

永磁同步电机无位置传感器控制下的参数辨识

方伟明,康 敏

(浙江科技学院 自动化与电气工程学院,杭州 310023)

摘 要: 在永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)无位置传感器矢量控制过程中,电机参数时变使得位置观测器参数与实际参数不匹配,导致其控制性能下降。为此,以鼓风机用永磁同步电机为研究对象,采用一种无位置传感器控制下的电机参数辨识方案进行多参数辨识。首先通过反电势积分法结合锁相环估计出电机转子位置、转速及永磁体磁链;然后利用模型参考自适应算法(model reference adaptive system, MRAS)对电机的定子电阻和电感进行在线辨识,同时根据波波夫(Popov)超稳定性原理设计了一种滑模控制器形式的自适应律,用以简化参数整定过程。试验结果表明,我们所提方案可使鼓风机的参数辨识结果收敛至真实值附近,鼓风机在无位置传感器控制下运行稳定。本参数辨识方案可以简化模型参考自适应算法的参数整定过程,实现永磁同步电机的多参数在线辨识,具有一定的实用价值。

关键词: 永磁同步电机;无位置传感器控制;参数辨识;模型参考自适应;滑模控制器

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8798(2021)06-0469-08

Parameter identification of position sensorless control for PMSM

FANG Weiming, KANG Min

(School of Automation and Electrical Engineering, Zhejiang University of
Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: In the process of position sensorless vector control of PMSM (permanent magnet synchronous motor), the time-varying motor parameters cause a mismatch between the position observer parameters and the actual parameters, leading to the degradation of its control performance. Therefore, targeting PMSM for an air blower as the object, a motor parameter identification scheme was adopted under the position sensorless control, capable of performing multi-parameter identification. Firstly, the rotor position, speed and permanent magnet flux of motor were estimated by the back-EMF integration method in combination with the phase-locked loop. Then, the stator resistance and inductance of the motor were identified online in real time by using the model reference adaptive method (MRAS), and an adaptive law in the form of sliding mode controller was designed on the basis of Popov's hyper-stability theory, with a view to simplifying the process of parameter tune. The experimental results show that the proposed scheme can make the parameter identification results of the

收稿日期: 2020-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51407161)

通信作者: 康 敏(1980—),男,江西省泰和人,教授,博士,主要从事多相电机、电机优化设计、电机控制研究。

E-mail: kangmin@zust.edu.cn.

blower converge to the true value and the blower runs stably under the position sensorless control. This scheme of parameter identification can simplify the parameter tuning process of model reference adaptive algorithm and realize the multi-parameter online identification of PMSM, which has certain practical value.

Keywords: PMSM (permanent magnet synchronous motor); position sensorless control; parameter identification; model reference adaptive; sliding mode controller

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)因具有结构简单、损耗小、功率密度高、响应速度快等特点,被广泛应用于工业生产、新能源汽车及航空航天等高性能控制领域^[1]。在一些应用场合中,由于安装机械式传感器会造成系统成本增加、体积增大及可靠性降低等问题,此时可以通过无位置传感器算法来估计 PMSM 的转子位置和转速。常用的 PMSM 无位置传感器算法主要有高频信号注入法^[2]、反电势积分法^[3]、扩展卡尔曼(Kalman)滤波器^[4]及滑模观测器^[5]等。其中,反电势积分法因具有实现简单且在电机中高速运行时估计准确的特点,被广泛地应用在 PMSM 转子位置和转速估计中。

由于 PMSM 的长期运行或工况发生变化,受温度上升、磁饱和及负载扰动等因素的影响,电机参数会发生变化,而这将导致观测器及控制器性能下降,甚至会导致 PMSM 矢量控制系统出现故障^[6-7]。因此, PMSM 参数的在线辨识对矢量控制系统故障诊断及控制效果的稳定非常重要。许多研究者在 PMSM 的参数辨识方面做了探讨,年珩等^[8]利用递归最小二乘法对永磁风力发电机的 d 、 q 轴电感进行实时辨识,并将辨识得到的电感值应用于发电机转子位置观测和矢量控制中,从而提高了转子位置的估算精度和永磁风力发电机的矢量控制性能。李旭春等^[9]提出了一种具有参数辨识的永磁同步电机无位置传感器方案,运用扩展卡尔曼滤波器对转子磁链和交轴电感同时进行在线辨识,取得了良好的辨识效果。黄松等^[10]提出了一种新的自适应变异粒子群优化算法,可以同时辨识 PMSM 定子电阻、交直流电感及转子磁链,实现电机的多参数在线辨识。然而上述参数辨识算法都较为复杂,运算量较大,在考虑微处理器运算能力有限和开关频率限制的情况下,辨识算法不易实现。张红^[11]在无位置传感器控制下的 PMSM 参数辨识中采用的模型参考自适应算法(model reference adaptive system, MRAS)运算简便,易于实现,在低成本电机参数辨识解决方案中具有优势。

