

Luenberger 观测器在永磁同步电机无传感器控制中的应用研究^{*}

周双飞, 黄海波, 简 炜

(湖北汽车工业学院 电气与信息工程学院, 湖北 十堰 442002)

摘 要: 在永磁同步电机(PMSM)矢量控制中, 根据 Luenberger 观测器原理, 提出了一种基于 Luenberger 观测器的 PMSM 转子速度和位置的估算方法, 有效解决了 PMSM 由于机械传感器安装带来的一些弊端。利用 MATLAB/Simulink 工具搭建控制系统仿真模型并进行仿真验证, 仿真结果表明控制系统具有良好的控制性能。最后, 在以 STM32F103ZET6 为控制核心的硬件系统上进行算法的实现, 试验结果表明基于 Luenberger 观测器的 PMSM 控制系统具有较高的控制精度且稳定性较好。

关键词: 永磁同步电机; 无速度传感器; Luenberger 观测器

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)10-0059-04

Research on Application of Luenberger Observer in Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor^{*}

ZHOU Shuangfei, HUANG Haibo, JIAN Wei

(School of Electrical & Information Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China)

Abstract: In the vector control of permanent magnet synchronous motor (PMSM), according to the principle of Luenberger observer, a based on Luenberger observer of PMSM rotor speed and position estimation method was proposed, an effective solution to some drawbacks of the PMSM due to the installation of mechanical sensors. Using MATLAB/Simulink tool to build the control system simulation model and simulation, simulation results showed that the control system had good control performance. Finally, in STM32F103ZET6 as the control core of the hardware system for algorithm implementation. The experimental results showed that the PMSM control system based on Luenberger observer had high control precision and good stability.

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

0 引 言

永 磁 同 步 电 机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 具有高动态性能、高功率密度、轻量化等特点, 随着电力电子技术和微处理器技术的发展, PMSM 得到广泛的应用。目前 PMSM 的控制方法主要包括矢量控制和直接转矩

控制。矢量控制是通过将电机的定子电流从三相静止坐标系变换到以转子磁链定向的同步旋转坐标系, 实现励磁电流和转矩电流的解耦, 获得与直流电机一样的动态调速性能; 直接转矩控制通过空间矢量的分析方法, 在定子坐标系下直接实现磁链计算与转矩控制, 但其有着磁链和转矩脉动问题^[1], 故通常情况下选择矢量控制来实现

^{*} 基金项目: 湖北省科技支撑计划项目(2015BAA049); 湖北省自然科学基金项目(2014CFB378); 湖北省教育厅科学研究计划项目(D20131802); 智能驾驶控制湖北省重点实验室(筹)开放基金项目(ZDK2201402)

作者简介: 周双飞(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为节能与新能源汽车。

黄海波(1974—), 男, 博士, 教授, 研究方向为节能与新能源汽车。

PMSM 的控制。

PMSM 控制系统,需要得到精确的转子位置和电机转速,来实现较高的控制特性。目前,主要通过安装在转子上安装机械式的传感器获取其信号,传感器的安装会增加电机控制系统的成本,降低稳定性,还使其在振动、潮湿等恶劣环境下的应用受到限制^[2]。因此利用容易获得的电机物理量来计算电机的转子位置和转速,取代机械传感器的无传感器算法得到广泛关注。

目前 PMSM 无位置传感器矢量控制方法主要有滑模观测器、Luenberger 观测器^[3-4]、扩展卡尔曼滤波器等。扩展卡尔曼滤波器对噪声有滤波作用,且有良好的抗干扰能力,但该算法复杂,对硬件性能要求较高^[5],而滑模观测器存在抖振问题^[6],因此为解决以上问题,采用基于 Luenberger 观测器的 PMSM 无传感器矢量控制算法,在 Simulink 中搭建仿真模型,验证该算法的优越性,并设计硬件系统进行验证。

1 PMSM 无传感器控制系统

基于 Luenberger 观测器的 PMSM 无位置传感器矢量控制系统的框图如图 1 所示。采用容易测量的电压和电流来估计得到电机的反电动势 e_α 、 e_β ,利用转子位置和转速与反电动势的关系,可计算得到双闭环控制系统电流内环所需要的转子位置信息 θ 和速度外环反馈信息 ω_r 。控制系统采用 3 个 PI 调节器和电压 SVPWM 技术来控制电机的运行。

