

电动汽车空调无位置传感器的内置式 永磁同步电机控制研究*

丁曙光, 江 跃

(合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘 要: 针对内置式永磁同步电机(IPMSM)无位置传感器的转子位置和速度估计的难点,提出了一种基于改进定子磁链观测器的转子位置、速度的估计方法。该方法结构简单,涉及电机参数少。通过引入有效磁链概念对 IPMSM 的电压方程进行等效变换,对两相静止坐标系下的反电动势进行积分。为了抑制反电动势的积分环节带来的积分饱和和直流漂移问题,设计了截止频率可以自动调节的低通滤波器来代替积分器。对于在低速时低通滤波器所带来的磁链幅值衰减和相位超前问题,利用饱和和反馈对观测误差进行补偿。最后通过锁相环进行位置的估计。搭建了 MATLAB/Simulink 仿真平台。仿真表明:该方法能够实现对 IPMSM 全速度范围内的转子位置的高精度估计。

关键词: 内置式永磁同步电机; 定子磁链观测器; 有效磁链; 低通滤波器; 积分补偿

中图分类号: TP 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)03-0001-05

Research on IPMSM Control of Air-Condition Sensorless Position Sensor for Electric Vehicle*

DING Shuguang, JIANG Yue

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The difficulty of rotor position and speed estimation for sensorless position of built permanent magnet synchronous motor (IPMSM) was discussed. A method of rotor position and velocity estimation based on improved stator flux observer was proposed. By introducing the concept of effective flux linkage, the voltage equation of IPMSM was transformed equivalently, and then the back electromotive force in the two phase stationary coordinate system was integrated. In order to suppress the integral saturation and DC drift problems caused by the integral part of the back electromotive force, a low-pass filter with automatic cut-off frequency was designed instead of the integrator. For the low-pass low-pass filter caused by the flux amplitude attenuation and phase advance problems, the use of saturated feedback compensated for the observation error. The phase locked loop was used to estimate the position. The MATLAB/Simulink simulation platform was built. The simulation results show that this method can realize the high accuracy estimation of the rotor position in the full speed range of the built-in permanent magnet synchronous motor.

Key words: interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM); stator flux observer; effective flux linkage; low-pass filter; integral compensation

0 引 言

由于资源的匮乏和环境的恶化,电动汽车发

展越来越快。空调压缩机作为电动汽车的重要组成部分,如何对其进行高效的控制是研究的重点。
永 磁 同 步 电 机 (Permanent Magnet Synchronous

* 基金项目: 安徽省科技厅秋实计划项目(2013AKKG0392); 大排量涡旋压缩机直流无刷电动机及其驱动控制技术研究(W2016JSKF0175)

作者简介: 丁曙光(1962—),男,博士研究生,副教授,硕士生导师,研究方向为数控技术及数控装备、嵌入式控制。

江 跃(1991—),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机控制技术。

Motor, PMSM) 具有体积小、效率高、功率密度高等优点^[1], 广泛应用于电动汽车空调压缩机的驱动。对 PMSM 进行精确控制, 就需要对电机转子的位置进行估计。传统 PMSM 转子位置的测试是通过编码器完成的, 但该做法增加了成本, 降低了可靠性。因此需要对 PMSM 无位置传感器控制进行研究。

目前, 对于 PMSM 无位置传感器控制方法有很多: 高频信号注入法^[2-3]、观测器法^[4-8]、扩展卡尔曼滤波器法^[9-11]、模型参考自适应法^[12-14]等。

