

永磁同步电机分数阶与滑模变结构复合控制研究

续丹, 雒焕强, 房念兴, 曹秉刚

(西安交通大学电动汽车与系统控制研究所, 710049, 西安)

摘要: 针对永磁同步电机矢量控制系统的速度环,通过引入分数阶微积分及滑模变结构控制理论,设计了一种分数阶与滑模变结构复合控制器.该复合控制器通过一个可变的加权因子 α 将分数阶 $PI^{\lambda}D^{\mu}$ 与滑模变结构控制有效、协调地组合起来,从而达到了既克服滑模变结构在滑动平面原点附近产生高频颤动的缺点,又拓宽了相对于传统比例-积分-微分(PID)控制器的调节范围,使得永磁同步电机控制系统的鲁棒性、快速性、稳定性和抗干扰能力得以提高,对于采用多种复合交叉控制方法来改善电动机控制系统具有参考意义.

关键词: 永磁同步电机;分数阶微积分;滑模变结构;复合控制

中图分类号: TM35 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)05-0132-05

Hybrid Control of Fractional Order and Sliding-Mode Variable Structure in Permanent Magnet Synchronous Motor

XU Dan, LUO Huanqiang, FANG Nianxing, CAO Binggang

(Institute for Electric Vehicle and System Control, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: For the speed loop of a permanent magnet synchronous motor (PMSM), fractional calculus and the sliding-mode variable structure control theory were employed to design the hybrid controller which integrates a fractional order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller with a sliding-mode variable structure controller. The fractional order $PI^{\lambda}D^{\mu}$ and sliding-mode variable structure control are effectively combined by using the variable weighted factor α . The hybrid controller not only overcomes the high-frequency quiver near the origin of the sliding plane but also broadens the scope of adjustment of conventional PID controllers, leading to higher robustness, anti-jamming capability, good rapidity and stability of PMSM. The results of this study may be beneficial to the improvement of complex cross-control methods in motor control systems.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; fractional calculus; sliding-mode variable structure; complex controller

永磁同步电机(PMSM)结构简单、体积小、重量轻,并具有功率密度、效率和功率因数高等特点.20世纪70年代初,德国学者 Blaschke 等人提出了矢量控制原理,利用它可使永磁同步电机获得与直流电机相媲美的动、静态性能,而且大大简化了交流电机控制的复杂度.永磁同步电机已广泛应用于工业自动化、数控机床、机器人、航空航天以及电动汽车等领域^[1].

永磁同步电机的调节器大都采用常规的比例-积分-微分(PID)控制,该控制简单,稳定性好,但是系统的响应速度和抗负载扰动能力较差.滑模变结构是面向控制系统的综合方法,能够组合每个结构的有用性质,还使得系统具备新的性质^[2].滑模变结构对控制系统数学模型的精度要求不高,滑动模态可以设计.在进入预先设定的滑模面之后,系统对参数的变化和外界的扰动不敏感,且具有鲁棒性强、响

应速度快、无超调等特性^[3].滑模变结构控制的突出缺点是,系统在滑模平面原点附近会产生高频颤动^[4],这在实际应用中是不允许的.

分数阶微积分是研究任意实数阶微积分的基础,是整数阶微积分的自然延续和推广.随着计算机技术的飞速发展,分数阶微积分研究逐步从理论层面进入到应用层面,其在动力学和控制方面的应用包括:CRONE 控制^[5],分数阶系统的稳定性、可控性、可观性分析^[6],分数阶系统的分数阶 $PF^{\lambda}\mathcal{D}^{\mu}$ 控制器的设计^[7-9].分数阶 $PF^{\lambda}\mathcal{D}^{\mu}$ 控制器是传统 PID 控制器的一般形式.

复合控制是一种新型的控制方法,其在宏观层面将 2 种或多种控制策略有效地组合起来,即根据具体的要求、利用相应的手段,充分发挥了各个控制策略的优势,使得控制器具有更优的控制效果.

1 PMSM 矢量控制

1.1 PMSM 数学模型

假设磁路不饱和,且不计磁滞和涡流损耗影响,在空间磁场呈正弦分布的条件下,隐极式永磁同步电机($L_d=L_q=L$)在 d 、 q 轴上的状态方程^[10]为

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & p_n \omega_r & 0 \\ -p_n \omega_r & -R/L & -p_n \varphi_f/L \\ 0 & \frac{3}{2} p_n \varphi_f/J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_d/L \\ u_q/L \\ -T_L/J \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: R 为绕组等效电阻; L 为等效轴电感; p_n 为极对数; ω_r 为转子角速度; φ_f 为转子磁场的等效磁链; T_L 为负载转矩; i_d 为 d 轴电流; i_q 为 q 轴电流; J 为转动惯量.

