

基于改进低通滤波的无传感器永磁同步电机 矢量控制技术研究*

施铃丽¹, 谢源¹, 何志明²

(1. 上海电机学院 电气学院, 上海 201306;

2. 苏州半唐电子有限公司, 江苏 苏州 215332)

摘要: 转子位置角估算是无传感器永磁同步电动机(PMSM)矢量控制的关键,其精度直接影响控制系统的性能。基于磁链观测器的转子位置角估算方法简单易实现,但系统控制性能受磁链估算动态性能限制。为提高无传感器 PMSM 矢量控制系统的运行性能,对交换滤波与补偿顺序的改进低通算法进行了拓展性研究,通过 MATLAB 仿真验证了改进方法的可行性和有效性。

关键词: 永磁同步电动机; 改进低通滤波算法; 无传感器; 矢量控制

中图分类号: TM 341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)12-0031-05

Research on Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Vector Control Based on Improved Low-Pass Filter*

SHI Lingli¹, XIE Yuan¹, HE Zhiming²

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China;

2. Suzhou Parton Electronics Co., Ltd., Suzhou 215332, China)

Abstract: The estimation of rotor-position-angle was the key to the vector control of the sensorless permanent magnet synchronous motor (PMSM), and its precision will directly affect the performance of the control system. The rotor-position-angle estimation method based on the flux observer was easy to realize, but the system control performance was limited by the dynamic performance of the flux linkage estimation. To improve the running performance of sensorless PMSM vector control system, an improved low-pass filter algorithm featured in the exchange of filtering and compensation order was studied, and the feasibility and effectiveness of the improved method were proved by using MATLAB simulation.

Key words: permanent magnet synchronous motor; improved low-pass filter algorithm; sensorless; vector control

0 引言

无传感器永磁同步电动机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)的控制系统因其成本低、安装简单、体积小、质量轻、损耗小、抗干扰能力强等优点,在工程实际应用中备受关注^[1-7]。

其中,基于电压模型磁链观测器的无传感器矢量控制算法计算过程简单,仅需定子电阻参数,无需转子速度等信息,是无传感器 PMSM 矢量控制系统的重要研究方向之一。磁链观测器的观测精度将直接影响转子位置角的估算,从而影响矢量控制系统的性能。大量文献对基于电压模型的磁链

* 基金项目: 上海市科学技术委员会科研项目(17DZ1201200)

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

谢源(1978—),男,博士,副教授,研究方向为电机控制、风力发电状态监测、故障诊断等。

何志明(1971—),男,博士,研究方向为电机控制。

观测方法进行了深入研究^[8-10]。

电压模型磁链观测器运用理想积分器计算定子磁链时,变频器直流电压和定子电流的测量误差、定子电阻参数的变化等都将引起积分结果的直流漂移^[11-13],导致磁链估算不准确,从而影响系统的运行特性。针对该问题,文献[14-18]提出采用低通滤波器代替理想积分器,但该方法会引入稳态误差,需增加补偿环节,对低通滤波器输出结果进行幅值和相位补偿。

文献[19]提出利用定子磁链积分正交性,对补偿电压积分模型进行闭环补偿自动调整使磁链补偿达到最优,理论上观测精度有所提高,但涉及限幅器幅值的选取,要求较为严格,实际系统中难以实现。文献[20]提出了一种改进的新型磁链算法,对圆形和椭圆形磁场均能准确估算,在中高速范围内,稳态及转速突变时均具有良好的位置和转速跟踪性能,但在低速区会出现系统不稳定。文献[21]提出一种新型的改进低通滤波算法,该算法先对定子感应电势进行幅值和相位补偿,再经低通滤波处理获得定子磁链,在感应电机直接转矩控制(Direct Torque Control, DTC)系统得到仿真和试验验证,具有良好的动态性能。

DTC除了需要定子磁链角以外,还需利用定子磁链幅值,其估计误差将影响系统的低速动态性能,尤其是影响系统的最大输出力矩。矢量控制则不存在这一问题。该算法在矢量控制平台的应用有利于进一步提高系统低速运行性能。为提高无传感器PMSM矢量控制系统的运行性能,尤其是低速时的动态性能,同时验证改进低通滤波算法的通用性,本文通过理论和仿真分析,对文献[21]提出的新型改进低通滤波算法进行了拓展性研究。

