

基于 RTU 平台的永磁同步电机 无位置传感器控制算法*

杨泽贤, 朱雨菲, 陈瑜涵, 温志威, 张蔚
(南通大学电气工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 传统电机控制中常用的芯片有 FPGA、DSP、ARM 等, 均需要进行手工编程, 不仅开发过程复杂, 而且调试过程较为繁琐。针对此类情况, 半实物仿真平台 RTU (Real-time unit) 为用户提供了一种在真实硬件上无需手动编程就可以非常有效且快速地开发、优化和测试复杂控制算法的方法。采用 RTU 试验平台, 实现了永磁同步电机(PMSM)模型参考自适应无位置传感器控制系统的开发。在 MATLAB/Simulink 和 RTU 平台下对该控制策略进行仿真和试验研究。研究结果证明了该控制方法的正确性以及 RTU 平台的可行性和有效性。

关键词: 永磁同步电机; 模型参考自适应系统; 无位置传感器控制; RTU 平台

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)01-0029-07

doi: 10.12177/emca.2019.137

Permanent Magnet Synchronous Motor Position Sensorless Control Algorithm Based on RTU Platform*

YANG Zexian, ZHU Yufei, CHEN Yuhuan, WEN Zhiwei, ZHANG Wei
(School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: The traditional chips used in motor control are FPGA, DSP, ARM and so on, which need to be programmed manually. These methods are complicated in both development and debugging process. For this situation, the hardware-in-the-loop simulation platform real-time unit (RTU) provides a very effective and rapid method to develop, optimize and test complex control algorithms without manual programming on real hardware. A model reference adaptive position sensorless control system for permanent magnet synchronous motor (PMSM) is developed based on RTU experimental platform. The control strategy is simulated and experimentally studied on the platform of MATLAB/Simulink and RTU. The results show that the control method is correct and the RTU platform is feasible and effective.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); model reference adaptive system; position sensorless control; real-time unit (RTU) platform

0 引言

永磁同步电机(PMSM)具有结构简单、体积小、效率高、起动转矩大、运行可靠等特点,在工业

控制和民用电器领域应用广泛^[1]。传统闭环控制需要测量电机转子的速度和位置信息,一般需要在转子转轴上安装机械式的传感器。额外的传感器增加了系统的硬件成本以及后期维护量,从而

收稿日期: 2019-10-18; 收到修改稿日期: 2019-11-25

* 基金项目: 江苏省创新创业训练计划项目(201910304057Z); 江苏省六大人才高峰项目(XNYQC-017)

作者简介: 杨泽贤(1993—),男,硕士研究生,研究方向为电机驱动与控制。

张蔚(1977—),女,博士,教授,研究方向为电机设计及其控制。

降低了系统的可靠性。为此,国内外学者开展了对无位置传感器控制技术的^[2]研究,如滑模观测器法、扩展卡尔曼滤波法、模型参考自适应法等。文献[3-4]采用滑模观测器估计转子转速,计算简单、动态响应快,但存在抖振问题,影响了估计精度。文献[5-6]采用扩展卡尔曼滤波方法估计了转子转速,具有良好的抗干扰性能和参数鲁棒性,但矩阵的反演和递归计算过程复杂,使得系统矩阵和噪声矩阵的值难以测量,需要经过试验选择,不能保证该方法在整个速度范围内收敛。与之相比,模型参考自适应方法实现简单,保证了参数的收敛性^[7-8]。

PMSM 无位置传感器控制算法的试验平台有:单片机、DSP、dSPACE 等。单片机具有低功耗、高性能、可编程和存储等特点,但对于单片机控制的 PMSM 体积和谐波等有一定的要求,在硬件主电路的设计中有一定的限制^[9]。DSP 芯片具有更加适合于数字信号处理的软件和硬件资源开发,可用于复杂的数字信号处理算法,但抗干扰能力差,得到的数据不够精确^[10-11]。dSPACE 半仿真试验平台可以完成与 MATLAB/Simulink/RTW 的无缝连接,硬件系统具有高速计算能力,丰富的 I/O 接口可以被用户任意组合,但 dSPACE 设备昂贵,需要大量的资金投入,性价比较低^[12-13]。RTU (Real-time unit) 半实物仿真平台,不仅完美继承了 dSPACE 的功能,而且价格较低,降低了开发成本。本文在 MATLAB/Simulink 和 RTU 平台下,搭建了模型参考自适应无位置传感器控制系统模型。通过仿真和试验,对该控制策略和 RTU 平台的可行性和有效性进行了验证。