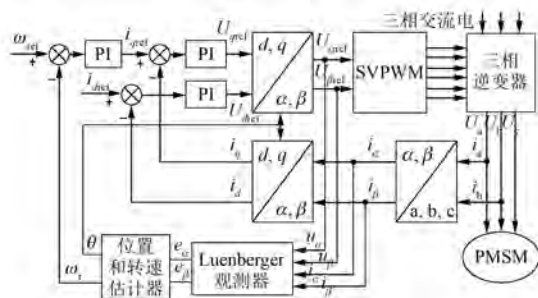


图 1 无传感器控制系统整体框图

2 Luenberger 观测器设计

PMSM Luenberger 观测器基本结构如图 2 所示。采用 PMSM 容易测量的电压 u_α 、 u_β 和电流 i_α 、 i_β 作为输入,对其进行状态重构,采用估计电

流与实际电流的偏差对估计状态不断修正的方法^[7],使估计值接近真实值。

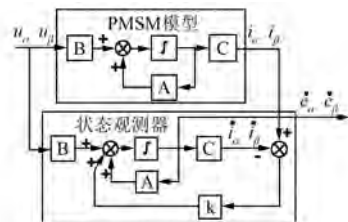


图 2 Luenberger 观测器结构图

在静止 $\alpha\beta$ 坐标系下的电机状态方程为

$$\begin{cases} \frac{di_\alpha}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}i_\alpha - \frac{\lambda_r p_p \omega_r}{L_s} \cos \theta + \frac{1}{L_s}u_\alpha \\ \frac{di_\beta}{dt} = -\frac{R_s}{L_s}i_\beta + \frac{\lambda_r p_p \omega_r}{L_s} \sin \theta + \frac{1}{L_s}u_\beta \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_s 、 L_s ——电机定子相电阻和相电感;

i_α 、 i_β 、 u_α 、 u_β ——定子两相静止坐标系定子绕组电流和电压;

λ_r ——转子永磁体磁链;

ω_r ——转子速度;

p ——电机的极对数。

设

$$\begin{cases} e_\alpha = \lambda_r p \omega_r \cos \theta \\ e_\beta = -\lambda_r p \omega_r \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

根据电机状态方程建立 $\alpha\beta$ 坐标系下的数学模型:

$$\begin{cases} \dot{x}'(t) = f[x(t)] + Bu(t) \\ y(t) = h[x(t)] \end{cases} \quad (3)$$

选取状态变量 $x = [i_\alpha \ i_\beta \ e_\alpha \ e_\beta]^T$, 控制变量 $u = [u_\alpha \ u_\beta]^T$, 输出变量 $y = [e_\alpha \ e_\beta]^T$ 。在数字控制系统中,由于采样时间很短,可将单个采样周期内的机械转速 ω_r 变化量视为零,则

$$f[x(t)] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s}i_\alpha - \frac{e_\alpha}{L_s} \\ -\frac{R_s}{L_s}i_\beta - \frac{e_\beta}{L_s} \\ p\omega_r e_\beta \\ -p\omega_r e_\alpha \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

建立 Luenberger 观测器:

$$\dot{x}'(t) = f[x(t)] + Bu(t) + Kw(t) \quad (5)$$

为了简化极点的配置,设

$$k = \begin{bmatrix} K_1 \\ K_1 \\ K_2 \\ K_2 \end{bmatrix}, w(t) = \begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha & -\dot{i}_\alpha \\ \dot{i}_\beta & -\dot{i}_\beta \\ \dot{i}_\alpha & -\dot{i}_\alpha \\ \dot{i}_\beta & -\dot{i}_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中： $\hat{i}_\alpha, \hat{i}_\beta$ —— i_α, i_β 的估计值。

