

高速永磁同步电机模型参考自适应转速观测

何延昭^{1,2},王贞艳³,王金霞³,魏大忠^{1,2},张猛¹

(1.北京轩宇空间科技有限公司,北京 100190;2.北京控制工程研究所,北京 100190;
3.太原科技大学 电子信息工程学院,山西 太原 030024)

摘要:针对高速永磁同步电机(HS-PMSM)无位置传感器矢量控制,提出一种基于模型参考自适应(MRAS)的电机转速观测方法。该方法将HS-PMSM作为参考模型, d, q 轴定子电流数学模型作为可调模型。利用模型输出转速偏差,借助Popov超稳定性理论构造了一种转速观测自适应律,实现了HS-PMSM转速的准确观测。最后,对基于MRAS的HS-PMSM无位置传感器矢量控制系统进行了仿真和实验验证。结果表明,所提出的方法具有良好的动态响应和稳态响应,转速观测精度高,鲁棒性强,无位置传感器HS-PMSM运行良好。

关键词:高速永磁同步电机;模型参考自适应;旋转坐标系;转速观测

中图分类号:TM341;TM355 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqed19873

Speed Observation for High-speed Permanent Magnet Synchronous Motor with Model Reference Adaptive System

HE Yanzhao^{1,2}, WANG Zhenyan³, WANG Jinxia³, WEI Dazhong^{1,2}, ZHANG Meng¹

(1. Beijing Sunwise Space Technology Ltd, Beijing 100190, China; 2. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China; 3. School of Electronics and Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract: For sensorless vector control of high-speed permanent magnet synchronous motor(HS-PMSM), a speed observation method based on model reference adaptive system(MRAS) was proposed. The HS-PMSM was used as the reference model. Meanwhile, the d, q axis stator current mathematical model was used as the adjustable model. According to the output speed deviation of the two models and the Popov superstability theory, an adaptive law of speed observation was constructed, and the accurate speed observation of the HS-PMSM was realized. Finally, the simulation and experiment of the sensorless vector control system with HS-PMSM based on MRAS was established. The results show that the proposed method can realize good dynamic and steady-state response, high accuracy observation of the rotor speed robustly, and realize the sensorless operation of the HS-PMSM well.

Key words: high speed permanent magnet synchronous motor(HS-PMSM); model reference adaptive system(MRAS); rotating coordinate system; speed observation

非接触式轴承支撑的高速永磁同步电机(HS-PMSM)具有调速范围宽、功率密度大、效率高、体积小、重量轻、噪音低等优点^[1]。HS-PMSM直驱负载省去了增速箱,有效地提高了系统级效率,在鼓风机、压缩机、储能飞轮、分子泵等高速设备的应用中快速增长^[2]。矢量控制是永磁同步电机常用的驱动方式^[3]。高效高精度的矢量控制需要精确的转子角位置信息^[4]。转子角位置信息

通常采用光电式位置传感器采集,而位置传感器的选用需要考虑HS-PMSM本体和驱动系统的设计约束,如高速电机散热影响、安装空间限制、高速轴系模态制约和电磁兼容考虑等^[5]。而采用无位置传感器矢量控制算法驱动HS-PMSM不受上述设计约束,且克服了由位置传感器安装角度偏差所引起的换相不准确和转矩脉动等问题,提高了系统可靠性,同时降低了系统成本^[6]。因此,

基金项目:山西省青年科技研究基金(201701D221108);太原科技大学博士科研基金资助项目(20142004)

作者简介:何延昭(1981—),男,博士,工程师,Email:he.yanzhao@163.com

无位置传感器控制方法研究是HS-PMSM驱动控制的核心内容之一。

在诸多无位置传感器控制方法中,模型参考自适应法(MRAS)因其结构简单、收敛稳定而被广泛采用^[3,7]。模型参考自适应最早由Schauder C.提出用于电机转速观测^[8],通常采用Popov超稳定性理论^[9-10]和Lyapunov稳定性理论^[11-12]设计自适应律以保证观测器的渐进收敛性。目前,MRAS与其他控制算法结合进行电机转速观测,如滑模变结构^[13-14]、高频信号注入法^[15]、模糊控制^[1,16]、神经网络^[17]和最小二乘法^[18]等。MRAS也可用于电机阻感参数辨识和磁链观测^[19-20]。基于MRAS的电机控制在低速下能良好运行^[7,21],也可首先电流闭环启动^[22]再根据切换算法^[23]切换到转速电流双闭环运行。文献[24]用定子反馈电压进行转速观测,文献[25]仅估算 q 轴电流用于转速MRAS自适应观测,但通常既估算 d 轴电流又估算 q 轴电流^[26]。