本文设计了改进的定子磁链观测器。该方法涉及电机参数少, 结构简单, 动态响应好。对于纯积分器带来的积分饱和和直流漂移问题使用截止频率可自动调节的一阶低通滤波器来代替, 低速带来的磁链幅值衰减和相位超前问题可通过反馈通道进行饱和幅值补偿。由于内置式永磁同步电机 (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM) 的定子直、交轴的电感不相等, 不能直接应用于改进的定子磁链观测器, 所以引入了有效磁链的概念。在有效磁链的基础上对 IPMSM 的电压方程进行等效变换得到类似于表贴式永磁同步电机 (Surface Permanent Magnet Synchronous Motor, SPMSM) 的两相静止坐标系下的电压方程, 然后通过改进的定子磁链观测器对定子磁链进行估计从而得到转子的位置和转速。最后通过仿真验证, 可见该方法转子位置估计精度高, 动态响应好, 在低速时运行良好, 满足电动汽车空调压缩机的控制。

1 IPMSM 数学模型

在两相旋转坐标系, IPMSM 的数学模型为

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

式中: u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 、 L_d 、 L_q ——旋转坐标系 d 、 q 轴的电压、电流、电感;

R_s ——定子电阻;

ω_r ——转子电角速度;

ψ_f ——永磁体磁链。

对式(1)进行等效变换:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_q \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q + (L_d - L_q) \frac{di_d}{dt} \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_q i_d + \omega_r (\psi_f + L_d i_d - L_q i_q) \end{cases} \quad (2)$$

令 $\psi'_f = \psi_f + L_d i_d - L_q i_q$, 并定义 ψ'_f 为有效磁链, 则式(2)转换为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_q \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q + \frac{d\psi'_f}{dt} \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_q i_d + \omega_r \psi'_f \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知转换后的 IPMSM 数学模型类似于 SPMSM 的数学模型, 有效磁链 ψ'_f 的方向与电机转子磁链的方向相同。

将式(3)进行模型转换, 在两相静止坐标系中的 IPMSM 新模型电压方程为

$$\begin{cases} u_\alpha = R_s i_\alpha + L_q \frac{di_\alpha}{dt} + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} \\ u_\beta = R_s i_\beta + L_q \frac{di_\beta}{dt} + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \psi_{r\alpha} = \psi'_f \cos \theta_e \\ \psi_{r\beta} = \psi'_f \sin \theta_e \end{cases} \quad (5)$$

式中: θ_e ——转子的位置。

由式(4)可得:

$$\begin{cases} \psi_{r\alpha} = \int (u_\alpha - R_s i_\alpha) dt - L_q i_\alpha \\ \psi_{r\beta} = \int (u_\beta - R_s i_\beta) dt - L_q i_\beta \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知只需要定子电阻和交轴电感两个电机参数就可以得到定子磁链值, 下面对定子磁链观测器进行设计。

2 改进的定子磁链观测器

如果直接使用积分器对反电动势进行积分会由于积分初值和直流偏移问题造成磁链估计误差, 不能应用于实际^[6]。

对于纯积分带来的问题可以使用一阶低通滤波器来代替纯积分, 一阶低通滤波器的传递函数:

$$\frac{1}{s + \omega_e} = \frac{1}{s} \times \frac{s}{s + \omega_e} \quad (7)$$

可将一阶低通滤波器看成纯积分器和高通滤波器的乘积。当直流分量的频率为 0 时, 高通滤

波器输出为 0。当输入信号频率远高于截止频率时,高通滤波器的输出接近于 1。可知一阶低通滤波器可对高频信号输入能够无畸输出且能抑制由纯积分产生的直流偏移。

但在输入信号低频时,甚至低于截止频率时,一阶低通滤波器会造成磁链的幅值衰减,相位超前,所以需要对一阶低通滤波器进行改进,使之在低频时能够降低磁链估计的误差。

2.1 改进的定子磁链观测器

图 1 为改进的定子磁链观测器的原理框图,一阶低通滤波器的截止频率可根据运行的频率进行自动调节。在输入信号低频时,针对一阶低通滤波器带来的幅值衰减和相位超前的问题,使用有限幅环节的补偿器进行补偿。

