

基于线性自抗扰控制的永磁同步电机 无传感器控制*

郭伟¹, 罗力成², 陆江燕³, 董鹏¹, 徐向阳¹, 赵燕乐¹

(1. 北京航空航天大学 宁波创新研究院, 浙江 宁波 315800;

2. 宁波圣龙汽车动力系统股份有限公司, 浙江 宁波 315100;

3. 浙江万里扬新能源驱动有限公司, 浙江 金华 321000)

摘要: 针对永磁同步电机(PMSM)高频注入无感算法在估算电机角度时容易产生滞后而影响转速控制精度的问题,提出了一种基于线性自抗扰控制的永磁同步电机无传感器控制策略。通过使用简化的线性自抗扰控制算法,对永磁同步电机速度闭环进行优化控制,同时采用高频正弦电压注入的无传感器角度观测算法,获取电机转子的角度及转速信息。最后,通过仿真分析与实物试验,验证了该控制策略可以有效提高永磁同步电机转子角度与转速的估算精度,提升系统的控制效果,且具有较好的工程应用前景。

关键词: 线性自抗扰控制(LADRC); 高频注入; 永磁同步电机(PMSM); 无传感器控制

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)08-0001-08

doi: 10.12177/emca.2023.082

Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Linear Active Disturbance Rejection Control*

GUO Wei¹, LUO Licheng², LU Jiangyan³, DONG Peng¹, XU Xiangyang¹, ZHAO Yanle¹

(1. Ningbo Institute of Technology, Beihang University, Ningbo 315800, China;

2. Ningbo Shenglong Automotive Powertrain System Co., Ltd., Ningbo 315100, China;

3. Zhejiang Wanliyang New Energy Drive Co., Ltd., Jinhua 321000, China)

Abstract: The high frequency injection sensorless control algorithm of permanent magnet synchronous motor (PMSM) is prone to lag when estimating motor angle, which affects the accuracy of speed control. To solve this problem, a sensorless control strategy of PMSM based on linear active disturbance rejection control is proposed. The speed closed-loop of PMSM is optimized by using simplified linear active disturbance rejection control algorithm. Simultaneously, a sensorless angle observation algorithm using high-frequency sinusoidal voltage injection is used to obtain the angle and velocity information of the motor rotor. Finally, through simulation analysis and physical experiments, it was verified that the control strategy can effectively improve the estimation accuracy of motor angle and speed of PMSM, improve the control effect of the system, and have good prospect of engineering application.

Key words: linear active disturbance rejection control(LADRC); high frequency injection; permanent magnet synchronous motor(PMSM); sensorless control

收稿日期: 2023-02-13; 收到修改稿日期: 2023-04-17

* 基金项目: 宁波科技创新 2025 重大专项(2020Z026, 2020Z028, 2020Z014)

作者简介: 郭伟(1984—),男,博士,研究员,研究方向为电机控制。

赵燕乐(1996—),男,硕士,研究方向为汽车电子与电机控制。(通信作者)

0 引言

永磁同步电机(PMSM)凭借其体积小、质量轻、控制精度高及功率密度高等优点,广泛应用于汽车工业领域,包括驱动电机、电动助力、电子油泵等各种功率使用场景。随着永磁同步电机的广泛使用,人们对永磁同步电机系统的控制精度要求越来越高,永磁同步电机控制算法也因此得到快速发展。

自抗扰控制(ADRC)继承了PID控制的优势,不依赖于被控制对象的精确数学模型,并将抗干扰技术融入到传统PID控制中,其具有良好的性能。因此,有不少学者使用ADRC对永磁同步电机的转速或电流进行控制。文献[1-2]分别对扩张观测器与线性误差反馈率中的非线性函数进行了改进优化,分析了系统收敛性,并应用于永磁同步电机控制系统中,提高了永磁同步电机的控制精度。文献[3-5]分别对自抗扰控制器的结构进行了一定程度的简化,并应用于永磁同步电机的速度环控制中,具有较好的工程实用价值。