采用 $i_d=0$ 的矢量控制方式获得的线性解耦状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & -p_n \varphi_f/L \\ \frac{3}{2} p_n \varphi_f/J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_q/L \\ -T_L/J \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.2 PMSM 矢量控制系统

一般情况下,PMSM 矢量控制系统采用电流、速度双闭环控制,首先将采集到的电机三相电流通过坐标变换得到旋转坐标系下的 i_q 、 i_d ,再将电机实际转速和给定转速进行比较得到 i_q 的修正值,修正

后的实际转速和给定转速经过 3 个 PI 模块得到旋转坐标下的 u_q 、 u_d ,再由坐标变换和 SVPWM 模块便可输出 6 路 PWM 波,这样通过控制三相逆变器的选通可以达到控制电机的目的.控制系统原理框图如图 1 所示.

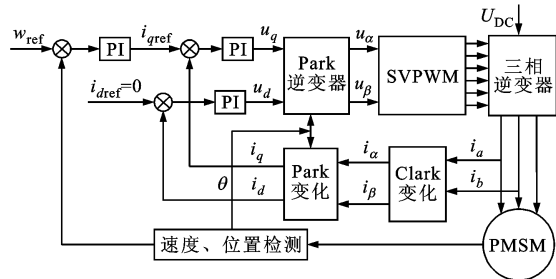


图 1 基于常规 PID 的 PMSM 矢量控制系统原理框图

2 复合控制器设计

2.1 分数阶 $PF^{\lambda}\mathcal{D}^{\mu}$ 控制

利用分数阶微积分理论设计的控制器称为分数阶控制器,分数阶控制器的控制对象可以是整数阶系统,也可以是分数阶系统.与整数阶 PID 控制器相似,分数阶 $PF^{\lambda}\mathcal{D}^{\mu}$ 控制器的传递函数为

$$G_{fc}(s) = K_P + K_I s^{-\lambda} + K_D s^{\mu} \quad (3)$$

由式(1)可知:当 $\lambda=0$ 、 $\mu=0$ 时, $G_{fc}(s)=K_P$ 为整数阶 P 控制器;当 $\lambda=0$ 、 $\mu=1$ 时, $G_{fc}(s)=K_P+K_D s$ 为整数阶 PD 控制器;当 $\lambda=1$ 、 $\mu=0$ 时, $G_{fc}(s)=K_P+K_I s^{-1}$ 为整数阶 PI 控制器;当 $\lambda=1$ 、 $\mu=1$ 时, $G_{fc}(s)=K_P+K_I s^{-1}+K_D s$ 为整数阶 PID 控制器.分数阶 $PF^{\lambda}\mathcal{D}^{\mu}$ 控制器比传统整数阶 PID 控制器多出了 2 个任意实数的参量 λ 、 μ ,如图 2 所示.假设 $0<\lambda\leq 1$, $0<\mu\leq 1$,则控制器的阶次 λ 和 μ 可以在图 2 中的阴影区域内任意取值,分数阶 $PF^{\lambda}\mathcal{D}^{\mu}$ 控制器分布扩展为面域,从而控制器的调节范围更广,适应性更好.已有实验证明,分数阶 $PF^{\lambda}\mathcal{D}^{\mu}$ 控制器的控制效果优于传统整数阶 PID 控制器^[11].

分数阶 $PF^{\lambda}\mathcal{D}^{\mu}$ 控制器和整数阶 PID 控制器在频域中的特性研究相同且比较简单,而分数阶 $PF^{\lambda}\mathcal{D}^{\mu}$ 控制器时域的数字实现很困难.分数阶控制器的数

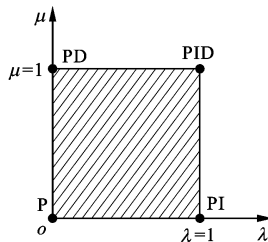


图 2 按微积分阶次划分的控制器分量

字实现方法分为解析法和数值法^[10],解析法用于理论推导和证明,数值法用于实际应用研究.本文采用Tustin+CFE数字实现法,即利用Tustin算子生成函数将分数微积分由复频域变换到Z域,然后用连分式展开式近似展开,从而获得分数阶控制器的时域离散近似传递函数.该方法优于Grunwald-Letnikov微积分定义实现的短记忆数字实现法,已得到实验验证^[12].