在上述研究的基础上,本研究以冷却系统中常见的鼓风机用永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)为参数辨识对象,提出一种无位置传感器矢量控制下的 PMSM 参数在线辨识方案,通过无位置传感器算法估计电机转子位置、转速及永磁体磁链,利用改进的 MRAS 在线辨识电机的定子电阻和定子电感。与传统的 MRAS 自适应律相比,参数整定个数从 4 个减少到了 2 个,从而简化了传统 MRAS 中自适应律的参数整定过程;通过本参数辨识方案,在同一时间尺度下实现了 PMSM 的转子位置、转速、永磁体磁链、定子电阻和定子电感的在线辨识。最后,通过搭建的试验平台对本方案的可行性和有效性进行了验证。

1 基于 MRAS 的电机参数在线辨识模型的构建

PMSM 的 MRAS 参数辨识原理如图 1 所示,其中 u 为辨识系统的输入电压矢量, i 为辨识系统的响应电流矢量, \hat{i} 为系统估计电流矢量, e 为电流估计误差矢量。系统主要由三部分组成,分别是 PMSM 参考模型、PMSM 可调模型及自适应律^[12]。MRAS 参数辨识策略是将不包含待辨识参数的数学模型作为参考模型,含有待辨识参数的未知模型作为可调模型,2 个模型的输入量完全相同,输出量具有相同的物理意义,对 2 个模型作差得到误差状态方程,通过设计合适的自适应律对误差进行控制,使得可调模型的输出与参考模型的输出一致,实现对可调模型中待辨识参数的在线辨识。

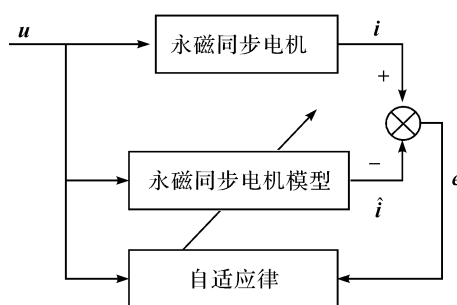


图 1 PMSM 的 MRAS 参数辨识原理

Fig. 1 MRAS parameter identification schematic of PMSM

本研究中 MRAS 在线辨识针对电机定子电阻和电感,以 d 、 q 轴电流作为状态变量,PMSM 数学模型可表示为

$$p \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \omega_e \\ -\omega_e & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\omega_e \psi_f}{L_q} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式(1)中: p 为微分算子; i_d 与 i_q 、 u_d 与 u_q 分别为 d 、 q 轴电流和电压; R_s 为电机定子电阻; L_q 、 L_d 为交直流电感; ω_e 为电机电角速度; ψ_f 为永磁体磁链;对于表贴式 PMSM, $L_d=L_q=L_s$, L_s 为电机定子电感。

令 $a=R_s/L_s$, $b=1/L_s$,则式(1)可写为

$$p\mathbf{i} = \mathbf{A}\mathbf{i} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{C}. \quad (2)$$

式(2)中:电流矢量 $\mathbf{i} = (i_d \quad i_q)^T$;电压矢量 $\mathbf{u} = (u_d \quad u_q)^T$; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -a & \omega_e \\ -\omega_e & -a \end{bmatrix}$; $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix}$; $\mathbf{C} = (0 \quad -\omega_e \psi_f b)^T$ 。

以式(2)为参考模型,系统的可调模型为

$$p\hat{\mathbf{i}} = \hat{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{i}} + \hat{\mathbf{B}}\mathbf{u} + \hat{\mathbf{C}} + \mathbf{G}(\hat{\mathbf{i}} - \mathbf{i}). \quad (3)$$

