

DOI: 10.7652/xjtuxb201511017

新型磁链观测算法及其在永磁同步电机 无位置传感器控制中的应用

李彪, 李黎川

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对传统电压型磁链观测器在对电机内普遍存在的椭圆形磁场磁链进行观测时存在稳态幅值相位误差的问题,依据稳态时磁链与感应电动势在时域的基本关系,提出了 2 种结构简单、易于工程实现的新型磁链观测算法。新算法在同步角频率处与纯积分具有相同的频率特性, α 、 β 两相磁链观测不存在耦合,不再需要两相对称或感应电动势矢量与磁链矢量正交,因此能够对圆形和椭圆形磁链进行准确观测。对新算法进行了仿真,结果表明:新算法有效地消除了积分漂移,不存在稳态误差。将新算法应用于一台表贴式永磁同步电机无位置传感器调速系统的转子位置估算,并利用数字信号处理器 TMS320F2812DSP 对算法进行了数字化实现,结果表明:新算法在 10% 额定转速以上时具有良好的转速和位置跟踪效果,但在低速区估算结果不稳定;新算法具有良好的幅值、相位观测精度,从而使系统具有良好的稳态特性;当电机转速突变时,新算法具有良好的磁链观测精度,从而使系统具有良好的动态特性。

关键词: 磁链观测器;椭圆形旋转磁场;永磁同步电动机;无位置传感器控制

中图分类号: TM301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)11-0102-08

New Flux Estimation Algorithms for Position Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors

LI Biao, LI Lichuan

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

Abstract: Aiming at the problem that traditional flux estimation algorithms based on the voltage model would introduce magnitude and phase errors in steady state in the elliptical rotating magnetic field commonly existing in motors, two novel flux estimation algorithms were proposed based on the basic relationship between the back electromotive force (EMF) and the flux in steady state in time domain. They are simple in structure and easy to implement in industrial applications. The new algorithms have the same frequency characteristics as that of pure integrator at synchronous frequency, and there is no coupling in α and β phases. The new algorithms can estimate flux exactly either in circular rotating magnetic field or in elliptical rotating magnetic field, since neither the symmetry of the α and β phases nor the orthogonality of the flux vector and the back EMF vector is needed. Simulation results show that the new algorithms could effectively eliminate the integration drift, and realize errorless flux estimation in steady state. The new algorithms were used for the rotor position estimation in the position sensorless vector control of a surface-mounted permanent magnet synchronous motor (SPMSM).

Experiment was performed using a digital signal processor TMS320F2812DSP. Experimental results show that the new algorithms have fine speed and position tracking effect when operating at a speed 10% above the rated value, but in the low-speed region, there will be unstable estimation results. The speed control system has good steady-state performance since the new algorithms can exactly estimate the magnitude and phase of flux. The speed control system also has good dynamic characteristics due to the high flux estimation accuracy of the new algorithms when the motor speed has an abrupt change.

Keywords: flux estimation; elliptical rotating magnetic field; permanent magnet synchronous motor; position sensorless vector control

准确的磁链观测是实现交流电机磁场定向控制和直接转矩控制的关键。电压型磁链观测器由于算法简单,易于实现,对参数依赖小(仅需要电机定子电阻参数),从而在工业中获得了广泛的应用。但是,电压型磁链观测器中的纯积分环节会在观测的磁链中引入初始相位误差和直流偏置误差,产生积分漂移,从而引起转矩脉动,影响系统运行的稳定性。为了解决此纯积分存在的问题,常用一阶低通滤波器(LPF)来代替纯积分,从而消除初始相位误差并抑制直流偏置误差,但是在稳态时,尤其是当电机运行在低通滤波器截止频率以下时,又会存在幅值相位误差。文献[1]提出根据电机转速动态调整滤波器的截止频率来降低低速时观测磁链的稳态幅值相位误差,但是随着电机转速降低,算法中低通滤波器的截止频率也随之降低,大的时间常数导致在输入变化时观测结果又存在漂移问题。文献[2-7]采用一阶低通滤波器代替纯积分,用一个补偿环节来补偿稳态幅值相位误差。文献[5,8]指出,交换低通滤波环节与补偿环节的相对位置,可以增强磁链观测器动态时的观测精度。文献[9]采用一阶高通滤波器(HPF)代替纯积分,用一个坐标变换环节补偿稳态幅值相位误差。文献[10-13]采用一阶低通滤波器与一阶高通滤波器串联代替纯积分,再串联补偿环节来补偿稳态幅值相位误差。文献[14]采用带通滤波器(BPF)代替纯积分环节,并对观测磁链的稳态幅值相位误差进行补偿。文献[15]中的算法采用五阶低通滤波器串联一阶高通滤波器和一个逻辑转换模块,消除了积分漂移,同时抑制了系统中的高频干扰。

