

基于永磁磁链在线辨识的永磁同步电机无速度传感器控制*

韩世东^{1,2}, 王应喜¹, 邢益超², 童文雨²

(1. 南京铁道职业技术学院, 江苏 南京 210031; 2. 南京工业大学, 江苏 南京 211816)

摘要: 在无速度传感器控制条件下,研究了基于 MRAS 的永磁同步电机永磁磁链在线辨识系统。仅辨识速度和永磁磁链两个参数,使得辨识模型满秩,避免了出现设置不同初值获得不同永磁磁链辨识值的问题,确保了参数估计的收敛性和唯一性。分析了欠秩问题的本质,分别推导了速度和永磁磁链的辨识自适应律。仿真结果表明:该控制系统在转速和负载突变下均能准确跟踪转子的速度,具有良好的鲁棒性和动态性能,同时降低了系统参数敏感性。

关键词: 永磁同步电机; 永磁磁链; 参数辨识; 在线辨识系统

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)01-0046-05

Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Identification of Permanent Magnet Flux*

HAN Shidong^{1,2}, WANG Yingxi¹, XING Yichao², TONG Wenyu²

(1. Nanjing Institute of Railway Technology, Nanjing 210031 China

2. Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: The permanent magnet flux identification system of permanent magnet synchronous motor based on MRAS under the condition of speed sensorless control was studied. Only the speed and permanent magnetic flux were estimated. It satisfies a identification model of full rank and avoids the problem of different initial values different identification values. The convergence and uniqueness of parameter estimation were also ensured. The essence of the rank deficient problem and deduct the identification adaptive law of speed and permanent magnet flux respectively were analyzed. The simulation results showed that the control system could accurately track the speed of the rotor under the speed and load transient change, and had good robustness, with reduced sensitivity on the parameters.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); permanent magnetic flux; parameter identification; identification system

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 由于具有高效率、高转矩惯性比及快速响应等优势, 其在许多高性能调

速场合得到了广泛的应用。为了解决机械式传感器的一些缺点和问题, 电机的控制往往选择无速度传感器技术^[1]。

长期以来, 无传感器技术在 PMSM 中应用大致可以概括成以下几种方法: (1) 基于低频或高

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51277092, 51307080); 南铁院青年基金项目 (YQ170004)

作者简介: 韩世东 (1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机与控制。

王应喜 (1964—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为软件开发。

邢益超 (1993—), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。

频信号注入;(2) 利用电机模型状态观测器;(3) 采用模型参考自适应系统;(4) 利用 PMSM 绕组反电动势的方法等。可以看出虽然 PMSM 的无传感器控制算法有多种,但是从技术本身来看,除了(1)之外其余都是利用 PMSM 的参数,导致这些方法很依赖 PMSM 的永磁磁链 φ_f 。另外,温度的升高会使永磁磁链 φ_f 下降^[2],严重时甚至出现高温失磁^[3]。PMSM 各参数的准确程度对无位置传感器技术是至关重要的。系统的控制性能以及速度的辨识精度与 PMSM 永磁磁链 φ_f 的准确度有着直接的关系^[4]。

模型参考自适应系统 (Model Reference Adaptive System, MRAS) 算法在以上提及到的 4 种算法中实现起来相对容易,但其对永磁磁链参数 φ_f 敏感这一问题同样不可忽视。MRAS 的这一问题,引起了国内外学者的注意。文献[5-6]采用了不同的稳定性理论来搭建 MRAS 的自适应律,对 PMSM 多个参数进行了同时在线辨识,但是 PMSM 数学模型的秩为 2,辨识的这部分参数只能在固定的初始值下收敛,且收敛值不唯一。文献[7]进行了 PMSM 基于 MRAS 的无位置传感器控制研究,提出无位置控制中永磁体磁链 φ_f 和定子绕组电阻 R_s 不可能同时辨识出来。文献[8]一方面采用扩展卡尔曼滤波器(EKF)来估算永磁磁链,另一方面利用 MRAS 来辨识转速和位置,很大程度上避免了上述的 PMSM 低阶状态方程导致的欠秩问题。

本文提出一种基于永磁磁链 φ_f 在线辨识的 PMSM 无速度传感器算法(包括转速和位置参数估计)。方案中固定定子电阻 R_s ,估算永磁磁链 φ_f 和电机转速 ω_e 。估算的参数直接在线更改 PMSM 永磁体磁链值,确保了电机模型中使用的永磁参数是准确性。由于仅涉及两个参数(ω_e 和 φ_f)的辨识,解决了之前文献所遇到的 PMSM 方程欠秩问题以及多参数辨识的交叉耦合问题,能够保证估计参数的唯一与收敛,提高了 MRAS 算法的鲁棒性和转速辨识精度。

