

基于滑模观测器的永磁同步电机无传感器矢量控制*

黄 雷¹, 崔 迎²

(1. 中国汽车技术研究中心, 天津 300162, 2. 中交一航局铁路分公司, 天津 300042)

摘要:为解决永磁同步电机(PMSM)控制中机械式位置传感器带来的成本及可靠性等问题,将滑模观测器技术应用到 PMSM 矢量控制系统中。该系统采用滑模面及滑模等效控制方法,通过选择足够大的滑模增益,在观测电流和实测电流之间的误差上构建滑模面,对电机反电势进行观测以得到转子位置角,并基于 Lyapunov 稳定性判据对滑模观测器的收敛性进行了分析;建立了应用滑模观测器的 PMSM 无传感器矢量控制实验系统,设计了位置及速度滑模控制器。进行了 1 500 r/min 稳态及正负转速切换的角度估算实验,实验结果验证了该方法的有效性。研究结果表明,基于滑模观测器的无传感器控制策略能准确估计出 PMSM 的转子位置角,从而得到转子速度,且系统具有较好的动、静态特性。

关键词:永磁同步电机;滑模观测器;无传感器;矢量控制

中图分类号: TM351; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)11-1303-03

Sensorless vector control of PMSM based on sliding mode observer

HUANG Lei¹, CUI Ying²

(1. China Automotive Technology and Research Center, Tianjin 300162, China;

2. Rail Road Engineering Branch Company of CCC First Harbor Engineering Company Ltd., Tianjin 300042, China)

Abstract: In order to eliminate the problems of cost and reliability that caused by the mechanical sensor of the permanent magnet synchronous motor(PMSM) drives, a novel nonlinear control strategy based on sliding mode observer was investigated. The sliding surface was defined on the errors between the actual and estimated currents. The estimated back-EMF was observed to calculate the angle and speed of the rotor by using a sufficient sliding gain. The styplicity of sliding observer based on Lyapunov was analyzed. The hardware and software of the proposed sensorless vector control based on sliding mode observer was implemented. The steady state of 1 500 r/min and the transient response of positive to negative speed tests were evaluated. The experimental results show that proposed sliding mode observer algorithm is effective to estimate the rotor position of the PMSM and has good steady and transient response.

Key words: permanent magnet synchronous motor(PMSM); sliding observer; sensorless; vector control

0 引 言

在永磁同步电动机调速系统中,机械式的传感器都有安装、电缆连接和维护等问题,降低了系统的可靠性,限制了传动系统在恶劣环境下的应用。开展无机械位置/速度传感器的研究已成为当今研究交流传动系统的重要方向^[1-7]。

由于对参数变化不敏感、对外部扰动的鲁棒性以

及快速的动态响应,滑模控制已经在电机控制中得到了很好的应用^[8]。滑模观测器同样具有滑模控制器的鲁棒性,可以用于估计控制系统的状态^[9-11]。

本研究提出一种基于滑模观测器的非线性观测器方法,通过在观测电流和实测电流之间的误差上构建滑模面对反电势进行观测以得到转子位置角,并基于 Lyapunov 稳定性判据对观测器的收敛性进行分析;在此基础上,设计基于滑模观测器的无传感器矢量控制系统,并进行实验运行,以验证该方法的有效性。

收稿日期:2012-06-15

基金项目:国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2011AA11A211)

作者简介:黄 雷(1980-),男,河北定州人,博士,高级工程师,主要从事电动汽车电机控制、电力电子技术等方面的研究. E-mail: huanglei

@catarc.ac.cn

1 滑模观测器的设计

一台面贴式隐极 ($L_d = L_q$) 永磁同步电机 (PMSM) 在静止 $\alpha - \beta$ 坐标系下的数学模型为:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{i}_s = \mathbf{A} \mathbf{i}_s + \mathbf{B} \mathbf{v}_s + \mathbf{B} \mathbf{E}_s \quad (1)$$

且:

$$\mathbf{A} = (-R_s/L_s) \cdot \mathbf{I}; \mathbf{B} = (1/L_s) \cdot \mathbf{I}$$