永磁同步电机的无传感器控制算法(以下称无感算法),大致可分为基于模型的方法与基于电机凸极性的方法两类。基于模型的方法依赖于电机的反电动势或磁链反馈,当电机处于零速或低速阶段时,该类方法无法准确获得电机的位置信息;基于电机凸极性的方法通过注入高频脉振信号或高频旋转信号,通过高频响应电流对电机转子的角度信息进行解算,可用于电机零速或低速时的起动。传统高频脉振信号注入方法,由于大量滤波器的引入,易造成解算角度滞后^[6],从而影响电机的控制精度。为改善该问题,有较多学者对此进行了研究。文献[7]和文献[8]对高频方波注入法进行改进优化,通过提高方波注入频率,将高频电流信号与低频电流信号进行分离,提高永磁同步电机角度估算精度。文献[9-11]对高频注入算法中的龙伯格观测器进行改进,提高了电机角度解算精度,并通过试验验证了其正确性。文献[12]提出滑模控制器下的脉振高频注入的无位置传感器控制方法,提高了永磁同步电机在零速或低速下的控制精度与稳定性。

上述文献虽然提高了高频注入无传感器控制

下的永磁同步电机控制精度,但在一定程度上增加了系统的复杂度,不利于实际工程应用。本文提出一种基于线性化自抗扰控制(LADRC)优化的变频正弦注入的永磁同步电机无传感器控制策略,使用简化线性自抗扰控制器对永磁同步电机进行速度闭环控制,采用高频正弦电压注入方法,对永磁同步电机位置与速度信息进行解算,以减小无感算法中滤波器所造成的角度滞后,提升永磁同步电机在零速、低速下的无传感器控制效果,最后通过仿真分析与实物试验,验证了该方法的正确性与有效性。

1 线性自抗扰控制设计

传统自抗扰控制器主要由跟踪微分器(TD)、扩张观测器(ESO),误差反馈控制器(NLSEF)三部分组成^[13],其控制结构如图1所示。

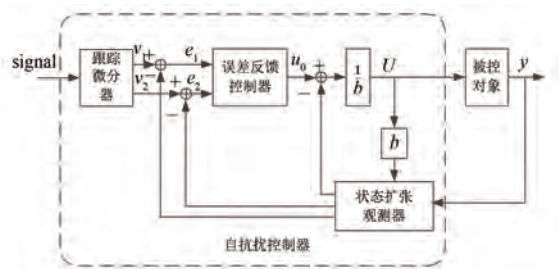


图1 自抗扰控制结构示意图

传统自抗扰控制器参数众多,调节过程复杂,在实际应用中十分不便。为提高自抗扰控制算法在永磁同步电机控制系统中实际应用的可行性,对其进行如下简化:使用直接误差代替TD、ESO以及NLSEF中的非线性函数,从而减少了控制器中大量的参数与计算,方便进行参数整定,提高电机控制器的计算效率。本文设计TD、ESO及NLSEF的线性化自抗扰控制器如下^[14-15]。

设计线性化TD为

$$\begin{cases} e_0 = \omega_{\text{ref}} - \omega^* \\ \dot{\omega}^* = -re_0 \end{cases} \quad (1)$$

设计ESO方程为

$$\begin{cases} e_1 = \omega - \omega_{\text{fb}} \\ \dot{\omega} = f(t) - \beta_1 e_1 + bu(t) \\ \dot{f}(t) = -\beta_2 e_2 \end{cases} \quad (2)$$

设计NLSEF方程为

$$\begin{cases} e_2 = \omega^* - \omega \\ u_0(t) = K e_2 \\ u(t) = u_0(t) - f(t)/b \end{cases} \quad (3)$$

式中: e_0 、 e_1 、 e_2 均为误差信号; ω_{ref} 为目标转速; ω^* 为转速跟踪信号; r 为速度因子; ω 为反馈转速估计信号; ω_b 为反馈转速信号; $f(t)$ 为扰动信号; β_1 、 β_2 均为 ESO 输出误差校正增益; b 为补偿因子; $u_0(t)$ 为线性反馈输出, $u(t)$ 为最终输出控制信号; K 为调节器增益。

