

基于稳态欠秩方程的永磁同步电机 多参数并行辨识^{*}

储建华¹, 于霜¹, 魏海峰²

(1. 苏州工业职业技术学院 机电工程系, 江苏 苏州 215104;

2. 江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 针对永磁同步电机(PMSM)运行过程中电机参数受运行工况影响实时摄动的问题,提出一种基于稳态欠秩方程的电机多参数并行在线辨识算法。对PMSM稳定状态方程组的系数矩阵进行分析,指出PMSM稳定状态方程组为秩数为2的包含3个未知参数的欠秩方程。基于Lyapunov稳定性理论及Popov超稳定性理论分别设计了PMSM模型参考自适应多参数并行辨识器,通过设计合理的自适应律使得参考自适应系统渐进稳定,对电机定子电阻、电感及转子磁链进行相应辨识。试验辨识结果验证了所提辨识算法的有效性和实用性。

关键词: 永磁同步电机; 稳态欠秩方程; Lyapunov; Popov; 模型参考自适应

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)01-0057-07

Multi-Parameter Parallel Identification of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Rank Deficient Steady Equation^{*}

CHU Jianhua¹, Yu Shuang¹, WEI Haifeng²

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Suzhou Institute of Industrial Technology,
Suzhou 215104, China;

2. School of Electrical and Information, Jiangsu University of Science and Technology,
Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Aiming at the problem of real-time perturbation of the motor parameters affected by the operating conditions during the operation of the permanent magnet synchronous motor (PMSM), a multi-parameter parallel online identification algorithm for PMSM based on rank deficient steady equation was proposed. The coefficient matrix of the steady state equation of PMSM was analyzed, and the steady state equation of PMSM was the rank deficient equation with the rank number of two and three unknown parameters was pointed out. Based on the theory of Lyapunov stability and Popov super stability theory, the PMSM model reference adaptive multi-parameter parallel identifiers were designed. By designing reasonable adaptive law, the reference adaptive system is gradually stabilized, and the motor stator resistance, inductance and rotor flux were identified correspondingly. The experimental results verified the validity and practicability of the proposed algorithm.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); rank deficient steady equation; Lyapunov; Popov; model reference adaptive

^{*} 基金项目: 江苏省自然科学基金面上项目(BK20161229);江苏省高校自然科学研究面上项目(16KJB510046)

作者简介: 储建华(1982—),博士,研究方向为微特电机与伺服控制技术。

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 作为伺服系统的执行部件, 为使其精准地控制位置, 需获取精确的伺服驱动器控制参数, 而控制器参数的给定直接与其执行电机参数相关, 包括电气参数如定子电阻、电感及转子磁链等。考虑到电机在运行过程中不同工况变化会使得其参数发生实时摄动, 因此有必要对其参数进行在线辨识^[1-2]。

PMSM 参数在线辨识, 包括最小二乘法^[3]、卡尔曼滤波法^[4]及人工智能方法^[5]等。张兴华等人^[6]提出了一种内置式永磁同步电机自适应反步控制方法, 能够根据自适应参数估计器实时估计出负载转矩和定子电阻, 并对控制器输出进行动态校正。文献[7]针对 PMSM 多参数辨识问题, 给出一种基于免疫协同微粒群进化算法的电机多参数辨识方法。文献[8]针对 3 台异步电机和 3 台逆变器组成的三电机同步系统, 提出了局部模型网络磁链辨识方法, 将电机参数变化视为干扰项来处理, 解决了因电机参数变动影响磁链准确观测的难题。刘朝华等^[9]提出一种双模态自适应小波粒子群的 PMSM 多参数识别与温度检测方法, 能够有效地辨识电机电阻、 dq 轴电感与转子磁链等参数。文献[10]设计了一种基于非线性坐标变换后能观测规范形的高增益观测器, 利用微分几何理论分析了转子磁链定向系内非线性局部弱能观性及全局能观性。文献[11]针对电机系统运行过程中电机参数变化问题, 采用粒子群优化算法在线调节子模型权值, 以改善逆模型失配造成解耦控制性能下降的问题。文献[12]提出一种重置自适应转速观测器对转子磁链进行观测, 并可同时观测得到电机转速。文献[13]提出一种基于高增益观测算法的感应电机磁链观测器, 既不需要满足状态能观的条件又计算量小, 通过调节增益能够达到任意精度的误差。文献[14]将递推最小二乘法与模型参考自适应法结合, 实现了不同运行工况下的转子电阻在线辨识。