转子转速和位置信息可从 PMSM 反电动势的分量 e_α 、 e_β 计算得到:

$$\text{由 } \frac{e_\beta}{e_\alpha} = \frac{-\lambda_r p \omega_r \sin \theta}{\lambda_r p \omega_r \cos \theta} = -\tan \theta, \text{ 得}$$

$$\theta = \arctan\left(-\frac{e_\beta}{e_\alpha}\right) \quad (7)$$

由此得到的转子位置信息周期是 π , 而实际的转子位置信息周期是 2π , 故需要对其进行预先处理, 在此采用反电动势分量 $e_\beta \geq 0, \theta + \pi$ 的方式进行处理, 转化得到所需要的位置信号。由 $e_\alpha^2 + e_\beta^2 = (\lambda_r p \omega_r \cos \theta)^2 + (-\lambda_r p \omega_r \sin \theta)^2 = (\lambda_r p \omega_r)^2$, 得

$$\omega_r = \frac{\sqrt{e_\alpha^2 + e_\beta^2}}{\lambda_r p} \quad (8)$$

3 系统仿真模型的搭建及分析

为了验证该控制系统的性能,在 MATLAB/Simulink 平台搭建基于 Luenberger 观测器的无速度传感器矢量控制系统的仿真模型,如图 3 所示。其中:PMSM 采用 42JSF330AS-1000 型号的伺服电机,供电电压 24 V,额定功率 32 W,额定转速 3 000 r/min,相电阻 2.1 Ω ,相电感 $L_d = L_q =$

1.4 mH,反电动势系数 $K_e = 4.29 \text{ V/krpm}$,极对数为4。

为构建数字化的滤波器,需要对 Luenberger 观测器进行离散化,设采样时间 $T_s = 1 \times 10^{-6}$,则离散化的观测器为

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{i}_\alpha(k+1) &= \dot{i}_\alpha(k) - \frac{R_s T_s}{L_s} \dot{i}_\alpha(k) + \\ & k_1 T_s [\dot{i}_\alpha(k) - i_\alpha(k)] - \frac{T_s}{L_s} \dot{e}_\alpha(k) + \frac{T_s}{L_s} u_\alpha(k) \\ \dot{i}_\beta(k+1) &= \dot{i}_\beta(k) - \frac{R_s T_s}{L_s} \dot{i}_\beta(k) + \\ & k_1 T_s [\dot{i}_\beta(k) - i_\beta(k)] - \frac{T_s}{L_s} \dot{e}_\beta(k) + \frac{T_s}{L_s} u_\beta(k) \\ \dot{e}_\alpha(k+1) &= \dot{e}_\alpha(k) + k_2 T_s [\dot{i}_\alpha(k) - i_\alpha(k)] + \\ & T_s p \omega_r \dot{e}_\beta(k) \\ \dot{e}_\beta(k+1) &= \dot{e}_\beta(k) + k_2 T_s [\dot{i}_\beta(k) - i_\beta(k)] + \\ & T_s p \omega_r \dot{e}_\alpha(k) \end{aligned} \right. \quad (9)$$

其仿真结构图如图 4 所示。 k_1 和 k_2 为观测器增益,其值的选择直接关系到观测器性能的优劣。 k_1 、 k_2 可通过计算观测器特征值的方法得到其值的大小,由于计算比较复杂,在此选择在传感器模式下启用观测器,试凑得到 k_1 、 k_2 的初值,再切换到观测器模式下进行微调,由此得到 $k_1 = -9\ 000$, $k_2 = 80\ 000$ 。