式(3)中:可调模型的电流矢量 $\hat{\mathbf{i}} = (\hat{i}_d \quad \hat{i}_q)^T$; $\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} -\hat{a} & \omega_e \\ -\omega_e & -\hat{a} \end{bmatrix}$,其中 $\hat{a} = \hat{R}_s/\hat{L}_s$ (\hat{R}_s 和 \hat{L}_s 分别为 R_s 和 L_s 的估计值); $\hat{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \hat{b} & 0 \\ 0 & \hat{b} \end{bmatrix}$,其中 $\hat{b} = 1/\hat{L}_s$; $\hat{\mathbf{C}} = (0 \quad -\omega_e \psi_f \hat{b})^T$; $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix}$ 为系统误差反馈系数矩阵,其中, k_1 、 k_2 为有限正实数。

将式(2)减去式(3),得到误差状态方程

$$p\mathbf{e} = \mathbf{A}\mathbf{i} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{C} - \hat{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{i}} - \hat{\mathbf{B}}\mathbf{u} - \hat{\mathbf{C}} + \mathbf{G}\mathbf{e} = (\mathbf{A} + \mathbf{G})\mathbf{e} + \Delta\mathbf{A}\hat{\mathbf{i}} + \Delta\mathbf{B}\mathbf{u} + \Delta\mathbf{C} = (\mathbf{A} + \mathbf{G})\mathbf{e} - \mathbf{w}. \quad (4)$$

式(4)中: $\mathbf{e} = \mathbf{i} - \hat{\mathbf{i}} = [e_d \quad e_q]^T$,其中, d 轴电流估计误差 $e_d = i_d - \hat{i}_d$, q 轴电流误差 $e_q = i_q - \hat{i}_q$; $\Delta\mathbf{A} = \mathbf{A} - \hat{\mathbf{A}}$; $\Delta\mathbf{B} = \mathbf{B} - \hat{\mathbf{B}}$; $\Delta\mathbf{C} = \mathbf{C} - \hat{\mathbf{C}}$; $\mathbf{w} = -(\Delta\mathbf{A}\hat{\mathbf{i}} + \Delta\mathbf{B}\mathbf{u} + \Delta\mathbf{C})$ 。

从误差方程中可以看出,PMSM 的自适应参数辨识系统由前向线性模块 $\mathbf{A} + \mathbf{G}$ 和非线性时变反馈环节 \mathbf{w} 构成。

2 MRAS 自适应律的设计

MRAS 参数辨识算法的关键是设计合适的自适应律来使参考模型与可调模型的输出误差收敛到零。根据波波夫(Popov)超稳定性原理可知,若要使 MRAS 辨识系统稳定,则需要满足 2 个条件^[13]: 1)辨识系统前向线性模块的传递函数严格正实;2)辨识系统非线性时变反馈环节满足 Popov 积分不等式。对于条件 1 可通过调节系统误差反馈系数 k_1 、 k_2 ,使得系统前向线性模块传递函数 $\mathbf{A} + \mathbf{G}$ 严格正实。条件 2 中定义的 Popov 积分不等式为

$$\eta(0, t_1) = \int_0^{t_1} \mathbf{w}^T \mathbf{e} dt \geq -\gamma_0^2, t_1 \geq 0. \quad (5)$$

式(5)中: γ_0^2 为有限正实数。

将式(4)中的 \mathbf{w} 和电流矢量误差 \mathbf{e} 代入式(5)可得

$$\eta(0, t_1) = - \int_0^t (\hat{i}_d e_d + \hat{i}_q e_q)(\hat{a} - a) dt + \int_0^t (u_d e_d + u_q e_q - \omega_e \psi_f e_q)(\hat{b} - b) dt \geq -\gamma_0^2. \quad (6)$$

常用的参数辨识自适应律为比例积分控制器形式,即令

$$\begin{cases} \hat{a} = \int_0^t f_1(\tau) d\tau + f_2(t) + \hat{a}(0); \\ \hat{b} = \int_0^t g_1(\tau) d\tau + g_2(t) + \hat{b}(0). \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: $f_1(\tau)$ 为 \hat{a} 的积分函数, $f_2(t)$ 为 \hat{a} 的比例函数; $g_1(\tau)$ 为 \hat{b} 的积分函数; $g_2(t)$ 为 \hat{b} 的比例函数; $\hat{a}(0)$ 、 $\hat{b}(0)$ 分别为 \hat{a} 、 \hat{b} 的初值。