本文给出一种基于稳态欠秩方程的电机多参数并行在线辨识算法, 对稳态下的 PMSM 状态方程的欠秩性进行分析, 基于 Lyapunov 稳定性理论以及 Popov 超稳定性理论设计了 PMSM 模型参考

自适应多参数并行辨识器, 通过设计合理的自适应律对电机定子电阻、电感及转子磁链进行相应辨识。以 1 台 1.1 kW PMSM 为试验对象, 对本文提出的辨识算法进行合理验证, 考虑电机外部负载干扰对辨识效果的影响, 给定空载和额定负载两种典型工况。试验结果验证了本文提出算法对电机内部电气参数辨识的高有效性。

1 PMSM 稳态欠秩方程分析

根据 PMSM 数学模型, 可得 dq 旋转坐标系下的电机状态方程为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}\omega i_q + \frac{u_d}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L_q}i_q - \frac{L_d}{L_q}\omega i_d + \frac{u_q}{L_q} - \frac{\psi_m}{L_q}\omega \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_d, i_q, u_d, u_q —— dq 轴上的电流和电压分量;

L_d, L_q —— dq 轴定子电感, 对于表贴式电机

$$L_d = L_q;$$

R ——定子电阻;

ω ——电机转子电角速度;

ψ_m ——永磁体磁链。

电机稳态运行时, 式(1)可离散为

$$\begin{cases} u_d(k) = Ri_d(k) - L_q\omega(k)i_q(k) \\ u_q(k) = Ri_q(k) + L_d\omega(k)i_d(k) + \psi_m\omega(k) \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知, 稳定状态下的 PMSM 状态方程方程组秩数为 2, 待辨识的参数包含 dq 轴定子电感、定子电阻及转子磁链 3 个变量。控制方法选用 $i_d=0$ 的方式时, 式(2)可简化为

$$\begin{cases} u_d(k) = -L_q\omega(k)i_q(k) \\ u_q(k) = Ri_q(k) + \psi_m\omega(k) \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知, 选用 $i_d=0$ 的控制方式时, d 轴上的方程只包含 q 轴电感参数, q 轴上的方程只包含定子电阻和转子磁链参数。因此选用 $i_d=0$ 的控制方式时, 其状态方程秩数小于求解未知参数个数, 即无法根据式(3)求解出定子电感、电阻及转子磁链。

2 基于 Lyapunov 稳定性的模型参考自适应多参数辨识

将式(1)变换为

$$\dot{X} = AX + Br + Cl \quad (4)$$

其中: $X = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}$, $A = \begin{bmatrix} -\alpha & \omega \\ \omega & -\alpha \end{bmatrix}$, $\alpha = \frac{R}{L_0}$, $L_0 = L_d =$

$$L_q, B = \frac{1}{L_0}, C = -\frac{\psi_m}{L_0}, r = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}, l = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix}。$$

将式(4)表示为可变模型:

$$\dot{\hat{X}} = \hat{A}\hat{X} + \hat{B}r + \hat{C}\hat{L} \quad (5)$$

其中: $\hat{A} = \begin{bmatrix} -\hat{\alpha} & \omega \\ \omega & -\hat{\alpha} \end{bmatrix}$, $\hat{\alpha} = \frac{\hat{R}}{\hat{L}_0}$, $\hat{B} = \frac{1}{\hat{L}_0}$, $\hat{C} = -\frac{\hat{\psi}_m}{\hat{L}_0}$ 。