关于滤波器截止频率的选取,文献[4-6,9-12,15]中的可编程滤波器采用的截止频率是同步角频率的某一倍数,而不是取某一固定值,从而使算法在低速时兼顾了对直流偏置的抑制能力与动态过程中磁链观测的精度。关于稳态时幅值与相位误差的补

偿,文献[3-7,12,14]中的补偿环节采用了旋转空间矢量的方法,文献[2,8,10-11,13,15]中的补偿环节通过分析相关时间相量之间的关系得到,而文献[9]则采用坐标变换实现补偿。文献[7]还引入定子磁链的电流模型和电压模型之间的误差对定子感应电动势进行补偿。文献[16]采用低通滤波器代替纯积分,并用另一个低通滤波器进行幅值相位补偿,但 2 个低通滤波器的截止频率要求严格,需满足一定关系,且在低速时无法使 2 个滤波器的时间常数同时较低。文献[17-18]采用低通滤波器代替纯积分,用经过低通滤波的磁链反馈补偿稳态时的幅值相位误差,通过检测感应电动势矢量和磁链矢量的正交程度来决定反馈补偿程度。

对文献[2-15,17-18]]中的算法进行分析后发现,在稳态时观测磁链的准确性必须基于以下条件之一:

- (1)在时域, α 、 β 两相对称;
- (2)在空间,感应电动势矢量与磁链矢量的幅值之比等于同步角频率,磁链矢量滞后于感应电动势矢量 90° (电机反转时则超前 90°)。

分析可知这 2 个条件等价,且只在圆形磁场时成立。

一般情况下,电机本体设计和实时控制都期望电机中的磁场呈圆形,而在实际中,由于电机电阻、电感参数的不对称,逆变器电压-电流的非线性特性,逆变器开关量所加死区的影响,各相电流检测电路及调理电路的不对称,AD 采样转换电路的不对称,负载不对称等各种因素的影响,以及在调速系统动态调整过程中,电机磁场都会呈椭圆形。

当电机磁场呈椭圆形时,通过分析可知前述算法不再有效,从而出现磁链观测稳态误差。图 1 所示为 α 、 β 两相感应电动势存在 5% 幅值误差和 10% 相位误差时(具体参数见本文仿真部分),传统典型算法的稳态观测结果。本文依据稳态时磁链相量与

感应电动势相量的基本关系,提出2种新的算法。新算法在同步角频率处与纯积分具有相同的频率特性, α 、 β 两相磁链观测不存在耦合,不再需要两相对称或感应电动势矢量与磁链矢量正交,因此对圆形椭圆形磁链均能够进行准确观测。将新算法用于永磁同步电机无位置传感器调速系统的转子位置估算,通过仿真与实验证明了新算法的正确性和实用性。

