

基于自适应观测器的复式永磁同步电机控制仿真

张现猛, 叶云岳*, 郑 灼

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:为了解决复式永磁同步电机(PMSM)的可靠运行及速度控制等问题,提出了一种基于自适应观测器的无传感器控制方案。利用Matlab这一工具搭建了复式永磁同步电机的自适应观测器的控制仿真模型,并对算法进行了分析验证,同时为了提高该系统的稳定性,对电机的电阻和磁链也进行了参数辨识。仿真运行的结果验证了自适应观测器作为复式永磁同步电机无速度传感器控制方案的可行性。

关键词:复式永磁同步电机;自适应观测器;参数辨识

中图分类号:TP273

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)05-0632-03

Control simulation of compound permanent magnet synchronous motor based on adaptive observer

ZHANG Xian-meng, YE Yun-yue, ZHENG Zhuo

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Low-speed and large-torque compound permanent magnet synchronous motor(CPMSM) is one kind of permanent magnet synchronous motor(PMSM), which has the characteristic of low-speed and large-torque and is widely applied in many areas. In order to solve the problems of the control of CPMSM, adaptive observer was adopted as one sensorless method. The model of adaptive observer was established and analyzed based on the simulation of Matlab. Parameter identification was also used to improve the stability of the system. The result of simulation proves the feasibility of adaptive observer as one sensorless method.

Key words: compound permanent magnet synchronous motor(CPMSM); adaptive observer; parameter identification

0 引 言

对于低速大力矩复式永磁同步电机的驱动控制,可以采用开环控制,永磁同步电机有良好的机械特性,但是在直接驱动的电气传动系统中,电机直接带动负载,负载的变化也将直接反映到电机上,因此电机能否可靠、稳定运行是一个关键问题;若采用闭环控制,永磁电机的矢量控制技术成熟,而且运行效果非常好,但是前提需要安装速度传感器,然而速度传感器的安装不仅仅会增加设计上的成本,也会提高整个系统的复杂程度,同时这种传感器对使用环境有着严格的要求,电磁干扰、温度、湿度、振动对它的测量精度都有影响;

目前无速度传感器算法的应用虽然在控制精度上略差于有传感器的控制系统,但它可以减小传动系统的体积,降低成本,而且系统本身仅需要电压电流信号,结构简单,有利于在恶劣环境下稳定运行^[1-3]。

目前,关于永磁同步电机的无传感器控制已经提出了许多方案:扩展卡尔曼滤波法、高频注入法和模型自适应法。扩展卡尔曼滤波法,该方法估算精度比较高,但是算法比较复杂。而且算法的高精度是基于准确的电流和机械方程,但是对于低速大力矩复式永磁同步电机来说,转动惯量会随负载变化而变化的^[4-5]。当然也有作者对扩展卡尔曼滤波算法进行了改进,简化了机械方程,不再要求测量转动惯量,但精度却下降了^[6];高频注入法,该方法可应用于较宽的速度范围

收稿日期:2010-10-08

作者简介:张现猛(1986-),男,山东泰安人,主要从事电机变频控制方面的研究。E-mail:zhxm860424@163.com

通信联系人:叶云岳,男,教授,博士生导师。E-mail:yeyunyue@yahoo.com.cn

甚至在低速也可取得较好的效果,但是算法依赖电机的凸极效应,但是实验中的复式永磁同步电机为面装式结构,凸极效应不明显,不利于使用高频注入法^[7-8];模型自适应法,在原理仿真和实验中,都取得了不错的效果。但是模型自适应控制的一个很大缺点是模型参数本身存在的误差会影响到系统的性能,甚至导致系统传递函数的发散^[9-10]。

笔者采用自适应观测器的方法来估算转子的速度,该方法和模型自适应方法很相似,所不同的是在状态估计方程中增加了一个校正项,加快了观测器动态误差的收敛速度,同时对转子的电阻和转子磁链进行参数辨识,提高了整个系统的稳定性,最后利用 Matlab 搭建仿真模型,对该方法进行分析验证。

1 转子速度估算

低速大力矩复式永磁同步电机采用面装式结构, dq 轴电感相等,其状态方程为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\omega_r \\ \omega_r & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_q \\ u_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{\psi_f}{L_s} \omega_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

简写成:

$$\frac{di_s}{dt} = Ai_s + Bu_s + d \quad (2)$$

其中:

$$i_s = \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix}, u_s = \begin{bmatrix} u_q \\ u_d \end{bmatrix}, A = -R_s I / L_s + \omega_r J, B = I / L_s,$$

$$d = \begin{bmatrix} -\frac{\psi_f}{L_s} \omega_r \\ 0 \end{bmatrix}, I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