图1所示为基于模型参考自适应的PMSM多参数在线辨识系统结构框图。 dq 轴电压 u_d, u_q 作为参考模型和可变模型的输入,将参考模型和可变模型的输出电流进行比较,将比较误差 e 反馈给相应的自适应率算法调节可调模型,使得可调模型的待辨识参数逐渐收敛于参考模型。

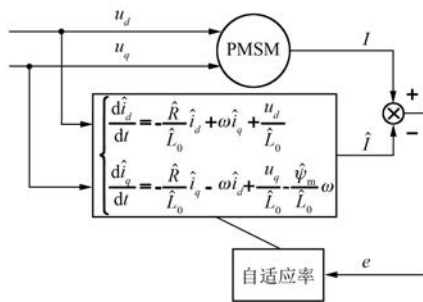


图1 PMSM模型参考自适应多参数辨识系统

假设比较误差为 $e = X - \hat{X} = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \end{bmatrix}$, 图1模型

参考自适应辨识系统可表示为

$$\begin{aligned} \dot{e} &= AX - \hat{A}\hat{X} + Br - \hat{B}r + Cl - \hat{C}\hat{L} = \\ &AX - \hat{A}\hat{X} + A\hat{X} - \hat{A}\hat{X} + Br - \hat{B}r + Cl - \hat{C}\hat{L} = \\ &Ae + (A - \hat{A})\hat{X} + (B - \hat{B})r + h \end{aligned} \quad (6)$$

令 $b = B - \hat{B} = \left(\frac{1}{L_0} - \frac{1}{\hat{L}_0} \right)$, $aI = A - \hat{A} = (\alpha - \hat{\alpha})I$, $h = (C - \hat{C})l$, $g_2 = \frac{\hat{\psi}_m}{\hat{L}_0} - \frac{\psi_m}{L_0} = C - \hat{C}$, $\varphi^T = [a \quad b \quad g_2]$, $s = [\hat{X} \quad r \quad l]^T$, 则式(6)可转化为

$$\dot{e} = Ae + \varphi^T s \quad (7)$$

设计 Lyapunov 函数为

$$V(X = e, t) = \frac{1}{2}(e^T P e + \varphi^T \Gamma \varphi) \quad (8)$$

式(8)为正定 Lyapunov 函数, 工作点 $e = \varphi^T =$

0 为自适应系统的平衡点, 其中 $P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = P^T$,

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \Gamma^T。根据 Lyapunov 稳定性理论,$$

自适应系统渐进稳定的要求为

- (1) $V(X, t)$ 正定;
- (2) $\dot{V}(X, t)$ 负定;
- (3) $|X| \rightarrow \infty$ 时, $V(X, t) \rightarrow \infty$ 。

当系统满足上述3个条件时, 其在平衡点 ($X = e = 0$) 处为大范围渐进稳定。根据 $V(X, t)$ 的定义可知系统满足条件(1)和条件(3), 条件(2)通过设计合理的自适应率来满足。

将式(8)求导可得

$$\dot{V}(X, t) = \frac{1}{2}(\dot{e}^T P e + e^T P \dot{e} + \dot{\varphi}^T \Gamma \varphi + \varphi^T \Gamma \dot{\varphi}) \quad (9)$$

其中: $\dot{e}^T P e = e^T A^T P e + s^T \varphi P e$, $e^T P \dot{e} = e^T P (Ae) + e^T P (\varphi^T s)$, $\dot{e}^T P e + e^T P \dot{e} = e^T (PA + A^T P)e + s^T \varphi P e + e^T P (\varphi^T s)$, $\dot{\varphi}^T \Gamma \varphi + \varphi^T \Gamma \dot{\varphi} = 2(a\dot{a} + b\dot{b} + g_2\dot{g}_2)$ 。

即

$$\begin{aligned} \dot{V}(X, t) &= \frac{1}{2}e^T (PA + A^T P)e + \\ &\frac{1}{2}[s^T \varphi P e + e^T P (\varphi^T s)] + \\ &a\dot{a} + b\dot{b} + g_2\dot{g}_2 \end{aligned} \quad (10)$$