经过对传统自抗扰控制线性简化, 控制器所需整定参数数量大大减少, 提高了工程应用的可行性, 以便于其在永磁同步电机速度闭环控制中的应用。

2 高频正弦注入下的永磁同步电机模型

本文中永磁同步电机无传感器控制系统采用高频正弦电压注入法, 在同步旋转坐标系 d 轴注入一定幅值的高频正弦电压信号, 通过电机高频响应电流解算获得电机角度与转速信息。

为简化分析, 假设三相永磁同步电机为理想电机, 则永磁同步电机同步旋转坐标系 (d - q) 下的数学模型为^[16]

$$\begin{cases} u_d = R i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_e L_q i_q \\ u_q = R i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_e (L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (4)$$

式中: u_d 和 u_q 分别为 d 、 q 轴电压; i_d 和 i_q 分别为 d 、 q 轴电流; L_d 和 L_q 分别为 d 、 q 轴电感; R 为定子电阻; ω_e 为电机电角速度; φ_f 为永磁体磁通。

由于高频注入信号频率远大于基波频率, 当高频电压信号激励时, 电机绕组感抗作用远大于其阻抗作用, 因此忽略其阻抗作用。高频信号激励下的永磁同步电机电流响应方程可简化为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d \approx \frac{1}{L_d} u_d \\ \frac{d}{dt} i_q \approx \frac{1}{L_q} u_q \end{cases} \quad (5)$$

为了准确估计出电机转子位置, 首先需要建立估计转子同步旋转坐标系与实际转子同步旋转坐标系之间的关系, 如图 2 所示。图 2 中, α - β 为

两相静止坐标系; d - q 为实际旋转两相坐标系; $\hat{d}$ - $\hat{q}$ 为估计旋转两相坐标系; θ 为电机转子实际电角度; $\hat{\theta}$ 为电机转子估计电角度; $\tilde{\theta}$ 为电机转子角度估计误差。

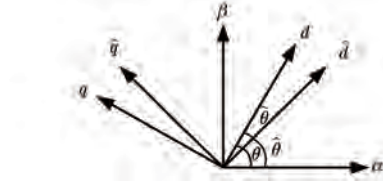


图2 估计转子与实际转子同步旋转坐标系

假设在估计转子同步旋转坐标系 $\hat{d}$ - $\hat{q}$ 下注入高频电压为 $[\hat{u}_d \ \hat{u}_q]^T$, 则 $\hat{d}$ - $\hat{q}$ 坐标系下高频响应电流为^[17-19]

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} \hat{i}_d \\ \frac{d}{dt} \hat{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \tilde{\theta} & -\sin \tilde{\theta} \\ \sin \tilde{\theta} & \cos \tilde{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}_d \\ \hat{u}_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $\hat{i}_d$ 、 $\hat{i}_q$ 分别为估计转子同步旋转坐标系的电流高频分量。

化简后可得:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \hat{i}_d = [(L + \cos 2\tilde{\theta} \cdot \Delta L) + \sin 2\tilde{\theta} \cdot \Delta L \cdot \hat{u}_q] \cdot \frac{1}{L^2 - \Delta L^2} \\ \frac{d}{dt} \hat{i}_q = [\sin 2\tilde{\theta} \cdot \Delta L \cdot \hat{u}_d + (L - \cos 2\tilde{\theta} \cdot \Delta L) \cdot \hat{u}_q] \cdot \frac{1}{L^2 - \Delta L^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: L 为平均电感, ΔL 为半差电感。

$$L = \frac{L_d + L_q}{2} \quad (8)$$

$$\Delta L = \frac{L_q - L_d}{2} \quad (9)$$

高频正弦电压信号注入在估计转子同步坐标系 $\hat{d}$ - $\hat{q}$ 下 $\hat{d}$ 轴中时:

$$\begin{cases} \hat{u}_d = u \cdot \cos \omega_h t \\ \hat{u}_q = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: u 为注入高频电压信号幅值; ω_h 为注入高频

