

一种参数自适应双滑模结构 MRAS 永磁同步电机矢量控制方法

朱吕攀, 毛谦敏, 王学影

(中国计量大学 计量测试工程学院, 杭州 310018)

摘要: 针对模型参考自适应系统(MRAS)在永磁同步电机控制中存在的响应速度慢、控制精度低、对参数变化敏感等问题, 提出了一种参数自适应双滑模结构的 MRAS 永磁同步电机矢量控制方法。将传统模型参考自适应系统中的 PI 速度环和 PI 自适应调节器用滑模结构替代, 提高系统的抗干扰能力和控制精度。基于波波夫超稳定性理论设计电机参数自适应系统, 对电机参数进行辨识, 进而提高系统鲁棒性。为抑制抖振, 引入饱和函数和随系统状态变量自适应变化的滑模增益。最后借助 SIMULINK 软件进行仿真实验, 实验结果表明该方法提高了控制精度和响应速度, 且鲁棒性强, 具有一定的优越性。

关键词: 滑模控制器; 永磁同步电机; 模型参考自适应; 波波夫超稳定性; 参数自适应

中图分类号: TM351; TM341; TP273

文献标志码: A

文章编号: 1001-6848(2023)07-0023-06

DOI:10.15934/j.cnki.micromotors.2023.07.012

A Vector Control Method for MRAS Permanent Magnet Synchronous Motor With Adaptive Parameters and Double Sliding Mode Structure

ZHU Lyupan, MAO Qianmin, WANG Xueying

(China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problems of model reference adaptive system (MRAS) in the control of permanent magnet synchronous motor, such as slow response speed, low control precision and sensitive to parameter changes, a vector control method of MRAS permanent magnet synchronous motor with parameter adaptive double sliding mode structure was proposed. The PI speed loop and PI adaptive regulator in the traditional model reference adaptive system were replaced by sliding mode structure to improve the anti-jamming ability and control accuracy of the system. Based on Popov's superstability theory, an adaptive system of motor parameters was designed to identify motor parameters and improve the robustness of the system. In order to suppress chattering, saturation function and sliding mode gain which adaptively varies with system state variables were introduced. Finally, simulation experiments were carried out by Simulink software. The experimental results show that the proposed method improves the control accuracy and response speed, and has strong robustness.

Key words: sliding mode controller; permanent magnet synchronous motor; model reference adaptive; Popov superstability; parameter adaptive

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 具有调速性能好、维护方便、运行可靠、单位功率密度大、效率高等独特优点, 被广泛应用于汽车、医疗、国防等领域。准确的转子位置

信息是永磁同步电机的精确控制的关键, 传统的位置信息获取通过位置或速度传感器, 但传感器的安装增加了电机的体积和成本, 且某些情况无法安装传感器。因此, 如何在无传感器条件下实现对电机转子位置的准确估算是目前永磁同步电机控制的难点。

收稿日期: 2023-01-11

作者简介: 朱吕攀(1999), 第一作者, 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步电机控制技术。

通讯作者: 毛谦敏(1966), 男, 教授, 研究方向为精密测量与智能化仪器。

王学影(1979), 女, 副教授, 研究方向为光电检测技术、三坐标测量机技术。

国内外学者提出了很多 PMSM 无传感器控制方法,主要有滑模控制法、扩展卡尔曼滤波器法、高频信号注入法、模型参考自适应法等^[1-9]。文献[10]设计了分数阶滑模转速控制器,有效抑制了高频抖振,但是控制精度偏低。文献[11]将自适应广义二阶积分器引入高频信号注入法,有效提高了系统的动态性能和稳态精度,但只适用于低转速控制。文献[12]提出了一种基于扩展卡尔曼滤波器的无速度传感器控制方法,但运算量大、模型复杂,对硬件要求高。模型参考自适应法基于李雅普诺夫方程和波波夫超稳定性理论设计,确保其收敛,但准确性受参考模型的参数准确度影响,鲁棒性弱^[13]。文献[14]提出一种基于模糊 PI 的模型参考自适应观测器,该观测器在电机很宽的速度范围内都有良好的动稳态性能,提高了转子位置的检测精度,但模糊规则不易确定。文献[15]使用扩展卡尔曼滤波替代传统 MRAS 的 PI 自适应率,同时结合了一种线性的神经网络,对 PMSM 控制参数采集的准确性和动态响应均有提升,但计算量大,对硬件要求高。滑模控制的动态特性仅依赖滑模面的选择,具有鲁棒性强和控制简单的优点,将滑模控制引入模型参考自适应系统,可以在保证系统结构简单,控制精度高的同时提高系统的鲁棒性。

