引起了转子电阻值的变化。磁通和转矩值设置为9 A,转子的额定速率为100 r/s。

### 3 结论

1) 本文所做的研究工作表明, MATLAB SMULNK软件适用于CM矢量控制系统仿真。

2) 此控制系统仿真中使用了一个线性电源(静止状态下为正弦输出电压)和一个PWM电源。两种仿真结果除了由于PWM波形在转换频率上有很小的波动外,其余均相同。为了保证精度,PWM仿真时其仿真步长时间要比PWM载波周期小100倍。这就导致了与用线性电源仿真相比,用PWM仿真耗时更长。由于控制系统已作线性化处理,而PWM也是线性电源,所以两种仿真得到了比较一致的结果。

3) CM矢量控制系统运行比较平稳,带载转矩脉动较小,而且具有一定的调速范围,与文献[3~5]拖动系统相比,调速性能更为优良,但明显不如文献[6]调速系统。然而,它的结构简单,操作方便,适用于农村中风机与水泵类负载的拖动场合(因为误差较大的转子电阻仿真结果,制约了调速范围不可能很宽广)。

### [参 考 文 献]

- [1] 成立 农村用电机的使用与维修 南京:东南大学出版社,1998
- [2] 陈在平,魏克新 基于MATLAB(SMULNK)语言的智能控制系统仿真 电气传动,1998,28(6):42~44
- [3] 成立,杨正堂,刘国海 电压型PWM逆变器-M调速系统的仿真研究 江苏工学院学报,1991,12(2):77~85
- [4] 成立 PWM逆变器中谐波消除法的仿真研究 江苏工学院学报,1993,14(6):94~101
- [5] 成立,蒋晓东 优化阶梯波PWM逆变器-M调速系统的数字仿真和性能试验 电气传动,1996,26(3):16~20
- [6] 成立 农用风机与水泵的劈零矢量脉宽调制(PWM)调速研究 农业工程学报,1998,14(3):168~172

## Study on the CM Vector Controlled System Based on MATLAB and SMULNK Platform

Cheng Li Liu Guohai Hou Junfeng Zhang Jixian

(Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212013)

**Abstract:** This paper shows that it is possible to model and simulate any CM vector controlled system used for agricultural pump or fan by means of advanced MATLAB and SMULNK platform. The results proved that the validity of the method with the smoother and wider speed control characteristics is available, which is the same as the one of DC motors

**Key words:** modeling; simulation; vector controlled system; PWM inverter