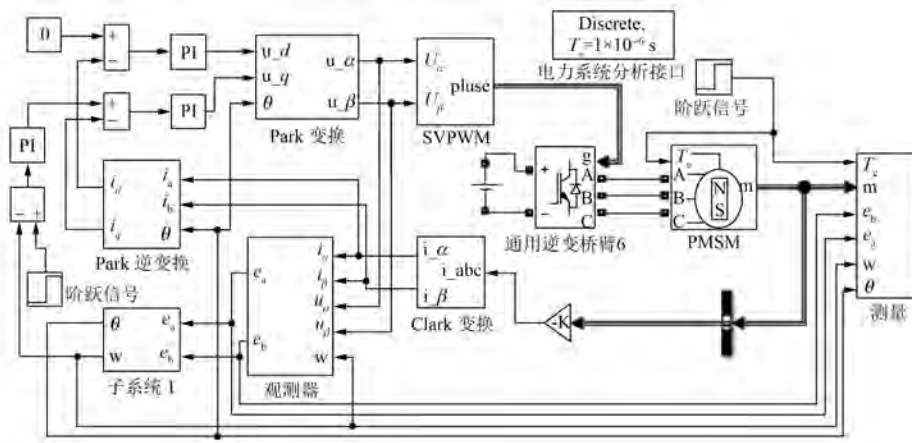


图3 基于 Luenberger 观测器的 PMSM 控制系统仿真模型

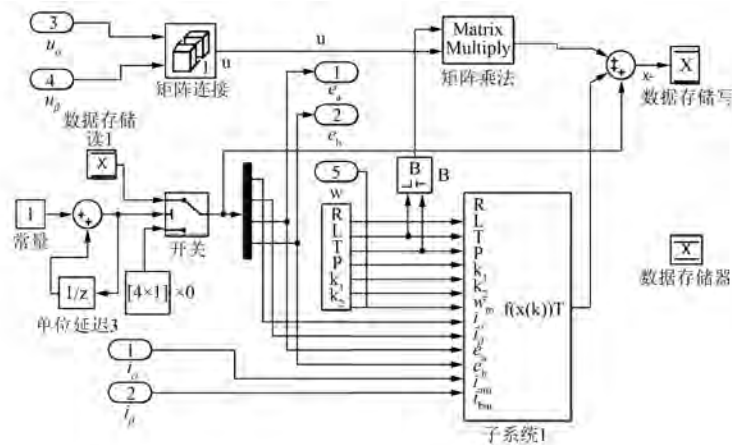


图 4 Observer 模块内部结构图

设电机的目标转速为 2 000 r/min,对系统进行仿真,反电动势估计曲线如图 5 所示。反电动势曲线呈现非常好的正弦波形,且 PMSM 起动过程中波动较小,为电机转子位置和转速的准确估计奠定良好的基础。图 6 为转子位置响应曲线,约 0.01 s 后估计的转子位置曲线与实际位置曲线几乎重合,跟踪效果较好。图 7 为速度响应曲线,可以看出电机起动过程用时约 0.04 s,且起动过程比较平稳,转速稳定后估计转速与实际转速误差几乎为零,控制效果比较理想。

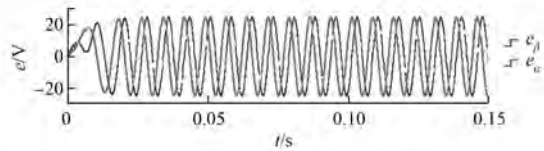


图 5 反电动势估计曲线

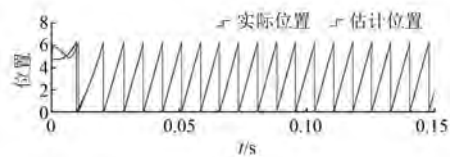


图 6 转子位置响应曲线

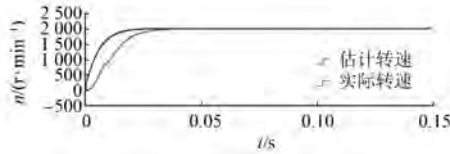


图 7 速度响应曲线

4 系统实现

利用前面的理论和仿真结论,实现 PMSM 无传感器矢量控制系统,硬件部分采用低功耗、高性能的 STM32F103ZET6 为控制芯片设计控制系统,电机采用与仿真同型号的 PMSM,软件部分采用 C 语言编程实现系统的控制。

做与仿真相同的试验,目标转速设为 2 000 r/min,通过 DAC 功能输出电机转速 ω_r 及反电动势分量 e_α 、 e_β ,并设计简单的 RC 低通滤波器输出波形。图 8 为电机的反电动势波形图,输出波形比较好且比较稳定;图 9 为电机的输出转速波形图,波形 1 为输出的电机实际转速,通过 encode 编码器测量得到,波形 2 为输出的观测器观

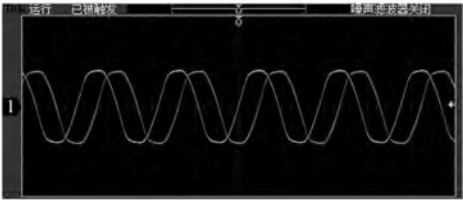


图 8 反电动势波形图

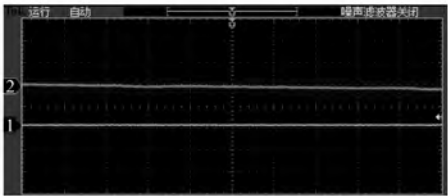


图 9 输出转速波形图

(下转第 66 页)