1 基于改进低通滤波算法的转子位置角估算原理

1.1 改进低通滤波算法

结合文献[21],改进低通滤波器的PMSM转子位置角观测框图如图1所示。

由图1可得:

$$E'G = E \quad (1)$$

式中: E' ——补偿前感应电势空间矢量;

E ——补偿后感应电势空间矢量;

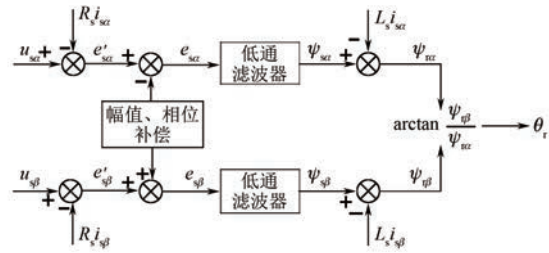


图1 改进低通滤波器的PMSM转子位置角观测器原理框图

G ——补偿矢量函数^[21]。

其中:

$$G = \frac{\sqrt{\omega_e^2 + \omega_c^2}}{\omega_e} e^{j(\arctan \frac{\omega_c}{\omega_e} - \frac{\pi}{2})} = G(\omega_e) e^{j\rho(\omega_e)} \quad (2)$$

$$G(\omega_e) = \frac{\sqrt{\omega_e^2 + \omega_c^2}}{\omega_e} \quad (3)$$

$$e^{j\rho(\omega_e)} = \cos[\rho(\omega_e)] + j\sin[\rho(\omega_e)] \quad (4)$$

$$\cos[\rho(\omega_e)] = \frac{\omega_e}{\sqrt{\omega_e^2 + \omega_c^2}} \quad (5)$$

$$\sin[\rho(\omega_e)] = -\frac{\omega_c}{\sqrt{\omega_e^2 + \omega_c^2}} \quad (6)$$

式中: ω_e ——定子电角频率;

ω_c ——低通滤波器截止频率。

由式(1)~式(6)可得改进低通滤波算法补偿后的 α - β 轴的感应电动势为(式中符号的极性与正方向规定有关)

$$\begin{cases} e_{s\alpha} = e'_{s\alpha} - \frac{\omega_c}{\omega_e} e'_{s\beta} \\ e_{s\beta} = e'_{s\beta} + \frac{\omega_c}{\omega_e} e'_{s\alpha} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $e_{s\alpha}$ —— α 轴的感应电动势;

$e_{s\beta}$ —— β 轴的感应电动势。

则:

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} = \frac{e_{s\alpha}}{j\omega_e + \omega_c} \\ \psi_{s\beta} = \frac{e_{s\beta}}{j\omega_e + \omega_c} \end{cases} \quad (8)$$

本文研究针对隐极电机,凸极率 $\rho \approx 1$,因此有 $L_d \approx L_q \approx L_s$,则:

$$\begin{cases} \psi_{r\alpha} = \psi_{s\alpha} - L_s i_{s\alpha} \\ \psi_{r\beta} = \psi_{s\beta} - L_s i_{s\beta} \end{cases} \quad (9)$$

$$\theta_r = \arctan \frac{\psi_{r\beta}}{\psi_{r\alpha}} \quad (10)$$

式中： $\psi_{s\alpha}$ 、 $\psi_{s\beta}$ —— α 、 β 轴的定子磁链；
 $\psi_{r\alpha}$ 、 $\psi_{r\beta}$ —— α 、 β 轴的转子磁链；
 L_s ——定子电感；
 θ_r ——转子位置角。

1.2 改进低通滤波器提高动态性能的物理机理

文献[21]针对改进低通滤波器具有更好的动态跟踪性能进行了数学上的理论分析, 本文将从物理层面作进一步分析。为便于叙述, 以下所分析的改进前后两种磁链观测算法仅存在低通滤波和补偿先后顺序不同, 其他条件都相同。

首先, 由于磁链观测器中的补偿矢量函数反比于定子电角频率, 在速度升高后, 系统的动态性能会随之得到提高, 所以下文分析所指动态性能特指低速时的动态性能。稳态时, 改进前低通滤波算法(先低通滤波处理, 再对磁链进行幅值、相