本文提出了一种参数自适应双滑模结构的 MRAS 永磁同步电机控制方法,将滑模控制与模型参考自适应系统结合,同时基于波波夫超稳定性理论设计电机参数自适应系统,引入饱和函数和随系统状态变量自适应变化的滑模增益。通过 Simulink 仿真实验证明,该方法动静态性能好,鲁棒性强,可以提高系统的控制精度,有效抑制系统抖振。

1 永磁同步电机的数学模型

表贴式三相 PMSM 同步旋转坐标系下的数学模型为

定子电压方程为

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

转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} P_n i_q \psi_f \quad (2)$$

机械运动方程为

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (3)$$

式中, u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 表示定子电压、电流在 d 、 q 轴上的分量; ω_e 为转子电角速度; ω_m 为转子机械角速度; R_s 为定子电阻; L_d 、 L_q 为交直流电感,在表贴式 PMSM 中 $L_d = L_q = L_s$; ψ_f 为永磁体磁链; P_n 为电机极对数; T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; B 为阻尼系数; J 为转动惯量。

2 电机参数模型参考自适应系统

为解决实际工作中, PMSM 的参数随着外界环境的变化,造成转速估算误差变大的问题,设计电机参数模型参考自适应系统:

将式(1)用状态空间形式表示,其中 $L_d = L_q = L_s$:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \omega_e \\ -\omega_e & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega_e \frac{\psi_f}{L_s} \end{bmatrix} \quad (4)$$

令 $x = -\frac{R_s}{L_s}$, $y = \frac{1}{L_s}$, $z = \frac{\psi_f}{L_s}$, 可得:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & \omega_e \\ -\omega_e & x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y & 0 \\ 0 & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega_e z \end{bmatrix} \quad (5)$$

在转速已知的前提下,对电机参数进行辨识,将式(5)用估计量表示:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x} & \omega_e \\ -\omega_e & \hat{x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{y} & 0 \\ 0 & \hat{y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega_e \hat{z} \end{bmatrix} \quad (6)$$

定义 $\begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d - \hat{i}_d \\ i_q - \hat{i}_q \end{bmatrix}$, 将式(6)与式(5)相减

可得:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x - \hat{x} & 0 \\ 0 & x - \hat{x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y - \hat{y} & 0 \\ 0 & y - \hat{y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \hat{z} - \omega_e z \end{bmatrix} \quad (7)$$

根据波波夫超稳定性理论,对波波夫积分逆向求解,可得出电阻、电感、磁链的自适应率:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = -\left(\frac{K_i}{s} + K_p\right)(i_d \hat{i}_d + i_q \hat{i}_q - \hat{i}_d^2 - \hat{i}_q^2) + \hat{x}_{(0)} \\ \dot{\hat{y}} = \left(\frac{K_i}{s} + K_p\right)(u_d \hat{i}_d + u_q \hat{i}_q - u_d \hat{i}_d - u_q \hat{i}_q) + \hat{y}_{(0)} \\ \dot{\hat{z}} = -\left(\frac{K_i}{s} + K_p\right)\omega_e(i_q - \hat{i}_q) + \hat{z}_{(0)} \end{cases} \quad (8)$$

其中, 将 K_i 、 K_p 为 PI 自适应率参数。

3 双滑模结构模型参考自适应系统

3.1 模型参考自适应系统滑模速度观测器设计

构造滑模面函数为

$$S = C(i_d' \hat{i}_q' - \hat{i}_d' i_q') + \frac{d}{dt}(i_d' \hat{i}_q' - \hat{i}_d' i_q') \quad (9)$$

