

Research on Parameter Identification and PI Self-tuning of PMSM

Gao Junli

Faculty of Automation, Guangdong Univ. of Technology
Guang Zhou, China
gaojunli@gdut.edu.cn

Abstract—Permanent magnet synchronous motor (PMSM) as a multi-variable, nonlinear, time varying, strong coupling controlled-plant, the variation of the motor parameters has significant impact on the dynamic and static performance of the system. The dynamic parameters of the motor and load inertia will vary because of the change of the working conditions for the vector control of PMSM, but the traditional PI regulator is incapable of self-tuning its parameters. The subject presents using robust adaptive sliding mode variable structure (SMVS) motor parameter identification, model reference adaptive motor moment of inertia identification, and real-time self-tuning the PI regulator parameters to improve the parameter identification efficiency and accuracy of PMSM and enhance the adaptive servo control ability and robustness of PMSM.

Keywords- PMSM; parameter identification; SMVS; MRAS; PI self-tuning;

I. 引言

永磁同步电机(PMSM)作为一个多变量、非线性、时变、强耦合的控制对象，其参数变化对系统的动/静态性能有着显著的影响。对于永磁同步电机的参数辨识算法，卡尔曼滤波法的 P、Q 矩阵难以确定，最小二乘法算法较为复杂，文献[1]采用模型参考自适应算法虽然能辨识出电机的参数，但其抗扰能力和鲁棒性稍差。在 PMSM 的矢量控制过程中，由于工况的改变，电机的动态参数、负载转动惯量也会随之改变，而传统的 PI 调节器因不具备参数自校正能力而影响到 PMSM 的伺服驱动性能。为此，本课题采用鲁棒性强的自适应滑模变结构 (SMVS) PMSM 参数辨识方法，模型参考自适应 (MRAS) 方法在线辨识 PMSM 的转动惯量，并实时自校正 PI 调节器的参数，以提高电机参数的辨识效率和精度，以及 PMSM 伺服控制的自适应能力和鲁棒性。

II. PMSM 参数辨识

A. 永磁同步电机参数辨识系统架构

基于转子磁场定向矢量控制的 PMSM 控制平台如图 1 所示，采用内外环相级联的电流/速度双闭环结构。主要包括：基于 SVPWM 的电压逆变器，电流/速度 PI 调节器，速度 PI 调节器参数自校正环节，基于 SMVS 和 MRAS 的 PMSM 参数辨识环节，定子电压/电流、转子转速检测环节等。通过检测母线电压和 PWM 的占空比实现

Zhang Yingfan

Faculty of Automation, Guangdong Univ. of Technology
Guang Zhou, China
dqzhuitao@126.com

定子电压重构，作为 PMSM 参数辨识环节的输入量。基于该平台的主要研究内容如下：1) 基于抗干扰能力强、鲁棒性强的自适应滑模变结构控制算法实现电机定子电感、定子电阻和永磁体磁链参数的在线辨识；2) 用离散的模型参考自适应算法实现转动惯量的在线辨识；3) 借助所辨识出的相关参数实现速度 PI 调节器参数的自校正。

