

具有低通滤波的改进电压型磁链观测器

李彪, 刘新正, 李黎川

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对现有算法在 PWM 波反电动势输入时磁链观测精度很差的问题, 采用了一种改进的电压型磁链观测算法, 在现有算法的基础上增加了一个低通滤波器和一个用于补偿低通滤波器引起的幅值和相位误差的补偿环节. 根据所采用的低通滤波器形式, 利用时间相量分析方法, 推出了滤波误差补偿公式, 并在不同的同步速情况下分析比较, 确定最佳补偿系数. 仿真结果证明, 新算法在 PWM 波反电动势输入情况下仍具有很高的磁链观测精度, 可以有效地消除积分漂移误差. 将新算法用于一永磁同步电动机无位置传感器控制系统, 仿真证明了新算法的可行性及有效性.

关键词: 磁链观测器; 积分漂移; 误差补偿; 永磁同步电机

中图分类号: TM341 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)12-0091-05

Modified Algorithm for Voltage Module Flux Estimation with Lowpass Filter

LI Biao, LIU Xinzheng, LI Lichuan

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To improve the poor precision of flux estimation of the existing algorithm under the PWM wave input of electromotive force (EMF), a modified stator flux estimation algorithm is adopted. Based on the modification of the existing algorithm, a lowpass filter (LPF) and a compensation unit are used. The compensation unit is for compensation of the amplitude and phase error caused by the LPF. The compensation formula is derived with time phasor method. The optimal compensation coefficient is ascertained via analyses at various synchronous speed. The simulation results show that the new algorithm can effectively eliminate the integrator drift with higher precision of flux estimation under permanent magnet synchronous motor wave input of EMF. The effectiveness of the new algorithm in a sensorless control of permanent magnet synchronous motor is also verified via simulation.

Keywords: flux estimation; integrator drift; error compensation; permanent magnet synchronous motor

准确的磁链观测是实现磁场定向和直接转矩控制的关键, 目前的磁链观测方法主要有电压模型、电流模型和基于两者切换的混合模型. 电压型磁链观测器由于简单, 易于实现, 对参数依赖小 (仅需要定子电阻参数), 所以一直很受关注^[1-7].

电压型纯积分磁链观测器引入一个积分环节, 给磁链观测带来初值误差和直流偏置误差两个问题. 这两种误差会使磁链空间矢量轨迹圆中心发生偏移, 磁链幅值上产生交流分量. 磁场定向闭环调节

时, 电动机会出现振动, 影响安全运行.

为消除上述纯积分环节存在的问题, 常用的方法是使用一阶低通滤波器来代替纯积分环节^[8], 这种方法可以消除初值误差, 但不能完全消除直流偏置误差, 而且低通滤波器的使用会带来附加的幅值和相位误差, 影响磁链观测精度. 文献[1]给出了一种新颖的磁链观测算法, 它由一个高通滤波器和一个坐标变换环节构成. 当输入反电动势为正弦波时, 这种算法可以有效地消除积分中初值误差和直流偏

置误差,而且不会引入幅值和相位误差,但在普遍使用的 PWM 波反电动势输入时磁链观测精度很差,几乎无法正常工作。

本文针对文献[1]中算法存在的问题进行改进,在原算法基础上加一低通滤波器和为补偿使用低通滤波器带来的幅值和相位误差的补偿环节。新算法在正弦波输入时和原算法具有相同的效果,仿真证明了新算法在 PWM 波输入情况下仍具有很高的磁链观测精度,可以有效地消除积分中初值误差和直流偏置误差,不会引入较大幅值和相位误差。

1 原算法及存在问题

原算法由一个高通滤波器和一个坐标变换环节构成^[1],高通滤波器的截止频率为电机同步电角频率 ω_e , $\alpha'\beta'$ 坐标系滞后于 $\alpha\beta$ 坐标系 $\frac{3}{4}\pi$ 电角度。原算

