

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20160106

基于终端滑模的永磁同步电机磁场定向控制

侯 勇, 陈少东, 毛润华, 马兴智

(天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

摘 要: 在永磁同步电机磁场定向控制策略中,常采用传统的 PI 调节器实现转速环和电流环的控制,存在着抗干扰能力弱、鲁棒性差等问题.针对此问题,将终端滑模控制方法应用于永磁同步电机的磁场定向矢量控制,结合终端滑模理论和永磁同步电机的数学模型,提出一种速度环和 i_q 环联合控制方法.该方法既提高了系统控制性能,又减少了控制器的数量.通过仿真实验验证了该控制策略的有效性.

关键词: 永磁同步电机; 磁场定向控制; 终端滑模

中图分类号: TM714

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2017)04-0067-04

Field-oriented Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Terminal Sliding Mode

HOU Yong, CHEN Shaodong, MAO Runhua, MA Xingzhi

(College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: In the field-oriented control of permanent magnet synchronous motor (PMSM), conventional PI regulators are often used to realize the control of speed loop and current loop, which have some shortcomings such as weak anti-interference ability and poor robustness. In this research, the terminal sliding mode control method is applied to PMSM field-oriented vector control. Combining the terminal sliding mode theory with the PMSM mathematical model, a joint control method for both speed loop and i_q loop is proposed, which can improve the system control performance and reduce the number of the controllers. The effectiveness of the proposed control strategy is verified by matlab/simulink simulation.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); field-oriented control; terminal sliding mode

永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM) 具有结构简单、运行可靠、转矩/质量比高、高效节能等一系列优点,被广泛地应用于国防、工农业生产和日常生活等诸多领域.根据永磁同步电机的基本原理,系统调速主要是针对定子电流的调节与控制,包括电流的幅值、频率和相位.当前,常见的永磁同步电机的控制策略有磁场定向矢量控制^[1]和直接转矩控制^[2],传统的方法是采用 PI 控制器实现转速和电流的跟踪控制.永磁同步电机是一个典型的多变量、强耦合、非线性的系统,PI 控制虽简单易行,并可以在一定程度上满足系统控制要求,但对系统模型的依赖性较强,当系统受到外部扰动或出现参数摄动时,难以达到高精度的控制效果,系统的

鲁棒性较差.目前出现了许多可以提高系统的鲁棒性和动态性能的改进控制方法,如自适应控制、模糊控制、神经网络、自抗扰控制等^[3].其中,滑模变结构控制 (SMC) 对系统数学模型精度要求不高,对系统参数摄动、外部扰动具有强鲁棒性,因而被大量地应用于永磁同步电机的控制中^[4-7].常用的滑模变结构控制方法采用线性的滑模面函数,系统状态与给定值之间的偏差是渐近收敛的,状态到达平衡点的时间是无限的.终端滑模变结构控制方法^[8]在滑模面函数中引入一个适当的非线性项,可使系统状态在有限的时间内收敛为给定值,稳态跟踪精度高.文献[9]—文献[13]将终端滑模变结构控制应用于永磁同步电机的控制,取得了良好的控制效果.

收稿日期: 2016-03-24; 修回日期: 2017-03-02

基金项目: 天津市大学生创新创业训练计划项目 (201410057143)

作者简介: 侯 勇 (1965—), 男, 吉林人, 教授, houyong@tust.edu.cn

本文提出一种基于终端滑模控制的永磁同步电机磁场定向控制方法,针对永磁同步电机矢量控制策略中的速度环设计了终端滑模控制器,并结合转子同步旋转 dq 坐标系统下的永磁同步电机模型,将 q 轴定子电流的控制综合到转速控制器中,在电流控制中仅需一个独立的 d 轴电流控制器,不仅提高了系统控制性能,而且简化了系统的控制过程。

1 永磁同步电机磁场定向数学模型

首先,对永磁同步电机进行如下假设:

- (1) 反电动势的波形为正弦波;
- (2) 定子电流为三相对称的正弦波电流;
- (3) 忽略磁路的饱和效应及电机的铁损耗;
- (4) 无阻尼绕组。

在永磁同步电机磁场定向控制理论中,选择与转子同步旋转的两相坐标系统(dq 坐标系统),且 d 轴与电机转子永磁体基波磁场的轴线方向一致,则永磁同步电机在转子同步旋转坐标系统中的数学模型为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \dot{i}_d - \omega L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \dot{i}_q + \omega L_d i_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

