

文章编号: 1671- 251X( 2010) 11- 0063- 05

# 逆变器非线性运行的同步电动机无源性控制研究

石桢， 赵蕾

(山西煤炭规划设计院机电室, 山西 太原 030045)

**摘要:** 通过严格的理论分析和数学计算, 建立了同步电动机在同步坐标系中  $E-L$  方程形式的数学模型, 给出了逆变器的非线性模型。以这些模型为基础, 研究并设计了在负载转矩(转速、位置)为任意时变未知情形下同步电动机的无源性渐近跟踪控制器。该控制器在实现机械控制目标的同时实现了对磁场方向和磁场幅值的控制, 即同时实现了磁场矢量控制。仿真结果表明, 该无源性控制器可以很好地实现转速和位置的跟踪控制, 具有很高的动态控制性能和鲁棒特性。

**关键词:** 同步电动机; 逆变器; 无源性控制; 渐近跟踪控制; 磁场矢量; 转速; 位置; 负载转矩

**中图分类号:** TD614; TM341      **文献标识码:**A

Research of Passivity Control of Synchronous Motor under  
Nonlinear Running of Inverter

SHI Zhen, ZHAO Lei

(Electromechanical Dept. of Shanxi Coal Institute of Planning & Design, Taiyuan 030045, China)

**Abstract:** By strict theoretical analysis and calculation, a mathematical model of synchronous motor of  $E-L$  equation in synchronous rotating coordinates was established and nonlinear model of inverter was given. Based on the models, a passivity asymptotical tracking controller of synchronous motor was designed in case of time-varying and unknown load torque( rotation rate and location). The controller realizes mechanical control target in meanwhile realizes control of magnetic field direction and magnetic field amplitude, namely realizes magnetic field vector control. The simulation result showed that the passivity controller can realize tracking control of rotation rate and location, which has high dynamic control performance and robust.

**Key words:** synchronous motor, inverter, passivity control, asymptotic tracking control, magnetic field vector, rotation rate, location, load torque

## 0 引言

无源性是系统的一种与输入、输出相关联的重要性质。粗略的解释就是如果一个系统的能量总是小于或等于初始时刻系统所具有的能量与外部提供的能量之和, 则表明系统只从外部吸收能量, 而系统本身并不产生能量, 则称系统是无源的。无源性是与系统的稳定性紧密相关的一个重要概念, 虽然无源性并不等同于系统的稳定性, 但是如果系统是无

源的, 通过输出反馈就可以实现闭环系统的渐近稳定<sup>[1-2]</sup>。

交流电动机的无源性控制是 ROMEO O 等人<sup>[3]</sup>从机器人控制的研究中受启发发展起来的。他们从对电动机的  $E-L$  (Euler- Lagrange) 方程分析入手, 将整个电动机系统分解为电气和机械 2 个子系统, 使电气子系统严格无源化, 将机械系统看作为电气子系统的无源性干扰, 根据无源性与稳定性的关系保证整个电动机系统的全局稳定性。该方法由于从电动机的能量方程入手, 使得电动机控制系统的控制律具有明确的物理意义, 使自动控制专家的理论分析更容易, 也便于电气工程师们理解和应用。特别是通过对感应电动机的研究发现, 电动机控制

收稿日期: 2010- 07- 21

作者简介: 石桢(1984- ), 男, 山西阳泉人, 助理工程师, 2007 年毕业于中国矿业大学, 现主要从事机电设计方面的工作。E-mail: 815690999@qq.com

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

系统能够实现控制的简化, 能够找到不影响稳定性  
的无功力的存在。特别是在定子坐标下, 电动机控  
制系统的反馈不需要观测器, 直接利用输出反馈就  
可以实现系统的全局稳定性<sup>[4]</sup>, 同时在一定的假设  
和条件下就能实现同步电动机无源性控制——间接  
磁场定向控制。