其中: $PA + A^T P = -Q = \begin{bmatrix} -2\alpha & 0 \\ 0 & -2\alpha \end{bmatrix}$ 。

由于 $\alpha = \frac{R}{L_0} > 0$, 可得 $\frac{1}{2}e^T (PA + A^T P)e$ 负定,

进一步得

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2}[s^T \varphi P e + e^T P (\varphi^T s)] = \\ &a\hat{i}_d(i_d - \hat{i}_d) + a\hat{i}_q(i_q - \hat{i}_q) + \\ &b u_d(i_d - \hat{i}_d) + (b u_q + \omega g_2)(i_q - \hat{i}_q) \end{aligned} \quad (11)$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V}(X, t) &= \frac{1}{2}e^T (PA + A^T P)e + a\hat{i}_d(i_d - \hat{i}_d) + \\ &a\hat{i}_q(i_q - \hat{i}_q) + b u_d(i_d - \hat{i}_d) + \\ &(b u_q + \omega g_2)(i_q - \hat{i}_q) + a\dot{a} + b\dot{b} + g_2\dot{g}_2 = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & a[\hat{i}_d(i_d - \hat{i}_d)] + \hat{i}_q[(i_q - \hat{i}_q) + \dot{a}] + \\ & b[u_d(i_d - \hat{i}_d) + u_q(i_q - \hat{i}_q) + \dot{b}] + \\ & g_2[\omega(i_q - \hat{i}_q) + \dot{g}_2] + \frac{1}{2}e^T(PA + A^TP)e \end{aligned} \quad (12)$$

为使得 $\dot{V}(X, t)$ 满足条件(2), 则有

$$\begin{cases} a[\hat{i}_d(i_d - \hat{i}_d)] + \hat{i}_q[(i_q - \hat{i}_q) + \dot{a}] = 0 \\ b[u_d(i_d - \hat{i}_d) + u_q(i_q - \hat{i}_q) + \dot{b}] = 0 \\ \omega(i_q - \hat{i}_q) + \dot{g}_2 = 0 \end{cases} \quad (13)$$

由此可得定子电阻、电感及转子磁链辨识的自适应律为

$$\begin{aligned} a &= \hat{\alpha} - \alpha = - \int_0^t [\hat{i}_d(i_d - \hat{i}_d) + \hat{i}_q(i_q - \hat{i}_q)] dt \\ \frac{\hat{R}}{\hat{L}_0} &= \hat{\alpha} = \alpha - \int_0^t [\hat{i}_d(i_d - \hat{i}_d) + \hat{i}_q(i_q - \hat{i}_q)] dt \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} b &= \frac{1}{L_0} - \frac{1}{\hat{L}_0} = - \int_0^t [u_d(i_d - \hat{i}_d) + u_q(i_q - \hat{i}_q)] dt \\ \frac{1}{\hat{L}_0} &= \frac{1}{L_0} + \int_0^t [u_d(i_d - \hat{i}_d) + u_q(i_q - \hat{i}_q)] dt \end{aligned} \quad (15)$$

$$\hat{\psi}_m = \hat{L}_0 \left[\frac{\psi_m}{L_0} - \int_0^t \omega(i_q - \hat{i}_q) dt \right] \quad (16)$$

3 基于 Popov 超稳定的模型参考自适应多参数辨识

将误差状态方程(7)转化为前向线性定常模块:

$$\begin{cases} \dot{e} = Ae + I(-\omega) \\ Y = De \end{cases} \quad (17)$$

其中: $I(-\omega) = (A - \hat{A})\hat{X} + (B - \hat{B})U + (C - \hat{C})G$, $B - \hat{B} = \left(\frac{1}{L_0} - \frac{1}{\hat{L}_0}\right)$, $C - \hat{C} = \left(\frac{\hat{\psi}_m}{\hat{L}_0} - \frac{\psi_m}{L_0}\right)$, $G = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix}$, $U = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}$ 。