本文针对HS-PMSM无位置传感器适量控制需求,提出了一种基于MRAS的转速观测方法。首先根据MRAS原理和HS-PMSM旋转坐标系电流模型,选取了参考模型和可调模型。然后根据Popov超稳定性理论推导了HS-PMSM转速观测算法,并给出了交直流电流离散化观测公式。最后,在Matlab/Simulink仿真环境建立了基于MRAS的HS-PMSM无位置传感器矢量控制系统模型,对所提出的转速观测方法进行了验证。

1 模型参考自适应原理和高速永磁同步电机数学模型简介

本节介绍了模型参考自适应的原理,给出了MRAS的基本结构图和设计思想。结合被控对象高速永磁同步电机在旋转坐标系下的定子电流数学模型,选取了参考模型、可调模型和待观测参数。

1.1 模型参考自适应原理简介

模型参考自适应的基本结构如图1所示。其基本思想是设计一个不含未知参数的参考模型 $G(\cdot)$ 与一个含有待观测参数的可调模型 $\hat{G}(\cdot)$ 。两个模型被相同的外部输入 u 所激励,并具有相同物理意义的输出量 x 和 \hat{x} 。该2个输出量之间的广义误差 e 被送入自适应律 $f(\cdot)$,通过调节可调模型 $\hat{G}(\cdot)$ 中的待观测参数使广义误差 e 趋近于零,从而实现参数观测。

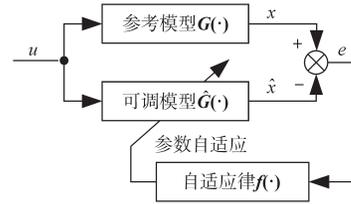


图1 模型参考自适应的基本结构

Fig.1 Fundamental structure of MRAS

1.2 旋转坐标系高速永磁同步电机定子电流数学模型

本文研究对象HS-PMSM为表贴式永磁同步电机,直轴电感和交轴电感相等。该电机在旋转坐标系(d, q 轴)下定子电流数学模型为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}i_d + \omega_r i_q + \frac{u_d}{L_s} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}i_q - \omega_r i_d + \frac{u_q - \omega_r \Psi_r}{L_s} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d, u_q 为 d, q 轴定子电压; i_d, i_q 为 d, q 轴定子电流; R_s, L_s 分别为定子电阻和定子电感; ω_r 为转子电角速度; Ψ_r 为转子永磁体磁链。

根据上述HS-PMSM数学模型,可以看出该定子电流模型与电机转速有关。因此可以选取HS-PMSM本身作为参考模型,式(1)所示定子电流模型为可调模型, ω_r 为待观测参数。

2 基于MRAS的HS-PMSM无位置传感器转速观测方法

为便于分析系统稳定性,将转子电角速度约束在系统矩阵中,因此将式(1)控制量和状态变量做相应变换,改写为如下矩阵形式:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d + \frac{\Psi_r}{L_s} \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d + \frac{\Psi_r}{L_s} \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} u_d + \frac{R_s \Psi_r}{L_s} \\ u_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

令

$$\begin{cases} i'_d = i_d + \frac{\Psi_r}{L_s} \\ i'_q = i_q \\ u'_d = u_d + \frac{R_s \Psi_r}{L_s} \\ u'_q = u_q \end{cases} \quad (3)$$

定义 i'_d 和 i'_q 为状态变量,则由式(2)可得参考模型:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

根据式(4)建立可调模型:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}'_d \\ \hat{i}'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \hat{\omega}_r \\ -\hat{\omega}_r & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}'_d \\ \hat{i}'_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\hat{\omega}_r$ 为转速观测值; \hat{i}'_d, \hat{i}'_q 为可调模型中状态变量 d, q 轴定子电流观测值。

将式(4)HS-PMSM参考模型简写为

$$\frac{d}{dt} \mathbf{i}'_s = \mathbf{A} \mathbf{i}'_s + \mathbf{B} \mathbf{u}'_s \quad (6)$$

其中

$$\mathbf{i}'_s = \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} \quad \mathbf{u}'_s = \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \frac{1}{L_s}$$

同理,式(5)HS-PMSM可调模型简写为

$$\frac{d}{dt} \hat{\mathbf{i}}'_s = \mathbf{A}' \hat{\mathbf{i}}'_s + \mathbf{B} \mathbf{u}'_s \quad (7)$$

其中

$$\hat{\mathbf{i}}'_s = \begin{bmatrix} \hat{i}'_d \\ \hat{i}'_q \end{bmatrix} \quad \mathbf{A}' = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \hat{\omega}_r \\ -\hat{\omega}_r & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix}$$