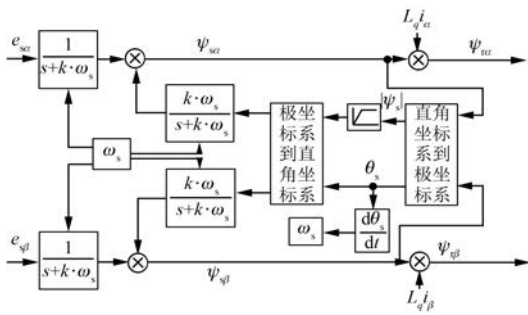


图 1 改进的定子磁链观测器

由图 1 可得改进的定子磁链观测器的数学表达式为

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} = \frac{1}{s+k\omega_s}(u_{\alpha}-R_s i_{\alpha}) + \frac{k\omega_s}{s+k\omega_s}\psi'_{s\alpha} \\ \psi_{s\beta} = \frac{1}{s+k\omega_s}(u_{\beta}-R_s i_{\beta}) + \frac{k\omega_s}{s+k\omega_s}\psi'_{s\beta} \end{cases} \quad (8)$$

式中: \$\psi'_{s\alpha}\$、\$\psi'_{s\beta}\$——反馈的磁链值。

在高速时,输入信号频率远大于截止频率,则反馈通道的增益近似为 0,定子磁链观测器即为一阶低通滤波器,能够获得准确的测试结果。

在低速时,幅值限定补偿能够通过反馈通道进行。当反馈的信号幅值没有超过限幅器的幅值 \$L\$ 时,补偿磁链即为实际的磁链,由式(8)可得:

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} = \frac{1}{s}(u_{\alpha}-R_s i_{\alpha}) \\ \psi_{s\beta} = \frac{1}{s}(u_{\beta}-R_s i_{\beta}) \end{cases} \quad (9)$$

改进的定子磁链观测器即为纯积分器,由纯积分初值带来的直流偏置问题可由反馈通道的饱和和限幅环节进行限制。当反馈的信号幅值大于限幅器的幅值 \$L\$ 时,反馈补偿信号为限幅器的幅值 \$L\$,为了补偿信号的准确性,幅值 \$L\$ 设为给定的定子磁链幅值。

为了减少反馈通道的磁链幅值和相位的误差,应使一阶低通滤波器的截止频率尽可能地小,但截止频率过小时,会使对直流偏置的抑制减弱,所以设计截止频率能够根据实际频率进行自动调节。截止频率的调节方法如下:

$$f(\omega_s) = k \cdot |\omega_s| \quad (10)$$

式中: \$k\$——比例因子;

\$\omega_s\$——同步运行频率,设定 \$k=0.2^{[15]}\$。

2.2 PLL 转速估计

由式(5)可知,通过反正切得到转子的位置,然后通过微分得到转速。但对位置的直接微分会导致高频噪声和干扰。因此通过引入锁相环来对转子位置及转速进行估计以减少稳态估计误差。

$$\Delta\psi_{rq} = \psi_{rp}\cos\hat{\theta}_e - \psi_{ra}\sin\hat{\theta}_e = \psi'_f\sin(\theta_e - \hat{\theta}_e) \quad (11)$$

式中: \$\hat{\theta}_e\$——估计的转子位置。

当误差较小时, \$\Delta\psi_{rq} \approx \psi'_f\Delta\theta_e\$, \$\Delta\theta_e = \theta_e - \hat{\theta}_e\$ 为位置误差。

把 \$\Delta\psi_{rq}\$ 作为 PLL 的输入,通过 PI 调节使得位置误差为零,则能得到准确的转子位置,如图 2 所示。

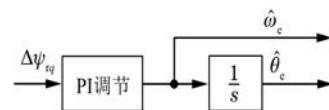


图 2 PLL 转速与位置调节器

3 仿真研究

图 3 为 PMSM 经典的矢量控制软件框图,使用 \$i_d=0\$ 的控制方案,中间为改进的定子磁链观测器和 PLL 模块,用来估计电机的转子位置和转速。仿真所用的电机参数如表 1 所示。