位补偿)和改进后低通滤波算法在磁链估算方面精度相同, 不存在差异性。动态时, 因改进前低通滤波算法是在低通滤波处理后对磁链进行幅值和相位补偿, 在输入信号频率突变时, 因补偿系数 G 的突变, 导致估计磁链突变, 从而导致磁链估算不准确, 转子位置角估算存在误差, 系统的跟踪性能差; 改进后低通滤波算法是在低通滤波处理前对感应电动势进行幅值和相位补偿, 输入信号频率突变时, 不会引起估计磁链的突变, 磁链估算更准确, 系统具有更好的动态跟踪性能。

2 系统仿真研究

为验证改进后低通滤波算法在无传感器 PMSM 矢量控制系统的通用性能, 建立基于改进后低通滤波算法的 40 W 无传感器 PMSM 矢量控制系统的仿真平台。无传感器 PMSM 矢量控制框图如图 2 所示。仿真模型使用的电机参数如表 1 所示。

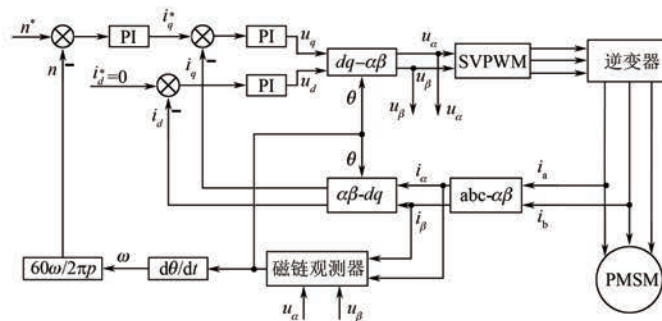


图 2 无传感器 PMSM 矢量控制框图

表 1 仿真电机参数

参数名称	参数值
额定功率/W	40
额定电压/V	220
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 100
定子电阻/Ω	56
定子电感/H	0.224
极对数	4

为了验证改进后低通滤波算法在矢量控制下的有效性和优良的动态性能, 尤其是低速性能, 对无传感器 PMSM 矢量控制系统在低速下的动态过程进行仿真研究。

仿真过程中, 电机从 $t=0$ s 开始空载起动, 仿真模型中控制周期、采样周期、磁链估算的计算周

期均设置为 100 μs。

仿真结果如图 3~图 7 所示。图 3 是基于改进前低通滤波算法的无传感器 PMSM 矢量控制系统的转速图形。其中, 图 3(a) 为系统在 $t=3.5$ s 时, 电机的给定转速由 400 r/min 突变至 95 r/min, 负载由 0 N·m 突变至 0.15 N·m (系统不失控) 的波形; 图 3(b) 是系统在相同时刻转速突变为 90 r/min, 负载突变为 0.15 N·m (系统失控) 的波形。由图 3 可知, 改进前系统在不失控的情况下可达最低转速为 95 r/min, 是系统额定转速的 8.6%, 转速指令低于该速度都会导致系统失控。

图 4 所示为改进后系统的转速图形。在 $t=3.5$ s 时, 电机的给定转速由 400 r/min 突变至 5 r/min, 负载由 0 N·m 突变至 0.15 N·m。由图 4

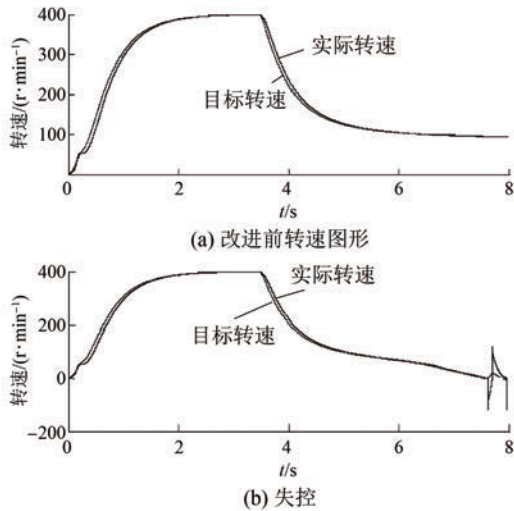


图3 改进前系统是否失控的转速对比

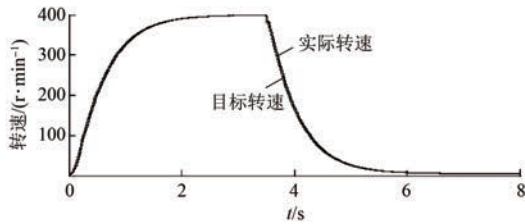


图4 改进前后系统可达最低转速

可知,改进后系统在不失控的情况下可达最低转速为 5 r/min,是系统额定转速的 0.45%。对比可知,改进后算法显著拓宽了系统低速运行范围,具有更好的低速性能。