Popov 不等式标准型式为

$$\eta(t_0, t_1) = \int_{t_0}^{t_1} w^T y dt \geq -\gamma^2 \quad (18)$$

结合式(17)和式(18), 非线性时变反馈模块需满足:

$$\eta(0, t_1) = \int_0^{t_1} w^T y dt = \int_0^{t_1} w^T (De) dt \geq -\gamma^2 \quad (19)$$

采用正实引理确保前向线性模块的正实性:

(1) 对于一个线性定常多变量系统

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Ju \end{cases} \quad (20)$$

其中: (A, B) 完全可控, (A, C) 完全可观。

系统传递函数表示为

$$H(s) = J + C(sI - A)^{-1}B \quad (21)$$

(2) 若存在一个对称正定矩阵 P , 以及矩阵 K 和 L 满足以下条件, 则系统式(21)正实。

$$\begin{cases} PA + A^TP = -LL^T \\ B^TP + K^TL^T = C \\ K^TK = J + J^T \end{cases} \quad (22)$$

对于系统式(17), 上述条件可简化为

$$\begin{cases} PA + A^TP = -Q \\ L^TP = D \end{cases} \quad (23)$$

式中: Q ——对称正定矩阵。

式(17)对应的传递函数矩阵为

$$H(s) = D(sI - A)^{-1}I \quad (24)$$

假设 $P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 将其代入式(23)可得

$$\begin{cases} PA + A^TP = -Q \\ L^TP = D = I \end{cases} \quad (25)$$

由式(25)可得线性补偿矩阵 D, Q 为对称正定矩阵, (A, I) 完全能控, (A, D) 完全可观。系统传递函数式(24)为严格正实传递函数, 前向线性定常模块同样严格正实。

将式(19)进行分解, 可得

$$\begin{aligned} \eta(0, t_1) &= \int_0^{t_1} w^T y dt = \int_0^{t_1} w^T (De) dt = \\ &= \int_0^{t_1} w^T e dt = \int_0^{t_1} e^T w dt = - \int_0^{t_1} e^T [(A - \hat{A})\hat{X} + \\ &+ (B - \hat{B})U + (C - \hat{C})G] dt \geq -\gamma^2 \end{aligned} \quad (26)$$

即

$$\begin{aligned} \eta(0, t_1) &= - \int_0^{t_1} e^T (A - \hat{A})\hat{X} dt - \int_0^{t_1} e^T (B - \hat{B})U dt - \\ &= - \int_0^{t_1} e^T (C - \hat{C})G dt \geq -\gamma_1^2 - \gamma_2^2 - \gamma_3^2 = -\gamma^2 \end{aligned} \quad (27)$$

令

$$\begin{cases} \eta_1(0, t_1) = \int_0^{t_1} e^T (\hat{A} - A) \hat{X} dt \geq -\gamma_1^2 \\ \eta_2(0, t_1) = \int_0^{t_1} e^T (\hat{B} - B) U dt \geq -\gamma_2^2 \\ \eta_3(0, t_1) = \int_0^{t_1} e^T (\hat{C} - C) G dt \geq -\gamma_3^2 \end{cases} \quad (28)$$

根据式(28) $\eta_1(0, t_1)$ 表达式可得

$$\eta_1(0, t_1) = \int_0^{t_1} e^T (\hat{A} - A) \hat{X} dt = \int_0^{t_1} (e_1 \hat{X} + e_2 \hat{X}_2) \left(\frac{R}{L_0} - \frac{\hat{R}}{\hat{L}_0} \right) dt \geq -\gamma_1^2 \quad (29)$$

以 PI 形式设置相应的自适应率为

$$-\frac{\hat{R}}{\hat{L}_0} = -\frac{R}{L_0} + \int_0^t [G_1(\tau) d\tau + G_2(\tau)] dt \quad (30)$$