信号频率。

将式(10)代入式(7),估计转子同步旋转坐标系下高频响应电流化简可得:

$$\begin{cases} \dot{\hat{i}}_d = \frac{(L + \cos 2\tilde{\theta} \cdot \Delta L) \cdot u}{\omega_h(L^2 - \Delta L^2)} \sin \omega_h t \\ \dot{\hat{i}}_q = \frac{\sin 2\tilde{\theta} \cdot \Delta L \cdot u}{\omega_h(L^2 - \Delta L^2)} \sin \omega_h t \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可知,高频响应电流 $\hat{i}_d$ 、 $\hat{i}_q$ 的幅值中均包含转子位置估计误差 $\tilde{\theta}$ 角度信息,即转子角度信息。当 $\hat{q}$ 轴高频响应电流 $\hat{i}_q \rightarrow 0$ 时,估计电角度与实际电角度之间角度差 $\tilde{\theta} \rightarrow 0$ 。因此,可以对 $\hat{q}$ 轴高频响应电流进行适当处理后,使用PI控制器构成锁相环(PLL)系统,从而得到转子的角度信息。基于PLL的高频正弦电压注入的位置解算系统框图如图3所示,图中BPF为带通滤波

器,LPF为低通滤波器。但由于滤波器的使用,会使得高频响应电流 $\hat{i}_d$ 、 $\hat{i}_q$ 产生滞后,导致估算角度 $\hat{\theta}$ 产生滞后,进而产生角度误差,影响系统控制精度。

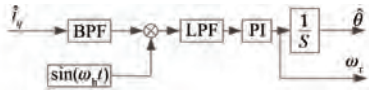


图3 基于PLL的转子位置估计框图

3 仿真分析与试验结果

3.1 模型建立

本文所提出的基于线性自抗扰控制永磁同步电机无感控制框图如图4所示。永磁同步电机控制系统速度闭环采用改进线性自抗扰控制策略,电流环采用PI控制器,永磁同步电机角度转速信息由高频正弦电压注入法求解。在Simulink中搭建仿真模型,相关电机参数设置见表1。

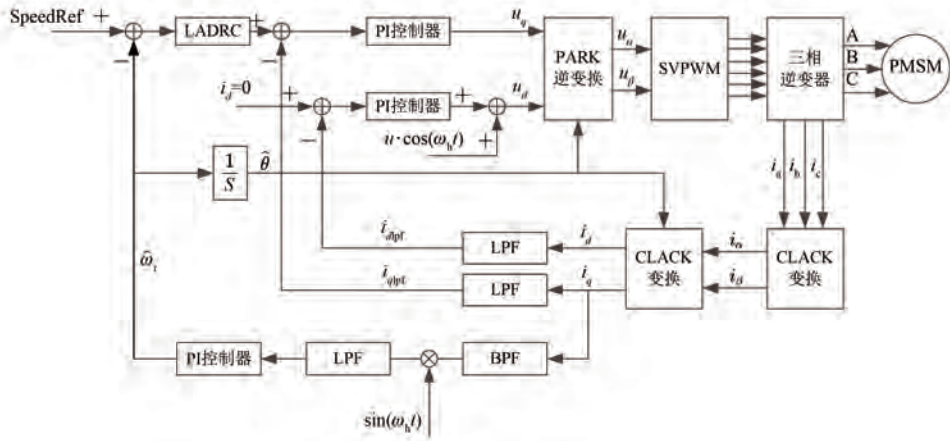


图4 基于线性自抗扰控制的永磁同步电机无传感器控制系统框图

表1 电机参数

参数名称	参数值
定子直轴电感 L_d/H	0.000 010 8
定子交轴电感 L_q/H	0.000 026 7
定子电阻 R/Ω	0.014 05
磁链 φ_f/Wb	0.021 6
转子转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1.31×10^{-5}
极对数	3
额定扭矩 $/(\text{N}\cdot\text{m})$	1.07
额定电压/V	12
额定转速 $/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	4 000