1 PMSM 的建模及参数辨识的欠秩问题

1.1 PMSM 的数学模型

dq 轴坐标系下 PMSM 的数学模型为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e \psi_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e \psi_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: L, R_s ——定子电感和电阻;

u_d, u_q, i_d, i_q ——定子 dq 轴的电压和电流;

ω_e ——PMSM 电角速度;

ψ_d, ψ_q ——定子磁场在 d, q 轴上的分量。

ψ_d, ψ_q 可表示为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: ψ_f ——永磁体磁链。

在表贴式 PMSM 中有 $L_d = L_q = L$, 一般情况下, MRAS 选取电流作为状态量, 所以将式(2)代入 dq 轴坐标系下的数学模型可得

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L} i_d + \omega_e i_q + \frac{u_d}{L} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L} i_q - \omega_e \left(i_d + \frac{\varphi_f}{L} \right) + \frac{u_q}{L} \end{cases} \quad (3)$$

1.2 PMSM 多参数在线辨识欠秩问题的分析及解决方案

PMSM 的数学模型中有 5 个参数: 转速 ω_e 、位置 θ 、定子电阻 R_s 、电感 L 和永磁磁链 φ_f 。学者刘侃在文献[2]中做了基于 PMSM 稳态欠秩方程的参数辨识进行了验证。其仿真和试验均指出, 在 $i_d = 0$ 时, 选取不同的积分常数会导致辨识结果发生变化, 甚至出现结果发散, 不能保证正确收敛到实际值。

欠秩问题的根源在于 PMSM 的数学模型。式(3)中, PMSM 的数学模型可以看作一个秩为 2 的方程组。由式(3)分析可知, PMSM 的数学模型中有 5 个待辨识参数, 直接导致式(3)欠秩, 有解但不唯一。这解释了文献[5-6]所述及的 3 个及以上参数的在线辨识只能在有传感器情况下进行的原因, 如果要实行无传感器控制仅能固定在一些特别选取值下完成。一旦辨识算法的初始值变更, 将会得到不同的永磁磁链和定子电阻, 其原因在于 MRAS 算法的可调模型欠秩。凭借多个电机电压和电流的采样值, 能辨识出多个参数, 但其结果的唯一性和收敛性缺乏理论依据^[2]。

以上是基于 PMSM 在 dq 旋转坐标系, 当采用其他数学模型时结论一致, 根据电机统一理论, 系

统的秩不变,在超过 2 个未知参数情况下,方程无法同时确定这些个参数的唯一性^[9]。

综合上述分析,可以得出以下结论:如何保证所估计的参数值正确收敛于实际值,并保证系统稳定性,关键在于设计一个满秩的可调模型。

2 基于永磁磁链在线辨识的 PMSM 转速估计方案

针对 MRAS 算法对永磁磁链敏感的问题,本文在线辨识电机模型中的 φ_f ,对其值进行实时修改,以确保系统使用参数的准确性。图 1 给出了 MRAS 的原理图,两个输出中一个独立于估计量(参考模型),还有一个依赖于估计量(可调模型),两个模型各自运算会得到误差信号。MRAS 算法利用该误差信号产生自适应控制信号。最终目标是让两个模型的输出误差为 0,也就是可调模型的 $\hat{\omega}_e(\hat{\varphi}_f)$ 逼近真实的 $\omega_e(\varphi_f)$ 。

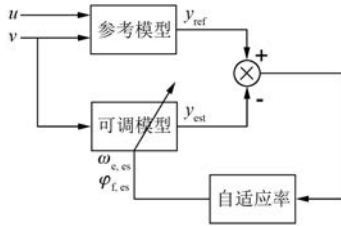


图 1 MRAS 转速辨识原理图

由于 PMSM 数学模型实现多参数同时在线辨识是欠秩的,所以这里设定电阻 R_s 为额定值,只估算转速 ω_e 和磁链 φ_f 。对电机基本方程式(3)进行简单变换,得

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & \omega_e \\ -\omega_e & -\frac{R_s}{L} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} + \frac{1}{L} \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\omega_e \frac{\varphi_f}{L} \end{pmatrix} \quad (4)$$

简写为 $\frac{di}{dt} = Ai + Bu + C$, 其中, $i = (i_d \ i_q)^T$,

$$u = (u_d \ u_q)^T, A = \begin{pmatrix} -\frac{R_s}{L} & \omega_e \\ -\omega_e & -\frac{R_s}{L} \end{pmatrix}, B = \frac{1}{L}, C =$$

