

基于滑模变结构控制的内置式永磁同步电机 无位置传感器矢量控制

张伯泽, 宗剑, 钱平

(上海应用技术大学 电气与电子工程学院, 上海 201418)

摘要: 对一种基于滑模变结构控制(SMVSC)的内置式永磁同步电机(IPMSM)无位置传感器矢量控制策略进行了研究。针对 SMVSC 中固有的抖动问题,对其产生的机理进行了详细的分析与研究,用一种饱和函数代替符号函数进行改进,以降低符号函数的不连续性,同时将饱和函数的边界层厚度参数设置为一变量,进行自适应调节,通过调节边界层厚度函数值,减慢状态变量趋于滑模切换面的速度,以减小抖振。仿真结果表明:所研究的控制策略具有良好的动态响应和稳态响应,获得了精确的转子估算位置和估算转速,系统具有较强的鲁棒性。

关键词: 内置式永磁同步电机; 滑模变结构控制; 无位置传感器控制; 矢量控制

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)08-0036-04

doi: 10.12177/emca.2020.083

IPMSM Sensorless Vector Control Based on SMVSC

ZHANG Boze, ZONG Jian, QIAN Ping

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: A sensorless vector control strategy of interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) based on sliding mode variable structure control (SMVSC) is studied. Aiming at the chattering problem of SMVSC, the generation mechanism is analyzed and studied in detail, then the saturation function is used to replace the sign function to decrease the discontinuity of sign function. At the same time, the border layer thickness parameter of the saturation function is set to be a self-adaptive variable, and the value of the border layer thickness is adjusted to slow the speed of state variables approaching sliding mode switching surface to decrease the chattering problem. The simulation results prove that the proposed control strategy is effective. It has excellent dynamic and static performances, the estimated position and speed have good precision, and the system has strong robustness.

Key words: interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM); sliding mode variable structure control (SMVSC); sensorless control; vector control

0 引言

随着永磁材料价格的不断降低,永磁同步电机(PMSM)得以突飞猛进的发展。PMSM 具有体积小、质量轻、功率密度大、功率因数高、效率高等优点^[1],广泛应用于电动汽车、航空航天、国防、家

电、机器人、医疗等领域。内置式永磁同步电机(IPMSM)是 PMSM 的一种,可实现高精度位置和转矩控制,且具有动态性能好、调速范围宽等调速性能。传统 IPMSM 有位置传感器调速控制,需要额外的安装空间,且需要电缆连接,导致有位置传感器调速系统存在成本高、可靠性低、不易维护等

收稿日期: 2020-04-17; 收到修改稿日期: 2020-06-17

作者简介: 张伯泽(1976—),男,博士,研究方向为电机驱动、开关电源、新能源发电与电动汽车充电技术。

宗剑(1973—),男,博士,副教授,研究方向为电机驱动、新能源发电与智能微电网、供配电安全与继电保护。

钱平(1960—),男,硕士,教授,研究方向为电机驱动、新能源发电、智能微电网与电动汽车充电技术。

缺点。

因此,研究开发 PMSM 无位置传感器控制技术成为一个热点。磁链观测器法^[2-3]对 PMSM 的转速或位置的估算具有计算量小、方法简单、易于实现的优点,但对电机参数的准确性要求较高;模型参考自适应法^[4-5]结构和算法简单,易于数字实现,但精度跟模型的选取有关;扩展卡尔曼滤波器法^[6]具有优化和自适应能力,可以削弱随机干扰和测量噪声的影响,但模型复杂、计算量大;高频信号注入法^[7-8]不依赖 PMSM 的基波方程,对电机的参数变化不敏感,在低速区优势明显,但随着转速的升高,高频噪声增加,高频激励的响应不易于提取,使转速和位置的估算困难。在这些控制方法中,滑模变结构控制^[9-12]以其对参数变化和干扰不敏感、鲁棒性好、动态响应快、易于物理实现等优点而受到重视,得以研究和发展。

本文首先分析了 IPMSM 的数学模型,然后研究了基于滑模变结构控制(SMVSC)的 IPMSM 无位置传感器矢量控制系统。针对 SMVSC 中固有的抖振问题,对其产生的机理进行了详细的分析与研究,运用饱和函数代替符号函数,进行改进以降低符号函数的不连续性,同时将饱和函数的边界层厚度参数设置为一变量,进行自适应调节,通过调节边界层厚度函数值,减慢状态变量趋于滑模切换面的速度,减小了抖振现象。仿真结果表明:本文提出的控制策略具有良好的动态响应和稳态响应,获得了精确的估算位置和估算转速,系统具有较强的鲁棒性。

