

基于超螺旋滑模变结构永磁同步电机的控制*

陈再发^{1,2}, 刘彦呈¹

(1. 大连海事大学 轮机工程学院, 辽宁 大连 116026;

2. 浙江国际海运职业技术学院, 浙江 舟山 316021)

摘要: 根据 $\alpha\beta$ 坐标系统的永磁同步电机数学模型, 利用 MATLAB/Simulink 仿真工具, 搭建了传统直接转矩控制系统仿真模型。针对系统磁通与转矩的输出波动大的特点, 基于超螺旋滑模变结构控制策略, 在 dq 坐标系下, 设计了磁链与转矩控制器, 继而搭建仿真模型。在新的模型下, 用转矩控制器与磁链控制器替换滞环比较器, 得出了改进系统的电磁转矩与电机转速的响应曲线。通过对比传统直接转矩控制系统的曲线, 结果表明改进后的系统电磁转矩曲线脉动显著减小, 转速响应明显加快。

关键词: 永磁同步电机; 超螺旋; 滑模变结构; 仿真分析

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2017)06-0019-05

Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Super Spiral Sliding Model Variable Structure*

CHEN Zaifa^{1,2}, LIU Yancheng¹

(1. Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. Zhejiang International Maritime College, Zhoushan 316021, China)

Abstract: According to the mathematical model of the permanent magnet synchronous motor based on the $\alpha\beta$ coordinate system, the traditional direct torque control system simulation model was built by using the Simulink stool in MATLAB. According to characteristics of the system of magnetic flux and torque output fluctuations, super-twisting synovial variable structure control strategy based on, in the dq coordinate system design flux and torque controller, then built the simulation model, in the new model, hysteresis comparator was replaced by torque controller and flux linkage controller, it was concluded that the improved system of electromagnetic torque and motor speed of response curve. By comparing the curve of the traditional direct torque control system, the results showed that the electromagnetic torque curve of the improved system was significantly reduced, and the speed response was obviously accelerated.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); super spiral; sliding model variable structure; simulation analysis

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 凭借高功率密度、高效率、高可靠性及结构简单、维护成本小等优点, 成为电力推进船舶推进电机最佳对象。但是, 该电机是一个多变量、强耦合的非线性系统, 存在着

输出电磁转矩波动大、输出响应慢等不利因素, 直接影响着控制系统性能的提高^[1]。滑模变结构控制因其鲁棒性强、响应迅速, 以及对外界扰动不敏感而备受关注^[2], 针对传统直接转矩控制效果的不足, 基于超螺旋滑模变结构控制策略, 设计磁链控制器和转矩控制器取代传统滞环比较器, 搭建仿真模型, 对 PMSM 控制进行研究。

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51479018, 51379002)

作者简介: 陈再发(1981—), 男, 博士研究生, 研究方向为船舶机电设备状态监测、故障诊断等。

刘彦呈(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为机电一体化。

1 PMSM 的数学模型

变量多、耦合强、非线性等是 PMSM 的特征, 为此, 若忽略对 PMSM 的性能与效果干扰较小的变量, 可得出一个较为精简的数学模型^[3]。

1.1 两相静止坐标系 $\alpha\beta$ 下的数学模型

定子电压方程为

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

式中: $u_\alpha, u_\beta, i_\alpha, i_\beta$ ——定子电流矢量与电压矢量在 α, β 轴上的分量;

- R_s, L_s ——定子电阻和定子电感;
- ω_r ——电机角速度;
- ψ_r ——永磁体磁通;
- θ_r ——位置角。

定子磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_\alpha = \int (u_\alpha - R_s i_\alpha) dt \\ \psi_\beta = \int (u_\beta - R_s i_\beta) dt \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_\alpha i_\beta - \psi_\beta i_\alpha) \quad (3)$$

电机运动方程为

$$J \frac{d(\omega_r)}{dt} + B \left(\frac{\omega_r}{p} \right) = T_e - T_L \quad (4)$$