利用式(2)构建全阶电流观测器,于是有:

$$\frac{d\hat{i}_s}{dt} = \hat{A}\hat{i}_s + Bu_s + \hat{d} + K(\hat{i}_s - i_s) \quad (3)$$

其中:

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & -\hat{\omega}_r \\ \hat{\omega}_r & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix}, \hat{d} = \begin{bmatrix} -\frac{\psi_f}{L_s} \hat{\omega}_r \\ 0 \end{bmatrix}$$

式中:K—观测器增益矩阵,在矩阵 \hat{A} 和 \hat{d} 中含有待估参数 $\hat{\omega}_r$ 。

为了估计转速,采用模型自适应技术,将式(2)作为参考模型,将式(3)所示的全阶电流观测器作为可

调模型,用两个模型的输出误差来驱动自适应结构,在自适应规律作用下,不断地修正待估计的参数,使两个模型的输出误差接近于零。

将式(2)和式(3)相减,可得到误差公式:

$$\frac{de}{dt} = (A + K)e - W \quad (4)$$

且:

$$e = i_s - \hat{i}_s \quad (5)$$

$$W = -\Delta A \hat{i}_s - \Delta d \quad (6)$$

其中:

$$\Delta A = A - \hat{A} = -(\hat{\omega}_r - \omega_r)J$$

$$\Delta d = d - \hat{d} = \begin{bmatrix} \hat{\omega}_r - \omega_r \\ 0 \end{bmatrix} \frac{\psi_f}{L_s}$$

式(4)构成了动态误差反馈系统,依据 Popov 超稳定理论, $[SI - (A + K)]^{-1}$ 必须为严格正定矩阵,同时自适应机构必须满足:

$$\eta(0, t_0) = \int_0^{t_0} e^T W dt \geq -\gamma_0^2 \quad \forall t_0 \geq 0 \quad (7)$$

式中: γ_0^2 —任一有限的正数。

将式(5)和式(6)代入式(7)求解可得到:

$$\hat{\omega}_r = \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) \left[i_d \hat{i}_q - \hat{i}_d i_q - \frac{\psi_f}{L_s} (i_q - \hat{i}_q) \right] + \hat{\omega}_r(0) \quad (8)$$

由于和模型自适应方法采用的是同一个数学模型,而且均采用 Popov 超稳定理论来推导自适应律,结果是一样的,不同的是自适应观测器在状态估计方程中加入了一个校正项。状态估计误差要乘以一个反馈增益矩阵,来优化观测器的下一个输出,反馈增益矩阵的设计要满足系统稳定性的要求,即:

$$K = -g_1 I + g_2 J$$

$$g_1 = (k - 1) \frac{R_s}{L_s} \quad (k \geq 1)$$

$$g_2 = (k - 1) \hat{\omega}_r \quad (k \geq 1)$$

反馈增益矩阵的加入,会使观测器动态误差的收敛速度快于 MARS,但 k 选取过大,也会扩大测量噪声,可能导致系统不稳定,实验中 k = 2。

2 辨识参数 R_s 和 ψ_f

由于电机在运行过程中, R_s 和 ψ_f 都会受到温度的影响,电机参数的变化会影响到估算的精度,同时辨识 R_s 和 ψ_f 是非常必要的。同估算转子速度一样:

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} -\frac{\hat{R}_s}{L_s} & -\omega_r \\ \omega_r & -\frac{\hat{R}_s}{L_s} \end{bmatrix}, \hat{d} = \begin{bmatrix} -\frac{\hat{\psi}_f}{L_s} \omega_r \\ 0 \end{bmatrix}$$

将式(2)和式(3)相减,可得到误差公式:

$$\frac{de}{dt} = (A + K)e - W \quad (9)$$

其中:

$$e = i_s - \hat{i}_s \quad (10)$$

$$W = -\Delta A \hat{i}_s - \Delta d \quad (11)$$

而此时:

$$\Delta A = A - \hat{A} = -\frac{\Delta R_s}{L_s} I$$

$$\Delta d = d - \hat{d} = \begin{bmatrix} -\frac{\omega_r}{L_s} \\ 0 \end{bmatrix} \Delta \psi_f$$

其中:

$$\Delta R_s = R_s - \hat{R}_s; \Delta \psi_f = \psi_f - \hat{\psi}_f$$

可以得到:

$$\hat{R}_s = -\left(K_p + \frac{K_i}{p}\right) [(i_q - \hat{i}_q) \hat{i}_q + (i_d - \hat{i}_d) \hat{i}_d] \quad (12)$$

$$\hat{\psi}_f = -\left(K_p + \frac{K_i}{p}\right) (i_q - \hat{i}_q) \omega_r \quad (13)$$

