

基于滑模变结构电流环的 PMSM 矢量控制

刘俊锋, 杨文焕, 陈 斌

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 永磁同步电机具有转矩脉动小、效率高、结构简单、转矩/惯量比大等优点, 广泛应用于交流调速系统。针对参数时变、负载扰动等引起的调速系统干扰问题, 提出了一种基于滑模变结构控制理论的电流环鲁棒控制器, 取代传统的电流 PI 控制器。采用电流转速双闭环和基于转子磁链定向的 SVPWM 矢量控制策略, 使得系统动态响应更快、稳定性和抗干扰能力更强, 鲁棒性大幅提高。通过 MATLAB/Simulink 仿真验证了该控制器设计的正确性。

关键词: 永磁同步电机; 滑模变结构控制; 电流环鲁棒控制器; Simulink

中图分类号: TP391.9; TM341 **文献标识码:** A

PMSM vector control based on variable structure sliding model control current-loop

LIU Jun-feng, YANG Wen-huan, CHEN Bin

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Permanent magnet synchronous motor has small torque ripple, high efficiency, high ratio of torque and volume, simple structure, and other advantages, widely used in AC speed control system. In order to solve the problems of parameter variation and load disturbance, a new current loop robust controller based on variable structure sliding mode control was proposed. In the control system, the SVPWM vector control strategy based on current and speed double closed loop and rotor flux oriented was used. Compared with the traditional PI controller, the controller makes the system has faster response speed, higher stability and a stronger anti-interference ability. The robustness of the system is improved. Finally, through MATLAB/Simulink simulation it verifies the correctness of the controller design.

Key words: PMSM; variable structure sliding mode control; current loop robust controller; Simulink

0 引言

近年来, 随着稀土永磁材料、电力电子技术和现代控制理论的快速发展, 永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 因其气隙磁密高、转矩脉动小、效率高、结构简单和维修性好等优点, 广泛应用于高控制精度和高可靠性的场合, 如数控机床、航空航天、军用武器跟随系统以及机器人等行业, 成为交流伺服系统的研究热点。在现代交流电机中占有举足轻重的地位。

由于调速系统存在参数时变、负载扰动以及电动机自身的严重非线性、强耦合等因素, 这就要求一

个高性能的永磁同步电机调速系统必须具有较好的动态响应性能、抗干扰能力和鲁棒性。与此同时, 随着高速 DSP、FPGA 技术的快速发展, 使得模型参考自适应和滑模变结构等现代控制理论逐渐应用于永磁同步电机控制系统。文中在研究永磁同步电机数学模型、磁场定向控制理论及滑模变结构控制理论的基础上, 对传统的电流环 PI 控制器进行了改进, 设计了基于滑模变结构控制理论的电流环鲁棒控制器。采用电流转速双闭环及转子磁链定向的 SVP-

收稿日期: 2014-11-04

作者简介: 刘俊锋 (1991-) 男, 硕士研究生, 研究方向为电机电器。

WM 矢量控制策略,使得系统的动态性能、抗干扰性和鲁棒性显著增强。

1 PMSM 数学模型

永磁同步电机在忽略铁心饱和、绕组漏磁,并假设气隙磁势呈正弦分布,同时忽略磁场高次谐波的情况下,采用 Clarke、Park 坐标变换原理,得到 PMSM 在同步旋转 $d-q$ 坐标系下的数学模型如下:

电气方程:

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

式中, $\omega_e = P\omega_r$

磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩方程:

$$T_e = \frac{3}{2} P [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

机械运动方程:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_L - B\omega_r) \quad (4)$$

式中, U_d 、 U_q 、 i_d 、 i_q 、 L_d 、 L_q 、 ψ_d 、 ψ_q 分别为 $d-q$ 轴的电压、电流、电感和磁链; ψ_f 为转子永磁体主磁链; T_e 、 T_L 为电磁转矩和负载转矩; R_s 为定子绕组电阻; P 为电机极对数; ω_r 为转子角速度; B 为粘滞摩擦系数; J 为转动惯量。