1.2 旋转坐标系 dq 下的数学模型

dq 坐标系下定子电压方程:

$$\begin{cases} u_d = \frac{d\psi_d}{dt} + R_s i_d - p\omega_r \psi_q \\ u_q = \frac{d\psi_q}{dt} + R_s i_q + p\omega_r \psi_d \end{cases} \quad (5)$$

dq 坐标系下定子磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (6)$$

dq 坐标系下转矩方程:

$$T_e = \frac{3p |\psi_s| [2\psi_f L_q \sin \delta - |\psi_s| (L_q - L_d) \sin(2\delta)]}{4L_d L_q} \quad (7)$$

式中: u_d, u_q ——定子电压在 dq 轴上的分量;

- i_d, i_q ——定子电流在 dq 轴上的分量;
- ψ_d, ψ_q ——定子磁链在 dq 轴上的分量;
- L_d, L_q ——定子绕组在 dq 轴上的等效电感;
- ψ_f ——在定子上生成的永磁体磁通;
- T_e ——PMSM 转矩;
- ω_r ——转子旋转角速度。

由式(7)可知, 如果定子磁通大小确定, 要改变 PMSM 的电磁转矩 T_e 可通过调节 δ 来完成。这就是传统直接转矩控制的原理所在^[4]。

2 PMSM 直接转矩控制系统的仿真

2.1 系统建模

根据 $\alpha\beta$ 坐标系下的 PMSM 数学模型, 利用 MATLAB/Simulink 仿真工具, 搭建传统直接转矩控制系统仿真模型。仿真模型包括电机模块、磁链计算模块、速度调节模块、坐标转换模块、控制器模块等多个子系统模块。系统模型如图 1 所示。

2.2 仿真结果及分析

在直接转矩控制系统中, 给出的 PMSM 参数如下: 定子绕组电阻为 $R_s = 1.2 \Omega$, 定子电感 $L_d = L_q = 0.0085 \text{ H}$, 永磁转子磁链 $\psi_f = 0.175 \text{ Wb}$, 转动惯量 $J = 0.0008 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 极对数 $p = 4$ 。系统仿真参数如下: 电机给定转速为 $\omega^* = 600 \text{ r/min}$, 定子磁链给定值 $\psi^* = 0.3 \text{ Wb}$, 负载转矩初始给定值为 $T_m = 0.5 \text{ N} \cdot \text{m}$, 仿真时间为 0.3 s 。仿真曲线如图 2~图 4 所示。

通过上述仿真曲线可发现, 直接转矩控制系统的响应较慢, 且磁通与转矩的输出波动很大, 严重影响 PMSM 的控制性能。如何减小磁链和转矩的脉动, 提高调速系统的性能, 是 PMSM 面临的一个重要问题。

3 超螺旋滑模变结构控制策略

为了改善 PMSM 的控制性能, 文献[5-7]提出了扩展卡尔曼滤波器, 文献[8-10]提出了神经网络辨识, 文献[11-14]提出了滑模观测器等。其中滑模观测器由于相比其他方法更加简单, 且具有良好的鲁棒性而得以迅速发展, 但该方法存在滑模“抖振”现象。为了解决“抖振”问题, 国内外学者提出了多种方法, 但均不能从根本上消除抖振或者必须牺牲其他指标^[15-18]。采用基于超螺旋算法