1 IPMSM 数学模型

采用 Clarke 变换可得两相静止 α - β 坐标系下,IPMSM 的电压方程:

$$\begin{cases} u_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + L_{sd} \frac{di_{s\alpha}}{dt} + \omega_r (L_{sd} - L_{sq}) i_{s\beta} + e_{s\alpha} \\ u_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + L_{sq} \frac{di_{s\beta}}{dt} - \omega_r (L_{sd} - L_{sq}) i_{s\alpha} + e_{s\beta} \end{cases} \quad (1)$$

反电动势方程为

$$\begin{cases} e_{s\alpha} = -[(L_{sd} - L_{sq})(\omega_r i_{sd} - i_{sq}) + \omega_r \psi_f] \sin\theta_r \\ e_{s\beta} = [(L_{sd} - L_{sq})(\omega_r i_{sd} - i_{sq}) + \omega_r \psi_f] \cos\theta_r \end{cases} \quad (2)$$

整理式(1),可得 IPMSM 电流状态方程为

$$\begin{cases} \frac{di_{s\alpha}}{dt} \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} \end{cases} = \begin{bmatrix} -R_s/L_{sd} & -\omega_r(L_{sd} - L_{sq})/L_{sd} \\ \omega_r(L_{sd} - L_{sq})/L_{sq} & -R_s/L_{sq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1/L_{sd} & 0 \\ 0 & 1/L_{sq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{s\alpha} - e_{s\alpha} \\ u_{s\beta} - e_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

IPMSM 电磁转矩为

$$T_e = p_n (\psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (4)$$

式中: $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 为 α 、 β 轴上定子电压分量; R_s 为定子电阻; $i_{s\alpha}$ 、 $i_{s\beta}$ 为 α 、 β 轴上定子电流分量; L_{sd} 、 L_{sq} 为 d 、 q 轴电感; ω_r 为 IPMSM 转子电气角速度; $e_{s\alpha}$ 、 $e_{s\beta}$ 为 α 、 β 轴上定子反电动势分量; i_{sd} 、 i_{sq} 为 d 、 q 轴上定子电流分量; ψ_f 为转子永磁体产生的磁链; θ_r 为同步旋转坐标系 d 轴与两相静止坐标系 α 轴的夹角; p_n 为 IPMSM 电机极对数; $\psi_{s\alpha}$ 、 $\psi_{s\beta}$ 为 α 、 β 轴上定子磁链分量。

依据坐标变换功率不变原则,式(4)中电机极对数 p_n 前的系数为 1。

2 SMVSC 的 IPMSM 无位置传感器矢量控制及抖振问题

在 SMVSC 中,定义电流方程如下:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_{s\alpha}}{dt} = -\frac{R_s}{L_{sd}} \hat{i}_{s\alpha} + \frac{1}{L_{sd}} u_{s\alpha} - \frac{1}{L_{sd}} \text{sign}(\hat{i}_{s\alpha} - i_{s\alpha}) \\ \frac{d\hat{i}_{s\beta}}{dt} = -\frac{R_s}{L_{sq}} \hat{i}_{s\beta} + \frac{1}{L_{sq}} u_{s\beta} - \frac{1}{L_{sq}} \text{sign}(\hat{i}_{s\beta} - i_{s\beta}) \end{cases} \quad (5)$$

则由式(3)、式(5)可得 IPMSM 电流误差方程为

$$\begin{cases} \frac{d\bar{i}_{s\alpha}}{dt} = -\frac{R_s}{L_{sd}} \bar{i}_{s\alpha} + \frac{1}{L_{sd}} u_{s\alpha} - \frac{1}{L_{sd}} \text{sign}(\bar{i}_{s\alpha}) \\ \frac{d\bar{i}_{s\beta}}{dt} = -\frac{R_s}{L_{sq}} \bar{i}_{s\beta} + \frac{1}{L_{sq}} u_{s\beta} - \frac{1}{L_{sq}} \text{sign}(\bar{i}_{s\beta}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\bar{i}_{s\alpha}$ 、 $\bar{i}_{s\beta}$ 为 SMVSC 电流估算值与实际值之差。

根据 SMVSC 理论,定义切换面为

$$s(x) = \begin{cases} \hat{i}_{s\alpha} - i_{s\alpha} = 0 \\ \hat{i}_{s\beta} - i_{s\beta} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