将式(29)代入式(30)得

$$\begin{aligned} \eta_1(0, t_1) &= \int_0^{t_1} (e_1 \hat{X}_1 + e_2 \hat{X}_2) \left[\frac{R}{L_0} - \frac{R}{L_0} + \int_0^t G(\tau) d\tau + G_2(\tau) \right] dt = \\ &= \int_0^{t_1} (e_1 \hat{X}_1 + e_2 \hat{X}_2) \left[\int_0^t G_1(\tau) d\tau + G_2(\tau) \right] dt \geq -\gamma_1^2 \end{aligned} \quad (31)$$

将式(31)分解成两部分:

$$\begin{cases} \eta_{11}(0, t_1) = \int_0^{t_1} (e_1 \hat{X}_1 + e_2 \hat{X}_2) \left[\int_0^t G_1(\tau) d\tau \right] dt \geq -\gamma_{11}^2 \\ \eta_{12}(0, t_1) = \int_0^{t_1} (e_1 \hat{X}_1 + e_2 \hat{X}_2) G_2(\tau) dt \geq -\gamma_{12}^2 \end{cases} \quad (32)$$

考虑到不等式成立, 如式(33)所示:

$$\begin{cases} \int_0^t f(t) \dot{f}(t) dt = \frac{1}{2} [f^2(t) - f^2(0)] \geq -\frac{1}{2} f^2(0) \\ \int_0^t f^2(t) dt \geq 0 \end{cases} \quad (33)$$

$\hat{R}/\hat{L}_0$ 的自适应率为

$$\frac{\hat{R}}{\hat{L}_0} = \frac{R}{L_0} - K_1 \int_0^t (e_1 \hat{X}_1 + e_2 \hat{X}_2) dt - K_2 (e_1 \hat{X}_1 + e_2 \hat{X}_2) \quad (34)$$

同理, 根据式(28)中 $\eta_2(0, t_1)$ 及 $\eta_3(0, t_1)$ 的表达式, 可得相关自适应律表达式为

$$\begin{aligned} \frac{1}{\hat{L}_0} &= \frac{1}{L_0} + K_1 \int_0^t [u_d(i_d - \hat{i}_d) + u_q(i_q - \hat{i}_q)] dt + \\ &+ K_2 [u_d(i_d - \hat{i}_d) + u_q(i_q - \hat{i}_q)] \end{aligned} \quad (35)$$

$$\frac{\hat{\psi}_m}{\hat{L}_0} = \frac{\psi_m}{L_0} - K_1 \int_0^t \omega(i_q - \hat{i}_q) dt - K_2 \omega(i_q - \hat{i}_q) \quad (36)$$

4 试验结果及分析

在 PMSM 交流调速平台上, 对本文提出的多参数辨识算法进行了试验研究, 试验平台如图 2 所示。

对应试验电机参数如表 1 所示。

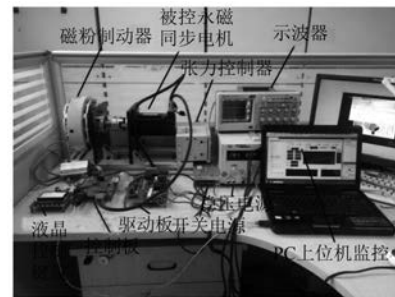


图 2 PMSM 交流调速平台

表 1 试验电机参数

参数名称	参数值
额定功率 P_n/kW	1.1
极对数 p	2
额定转速 $N_n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1 500
额定电流 I_N/A	8
定子电阻 R_s/Ω	2.5
dq 轴电感 L/mH	10.8
转子磁链 ψ_f/Wb	0.665
转动惯量 $J/(10^{-3} \times \text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.2
额定负载转矩 $T_L/(\text{N} \cdot \text{m})$	7.4

试验中, 初始负载给定空载, 当系统运行至 9 s 时刻时, 通过磁粉制动器给定额定负载, 分别通过基于 Lyapunov 稳定性理论及 Popov 超稳定性理论的模型参考自适应辨识器对试验电机的定子电阻、电感及转子磁链进行相应辨识。