式中: \mathbf{i}_s 一定子 α, β 轴电流, $\mathbf{i}_s = (i_\alpha, i_\beta)^T$; \mathbf{v}_s — α, β 轴电压, $\mathbf{v}_s = (v_\alpha, v_\beta)^T$; \mathbf{E}_s — 反电势, $\mathbf{E}_s = (E_\alpha, E_\beta)^T$; R_s 一定子电阻; L_s 一定子电感。

可定义滑模面 \mathbf{S} 为:

$$\mathbf{S} = (s_1, s_2)^T = \hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{i}_s = \mathbf{e}_s = 0 \quad (2)$$

电流的滑模观测器为:

$$\frac{d}{dt} \hat{\mathbf{i}}_s = \mathbf{A} \hat{\mathbf{i}}_s + \mathbf{B} \mathbf{v}_s + \mathbf{B} \mathbf{K} \quad (3)$$

且:

$$\mathbf{K} = [h \operatorname{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha), h \operatorname{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta)]^T$$

式中: $\hat{\mathbf{i}}_s$ 一定子 α 和 β 轴观测电流, $\hat{\mathbf{i}}_s = (\hat{i}_\alpha, \hat{i}_\beta)^T$; h — 滑模增益; sgn — 符号函数。

式(3)减去式(1)得电流观测误差的状态方程为:

$$\dot{\mathbf{S}} = \dot{\mathbf{e}}_s = \frac{d}{dt}(\hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{i}_s) = \mathbf{A} \mathbf{e}_s - \mathbf{B} \mathbf{E}_s + \mathbf{B} \mathbf{K} \quad (4)$$

如果满足下面的滑模条件,则系统进入滑模状态:

$$\mathbf{S}^T \dot{\mathbf{S}} < 0 \quad (5)$$

滑模增益 h 必须足够大才能满足到达滑模状态的条件,但过分大将因抖振噪声导致估计误差,因此如何选择合适的滑模增益 h 是问题的关键。

取正定 Lyapunov 函数 $V = \frac{1}{2} \mathbf{e}_s^T \mathbf{e}_s > 0$, 求导,得:

$$\dot{V} = \mathbf{e}_s^T \dot{\mathbf{e}}_s = \mathbf{e}_s^T \left\{ \mathbf{A} \mathbf{e}_s - \frac{1}{L_s} (\mathbf{K} - \mathbf{E}_s) \right\} = \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_2 \quad (6)$$

其中:

$$\mathbf{A}_1 = -\frac{1}{L_s} R_s (\hat{i}_\alpha - i_\alpha)^2 + \frac{\lambda_\alpha}{L_s} (\hat{i}_\alpha - i_\alpha) - \frac{h}{L_s} |\hat{i}_\alpha - i_\alpha| \quad (7)$$

$$\mathbf{A}_2 = -\frac{1}{L_s} R (\hat{i}_\beta - i_\beta)^2 + \frac{\lambda_\beta}{L_s} (\hat{i}_\beta - i_\beta) - \frac{h}{L_s} |\hat{i}_\beta - i_\beta| \quad (8)$$

取滑模增益为:

$$k > \max \{ \lambda_\alpha \operatorname{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) - R |\hat{i}_\alpha - i_\alpha|, \lambda_\beta \operatorname{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta) - R |\hat{i}_\beta - i_\beta| \} + \delta \quad (9)$$

式中: δ — 正常数。

$\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2 < 0$, 从而 $\dot{V} < 0$, 满足滑模条件式(5)。从而系统进入滑模状态后。此时,有:

$$\dot{\mathbf{e}}_s = \mathbf{e}_s = 0 \quad (10)$$

代入式(4),得到:

$$\mathbf{E}_s = \mathbf{K} \quad (11)$$

将不连续的含有高频成分的切换控制量经过适当的低通滤波器后得到等价控制量,即估算反电势:

$$(h \operatorname{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha))_{eq} = E_\alpha = -K_E \omega_r \sin \theta_r \quad (12)$$

$$(h \operatorname{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta))_{eq} = E_\beta = K_E \omega_r \cos \theta_r \quad (13)$$