定义状态变量广义误差: $\mathbf{e} = \mathbf{i}'_s - \hat{\mathbf{i}}'_s$,将式(4)与式(5)相减,可得定子电流矢量的误差方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} - \mathbf{J}(\omega_r - \hat{\omega}_r) \begin{bmatrix} \hat{i}'_d \\ \hat{i}'_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中 $e_d = i'_d - \hat{i}'_d$ $e_q = i'_q - \hat{i}'_q$ $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$

将式(8)简写为

$$\frac{d\mathbf{e}}{dt} = \mathbf{A}_e \mathbf{e} - \mathbf{W} = \mathbf{A}_e \mathbf{e} + \mathbf{W}_1 \quad (9)$$

其中 $\mathbf{A}_e = \mathbf{A}$ $\mathbf{W} = (\omega_r - \hat{\omega}_r) \mathbf{J} \hat{\mathbf{i}}'_s$ $\mathbf{W}_1 = -\mathbf{W}$

式(1)所示的HS-PMSM定子电流方程是非线性方程,转速 ω_r 为时变参数;但在定载波频率数字控制系统中,一个采样周期内 ω_r 是定值,因此,式(5)可视为线性定常系统。通过转速自适应律的反馈调节,当广义误差 \mathbf{e} 为零时,有转速观

测值 $\hat{\omega}_r$ 等于转速实际值 ω_r ,即 $\hat{\omega}_r = \omega_r$ 。根据真实性原理和波波夫超稳定性理论可以证明,该反馈系统是渐进超稳定系统,并选择比例积分(proportion integral, PI)控制器作为自适应调节结构,这里不再赘述。在MRAS渐进稳定的条件下,通过逆向求解波波夫积分不等式可得HS-PMSM转子电角速度观测算法:

$$\hat{\omega}_r = k_p [i_d \hat{i}_q - i_q \hat{i}_d - \frac{\Psi_r}{L_s} (i_q - \hat{i}_q)] + \int_0^t k_i [i_d \hat{i}_q - i_q \hat{i}_d - \frac{\Psi_r}{L_s} (i_q - \hat{i}_q)] dt \quad (10)$$

式中: i_d, i_q 为参考模型实测值; \hat{i}_d, \hat{i}_q 为可调模型计算值; k_p, k_i 为PI控制器比例和积分增益。

HS-PMSM转子电角速度观测算法通常离散计算,由式(1)可得离散化定子电流参考模型:

$$\begin{cases} \frac{i_d(k+1) - i_d(k)}{T_s} = -\frac{R_s}{L_s} i_d(k+1) + \omega_r i_q(k+1) + \frac{u_d}{L_s} \\ \frac{i_q(k+1) - i_q(k)}{T_s} = -\frac{R_s}{L_s} i_q(k+1) - \omega_r i_d(k+1) - \frac{\Psi_r}{L_s} + \frac{u_q}{L_s} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $i_d(k), i_d(k+1), i_q(k), i_q(k+1)$ 为参考模型离散电流值,可由任意两相电流直接测量并坐标变换得到; T_s 为采样周期。

根据式(11)建立可调模型,并变形可得:

$$\begin{cases} \hat{i}'_d(k+1) = \frac{1}{R_s T_s + L_s} \{ L_s \cdot \hat{i}'_d(k) + [\hat{\omega}_r L_s \cdot \hat{i}'_q(k+1) + \hat{u}_d] T_s \} \\ \hat{i}'_q(k+1) = \frac{1}{R_s T_s + L_s} \{ L_s \cdot \hat{i}'_q(k) + [-\hat{\omega}_r L_s \cdot \hat{i}'_d(k+1) + \hat{u}_d - \Psi_r] T_s \} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\hat{i}'_d(k), \hat{i}'_d(k+1), \hat{i}'_q(k), \hat{i}'_q(k+1)$ 为可调模型离散电流值; \hat{u}_d, \hat{u}_q 为可调模型离散电压值,可选取为矢量控制中计算得到的交直流电压。

图2为基于MRAS的HS-PMSM转子电角速度观测框图。图2中,电流误差经过PI控制器得到观测电角速度信号 $\hat{\omega}_r$,会使得可调模型输出值 \hat{i}'_d, \hat{i}'_q 逼近参考模型输出值 i_d, i_q ,也就使观测电角速度 $\hat{\omega}_r$ 逼近实际电角速度 ω_r ,从而达到转速辨识的目的。将所观测HS-PMSM转子电角速度进行积分运算后可得转子电角位置,并用于矢量控制坐标变换中。根据自动控制理论中的分离原理,将观测值应用到反馈系统不会影响整个系统的

