

DOI: 10.7652/xjtub201309010

永磁同步电机宽速域无位置传感器控制

续丹, 包鑫, 霍小宁, 曹秉刚

(西安交通大学电动汽车与系统控制研究所, 710049, 西安)

摘要: 基于采用改进型模型参考自适应法及脉振高频电压信号注入法对电机转子转速和位置进行辨识的原理与性能的分析, 提出了一种宽速域内适用的无位置传感器复合控制法。通过滞环加权切换法实现了2种方法的平滑切换, 克服了改进型模型参考自适应法在零速与低速时误差大, 以及脉振高频电压注入法在高速时有稳态位置误差的缺点。经实验验证, 复合控制法能在宽速域内准确地辨识出转子的转速与位置, 系统动态响应快, 鲁棒性好, 对于宽速域内永磁同步电机无位置传感器研究具有重要的理论和现实意义。

关键词: 永磁同步电机; 无位置传感器控制; 参考自适应法; 高频脉振电压信号注入法; 复合控制
中图分类号: TM35 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)09-0060-05

Sensorless Technique for Permanent Magnet Synchronous Motor with Wide-Speed-Range

XU Dan, BAO Xin, HUO Xiaoning, CAO Binggang

(Institute for Electric Vehicle and System Control, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: From the analysis on the principle and performance of the rotor speed and the position identification using the improved model reference adaptive system and fluctuating high frequency voltage signal injection, a hybrid of sensorless technique for PMSM (permanent magnet synchronous motor) in the wide-speed-range was presented. The hybrid control strategy can switch smoothly between the two methods by using a hysteresis weight switch-over strategy. The hybrid controller not only overcomes the steady-state error of fluctuating high frequency voltage signal injection at high speeds but also reduces the unacceptable error of the improved model reference adaptive system at zero and low speeds. The experiment results show that the hybrid control method can precisely identify the rotor speed and position, and it has quicker dynamic response and strong robustness. The results of this study may be beneficial to the research on the sensorless control strategy for PMSM with wide-speed-range.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; position sensorless control; reference adaptive system; fluctuating high frequency voltage signal injection; hybrid control

永磁同步电机(PMSM)具有体积小、质量轻、效率高等特点, 在各种高性能驱动系统中得到了广泛的应用^[1]。对于高性能的驱动系统, 需要检测电机转子的位置和速度, 然而传统机械传感器的安装增加了系统的体积和成本, 降低了系统的可靠性, 也限

制了永磁同步电机在一些特殊场合的应用。为了克服机械传感器给系统带来的缺陷, 近年来无位置传感器技术成为电机控制领域的研究热点^[2-3]。

无位置传感器技术分两类: 第一类是基于电机的基波激励模型, 主要涉及模型参考自适应法

(MRAS)、扩展卡尔曼滤波法、全阶观测器等,这类方法仅适用于中、高速场合;第二类是基于电机的凸极和磁饱和效应产生的异向性,高频信号叠加在电机基波模型上,转子的位置可以通过激励的高频电流获得,这类方法更适用于低速及零速^[4]。

将这两类方法结合是实现永磁同步电机宽速域无位置传感器控制的有效途径。考虑到扩展卡尔曼滤波等方法的复杂性,而旋转高频电压信号注入法仅适用于凸极效应明显的内插式永磁同步电机,通过综合分析,本文提出中、高速时运用模型参考自适应法和低速及零速时运用高频脉振电压信号注入法的复合控制,经仿真与实验取得了良好的效果。

1 改进型模型参考自适应法

1.1 传统 MRAS 法及其改进

假设电机三相绕组对称,不考虑磁路饱和、磁滞和涡流损耗等影响,且空间磁场呈正弦分布,将面贴式永磁同步电机在 d - q 轴的电流方程作为传统 MRAS 法可调模型^[5-6],则有

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

式中: u_d 和 i_d 分别为 d 轴的电压和电流; u_q 和 i_q 分别为 q 轴的电压和电流; $i'_d = i_d + \phi_r/L$, ϕ_r 为转子磁通; $i'_q = i_q$; $u'_d = u_d + R\phi_r/L$; $u'_q = u_q$; L 为等效轴电感; R 为定子电阻。式(1)中的电机定子电阻随工况变化较大,从而降低了转速辨识精度,因此在传统 MRAS 法中加入定子电阻在线辨识,将定子电阻作为可调参数,则式(1)可改写为^[7]

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}'_d \\ \hat{i}'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\hat{R}}{L} & \hat{\omega} \\ -\hat{\omega} & -\frac{\hat{R}}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}'_d \\ \hat{i}'_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

