

永磁同步电机矢量控制双滑模模型参考 自适应系统转速辨识

王庆龙¹, 张兴², 张崇巍²

(1. 合肥学院电子信息与电气工程系, 安徽省 合肥市 230601;

2. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽省 合肥市 230009)

Double Sliding-mode Model Reference Adaptive System Speed Identification for Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motors

WANG Qinglong¹, ZHANG Xing², ZHANG Chongwei²

(1. Department of Electronics and Electrical Engineering, Hefei University, Hefei 230601, Anhui Province, China;

2. College of Electrical and Automatic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui Province, China)

ABSTRACT: The use of encoders reduces the ruggedness and reliability for the vector control system of permanent magnet synchronous motor; Also, in some cases the mounting of the encoders is a major problem. In theory, speed and rotor position angle of permanent magnet synchronous motor can in real-time be calculated by voltage and current. This paper proposes a sensorless speed control strategy for a permanent magnet synchronous motor (PMSM) based on a new double sliding-mode model reference adaptive system, and the PMSM itself is selected as the reference model and its current model as the adjustable model. Two slide-mode surfaces are formulated according to two models' output errors. Equivalent current is obtained by sliding mode, and rotor position and speed are achieved by a certain algorithm. The rotor position and speed obtained are used respectively to partake coordinate transformation and speed control in sensorless vector control of PMSM. The simulation research has been done on the basis of theoretical analysis, and shows that the proposed method is effective

KEY WORDS: permanent magnet synchronous motor (PMSM); double sliding-mode; model reference adaptive system (MRAS); speed-sensor-less; speed identification

摘要: 编码器的使用降低了永磁同步电机矢量控制系统的可靠性和耐用性,且某些场合无法安装编码器。理论上可以通过永磁同步电机的电压和电流实时计算出电机的转速和转子位置角度。该文提出了一种基于双滑模模型参考自适应系统(model reference adaptive system, MRAS)的永磁同步电机无位置传感器控制策略。其中,参考模型为永磁电机本身,可调模型为永磁电机电流模型。利用两模型输出的偏差构造了2个滑模面,将通过滑模算法获得的等效控制进行运算即

可获得电机的转速和转子位置角度,并分别用于矢量控制系统的速度调节和坐标变换。在理论分析的基础上进行了仿真研究,仿真结果表明所提出的观测方法是有效的。

关键词: 永磁同步电机;双滑模;模型参考自适应系统;无速度传感器;转速辨识

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)由于具有高转矩惯性比、高效率及高功率密度,在工业驱动领域应用前景广阔^[1]。通常,位置和速度反馈需要机械位置传感器,但编码器的使用显著降低了驱动系统的可靠性和耐用性;而且在某些场合不允许安装编码器。安装编码器带来的问题促使研究人员开展无速度传感器驱动技术的研究,即通过定子电压和电流等参数辨识转子速度和位置。文献[2-19]给出了一些在线速度辨识方法,大致可以分为如下几类:

1) 基于反电动势(Back-EMF)技术^[2-3]。这种方法的核心是反电动势的计算。由于在零速或低速情况下反电动势为0或很小,因而转子速度的估计存在困难;此外,这种方法对电机参数高度敏感。

2) 基于机械物理性能的技术^[4-7]。由于转子侧凸极效应的存在,相电感随着转子位置的变化而变化。据此,可以通过电感获取转子位置信息,但需要在电机定子绕组中叠加一高频的电压信号。这种方法的优点是电机零速时可以精确辨识。文献[7]将信号注入与Back-EMF技术进行结合,前者用于

零速或极低速时转速估计,后者用于高速;但该方法的准确性受永磁体位置影响严重,因而不适用于面装式的PMSM。该方法的不足之处是,注入信号影响电机动态特性,同时注入信号需要增加额外的硬件。