设计滑模观测器的控制律为

$$\begin{cases} z_{s\alpha} = k_s \text{sign}(\hat{i}_{s\alpha} - i_{s\alpha}) \\ z_{s\beta} = k_s \text{sign}(\hat{i}_{s\beta} - i_{s\beta}) \end{cases} \quad (8)$$

式中: k_s 为 SMVSC 的切换增益, 当滑模的状态变量到达并紧贴滑模面运动时, 近似认为电流观测误差等于零。

研究表明, 滑模观测器具有抗扰动和对电机参数变化不敏感、鲁棒性好等优点, 但在实际的应用中, 由于 SMVSC 不停的切换, 不会出现理想平滑的滑模面^[13-15]。

采用 SMVSC 观测器常用符号函数 $\text{sign}(x)$ 来表示切换函数, 如图 1 所示。可见, $\text{sign}(x)$ 简单的开关特性是产生系统抖振的主要原因。因此, 抖振问题是 SMVSC 固有的一个问题, 只能设法减弱, 不能从根本上消除。

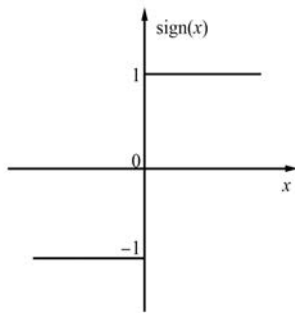


图 1 开关函数 $\text{sign}(x)$

为了降低系统的抖振, 采用饱和函数 $\text{sat}(x)$ 代替 $\text{sign}(x)$, 如图 2 所示。

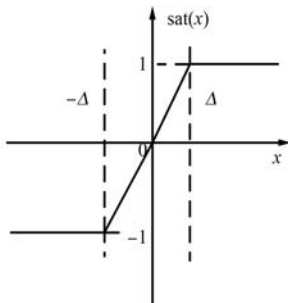


图 2 饱和函数

图 2 中, Δ 为边界层厚度。从图 2 可以看出, 该函数是一个由 2 个切换面 $x = -\Delta$ 、 $x = \Delta$ 构成的三界沟系统, 饱和函数 $\text{sat}(x)$ 是 x 的线性函数。其数学表达式如下:

$$\text{sat}(x) = \begin{cases} 1, & x > \Delta \\ x/\Delta, & |x| \leq \Delta \\ -1, & x < -\Delta \end{cases} \quad (9)$$

本文对边界层厚度的参数进行自适应调节, 通过调节 Δ 函数值, 减慢状态变量趋于滑模切换面的速度, 以减小抖振。

设计具有合适截止频率的低通滤波器进行滤波, 提取反电动势信号, 可得 IPMSM 反电动势的观测值 \hat{e}_α 、 \hat{e}_β :

$$\begin{cases} \hat{e}_{s\alpha} = \frac{\omega_c}{s}(z_{s\alpha} - \hat{e}_{s\alpha}) \\ \hat{e}_{s\beta} = \frac{\omega_c}{s}(z_{s\beta} - \hat{e}_{s\beta}) \end{cases} \quad (10)$$

式中: ω_c 为低通滤波器的截止频率。

考虑到经过低通滤波后得到的转子估算位置会有一些的相位延迟, 因此用一个位置补偿角 $\Delta\theta$ 来进行补偿, 则可得补偿后的 IPMSM 转子估算位置为

$$\hat{\theta} = \theta + \Delta\theta = \arctan \frac{\hat{e}_\beta}{\hat{e}_\alpha} + \arctan \frac{\hat{\omega}_r}{\omega_c} \quad (11)$$

根据 Lyapunov 理论, 可以证明基于 SMVSC 的 IPMSM 无位置传感器控制系统是稳定的。其系统框图如图 3 所示。

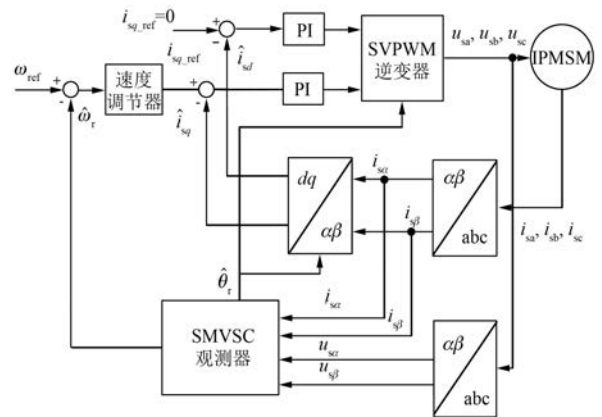


图 3 基于 SMVSC 的 IPMSM 无位置传感器控制系统框图

3 仿真研究

运用 MATLAB/Simulink, 建立各个功能子模块, 再将各子模块组建成系统仿真模型, 对基于 SMVSC 的 IPMSM 无位置传感器控制系统进行验证, 负载为 $15 \text{ N}\cdot\text{m}$, 电机的机械速度运行范围从