图5所示为改进前后系统可稳定最低转速的

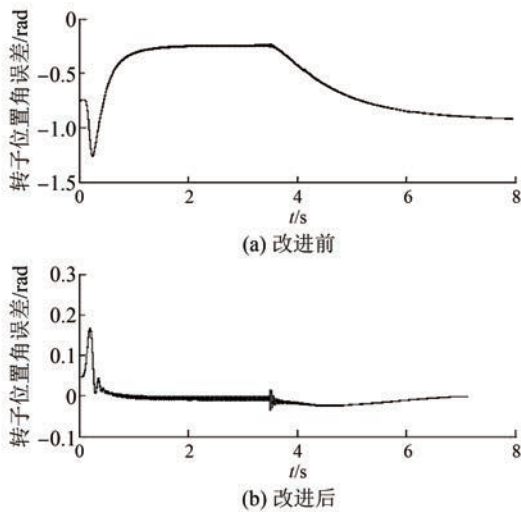


图5 改进前后系统可稳定最低转速的转子位置角误差对比

转子位置角误差。对比图5(a)和图5(b)可知:改进前的转子位置角的误差最大为 1.20 rad,最小为 0.25 rad;而改进后的转子位置角的误差最大 0.16 rad,最小几乎为 0。改进后算法的转子位置角估算精度明显提高。

图6、图7是改进前后系统在 $t=5\text{ s}$ 时突加负载(0.15 N·m)的转速和转子位置角波形。由图6可知,在相同情况下,改进前系统需要约 1.7 s 可达稳定状态,而改进后系统仅需约 1.2 s 即可处于稳定状态。因此,改进后系统的低速动态性能更好。同时,对比图7(a)和图7(b)可知:改进后的转子位置角估算精度也更高。

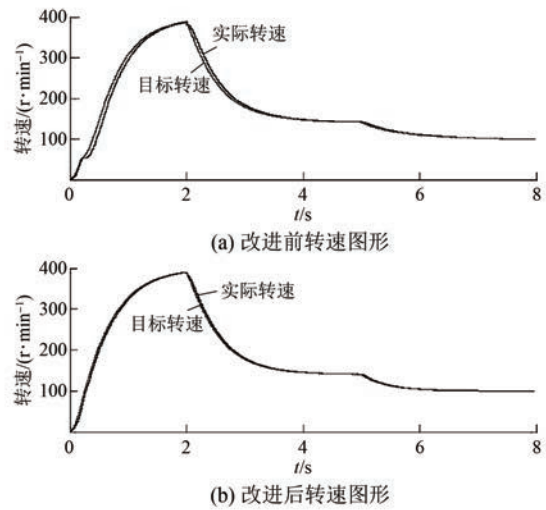


图6 改进前后系统突加负载的转速对比

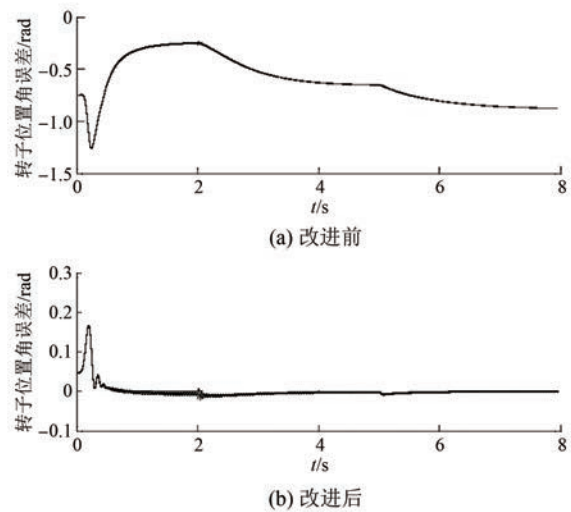


图7 改进前后系统突加负载的转子位置角误差对比

3 结 语

本文采用改进磁链观测算法来估算转子位置角,并在无传感器 PMSM 矢量控制系统中进行仿真研究,仿真结果验证了该方法的有效性。对比改进前的无传感器 PMSM 矢量控制系统,改进后的方法具有以下优点:

(1) 转子位置角的估算精度提高,估算误差在负载突变时由改进前的最大 0.8 rad 降到改进后的 0.01 rad;

(2) 系统的低速运行范围明显提高,改进前系统可达到的最低转速约为系统额定转速的 8.6%,而改进后的算法达到的最低转速为系统额定转速的 0.45%;

(3) 系统的中低速性能明显提高,在突加负载的情况下,改进后系统可更快趋于稳定。

【参 考 文 献】

- [1] 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.
- [2] KUMAR R, DAS S, PYAM P, et al. Review on model reference adaptive system for sensorless vector control of induction motor drives [J]. IET Electric Power Applications, 2015, 9(7): 496-511.
- [3] 向国菲, 掂松宜, 蒲明. 基于 EKF 永磁同步电机无传感直接转矩控制研究 [J]. 控制工程, 2015, 22(3): 369-374.
- [4] PAL A, DAS S, PYAM P, et al. An improved rotor flux space vector based MRAS for field oriented control of induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(6): 5131-5141.
- [5] 丁莉芬, 刘大亮, 王桂荣, 等. 永磁直线同步电机无传感驱动系统全速范围位置估计新方法 [J]. 电机与控制应用, 2017, 44(9): 71-76.
- [6] 柏建勇, 刘雨佳. 基于 MRAS 观测器的 PMSM 无速度传感器模型预测电流控制 [J]. 新型工业化, 2015, 5(9): 52-58.
- [7] 符一凡, 向大为, 何志明. 一种无传感永磁电机效率自动跟踪控制方法 [J]. 新型工业化, 2017, 17(7): 5-13.
- [8] 张星, 瞿文龙, 陆海峰. 一种能消除直流偏置和稳态误差的电压型磁链观测器 [J]. 电工电能新技术, 2006, 25(1): 39-43.
- [9] 孙大南, 林立文, 刁利军, 等. 改进型感应电机电压模型磁链观测器设计 [J]. 北京交通大学学报, 2011, 35(2): 94-98.
- [10] 王贤明, 何露, 胡丽, 等. 基于新型磁链观测器的无速度传感器感应电机控制技术研究 [J]. 舰船科学技术, 2017, 39(6): 142-145.
- [11] BOSE B K, PATEL N R. A programmable cascaded low-pass filter based flux synthesis for a stator flux oriented vector controlled induction motor drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44(1): 140-143.
- [12] 李红, 罗裕, 韩邦成, 等. 带通滤波器法电压积分型定子磁链观测器 [J]. 电机与控制学报, 2013, 17(9): 8-16.
- [13] 周扬中, 毛洁. 基于有效磁链概念的永磁同步电动机新型定子磁链滑模观测器 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 152-158.
- [14] HU J, WU B. New integration algorithms for estimating motor flux over a wide speed range [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(5): 969-977.
- [15] 唐校, 杨澜倩, 赵世伟, 等. 基于低通滤波器的电压模型磁链观测及仿真研究 [J]. 微电机, 2014, 47(8): 26-29.
- [16] 杨立永, 谢晓峰, 陈智刚. 基于反电动势 PLL 法的 PMSM 无传感器控制研究 [J]. 电力电子技术, 2016, 50(12): 88-90.
- [17] 赵龙龙, 李百宇, 常国祥. 基于改进型 MRAS 的异步电机无传感器矢量控制策略研究 [J]. 黑龙江电力, 2017, 39(6): 481-485.
- [18] LI Y, HUANG W X, HU Y W. A low cost implementation of stator-flux-oriented induction motor drive [C] // Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing, 2005: 1534-1538.
- [19] 刘忠举, 梁宝明, 陈嘉福. 基于改进型积分器的矢量控制系统研究 [J]. 电力电子技术, 2010, 44(2): 62-63.
- [20] 李彪, 李黎川. 基于高性能磁链算法的永磁同步电动机无位置传感器控制 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(11): 59-67.
- [21] 何志明, 廖勇, 向大为. 定子磁链观测器低通滤波器的改进 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(18): 61-65

收稿日期: 2018-05-31