3) 基于扩展的卡尔曼滤波器(extended Kalman filter, EKF)或基于状态观测器的方法^[8-11]。近年来,这种方法在PMSM转速估计中获得了认可,其优势在于参数也可以被视为状态变量,并可依据速度进行估计;但该方法存在运算量大、参数敏感性及初始条件不利等问题,降低了其优越性。

4) 基于模型参考自适应控制(model reference adaptive controller, MRAC)的技术^[12-15]。在众多的MRAC速度估计方法中,速度信息是通过两种不同模型获取的,一种是参考模型,另一种是可调模型。参考模型与速度无关,而可调模型包含转速信息。两个模型输出量通过运算获得偏差信号,偏差信号馈入自适应机构(通常自适应机构为PI调节器)。自适应机构的输出为估计量,一方面用于调节可调模型,另一方面作为转速反馈值。根据构成偏差信号的量的不同,有多种MRAC方法。文献[13]基于 d 、 q 轴磁链分量提出了一种MRAC方法,但这种方法受定子电阻变化及积分漂移和饱和的影响。为了克服定子电阻变化的问题,文献[14]给出了一种在线定子电阻估计的MRAC方法。文献[15]提出了基于无功功率的MRAS方法。在上述所有方法中,基于无功功率的MRAC速度估计方法因与定子电阻无关而获得广泛应用。

5) 其它方法包括基于人工智能的方法^[16]、变结构技术^[17-19]等。人工神经网络和模糊逻辑等基于人工智能的方法不足之处是需要存储大量数据且算法复杂。在众多的转子位置辨识方法中,滑模观测器尤其获得学者们青睐,因为系统动态特性仅依赖于滑模面的选择,不受系统结构和参数不确定性影响,在面装式永磁同步电机中获得广泛应用。

本文提出了一种双滑模变结构模型参考自适应观测器,用于永磁同步电机矢量控制系统转速辨识。观测器中参考模型为永磁电机本身,可调模型为永磁电机电流模型,利用两模型输出的偏差构造了2个滑模面,采用常规的滑模观测器获得等效控制。为了降低观测器中使用符号函数($\text{sgn}(\cdot)$)产生的常见的抖振问题,采用了低通滤波器和附加转子位置补偿方法。基于Matlab/simulink搭建了一个永磁

同步电机无速度传感器矢量控制系统仿真平台,从转速跟踪、电机参数变化及负载扰动等3方面对提出的控制策略进行仿真研究。

1 PMSM 无速度传感器矢量控制技术

本文中永磁同步电机定子采用三相对称绕组,转子为永磁体结构。假设磁场在空间呈正弦分布,在不计磁滞和涡流损耗影响条件下,取 d 轴与永磁体基波励磁轴线一致, q 轴顺着转子旋转方向且超前 d 轴 $\pi/2$ 电角度,于是永磁同步电机在 d - q 坐标系下的数学模型(对于面装式PMSM有 $L_d=L_q=L$)为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d - \omega\psi_q + \frac{d\psi_d}{dt} \\ u_q = Ri_q + \omega\psi_d + \frac{d\psi_q}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

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

$$T_e = n_p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) = n_p \psi_r i_q \quad (3)$$

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (4)$$

式中: R 为定子电阻; ω 为转子角速度; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流分量; u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴电压分量; ψ_d 、 ψ_q 分别为 d 、 q 轴磁链分量; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感分量; ψ_r 为永磁体产生的磁链; n_p 为转子极对数; T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; J 为转动惯量。

作为PMSM高性能控制方法之一的磁场定向矢量控制技术,其核心是在转子磁场旋转坐标系中针对励磁电流 i_d 和转矩电流 i_q 分别进行控制。由PMSM在 d - q 坐标系下的数学模型,可得其矢量控制策略,如图1所示。