2 电流环鲁棒控制器

滑模变结构控制系统具有良好的鲁棒性、对参数变化不敏感的优点,但是也存在先天缺陷——抖振,该缺陷极大影响着系统的动态性能。因此当采用滑模变结构原理实现高性能永磁同步电机控制系统设计时,不仅要确保电流环鲁棒控制器的鲁棒性,还必须解决抖振问题。下面将从切换面的选择、变结构控制的设计和开关函数的确定三个方面来构建和优化变结构控制器。

2.1 切换面选择

在确保滑动模态渐进稳定性和良好品质的前提下,按照滑模切换函数 $s(x)$ 的选取原则和转子磁场定向控制原理定义滑模面为:

$$S = [s_1 \quad s_2]^T \quad (5)$$

$$\begin{cases} s_1 = e_1(t) + k_1 \int_0^t e_1(t) dt - e_1(0) \\ s_2 = e_2(t) + k_2 \int_0^t e_2(t) dt - e_2(0) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} e_1(t) = i_d - i_d^* = i_d \\ e_2(t) = i_q - i_q^* \end{cases} \quad (7)$$

式中, s_1 为 d 轴电流控制滑模面, d 轴参考电流 i_d^* 为 0; s_2 为 q 轴电流控制滑模面, q 轴参考电流为 i_q^* ; k_1 、 k_2 为积分系数,决定着误差收敛速度。

由于在滑模面中引入了积分项,因而可以确保电机 $d-q$ 两轴的电流以很好的动态特性趋近于各自电流参考设定值,更好地保证滑模运动的动态性能,进一步地削弱系统的抖振。

2.2 变结构控制设计

变结构控制系统的运动,由正常运动和滑动模态两个阶段组成。第一阶段由切换面之外进入切换面,第二阶段在切换面上运动。两个阶段的过渡品质取决于这两个阶段的运动品质。为使系统具备可达性,需在切换面上形成滑动模态区。常用的常值切换控制、函数切换控制和比例切换控制只是简单保证了滑模变结构控制的三个基本条件,正常运动段的品质一直未受到重视。为了保证基本的三个条件,同时还能保证控制品质,在此选用指数趋近律式(8)来设计滑模控制器。

$$\dot{s} = -\alpha \text{sgns} - \beta s \quad \alpha > 0 \quad \beta > 0 \quad (8)$$

由式(6)-(8)计算可得:

$$\begin{cases} -\alpha_1 \text{sgns}_1 - \beta_1 s_1 = -\frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} \omega_e i_q + \frac{u_d}{L_q} + k_1 i_d \\ -\alpha_2 \text{sgns}_2 - \beta_2 s_2 = -\frac{R_s}{L_q} i_d - \frac{L_d}{L_q} \omega_e i_d + \frac{u_d - \omega_e \psi_f}{L_q} + k_2 (i_q - i_q^*) \end{cases} \quad (9)$$

由此可得两相旋转坐标系上的电机输入电压为:

$$\begin{cases} u_d = (\frac{R_s}{L_d} i_d - \frac{L_q}{L_d} \omega_e i_q - k_1 i_d - \alpha_1 \text{sgns}_1 - \beta_1 s_1) L_d \\ u_q = (\frac{R_s}{L_q} i_d + \frac{L_d}{L_q} \omega_e i_d + \frac{\omega_e \psi_f}{L_q} - k_2 (i_q - i_q^*) - \alpha_2 \text{sgns}_2 - \beta_2 s_2) L_q \end{cases} \quad (10)$$

采用指数趋近律,可确保系统滑模的存在性和可达性,实现滑模运动。当满足 $s_1 = s_2 = \dot{s}_1 = \dot{s}_2 = 0$ 时,系统运动状态到达切换面上,则可保证电机的 $d-q$ 轴电流能够以很好的动态性能跟踪给定值。

2.3 开关函数选择

为了进一步削弱滑模变结构控制系统的抖振,采用式(11)的开关函数。其中 λ_1 、 λ_2 均为正数,其值选取过小则减抖效果不显著;选取过大则不利于系统正常运行段的动态品质,减缓响应速度。

$$\text{sgns}_i = \begin{cases} 1 & s_i > \lambda_i \\ \frac{s_i}{\lambda_i} & \lambda_i \geq |s_i| \quad i = 1, 2 \\ -1 & -\lambda_i > s_i \end{cases} \quad (11)$$