3 控制系统建模

本研究所采用的自适应观测器算法的基本结构如图 1 所示。

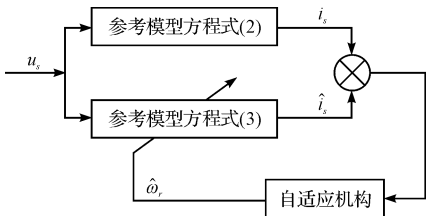


图 1 自适应观测器算法的基本结构

笔者除了采用自适应观测器作为无传感器的设计方案外,在电气驱动的控制方式上,采用 $I_d = 0$ 的 SVPWM 方式。整个系统为含有速度环和电流环的双闭环结构,算法需要的电流信号为电机电流的实际采样值,电压信号为 d, q 轴电流 PI 调节输出的给定值。具体的模型框图如图 2 所示。

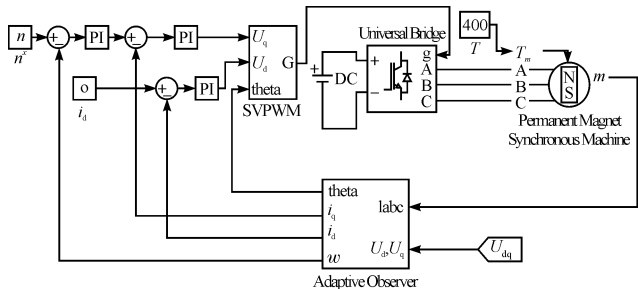


图 2 Matlab 结构示意图

4 仿真实验结果分析

低速大力矩复式永磁同步电机一般用于大力矩、低转速的场合,所以一般转速不会很高,模型中给定转速为 10 r/min。为了使算法中的电机参数与实际选用电机的参数有一定的偏差,在系统运行前,可设定如下: $\hat{R}(0) = 1.5 \Omega$ (实际值为 1.9Ω), $\hat{\psi}_r = 0.7 \text{ T}$ (实际值为 0.9 T), L 为准确值 0.025 H 。

仿真结果如图 3 ~ 图 6 所示。转速在启动时出现了较明显的波动,这是由于短时间内各参数没有补偿至实际电机参数值,由此,也可以知道在没有参数辨识的情况下,若参数实际值发生变化,算法将发生振荡,达不到控制要求。随着电机的运行,各项参数将最终稳定下来,转速估算也和实际值相符,因此这种算法是可行的^[11-12]。

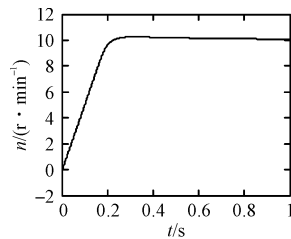


图 3 实际转速

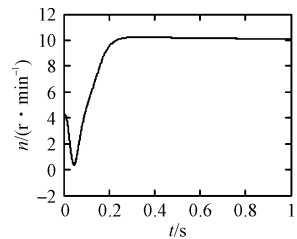


图 4 估计转速

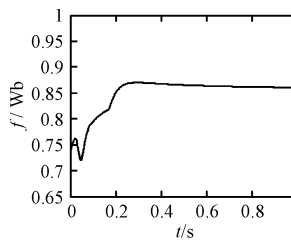


图 5 磁链曲线

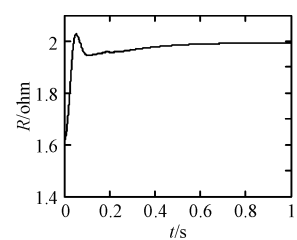


图 6 电阻曲线

5 结束语

通过理论的推导和仿真实验的验证,自适应观测器可以作为低速大力矩复式永磁同步电机的无位置传感器的控制方案,而且参数辨识能够在电机运行中电阻磁链发生变化的情况下使算法趋于稳定,电机可以平稳的运行。

参考文献 (References):

[1] 王成元,夏加宽. 电机现代控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2006.

[2] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2006.

表 2 实验对比

	脉冲加入方式	改进前现象	原因分析与查证	改进措施	结论
第 1 款表 3 台	LA	计量复位	晶振受干扰	孤立晶振,加粗电源线回路	复位消失
	LA、LN	计量复位	晶振受干扰	孤立晶振,加粗电源线回路	复位消失
	LA、LB、LC、LN	频繁复位	晶振受干扰	孤立晶振,加粗电源线回路	复位消失
第 2 款表 3 台	LB	精度超差	B 相电压起伏	电压回路并联 100 pF 抗混叠电容	精度合格
	LB、LN	精度超差	B 相电压起伏	电压回路并联 100 pF 抗混叠电容	精度合格
	LA、LB、LC、LN	精度超差	电压起伏	电压回路并联 100 pF 抗混叠电容	精度合格
第 3 款表 3 台	LC	精度超差	电流不稳	电流回路并联 100 pF 抗混叠电容	精度合格
	LC、LN	精度超差	电流不稳	电流回路并联 100 pF 抗混叠电容	精度合格
	LA、LB、LC、LN	精度超差	电流不稳	电流回路并联 100 pF 抗混叠电容	精度合格