整个系统采用转速外环、电流内环的双环控制。转子角速度反馈量 ω 和用于派克(Park)变换的

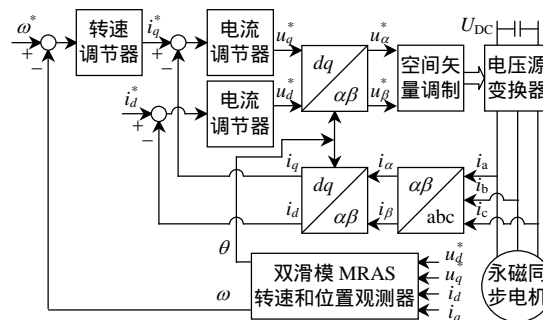


图1 PMSM 无速度传感器矢量控制

Fig. 1 Sensorless vector control of PMSM

电角度 θ 均由观测器获取; 电流反馈量 i_d 、 i_q 通过检测电机三相定子电流 i_a 、 i_b 、 i_c 经克拉克(Clarke)变换和派克变换获得。转速给定 ω^* 与转速反馈量 ω 的偏差经PI调节器后输出转矩电流 i_q^* 参考值, i_q^* 与 i_q 的偏差经PI调节器后输出解耦电压 u_q^* ; 励磁电流 i_d^* (采用 $i_d^*=0$ 控制策略)与 i_d 的偏差经PI调节器后输出解耦电压 u_d^* ; u_q^* 和 u_d^* 经派克逆变换得到 u_α^* 及 u_β^* , 根据 u_α^* 及 u_β^* 进行SVPWM调制产生电压源变换器的信号, 实现对电机的运行控制。

2 双滑模 MRAS 转速观测方法

2.1 双滑模 MRAS 基本结构

双滑模 MRAS 辨识转速的主要思想是选取永磁同步电机本体作为参考模型, 可调模型为永磁同步电机的电流模型, 利用两模型输出的参考电流与估计电流偏差构造了2个滑模面, 利用滑模算法获得等效的 d 、 q 轴电流, 进而通过一定算法获得转子转速和位置角度, 并分别用于矢量控制系统的速度调节和坐标变换, 使得永磁同步电机受到温升等引起的电阻参数变化及负载突变等影响的实际系统, 其转速能够跟踪给定, 即使得:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0 \quad (5)$$

式中: $e(t) = \hat{i}(t) - i(t)$; $e(t_0) = \hat{i}(t_0) - i(t_0) = 0$, 其中上标“ $\hat{\cdot}$ ”表示估计值。

基于上述思想, 本文提出的双滑模 MRAS 转速观测器结构框图如图2所示。其中, 参考模型选取永磁同步电机本体, 可调模型是由包含转速信息的PMSM 定子电压方程(1)转化而来的。

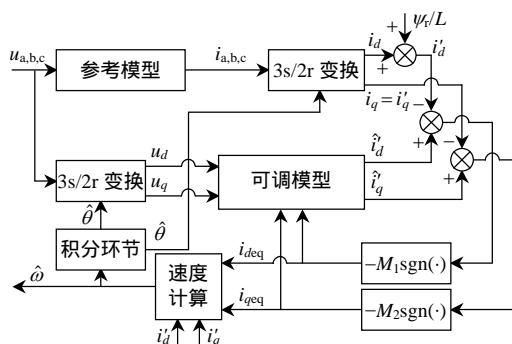


图2 双滑模 MRAS 转速辨识结构

Fig. 2 Structure of double sliding mode MRAS speed identification

2.2 双滑模 MRAS 理论分析

2.2.1 PMSM 偏差状态方程

根据式(1)、(2)可得 PMSM 定子电流方程矩阵

形式:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d + \frac{\psi_r}{L} \\ i_q \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} i_d + \frac{\psi_r}{L} \\ i_q \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} u_d + \frac{R\psi_r}{L} \\ u_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\text{式中: } A = \begin{bmatrix} -R/L & \omega \\ -\omega & -R/L \end{bmatrix}; b = 1/L_0$$

设:

$$\begin{cases} i'_d = i_d + \frac{\psi_r}{L} \\ i'_q = i_q \\ u'_d = u_d + \frac{R\psi_r}{L} \\ u'_q = u_q \end{cases} \quad (7)$$