3 PMSM 控制框图

根据矢量控制的基本思想,通过坐标变换将定子电流分解成磁场电流分量和转矩电流分量。由

式(3)可知 d 轴给定参考电流为 0 ,此时电磁转矩与 q 轴电流呈线性关系。因此 ,文中采用 $i_d = 0$ 的转子磁链定向的控制方式 ,只要准确检测出转子的空间位置(d 轴位置) 控制逆变器使三相定子电流合成电流位于 q 轴 ,从而只要对定子电流幅值进行控制就能很好地控制电磁转矩。整个控制系统在 SVPWM 矢量控制中采用电流转速双闭环控制。由于转速环的响应速度相对于电流环响应速度慢很多 ,因此转速环仍采用传统的 PI 控制器 ,控制器输出作为 q 轴给定电流值。系统控制框图如图 1 所示。

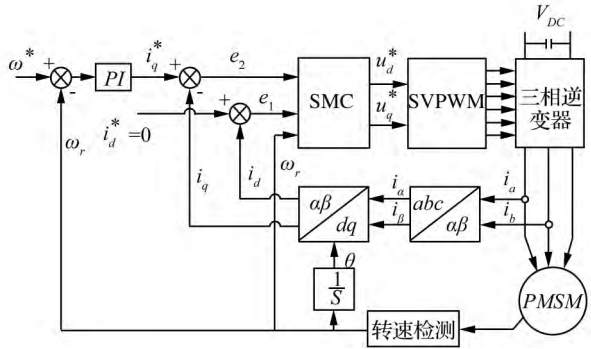


图 1 PMSM 系统控制框图

4 仿真分析

在 MATLAB/Simulink 环境下搭建电流转速双闭环 PMSM 矢量控制系统仿真模型 ,如图 2 所示。主要包括 PMSM 模块、SVPWM 模块、三相电压逆变器模块、坐标变换模块及滑模变结构电流控制器模块。

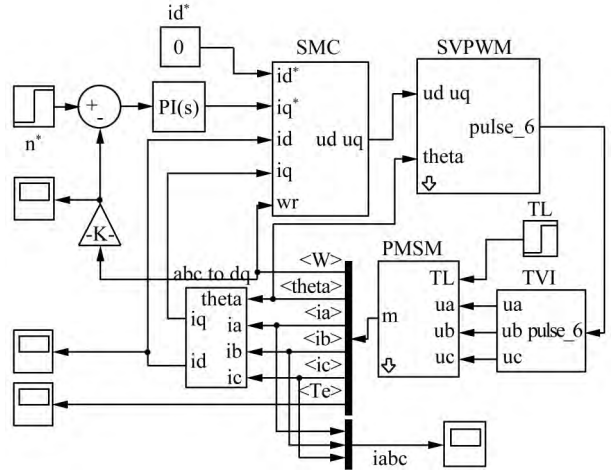
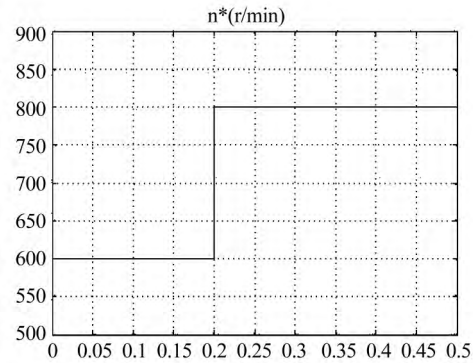
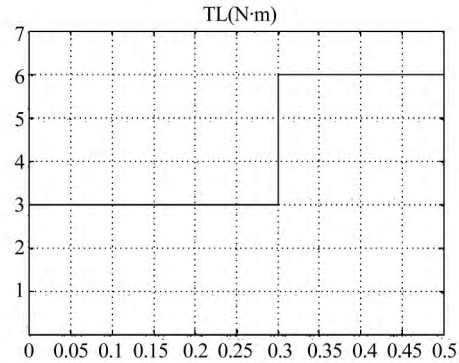