## 1 同步电动机 $d-q$ 坐标系的 E-L 方程

同步电动机在  $d-q$  坐标系中的 E-L 方程  
如下:

$$\dot{M^2 x} + (\omega M^3 + M^4)x + M^1 x = u + h \quad (1)$$

$$F(x) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega(L_{sd} + L_{sq}) & 0 & 0 & -\omega L_{mq} & 0 \\ \omega(L_{sd} + L_{sq}) & 0 & \omega L_{md} & \omega L_{md} & 0 & 0 \\ 0 & -\omega L_{md} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\omega L_{md} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega L_{mq} & 0 & 0 & 0 & 0 & -L_{mq} i_d \\ -L_{sd} i_q & L_{sq} i_d & -L_{md} i_q & -L_{md} i_q & L_{mq} i_d & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为转子角速度;  $L_{sd}$ 、 $L_{sq}$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电  
感;  $L_{md}$ 、 $L_{mq}$  分别为  $d$ 、 $q$  轴互感;  $i_d$ 、 $i_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴  
电流。

因此, 式(1)等价于方程:

$$\dot{Ex} + F(x)x + Gx = u + h \quad (4)$$

$$\text{其中: } E = M^2 = \begin{bmatrix} L_1 & 0 \\ 0 & \frac{J}{n_p} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} L_{sd} & 0 & L_{md} & L_{md} & 0 & 0 \\ 0 & L_{qs} & 0 & 0 & L_{mq} & 0 \\ L_{md} & 0 & L_f & L_{md} & 0 & 0 \\ L_{md} & 0 & L_{md} & L_D & 0 & 0 \\ 0 & L_{mq} & 0 & 0 & L_Q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{J}{n_p^2} \end{bmatrix}.$$

式中:  $L_f$  为激磁绕组电感;  $J$  为转动惯量;  $n_p$  为  
极对数;  $L_D$ 、 $L_Q$  分别为阻尼绕阻  $d$ 、 $q$  轴电感。

可以证明, 只要  $\begin{bmatrix} L_f L_{sd} - L_{md}^2 & L_{md} L_{sd} - L_{md}^2 \\ L_{md} L_{sd} - L_{md}^2 & L_D L_{sd} - L_{md}^2 \end{bmatrix} >$

0, 则  $E$  一定是正定的。

## 2 逆变器的非线性模型

电动机的非线性特性已经在电动机模型中得到了体现, 为了提高整个调速系统的性能, 必须考虑逆变器的非线性<sup>[5]</sup> 特性的影响。为了研究逆变器的非

其中:  $\omega M_3 + M_4 =$

$$\begin{bmatrix} 0 & -\omega L_{sq} & 0 & 0 & -\omega L_{mq} & 0 \\ \omega L_{sd} & 0 & \omega L_{md} & \omega L_{md} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -L_{sd} i_q & L_{sq} i_d & -L_{md} i_q & -L_{md} i_q & L_{mq} i_d & 0 \end{bmatrix}.$$

矩阵  $\omega M_3 + M_4$  不是反对称的, 但是可以按  
式(2)等价于反对称矩阵  $F(x)$ :

$$(\omega M_3 + M_4)x = F(x)x \quad (2)$$

其中:  $F(x)$  是反对称矩阵。

线性效应的影响, 逆变器的输入、输出模型可以用下  
列连续分段线性函数表示<sup>[5]</sup>:

$$v(t) = \theta_1 \cdot u(t) - \theta_2 \operatorname{sgn}(i(t)) \quad (5)$$

式中:  $v(t)$ 、 $u(t)$  分别为逆变器的一相输出输入  
电压;  $\theta_i$  是正的常数, 依赖于逆变器的实际参数, 如  
中间直流电压、调制频率、死区时间以及功率器件开  
通关断时间等, 由于各种逆变器的实现方法不同, 同  
时为避免参数的确定, 一般假设  $\theta_i$  在某一数值附近  
波动;  $\operatorname{sgn}(i(t))$  为一相电流  $i(t)$  的不连续函数, 可  
通过检测定子电流的方向获得。