法原理框图如图 1 所示。

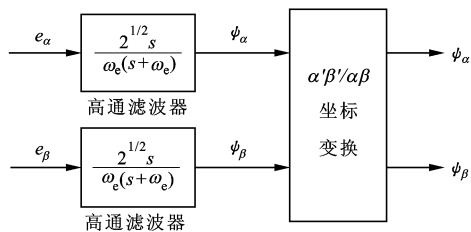


图 1 原算法原理简化图

这种算法在输入反电动势为正弦波时很有效,而在普遍使用的 PWM 波输入时磁链观测精度很差,几乎无法正常工作,如图 2 所示。

在同步角频率处,原算法具有和纯积分完全相

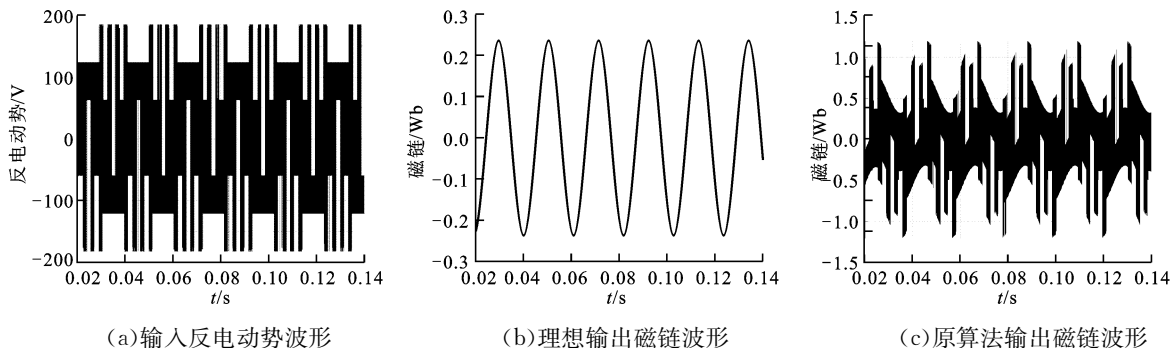


图 2 原算法在反电动势输入为 PWM 波时的输出磁链波形

同的幅频特性、相频特性,但在高次谐波频率段原算法幅频特性、相频特性与纯积分方法相差很大。因此,当输入反电动势为 PWM 波时,原算法作用与积分作用相差很大,几乎无法正常工作,需要改进。

2 改进的新算法

2.1 对原算法的改进

在原算法基础上加一低通滤波器,和用于补偿低通滤波器引起的幅值与相位误差的补偿环节,如图 3 中虚线框内所示。

图 3 中低通滤波器传递函数为 $H_{\text{LPF}}(s) = \frac{\omega_e}{s + k\omega_e}$, 其中 k 为补偿系数。

2.2 补偿环节算法

根据图 3 可得

$$\phi_{2\alpha}(s) = -\frac{\omega_e}{s + k\omega_e} \frac{s}{\omega_e(s + \omega_e)} E_{\alpha}(s) +$$

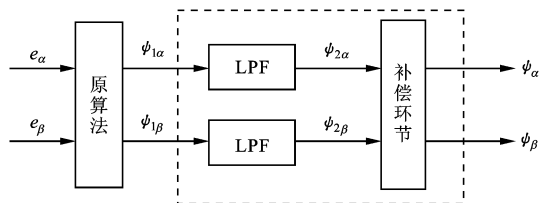


图 3 对原算法的改进

$$\frac{\omega_e}{s + k\omega_e} \frac{s}{\omega_e(s + \omega_e)} E_{\beta}(s) \quad (1)$$

$$\phi_{2\beta}(s) = -\frac{\omega_e}{s + k\omega_e} \frac{s}{\omega_e(s + \omega_e)} E_{\alpha}(s) -$$

$$\frac{\omega_e}{s + k\omega_e} \frac{s}{\omega_e(s + \omega_e)} E_{\beta}(s) \quad (2)$$

则在稳态时相对于基波,将 $s = j\omega_e$ 带入式(1)、式(2)整理可得

$$\phi_{2\alpha}(\omega_e) = \frac{1}{\omega_e} \frac{j}{(k-1) + (k+1)j} \cdot (-E_{\alpha}(\omega_e) + E_{\beta}(\omega_e)) \quad (3)$$

$$\psi_{2\beta}(\omega_e) = \frac{1}{\omega_e} \frac{-j}{(k-1) + (k+1)j} \cdot (E_\alpha(\omega_e) + E_\beta(\omega_e)) \tag{4}$$

期望稳态时新算法和纯积分具有相同的作用,即

$$\psi_\alpha(\omega_e) = \frac{1}{j\omega_e} E_\alpha(\omega_e) \tag{5}$$

$$\psi_\beta(\omega_e) = \frac{1}{j\omega_e} E_\beta(\omega_e) \tag{6}$$

通过对照式(3)~式(5),可得

$$\psi_\alpha = \frac{1}{j\omega_e} E_\alpha = \frac{(k-1) + (k+1)j}{2} (\psi_{2\alpha} + \psi_{2\beta}) \tag{7}$$

$$\psi_\beta = \frac{1}{j\omega_e} E_\beta = -\frac{(k-1) + (k+1)j}{2} (\psi_{2\alpha} - \psi_{2\beta}) \tag{8}$$