且 $i' = [i'_d \ i'_q]^T$, $u' = [u'_d \ u'_q]^T$, 则式(6)可以写为

$$\frac{d}{dt} i' = A i' + b u' \quad (8)$$

由于式(8)由包含转速信息的 PMSM 定子电压方程(1)转化而来, 故可选作为可调模型, 如此可构造自适应模型如下:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} = \hat{A} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} + b \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $\hat{A} = \begin{bmatrix} -R/L & \hat{\omega} \\ -\hat{\omega} & -R/L \end{bmatrix}$; \hat{i}_d 、 \hat{i}_q 分别为定子电流 d 、 q 轴分量的估计值; $\hat{\omega}$ 为辨识的定子角速度。式(9)可以写为

$$\frac{d}{dt} \hat{i}' = \hat{A} \hat{i}' + b u' \quad (10)$$

定义电流偏差矢量:

$$e = i' - \hat{i}' \quad (11)$$

则将式(8)减去式(10), 可得偏差状态方程:

$$\frac{d}{dt} e = A e - (\hat{A} - A) \hat{i}' \quad (12)$$

2.2.2 滑模设计

定义如下滑模面矢量:

$$s = e \quad (13)$$

由式(11), 可得转子参考系双滑模面:

$$\begin{cases} s_d = \hat{i}_d - i'_d \\ s_q = \hat{i}_q - i'_q \end{cases} \quad (14)$$

采用常值切换控制法, 则可以得到滑模观测器方程:

$$\frac{d}{dt}\hat{i}_d' = -M_1 \operatorname{sgn}(s_d) + bu_d' \quad (15)$$

$$\frac{d}{dt}\hat{i}_q' = -M_2 \operatorname{sgn}(s_q) + bu_q' \quad (16)$$

式中: M_1 、 M_2 为大于 0 的常数; $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。

2.2.3 滑模存在和到达条件分析

对切换函数 s_d 、 s_q 求导, 并考虑式(1)、(2)、(7)、(15)及(16), 可得

$$\dot{s}_d = f_d(i_d, i_q, \omega, \psi_r, R, L) - M_1 \operatorname{sgn}(s_d) \quad (17)$$

$$\dot{s}_q = f_q(i_d, i_q, \omega, \psi_r, R, L) - M_2 \operatorname{sgn}(s_q) \quad (18)$$

式中 f_d 、 f_q 均为 i_d 、 i_q 、 ω 、 ψ_r 、 R 及 L 的函数。

由于 f_d 、 f_q 具有大于 0 的上限, 则存在充分大的正常数 M_1 、 M_2 满足式(17)、(18)滑模存在的充分条件, 使得滑模被约束在 2 个滑模面的相交部分, 即满足如下不等式:

$$\begin{cases} s_d \dot{s}_d < 0 \\ s_q \dot{s}_q < 0 \end{cases} \quad (19)$$

滑模发生后, 有 $s_d=1$ 、 $s_q=1$, 且观测电流等于参考电流, 即在滑模面上运动时有:

$$\dot{e} = e = i' - \hat{i}' = 0 \quad (20)$$

2.2.4 转速计算

等效控制可通过对切换函数 s_d 、 s_q 进行滤波获得, 并用 i_{deq} 、 i_{qeq} 表示。比较观测器方程式(15)、(16)及式(1)、(2), 可得等效控制矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} i_{deq} \\ i_{qeq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i_d' & i_q' \\ -i_q' & -i_d' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{R}{L} \\ \omega \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \frac{R}{L} \\ \omega \end{bmatrix} \quad (21)$$