$\begin{pmatrix} 0 & -\omega_e \frac{\varphi_f}{L} \end{pmatrix}^T$ 。式(4)中含有需要估算的转速信息和磁链,故作为可调模型。将式(4)估算参数用估计值表示为

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & \hat{\omega}_e \\ -\hat{\omega}_e & -\frac{R_s}{L} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{pmatrix} + \frac{1}{L} \begin{pmatrix} u_d \\ u_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\hat{\omega}_e \frac{\hat{\varphi}_f}{L} \end{pmatrix} \quad (5)$$

简写为: $\frac{d\hat{i}}{dt} = \hat{A}\hat{i} + Bu + \hat{C}$ 。令 $e = i - \hat{i} =$

$\begin{pmatrix} i_d - \hat{i}_d \\ i_q - \hat{i}_q \end{pmatrix}$, $\hat{A} = A + \Delta A$, 则式(4)和式(5)可分别表示成如下形式:

$$\frac{d}{dt} i = A(\hat{i} + e) + Bu + C \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \hat{i} = (A + \Delta A)\hat{i} + Bu + \hat{C} \quad (7)$$

式(6)减式(7)可得误差方程:

$$\frac{de}{dt} = Ae - [\Delta A\hat{i} + \Delta C] = Ae - W \quad (8)$$

图 2 所示为由式(8)得到的一个等效的标准反馈系统。图 2 中, D 为增益矩阵,为了简化计算取 $D=I$ (单位矢量)。由于机械时间常数远大于电气常数,虽然式(3)中 ω_e 是变化的,但可近似为在每一个采样周期内 ω_e 不变,故图 2 中可以用一个线性时不变系统(LTI)来表示。

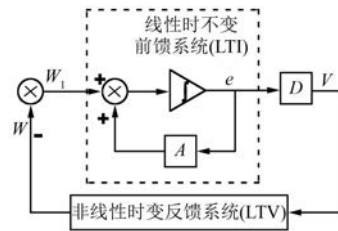


图 2 等效的非线性反馈系统

根据 Popov 超稳定理论,若系统渐近稳定,则图 2 所示非线性时变环节必须满足 Popov 不等式^[10],即

$$\eta(0, t_1) = \int_0^{t_1} V^T W dt \geq -\gamma^2 \quad \forall t_1 > 0 \quad (9)$$

式中: γ^2 ——一个有限正数。

由上文可知, $W = \Delta A \hat{i} + \Delta C, V^T = e^T$; 上文提及一个采样周期内 ω_e 可近似认为维持不变, 故可以简化处理式 (5) 中右边的 $\hat{\omega}_e$, 得到 $\Delta C =$

$$\begin{pmatrix} 0 & -\omega_e \frac{\hat{\varphi}_f - \varphi_f}{L} \end{pmatrix}^T, \text{而}$$

$$\Delta A = \hat{A} - A = \begin{pmatrix} 0 & \hat{\omega}_e - \omega_e \\ -(\hat{\omega}_e - \omega_e) & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} (\hat{\omega}_e - \omega_e) \quad (10)$$

令 $J = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$, 将 V 和 W 代入式 (9), 计算化简得:

$$\eta_1(0, t_1) = \int_0^{t_1} e^T (\hat{\omega}_e - \omega_e) J \hat{i} dt + \int_0^{t_1} -e^T \omega_e \frac{\hat{\varphi}_f - \varphi_f}{L} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} dt \geq -\gamma^2 \quad (11)$$

对 Popov 不等式逆向求解可得到自适应律。一些国内外文献给出了具体过程^[10], 在此不再赘述。自适应律一般选择积分加比例的形式, 故 $\hat{\omega}_e$ 和 $\hat{\varphi}_f$ 的自适应律为:

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_e &= \int_0^t K_{i\omega} \left[i_d \hat{i}_q - i_q \hat{i}_d - \frac{\varphi_f}{L} (i_q - \hat{i}_q) \right] d\tau + \\ K_{p\omega} \left[i_d \hat{i}_q - i_q \hat{i}_d - \frac{\varphi_f}{L} (i_q - \hat{i}_q) \right] &+ \hat{\omega}_e(0) \quad (12) \end{aligned}$$

$$\hat{\varphi}_f = - \left(K_{p\varphi} + \frac{K_{i\varphi}}{s} \right) \frac{\omega_e (i_q - \hat{i}_q)}{L} + \hat{\varphi}_f(0) \quad (13)$$