从而,转子位置角可以根据式(12,13)计算得到:

$$\hat{\theta}_r = \arctan(- (h \operatorname{sgn}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha))_{eq}, (h \operatorname{sgn}(\hat{i}_\beta - i_\beta))_{eq}) \quad (14)$$

将 $\hat{\theta}_r$ 对时间进行微分即可求得转子估算速度 $\hat{\omega}_r$ 。

2 控制系统结构及实现

采用了滑模观测器的 PMSM 无传感器矢量控制系统框图如图 1 所示。系统采用 $i_d = 0$ 的磁场定向控制方式。电机定子电流经霍尔电流传感器采样后送入 DSP 并转换成到两相坐标系的 α 和 β 轴电流分量 i_α, i_β , 与定子 α 和 β 轴电压 v_α, v_β 一起,作为滑模观测器的输入。滑模观测器的输出即是转子位置角 $\hat{\theta}_r$, 用作 park 变换及其逆变换的空间位置依据。 $\hat{\theta}_r$ 的微分为转子的估算速度 $\hat{\omega}_r$, 与给定速度 ω_r 之差经 PI 调节后用作为 q 轴电流给定 i_q^* 。 i_d, i_q 反馈值与给定值的偏差经过 PI 调节后用作电压空间矢量 SVPWM 模块的 α, β 轴参考电压分量 v_α, v_β 。而 SVPWM 模块的输出为产生 6 路 PWM 波驱动信号。

硬件系统中采用了“DSP + PIM”的模式。控制电路中以 TI 公司的高性能 DSP-TMS320F2812 作为控制器。

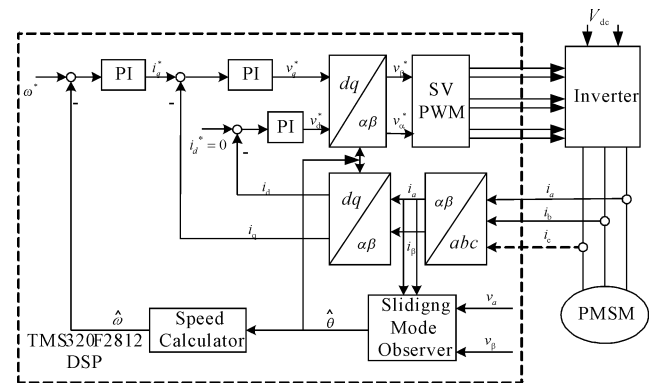


图 1 采用滑模观测器的无传感器控制框图

系统控制程序由主程序、周期定时中断子程序组成。主程序中完成对系统初始化设置和变量定义,设置定时器 T1 作为系统的控制周期(100 μs)。最后启动定时器 T1,系统进入循环等待中断。T1 周期中断服务子程序完成电流 A/D 采样、位置和速度估算、坐标变换、速度和电流的 PI 调节以及 SVPWM 调制等。整个控制程序用 C 语言编程,采用滑模观测器的矢量算法执行时间约为 20 μs 。

3 实验研究

实验中所用永磁同步电动机的参数如下:功率为 400 W,额定电压为 220 V,额定电流为 3 A,额定转速为 3 000 r/min。

转子速度 1 500 r/min 时实测与估算转子位置角度如图 2 所示。转子速度 1 500 r/min 时转子位置角及转速估计值与实测值之间的误差估计如图 3 所示,可见估计转子最大误差约 $\pm 10^\circ$,满足矢量控制的要求;转速误差最大值为约 10 r/min。转速给定为 $-720 \text{ r/min} \sim +720 \text{ r/min}$,动态过程中实测与估算转子位置角度曲线如图 4 所示,反映出在动态过程中滑模观测器能够较准确估计转子位置。但接近零速时估算值与实测值相差较大,这是低速时实际电流和电压很小而引起的测量误差造成的。