例如, 在仿真时, 取逆变器的参考模型为

$$\begin{cases} v_1(t) = (1.02 + \delta_{11})u_1(t) - (11.6 + \delta_{12})\operatorname{sgn}(i_1(t)) \\ v_2(t) = (0.95 + \delta_{21})u_2(t) - (12.4 + \delta_{22})\operatorname{sgn}(i_2(t)) \end{cases} \quad (6)$$

$\delta_j$  的变化范围分别为

- $1.02 \times 0.1 \leq \delta_{11} \leq 1.02 \times 0.1$ ,
- $0.95 \times 0.1 \leq \delta_{21} \leq 0.95 \times 0.1$ ,
- $11.6 \times 0.1 \leq \delta_{12} \leq 11.6 \times 0.1$ ,
- $12.4 \times 0.1 \leq \delta_{22} \leq 12.4 \times 0.1$ 。

## 3 控制器设计

假设定子电流、转子励磁电流、转子转速都可以  
准确测量<sup>[6-8]</sup>, 根据下列方程设计期望轨迹:

$$x_{1d} = \left[ \frac{L_{sq}L_Q - L_{mq}^2}{n_p M L_{mq}} T_d + \frac{R_Q L_{sq}}{n_p M L_{mq}} T_d + x_{1x6d} \right] \frac{1}{x_6} \quad (7)$$

$$x_{2d} = \frac{T_d}{n_p M} \quad (8)$$

$$x_{5d} = -\frac{L_{sq}}{n_p M L_{mq}} T_d \quad (9)$$

$$\dot{x}_{3d} = \frac{R_D}{L_D - L_{md}} x_{4d} - \frac{L_{md}}{n_p M (L_D - L_{md})} x_6 T_d + \frac{L_{md}}{L_D - L_{md}} x_{2x6d} - \frac{L_D L_{sd} - L_{md}^2}{L_{md} (L_D - L_{md})} \dot{x}_{1d} \quad (10)$$

$$\dot{x}_{4d} = \frac{-R_D}{L_D - L_{md}} x_{4d} + \frac{L_{md}}{n_p M (L_D - L_{md})} T_d x_6 + \frac{L_{md}}{L_D - L_{md}} x_{2x6d} + \frac{L_{sd} - L_{md}}{L_D - L_{md}} \dot{x}_{1d} \quad (11)$$

$$\frac{J}{n_p} \dot{x}_{6d} + \frac{D}{n_p} x_{6d} - x_{2M} - k_6 e_6 = -\frac{T_L}{n_p} \quad (12)$$

式中:  $R_D$ 、 $R_Q$  为阻尼绕组  $d$ 、 $q$  轴电阻;  $T_d$  为期望转矩;  $T_L$  为负载转矩。

负载转矩估计器为

$$\dot{\tilde{T}_L} = -k_7 \overline{T_L} + \frac{1}{n_p} e_6 \quad (13)$$

$k_7 > 0$  为反馈增益系数, 设计无源性控制器的控制变量为

$$u_1 = L_{sd} \dot{x}_{1d} + L_{md} \dot{x}_{3d} + L_{md} \dot{x}_{4d} + R_1 x_{1d} - L_{sd} (x_{6x2d} - x_{2x6d}) - k_1 e_1 = R_1 x_{1d} - \frac{L_{sd}}{n_p M} x_6 T_d + L_{sd} x_{2x6d} - k_1 e_1 \quad (14)$$

$$u_2 = R_1 x_{2d} + (L_{sd} + L_{sq}) x_{6x1d} + L_{md} x_6 \times (x_{3d} + x_{4d}) - L_{sq} x_{1x6d} - k_2 e_2 = \frac{R_1}{n_p M} T_d + M x_6 + L_{sq} (x_{6x1d} - x_{1x6d}) - k_2 e_2 \quad (15)$$

$$u_3 = \frac{R_D (L_{md} - L_f)}{L_{md} - L_D} x_{4d} - \left[ \frac{L_{md} (L_{md} - L_f)}{L_{md} - L_D} + L_{md} \right] \times (x_{6x2d} - x_{2x6d}) + R_1 x_{3d} - k_3 e_3 + \left[ \frac{L_f (L_{md}^2 - L_{sd} L_D)}{L_{md}^2 - L_{sd} L_D} + \frac{L_{md} (L_{md} - L_{sd})}{L_{md} - L_D} \right] \dot{x}_{1d} \quad (16)$$