变结构滑模控制率设计如下式:

$$\hat{\omega}_e = K \operatorname{sgn}(s) \quad (10)$$

式中, K 为滑模增益, $\operatorname{sgn}(s)$ 是符号函数。

由于符号函数不连续的开关特性, 系统会产生抖振现象, 故选择饱和函数替换符号函数 $\operatorname{sat}(s)$, 减少系统抖振, 此时滑模控制率为

$$\hat{\omega}_e = K \operatorname{sat}(s) \quad (11)$$

滑模变结构模型参考自适应系统的结构框图如图 1 所示。

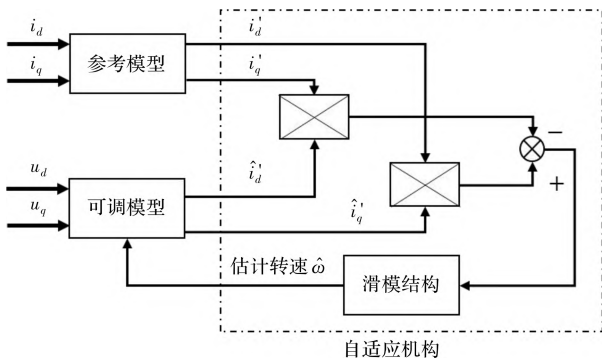


图 1 滑模变结构模型参考自适应系统的结构框图

3.2 新型滑模趋近率设计

高为炳院士率先提出趋近率的概念, 并设计了一种指数趋近率

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - qs \quad (12)$$

其中 $\varepsilon > 0$, $q > 0$ 。

传统指数型趋近率对改善系统的高频抖振具有一定的作用, 但是在滑模面附近, 固定的 ε 和 q 使得系统无法快速趋近于滑模面, 动态性能较差, 且依然存在高频抖振。为解决以上问题, 设计新型指数趋近率:

$$\begin{cases} \dot{s} = -|\varepsilon|^{\alpha} \operatorname{sat}(s) - qs \\ \varepsilon = \frac{|\dot{x}|}{|\dot{x}| + |x|} \omega_{\text{ref}} N \end{cases} \quad (13)$$

式中, ω_{ref} 为电机参考转速, 通常为常量; $x = \omega_{\text{ref}} - \hat{\omega}_e$; X 为自适应滑模增益, N 为滑模增益基准值, $\alpha \geq 1$ 为指数系数。

当系统离滑模面较远时, 较大的 $|k|$ 使得系统快

速趋近滑模面; 当系统在滑模面附近时, $|\varepsilon|^{\alpha} \operatorname{sat}(s)$ 起主要作用, 且逐渐减少到 0, 一定程度减小了系统的高频抖振。同时使用饱和函数替代符号函数, 进一步削减抖振。

3.3 滑模速度控制器设计

由式(1)~式(3)可得

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = -\frac{1}{L_s}(Ri_q + P_n \psi_f \omega_m - u_q) \\ \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} \left(\frac{3}{2} P_n i_q \psi_f - T_L \right) \end{cases} \quad (14)$$

定义 PMSM 系统的状态变量:

$$\begin{cases} x_1 = \omega_{\text{ref}} - \omega_m \\ x_2 = \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m \end{cases} \quad (15)$$

式中, ω_m 为实际转速。结合式(14)和式(15)可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\dot{\omega}_m = \frac{1}{J} \left(T_L - \frac{3}{2} P_n i_q \psi_f \right) \\ \dot{x}_2 = -\ddot{\omega}_m = -\frac{3}{2J} P_n \psi_f i_q \end{cases} \quad (16)$$