1 PMSM 数学模型

PMSM 在三相静止坐标系下的数学模型经 Clarke 变换和 Park 变换后,可得 PMSM 在 dq 旋转坐标系下的定子电压数学模型方程为

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

式中: u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴的定子电压; R_s 为电机绕组; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴的定子电流; L_d 、 L_q 分别

为 d 、 q 轴的定子电感; φ_f 为永磁体磁链。

电机的机械运动方程为

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (2)$$

式中: J 为转动惯量; ω_m 为电机的机械角速度; T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; B 为阻尼系数。

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p i_q [i_d (L_d - L_q) + \varphi_f] \quad (3)$$

式中: p 为电机的极对数。

2 模型参考自适应观测器设计

2.1 模型参考自适应系统原理

与其他方法相比,模型参考自适应法具有控制相对简单、不需要额外的信号注入、稳定性良好等特点。模型参考自适应系统通常由参考模型、可调模型以及自适应律 3 部分组成^[14]。参考模型指的是不含有待估计参数的方程,而可调模型指的是含有待估计参数的方程。利用 2 个模型在同时工作时输出量的差值输入到自适应机构,采用合适的自适应律不断调节模型中的估计参数,使 2 个模型输出相一致,以实现参数估计^[15-16]。模型参考自适应结构原理图如图 1 所示。

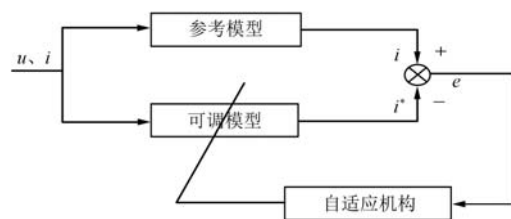


图 1 模型参考自适应结构原理图

2.2 可调模型与参考模型的确定

在模型参考自适应系统中,采用电流方程为参考模型,同步旋转坐标系下的 PMSM 电流方程为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = -\frac{R}{L_d} i_d + \omega_e \frac{L_q}{L_d} i_q + \frac{1}{L_d} u_d \\ \frac{d}{dt} i_q = -\frac{R}{L_q} i_q - \omega_e \frac{L_d}{L_q} i_d + \frac{1}{L_q} u_q - \omega_e \frac{\varphi_f}{L_q} \end{cases} \quad (4)$$

为了便于分析系统稳定性,将转速量约束于系统矩阵中,式(4)可改写为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\left(i_d + \frac{\varphi_f}{L_d}\right) = -\frac{R}{L_d}\left(i_d + \frac{\varphi_f}{L_d}\right) + \\ \omega_e \frac{L_q}{L_d} i_q + \frac{1}{L_d}\left(u_d + \frac{R}{L_d} \varphi_f\right) \\ \frac{d}{dt} i_q = -\frac{R}{L_q} i_q - \omega_e \frac{L_d}{L_q}\left(i_d + \frac{\varphi_f}{L_d}\right) + \frac{1}{L_q} u_q \end{cases} \quad (5)$$

定义 $i'_d = i_d + \frac{\varphi_f}{L_d}$, $i'_q = i_q$, $u'_d = u_d + \frac{R}{L_s} \varphi_f$, $u'_q = u_q$, 可得参考模型:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i'_d = -\frac{R}{L_d} i'_d + \omega_e \frac{L_q}{L_d} i'_q + \frac{1}{L_d} u'_d \\ \frac{d}{dt} i'_q = -\frac{R}{L_q} i'_q - \omega_e \frac{L_d}{L_q} i'_d + \frac{1}{L_q} u'_q \end{cases} \quad (6)$$