式中:  $u$ 、 $R_1$ 、 $x_d$  分别为定子电压、电阻、感抗;  $R_f$  为激磁绕组电阻。

则只要控制系数  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  选取合适(适当大), 这样设计的控制器一定能实现对转矩的渐近跟踪控制和对转子磁场矢量的渐近控制。

一般而言, 因为转子阻尼绕组电流  $x_4$ 、 $x_5$  不可测量, 跟踪误差  $e_4$ 、 $e_5$  无法得到, 所以, 常取  $k_4 = k_5 = 0$ 。

无源性控制器结构如图 1 所示, 基于无源性控制器的电气传动系统的结构如图 2 所示。其中, 符号 SM 表示同步电动机, DCS 表示直流电源, PBC 表示无源性控制器, rotor excit. 表示励磁电源。

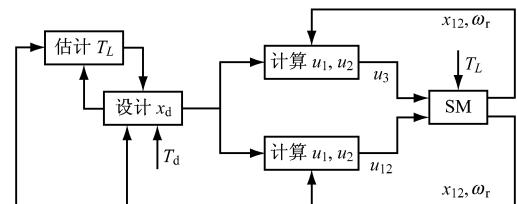


图 1 无源性控制器的结构

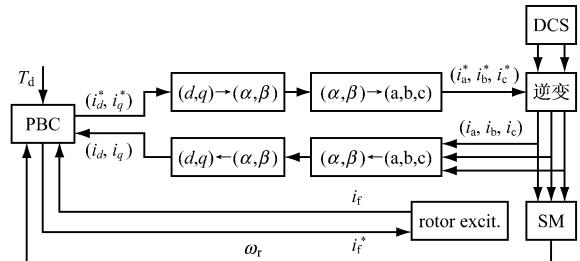


图 2 基于无源性控制器的电气传动系统结构

#### 4 仿真

仿真中, 考虑了负载转矩的 4 种情况:

- (1)  $T_L = 8$ : 恒值型负载;
- (2)  $T_L = 5 + 5\sin(10t)$ : 周期型负载;
- (3)  $T_L = \begin{cases} 5, & t \in [0, 1] \\ 8, & t \in [1, 2] \end{cases}$ : 阶跃型负载;
- (4)  $T_L = 3 + 3t$ : 斜坡型负载。

期望转矩由给定期望转速  $x_6 = 500 + 10 \times \sin(5t)$  生成, 取期望转子磁场幅值  $M = 5$ 。经多次仿真实验, 得到近似最优的反馈系数:  $k_1 = k_2 = 2.8 \times 10^3$ ,  $k_3 = 2.5 \times 10^3$ ,  $k_6 = 1.8 \times 10^3$ ,  $k_7 = 10^2$ ,  $k_8 = 5 \times 10^2$ 。

应用 Matlab/Simulink 仿真, 在以上各情形下的仿真结果如图 3~图 12 所示。在仿真曲线中, 符号  $M$  表示转子磁链幅值,  $T_L$ 、 $T_{L1}$  分别表示负载转矩及其估计值,  $T_e$ 、 $T_d$  分别表示电磁转矩和期望转矩,  $x_6$ 、 $x_{6d}$  分别表示实际转速和期望转速。

由图 3~图 12 可以看出, 对于负载转矩的不同情况, 控制器对期望转矩的跟踪性能都非常好, 具有很快的跟踪速度和很小的跟踪精度, 只要参数选择合适, 可以使静误差非常小。从而证明了这种控制器具有很高的控制性能和鲁棒性。由图 3~图 12 还可看出, 控制器对负载转矩的估计很好, 几乎没有静态误差, 对转子磁场矢量控制的结果也很好。在对期望转矩的跟踪控制上, 静态误差很小, 但是在过