特性,故所构造的HS-PMSM电角速度自适应观测器渐进超稳定。

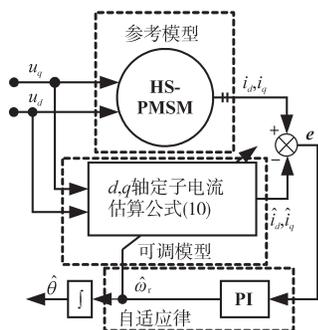


图2 基于MRAS的HS-PMSM转子电角速度观测框图
Fig.2 Diagram of HS-PMSM rotor electric angular velocity observation based on MRAS

3 仿真验证

为验证本文所提出观测方法的有效性,本节对基于MRAS的HS-PMSM无位置传感器矢量控制进行了仿真研究如图3所示,并和HS-PMSM有位置传感器矢量控制进行了对比。

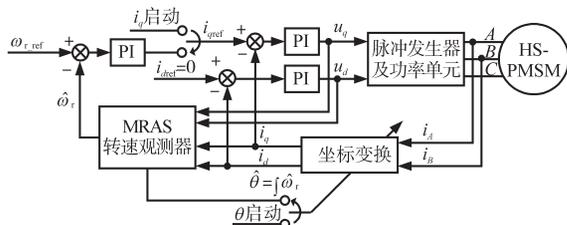


图3 基于MRAS的HS-PMSM无位置传感器矢量控制原理图
Fig.3 Diagram of sensorless HS-PMSM vector control based on MRAS

仿真研究基于软件 Matlab (R2014a)/Simulink (Version 8.3) 进行,定步长为 8.3×10^{-6} ,算法为 ode3,仿真时间设置为 10 s。被测 HS-PMSM 在 20°C 时参数设置如下:相电阻 $R_s=0.122 \Omega$,交直流电感 $L_s=0.675 \text{ mH}$,永磁体磁链幅值 $\Psi_f=0.0406 \text{ Wb}$,极对数 1,额定转速 $n=30000 \text{ r/min}$ 。矢量控制系统中 3 个闭环控制器采用增量式 PI 控制器,转速环、电流环和 MARS 环控制器参数如表 1 所示。文中定义,采用基于 MRAS 的 HS-PMSM 无位置传感器 $L_s \cdot \hat{i}_q(k) + [-\hat{\omega}_r L_s \cdot \hat{i}_d(k+1) + \hat{u}_d - \Psi_f] T_s$ 矢量控制算法时,电机转速为 speed_MRAS, q 轴电流为 i_{q_MRAS} ;采用 HS-PMSM 有位置传感器矢量控制算法时,电机转速为 speed_sensor, q 轴电流为 i_{q_sensor} ,下标表示不同工况下的电机转速和 q 轴电流。

表1 PI控制器参数

序号	参数	取值	备注
1	k_{p1}	0.10	转速环比例系数
2	k_{i1}	0.46	转速环积分系数
3	k_{p2}	0.36	电流环比例系数
4	k_{i2}	2.00	电流环积分系数
5	k_{p3}	0.063 8	MRAS 环比例系数
6	k_{i3}	10.50	MARS 环积分系数

3.1 变转速仿真研究

电机给定转速在 5 s 前设定为 30 000 r/min, 5 s 时刻电机给定转速设定为 20 000 r/min, 8 s 时刻电机给定转速恢复为 30 000 r/min。图 4 为电机转速 speed_MRAS1 和 speed_sensor1, q 轴电流 i_{q_MRAS1} 和 $i_{q_sensor1}$ 波形图。

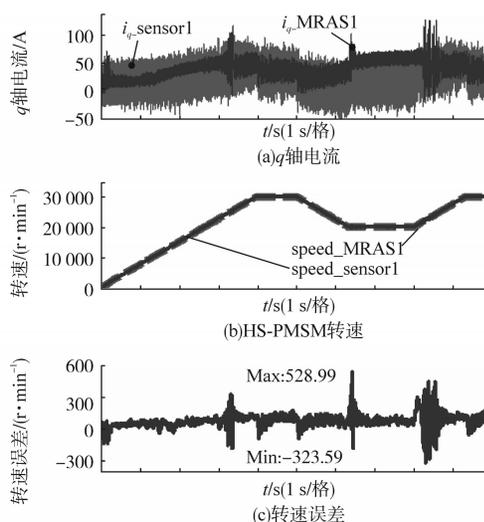


图4 HS-PMSM 变速度工况对比仿真研究波形图
Fig.4 Comparative simulation study waveforms of HS-PMSM variable speed operation