3.3 故障模式下发电机组状态转换仿真方法

故障模式下发电机组状态转换仿真方法如图 5。当机组处于正常模式, 分别接收到来自系统内部合法的模拟故障指令, 则经状态转换进入相应的故障模式。当机组处于故障模式下, 分别接收到来自系统内部合法的模拟故障消除指令, 则经状态转换回到正常模式。

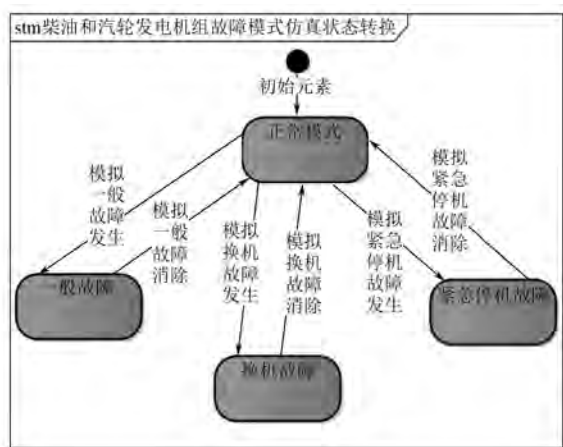


图 5 故障模式下发电机组状态转换图

4 结 语

本文针对嵌入式舰船电力虚拟模拟训练系统的特点, 对其发电机仿真的需求进行分析, 提出一种适用于嵌入式舰船电力虚拟模拟训练的发电机

仿真方法。设计构建了基于状态转换的发电机组仿真模块, 对发电机组运行状态进行分析, 提出了正常状态和故障状态两种模式下的发电机组状态转换仿真方法。该仿真方法简化了发电机组仿真模型, 提高了发电机组仿真速度。用该仿真方法构建的电力虚拟模拟训练系统, 通过运行表明, 该仿真方法在保证训练场景逼真的前提下, 解决了模拟训练中发电机组参数变化难以实现实时性的问题。

【参考文献】

- [1] 谢辉, 卜乐平, 冯源. 船舶电力模拟训练评估系统的设计和开发[J]. 舰船科学技术, 2013, 35(11): 45-48.
- [2] 潘昕, 侯新国, 夏立, 等. 船舶电力系统的建模与仿真[J]. 电力科学与工程, 2013, 29(4): 49-53.
- [3] 林平. 舰艇嵌入式模拟训练技术的应用及发展[J]. 军事运筹与系统工程, 2008, 22(4): 27-31.
- [4] 李爽. 设计模式在实船训练系统软件设计中的应用[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2011, 34(1): 47-51.
- [5] 张锦, 任长合, 聂伟. 舰艇机电模拟训练考核评估系统[J]. 军事交通学院学报, 2016, 18(12): 85-88.
- [6] 金炳哲, 龚喜文. 船舶电力系统模拟训练系统的设计与实现[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2016, 39(1): 49-53.

收稿日期: 2017-09-20

(上接第 62 页)

测的电机转速, 可以看出电机进入稳态后, 观测转速有小幅度的波动, 实际转速比较稳定, 控制系统整体效果较好。

5 结 语

本文通过设计 Luenberger 观测器, 估计得到 PMSM 的转子转速和位置信息, 有效解决了传统传感器的一些弊端, 且该算法简单, 容易实现。仿真和试验结果表明基于 Luenberger 观测器的 PMSM 矢量控制系统具有较好的控制精度, 且响应速度非常快, 系统稳定性较好。

【参考文献】

- [1] 杨国良, 李建雄. 永磁同步电机控制技术[M]. 北京: 知识产权出版社, 2015.
- [2] BOUSSAK M, JARRAY K. A high performance

sensorless indirect stator flux orientation control of induction motor drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(1): 41.

- [3] SBITAL B H M. An MRAS-based full order Luenberger observer for sensorless DRFOC of induction motors [J]. ICGST-ACSE Journal, 2007, 7(1): 11-20.
- [4] 任向杰, 陈冰. Luenberger 速度观测器在同步运动控制中的应用[J]. 机械与电子, 2011(12): 10-13.
- [5] 陈殷. 永磁同步电机无差拍直接转矩控制系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [6] 李立毅, 谭广军. 基于 Luenberger 观测器的高速 PMSM 无传感器技术研究[J]. 微电机, 2013, 41(4): 31.
- [7] ELLIS G. Observers in control systems-a practical guide[G]. 2002.

收稿日期: 2017-01-31