图 2 PMSM 控制系统仿真模型

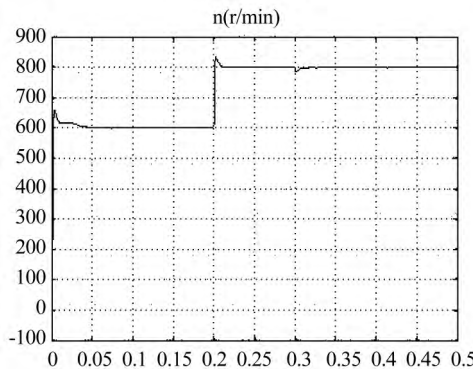
系统仿真参数如下: $L_d = L_q = 0.0085\text{H}$ 、 $P = 4$ 、 $R_s = 2.875\Omega$ 、 $J = 0.0008\text{kgm}^2$ 、 $\psi_f = 0.175\text{Wb}$ 、 $i_d^* = 0$ 。逆变器开关频率为 10kHz 转速设定为启动时为 600r/min 0.2s 升到 800r/min 。负载转矩设定为启动时为 $3\text{N}\cdot\text{m}$ 0.3s 跳变为 $6\text{N}\cdot\text{m}$ 。仿真结果如图 3 所示。可知 ,启动后转速在 0.0025s 达到给定值 ,超调量为 9.4% 。 0.2s 时转速由 600r/min 跳变为 800r/min ,在 0.0013s 内达到 800r/min ,超调量为 4.3% 。同时在负载转矩变化时定子电流、电磁转矩、 d 轴电流和转子转速都保持良好的稳定性 ,脉动较小。因此证明由于滑模变结构电流环的设计 ,使得 PMSM 矢量控制系统动态响应更快、稳定性和抗干



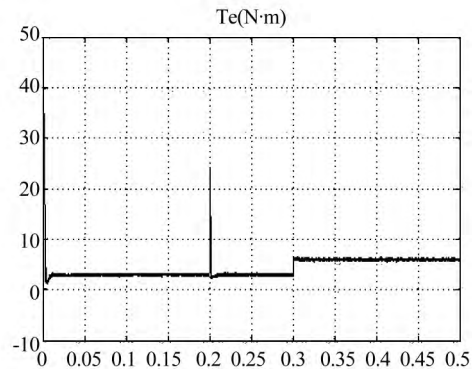
(a)给定转速



(b)给定负载



(c)转子转速



(d)电磁转矩

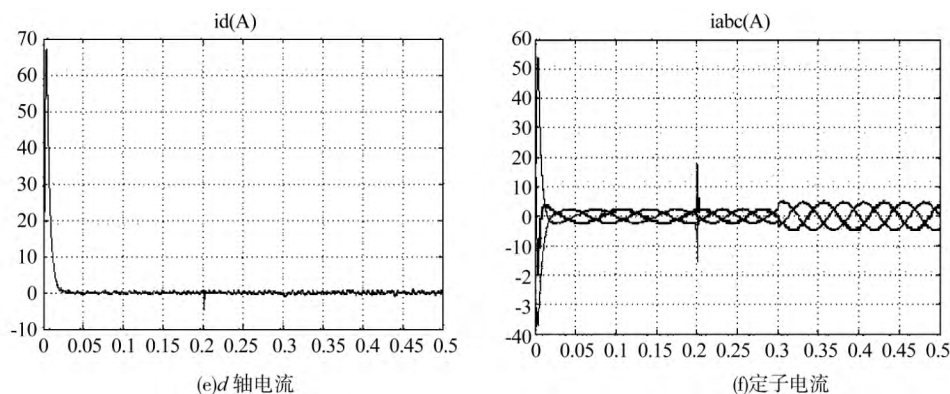


图3 仿真结果

抗能力更强 整个系统的鲁棒性得到了提高。

5 结束语

文中在分析滑模变结构控制理论的基础上,设计了电流环鲁棒控制器,取代了传统的电流PI控制器。并且在MATLAB/Simulink环境下搭建了整个PMSM控制系统仿真模型。通过仿真结果证明了该电流环鲁棒控制器使得系统在响应速度、稳定性、抗干扰能力方面都优于传统电流PI控制器,整个系统鲁棒性更强。为实际PMSM控制系统设计提供了参考。

参考文献:

- [1] Zhou Fu, Li Bei-zhi, Yang Jian-guo et al. A Sliding Model Speed/position Observer Integrated With a PI Controller for PM Synchronous Motors [J]. IEEE international Conference on Robotics and

Biomimetics, 2007: 15-18.