为了验证方案的准确性,给定定子磁链幅值 0.5 Wb,设置电机从空载启动到 1 500 r/min 的全速度范围内进行转子位置和转速测试,并在 0.15 s 突加 6 N·m 的负载,将测试结果与实际值

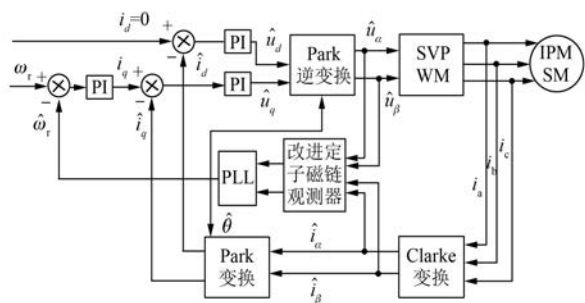


图3 无位置传感器矢量控制

表1 仿真的IPMSM 参数

参数名称	参数值
定子电阻/ Ω	0.023
定子 d 轴电感/ H	0.047 2
定子 q 轴电感/ H	0.082 3
永磁体磁链/ Wb	0.354
转动惯量/ $(kg \cdot m^2)$	0.000 8
额定转速/ $(r \cdot min^{-1})$	2 000

进行比较。图4和图5分别是电机转速的实际值和估计值的仿真曲线,可以得到在加负载的情况下,能够快速趋于稳定,响应时间约为0.03 s。图6和图7分别为电机转速和转子位置估计误差的仿真曲线,可得在低速甚至零速时转速误差小于20 r/min,位置误差小于0.12 rad。稳定时转速误差小于5 r/min,位置误差小于0.03 rad。图8为转子位置实际值,图9为转子位置估计值,图10