定义滑模面函数:

$$s = cx_1 + x_2 \quad (17)$$

其中, $c > 0$, 对式(17)求导得:

$$\dot{s} = c\dot{x}_1 + \dot{x}_2 = cx_2 - Du \quad (18)$$

其中, $D = \frac{3}{2J} P_n \psi_f$, $u = i_q$ 采用式(13)的新型指数趋近率, 可得控制器表达式为

$$u = \frac{1}{D} [cx_2 + |\varepsilon|^{\alpha} \operatorname{sat}(s) + qs] \quad (19)$$

从而可得 q 轴的参考电流为

$$i_q^* = \frac{1}{D} \int_0^t [cx_2 + \varepsilon |X|^{\alpha} \operatorname{sgn}(s) + qs] dt \quad (20)$$

定义 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (21)$$

对式(21)求导, 代入式(13), 可得:

$$\dot{V} = s\dot{s} = -\varepsilon |X|^{\alpha} |s| - qs^2 \quad (22)$$

由式(22)可知, $s\dot{s} \leq 0$, 当且仅当 $s = 0$ 时, $s\dot{s} = 0$, 故系统是渐进稳定的。

4 仿真结果及分析

为验证双滑模变结构 MRAS 的永磁同步电机矢量控制方法的可行性和优越性, 使用 Simulink 软件搭建表贴式永磁同步电机矢量控制仿真模型。

仿真实验的永磁同步电机参数如表 1 所示。

表 1 永磁同步电机参数表

参数	参数值
定子电阻 R/Ω	2.875
定子电感 L/mH	8.5
磁链 ψ_f/Wb	0.175
阻尼系数	0
电机极对数	4
转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	4.8×10^{-6}

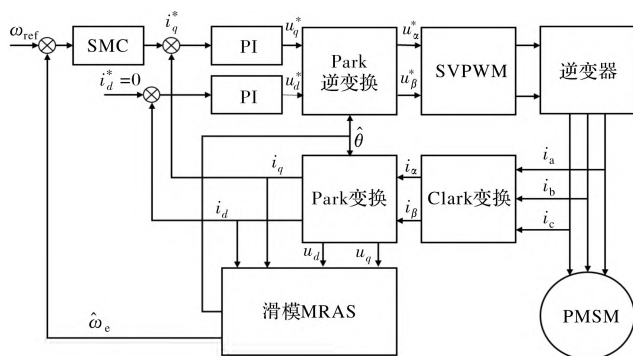


图 2 双滑模变结构 MRAS 系统结构图

4.1 变速度分析

图 3、图 4 为在 $t = 0.2 \text{ s}$ 时，PMSM 转速从 600 r/min 突变到 -600 r/min 的实际转速和估计转速响应曲线。对比图 4 和图 5 可以发现，相比于传统 MRAS 系统，双滑模变结构 MRAS 系统的超调量更小，且具有更快的响应速度。系统稳定时，双滑模变结构 MRAS 系统的抖振更小。

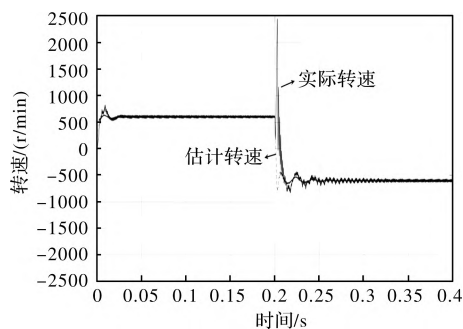


图 3 传统 MRAS 实际转速和估计转速响应曲线图

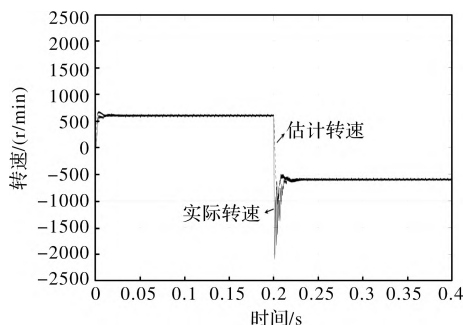


图 4 双滑模 MRAS 实际转速和估计转速响应曲线图

4.2 变负载分析

PMSM 在负载转矩 $T_L = 0$ 时以 600 r/min 的转速起动，在 $t = 0.2 \text{ s}$ 时，负载转矩 T_L 突变到 1 Nm，转速不变。