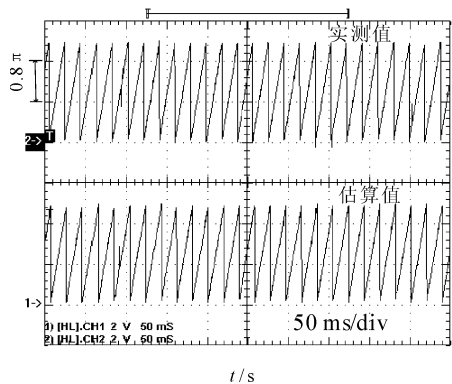


图 2 1 500 r/min 转速下转速实测值与估计值

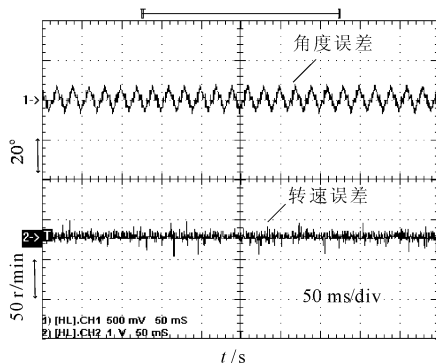


图 3 1 500 r/min 转速下角度误差和转速误差

从实验结果可以看到,除在零速及极低速范围,滑模观测器的无传感器控制策略能准确估计出永磁同步电机的转子位置角从而得到转子速度。

4 结束语

本研究提出了一种基于滑模观测器的永磁同步电机无速度传感器控制算法,通过选择足够大的滑模增益,在电流观测误差上建立滑模面,从而得到估计的

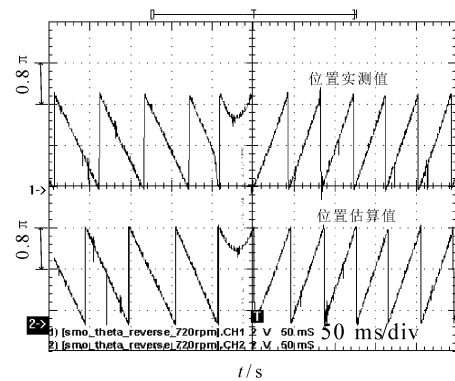


图 4 转速反向时实测转子位置角与估计角度(720 r/min)

反电势(其相位即是转子位置角),最后,通过 Lyapunov 函数证明了观测参数的收敛性,基于滑模观测器的无传感器算法在硬件平台进行了验证。实验结果表明,通过采用滑模观测器可以对转子位置角进行准确估计,证明了算法的有效性。

参考文献 (References):

- [1] 李鸿儒,顾树生. 基于神经网络的 PMSM 速度和位置自适应观测器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 32-35.
- [2] HOLTZ J. Acquisition of position error and magnet polarity for sensorless control of PM synchronous machines [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2008, 44(4): 1172-1180.
- [3] 万山明,吴芳,黄声华. 基于高频电压信号注入的永磁同步电机转子初始位置估计[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(33): 82-86.
- [4] 秦峰,贺益素,刘毅,等. 两种高频信号注入法的无传感器的运行研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 116-121.
- [5] 刘英培,万健如,梁鹏飞. 基于扩展卡尔曼滤波器和空间电压矢量调制的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 67-74.
- [6] 黄鹏,黄雷. 内插式永磁同步电机无速度传感器控制[J]. 机电工程, 2010, 27(5): 120-123.
- [7] 齐放,邓智泉,仇志坚. 一种永磁同步电机无速度传感器的矢量控制[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 30-34.
- [8] 汪海波,周波,方斯琛. 永磁同步电机调速系统的滑模控制[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 71-76.
- [9] 黄雷,赵光宙,年珩. 基于扩展反电势估算的内插式永磁同步电机无传感器控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 59-63.
- [10] 尚喆,赵荣祥,窦汝振. 基于自适应滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 23-27.
- [11] 鲁文其,黄文新,胡育文. 永磁同步电动机新型滑模观测器无传感器控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(4): 429-432.