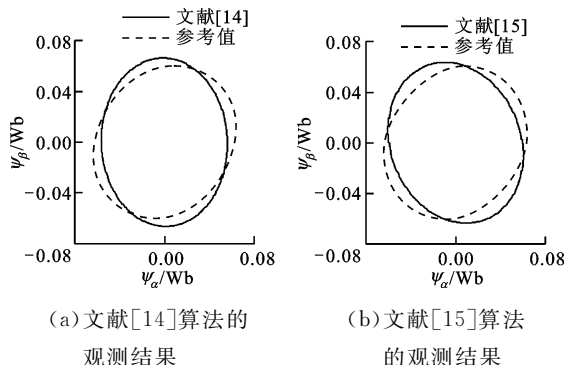


图1 传统磁链观测算法对椭圆形磁链的观测结果

1 新算法的原理

在静止两相 $\alpha\beta$ 坐标系下,交流电机电压模型的磁链表达式为

$$\Psi_{\alpha,\beta} = \int (v_{\alpha,\beta} - Ri_{\alpha,\beta}) dt = \int e_{\alpha,\beta} dt \quad (1)$$

式中: $\Psi_{\alpha,\beta}$ 、 $e_{\alpha,\beta}$ 、 $v_{\alpha,\beta}$ 、 $i_{\alpha,\beta}$ 分别为磁链、感应电动势、端电压与电流的 α 、 β 轴分量; R 为绕组电阻。

1.1 稳态时磁链与感应电动势的关系

稳态时感应电动势相量与磁链相量的关系为

$$\dot{\Psi}_{\alpha,\beta} = \frac{1}{j\omega_e} \dot{E}_{\alpha,\beta} \quad (2)$$

式中: ω_e 为同步角频率。无论圆形磁场或椭圆形磁场,式(2)所示相量关系均成立。因此,本文将式(2)作为基本关系,在此基础上提出新的磁链观测算法。

1.2 新磁链观测算法

1.2.1 算法1 初始相位误差和直流偏置误差作为直流量存在于纯积分观测磁链时的输出中,引起漂移。因此,在纯积分输出端串联一个带通滤波器,利用其原点处的零点使带通滤波器对直流量增益为零,以解决漂移问题,再通过输出负反馈以补偿串联带通滤波器后引入的稳态幅值相位误差。算法1的原理框图如图2所示,其中 b 为待定反馈系数, ω_e 为同步角频率, G_{BPF} 为带通滤波器的传递函数

$$G_{\text{BPF}}(s) = \frac{2\xi\omega_n s}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

式中: ω_n 为带通滤波器的中心频率, $\omega_n = k\omega_e$; ξ 为阻

尼系数。

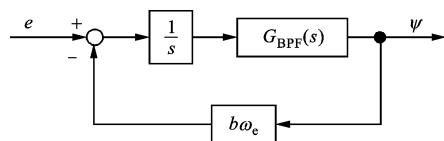


图2 算法1的原理框图

算法1采用中心频率为同步角频率 k 倍的可编程带通滤波器, k 值的选取会影响系统的动、静态性能。

由图2可得算法1的传递函数为

$$G(s) = \frac{2\xi\omega_n}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 + 2\xi\omega_n b\omega_e} \quad (4)$$

为消除稳态时的幅值相位误差,通过选取适当的反馈系数 b ,使算法的传递函数在同步角频率处与积分具有相同的频率特性,即

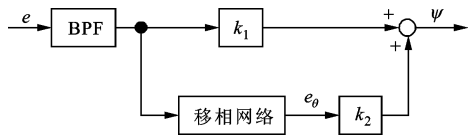
$$G(j\omega_e) = \frac{1}{j\omega_e} \quad (5)$$

由式(4)、式(5)可得反馈系数

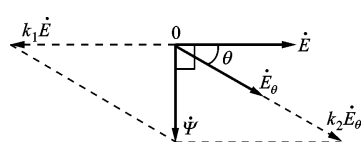
$$b = \frac{1 - k^2}{2\xi k} \quad (6)$$

1.2.2 算法2 算法1中利用带通滤波器在原点处的零点对消掉积分在原点处的极点,因此可以消除初始相位误差,但对直流偏置误差却只能抑制而无法彻底消除。要彻底消除直流偏置误差,则算法需要有一个原点处的零点。