式(21)表明, 在电机受到激励时, 则矩阵 A 非奇异, 即 $\det(A) = i_d'^2 + i_q'^2 \neq 0$, 式(21)有唯一解。由式(7)可获得转子速度辨识算法如下:

$$\hat{\omega} = \frac{i_{deq} i_q' - (i_d' + \frac{\psi_r}{L}) i_{qeq}}{(i_d' + \frac{\psi_r}{L})^2 + i_q'^2} \quad (22)$$

转子位置电角度 θ 可利用式(23)获得。

$$\theta = \int \hat{\omega} dt \quad (23)$$

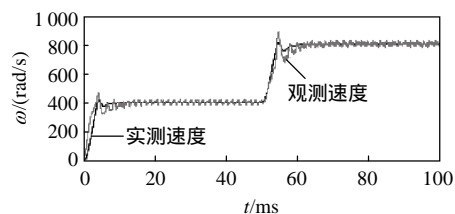
3 仿真及结果分析

利用 MATLAB7.1 仿真软件, 在 SIMULINK 环境下, 对所提出的辨识算法的有效性进行了仿真研究。仿真用 PMSM 模型为 SIMULINK 中内部提供,

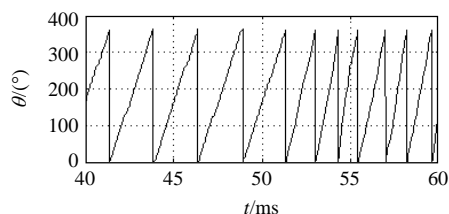
其额定参数为 $P_e=1.1$ kW、相电压 220 V、额定转速 $n_e=3000$ r/min, 额定输出转矩 $T_e=3$ N·m, 定子电阻 $R_s=2.875$ Ω , 绕组电感 $L_d=L_q=8.5$ mH, 转动惯量 $J=0.0008$ kg·m², 永磁体磁通 $\psi_r=0.175$ Wb, 极对数 $n_p=4$ 。

图 3 为转速变化时, 采用本文所述方法的仿真结果。图 3(a)表明, 在 50 ms 时转速由 400 rad/s 阶跃到 800 rad/s, 辨识转速能很好地跟踪实际转速; 图 3(b)为相应的转子位置角度观测波形。此外, 启动瞬间为了让电机能够顺利启动而有意强加给转子一个较大的初始位置。

图 4 为 PMSM 参数变化时, 采用本文所述方法的仿真波形。当定子电阻由 2.875 Ω 增大至 3.45 Ω (增加 20%) 时所观测到的速度波形如图 4(a)所示,



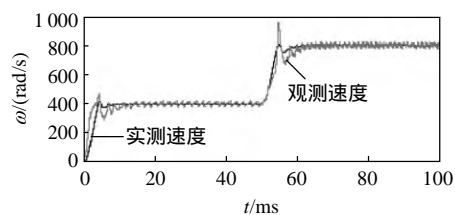
(a) 转子速度



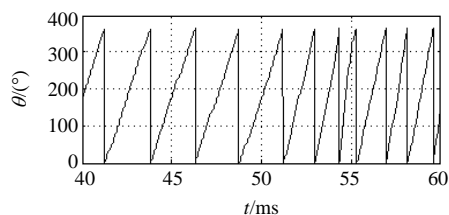
(b) 转子位置

图 3 转速变化时的仿真波形

Fig. 3 Simulation waveforms of speed change



(a) 转子速度



(b) 转子位置

图 4 转子电阻变化时的仿真波形

Fig. 4 Simulation waveforms for rotor resistance change

可以看出,定子电阻增加后在转速突变瞬间有一个比较大的峰值,但这个峰值能够在短时间内恢复到较小的波动范围,因此并不会影响到电机的动态性能,还可以让电机转速迅速改变,显示出定子电阻增加后速度仍然比较平滑,且跟踪性能较好,表明所提的转速观测方法对电机参数变化具有较强鲁棒性;图4(b)为相应的转子位置角度观测波形。