3.2 变载荷仿真研究

电机给定转速为稳速 30 000 r/min, 6 s 前电机载荷为叶轮性载荷,即转矩与转速平方成正比,转速稳定时载荷为 $3.6 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。6 s 时刻电机载荷增加为 $5 \text{ N}\cdot\text{m}$, 8 s 时刻电机载荷恢复为 $3.6 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。图 5 为电机转速 speed_MRAS2 和 speed_sensor2 的 q 轴电流 i_{q_MRAS2} 和 $i_{q_sensor2}$ 波形图。

3.3 变转速变载荷仿真研究

电机给定转速在 5 s 前为 30 000 r/min, 5 s 时刻电机给定转速变化为 20 000 r/min, 8 s 时刻电机给定转速恢复为 30 000 r/min。同时, 6 s 前电机载荷为叶轮性载荷,约为 $2.02 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。7~9 s 刻电机载荷增加为定载荷 $5 \text{ N}\cdot\text{m}$, 9 s 时刻电机载荷恢复为叶轮性载荷,约为 $3.03 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。图 6 为电机

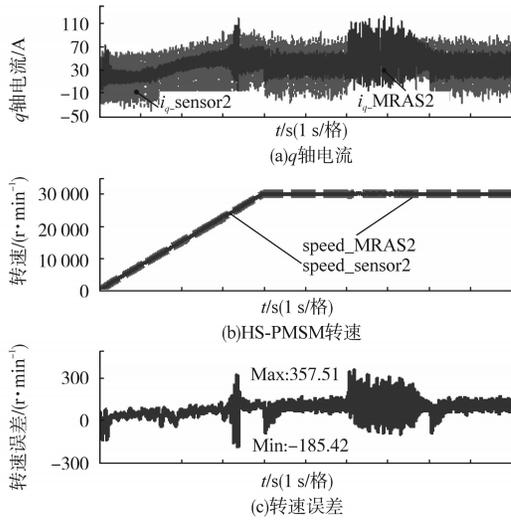


图5 HS-PMSM变负载工况对比仿真研究波形图
Fig.5 Comparative simulation study waveforms of HS-PMSM variable load operation

转速 speed_MRAS3 和 speed_sensor3, q 轴电流 i_{q_MRAS3} 和 $i_{q_sensor3}$ 波形图。

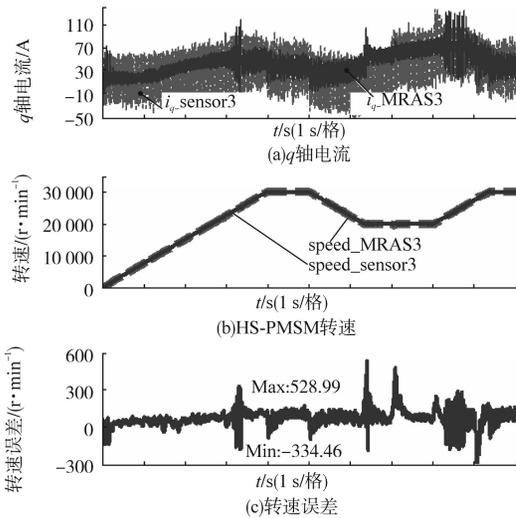


图6 HS-PMSM变负载变转速工况对比仿真研究波形图
Fig.6 Comparative simulation study waveforms of HS-PMSM variable load and variable speed operation

3.4 阻感参数摄动仿真研究

对比仿真工况为变转速,变转速仿真研究结果 speed_MRAS1 和 i_{q_MRAS1} 同 3.1 节。4.5 s 时刻电机阻感参数 R_s 和 L_s 由电机模型参数跳变, R_s 增大为 1.5 倍, L_s 减小为 0.99 倍, 永磁体磁链幅值保持不变。

图 7 为阻感参数摄动时的 q 轴电流 i_{q_MRAS4} 和 i_{q_MRAS1} , 电机转速 speed_MRAS4 和 speed_MRAS1 波形图。