在相量平面,任一相量都可以通过2个方向不同的非零相量的线性运算得到。依据磁链相量与感应电动势相量的关系,算法2的原理如图3a所示:先让感应电动势经过一个带通滤波器以彻底消除积分漂移,同时滤除系统高频干扰,带通滤波器中心频率选择等于同步角频率,这样对感应电动势的基波幅值与相位均无影响;然后,再利用滤波后的感应电动势相量和感应电动势经过一移相网络后得到的相量进行线性运算,得到磁链相量。各相量之间的关系如图3b所示。



(a)算法2原理示意图



(b)相量关系图

图3 算法2的原理框图

算法 2 中带通滤波器的传递函数为

$$G_{\text{BPF}}(s) = \frac{Bs}{s^2 + Bs + \omega_e^2} \tag{7}$$

式中: B 为带宽, $B=2\xi\omega_e$ 。

假设选取的移相网络在同步角频率 ω_e 处的频率特性为 $F\angle-\theta$, 则有

$$\dot{E}_\theta = F\dot{E}\angle-\theta \tag{8}$$

$$\dot{\Psi} = k_1\dot{E} + k_2\dot{E}_\theta = \frac{1}{\omega_e}\dot{E}\angle-\frac{\pi}{2} \tag{9}$$

式中: k_1, k_2 为线性运算系数。通过解三角形可得

$$k_1 = -\frac{1}{\omega_e}\cot\theta \tag{10}$$

$$k_2 = \frac{1}{\omega_e F}\frac{1}{\sin\theta} \tag{11}$$

算法 2 在仿真与实验中选择移相网络传递函数为

$$G_{\text{phase_shift}}(s) = \frac{(1+k^2)^{1/2}\omega_e}{s + k\omega_e} \tag{12}$$

则有: $F=1; k_1=-k/\omega_e; k_2=(1+k^2)^{1/2}/\omega_e$ 。

新磁链观测算法中 α, β 两相不存在耦合, 不求两相对称, 因此对圆形和椭圆形磁链均可以进行准确观测。

2 仿 真

为了验证新算法的有效性, 在 Matlab/Simulink 中进行离散系统仿真, 采样频率为 12 kHz。算法 1 取 $k=0.4, \xi=0.5$; 算法 2 取 $k=1.2, \xi=0.5$ 。

图 4a 所示为仿真所加感应电动势: 在 $0\sim0.25$ s, 感应电动势幅值为 7.97 V, 频率为 20 Hz; 在 $0.25\sim0.5$ s, 感应电动势幅值跃变为 15.94 V, 频率跃变为 40 Hz; 在 $0\sim0.5$ s, 感应电动势均叠加了大小为幅值 1% 的直流偏置。图 4b 所示为纯积分法的磁链观测结果, 可见存在明显的初始相位误差与直流偏置误差。图 4c 所示为算法 1 的磁链观测结果, 图 4d 所示为算法 2 的磁链观测结果, 从中可以看出, 新算法有效地消除了积分漂移, 不存在稳态误差。

图 5 所示为两相感应电动势不对称、磁链轨迹为椭圆形时, 新磁链观测算法的稳态观测结果。所加感应电动势频率为 20 Hz, α 相幅值为 7.97 V, β 相幅值为 α 相的 0.95 倍, β 相感应电动势的相位滞后于 α 相 $9\pi/20$, 同时两相感应电动势均叠加了大小为各自幅值 1% 的直流偏置。仿真结果证明, 新算法可以对椭圆形磁链进行准确观测。文献[14-15]中算法的观测结果如图 1 所示, 由于这 2 种算法是基于圆形磁场的, 因此对于椭圆形磁链的观测结