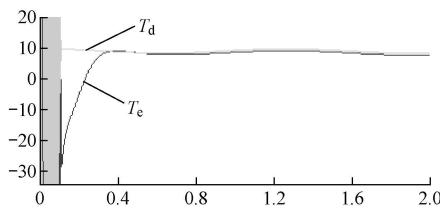


图 3 期望转矩跟踪曲线(恒值型负载)

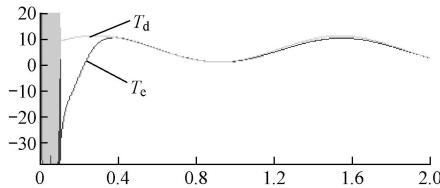


图 4 期望转矩跟踪曲线(周期性负载)

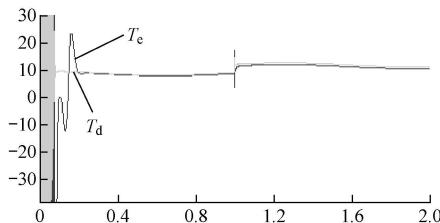


图 5 期望转矩跟踪曲线(阶跃型负载)

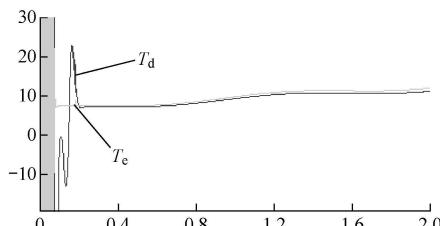


图 6 期望转矩跟踪曲线(斜坡型负载)

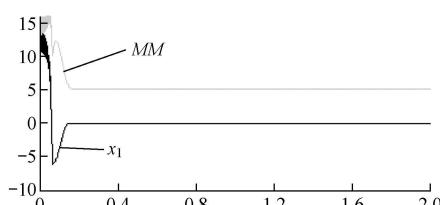


图 7 转子磁场控制曲线(包括仿真中的 4 种负载)

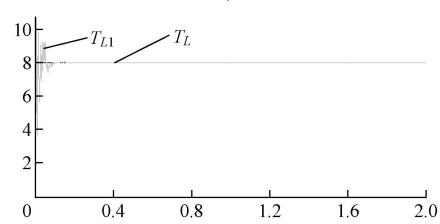


图 8 负载转矩估计曲线(恒值型负载)

渡过程中有较大幅度的振荡,这可能主要与初始值的设置有关,也可能受控制器系数非最优性的影响。

## 5 结语

同步电动机的无源性控制器可以用来实现对转速的跟踪控制和转子位置的跟踪控制,而且具有很

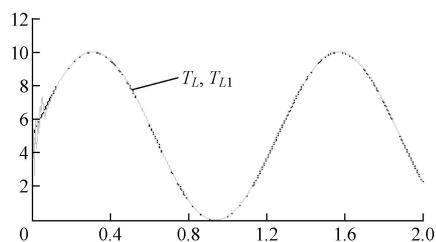


图 9 负载转矩估计曲线(周期型负载)

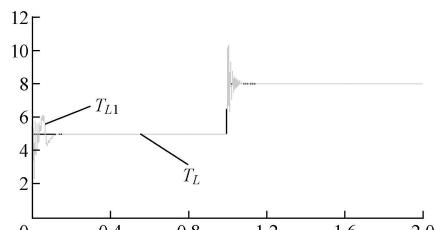


图 10 负载转矩估计曲线(阶跃型负载)

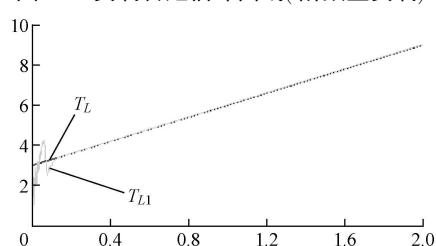


图 11 负载转矩估计曲线(斜坡型负载)