选择表面式 PMSM,有 $L_d = L_q = L$,转矩方程为

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

机械运动方程为

$$\dot{\omega} = \frac{n_p}{J} (T_e - T_L) \quad (3)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为定子 d 、 q 轴电压, V; i_d 、 i_q 分别为定子 d 、 q 轴电流, A; L_d 、 L_q 分别为定子 d 、 q 轴电感, H; R 为定子电阻, Ω ; ψ_f 为永磁体磁链, Wb; ω 为转子电角速度, rad/s; T_e 、 T_L 分别为电磁转矩和负载转矩, N·m; J 为转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$; n_p 为电机的极对数。

2 基于终端滑模的系统矢量控制策略

2.1 终端滑模控制^[8]

设计终端滑模面为

$$s = \dot{x} + \beta x^{q/p} = 0 \quad (4)$$

式中: x 为系统状态; 参数 $\beta > 0$; p 、 q 均为正奇数, 且有 $q < p < 2q$ 。

由式(4)解得

$$\frac{p}{p-q} [x(t)^{(p-q)/p} - x(0)^{(p-q)/p}] = -\beta t$$

从初始状态 $x(0) \neq 0$ 收敛到 $x = 0$ 的时间为

$$t_s = \frac{p}{\beta(p-q)} |x(0)|^{(p-q)/p}$$

由此可见,终端滑模控制可使系统状态在有限的时间内收敛到零,克服了线性滑模下状态渐进收敛的缺点,优化了系统的动态性能,具有响应速度快、跟踪精度高等优点。

2.2 系统控制策略

通常永磁同步电机的磁场定向矢量控制策略涉及 2 个控制环和 3 个控制器。外环为转速控制环,对应转速控制器;内环为电流控制环,对应 i_d 和 i_q 控制器。常规控制策略中,3 个控制器均采用 PI 控制器,难以满足高精度控制系统的要求。本文将终端滑模控制方法与磁场定向控制理论相结合,设计了新的永磁同步电机控制策略。

系统控制首先考虑对转速进行目标值跟踪控制,为此针对转速外环设计了终端滑模控制器。选择速度偏差作为系统的状态变量,即

$$e = \omega^* - \omega$$

式中: ω^* 为速度给定值,由式(3)可得

$$\dot{e} = \dot{\omega}^* - \dot{\omega} = \dot{\omega}^* - \frac{n_p}{J} (T_e - T_L) \quad (5)$$

按照式(4)及其参数要求,取终端滑模面函数为

$$s = \dot{e} + \beta e^{q/p} \quad (6)$$

为减小滑模控制中的抖振,选择指数趋近律的滑模控制方式^[14-15],即令

$$\dot{s} = -\varepsilon \text{sgn } s - ks \quad \varepsilon > 0, k > 0 \quad (7)$$

由式(6)可得

$$\dot{s} = \ddot{e} + \beta(q/p) e^{q/p-1} \dot{e} \quad (8)$$

由式(2)、式(5)可得

$$\ddot{e} = \dot{\omega}^* - \frac{n_p}{J} \frac{3}{2} n_p \psi_f \dot{i}_q + \frac{n_p}{J} \dot{T}_L \quad (9)$$

联立式(1)、(7)、(8)、(9),并忽略速度参考值瞬时突变和负载转矩扰动的影响,可得

$$u_q = Ri_q + \omega L_d i_d + \omega \psi_f + \frac{2JL_q}{3n_p^2 \psi_f} [\beta(q/p) e^{q/p-1} \dot{e} + \varepsilon \text{sgn } s + ks] \quad (10)$$

式(10)即为速度环的终端滑模控制器计算公

式. 该式除了实现系统转速的跟踪控制, 同时包含了传统矢量控制策略中定子 q 轴电流控制, 即通过该速度控制器直接得到系统的 q 轴电压参考值 u_q , 减少了控制器的数量, 使控制过程得以一定程度的简化.

针对 d 轴电流的控制, 本文仍采用传统的 PI 控制器. 图 1 为 $i_d = 0$ 模式的基于终端滑模控制器的 PMSM 矢量控制框图.