2.2 滑模变结构控制

滑模变结构控制本质上是一种非线性控制,它可以根据当前的状态有目的地不断变化,迫使系统按规定的滑动模态轨迹运动.滑模变结构控制器的设计主要是针对切换函数和滑模控制律设计的.以PMSM矢量控制系统的速度环为例,选取状态变量 $x_1 = \omega_e = \omega_{\text{ref}} - \omega$, $x_2 = \dot{x}_1$ 作为速度滑模变结构调节器的输入, i_{qref} 作为调节器的输出.由PMSM的线性解耦状态方程推出的滑模状态方程为

$$x_2 = \dot{x}_1 = Ax_1 + bf + h \quad (4)$$

式中

$$A = \frac{B}{J}; \quad b = -\frac{1.5p_n\Psi_r}{J}; \quad h = \frac{B}{J}\omega_{\text{ref}} + \frac{T_L}{J}$$

其中: B 为黏滞系数; Ψ_r 为转子磁链.

(1)切换函数.在满足了滑模控制律的基本条件下,选择简单、合适的实系数单值连续函数对速度调节器进行一阶建模,为了省去所需的加速度信号,在 x_1 的积分项中引入滑模切换函数,即

$$S(x) = c \int_0^t x_1 d\tau + x_1 \quad (5)$$

式中: c 为正常数. c 值的大小影响着系统速度响应趋于稳定的快慢, c 值越大,趋于稳定的时间越短,反之则越长.具体设置还需根据具体情况来定.

(2)滑模控制律.为了使系统在有限的时间内到达并保持在滑动模态切换面上,本文选择了函数切换控制的变结构控制方案,切换函数为 $f = f_{\text{eq}} + f_{\text{sw}}$,其中 f_{eq} 为滑模等效控制部分, f_{sw} 为滑模切换部分, f_{sw} 通过高频切换控制可使系统状态走向滑模线并稳定下来. $f_{\text{sw}} = k \text{sign}S$,其中 k 为正实数,是滑模切换控制增益, $\text{sign}S$ 为符号函数.滑模变结构控制器的控制律函数为

$$f = -\frac{1}{b}(c + A)x_1 + k \text{sign}S \quad (6)$$

2.3 复合控制器的实现

本文设计的复合控制器是,利用可变加权因子 α ($0 \leq \alpha \leq 1$)将分数阶 $\text{PI}^\lambda\text{D}^\mu$ 调节器和滑模变结构调节器有效地组合起来.复合控制器结构如图3所示.

当控制系统的速度误差信号的绝对值大于速度误差信号的给定值0.3(本文给定的0.3是经过多次调试后得到的,实际系统中则需根据工况测试后来定)时,复合控制器中滑模变结构控制起主导作用,可实现快速跟踪响应,加快电机的速度响应;当速度误差信号的绝对值小于速度误差信号的给定值0.3时,复合控制器中分数阶 $\text{PI}^\lambda\text{D}^\mu$ 控制起主导作用,可实现无超调、无静差,并克服了滑模平面原点附近的高频颤动.此外,当 $\alpha = 0$ 或 $\alpha = 1$ 时,2种控制器处于独立工作状态,分数阶 $\text{PI}^\lambda\text{D}^\mu$ 与滑模变结构复合控制方法兼备了分数阶 $\text{PI}^\lambda\text{D}^\mu$ 和滑模变结构控制器二者的优点,同时分数阶 $\text{PI}^\lambda\text{D}^\mu$ 控制相对于传统PID控制,控制范围得以拓宽,从而可以更灵活地匹配滑模变结构控制来实现对永磁同步电机的更优控制.

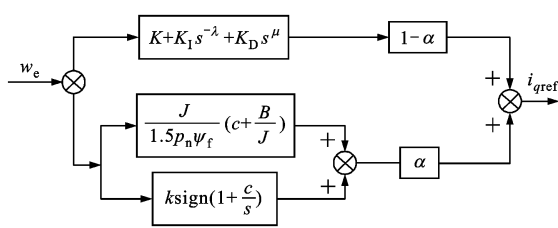


图3 复合控制器结构

3 仿真分析

3.1 仿真实现

控制系统的仿真模型如图4所示,仿真条件:永磁同步电机极对数 $p_n = 4$,定子电阻 $R_s = 2.875 \Omega$, d 轴电感 L_d 等于 q 轴电感 L_q ,即 $L_d = L_q = 0.0085 \text{ H}$,磁通量 $W_f = 0.175 \text{ Wb}$,转动惯量 $J = 0.001 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,IGBT的开关频率为 10 kHz ,速度 $\omega_{\text{ref}} = 300 \text{ rad/s}$,初始负载 $T_m = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$, $t = 0.03 \text{ s}$ 时负载 $T_m = 10 \text{ N} \cdot \text{m}$.

速度环复合控制器仿真模型如图5所示.该模型通过加权因子 α 对速度误差信号的判断,来决定采用何种控制方式.

3.2 仿真结果

为了分析复合控制器的控制策略对系统产生的影响,首先对传统整数阶PID进行了仿真. $K_P = 50$ 、 $K_I = 2.5$ 、 $K_D = 0$ 下整数阶PID转速仿真波形如图6所示.在复合控制中,分数阶控制器选用近似的微积分模型阶次为9, K_P 、 K_I 、 K_D 不变, $\lambda = -0.5$.滑模变结构控制器中 $c = 800$ 、 $k = 10$,此种情况下系统转速仿真波形如图7所示.复合控制器转速仿真波形如图8所示.