3.2 仿真分析

高频注入正弦电压信号的幅值 $u = 2 \text{ V}$,高频信号频率 $\omega_h = 1\ 000 \text{ Hz}$,LPF采用一阶巴斯沃斯滤波器,截止频率为150 Hz,BPF采用二阶巴斯沃斯滤波器,上、下截止频率分别为1 025 Hz与975 Hz。设定目标转速为100 r/min,分别采用LADRC控制与PI控制对转速进行控制,结果如图5~图11所示。

图5、图6分别为LADRC控制与PI控制下永磁同步电机无感算法的估算转速与真实转速对比。由图5和图6可知,在LADRC控制与PI控制下,电机均可以快速到达目标转速,无感转速估

计值对转速实际值具有较好的跟踪性能。PI 控制下系统在 0.015 s 内达到稳态值, LADRC 控制下由于 TD 阶段的过渡作用, 系统在 0.05 s 内达到稳态值。

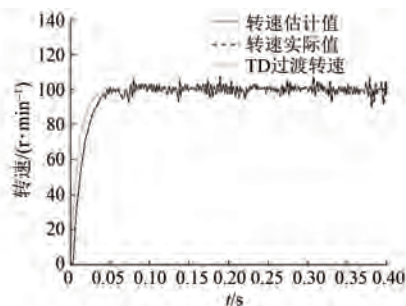


图5 LADRC 转速实际值与转速估计值对比

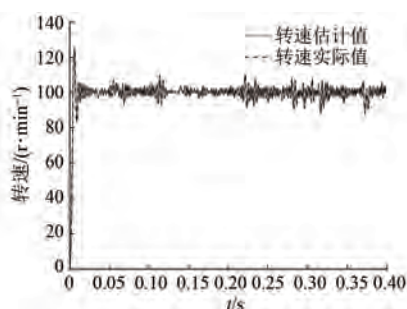


图6 PI 控制转速实际值与转速估计值对比

图7为LADRC控制与PI控制下转速估计值对比。由图7可知, PI控制下电机转速具有24.83 r/min的最大转速超调。而LADRC控制下无超调现象, 转速控制更为平滑, 具有更小的转速脉动, 有效提高了永磁同步电机的转速控制精度。

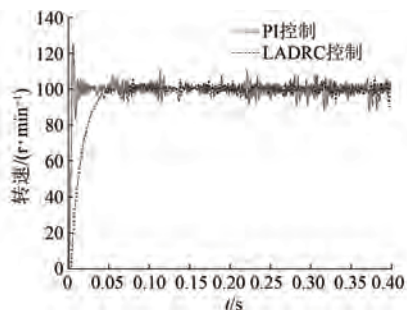


图7 LADRC 控制与PI 控制下转速估计值对比

图8为LADRC控制与PI控制下, 电机转速估计值与转速实际值的误差对比。由图8可知, 在PI控制下, 最大转速误差为0.13 r/min, 而在LADRC控制下, 最大转速误差为0.08 r/min, LADRC控制使电机无感估算转速误差降低

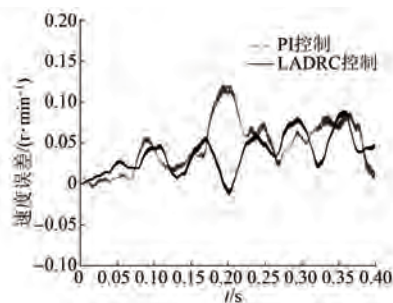


图8 LADRC 控制与PI 控制下转速误差对比

0.05 r/min, 降低约38%, 在一定程度上提高了系统的控制精度。

图9、图10分别为LADRC控制与PI控制下的电机无感估算角度与实际角度对比。由图9和图10可知, 在LADRC控制与PI控制下, 高频正弦电压注入无感算法可以正确地对电机角度进行估计, 从而对电机进行矢量控制。