图5为负载变化时的仿真波形。给定速度为600 rad/s,负载初始转矩 $T_L=0$ N·m,于50 ms时加入4 N·m的负载转矩。图5(a)为观测到的转速波形,可以看出,稳态时实际转速和观测转速吻合,只是在扰动出现的瞬间转速有波动,表明本文所提的转速观测器有较强的抗扰能力;图5(b)为相应的转子位置角度观测波形。

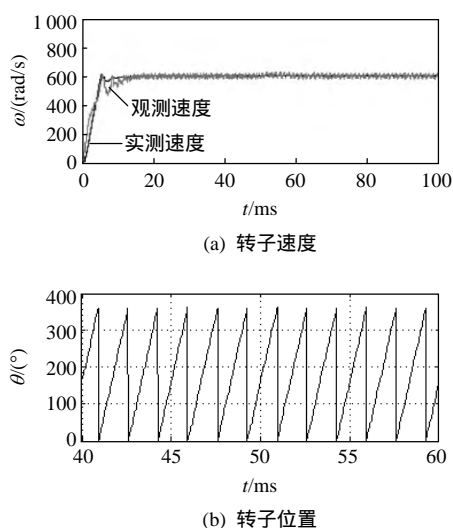


图5 负载扰动时的仿真波形

Fig. 5 Simulation waveforms for load change

4 结论

本文提出的双滑模 MRAS 速度辨识方法利用 PMSM 本体和其电流模型分别作为参考模型和可调模型,利用两模型输出的参考电流与估计电流偏差构造了两个滑模面。将通过滑模算法得到的等效 d 、 q 轴电流进行运算,进而获得电机的转速和转子位置角度。本策略在电机转速、负载转矩、电机参数等变化情况下的仿真研究表明:

- 1) 系统动态、稳态性能良好,速度及位置辨识精度较高;
- 2) 对电机参数变化及负载转矩波动具有较强的鲁棒性;
- 3) 算法简单,易于工程实现。

参考文献

- [1] Siva Kumar J S V, Sai Kumar P, Rambabu M. Model reference adaptive controller-based speed and q -axis inductance estimation for permanent magnet synchronous motor drive by utilizing reactive power[C]//2011 International Conference on Energy, Automation, and Signal (ICEAS 2011). Bhubaneswar, Odisha, India: IEEE, 2011: 1-6.
- [2] Zhuang Xu, Rahman M F. An adaptive sliding stator flux observer for a direct torque controlled ipm synchronous motor drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(5): 2398-2406.
- [3] 黄雷,赵光宙,年珩.基于扩展反电动势估算的内插式永磁同步电动机无传感器控制[J].中国电机工程学报, 2007, 27(9): 56-63.
Huang Lei, Zhao Guangzhou, Nian Heng. Sensorless control of interior permanent magnet synchronous motor by estimation of an extended electromotive force[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(9): 59-63(in Chinese).
- [4] 刘颖,周波,李帅,等.转子磁钢表贴式永磁同步电机转子初始位置检测[J].中国电机工程学报, 2011, 31(18): 48-54.
Liu Ying, Zhou Bo, Li Shuai, et al. Initial rotor position detection of surface mounted permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(18): 48-54(in Chinese).
- [5] 郭志荣,谢顺依,高巍.带阻尼绕组的凸极永磁同步电机转子位置估计[J].中国电机工程学报, 2009, 29(36): 55-59.
Guo Zhirong, Xie Shunyi, Gao Wei. Rotor position estimation of salient-pole permanent magnet synchronous motor with damper windings[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(36): 55-59(in Chinese).
- [6] Piippo A, Hinkkanen M, Luomi J. Analysis of an adaptive observer for sensorless control of interior permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(2): 570-576.
- [7] Gilbert Foo, Rahman M F. Sensorless sliding-mode MTPA control of an IPM synchronous motor drive using a sliding-mode observer and HF signal injection[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(4): 1270-1278.
- [8] Harnefors L, Hinkkanen M. Complete stability of reduced-order and full order observers for sensorless IM drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(3): 1319-1329.
- [9] Germano A, Parasiliti F, Tursini M. Sensorless speed control of a PM synchronous motor drive by Kalman filter[C]//Proceedings of International Conference on