此处 $\psi_{2\alpha}$ 、 $\psi_{2\beta}$ 均为时间相量,所以 $\psi_{2\alpha}$ 应该超前于 $\psi_{2\beta} \frac{\pi}{2}$ 电角度,即应有

$$j = \psi_{2\alpha} / \psi_{2\beta}; \quad -j = \psi_{2\beta} / \psi_{2\alpha} \tag{9}$$

将式(9)带入式(7)、式(8),整理可得

$$\psi_\alpha = k\psi_{2\alpha} - \psi_{2\beta} \tag{10}$$

$$\psi_\beta = \psi_{2\alpha} + k\psi_{2\beta} \tag{11}$$

通过式(10)、式(11)即可补偿由于低通滤波器引起的幅值与相位的偏差.改进后新算法原理框图如图 4 所示.

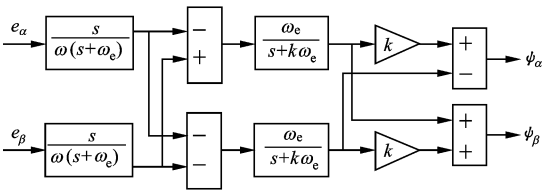


图 4 新算法原理框图

新算法在电机同步角频率 ω_e 处的幅频特性、相频特性和直流增益分别为

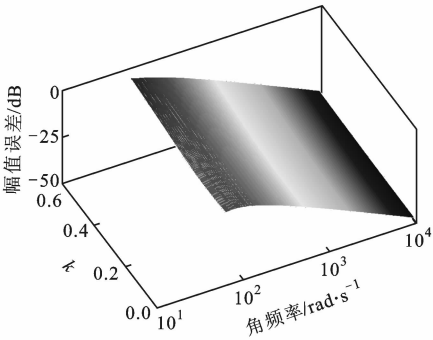
$$\begin{aligned} |G(j\omega_e)| &= 1/|\omega_e| \\ \angle G(j\omega_e) &= -90^\circ \\ |G(0)| &= 0 \end{aligned}$$

可见新算法在同步电角频率 ω_e 处具有和纯积分相同的幅频特性、相频特性,同时直流增益为 0,可以完全消除纯积分中初值误差和直流偏置误差.

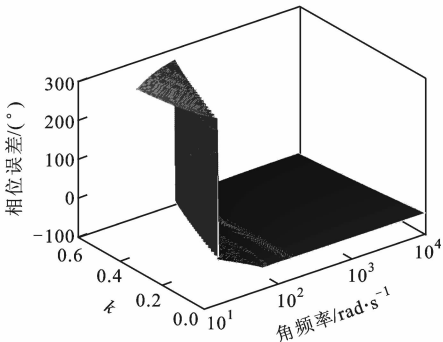
2.3 补偿系数 k 的选取

新算法幅频特性、相频特性与 ω_e 有关.当分别取 $\omega_e=314 \text{ rad/s}$ 和 $\omega_e=3\ 140 \text{ rad/s}$ 时,对应不同的系数 k .在高次谐波频率段,新算法相对于纯积分

的幅频特性误差和相频特性误差如图 5、图 6 所示

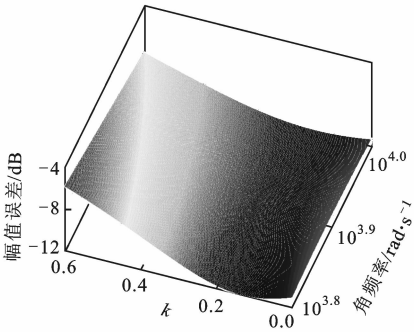


(a)幅频特性误差与 k 的关系

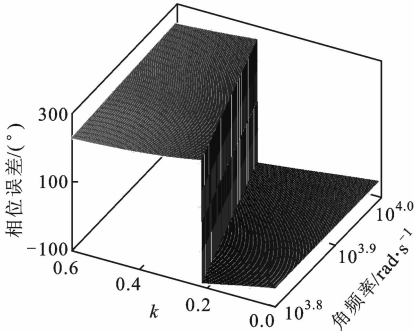


(b)相频特性误差与 k 的关系

图 5 $\omega_e=314 \text{ rad/s}$ 时的计算结果



(a)幅频特性误差与 k 的关系



(b)相频特性误差与 k 的关系

图 6 $\omega_e=3\ 140 \text{ rad/s}$ 时的计算结果

从图 5a、图 6a 可以看出, k 取得越大则高次谐

波频率段新算法相对于纯积分幅频特性误差越小,从图 5b,图 6b 可以看出,高次谐波频率段每个频率都有一个临界 k 值.当 k 大于某频率对应的临界 k 值时,该频率处新算法相对于纯积分的相频特性误差就会很大.通过同步速情况下高次谐波频率段相对于纯积分幅频特性误差、相频特性误差与 k 的关系,发现 k 的最佳值均为 0.2 左右,此时高次谐波频率段所有频率均只有较小的幅频特性、相频特性误差.