将式(7)代入式(6)可得

$$\eta_{pi}(0, t_1) = - \int_0^t (\hat{i}_d e_d + \hat{i}_q e_q) (\hat{a} - a) dt + \int_0^t (u_d e_d + u_q e_q - \omega_e \psi_f e_q) (\hat{b} - b) dt \geq -\gamma_0^2. \quad (8)$$

由式(8)可得 PI(proportion integration, 比例积分)形式的 MRAS 自适应律为

$$\begin{cases} \hat{a} = - \left(K_{f_2} + \frac{K_{f_1}}{s} \right) (\hat{i}_d e_d + \hat{i}_q e_q) + \hat{a}(0); \\ \hat{b} = \left(K_{g_2} + \frac{K_{g_1}}{s} \right) (u_d e_d + u_q e_q - \omega_e \psi_f e_q) + \hat{b}(0). \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: s 为积分因子; K_{f_1} 、 K_{f_2} 、 K_{g_1} 和 K_{g_2} 分别为 PI 形式的自适应律需要调节的参数。

从式(9)可以看出, PI 形式的自适应律需要同时调节 4 个参数, 参数整定过程较为不便。而本研究采用滑模控制器形式的自适应律, 只需整定 2 个参数, 设计滑模自适应律为

$$\begin{cases} \hat{a} = -K_{sw1} \operatorname{sgn}(\hat{i}_d e_d + \hat{i}_q e_q) + \hat{a}(0); \\ \hat{b} = K_{sw2} \operatorname{sgn}(u_d e_d + u_q e_q - \omega_e \psi_f e_q) + \hat{b}(0). \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: K_{sw1} 、 K_{sw2} 为滑模控制器形式自适应律的滑模增益; $\operatorname{sgn}(x)$ 为开关函数, 当 $x \geq 0$ 时, 值为 1, 当 $x < 0$ 时, 值为 -1。

将式(10)代入式(6)可得

$$\begin{aligned} \eta_{smc}(0, t_1) &= - \int_0^t (\hat{i}_d e_d + \hat{i}_q e_q) (\hat{a} - a) dt + \int_0^t (u_d e_d + u_q e_q - \omega_e \psi_f e_q) (\hat{b} - b) dt \geq \\ &\eta_{01}(0, t_1) + \eta_{02}(0, t_1) \geq -\gamma_{01}^2 - \gamma_{02}^2 \geq -\gamma_0^2. \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中, 当 $\eta_{01}(0, t_1) \geq -\gamma_{01}^2$ 和 $\eta_{02}(0, t_1) \geq -\gamma_{02}^2$ 都成立时, 则式(11)必成立。

令 $f(t) = -(\hat{i}_d e_d + \hat{i}_q e_q)(\hat{a} - a)$, 当 $f(t) \geq 0$ 恒成立时, 则 $\eta_{01}(0, t_1) \geq -\gamma_{01}^2$ 成立。那么当 $\hat{i}_d e_d + \hat{i}_q e_q \geq 0$ 时, 需满足 $K_{sw1} - \hat{a}(0) + a \geq 0$, 当 $\hat{i}_d e_d + \hat{i}_q e_q < 0$ 时, 需满足 $-K_{sw1} - \hat{a}(0) + a < 0$, 最终得到 $K_{sw1} \geq (\hat{a}(0) - a)$, $K_{sw1} > (a - \hat{a}(0))$ 。同理可得到 $K_{sw2} \geq (b - \hat{b}(0))$, $K_{sw2} > (\hat{b}(0) - b)$ 。确定初值 $\hat{a}(0)$ 和 $\hat{b}(0)$ 后, 滑模增益为

$$\begin{cases} K_{sw1} > |\bar{a} - \hat{a}(0)|; \\ K_{sw2} > |\bar{b} - \hat{b}(0)|. \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中: $\bar{a} = \bar{R}_s / \bar{L}_s$; $\bar{b} = 1 / \bar{L}_s$; \bar{R}_s 、 \bar{L}_s 分别为 PMSM 定子电阻和电感参考值。

图 2 为表贴式 PMSM 的 MRAS 参数辨识模型结构。图 2 中, R_0 为电阻辨识初值, L_0 为电感辨识初值, 转速 ω_e 和永磁体磁链 ψ_f 由无位置传感器算法估计得到, 通过设计的自适应律使得 e_d 、 e_q 收敛到零, 即电机实际电流与可调模型的估计电流一致, 通过式(9)或式(10)估计出 \hat{a} 和 \hat{b} , 得到 \hat{R}_s 和 \hat{L}_s , 实现对可调模型中电机定子电阻和电感的辨识。