- [2] F.-J. Lim K.-K. Shyu, Y.-S. Lin. Variable Structure Adaptive Control for PM Synchronous Servo Motor Drive [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1998(146): 173-185.
[3] 王鑫,黄巍. 滑模变结构PI控制的PMSM伺服系统[J]. 伺服控制, 2011(1): 23-26.
[4] 刘婷婷,谭晓,吴刚等. 基于SVPWM的高转速永磁同步电机控制系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 11-14.
[5] 周中军,李华德,陈书锦,等. 永磁同步电机滑模变结构直接转矩控制研究[J]. 电气传动自动化, 2008, 30(1): 1-4.
[6] 周复. 高性能无传感器PMSMs控制系统的研究与应用[D]. 上海: 东华大学, 2009.
[7] 董宁. 自适应控制[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.
[8] 阮毅,陈伯时. 电力拖动自动控制系统——运动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

责任编辑: 么丽苹

(上接第200页)

过MPI编程在多个计算节点上建立多个进程读写地震勘探数据,创建计算线程对相关数据进行分析,得出包括信噪比等多个属性分析数据后统一存放在并行文件系统中结果文件当中。这一系统开发优化完善后很快在某企业得到了应用,通过统计实际生产效果可以得到如表2所示效率对比表。

表2 属性分析新方法实际生产效率对比表

计算内容	计算方式	数据大小	用时
40万面元 2个目的层	原有方式	1.7GB	约3小时
	单节点单线程		6分20秒
	单节点6线程		2分55秒
400万面元 2个目的层	原有方式	16GB	约33小时
	单节点单线程		68分
	单节点6线程		27分
33600炮全排列 2个目的层 (盐北1井)	原有方式	约2TB	100小时以上
	单节点单线程		约30小时
	单节点6线程		约12小时

通过这一对比可以发现,相对于过去MPI编程实现的系统效率,在改变并行计算机硬件环境的条件下,通过算法优化和并行计算模式转换,地震勘探大数据属性分析效率提升近10倍,这还是在只使用1个计算节点的情况下统计出的数据,如果进一步

利用集群中多个计算节点并行,效率将进一步提升。

4 结束语

通过以上系统研发过程不难发现,油气勘探地震数据应用目前明显有“大数据”化发展趋势。大数据应用的核心问题是应用系统软件的研发。大数据处理离不开多节点计算集群并行计算的辅助,混合使用多种算法并行化开发方式才能充分应用现有计算资源,提升处理效率,使得大数据应用成为可能。另一方面,只有能够分析出有用信息的大数据对企业而言才是具备处理价值的数据,因此必要的的数据预处理、筛选和抽样工作必须根据实际工作的需要适度开展。只有开发出适用与现实企业工作状况的数据处理平台,大数据才能发挥它应有的作用。

参考文献:

- [1] 钟瑛,张恒山. 大数据的缘起、冲击及其应对[J]. 现代传播: 中国传媒大学学报, 2013(7): 104-109.
[2] 陆基孟. 地震勘探原理[M]. 东营: 石油大学出版社, 1993.
[3] 祝树云,朱旭光,颜冬莲,等. 应用并行计算机框架提升地震数据处理效率分析[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(3): 493-499.
[4] 贺春光,王英华,栾伟. 地球物理勘探海量地震数据高效操纵技术[J]. 石油工业计算机应用, 2011(2): 25-27.
[5] 何冬梅,陈清凉,何源鑫. Windows多线程编程体验[J]. 福建电脑, 2008, 24(5): 177-178.

责任编辑: 薛慧心