3 仿 真

仍采用图 2a 所示的反电动势输入 PWM 波,并叠加一直流偏置分量,采用新算法后,观测的磁链波形如图 7a 所示.

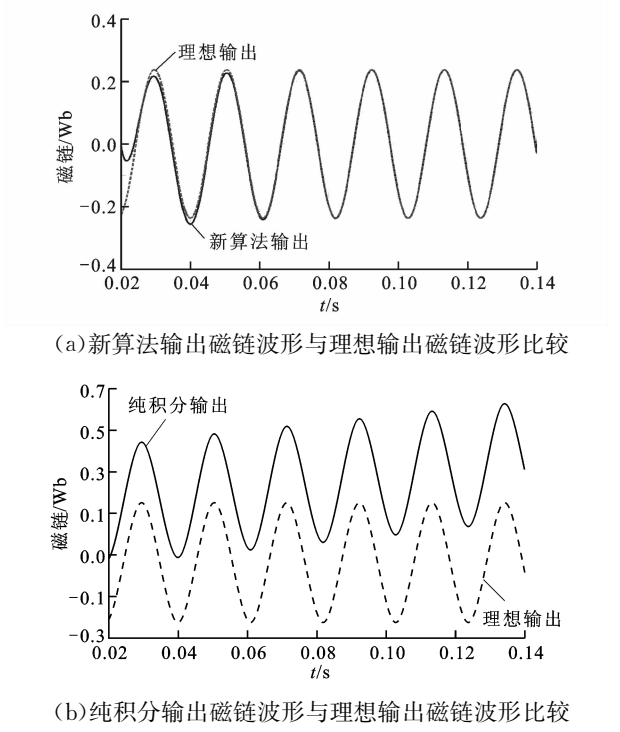


图 7 新算法与纯积分输出磁链波形与理想输出波形的比较

通过图 7 可以证明,新算法用于反电动势输入 PWM 波时仍具有很高的磁链观测精度,能消除初值误差和直流偏置误差,且不会引起较大的幅值与相位的误差.

将新算法用于一 PWM 波供电的永磁同步电动机无位置传感器控制系统,仿真中所用到电机参数为定子电阻 $R_s=2.875\ \Omega$,定子电感 $L_s=0.008\ 5\ \text{H}$,永磁体等效剩磁磁链 $\varphi_{pm}=0.175\ \text{Wb}$,转动惯量 $J=0.000\ 8\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$,极对数 $p=4$.控制系统采用 $i_d=0$ 控制策略.

在电机正常运行时($\omega_e=300\ \text{rad/s}$, $T=2\ \text{N}\cdot\text{m}$),从 0.2 s 开始反电动势叠加一直流偏置(直流偏置为稳态反电动势幅值的 0.1 倍),在新算法磁链观测器情况下,系统运行仿真结果如图 8 所示.可以看到,新算法可以有效地抑制直流偏置,使系统很快恢复正常运行.