因为式(6)中包含转子速度信息, 所以将式(6)以估计值表示可以得到可调模型:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \hat{i}'_d = -\frac{R}{L_d} \hat{i}'_d + \hat{\omega}_e \frac{L_q}{L_d} \hat{i}'_q + \frac{1}{L_d} u'_d \\ \frac{d}{dt} \hat{i}'_q = -\frac{R}{L_q} \hat{i}'_q - \hat{\omega}_e \frac{L_d}{L_q} \hat{i}'_d + \frac{1}{L_q} u'_q \end{cases} \quad (7)$$

其中: $\hat{i}'_d = \hat{i}_d + \frac{\varphi_f}{L_d}$; $\hat{i}'_q = \hat{i}_q$; $\hat{i}_d$, $\hat{i}_q$ 由式(4)的估计值形式计算可得。

2.3 参考自适应律的确定

本文采用 Popov 超稳定性理论来设计自适应律。Popov 超稳定性理论设计的自适应率能有效地使可调模型逼近参考模型, 同时保证系统的稳定性^[17-18]。由此, 可以得到转速的估计值:

$$\hat{\omega}_e = \left(\frac{K_i}{s} + K_p \right) \left[i_d \hat{i}_q - \hat{i}_d i_q - \frac{\varphi_f}{L_s} (i_q - \hat{i}_q) \right] + \hat{\omega}_e(0) \quad (8)$$

对 $\hat{\omega}_e$ 求积分可以得到转子位置的估计值:

$$\hat{\theta}_e = \int \hat{\omega}_e d\tau \quad (9)$$

3 半实物仿真平台

3.1 RTU 实时仿真系统介绍

RTU 实时仿真系统是由南京瑞途优特信息科技有限公司开发的 1 套基于 MATLAB/Simulink 的控制系统开发、测试及半实物仿真的软硬件工作平台。其最大的特点是为用户提供一种在真实硬件上无需手动编程就可以非常有效且快速开

发、优化和测试复杂控制算法的方法。RTU 实时仿真系统拥有高速计算能力, 方便易用的实现代码自动生成、下载和调试的软件环境, 广泛应用于电机控制、新能源与电力电子、机器人及其他众多领域。

3.2 试验硬件系统

RTU 的硬件结构图如图 2 所示。

RTU 的硬件控制器采用多核异构技术, 处理器由 DSP、ARM 和多个 FPGA 组成, 性能稳定、功能丰富。CPU 板为 RTU 系统的核心部件。CPU 板通过专用的总线来控制其他外设板, 板上的通信接口包括 10 M/100 M 以太网 Ethernet, 隔离的 RS232、隔离的 RS485、隔离的 CAN 接口。脉宽调制(PWM)板一共有 60 路 PWM, 输出的 PWM 由 FPGA 产生, 可支持多种 PWM 生成算法。同时 RTU 提供了 16 通道 A/D 转换, 16 通道 D/A 转换, 36 位数字 I/O 口。

3.3 试验软件系统

采用 RTU 强大的软硬件系统研究新控制算法时, 一般需要: (1) 确定控制算法; (2) 使用 MATLAB/Simulink 建立系统仿真模型, 验证算法的正确性与可行性; (3) 将模型转换为基于 RTU 的仿真模型并生成代码; (4) 将代码下载入系统, 在线调试参数, 完成算法的验证。软件工作流程图如图 3 所示。

4 仿真与试验分析

为了验证所提基于 RTU 平台的 PMSM 无位置传感器控制算法的有效性和准确性, 本文结合无位置传感器控制框图, 分别在 MATLAB/Simulink 和 RTU 试验平台中进行建模仿真和试验。无位置传感器控制框图如图 4 所示。控制系统由坐标变换模块、PI 模块、空间矢量脉宽调制(SVPWM)模块、模型参考自适应系统模块、PMSM 模块、逆变器模块等组成。根据文献[19], 模型参考自适应系统中 K_p 和 K_i 的取值分别为 0.32 和 0.8。