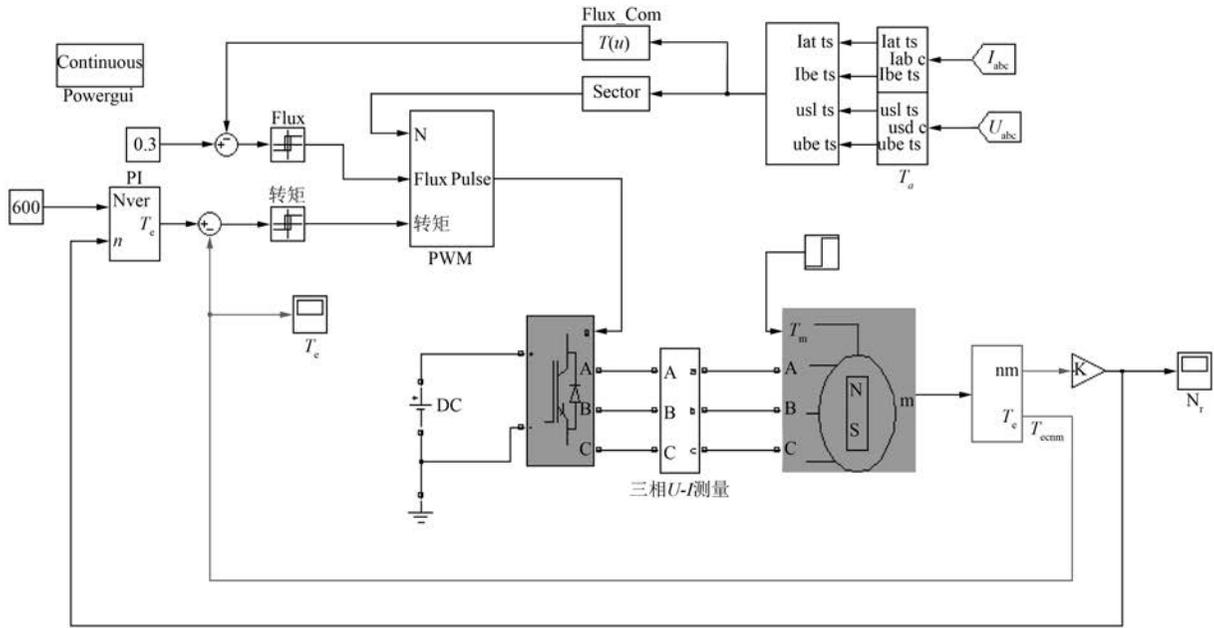


图1 传统 PMSM 直接转矩控制系统仿真模型

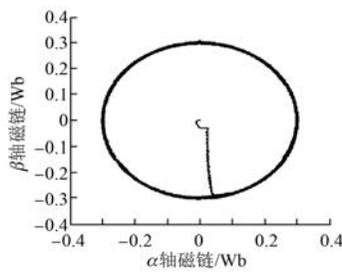


图2 磁链轨迹波形

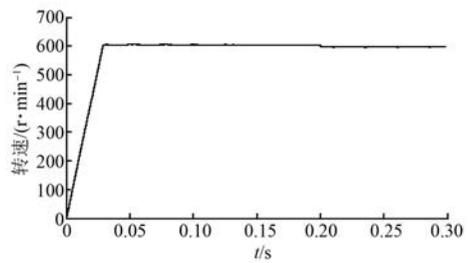


图4 电机转速波形

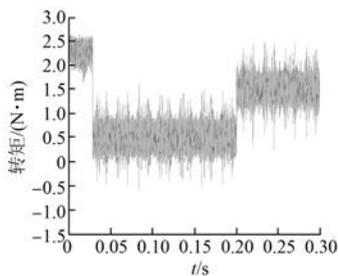


图3 电磁转矩波形

的滑模观测器不仅能较好地消除抖振,且能避免相位滞后,使得位置和速度估算精度大大提高。

3.1 基于超螺旋滑模变结构控制器的设计

对于一个动态系统,如下:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = a(x,t) + b(x,t)u \\ y = c(x,t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: x ——状态量;
 u ——控制输入;
 y ——被控输出;
 a, b, c ——关于状态量和时间的函数。

针对系统式(8)的控制问题,实际上就是要找到一个控制 $u = f(y, \dot{y})$ 使得系统能够在有限的时间内趋近相平面 $y = \dot{y} = 0$ 。超螺旋控制律一般包括两个部分:一是滑模变量的不连续函数,二是对时间偏导的连续函数。超螺旋控制算法可以写成如下形式:

$$\begin{cases} u = K_p |s|^r \text{sgn}(s) + u_1 \\ \frac{du_1}{dt} = K_1 \text{sgn}(s) \end{cases} \quad (9)$$