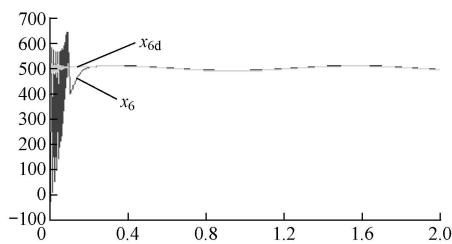


图 12 转速跟踪曲线(包括仿真中的 4 种负载)

高的控制性能;对于实际系统中逆变器的非线性效应,该无源性控制器同样可以保持高性能的控制效果和鲁棒特性,同时,该无源性控制器对于负载转矩也具有很高的鲁棒性能。另外,仿真实验还证明,基于转子磁场矢量控制方式的控制器可以很好地实现转速和位置的跟踪控制,具有很高的动态控制性能和鲁棒特性。

## 参考文献:

- [1] QIN Huashu, HONG Yiguang. Passivity, Stability and Optimality [J]. Control Theory and Application, 1994, 11(4), 421-427.
- [2] 陈伯时.电力拖动自动控制系统[M].2 版.北京:机械工业出版社,2003.
- [3] ROMEO O, ZHONG P J, HILL D J. Passivity-based Control of Nonlinear Systems: a Tutorial [C]// China Academic Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

文章编号: 1671- 251X( 2010) 11- 0067- 05

# 垂直运动永磁直线同步电动机的建模与控制仿真

张宗盛， 崔建明

(太原理工大学电气与动力工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 运用电动机统一理论及参照旋转电动机的数学建模方法并结合PMLSM的特点, 建立了PMLSM的数学模型。通过对Matlab/Simulink下旋转同步电动机模型的分析, 建立了基于Matlab/Simulink的通用PMLSM仿真模型, 可以利用它方便地进行垂直运动的PMLSM控制系统的仿真和分析。仿真结果证明, 该电动机模型能够较好地反映实际电动机的工作运行特性, 对于实际控制系统的设计制造具有很好的参考价值。

**关键词:** 永磁直线同步电动机; 建模; 控制; 数学模型; 仿真模型

**中图分类号:** TM341      **文献标识码:** A

Modeling and Control Simulation of Vertical Motion PMLSM

ZHANG Zongsheng, CUI Jianming

(School of Electrical and Dynamical Engineering of Taiyuan University of Technology,  
Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** A mathematical model of PMLSM was established on the basis of foundational motor theory, the method of establishing rotating motor's mathematical model and PMLSM's characteristics. Through analysis of rotating synchronous motor model in environment of Matlab/Simulink, an universal PMLSM simulation model based on Matlab/Simulink was established, and simulation and analysis of control system of vertical motion PMLSM can be conducted with the model. The simulation results indicated that the motor model can reflect practical motor's working characteristics and has high reference value for designing and manufacturing practical motor's control system.

**Key words:** PMLSM, modeling, control, mathematical model, simulation model

收稿日期: 2010- 07- 12

作者简介: 张宗盛(1984- ), 男, 山东潍坊人, 太原理工大学电力电子与电力传动专业在读硕士研究生, 研究方向为特种电动机控制。  
E-mail: zhangzongsheng714@163.com

## 0 引言

永磁直线同步电动机(PMLSM)具有永磁电动机高效、节能的特点, 同时具有直线电动机的直线运

- Proceedings of American Control Conference, 1997, Albuquerque 2633-2637.
- [4] 李伟. 感应电动机的非线性控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2002.
- [5] ZHU Guchuan, DESSAINT L A, AKHRIF O, et al. Speed Tracking Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor with State and Load Torque Observer[J]. IEEE Transactions on I. E., 2000, 47(2): 346-355.
- [6] 陈峰, 徐文立. 基于无源性的同步电动机控制器设计[J]. 电机与控制学报, 1998, 2(4): 217-220.
- [7] FATTAH H A A, LOPARO K A. Speed Control of Electrical Machines: Unknown Load Torque Case[J]. IEEE Transactions on A. C., 2001, 46(12): 1979-1983.
- [8] CECATI C, ROTONDALE N. Torque and Speed Regulation of Induction Motors Using the Passivity Theory Approach[J]. IEEE Transactions on I. E., 1999, 46(1): 119-127.