仿真与试验用 PMSM 参数如表 1 所示。

4.1 仿真结果分析

为了验证模型参考自适应系统参数辨识的可行性和有效性, 首先对该控制策略进行 MATLAB/Simulink 仿真验证。

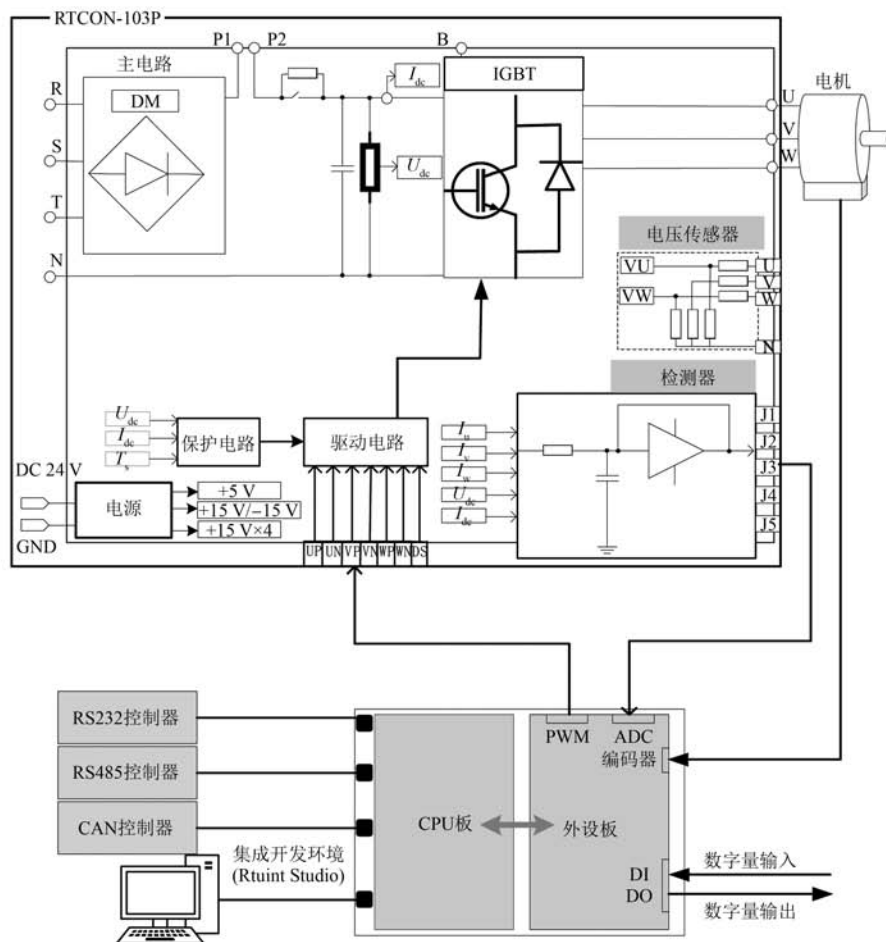


图 2 RTU 硬件结构图

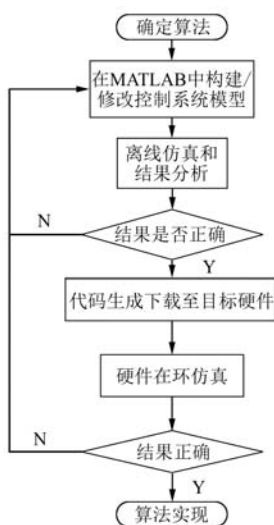


图 3 软件工作流程图

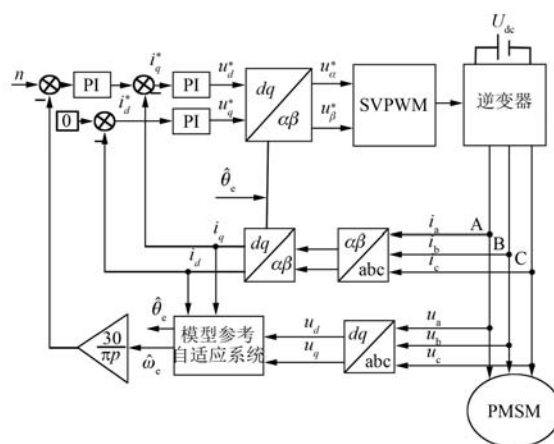


图 4 无位置传感器控制框图

转子位置波形分别如图 5、图 6 所示。从图 5 可以看出,电机空载起动,转速经 0.02 s 迅速收敛于给定转速,超调较小。图 6 中,转子位置估计误

初始空载转速设置为 350 r/min,电机转速和

表 1 PMSM 参数表

参数名称	参数值
极对数	4
永磁体磁链/Wb	0.115
额定功率/W	750
d 轴电感/mH	1.78
转子惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	0.000 182
q 轴电感/mH	2.02
额定转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	3 000
定子电阻/ Ω	1.44