3 PMSM 无位置传感器算法

在参数辨识过程中, u_d 和 u_q 为电流环控制器输出值, 在忽略逆变器死区和电机非线性的影响后, u_d 和 u_q 与真实值之间的误差很小, 可以直接使用。 i_d 和 i_q 由采样电流经过坐标变换得到, 而坐标变换需要知道电机实时转子位置, 本研究通过无位置传感器算法进行转子位置的估计。

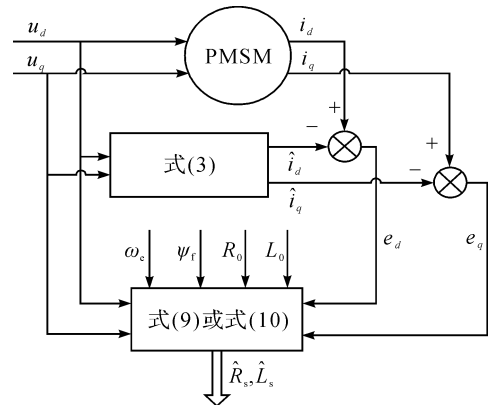


图 2 表贴式 PMSM 的 MRAS 参数辨识模型结构

Fig. 2 Structure diagram of MRAS parameter identification model of surface-mounted PMSM

$\alpha\beta$ 静止坐标系下的 PMSM 电压方程满足

$$\begin{cases} u_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\psi_{sa}}{dt}; \\ u_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt}. \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中: u_{sa} 与 $u_{s\beta}$ 、 i_{sa} 与 $i_{s\beta}$ 、 ψ_{sa} 与 $\psi_{s\beta}$ 分别为 α 、 β 轴定子电压、定子电流及定子磁链。

通过对反电势进行积分可以得到 PMSM 在 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的定子磁链:

$$\begin{cases} \psi_{sa} = \int u_{sa} - R_s i_{sa}; \\ \psi_{s\beta} = \int u_{s\beta} - R_s i_{s\beta}. \end{cases} \quad (14)$$

由于电压电流中存在初值误差和直流偏置,在对反电势积分时会出现磁链零漂^[14],导致计算得到的定子磁链偏离真实值,因此需要消除积分零漂,常用的做法是,在对反电势积分后,用高通滤波器对定子磁链中含有的直流量进行滤除^[15]。同时定子磁链还可以由自身绕组激励的磁链、与其他绕组作用产生的磁链及永磁体磁链在 α 、 β 轴上的分量组成,表示为

$$\begin{cases} \psi_{sa} = L_a i_a + L_{a\beta} i_{\beta} + \psi_f \cos\theta; \\ \psi_{s\beta} = L_{\beta} i_{\beta} + L_{\beta a} i_a + \psi_f \sin\theta. \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中: L_a 与 L_{β} 、 $L_{a\beta}$ 与 $L_{\beta a}$ 分别为 α 、 β 轴自感和互感; θ 为转子位置;对于表贴式 PMSM, $L_a = L_{\beta} = L_s$, $L_{a\beta} = L_{\beta a} = 0$ 。

则在 α 、 β 轴下的 PMSM 永磁体磁链可表示为

$$\begin{cases} \psi_{fa} = \psi_f \cos\theta = \psi_{sa} - L_a i_a; \\ \psi_{f\beta} = \psi_f \sin\theta = \psi_{s\beta} - L_{\beta} i_{\beta}. \end{cases} \quad (16)$$

从式(15)和式(16)可以看出,永磁体磁链在 α 、 β 轴上的分量中包含转子位置信息 θ ,而且可以计算得到永磁体磁链 $\psi_f = \sqrt{\psi_{fa}^2 + \psi_{f\beta}^2}$,这样永磁体磁链的估计结果也可以为转子位置估计的准确性提供依据。

通过对 $\psi_{f\beta}$ 和 ψ_{fa} 的商求反正切,可以得到 PMSM 的转子位置。为提高转子位置的估计精度,本研究采用锁相环^[16]进行转子位置的估计,得到 PMSM 转速和转子位置,其表达式为

$$\begin{cases} \hat{\omega}_e = \Delta E \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right); \\ \hat{\theta} = \int \omega_e dt. \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中: k_p 、 k_i 分别为锁相环控制器的比例系数和积分系数; $\Delta E = (\psi_{f\beta} \cos \hat{\theta} - \psi_{fa} \sin \hat{\theta}) / \psi_f = \sin(\theta - \hat{\theta})$; $\hat{\omega}_e$ 为估计转速; $\hat{\theta}$ 为转子位置估计值;当 $|\theta - \hat{\theta}| < \pi/6$ 时,可认为 $\Delta E = (\theta - \hat{\theta})$,即实际转子位置与估计转子位置的差值,通过设置合适的 k_p 、 k_i 使得 ΔE 收敛为零,实现估计转子位置对实际转子位置的跟踪。