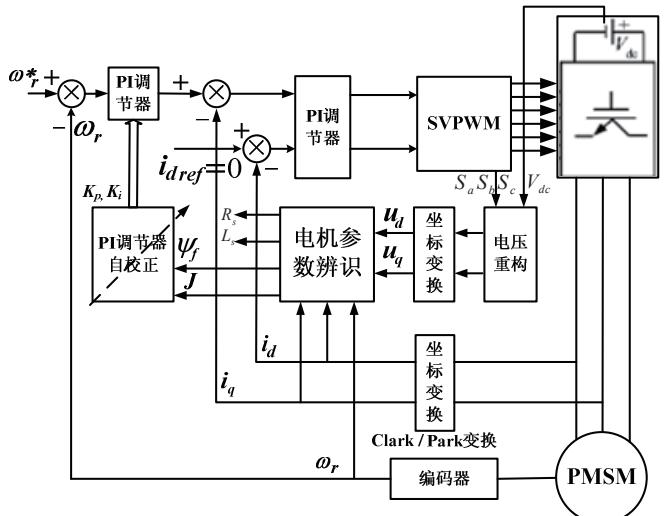


图 1 PMSM 参数辨识和自适应控制结构图

B. 基于自适应滑模变结构的 PMSM 参数辨识

滑模变结构控制出现在 20 世纪 50 年代，可用来设计系统的动态观测器，对参数变化和外部扰动具有很强的鲁棒性。利用自适应滑模变结构方法对 PMSM 参数进行在线辨识。基于自适应滑模变结构 (SMVS) 的 PMSM 参数辨识框图如图 2 所示。在同步旋转的 d、q 坐标系下，通过检测 PMSM 的定子电压、电流和转子转速信号，利用 d 轴和 q 轴的电压、电流及其偏差，借助自适应滑模变结构理论和 Lyapunov 函数，建立参数辨识模型并推导出待辨识参数的自适应律，从而保证特定条件下系统的稳定性和参数的收敛性。该方法仅利用 PMSM 的定子电压、电流和转速信号，可减少其它干扰对 PMSM 参数辨识结果的影响，提高 PMSM 参数辨识的准确性，理论推导如下：

PMSM 在同步旋转的 d、q 坐标系下的状态方程：

$$\begin{pmatrix} \frac{di_q}{dt} \\ \frac{di_d}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\omega_r \\ \omega_r & -\frac{R_s}{L_s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{i}_q \\ \hat{i}_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_q \\ u_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\frac{\psi_f}{L_s} \omega_r \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

令 $a=R_s/L_s$, $b=1/L_s$, $c=\psi_f/L_s$

$$\text{则 } A = \begin{pmatrix} -a & -\omega_r \\ \omega_r & -a \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} b & 0 \\ 0 & b \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} -\omega_r c \\ 0 \end{pmatrix}$$

PMSM 状态方程可简化为:

$$\frac{d \hat{i}_s}{dt} = A \hat{i}_s + B \hat{u}_s + C \quad (2)$$

基于式(2), 可将观测方程设定为:

$$\frac{d \hat{i}_s}{dt} = \hat{A} \hat{i}_s + \hat{B} \hat{u}_s + \hat{C} - K \operatorname{sgn}(\hat{i}_s - \hat{i}_s) - \Psi \quad (3)$$

式(3)中的 K 和 Ψ 的选择将由稳定性确定

$$\text{令 } \hat{a} = \hat{R}_s / \hat{L}_s \quad (4)$$

$$\hat{b} = 1 / \hat{L}_s \quad (5)$$

$$\hat{c} = \hat{\psi}_f / \hat{L}_s \quad (6)$$

则:

$$\hat{A} = \begin{pmatrix} -\hat{a} & -\omega_r \\ \omega_r & -\hat{a} \end{pmatrix}, \quad \hat{B} = \begin{pmatrix} \hat{b} & 0 \\ 0 & \hat{b} \end{pmatrix}, \quad \hat{C} = \begin{pmatrix} -\omega_r \hat{c} \\ 0 \end{pmatrix}$$

式(2)减式(3), 得到动态误差:

$$\begin{aligned} \dot{s} = \frac{d \hat{i}_s}{dt} &= (\hat{A} \hat{i}_s - A \hat{i}_s) + (\hat{B} \hat{u}_s - B \hat{u}_s) \\ &\quad + (\hat{C} - C) - K \operatorname{sgn}(\hat{i}_s - i_s) - \Psi \end{aligned} \quad (7)$$

选择 Lyapunov 函数为:

$$V = \frac{1}{2} s^T s + \frac{(\hat{a} - a)^2}{2} + \frac{(\hat{b} - b)^2}{2} + \frac{(\hat{c} - c)^2}{2}$$

为保证滑模运动的渐进稳定性, 应满足:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T \dot{s} + (\hat{a} - a) \frac{d \hat{a}}{dt} + (\hat{b} - b) \frac{d \hat{b}}{dt} \\ &\quad + (\hat{c} - c) \frac{d \hat{c}}{dt} \leq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

将式(7)代入式(8), 则有:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s^T [(\hat{A} - A) \hat{i}_s + A(\hat{i}_s - i_s) + (\hat{B} \hat{u}_s - B \hat{u}_s) \\ &\quad + \omega_r (\hat{c} - c) - K \operatorname{sgn}(\hat{i}_s - i_s) - \Psi] + \Delta a \frac{d \hat{a}}{dt} \\ &\quad + \Delta b \frac{d \hat{b}}{dt} + \Delta c \frac{d \hat{c}}{dt} \leq 0 \end{aligned}$$