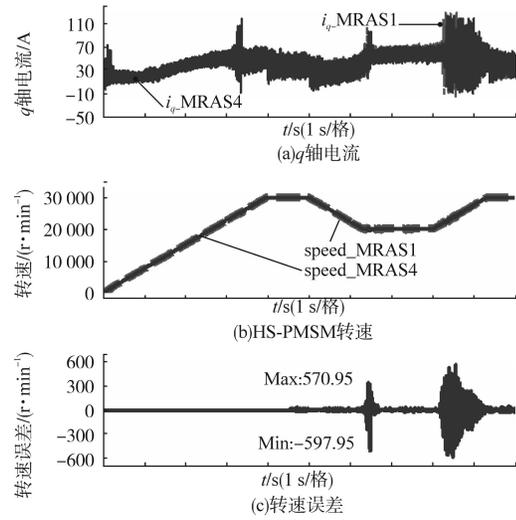


图7 HS-PMSM阻感参数摄动对比仿真研究波形图
Fig.7 Comparative simulation study waveforms of HS-PMSM resistance and inductance parameter perturbation

3.5 变控制器参数仿真研究

对比仿真工况为变转速,变转速仿真研究结果 speed_MRAS1 和 i_{q_MRAS1} 同 3.1 节。4.5 s 时刻 MRAS 环 PI 控制器参数 k_p 和 k_i 均增大为原参数的 2 倍, 电流环和转速环 PI 控制器参数保持不变。图 8 为变 MRAS 环 PI 控制器参数时的 q 轴电流 i_{q_MRAS5} 和 i_{q_MRAS1} , 电机转速 speed_MRAS5 和 speed_MRAS1。

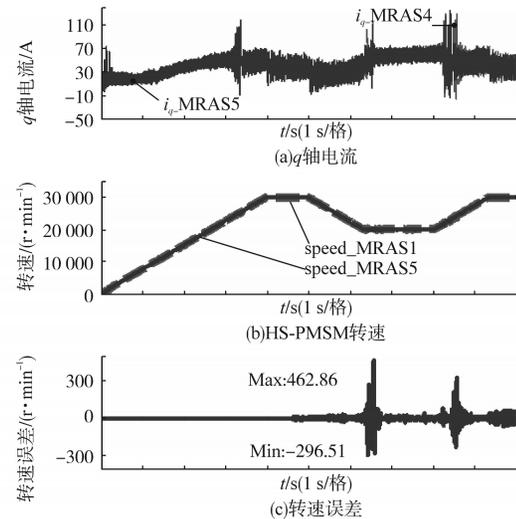


图8 变MRAS环PI控制器参数对比仿真研究波形图
Fig.8 Comparative simulation study waveforms of MRAS loop PI controller variable parameter

3.6 与静止坐标系MRAS转速观测对比仿真研究

将旋转坐标系(d, q 轴)MRAS转速观测方法与静止坐标系(α, β 轴)MRAS转速观测方法进行对比仿真研究。图9中对比仿真工况为变转速,

旋转坐标系下变转速仿真研究结果 $speed_MRAS1$ 和 i_q_MRAS1 同3.1节,静止坐标系下MRAS转速观测波形,电机转速 $speed_MRAS6$, q 轴电流 i_q_MRAS6 。从对比波形可以看出,两种MRAS转速观测方法均可实现HS-PMSM高速稳定运行,稳速精度和动态性能基本相当。静止坐标系MRAS转速稳速控制精度略高,但存在切换时刻转速波动大的现象。提高转速观测动态和稳态精度,是改进MRAS转速观测的研究方向之一。

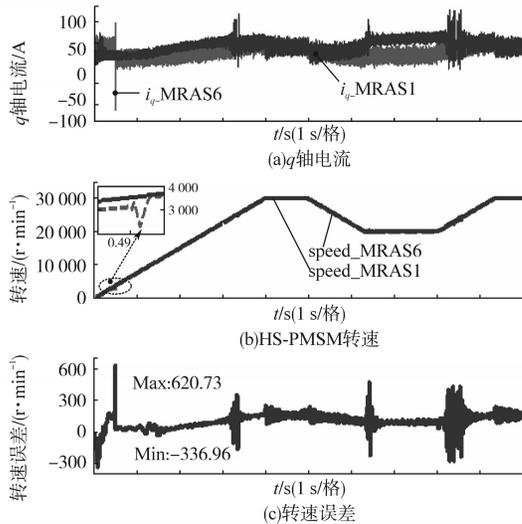


图9 与静止坐标系MRAS转速观测对比仿真研究波形图
Fig.9 Comparative simulation study waveforms of stationary reference frame MRAS speed observation