- chronous motor for traction applications of electric [C]//Electric Machines and Drives Conference. Madison, Wisconsin, USA; IEEE Co-Sponsoring Technical Societies, 2003; 1035-1041.
- [2] CHEN Yaguang, ZHAO Shuangyuan. An application of variable structure control of sliding mode to the speed adjustment system PMSM [J]. Journal of Benxi College of Metallurgy, 2002, 4(4): 28.
- [3] VACLIM I U. Variable structure system with sliding modes [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1977, 22(2): 857-860.
- [4] 赵金, 王离九, 万淑芸, 等. 高性能交流伺服系统的一种新型控制策略 [J]. 电气传动, 1994(4):13-15.
ZHAO Jin, WANG Lijiu, WAN Shuyun, et al. A new type of control strategy about high-performance AC servo system [J]. Electric Transmission, 1994 (4):13-15.
- [5] OUSTALOUP A, MOREAU X, NOUILLANT M. The CRONE suspension [J]. Control Engineering Practice, 1996, 4(8): 1101-1108.
- [6] MATIGNON M. Stability results for fractional differential equations with applications to control processing [C]//Computational Engineering in Systems and Application Conference. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 1996; 952-968.
- [7] PODLUBNY I. Fractional-order systems and PID^{*}-controllers [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1999, 44(1): 208-214.
- [8] PODLUBNY I. Fractional differential equations [M]. San Diego, USA: Academic Press, 1999.
- [9] 薛定宇, 赵春娜. 分数阶系统的分数阶 PID 控制器设计 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24(5): 771-776.
XUE Dingyu, ZHAO Chunna. Fractional order PID controller design for fractional order system [J]. Control Theory and Applications, 2007, 24(5): 771-776.
- [10] CHEN Y Q, VINAGRE B M, Podlubny I. Continued fraction expansion approaches to discretizing fractional order derivatives: an expository review [J]. Nonlinear Dynamics, 2004, 38(1/2): 1680-1685.
- [11] MORIMOTO S, KAWAMOTO K, SANADA M, et al. Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2002, 38 (4): 1054-1061.
- [12] CAO Junyi, CAO Binggang. Digital realization and characteristics of fractional order controllers [J]. Control Theory and Applications, 2006, 23(5): 792-793.
- [本刊相关文献链接]
- 永磁同步电机的改进扩展卡尔曼滤波测速算法. 2011, 45 (10):59-64.
- 采用有向电气介数的脆弱线路选取. 2011, 45(6):91-96.
- 免疫单神经元 PID 控制在永磁交流伺服系统中的应用. 2010, 44(4):76-82.
- 求解大型电力系统机电振荡模态的逆幂方法. 2010, 44 (10):93-98.
- 具有模态解耦构型的纵弯直线超声电机. 2010, 44(8):101-105.
- 可控磁悬浮系统的转子周期性振动抑制. 2010, 44(7):55-58.
- 关节片上位置伺服系统控制器的实现. 2010, 44(7):70-74.
- 一种无速度传感器的双馈风力发电机滞环矢量控制策略. 2010, 44(6):109-113.
- 互感耦合开关磁阻电机的等效磁路模型与有限元分析. 2010, 44(4):71-75.
- 交流伺服系统脉冲序列位置控制研究. 2009, 43(12):35-39.
- 具有低通滤波的改进电压型磁链观测器. 2009, 43(9):91-95.
- 变速恒频双馈感应电机系统中的低频振荡现象分析. 2009, 43(8):95-100.
- 永磁同步电机的非线性自适应解耦控制. 2009, 43(8):101-106.
- 电动汽车用感应电机弱磁区电磁转矩最大化控制. 2009, 43 (4):62-65.
- 无刷直流电机驱动控制容错方案研究. 2009, 43(2):53-57.
- 基于自适应解列的电力系统解列面快速搜索. 2009, 43(2): 90-95.
- 具有低通滤波的改进电压型磁链观测器. 2009, 43(12):91-95.
- e 型电子枪中非均匀磁场偏转系统的聚焦特性研究. 2009, 43(12):111-114.
- 永磁同步电机的非线性自适应解耦控制. 2009, 43(8):101-106.
- 一种有效的低场磁共振系统的水脂分离成像方法. 2009, 43 (6):52-56.
- 采用绕组变换的双三相永磁同步电动机建模研究. 2008, 42 (10):1275-1279.
- 一种永磁直线电机的永磁体阵列设计. 2007, 41(3):353-357.

(编辑 苗凌)