图 3 所示为定子电阻的在线辨识结果, 在 9 s 之前空载运行工况下, 辨识结果约为 2.5 Ω , 与真实值基本无误差。给定额定负载转矩后, 定子电阻辨识值相应增大, 进一步分析由于负载转矩的增加导致定子电流值增大, 绕组温度相应升高, 使得定子电阻值相应增大, 试验结果符合理论分析。

基于 Lyapunov 稳定性理论及 Popov 超稳定性理论的参数辨识器均可较为准确地辨识出定子电阻,两者相差甚小。

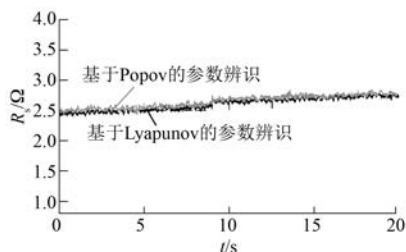


图3 定子电阻在线辨识

图4所示为定子电感值辨识结果,同样在给额定负载转矩前辨识值接近实际值,大约为10.8 mH。给定额定负载转矩后两者辨识结果均相应减小,经分析由于负载转矩增大导致定子电流增大,致使定子电感磁化曲线向饱和区靠拢。

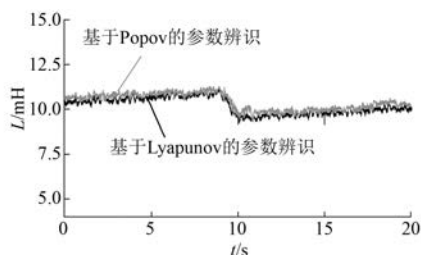


图4 定子电感在线辨识

图5所示为两种辨识器下的转子磁链辨识结果,空载下辨识值与转子永磁体给定磁链一致,约为0.66 Wb,给定负载后磁链值略有增大,产生相应抖振。

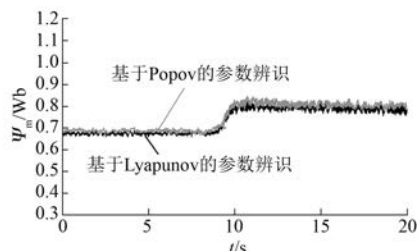


图5 转子磁链在线辨识

由图3~图5可知,基于 Lyapunov 稳定性理论及 Popov 超稳定性理论设计的模型参考自适应多参数并行辨识器均对电机内部电气参数辨识具有有效性,能够准确辨识出永磁同步电机内部

电气参数,对外部负载扰动具有鲁棒性,两者辨识结果相差无几。试验结果验证了本文所提辨识算法的有效性。

5 结 语

提出一种基于稳态欠秩方程的电机多参数并在线辨识算法,基于 Lyapunov 稳定性理论及 Popov 超稳定性理论设计了 PMSM 模型参考自适应多参数并行辨识器,通过设计合理的自适应律使得参考自适应系统渐进稳定,对电机定子电阻、电感及转子磁链进行相应辨识。

以1台1.1 kW PMSM为试验对象,验证基于本文提出新型算法下的辨识效果,考虑电机外部负载干扰对辨识效果的影响,给定空载和额定负载两种典型工况。试验结果表明本文所提算法对电机内部电气参数辨识具有高有效性,能够准确辨识出 PMSM 内部电气参数,具有理论意义与实用价值。

【参考文献】

- [1] LU B, HABETLEY T G, HARLLEY R G. A survey of efficiency-estimation methods for in-service induction motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2012, 42(4): 924-927.
- [2] MASTOROCOSTAS C, KIOSKERIDIS I, MARGARIS N. Thermal and slip effects on rotor time constant in vector controlled induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 21(2): 495-504.
- [3] WANG K Y, CHIASSON J, BODDON M, et al. A nonlinear least-squares approach for identification of the induction motor parameters [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 50(10): 1622-1628.
- [4] BARUT M, BOGOSYAN S, GOKASAN M. Experimental evaluation of braided EKF for sensorless control of induction motors [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2013, 55(2): 620-632.
- [5] ABDELHADI B, BENOUDJIT A, NAIT N. Application of genetic algorithm with a novel adaptive scheme for the identification of induction machine parameters [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 20(2): 284-291.
- [6] 张兴华, 唐其太. 考虑参数和负载不确定性的内置式永磁同步电机自适应反步控制 [J]. 控制与决