这样便完成了电机转速、永磁磁链的同时辨识, 基于磁链在线辨识的 MRAS 转速辨识系统的结构如图 3 所示。图 3 中的电流估计值 $\hat{i}_d, \hat{i}_q$ 通过 PMSM 数学模型[式(3)]的 dq 轴电压 u_d, u_q 得到, 在自适应律中按照数学模型计算, 具体实现在后文的仿真模块中。

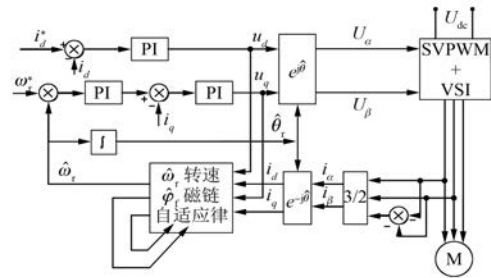


图3 基于磁链在线辨识的转速估计系统结构框图

3 仿真研究

本文利用 MATLAB/Simulink 来验证基于永磁磁链在线辨识的 PMSM 速度辨识算法。电机参数: 定子电阻 $R_s = 2.875 \Omega$, 绕阻电感 $L_d = L_q = 8.35 \text{ mH}$, 额定功率 $P_N = 1.1 \text{ kW}$, 永磁体磁链 $\varphi_f = 0.175 \text{ Wb}$, 转动惯量 $J = 0.000 62 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 极对数 $p=2$ 。整个系统的仿真模型如图 4 所示。

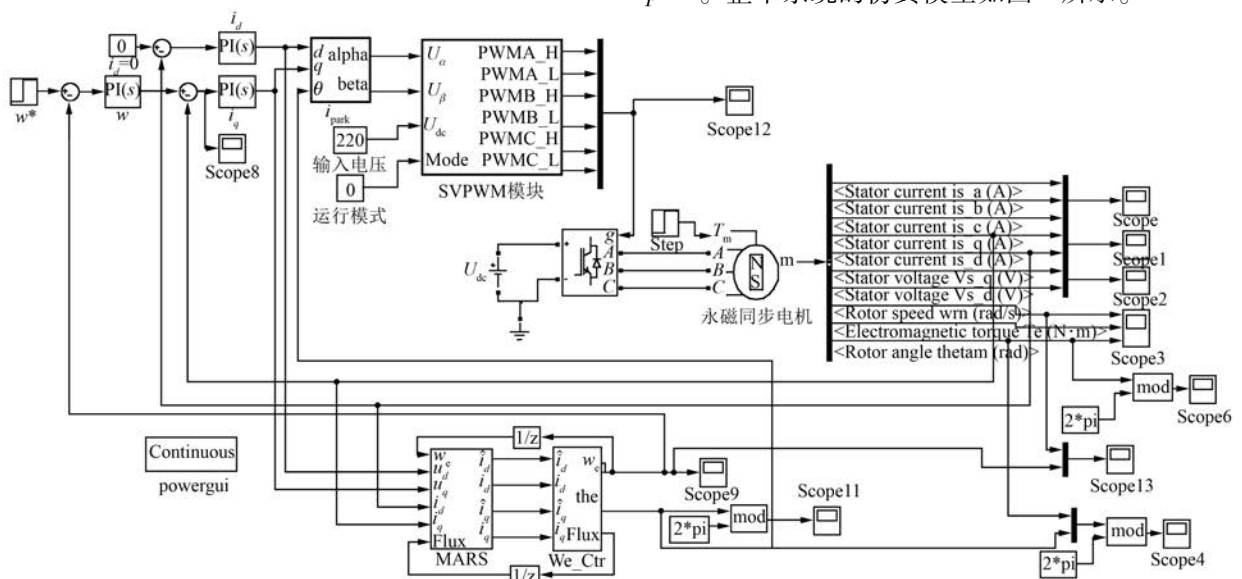


图4 基于永磁磁链在线辨识的无速度传感器系统的 MATLAB 仿真模型

搭建仿真来验证算法在负载突变和转速波动下的转速跟踪能力。参数设置为:仿真时长 1.6 s; $t=0.5$ s 时,负载转矩由初始 $1\text{ N}\cdot\text{m}$ 突变为 $10\text{ N}\cdot\text{m}$; $t=1.0$ s 时,转速由初始 600 rad/s 突变为 800 rad/s 。图 5(a)所示为转速辨识结果,在 0.5 s 时负载突然变化,经约 0.2 s 后转速能收敛到设定值;另外 1 s 时转速突增,约 0.45 s 后转速仍回到设定转速。图 5(b)为相应的位置观测波形。可以看出除起动和转速突变过程中存在一定的误差,但最终均能稳定在设定值,整个系统转速的稳态误差很小。图 5(c)为永磁磁链 φ_f 的在线辨识波形,起动和转速突变时有不同程度的波动,但在较短时间后均能收敛到实际值,具有较高的辨识精度。