将式(2)作为可调模型,根据 Popov 超稳定理论^[7-8]得

$$\hat{\omega} = \int_0^t K_i [i_d \hat{i}_q - i_q \hat{i}_d - \phi_r (i_q - \hat{i}_q)/L] d\tau + K_p [i_d \hat{i}_q - i_q \hat{i}_d - \phi_r (i_q - \hat{i}_q)/L] + \hat{\omega}(0) \quad (3)$$

$$\hat{R} = \int_0^t K_{ii} [(i_q - \hat{i}_q) \hat{i}_q + \hat{i}_d (i_d - \hat{i}_d)] d\tau + K_{pp} [(i_q - \hat{i}_q) \hat{i}_q + \hat{i}_d (i_d - \hat{i}_d)] + \hat{R}(0) \quad (4)$$

当 K_i 、 K_p 、 K_{ii} 、 K_{pp} 大于 0 时,转子的位置可以通过对转速的积分获得。改进型 MRAS 转速辨识算法框图如图 1 所示。

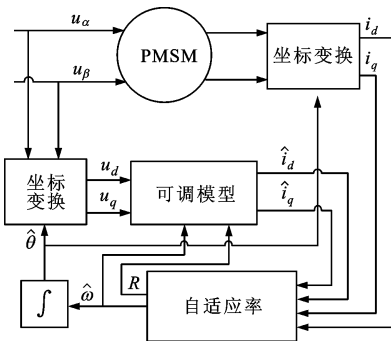


图 1 改进型 MRAS 法转速辨识算法框图

1.2 改进型 MRAS 法的仿真与结果分析

利用 Matlab/Simulink 软件建立了改进型 MRAS 法无位置传感器矢量控制系统的仿真模型,其中采用了典型的 $i_d=0$ 控制方式。仿真条件如下:永磁同步电机极对数 $p=4$;定子电阻 $R=2.875 \Omega$, 0.1 s 后为 1.6Ω ;转子磁通 $\phi_r=0.175$ Wb;等效轴电感 $L=0.0085$ H;转动惯量 $J=0.001$ kg·m;负载转矩 $T_m=5$ N·m;给定速度 $\omega_{ref}=500$ rad/s。传统与改进型 MRAS 法转速响应对比如图 2 所示,图中 $\hat{\omega}$ 为估算转速, ω 为实际转速。

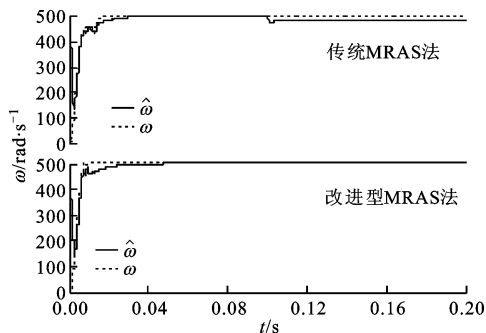


图 2 传统与改进型 MRAS 法的转速响应对比

从图 2 可以看出,定子电阻的变化会给传统 MRAS 法带来不可消除的转速误差,而改进型 MRAS 法在定子电阻变化时系统的鲁棒性增强,辨识转速几乎不受影响。MRAS 法在电机启动的低速及零速时估算误差较大,实现低速及零速的高精度辨识必须借用其他方法。

2 脉振高频电压信号注入法

2.1 脉振高频电压信号注入法原理

在估计的同步旋转 d - q 轴中,脉振高频电压信号注入法在 d 轴注入的正弦高频电压信号 $u_{dsi}^r = U_i \cos \omega_i t$ 。若注入电压角频率远高于电机本体角频率,则对应高频电流激励为^[9]

$$\left. \begin{aligned} i_{dsi}^r &= U_i \cos \omega_i t (z_{avr} - z_{dif} \cos 2\Delta\theta_r) / (z_{di}^r z_{qi}^r) \\ i_{qsi}^r &= U_i \cos \omega_i t (-z_{dif} \sin 2\Delta\theta_r) / (z_{di}^r z_{qi}^r) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

测试对比电机实际速度与位置时采用了 2 500 线光电编码器;400 W 永磁直流有刷负载电机,参数如表 2 所示。注入的脉振高频电压信号频率为 750 Hz,幅值取基波幅值的 10%,速度切换区间为 $\omega_1 = 18 \text{ rad/s}$, $\omega_2 = 300 \text{ rad/s}$ 。实验按如下条件进行:①参考电角速度分别为 20 rad/s 和 600 rad/s;②母线电压为 60 V;③功率器件开关频率为 10 kHz。恒定负载 1 N·m 时,宽速域复合控制与 2 种方法单独控制时转速、位置响应的实验结果对比如图 11、图 12 所示。初始时空载运行,0.5 s 突加负载 1 N·m,1.5 s 突卸负载 1 N·m 时,宽速域复合控制的转速误差与位置误差如图 13 所示。