4 实验验证

为进一步验证本文所提出观测方法的有效性,搭建了HS-PMSM系统实验平台对基于MRAS的无位置传感器矢量控制进行了实验验证,被测HS-PMSM参数同第3节。实验平台为基于数字控制器(DSP)的电压源逆变器驱动平台,包括DSP控制器、功率电路和自研HS-PMSM。所用DSP控制器采用TMS320F28335芯片,该芯片是美国德州仪器(texas instruments, TI)推出的一款32位浮点型DSP处理器芯片。功率电路中的逆变桥模块为德国英飞凌公司推出的六单元逆变桥模块FS450R12KE4,其驱动板为瑞士CONCEPT公司推出的专用配套电路板6SD312EI。矢量控制载波频率设定12 kHz,即中断周期为 $8.33e-5$ s,与仿真验证中相同。波形图中转速和电流序号定义同第3节。

4.1 变转速实验研究

HS-PMSM电机给定转速在4 s前设定为

24 000 r/min,4 s时刻电机给定转速设定为18 000 r/min,6 s时刻电机给定转速恢复为24 000 r/min。图10为 q 轴电流 i_q_MRAS7 。电机转速 $speed_MRAS7$ 和转速环给定转速 $speed_ref$ 及转速误差波形图。

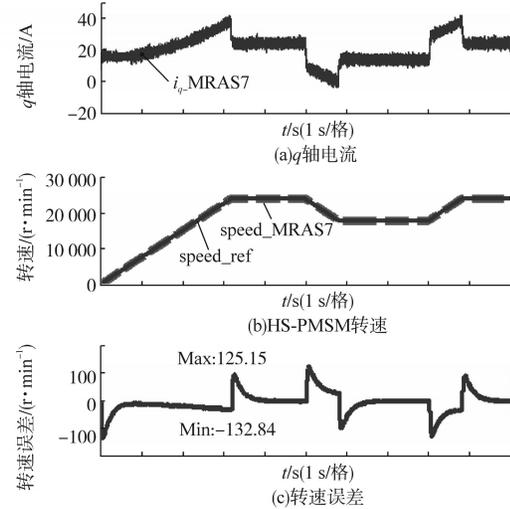


图10 HS-PMSM变速度工况实验研究波形图

Fig.10 Experimental study waveforms of HS-PMSM variable speed operation

4.2 变控制器参数实验研究

对比实验工况为变转速,变转速实验研究结果 $speed_MRAS6$ 和 i_q_MRAS6 同4.1节。改变MRAS环PI控制器参数 k_p 和 k_i 均增大为原参数的2倍,电流环和转速环PI控制器参数保持不变。图11为变MRAS环PI控制器参数时, q 轴电流 i_q_MRAS8 和 i_q_MRAS7 ,电机转速 $speed_MRAS8$ 和 $speed_MRAS7$ 及转速误差。

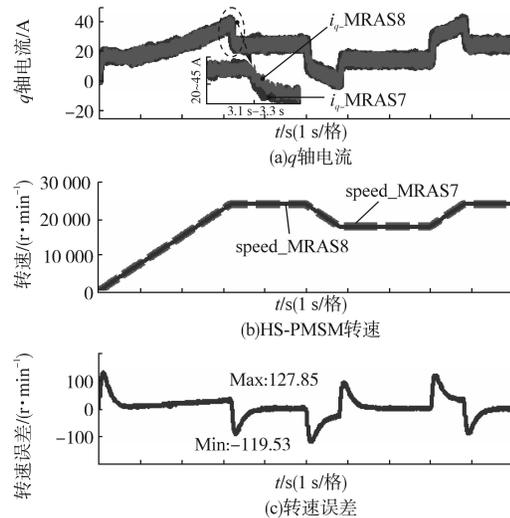


图11 变MRAS环PI控制器参数对比实验研究波形图

Fig.11 Comparative experimental study waveform of MRAS loop PI controller variable parameter

5 结论

本文基于Popov超稳定性理论,对基于MRAS的HS-PMSM无位置传感器转速观测方法进行了研究。将HS-PMSM作为参考模型,建立HS-PMSM旋转坐标系数学模型作为可调模型。参考模型和可调模型均含有相同物理意义的转子电角速度,但参考模型与可调模型分别输出的转子电角速度之间存在偏差。用该偏差构造一种自适应律来调节可调模型中的待观测转子电角速度,实时跟踪HS-PMSM实际转子角速度。最后,本文基于MRAS的HS-PMSM无位置传感器矢量控制系统,对所提出的转速观测方法进行了仿真和实验验证。结果表明,本文提出的基于MRAS的HS-PMSM无位置传感器矢量控制方法在不同的工况下具有良好的动态响应和稳态响应,观测转速有较高的精度,系统有较强的鲁棒性,无位置传感器HS-PMSM运行良好。基于MRAS的HS-PMSM无位置传感器矢量控制算法适用于HS-PMSM高速变频驱动。