- 策, 2016, 31(8): 1509-1512.
- [7] 刘朝华, 张兢, 李小花, 等. 免疫协同微粒群进化算法的永磁同步电机多参数辨识模型方法[J]. 自动化学报, 2012, 38(10): 1698-1708.
- [8] 张令朝, 刘国海, 潘天红, 等. 基于新型转子磁链辨识方法的多电机系统同步控制[J]. 控制与决策, 2010, 25(12): 1804-1809.
- [9] 刘朝华, 周少武, 刘侃, 等. 基于双模态自适应小波粒子群的永磁同步电机多参数识别与温度检测方法[J]. 自动化学报, 2013, 39(12): 2121-2130.
- [10] 祝晓辉, 李颖晖, 孙国强. 永磁同步电机非线性观测器设计及内核验证[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(12): 1594-1602.
- [11] 梅从立, 殷开婷, 黄文涛, 等. 基于数据驱动的感应电机多模型逆自适应解耦控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(6): 1037-1041.
- [12] 潘月斗, 郭映维, 贺靛. 基于重置算法的感应电机转速自适应观测器[J]. 控制与决策, 2015, 30(9): 1723-1728.
- [13] 潘月斗, 陈虎. 基于高增益观测技术的高精度感应电机磁链观测研究[J]. 控制与决策, 2014, 29(8): 1495-1500.
- [14] 赵海森, 杜中兰, 刘晓芳, 等. 基于递推最小二乘法与模型参考自适应法的鼠笼式异步电机转子电阻在线辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5386-5394.

收稿日期: 2017 -03 -20

(上接第 45 页)

- [5] TEUNTER R H. Note on the fill rate of single-stage general periodic review inventory systems [J]. Operations Research Letters, 2009, 37(1): 67-68.
- [6] 阮旻智, 李庆民, 彭英武, 等. 任意结构系统的备件满足率模型及优化方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(8): 1799-1803.
- [7] 罗伟, 阮旻智, 袁志勇. 多级维修供应下可修复备件库存建模与优化[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(10): 2623-2630.
- [8] PINCE C, GURLER U, BERK E. A continuous review replenishment disposal policy for an inventory system with autonomous supply and fixed disposal costs[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 190(2): 421-442.
- [9] AXSATER S. A simple procedure for determining order quantities under a fill rate constraint and normally distributed lead-time demand[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 174(1): 480-491.
- [10] LAU H C, SONG H, SEE C T, et al. Evaluation of time-varying availability in multi-echelon spare parts systems with passivation [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 170(1): 91-105.
- [11] 孙江生, 李苏剑, 吕艳梅, 等. 武器贵重备件三级库存模型仿真研究[J]. 兵工学报, 2008, 29(7): 854-858.
- [12] 王乃超, 康锐. 基于备件保障概率的多级库存优化模型[J]. 航空学报, 2009, 30(6): 1043-1047.
- [13] TEE Y S, ROSSETTI M D. A robustness study of a multi-echelon inventory model via simulation [J]. International Journal of Production Economics, 2002, 80(3): 265-277.
- [14] AL-RIFAI M H, ROSSETTI M D. An efficient heuristic optimization algorithm for a two-echelon (R, Q) inventory system [J]. International Journal of Production Economics, 2007, 109(12): 195-213.
- [15] LEE L H, CHEW E P, TENG S Y, et al. Multi-objective simulation based evolutionary algorithm for an aircraft spare parts allocation problem [J]. European Journal of Operational Research, 2008 (189): 325-341.
- [16] 梅丹, 王公宝, 叶志浩, 等. 基于复杂网络理论的舰船电力网络脆弱性分析[J]. 海军工程大学学报, 2015, 27(3): 28-32.

收稿日期: 2017 -06 -10

引领技术发展趋势

报道经典实用案例

反映行业最新动态