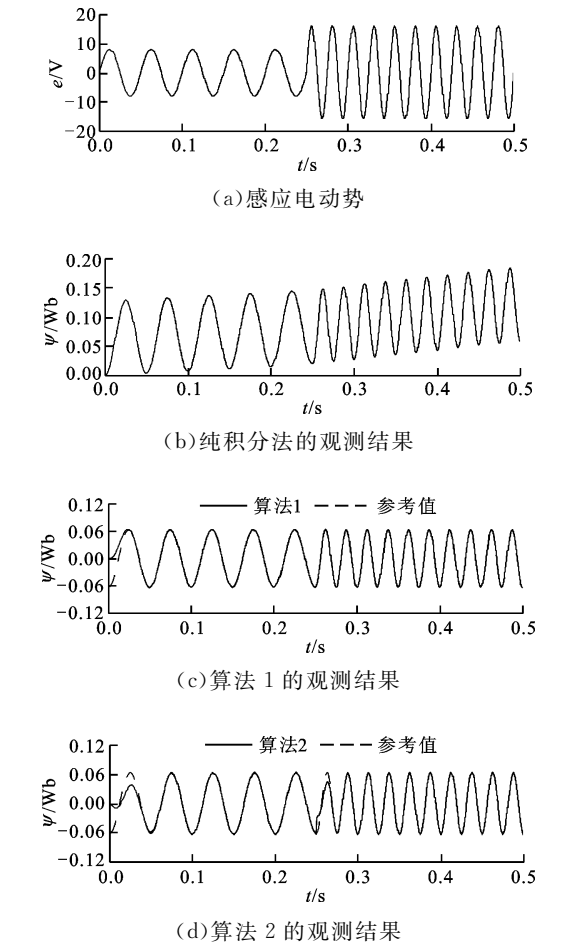


图 4 新磁链观测算法与纯积分法的磁链观测结果比较

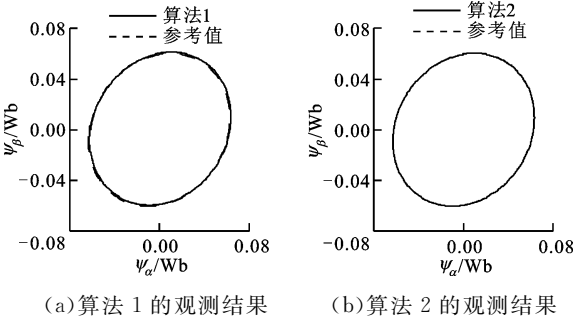


图 5 新磁链观测算法对椭圆形磁链的观测结果

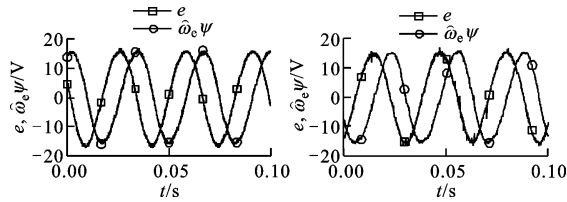
果存在稳态误差。

3 实验研究

将本文的新磁链观测算法应用于一台表贴式永磁同步电机无位置传感器调速系统的转子位置估算, 系统控制框图如图 6 所示。系统采用速度-电流双闭环矢量控制, 电流环采用 $i_d=0$ 控制策略。电机绕组电流采用霍尔传感器实时检测。系统控制周期, 电流采样及调节周期, 磁链、位置与速度的估算周期均取 $83.3\ \mu\text{s}$; 速度环调节周期为 $10T_s$ (T_s 为

加速运行状态到速度闭环-电流闭环的矢量控制运行状态的切换过渡。按一定规律逐步减小转矩电流 I_q^* , 当减小到维持电机稳定运行的最小值时, 即认为转子位置角、估算位置角与给定位置角重合, 此时即从状态 1 切换到状态 2, 实现速度电流双闭环的无位置传感器矢量控制。详细过程及分析可参见文献[19]。为了用示波器观察相关变量, 将 DSP 中要输出的数据作为调制波, 经过标么化后折算到 $[-1, 1]$ 以内, 通过 DSP 的 PWM 算法模块以一系列脉冲输出, 经过一个一阶 RC 低通滤波器后, 供示波器观察。