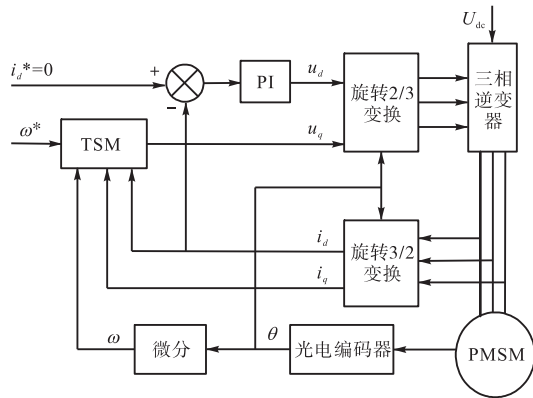


图 1 系统控制框图

Fig. 1 System control diagram

3 仿真分析

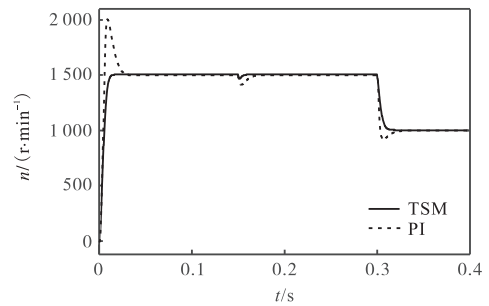
利用 Matlab/Simulink 仿真工具对本文于终端滑模的永磁同步电机矢量控制策略进行仿真, 并与传统的 PI 控制方法进行对比.

仿真中, 永磁同步电机的参数选择为: $R = 2.875 \Omega$, $L_d = L_q = 0.0085 \text{ H}$, $\psi_f = 0.175 \text{ Wb}$, $n_p = 2$; 供电逆变器的直流侧电压 $U_{dc} = 600 \text{ V}$, 开关频率为 5 kHz ; 终端滑模控制器的参数设置为: $q = 5$, $p = 7$, $\varepsilon = 50$, $k = 300$, $\beta = 1800$.

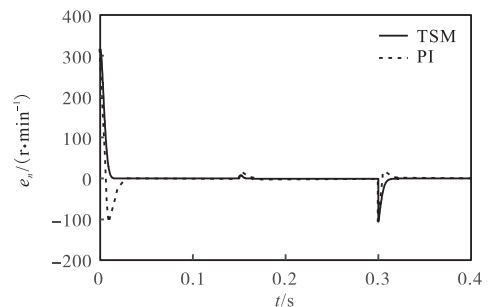
假定转速的初始参考值为 1500 r/min , 负载转矩为 $T_L = 5 \text{ N}\cdot\text{m}$; 在 0.15 s 时负载突变为 $T_L = 10 \text{ N}\cdot\text{m}$; 在 0.3 s 时转速参考值变为 1000 r/min .

仿真结果见图 2, 图中“PI”和“TSM”分别代表 PI 控制器和终端滑模控制器.

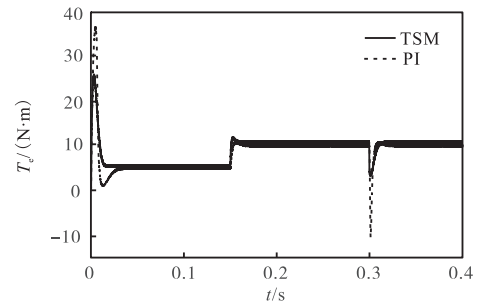
由仿真结果可以看出: 与传统的 PI 控制策略相比, 终端滑模控制的起动过程中转速无超调且起动时间较短; 负载转矩变化引起的转速和电磁转矩的变动波动较小且动态过程较短; 给定转速变化时, 可使转速快速平稳地过渡到新的给定值, 带来的转矩波动也较小. 本文提出的基于终端滑模的永磁同步电机磁场定向矢量控制方法具有更好的动态性能, 改进效果明显.