4 试验结果与分析

为验证我们提出的无位置传感器矢量控制下的表贴式 PMSM 参数在线辨识方案的可行性与有效性,特以冷却系统中常用的鼓风机为被控对象,硬件平台采用意法半导体处理器 STM32F103 和英飞凌公司的功率模块 IGCM10F60GA。试验采用的表贴式 PMSM 参数见表1。试验中设定开关频率为 7.2 kHz,在鼓风机低速时采用恒流频比开环运行,当达到开环给定转速后利用 q 轴电流调节器切换至闭环,在闭环阶段进行参数辨识。本研究以转子位置估计是否平滑、锁相环转子位置输入误差的大小、参数辨识的收敛性和稳定性及鼓风机的转速性能作为系统参数辨识及矢量控制是否有效的标准。

表1 表贴式 PMSM 参数

Table 1 Parameters of surface-mounted PMSM

参数	数值
额定电流/A	1.23
额定转速/(r · min ⁻¹)	1 520
定子电阻/ Ω	8.8
定子电感/mH	22
极对数	4
永磁体磁链/Wb	0.124

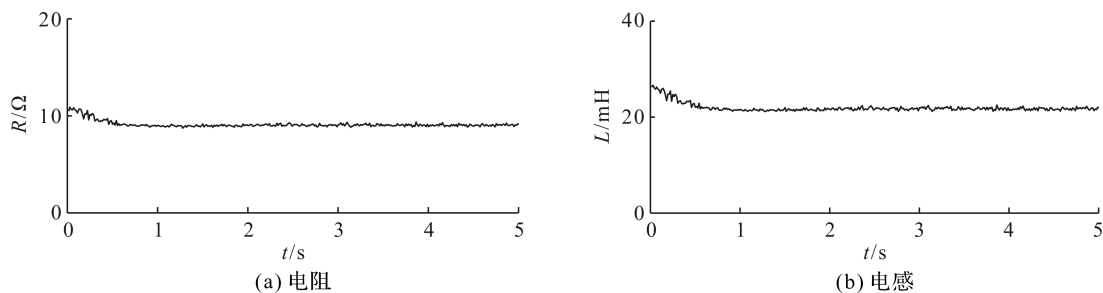


图7 电阻和电感辨识结果

Fig.7 Identification result of resistance and inductance

从图4(a)和(b)可以看出,转子位置估计平滑,周期在15 ms左右,符合鼓风机1 000 r/min的运行速度,转子位置输入误差 $\theta - \hat{\theta}$ 很小,在0.000 5 rad以内,表明锁相环具有良好的跟踪效果。从图5(a)和(b)可以看出,鼓风机转速估计平滑,稳定转速估计误差控制在 ± 10 r/min内,具有良好的转速估计效果,永磁体磁链稳态平均值为0.125 5 Wb,估计误差为1.2%,永磁体磁链估计效果较好。从图6(a)和(b)可以看到,采用滑模控制器形式的自适应律可以使得 d 、 q 轴估计电流误差 e_d 和 e_q 收敛到零值附近。从图7(a)和(b)可以看出,电阻和电感的辨识结果都很接近真实值,电阻的稳态辨识结果为9.05 Ω ,辨识误差为2.84%,电感的稳态辨识结果为21.76 mH,辨识误差为1.1%。鼓风机参数辨识结果见表2,辨识结果表明式(10)所示的滑模控制器形式的自适应律是有效的,同时也验证了我们提出的在无位置传感器矢量控制下进行永磁同步电机在线参数辨识的可行性与有效性。

表2 参数辨识结果

Table 2 Results of parameter identification

参数	真实值	辨识值	误差/%
定子电阻 R_s/Ω	8.80	9.05	2.84
定子电感 L_s/mH	22.00	21.76	1.10
转子磁链 ϕ_f/Wb	0.124 0	0.125 5	1.20