图 5、图 6 为传统 MRAS 和双滑模变结构 MRAS 的负载转矩 T_L 响应曲线，对比图 5 和图 6 可以发现，双滑模变结构 MRAS 系统在转矩突变时，具有更快的响应速度，在 4 ms 内趋于稳定，且超调量更小。稳定时，转矩抖振更小，相比于传统 MRAS 系统，转矩波动减少了 0.2 Nm。

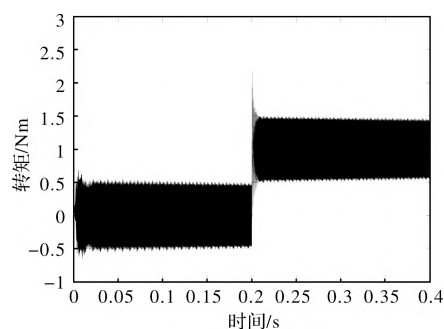
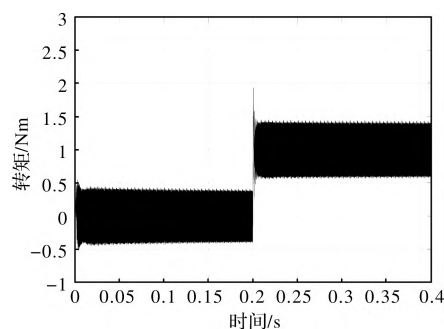
图 5 传统 MRAS 负载转矩 T_L 响应曲线图图 6 双滑模 MRAS 负载转矩 T_L 响应曲线图

图 7、图 8 为传统 MRAS 和双滑模变结构 MRAS 的估计转速误差响应曲线，在转矩突变时，双滑模变结构 MRAS 系统的超调量小，能更加快速的趋于稳定。

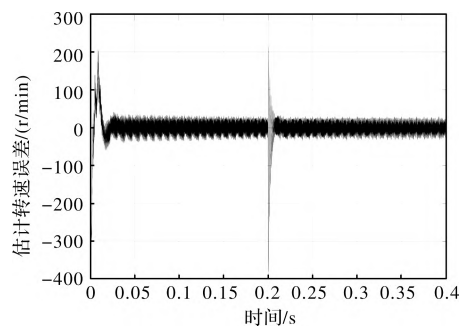


图 7 变负载时传统 MRAS 转速误差响应曲线图

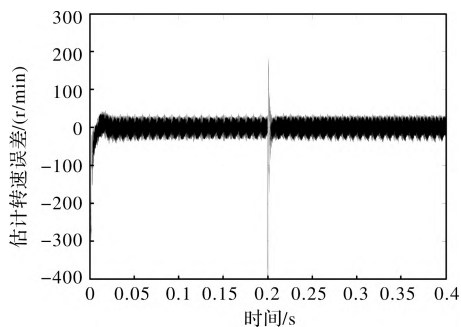
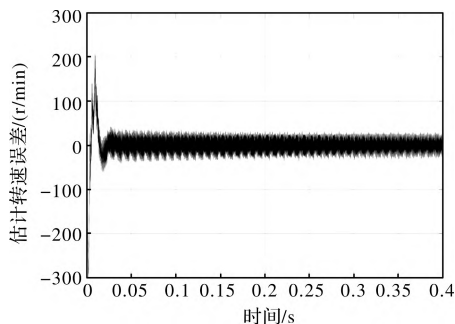
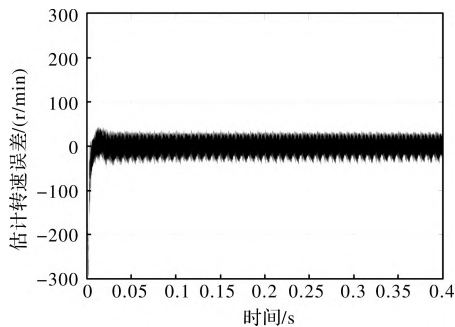
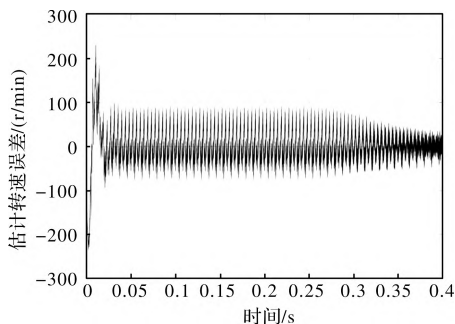
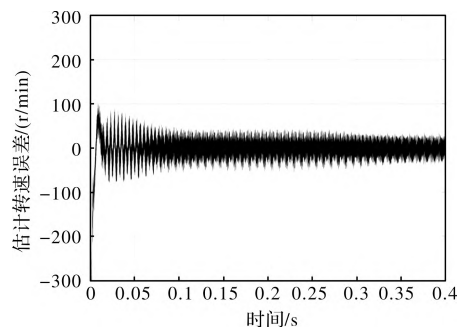