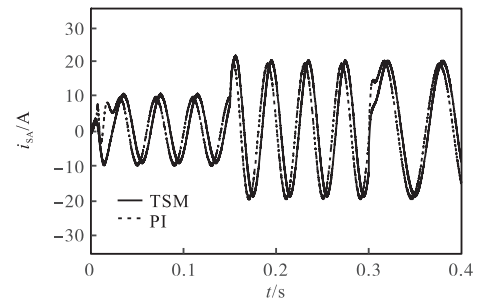
(a) 转速



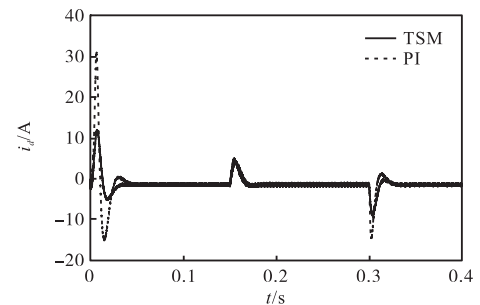
(b) 转速误差响应



(c) 电磁转矩



(d) A 相定子电流



(e) d 轴定子电流

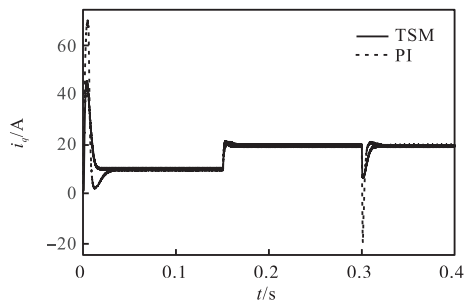
(f) q 轴定子电流

图2 仿真结果

Fig. 2 Simulation results

4 结 语

本文在传统的永磁同步电机磁场定向控制策略基础上,针对速度控制环设计了一种基于终端滑模的控制器,实现了对系统速度的快速准确跟踪控制;并且,根据永磁同步电机在转子同步旋转坐标系下的状态模型,将传统矢量控制策略中的 q 轴电流控制整合到速度控制环节中,实现转速和 q 轴电流的一次性综合控制,而仅对 d 轴电流实施独立控制,简化了控制过程.仿真结果表明:该控制策略相对于传统的PI控制方法,转速调节响应速度快、无超调、精度高,具有良好的系统稳定性.

参考文献:

- [1] 余佩倡,吴峻,周文武. 永磁同步电机矢量控制系统设计[J]. 电力电子技术,2011,45(11):105-107.
- [2] 孟高军. 永磁同步电机直接转矩控制的综述[J]. 电工电气,2012(5):1-3.
- [3] 许峻峰,冯江华,许建平. 永磁同步电动机控制策略综述[J]. 机车电传动,2005(3):7-11.
- [4] 王志宇,王长松,范普成,等. 基于滑模变结构的永磁同步电机调速系统设计[J]. 微电机,2011,44(6):52-56.
- [5] 李政,胡广大,崔家瑞,等. 永磁同步电机调速系统的积分型滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报,2014,34(3):431-437.
- [6] 赵越,刘斌. 基于滑模变结构控制的永磁同步电机矢量控制[J]. 微电机,2016,49(11):76-80.
- [7] 朱儒,刘鲲鹏,赵志锋,等. 永磁同步电机滑模控制研究[J]. 微电机,2014,47(12):52-55.
- [8] Zak M. Terminal attractors for addressable memory in neural networks[J]. Physics Letter A,1988,33(1/2):18-22.
- [9] 张袅娜,许祥军,林晓梅. 基于二阶滑模的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 微电机,2010,43(10):33-35.
- [10] 郑剑飞,冯勇,陆启良. 永磁同步电机的高阶终端滑模控制方法[J]. 控制理论与应用,2009,26(6):697-700.
- [11] 童灵华. 永磁同步电机快速高阶终端滑模控制[J]. 电机与控制应用,2016,43(12):1-5.
- [12] 雷晓彝,陈卓,熊攀,等. 基于模糊动态 Terminal 滑模的永磁同步电机控制研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2012,13(4):6-10.
- [13] 雷晓彝,谭海军,陈卓,等. 永磁同步电机调速系统的全局快速终端滑模控制[J]. 微电机,2013,46(11):38-41.
- [14] 姚琼荃,黄继起,吴汉松. 变结构控制系统[M]. 重庆:重庆大学出版社,1997.
- [15] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京:科学出版社,1998.

责任编辑:常涛