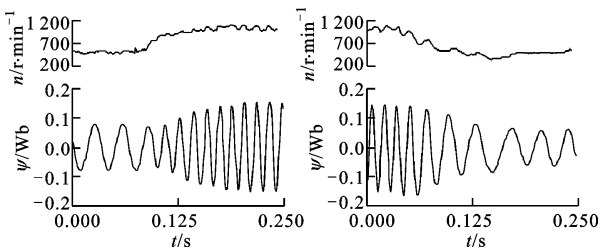
图 9 给出了转速为 450 r/min 时电机的感应电动势波形与新磁链观测算法观测的磁链波形, 为了便于观察幅值误差, 给观测的磁链乘以估算的角速度 ω_e 。由图 9 可见, 新算法具有良好的幅值、相位观测精度, 从而使系统具有良好的稳态特性。



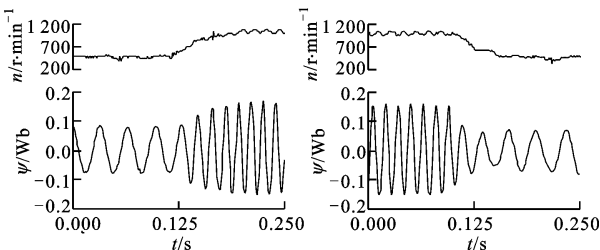
(a) 算法 1 的磁链观测结果 (b) 算法 2 的磁链观测结果

图 9 参考转速为 450 r/min 时的感应电动势波形与新磁链观测算法观测的磁链波形

图 10 为当电机参考转速在 450 至 1 000 r/min 之间跃变时, 电机转速的估算值与新磁链观测算法观测的定子磁链波形。由图可见, 当电机转速跃变



(a) 转速跃变时算法 1 的磁链观测结果

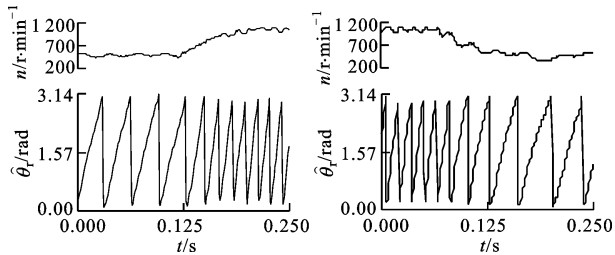


(b) 转速跃变时算法 2 的磁链观测结果

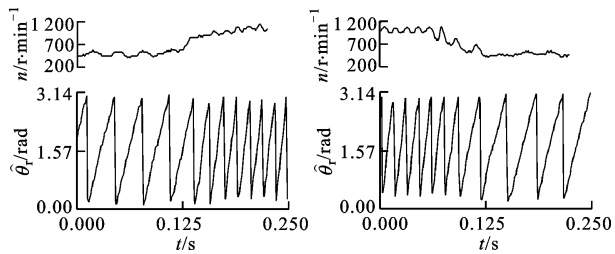
图 10 参考转速在 450 至 1 000 r/min 之间跃变时的电机转速估算波形与新算法观测的磁链波形

时, 新算法均具有良好的磁链观测精度, 从而使系统具有良好的动态特性。

图 11 为电机参考转速在 450 至 1 000 r/min 之间跃变时, 电机转速估算波形与新磁链观测算法估算的电机转子位置角波形。



(a) 转速跃变时算法 1 的转子位置角估算结果



(b) 转速跃变时算法 2 的转子位置角估算结果

图 11 参考转速在 450 至 1 000 r/min 之间跃变时的电机转速估算波形与新磁链观测算法估算的转子位置角波形

4 结 论

(1) 电压型磁链观测器中的纯积分存在漂移问题。传统磁链观测算法的推导要求 α 、 β 两相对称, 或要求磁链矢量与感应电动势矢量正交, 这虽然可以解决漂移问题, 但算法仅对圆形磁场是准确的, 而对实际中更普遍存在的椭圆形磁场, 进行观测时则存在稳态误差。

(2) 本文提出的 2 种新磁链观测算法不需要 α 、 β 两相对称或磁链矢量与感应电动势矢量空间正交, 因此对圆形与椭圆形磁链均可以进行准确观测。算法 1 具有简单的优点, 适用于低成本应用场合; 算法 2 的计算量相对稍大, 但是可以完全消除积分漂移, 并且实验证明算法 2 具有更好的动、静态性能。