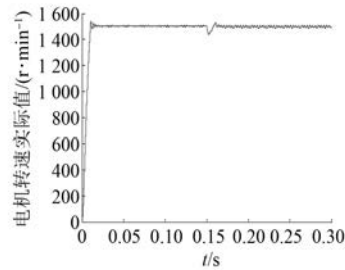


图4 电机转速实际值

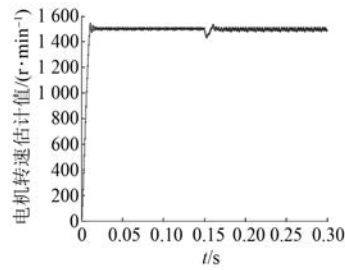


图5 电机转速估计值

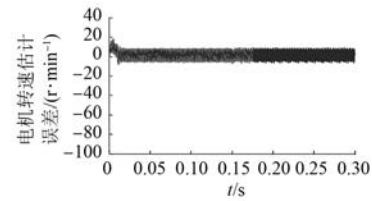


图6 转速估计误差变化曲线

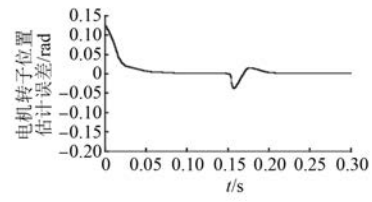


图7 转子位置估计值误差变化曲线

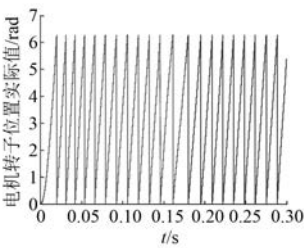


图8 转子位置实际值

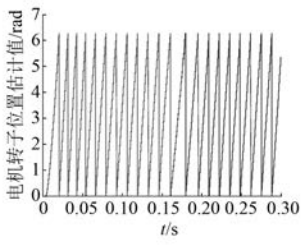


图9 转子位置估计值

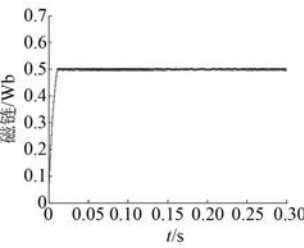


图10 定子磁链幅值变化曲线

为定子磁链幅值观测值,由图10可知改进的定子磁链观测器能够很精确地跟踪定子磁链。仿真验证了本文提出的方法能够准确地估计出电机转子的位置和速度。

4 结 语

本文设计了基于改进磁链观测器的 IPMSM 的控制,引入有效磁链的概念对 IPMSM 电压模型进行等效变换,通过使用截止频率可自动调节的一阶低通滤波器来代替纯积分器,并对滤波器带来的问题进行了反馈补偿,最后搭建了相应的 MATLAB/Simulink 仿真平台,通过观测电机转子估计位置和速度并与实际值相比较得到误差结果,并跟踪了定子磁链幅值。结果表明:改进的磁链观测器对于定子磁链能够准确跟踪,在低速时对转子的位置和转速准确估计,动态响应好,在突加负载的情况下能够快速趋于稳定。因此,该方法可应用于电动汽车空调的控制。

【参考文献】

- [1] ACARNLEY P P, WATSON J F. Review of position-sensorless operation of brushless permanent-magnet machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(2): 352-362.
- [2] 秦峰,贺益康,刘毅,等.两种高频信号注入法的无传感器运行研究[J].中国电机工程学报,2005,25(5): 116-121.
- [3] KIM S, HA J I, SUL S K. PWM switching frequency signal injection sensorless method in IPMSM [J]. Industry Applications IEEE Transactions on, 2011, 48(5): 1576-1587.
- [4] HU J, WU B. New integration algorithms for estimating motor flux over a wide speed range [J]. Power Electronics IEEE Transactions on, 1998, 13(5): 969-977.
- [5] 薛增涛,郭颖颖,李争.基于改进型滑模观测器的电动汽车用永磁同步电机转子位置估算[J].电机与控制应用,2017,44(1): 1-5.
- [6] 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.
- [7] SRIKANTH V, DUTT A A. A comparative study on the effect of switching functions in SMO for PMSM drives [C] // IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems IEEE, 2013: 1-6.
- [8] 谭冯忍,程启明,程尹曼,等.基于新型等效模糊滑模观测器和改进软件锁相环的永磁同步电机矢量控制[J].电机与控制应用,2017,44(2): 52-57.
- [9] 陈达波.基于卡尔曼滤波的永磁同步电动机位置检测[J].微特电机,2017,45(3): 62-64.
- [10] GHAOUTI L. Sensorless field oriented control of PMSM based on the extended KALMAN filter observer [J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2016, 1(12): 251-256.
- [11] 张猛,肖曦,李永东.基于扩展卡尔曼滤波器的永磁同步电机转速和磁链观测器[J].中国电机工程学报,2007,27(36): 36-40.
- [12] 张伯泽,阮毅.基于 MRAS 内置式永磁同步电机无位置传感器控制研究[J].电机与控制应用,2016,43(4): 13-16.
- [13] 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): 156-163.
- [14] ZHUANG X, WEN X, FENG Z, et al. Wide-speed-range sensorless control of Interior PMSM based on MRAS [C] // International Conference on Electrical Machines and Systems IEEE, 2010: 804-808.
- [15] 王高林,陈伟,杨荣峰,等.无速度传感器感应电机改进转子磁链观测器[J].电机与控制学报,2009,13(5): 638-642.

收稿日期: 2017-07-26

[期刊订阅]

在邮局漏订的读者,可直接从邮局汇款至期刊发行部补订

地址:上海市武宁路 505 号《电机与控制应用》发行部

邮编: 200063 电话: 021-62574990-745 传真: 021-62576377

国内邮发代号: 4-199 每册定价: 12.00 元 全年定价: 144.00 元