表 2 负载电机参数

额定电压/V	180	额定转矩/N·m	2.67
额定转速/r·min ⁻¹	1 500	额定功率/W	400
额定电流/A	2.67	定子电阻/Ω	5.6

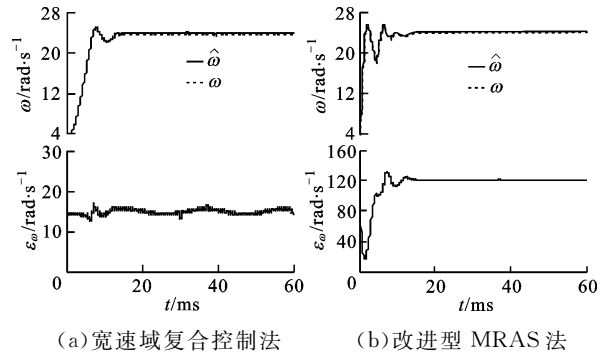


图 11 20 rad/s 转速响应

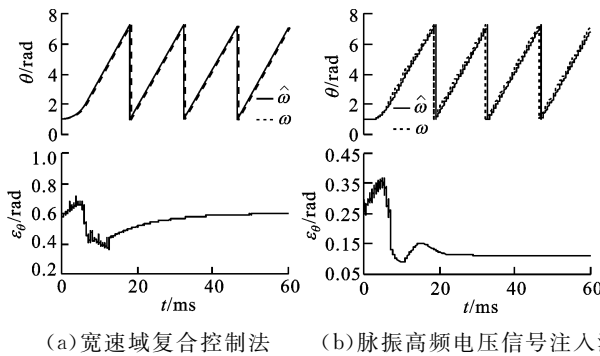


图 12 600 rad/s 位置响应

从图 11、图 12 可以看出,复合控制法克服了改进型 MRAS 法在零速与启动时估算误差大和脉振高频电压信号注入法在高速区间位置估算误差大的缺点,实现了宽速域内的无位置传感器控制。从图 13 可以看出,系统在突卸转矩时体现出了良好的稳定性,估算误差变化较小且很快趋向于 0。

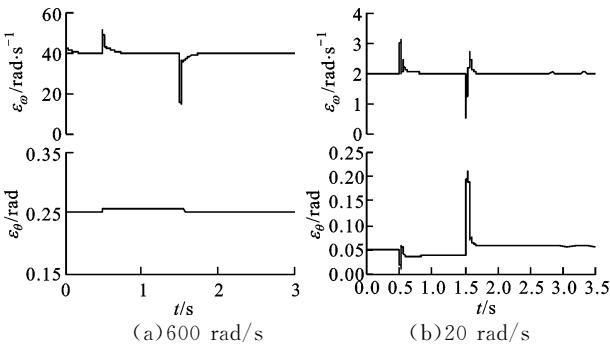


图 13 宽速域复合控制下突加、卸负载时的转速误差与位置误差

5 结 论

本文提出了一种改进型模型参考自适应法与脉振高频电压信号注入法相结合的宽速域无位置传感器复合控制方法,它可实现永磁同步电机宽速域的无位置传感器控制。通过加权滞环切换法实现了 2 种方法的平滑切换,利用随速度变化的加权因子 K ($0 \leq K \leq 1$) 实现了转速低于切换区间下限 ω_1 时完全采用脉振高频电压信号注入法($K=1$),转速高于切换区间上限 ω_2 时完全采用改进型模型参考自适应法($K=0$),在切换区间内 2 种方法复合控制且逐渐切换($0 < K < 1$)。该方法克服了 2 种方法单独应用的局限性。经过对一台面贴式永磁同步电机的仿真与实验研究表明,在低速与中速域内,复合控制法对转速与位置的辨识快速准确、鲁棒性较强。虽然算法较为复杂、程序调节周期长,且对部分参数选定较为敏感,但其为实现宽速域无位置传感器控制的有效途径,对其他型式的永磁同步电机以及更宽速域的无位置传感器复合控制的研究具有一定的启发意义。

参考文献:

[1] CHINY K, SOULARD J A. A permanent magnet synchronous motor for traction application of electric [C] // Proceedings of Electric Machines and Drives Conference, Madison, Wisconsin, USA; IEEE Co-Sponsoring Technical Societies, 2003: 1035-1041.

[2] ERTUGRUL N, ACARNLEY P P. A new algorithm for sensorless operation of permanent magnet synchronous motors [J]. IEEE Trans, 1997, 30(1): 126-133.

[3] KULKARNI A B, EHSANI M A. Novel position sensor elimination technique for interior permanent magnet synchronous motor drive [J]. IEEE Trans: IA,

(下转第 133 页)