图 8 变负载时双滑模 MRAS 转速误差响应曲线

4.3 变参数分析

PMSM 在负载转矩 $T_L = 0$ 时以 600 r/min 的转速起动。图 9、图 10 和图 11、图 12 分别是定子电阻 $R = 2.875 \Omega$ 和 $R = 5 \Omega$ 时, 传统 MRAS 和双滑模变结构 MRAS 的实际转速和估计转速误差响应曲线。

图 9 $R = 2.875 \Omega$ 时传统 MRAS 转速误差响应曲线图 10 $R = 2.875 \Omega$ 时双滑模 MRAS 转速误差响应曲线图 11 $R = 5 \Omega$ 时传统 MRAS 转速误差响应曲线图 12 $R = 5 \Omega$ 时双滑模 MRAS 转速误差响应曲线

从图 9、图 10 和图 11、图 12 可以看出, 当定子电阻 $R = 5 \Omega$ 时, 相比于传统 MRAS, 双滑模变结构 MRAS 系统收敛速度更快, 稳定时抖振小, 估计转速误差在 30 r/min, 可见所设计的双滑模变结构 MRAS 在参数变化时可以自适应调节参数, 对参数变化的鲁棒性强。

5 结 语

本文针对永磁同步电机控制中存在的响应速度慢、控制精度低、对参数变化敏感等问题, 提出了一种参数自适应双滑模结构的 MRAS 永磁同步电机矢量控制方法。为提高系统的鲁棒性, 简化控制结构, 用滑模结构替代传统模型参考自适应系统中的 PI 速度环和 PI 自适应调节器。为提高系统对电机参数变化的抗干扰能力, 设计了电机参数自适应系统。为抑制滑模抖振, 提升鲁棒性, 使用饱和函数替代传统符号函数, 设计了新型指数趋近率, 同时构造了一种积分型滑模速度控制器。

借助 Matlab/Simulink 仿真软件, 对参数自适应双滑模变结构 MRAS 系统与传统 MRAS 系统的进行仿真实验对比, 仿真结果表明参数自适应双滑模变结构 MRAS 控制系统超调量小, 控制精度高, 响应速度快, 对参数变化的鲁棒性强, 稳定时抖振幅度小, 具有一定的优越性。

参考文献

- [1] 张兴华, 牛兴林, 林锦国. 基于 EKF 的感应电机无速度传感器逆解耦控制[J]. 系统仿真学报, 2006(4): 982-985, 988.
- [2] Bolognani S, Oboe R, Zigliotto M. Sensorless Full-digital PMSM Drive with EKF Estimation of Speed and Rotor Position[J]. IEEE Trans. Industrial Electronics, 1999, 46(1).
- [3] Corley M J, Lorenz R D. Rotor Position and Velocity Estimation for a Salient-pole Permanent Magnet Synchronous Machine at Standstill and High Speeds[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34: 784-789.