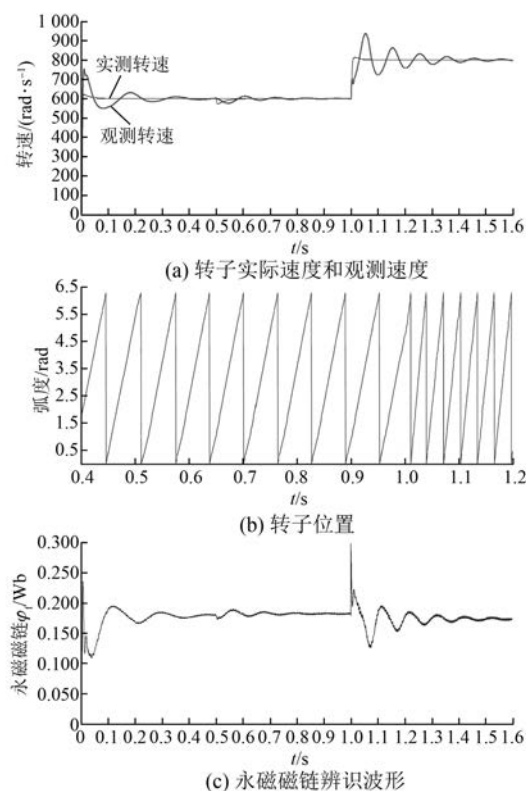


图5 负载扰动和转速突变时的仿真波形

由仿真试验可得,本文所提出的基于永磁磁链在线辨识的 PMSM 速度辨识方案利用估算的 φ_f 值在线修改永磁同步电机的永磁磁链值,较好地实现了转速估计,同时保证了参数估计的唯一性和收敛性。辨识转速和实际速度基本一致,转速和负载突变时虽然产生了一定的波动,但是均很快收敛到稳定值。仿真试验验证了本文设计的方案的有效性。

4 结 语

为了降低 PMSM 无传感器控制对永磁磁链参数 φ_f 十分敏感的问题,本文研究了一种基于永磁磁链在线辨识的 PMSM 转速辨识方案。文中确保辨识模型满秩,解决了选取不同积分参数导致结果产生大的变化甚至发散的问题。在保证辨识参数收敛性和唯一性的前提下,辨识参数在线修改 PMSM 永磁磁链 φ_f ,降低了 MRAS 对电机参数的敏感性。仿真结果验证了所提出方案在负载和转速突变的情况下均能准确跟踪转子的速度以及位置,提高了无位置传感器控制的精度。

【参考文献】

- [1] 韩世东,张广明,梅磊.基于瞬时无功型 MRAS 的 PMSM 无速度传感器控制[J].电气传动,2016,46(10): 13-16.
- [2] 刘侃.永磁同步电机多参数在线辨识研究[D].长沙:湖南大学,2011.
- [3] 邱腾飞,温旭辉,赵峰.永磁同步电机永磁磁链自适应观测器设计方法[J].中国电机工程学报,2015,35(9): 2287-2294.
- [4] 韩世东,张广明,梅磊.基于 MRAS 参数辨识的 PMSM 无速度传感器控制[J].电机与控制应用,2016,43(1): 7-11.
- [5] 安群涛,孙力,赵克.一种永磁同步电动机参数的自适应在线辨识方法[J].电工技术学报,2008,23(6): 31-36.
- [6] 陈振锋,钟彦儒,李洁.嵌入式永磁同步电机自适应在线参数辨识[J].电机与控制学报,2010,14(4): 9-13.
- [7] RASHED M, MACCONNELL P F A, STRONACH A. Sensorless indirect-rotor-field-orientation speed control of a permanent-magnet synchronous motor with stator-resistance estimation [J]. IEEE Trans Ind Electron,2007,54(3): 1664-1675.
- [8] 史宇超,孙凯,马鸿雁,等.内埋式永磁同步电机永磁磁链的在线辨识[J].电工技术学报,2011,26(9): 48-53.
- [9] 杨宗军,王莉娜.表贴式永磁同步电机的多参数在线辨识[J].电工技术学报,2014,29(3): 111-117.
- [10] 王成元,夏加宽,孙宜标.现代电机控制技术[M].北京:机械工业出版社,2008.

收稿日期: 2017-06-01