差约为 0.06 rad,估算精度基本满足无位置传感器控制系统的要求。

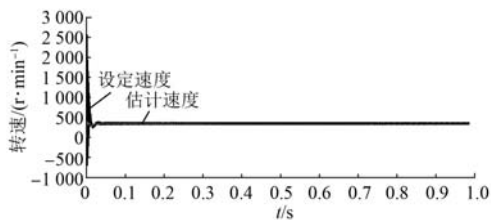


图 5 稳态时电机转速波形

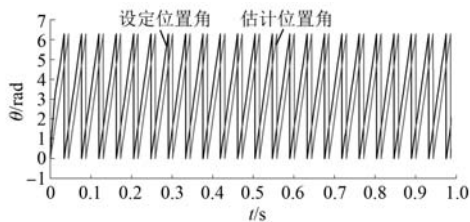


图 6 稳态时电机转子位置波形

当电机的转速由 350 r/min 切换到 700 r/min 时,电机转速与转子位置波形如图 7、图 8 所示。从图 7 可以看出,估算转速可以完全跟踪上实际转速。从图 8 可以看出,350 r/min 时转子位置误差约为 0.06 rad,700 r/min 时误差约为 0.01 rad。由此可见,该转子位置估算方法在电机速度变化时,控制精度良好。

4.2 试验结果分析

为了验证该控制方法在实际系统中的有效性,搭建了基于 RTU 的 PMSM 无位置传感器控制系统的试验平台,如图 9 所示。试验平台包括 PMSM、直流电源、示波器、驱动器、转接板、上位机等。

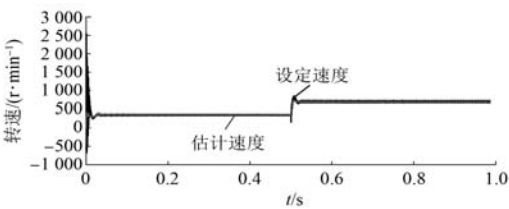


图 7 动态时电机转速波形

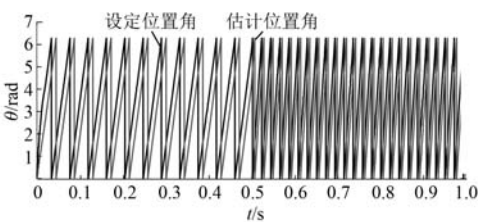


图 8 动态时电机转子位置波形

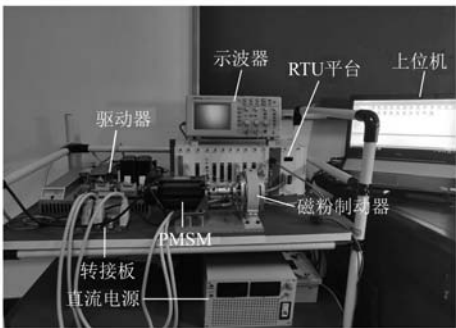


图 9 RTU 系统试验平台

在空载的情况下,给定速度为 350 r/min 时,所得的转速、转子位置、 dq 轴电流波形如图 10~图 12 所示。

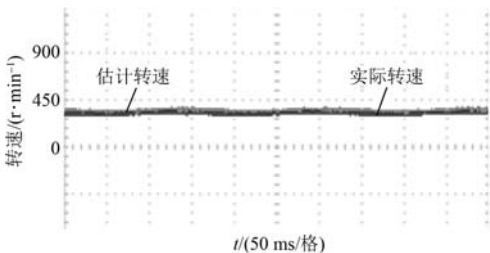


图 10 稳态时电机转速试验波形

由图 10 可以看出,估计转速和实际转速误差较小,数值在零附近波动。由图 11 可以看出,转子估算位置误差约为 0.063 rad,转速和位置误差均在可接受的范围内。由图 12 可以看出, d 、 q 轴