- [4] French C, Acarnley P P. Control of Permanent Magnet Motor Drives Using a New Position Estimation Technique[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32: 1089-1097.
- [5] Kim Y S, Kim S K, Kwon Y A. MRAS Based Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor [C]. Annual Conference, 2003: 1632-1637.
- [6] 刘军, 汪全虎, 陈敏祥. 基于滑模变结构 MRAS 的 PMSM 速度辨识[J]. 轻工机械, 2014, 32(5): 47-50, 56.
- [7] 吴永前, 李玉忍. 扩展 Kalman 滤波在永磁同步电机无速度传感器调速系统中的应用[J]. 电气传动自动化, 2001(6): 3-6.
- [8] 刘慧博, 黄前柱. 基于模型预测控制的永磁同步电机参数辨识[J]. 微电机, 2021, 54(9): 70-77, 100.
- [9] 何克胜, 王英. 永磁同步电机分数阶滑模观测器的设计[J]. 微电机, 2018, 51(5): 48-51, 70.
- [10] 杨城健, 李白雅, 王锦涛, 等. 基于分数阶滑模转速控制器的永磁同步电机矢量控制[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2022, 37(1): 51-59.
- [11] 陈景文, 王培瑞, 李英春. 基于改进高频注入法的 PMSM 转速检测方法[J]. 陕西科技大学学报, 2021, 39(6): 154-160.
- [12] 杨泽斌, 樊荣, 孙晓东, 等. 基于 EKF 的无轴承异步电机无速度传感器控制[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5): 1023-1030.
- [13] 王庆龙, 张崇巍, 张兴. 交流电机无速度传感器矢量控制系统变结构模型参考自适应转速辨识[J]. 中国电机工程学报, 2007(15): 70-74.
- [14] 张洪帅, 王平, 韩邦成. 基于模糊 PI 模型参考自适应的高速永磁同步电机转子位置检测[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1889-1896.
- [15] 宋博洋. 基于 MRAS 算法的永磁同步电动机无传感器自适应预测控制[J]. 电气开关, 2022, 60(2): 43-48, 51.

(上接第 16 页)

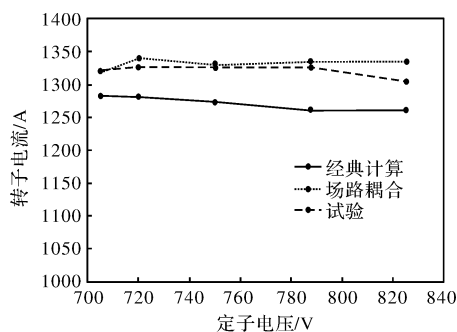


图 17 不同定子电压下的转子电流

由表 4 中数据可以看出, 相同工况下, 场路耦合仿真分析的结果, 精度远高于经典计算解析求解所得的结果; 尤其是转子电流仿真值, 与试验结果非常吻合。

3 结 论

本文结合解析计算, 利用 Ansys 软件建立了双馈感应发电机的场路耦合模型, 并对一台 6. X MW 双馈感应发电机进行了 P-Q 特性参数的场路耦合仿真计算, 对仿真结果、经典计算结果以及试验结

果进行了对比, 验证了场路耦合算法的正确性以及计算的高精确性。基于此设计和分析方法, 可以对双馈感应发电机的各种复杂工况进行仿真计算, 为双馈风力发电机组的匹配设计提供了理论依据。

参考文献

- [1] [美] Stephen D. Umans. 电机学[M]. 7 版. 刘新正等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [2] [芬兰] Juha Pyrhönen, 等. 旋转电机设计[M]. 2 版. 柴凤等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [3] 骆皓, 林明耀, 侯立军. 双馈风力发电机交流励磁控制技术[M]. 南京: 东南大学出版社, 2018.
- [4] 汤蕴璆, 王成元. 交流电机动态分析[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [5] [西班牙] Gonzalo Abad, 等. 双馈感应电机在风力发电中的建模与控制[M]. 胡家兵等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [6] 张新燕, 王维庆, 何山. 风电并网运行与维护[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [7] 赵鲁. 基于 Simplerer 场路耦合多物理域联合仿真[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.