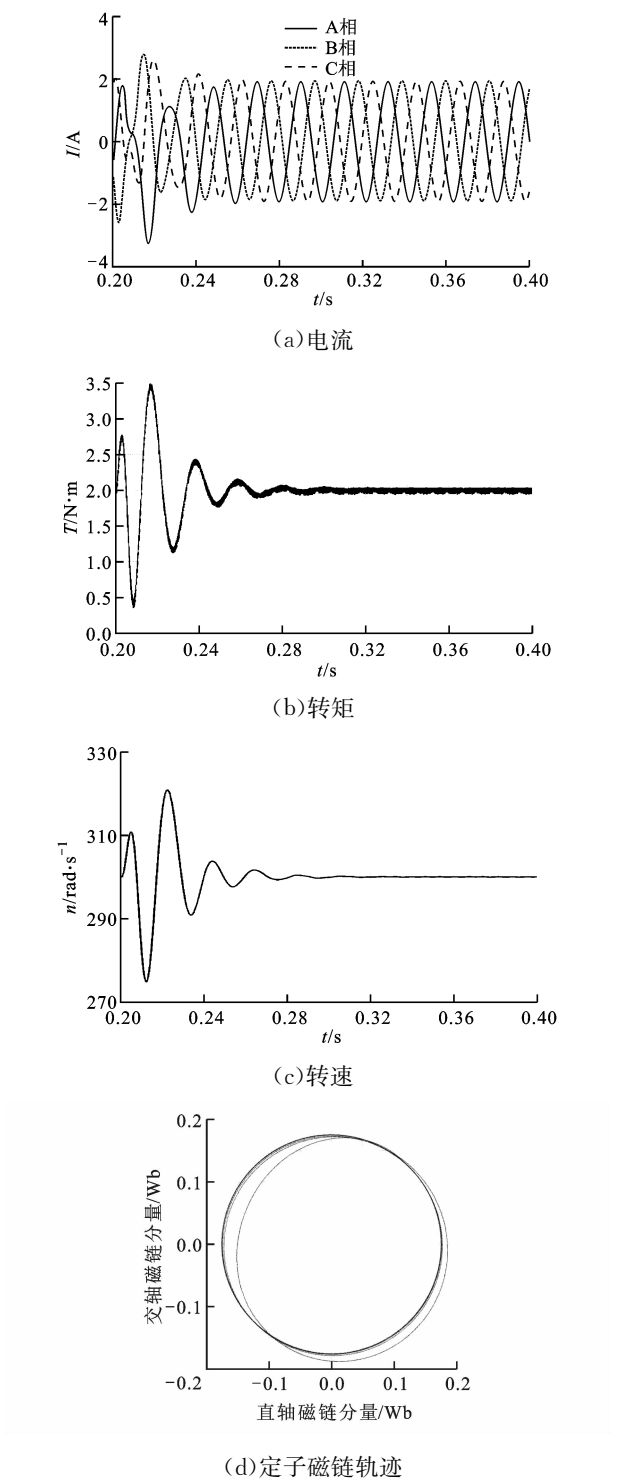


图 8 反电动势输入 PWM 波存在直流偏置时采用新算法的系统运行情况

4 结 论

电压型磁链观测器由于引入一个纯积分,从而存在初值误差和直流偏置误差两个问题,影响磁链观测精度和电动机的安全运行. 本文在文献[1]算法的基础上进行了改进,增加一个低通滤波器和一个用于补偿低通滤波器引起的幅值和相位误差的补偿环节. 改进后新算法在同步电角频率处和纯积分方法具有相同的幅频特性、相频特性. 仿真证明了新算法在 PWM 波输入时仍具有很好的磁链观测精度,可以有效消除初值误差和直流偏置误差,不会引起较大的幅值和相位误差. 将新算法用于一 PWM 波供电的永磁同步电动机无位置传感器控制系统,在反电动势出现直流偏置后,系统可以很快恢复正常工作状态,证明新算法可用于实际调速系统,实现较高精度控制.

参考文献:

- [1] 王宇,邓智泉,王晓琳. 一种新颖的电机磁链辨识算法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(6):39-43.
WANG Yu, DENG Zhiqun, WANG Xiaolin. A novel algorithm of motor flux estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(6): 39-43.
- [2] ZHANG Xing, QU Wenlong, LU Haifeng. A new integrator for voltage model flux estimation in a digital DTC system[C]//2006 IEEE Region 10 Conference. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2006: 1-4.
- [3] 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.

- HE Zhiming, LIAO Yong, XIANG Dawei. Improvement of low-pass filter algorithm for stator flux estimator[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(18): 61-65.
- [4] IDRIS N R N, YATIM A H M. An improved stator flux estimation in steady-state operation for direct torque control of induction machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(1): 110-116.
- [5] DE CARVALHO F V, PINTO J O P, DA SILVA L E B, et al. A DSP based torque meter for induction motors[C]//Proceedings of Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2003: 414-418.
- [6] COMANESCU M, XU L. An improved flux observer based on PLL frequency estimator for sensorless vector control of induction motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(1): 50-56.
- [7] 韦立祥,刘从伟,孙旭东,等. 一种消除电压型磁链观测器中直流偏置误差的新方法[J]. 清华大学学报(自然科学版),2001,41(9):51-54.
WEI Lixiang, LIU Congwei, SUN Xudong, et al. New integral error correction method for rotor flux identification of AC drives[J]. Journal of Tsinghua University(Sci & Tech), 2001, 41(9): 51-54.
- [8] CIRINCIONE M, PUCCI M. A new adaptive integration methodology for estimating flux in induction machine drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(1): 25-34.

(编辑 杜秀杰)