于是可得:

$$\dot{V} = s^T [A(\hat{i}_s - i_s) - K \operatorname{sgn}(\hat{i}_s - i_s) - \Psi] < 0 \quad (9)$$

$$s^T [(\hat{A} - A) \hat{i}_s] + \Delta a \frac{d \hat{a}}{dt} = 0 \quad (10)$$

$$s^T [(\hat{B} - B) \hat{u}_s] + \Delta b \frac{d \hat{b}}{dt} = 0 \quad (11)$$

$$s^T (\hat{c} - c) + \Delta c \frac{d \hat{c}}{dt} = 0 \quad (12)$$

取 $K=10$, $\Psi=0$, 满足式子(9)成立

由式(10)可得:

$$\frac{d \hat{a}}{dt} = s_1 \hat{i}_d + s_2 \hat{i}_q = (\hat{i}_d - i_d) \hat{i}_d + (\hat{i}_q - i_q) \hat{i}_q$$

$$\hat{a} = -\left(K_p + \frac{K_i}{p}\right) \left(\hat{i}_d e_d + \hat{i}_q e_q\right) + \hat{a}(0)$$

同理由式子(11), (12)可得:

$$\hat{b} = \left(K_p + \frac{K_i}{p}\right) (u_d e_d + u_q e_q) + \hat{b}(0)$$

$$\hat{c} = -\left(K_p + \frac{K_i}{p}\right) \omega_r e_q + \hat{c}(0)$$

由式(4)~(6)得电动机参数 \hat{R}_s 、 \hat{L}_s 、 $\hat{\psi}_f$

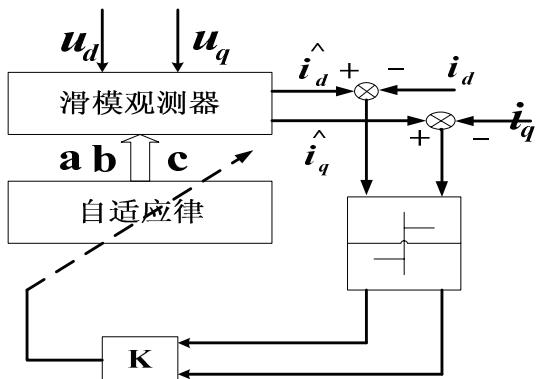


图 2 PMSM 参数辨识自适应滑模变结构框图

至此, PMSM 参数的辨识只与定子电压/电流、转子速度的检测结果有关, 只需提高硬件检测的精度, 就可以实现 PMSM 参数的准确观测。

C. 基于模型参考自适应的 PMSM 转动惯量辨识

PMSM 转动惯量的辨识结构图如图 3 所示, 根据电机的机械运动方程, 以超稳定与正性动态系统理论为基础, 采用模型参考自适应方法, 构建参数已知的参考模型和参数未知的可调模型, 利用两种模型输出量的误差和自适应机构实时调节可调模型的参数, 从而实现可调模型的输出以跟踪控制对象的输入。

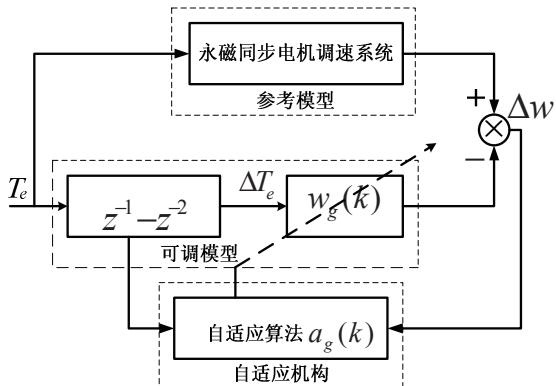


图 3 转动惯量辨识结构图

机械运动方程离散化：

$$T_e(t-1) - T_l(t-1) = J(t-1) \frac{\omega_m(t) - \omega_m(t-1)}{T}$$

此时参考模型的离散方程

$$\omega_m(k) = 2\omega_m(k-1) - \omega_m(k-2) + a\Delta T_e(k-1)$$

其中 $a = T/J$

$$\Delta T_e(k-1) = T_e(k-1) - T_e(k-2)$$

可调模型的离散方程为：

$$\omega_g(k) = 2\omega_m(k-1) - \omega_m(k-2) + \hat{a}(k-1)\Delta T_e(k-1)$$

其中 $\hat{a} = T / \hat{J}$ ， $\omega_g(k)$ 为速度估计量

基于 Popov 超稳定性理论辨识出 \hat{a} 的自适应率:

$$\hat{a}(k) = \hat{a}(k-1) + \beta \frac{\Delta T_e(k-1)}{1 + \beta \Delta T_e(k-1)^2} \Delta \omega_m(k)$$

其中 $\Delta\omega_m(k) = \omega_m(k) - \omega_g(k)$

最后由 $\hat{a} = T / \hat{J}$ 得出 \hat{J}

D. 速度PI调节器参数自校正

文献[4]给出了伺服系统中速度调节器比例系数 k_p 、积分系数 k_i 与系统的转动惯量和永磁体 ψ_f 之间的关系:

$$k_p = \frac{J}{3p_n^2\psi_f\tau_i}, \quad k_i = \frac{J}{12p_n^2\psi_f\tau_i^2}$$

由此可以得出：借助已经辨识出的转动惯量 J 和永磁体 ψ_f 调整 PI 控制器的比例增益 k_p 和积分增益 k_i ，实现速度 PI 调节器参数的在线自校正，从而保证在转动惯量发生剧烈变化时使伺服系统仍然具有良好的动态和静态性能。

III. 系统仿真

系统仿真样机参数：额定功率 P_N ：1000W，定子电阻 R_s ：2.875 ohm，定子电感 L_s 8.5e-3 H，永磁体磁链 ψ_f ：0.175 W_b，转动惯量 J ：0.0008 kgm²，基于 Matlab Simulink 的系统仿真结构图如图 4 所示。

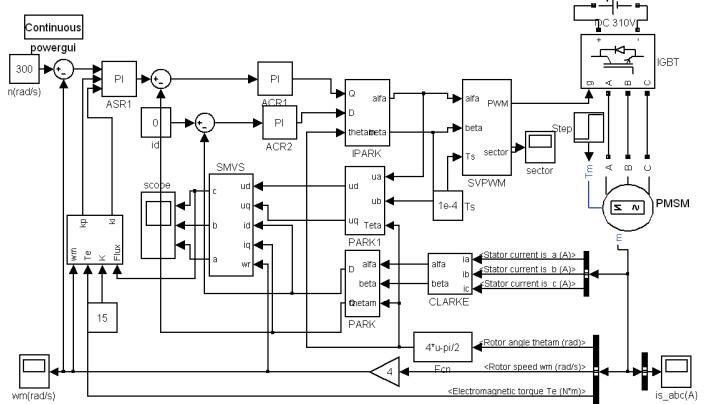


图 4 PMSM 参数辨识和自适应控制系统仿真图

A. PMSM 参数辨识

采用 MRAS 和 SMVS 两种方法对 PMSM 定子电阻 R_s 、定子电感 L_s 、永磁体磁链 ψ_f 进行计算机仿真所得出的辨识结果与误差比较如表 1 所示。其中由于 SMVS 方法的自适应性和强鲁棒性使得所辨识的结果更接近真实值，误差也较小。用离散的 MRAS 方法实现 PMSM 转动惯量的在线辨识，结果显示永磁同步电机转动惯量辨识值可收敛于某一值，从而验证了用离散模型参考自适应辨识转动惯量的可行性和正确性。

表 1 基于 MRAS 和 SMVC 的 PMSM 参数辨识结果

辨识方法		MRAS		SMVS	
		辨识结果	误差	辨识结果	误差
$R_s (\Omega)$	2.875	2.958	2.86 %	2.83	1.6%
$L_s (H)$	8.5e-3	7.68 e-3	9.7%	8.2 e-3	3.5%
$\psi_f (W_b)$	0.175	0.166	5.17 %	0.17	2.86 %
$J (kgm^2)$	0.0008	0.00078	2.5%		