(3) 新算法编程实现简单, 可以应用于工业的实时控制系统。将新算法应用于永磁同步电机无位置传感器调速系统中的转子位置估算, 系统运行稳定可靠, 证明了算法的实用性。

参考文献:

[1] 张旭, 瞿文龙. 一种低速下磁链观测补偿的新方法

- [J]. 电工电能新技术, 2003, 22(3): 50-54.
- ZHANG Xu, QU Wenlong. A novel compensation method of stator flux estimating in low speed region [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2003, 22(3): 50-54.
- [2] NIK I N R, MOHAMED Y A H. 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.
- [3] LI Yong, HUANG Wenxin, HU Yuwen. A low cost implementation of stator-flux-oriented induction motor drive [C] // Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005: 1534-1538.
- [4] SHIN M H, HYUN D S, CHO S B, et al. An improved stator flux estimation for speed sensorless stator flux orientation control of induction motors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(2): 312-318.
- [5] HINKKANEN M, LUOMI J. Modified integrator for voltage model flux estimation of induction motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(4): 818-820.
- [6] COMANESCU M L, 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] 陈振锋, 钟彦儒, 李洁, 等. 基于改进磁链观测器的感应电机转速辨识 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 42-47.
- CHEN Zhenfeng, ZHONG Yanru, LI Jie, et al. Speed identification for induction motor based on improved flux observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 42-47.
- [8] 何志明, 廖勇, 何大为. 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, HE Dawei. Improvement of low-pass filter algorithm for stator flux estimator [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(18): 61-65.
- [9] 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): 39-44.
- WANG Yu, DENG Zhiqian, WANG Xiaolin. A novel algorithm of motor flux estimation [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(6): 39-44.
- [10] 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.
- ZHANG Xing, QU Wenlong, LU Haifeng. Method for elimination of DC offset and steady state error for voltage module flux observer [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2006, 25(1): 39-43.
- [11] 李彪, 刘新正, 李黎川. 具有低通滤波的改进电压模型磁链观测器 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 91-95.
- LI Biao, LIU Xinzhen, LI Lichuan. Modified algorithm for voltage module flux estimation with low pass filter [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(12): 91-95.
- [12] 孙大南, 林文立, 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.
- SUN Danan, LIN Wenli, DIAO Lijun, et al. Improved voltage model flux observer design of induction machine [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(2): 94-98.
- [13] 史黎明, 王珂, 李耀华. 基于改进磁链观测器的直线异步电动机直接牵引力控制 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(9): 45-50.
- SHI Liming, WANG Ke, LI Yaohua. Direct thrust control of linear induction motor based on improved flux observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(9): 45-50.
- [14] 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.
- LI Hong, LUO Yu, HAN Bangcheng, et al. Voltage integral model for stator flux estimator based on band-pass filter [J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(9): 8-16.
- [15] WANG Yu, DENG Zhiqian. An integration algorithm for stator flux estimation of a direct-torque-controlled electrical excitation flux-switching generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(2): 411-420.