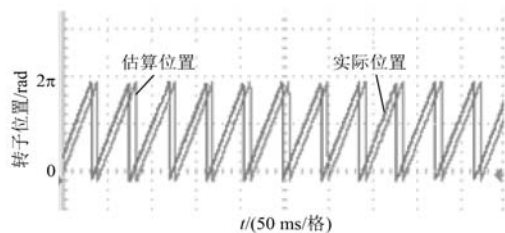


图 11 稳态时电机转子位置试验波形

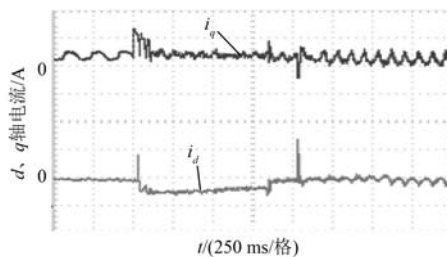


图 15 动态时 dq 轴电流试验波形

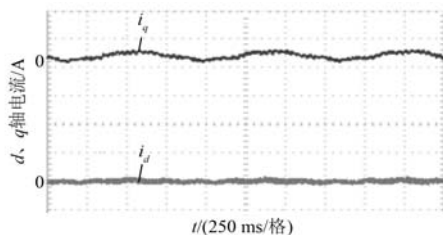


图 12 稳态时 dq 轴电流试验波形

电流 i_d 、 i_q 跟随能力较好。

为了验证模型参考自适应对速度突变的响应能力,进行从 350 r/min 切换到 700 r/min 的试验,所得的转速转子位置、dq 轴电流波形如图 13~图 15 所示。

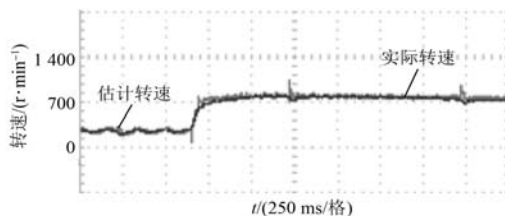


图 13 动态时电机转速试验波形

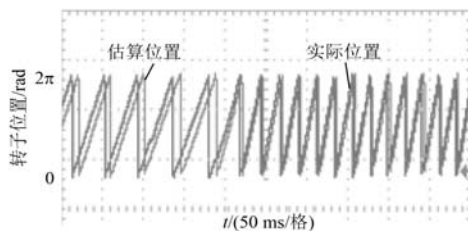


图 14 动态时电机转子位置试验波形

由图 13 可以看出,切换过程中转速在较短时间(小于 0.1 s)内收敛到 700 r/min,误差基本为零;速度切换时电机抖动小、平稳运行、鲁棒性较好。由图 14 可以看出,在 700 r/min 时转子的位置误差约为 0.012 rad,说明该方法在较宽的速度

范围内有良好的估算效果。由图 15 可以看出,在转速突变过程中,dq 轴电流 i_d 、 i_q 均能够快速跟踪指令值,同时具有很好的适应性,说明矢量控制具有良好的性能。

5 结 语

本文基于 RTU 对 PMSM 无位置传感器控制系统进行了设计与开发,以及 PMSM 的半实物仿真试验。试验结果与仿真结果基本一致,表明模型参考自适应无位置传感器控制策略在交流调速系统中能快速、准确地辨识转速和转子位置,性能良好、鲁棒性强。同时,RTU 半实物仿真平台可以为验证先进的控制算法提供开发平台,有效降低了研发周期与成本。

【参考文献】

- [1] 陈文卓,靳文涛,马可.永磁同步电机双模糊矢量控制系统研究[J].电气传动,2019,49(8): 7.
- [2] 王卫,阳鹏飞,陈瀚.对于 PMSM 实现全速范围无传感器控制技术的混合控制策略研究[J].电子产品世界,2019,26(8): 74.
- [3] 林茂,李颖晖,吴辰,等.基于滑模模型参考自适应系统观测器的永磁同步电机预测控制[J].电工技术学报,2017,32(6): 156.
- [4] 陈威,董秀成,周单,等.改进滑模模型参考自适应的 PMSM 无传感控制[J].计算机应用研究,2019,36(12): 3788.
- [5] 石慕杰.基于扩展卡尔曼滤波的转子速度和位置观测研究[J].变频器世界,2016(10): 69.
- [6] 张海刚,聂圆圆,张磊,等.基于改进卡尔曼滤波的无速度传感器探究[J].系统仿真学报,2018,30(10): 3761.
- [7] 李梦瑶,孙逢春,何洪文.基于模型参考自适应的永磁同步电机矢量控制[J].测试技术学报,2019,33(4): 322.