- Electrical Machines (ICEM '94) . Paris , France : IEEE , 1994 : 540-544 .
- [10] Ciabattioni L , Corradini M L , Grisostomi M , et al . Adaptive extended Kalman filter for robust sensorless control of PMSM drives[C]//2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC) . Orlando , FL , USA : IEEE , 2011 : 12-15 .
- [11] 陈振,刘向东,靳永强,等.采用扩展卡尔曼滤波磁链观测器的永磁同步电机直接转矩控制[J].中国电机工程学报,2008,28(33):75-81 .
Chen Zhen ,Liu Xiangdong ,Jin Yongqiang ,et al . Direct torque control of permanent magnet synchronous motors based on extended Kalman filter observer of flux linkage[J] . Proceedings of the CSEE , 2008 , 28(33) : 75-81(in Chinese) .
- [12] 万军,王建海,马彦兵,等.基于交互式模型参考自适应系统策略的无速度传感器矢量控制系统[J].中国电机工程学报,2005,25(23):163-166 .
Wan Jun , Wang Jianhai , Ma Yanbing , et al . Speed sensorless vector control system based on mutual MRAS scheme[J] . Proceedings of the CSEE , 2005 , 25(23) : 163-166(in Chinese) .
- [13] Eskola M , Tuusa H . Sensorless control of a permanent magnet synchronous motor—application to a hoist drive[C]//Proceedings of PESC 2002 - Power Electronics Specialists Conference . Cairns , Qld . , Australia : IEEE , 2002 : 967-972
- [14] Kim K H , Chung S K , Moon G W , et al . Parameter estimation and control for permanent magnet synchronous motor drive using model reference adaptive technique [C]//Proceeding of 21st IEEE-IECON 1995 . Orlando , FL , USA : IEEE , 1995 : 387-392 .
- [15] Maiti S , Chakraborty C . Reactive power based speed sensorless controller for permanent magnet synchronous motor drive[C]//IEEE International Conference on Industrial Technology . Bombay , India : IEEE , 2006 : 274-279 .
- [16] Jain M , Singh M , Chandra A , et al . Sensorless control of permanent magnet synchronous motor using ANFIS based MRAS[C]//2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC) . Niagara Falls , Canada : IEEE , 2011 : 599-606 .
- [17] 王庆龙,张崇巍,张兴.基于变结构模型参考自适应系统的永磁同步电机转速辨识[J].中国电机工程学报,2008,28(9):71-75 .
Wang Qinglong ,Zhang Chongwei ,Zhang Xing . Variable structure MRAS speed identification for permanent magnet synchronous motor[J] . Proceedings of the CSEE , 2008 , 28(9) : 71-75(in Chinese) .
- [18] Chen Wei ,Chen Yankun ,Li Hongfeng ,et al . Sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on sliding mode observer[C]//2012 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference—ECCE Asia . Harbin , China : IEEE , 2012 : 2582-2586 .
- [19] 鲁文其,胡育文,杜栩杨,等.永磁同步电机新型滑模观测器无传感器矢量控制调速系统[J].中国电机工程学报,2010,30(33):78-83 .
Lu Wenqi ,Hu Yuwen ,Du Xuyang ,et al . Sensorless vector control using a novel sliding mode observer for PMSM speed control system[J] . Proceedings of the CSEE , 2010 , 30(33) : 78-83(in Chinese) .



王庆龙

收稿日期:2013-07-20。

作者简介:

王庆龙(1968),男,博士,副教授,主要研究方向为电力电子与电力传动、风力发电, wangqlong@tom.com ;

张兴(1963),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为电力电子与电力传动、风力发电、光伏发电;

张崇巍(1945),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力电子与电力传动、控制理论与控制工程。

(责任编辑 李婧妍)