3 结束语

通过大量电磁兼容实验证明,上述应对电快速瞬变脉冲群干扰的改进措施具有可操作性,对克服极端脉冲对电能表所造成的复位、精度变化大等故障现象,具有明显的效果。这些措施是对电能表研发工作中从样机到产品定型所进行的电快速瞬变脉冲群实验的经验总结,对电子式电能表的设计与实验具有一定的实践指导意义。

参考文献 (References) :

[1] 王 英,杨 彦,陈 楠,等. GB/T 17626. 4 - 2008 电磁兼容 试验和测量技术 电快速瞬变脉冲群抗扰度试验 [S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[2] European Committee for Electrotechnical Standardization. EN61000-4-4/A1 Electro Magnetic Compatibility (EMC) - Part 4-4 Testing and Measurement Techniques-Electrical fast Transient/Burst Immunity Test [S]. European Committee for Electrotechnical Standardization, 2010.

[3] 王兆宏,徐人恒,徐 民,等. GB/T 17215. 211-2006 交流电测量设备通用要求、试验和试验条件第 11 部分测量设备 [S]. 北京:中国标准出版社,2006.

[4] 毕婕婷. 电子式电能表电快速瞬变脉冲群抗扰度试验

[J]. 广东科技,2008(18):122-123.

[5] 曹 恒,王 琪,张金锁,等. 电快速瞬变脉冲群试验方法研究 [J]. 振动、测试与诊断,2006,26(4):278-281.

[6] 祝贵军. 电快速瞬变脉冲群发生器的校准 [J]. 自动化与仪器仪表,2007(3):77.

[7] 蓝润泽,李 伟. 快速瞬变脉冲群干扰的原理及硬件防护 [J]. 电测与仪表,2002,39(2):11-14.

[8] 张三庆. 电快速瞬变脉冲群和浪涌干扰机理与抑制技术研究 [D]. 保定:华北电力大学电气与电子工程学院,2004.

[9] 杨新培,殷玉鹏. 多功能电能表电快速瞬变脉冲群抗干扰性试验 [J]. 山东电力技术,2000(1):15-18.

[10] 龚成龙,韩晓春,陈佳建. 电子仪器 PCB 设计中 EMC 技术的应用 [J]. 电测与仪表,2005,42(5):32-36.

[11] WESTON D A. Electromagnetic Compatibility Principles and Applications [M]. CRC Press,1994.

[12] 钱振宇. 3C 认证中的电磁兼容测试与对策 [M]. 北京:电子工业出版社,2004.

[13] International Electrotechnical Commission. IEC61000-4-3. Testing and Measurement Techniques Radio-frequency, Electromagnetic Field Immunity Test [S]. International Electrotechnical Commission, 2002.

[14] SCHUSTER C, FICHTNER W. Parasitic modes on printed circuit boards and their effects on EMC and signal integrity [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 43(4):416-425. [编辑:柴福莉]

(上接第 634 页)

[3] 许大中,贺益康. 电机控制 [M]. 杭州:浙江大学出版社,2002.

[4] 俞佳琦,叶云岳,范承志. 基于 EKF 的低速永磁电机控制系统建模与分析 [J]. 机电工程,2009,26(2):31-33.

[5] BOLOGNANI S, TUBIANA L, ZIGLIOTTO M. Extended Kalman filter tuning in sensorless PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(6):1741-1747.

[6] QIU A, WU B. Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Extended Kalman Filter [C]//CCECE 2004-CCGEI 2004. Niagara;2004:1557-1562.

[7] STAINES C S, CILIA J, MICALLED B, et al. Sensorless Vector Control of A Surface Mount PMSM Using High Frequency Injection [C]//Power Electronics, Machines and Drives, Conference Publication No. 487,2002:44-48.

[8] 贾洪平,贺益康. 基于高频注入法的永磁同步电动机转子初始位置检测研究 [J]. 中国电机工程学报,2007,27(15):15-20.

[9] LIANG Yan, LI Yong-dong. Sensorless control of PM synchronous motors based on MRAS method and initial position estimation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004,23(5):96-99.

[10] 齐 放,邓智泉,仇志坚,等. 基于 MRAS 的永磁同步电机无速度传感器 [J]. 电工技术学报,2007,22(2):53-58.

[11] 沈凯明,王玉芬,常 兴. 电机测试系统的 PLC 控制 [J]. 轻工机械,2010,28(4):70-79.

[12] 颜晓河. 全电动式注塑机计量位置控制电机的选择 [J]. 轻工机械,2010,28(4):103-104.

[编辑:柴福莉]