图 5 则为 PMSM 永磁体（磁链）、定子电感、定子电阻、转动惯量等参数辨识的计算机仿真曲线图。至此，PMSM 相关参数的高效在线辨识为图 1 所示的基于 SVPWM 的 PMSM 双闭环控制系统的速度 PI 调节器参数自校正奠定了基础。

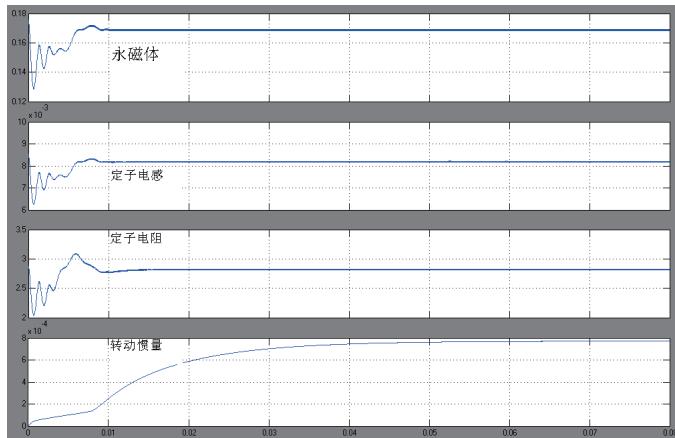


图 5 PMSM 参数辨识仿真结果

B. 速度 PI 调节器参数自校正

基于 SVPWM 的 PMSM 双闭环控制系统的速度响应曲线如图 6 所示。其中，曲线 1 是采用基于固定参数的传统速度 PI 调节器的速度响应曲线；曲线 2 是本课题所采用

的基于速度 PI 调节器自校正控制系统的速度响应曲线。由此得出，本课题所设计的 PMSM 伺服控制系统在转动惯量有较大变化时，系统不但没有超调，而且具有较强的抗扰动能力和鲁棒稳定性。

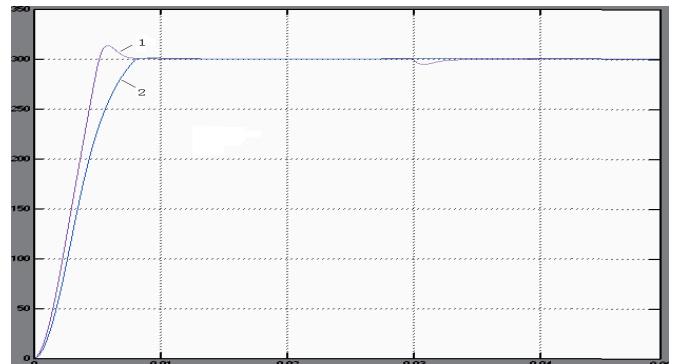


图 6 PMSM 伺服控制系统速度响应曲线

IV. 结论

针对现行 PMSM 参数辨识方法所存在的缺陷，提出了一种基于自适应滑模变结构参数辨识方法。该方法基于 Lyapunov 函数设计自适应率，其鲁棒性保证了系统参数的收敛性和稳定性。基于离散的模型参考自适应实现电机转动惯量的在线辨识。利用参数辨识结果对速度 PI 调节器参数进行自校正，有效提高了 PMSM 伺服控制系统的动/静态性能。

致谢

本课题的研究得到广东省“211 工程”（粤发改 431）；美国德州仪器公司（TI）2009 年创新基金项目的大力支持，课题组所有成员在此表示衷心感谢！

REFERENCES

- [1] An Quntao, Sun Li, “On-line parameter identification for vector controlled PMSM drives using adaptive algorithm,” IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference(VPPC), pp.1-6, Harbin: China, January 2008
- [2] Wang Chengyuan, Modern control technology of motor, China machine press, May 2006
- [3] Liu Jinkun, Matlab simulation for sliding mode control, Tsinghua university press, October 2005 (In Chinese)
- [4] Zhang Haoming and Sun Yukun, “Reasearch on parameter identification and pi self-adjusting of AC speed control system for the paramament magnet motor,” China Rural Water and Hydropower, vol. 5, pp. 121-123, 2008 (In Chinese)
- [5] Shang Zhe ,Zhao Rongxiang “research on sensorless control method of PMSM Based on an adaptive sliding mode observer,” Proceedings of the CSEE, vol. 27, pp. 23-27, January 2007