式中: K_p, K_1 ——增益。

控制系统稳定的充分条件为

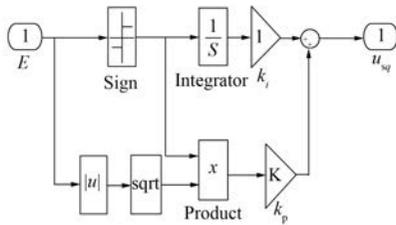


图6 转矩控制器模块

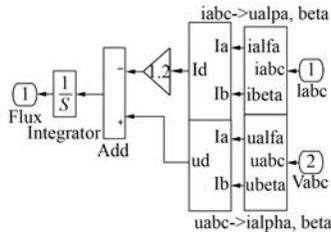


图7 磁链计算及坐标变换模块

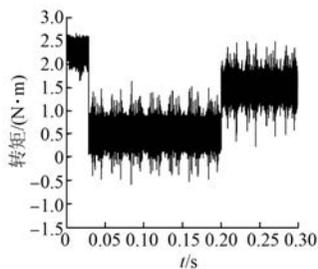


图8 电磁转矩波形(传统DTC)

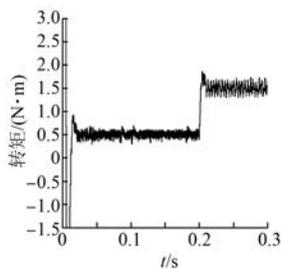


图9 电磁转矩波形(超螺旋滑模变结构DTC)

转矩脉动较传统的明显减小,而且转速响应更快。传统的直接转矩控制系统的转速响应时间约为0.03 s,而基于超螺旋滑模变的直接转矩控制系统只用了约0.01 s,证明了提出的控制策略的正确性。

4 结 语

为了改善 PMSM 控制系能,在 dq 坐标系下,

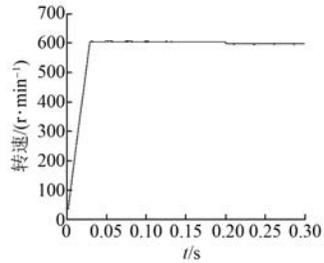


图10 转速波形(传统DTC)

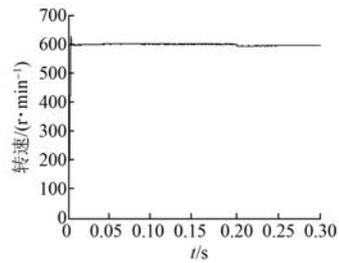


图11 转速波形(超螺旋滑模变结构DTC)

设计了基于超螺旋滑模的磁链控制器与转矩控制器,继而搭建仿真模型。在新的模型下,用转矩控制器与磁链控制器替换滞环比较器,得出了改进系统的电磁转矩与电机转速的响应曲线。通过对比传统直接转矩控制系统的曲线,结果表明改进后的系统电磁转矩曲线脉动显著减小,转速响应明显加快,证明了控制策略的正确性。

【参考文献】

- [1] 胡森.船舶电力推进永磁同步电机控制系统的研究 [D].大连:大连海事大学,2013.
- [2] FENG Y, YU X H, HAN F L. High-order terminal sliding-mode observer for parameter estimation of a permanent-magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 60(10): 4272-4280.
- [3] LIU H X, LI S H. Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 1171-1183.
- [4] 王斌,王跃,王兆安.空间矢量调制的永磁同步电机直接转矩控制[J].电机与控制学报,2010,14(6): 45-50.
- [5] 周腊吾,石书琪.一种新型的 PMSM 直接转矩控制 [J].湖南大学学报(自然科学版),2011,38(8): 40-44.

(下转第30页)