5 结 语

本研究在建立永磁同步电机数学模型的基础上介绍了MRAS参数辨识原理,搭建了MRAS参数在线辨识模型,采用一种滑模控制器形式自适应律的MRAS对PMSM的定子电阻和电感进行在线辨识,简化了传统PI形式自适应律的参数整定过程;同时参数辨识所需的电机转速和永磁体磁链由无位置传感器算法估计得到,在同一时间尺度下实现了PMSM的多参数辨识。将该参数辨识方案用于搭建的试验平台进行试验验证,结果表明,MRAS参数辨识方法可以有效地辨识出鼓风机用表贴式PMSM的定子电阻和定子电感;同时无位置传感器算法估计的永磁体磁链误差小,鼓风机在给定转速下运行平稳。因此,本方案具有一定的实用性。

参考文献:

- [1] 夏长亮,王东,程明,等. 高效能电机系统可靠运行与智能控制基础研究进展[J]. 中国基础科学,2017,19(1):16.
- [2] LIU J M, ZHU Z Q. Novel sensorless control strategy with injection of high-frequency pulsating carrier signal into stationary reference frame[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2014,50(4):2574.
- [3] 刘刚,肖烨然,孙庆文. 基于改进反电势积分的永磁同步电机位置检测[J]. 电机与控制学报,2016,20(2):36.
- [4] BOLOGNANI S, OBOE R, ZIGLIOTTO M. Sensorless full-digital PMSM drive with EKF estimation of speed and rotor position[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,1999,46(1):184.
- [5] 李佳伦,宋桂英,郭慧敏. 改进型自适应滑模观测器的PMSM无速度传感器[J]. 微电机,2020,53(1):47.
- [6] ILIOUDIS V C, MARGARIS N I. Flux weakening method for sensorless PMSM control using torque decoupling technique[C]//2010 First Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives (SLED). Padua: IEEE,2010:32.
- [7] 李红梅,陈涛,姚宏洋. 电动汽车PMSM退磁故障机理、诊断及发展[J]. 电工技术学报,2013,28(8):276.
- [8] 年珩,李嘉文,万中奇. 基于参数在线辨识的永磁风力发电机无位置传感器控制技术[J]. 中国电机工程学报,2012,32(12):146.
- [9] 李旭春,张鹏,严乐阳,等. 具有参数辨识的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报,2016,31(14):139.

- [10] 黄松,田娜,纪志成. 一种新的自适应变异粒子群优化算法在 PMSM 参数辨识中的应用[J]. 电工电能新技术,2016,35(6):67.
- [11] 张红. 无位置传感器控制下的永磁同步电机在线参数辨识[J]. 微特电机,2016,44(6):66.
- [12] ZHANG Y Q, YIN Z G, SUN X D, et al. On-line identification methods of parameters for permanent magnet synchronous motors based on cascade MRAS[C]//9th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia. Seoul, South Korea; IEEE 2015:345.
- [13] AN Q, SUN L. On-line parameter identification for vector controlled PMSM drives using adaptive algorithm[C]//IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Harbin; IEEE,2008:1.
- [14] 周硕. 基于改进磁链观测器的 PMSM 转子位置估计方法[J]. 电气传动,2020,50(6):15.
- [15] 张星,瞿文龙,陆海峰. 一种能消除直流偏置和稳态误差的电压型磁链观测器[J]. 电工电能新技术,2006,25(1):39.
- [16] SHINNAKA S. Versatile high-frequency current correlation method with high-frequency integral-type PLL for sensorless drive of PMSMs[J]. IEEJ Transactions on Industry Applications,2010,130(7):868.

~~~~~

(上接第 468 页)

- [20] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington DC; IEEE Computer Society,2016:770.
- [21] LI J, SUN M S. Scalable term selection for text categorization[C]//Proceedings of Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and Computational Natural Language Learning (EMNLP-CoNLL). Prague; Czech Republic,2007:774.
- [22] GitHub. ChineseNlpCorpus[DB/OL]. (2018-03-26)[2020-10-06]. <https://github.com/SophonPlus/ChineseNlpCorpus/tree/master/datasets>.
- [23] 全国应用统计专业学位研究生教育指导委员会. 案例 D:旅游行业游客满意度分析[DB/OL]. (2020-05-11)[2020-09-15]. <http://mas.ruc.edu.cn/syxwlm/tzgg/5068c3fd6e3c49919c79900d0bf3902c.htm>.