- [16] 文晓燕, 郑琼林, 韦克康, 等. 带零漂补偿和定子电阻自校正的磁链观测器 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 102-107.
- WEN Xiaoyan, ZHENG Qionglin, WEI Kekang, et al. Flux observer with offset compensation and stator resistance self-correction [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 102-107.
- [17] 韦立祥, 刘丛伟, 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.
- [18] 贾洪平, 贺益康. 一种适合 DTC 应用的非线性正交反馈补偿磁链观测器 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(1): 101-105.
- JIA Hongping, HE Yikang. A new nonlinear perpendicular flux observer with compensation feedback suitable for DTC application [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(1): 101-105.
- [19] 王子辉, 叶云岳. 反电势算法的永磁同步电机无位置传感器自启动过程 [J]. 电机与控制学报, 2011, 15(10): 36-42.
- WANG Zihui, YE Yunyue. Research on self-startup states process of back-EMF based sensorless vector control of PMSM [J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(10): 36-42.
- (编辑 葛赵青)
-
- (上接第 19 页)
- 2004, 33(3): 17-20.
- [7] 付平, 吴俊飞, 栾德玉, 等. 固定管板换热器参数化设计 [J]. 青岛大学学报, 2002, 15(3): 79-83.
- FU Ping, WU Junfei, LUAN Deyu, et al. Parameterized design for fixed tube-sheet exchanger [J]. Journal of Qingdao University, 2002, 15(3): 79-83.
- [8] ROHSENOW W M, HARTNETT J P, GANIC E N. Handbook of heat transfer fundamentals [M]. 2nd ed. New York, USA: McGraw-Hill, 1985.
- [9] 曹春暖. 高效螺旋折面板换热器数值模拟研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2013.
- [10] 文键, 杨辉著, 杜冬冬, 等. 螺旋折流板换热器换热强化的数值模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(9): 43-48.
- WEN Jian, YANG Huizhu, DU Dongdong, et al. The numerical studies on the heat transfer reinforcement of the helical baffle heat exchanger [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(9): 43-48.
- [11] 刘伟中. 心复合设计在裂区试验中的实现 [D]. 天津: 天津大学, 2006.
- [12] 李颖, 王悦, 邹梅娟, 等. 中心复合设计效应面法优化阿魏酸哌嗪缓释片处方 [J]. 中国药剂学杂志, 2009, 4(7): 242-250.
- LI Ying, WANG Yue, ZOU Meijuan, et al. Formulation optimization of piperazine ferulate sustained-release tablets by central composite design-response surface methodology [J]. Chinese Journal of Pharmaceutics, 2009, 4(7): 242-250.
- [13] 肖晓伟, 肖迪, 林锦国, 等. 多目标优化问题的研究概述 [J]. 计算机应用研究, 2011, 28(3): 805-808.
- XIAO Xiaowei, XIAO Di, LIN Jinguo, et al. Overview on multi-objective optimization problem research [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(3): 805-808.
- [14] 郝金伟, 闫奕任, 蒋懋. 基于 ANSYS 的结构优化设计有限元分析 [J]. 山西建筑, 2005, 31(5): 31-32.
- HAO Jinwei, YAN Yiren, JIANG Mao. Finite element analysis for structure optimization design based upon ANSYS [J]. Shanxi Architecture, 2005, 31(5): 31-32.
- [15] 张少维, 桑芝富. 壳程结构对换热器性能影响的数值研究 [J]. 石油机械, 2005, 33(9): 24-26.
- ZHANG Shaowei, SANG Zhifu. Numerical simulation of heat exchangers with different shell structures [J]. China Petroleum Machinery, 2005, 33(9): 24-26.
- [本刊相关文献链接]
- 季家东, 葛培琪, 毕文波. 换热器内弹性管束流体组合诱导振动响应的数值分析. 2015, 49(9): 24-29. [doi: 10. 7652/xjtuxb201509005]
- 张凡, 李兆辉, 李晓宇, 等. 不同材料翅片管换热器特性的试验研究. 2015, 49(5): 62-67. [doi: 10. 7652/xjtuxb201505010]
- 文键, 杨辉著, 王斯民, 等. 旋梯式螺旋折流板换热器优化结构的数值模拟. 2014, 48(11): 8-14. [doi: 10. 7652/xjtuxb201411002]
- 杨卫卫, 曹兴起, 何雅玲, 等. 一种带中间换热器的双热源高温热泵系统. 2014, 48(11): 70-74. [doi: 10. 7652/xjtuxb201411012]
- 文键, 杨辉著, 杜冬冬, 等. 螺旋折流板换热器换热强化的数值研究. 2014, 48(9): 43-48. [doi: 10. 7652/xjtuxb201409008]
- 王斯民, 文键. 无短路区新型螺旋折流板换热器换热性能的实验研究. 2012, 46(9): 12-15. [doi: 10. 7652/xjtuxb201209003]

(编辑 荆树蓉)