参考文献

- [1] 张洪帅,王平,韩邦成. 基于模糊PI模型参考自适应的高速永磁同步电机转子位置检测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12):1889-1896.
- [2] 何延昭,王贞艳,郑世强. 基于在线最小二乘支持向量机逆系统的高速永磁同步电机解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20):5639-5646.
- [3] 梁艳,李永东. 无传感器永磁同步电机矢量控制系统概述[J]. 电气传动, 2003, 33(4):4-9.
- [4] He YZ, Wang ZY. High Performance Control of High-speed PMSM Based on LS-SVM Inverse System Method[J]. Electric Power Components and Systems, 2017, 45(1):99-110.
- [5] Wang ZY, He YZ. A New Initial Rotor Angle Position Estimation Method for High-speed Brushless Direct Current Motor Using Current Injection and Mathematical Model[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-transactions of the ASME, 2018, 140(7):1-8.
- [6] He YZ, Zheng SQ, Fang JC. Start-up Current Adaptive Control For Sensorless High-speed Brushless DC Motor Based on Inverse System Method and Internal Model Controller[J]. Journal of Aeronautics, 2017, 30(1):358-367.
- [7] 张猛,李永东,赵铁夫,等. 一种减小变频器空调压缩机低速范围内转速脉动的方法[J]. 电工技术学报, 2006, 21(7):99-104.
- [8] Schauder C. Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction Motors Without Rotational Transducers[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28(5):1054-1061.
- [9] 禹继贤,颜钢锋,张斌. 基于MRAS的永磁同步电机无传感器控制[J]. 机电工程, 2015, 32(9):1222-1228.
- [10] 王杰,谢源,谢涛,等. 基于MRAS的永磁同步电机无传感器矢量控制研究[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(1):30-34.
- [11] 滕青芳,柏建勇,朱建国,等. 基于滑模模型参考自适应观测器的无速度传感器三相永磁同步电机模型预测转矩控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(2):150-161.
- [12] 尚飞,霍海波. 永磁同步电机滑模变结构MRAS转速辨识[J]. 电气传动, 2017, 47(2):9-14.
- [13] 朱瑛,程明,花为,等. 基于滑模变结构模型参考自适应的电气无级变速器无传感器控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2):64-72.
- [14] Zhao Yue, Qiao Wei, Wu Long. Improved Rotor Position and Speed Estimators for Sensorless Control of Interior Permanent-magnet Synchronous Machines[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(3):627-639.
- [15] 秦峰,贺益康,贾洪平. 基于转子位置自检复合方法的永磁同步电机无传感器运行研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3):12-17.
- [16] Mei Yang, Sun Kai, Shi Yuchao. A 2-D Fuzzy Logic Based MRAS Scheme for Sensorless Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drives with Cyclic Fluctuating Loads[J]. Chinese Journal of Electric Engineering, 2015, 1(1):85-91.
- [17] 于霜,储建华. 基于DRNN-MRAS参数自整定的异步电机转速估计[J]. 电气传动, 2017, 47(11):3-8.
- [18] 张华强,严洪峰,冷艳礼,等. 基于模型参考自适应的PMSM在线辨识研究[J]. 电气传动, 2015, 45(12):3-7.
- [19] 尹忠刚,张延庆,孙向东,等. 基于级联MRAS的PMSM参数在线辨识方法研究[J]. 电气传动, 2015, 45(4):19-24.
- [20] 孙嘉伟,郑泽东,李永东. 无差拍直接转矩控制的MRAS参数辨识方法[J]. 电气传动, 2018, 48(5):3-7.
- [21] 张伯泽,阮毅. 基于MRAS内置式永磁同步电机无位置传感器控制研究[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(4):13-16.
- [22] 艾顺义,刘刚,何延昭,等. 基于QCSI的高速无刷直流电机起动方法研究[J]. 微电机, 2013, 46(4):61-65.
- [23] He YZ, Wang ZY, Wei DZ, et al. A Dual-mode Operation and Smooth Transition Control of Sensorless High-speed Permanent Magnet Synchronous Motor[C]//Proceeding of the 36th Chinese Control Conference(CCC2017), 2017: 26-28.
- [24] Omer Cihankivanc, Salihbarisozturk. Sensorless PMSM Drive Based on Stator Feedforward Voltage Estimation Improved with MRAS Multiparam Eterestimation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(3):1326-1337.
- [25] 齐放,邓智泉,仇志坚,等. 基于MRAS的永磁同步电机无速度传感器[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4):53-58.
- [26] 韩世东,张广明,梅磊,等. 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):7-16.

收稿日期:2019-01-15

修改稿日期:2019-03-27