零速到额定转速 3 000 r/min, 仿真波形如图 4~图 8 所示。IPMSM 参数如表 1 所示。

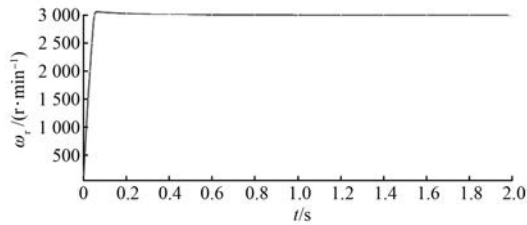


图 4 IPMSM 的实际转速

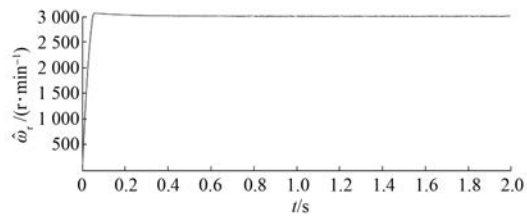


图 5 IPMSM 的估算转速

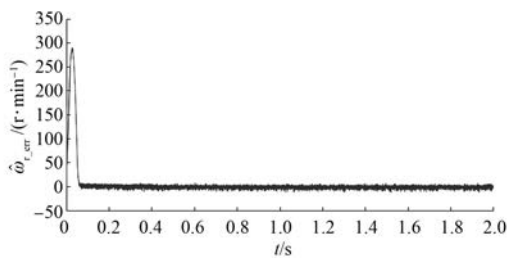


图 6 IPMSM 的实际转速与估算转速之差

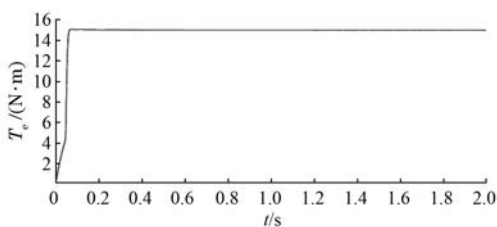


图 7 IPMSM 的电磁转矩

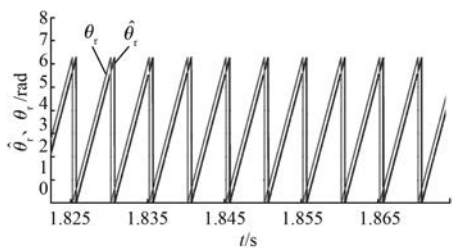


图 8 IPMSM 转子位置角的实际值和估算值

表 1 IPMSM 参数

参数名称	参数值
额定转矩/(N·m)	15
定子电阻/Ω	2.2
定子 d 轴电感/H	0.003 5
定子 q 轴电感/H	0.005 5
极对数	4
主磁极磁通/Wb	0.208 5
转动惯量/(kg·m ²)	0.003
额定机械转速/(r·min ⁻¹)	3 000

从仿真波形可以看出, 基于 SMVSC 的 IPMSM 无位置传感器控制策略具有良好的动态响应和稳态响应, 获得了精确的估算位置和估算转速。

4 结 语

本文研究了基于 SMVSC 的 IPMSM 无位置传感器控制策略。针对 SMVSC 中固有的抖振问题, 对其产生的机理进行了详细的分析与研究, 提出一种用饱和函数代替符号函数, 进行改进从而降低符号函数的不连续性, 同时将饱和函数的边界层厚度参数设置为一变量, 进行自适应调节, 通过调节边界层厚度函数值, 减慢状态变量趋于滑模切换面的速度, 减小了抖振。

最后, 本文用仿真对控制系统进行了验证。仿真结果表明: 该控制系统具有良好的动态响应和稳态响应, 且位置和转速估算效果较好, 系统有较强的鲁棒性。

【参 考 文 献】

- [1] 张伯泽, 宗剑, 钱平. 基于三电平逆变器的内置式永磁同步电机矢量控制研究[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(3): 41.
- [2] GHEORGHE D A, CRISTIAN I P. Combined flux observer with signal injection enhancement for wide speed range sensorless direct torque control of IPMSM drives[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2): 393.
- [3] SHINNAKA S. New sensorless vector control using minimum-order flux state observer in a stationary reference frame for permanent magnet synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(2): 388.

(下转第 51 页)