- [8] RENU K, KUMARI N K, KRISHNA D S G. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor with flux weakening operation for washing machine application [C] // 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2018.
- [9] 谢统辉. 基于单片机的永磁同步电机控制方法 [J]. 电子技术与软件工程, 2017(7): 264.
- [10] 李佑虹. 基于嵌入式 DSP 的小功率无刷直流电机控制系统的仿真研究 [J]. 科技风, 2018(9): 37.
- [11] 许中阳, 郭希铮, 邹方朔, 等. 永磁同步电机无速度传感器控制离散化方法研究 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(增刊 1): 52.
- [12] 王维强, 曾晓松, 夏茂树, 等. 基于 dSPACE 的电动汽车电机调速控制策略研究 [J]. 电机与控制应用, 2018, 45(8): 86.
- [13] 杜常清, 徐懂懂. 基于 dSPACE 的混合动力汽车控制策略半实物仿真平台 [J]. 自动化与仪表, 2018, 33(1): 79.
- [14] 陈再发, 刘彦呈, 卢亨宇. 具有参数辨识的船舶永磁推进电机无位置传感器控制 [J]. 电机与控制学报, [http: // kns. cnki. net/kcms/detail/23. 1408. TM. 20190626.1056.006.html](http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1408.TM.20190626.1056.006.html)
- [15] WU J, WEI H, ZHANG Y, et al. Sensorless vector control of permanent magnet synchronous motor based on model reference adaptive system [C] // 2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC), 2017.
- [16] 陈杨. 基于 MRAS 无速度传感器的永磁同步电机转速跟踪控制 [J]. 科技通报, 2018, 34(10): 176.
- [17] NAIR R R, NARAYANAN G. Stator flux based model reference adaptive observers for rotor position and speed estimation in doubly-fed induction machines [C] // 2018 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2018.
- [18] 朱瑞杰. 基于模型参考自适应的永磁同步电机无位置传感器控制 [D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [19] 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.

(上接第 20 页)

- [7] 王如乾, 王国峰, 李存贺, 等. 开关磁阻电机固定频率预测电流控制策略 [J]. 电机与控制应用, 2018, 45(7): 1.
- [8] MAGNI L, RAIMONDO D M, ALLGOWER F. Nonlinear model predictive control [M]. Berlin: Springer, 2009: 345-369.
- [9] ZHANG R, ZHANG Y, QIAN X, et al. Direct instantaneous torque control of switched reluctance motor based on adaptive backstepping [C] // 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014.
- [10] 刘涛, 吴忠, 吕昊曦. 开关磁阻电动机转矩分配策略研究 [J]. 微电机, 2013, 46(7): 11.
- [11] 王喜莲, 许振亮, 王翠. 开关磁阻电机转矩脉动与铜耗最小化控制研究 [J]. 电机与控制学报, 2015, 19(7): 52.
- [12] VUJICIC V. Minimization of torque ripple and copper losses in switched reluctance drive [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1): 388.
- [13] 王姣. 基于模糊滑模控制的开关磁阻电机转矩分配控制系统研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [14] 王宏华. 开关型磁阻电动机调速控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.

(上接第 28 页)

- [17] ERGENE L T, SALON S J. Determining the equivalent circuit parameters of canned solid-rotor induction motors [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(7): 2281.
- [18] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2004: 180-182.
- [19] 林宏民, 吴晓新, 乐胜康, 等. 基于三电平优化矢量的异步电机模型预测直接转矩控制 [J]. 电机与控制学报, 2018, 22(8): 65.
- [20] 缪仲翠, 党建武, 巨梅, 等. 基于分数阶滑模观测的感应电机无速度传感器矢量控制 [J]. 电机与控制学报, 2018, 22(5): 84.