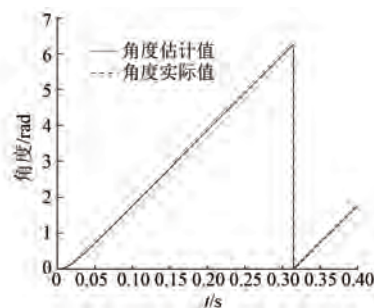


图9 LADRC 控制角度实际值与角度估计值对比

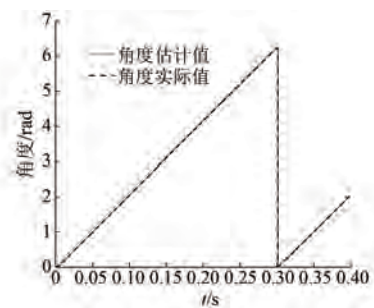


图10 PI 控制角度实际值与角度估计值对比

图11为LADRC控制与PI控制下, 电机无感估算角度与实际角度误差对比。由图11可知, LADRC控制下最大角度误差降低约45%, 有效提高了高频注入无感控制算法的角度估算精度。

3.3 试验结果

为验证所提控制策略在实际工程应用中的可行性与有效性, 本文基于NXP MC9S12ZVM单片

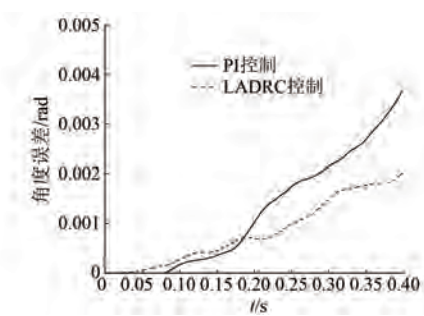


图 11 LADRC 控制与 PI 控制角度估计差对比

机设计永磁同步电机控制器,如图 12 所示,同时设计电机试验平台,如图 13 所示。选用一台额定功率为 450 W 的内嵌式永磁同步电机为测试电机,其电气参数如表 1 所示。试验分别使用 LADRC 控制器与 PI 控制器对电机转速环进行控制,使用高频正弦电压注入方法获取电机转速与角度信息,其中注入正弦电压幅值为 2 V,频率为 500 Hz。所选试验电机为电子油泵电机,综合考虑常温低速下负载情况,设定电机目标转速为 500 r/min,进行空载起动以及 0.2 N·m 与 0.3 N·m 加/减载试验,速度与角度估计值由高频注入算法解算获得,转速与角度实际值由传感器 A1333 获得,试验结果如图 14~图 19 所示。



图 12 永磁同步电机控制器

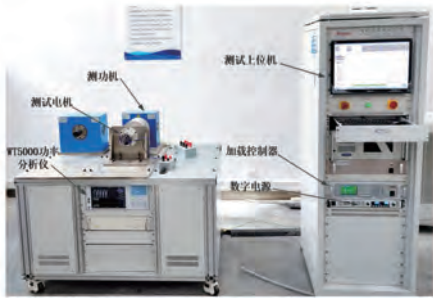


图 13 永磁同步电机试验平台

图 14 为 LADRC 控制与 PI 控制下电机转速

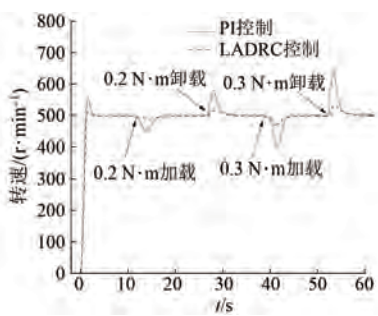


图 14 LADRC 控制与 PI 控制下电机转速响应对比

响应对比。由图 14 可知,电机空载起动时,在 PI 控制下,电机转速有 59 r/min 超调,而在 LADRC 控制下,电机转速仅有 12 r/min 超调。当系统施加 0.2 N·m 与 0.3 N·m 负载时,LADRC 控制相比 PI 控制具有较小的转速波动,系统的鲁棒性更好。

图 15 为 PI 控制与 LADRC 控制下高频估算转速与传感器转速误差对比。由图 15 可知,PI 控制下的转速误差的标准偏差为 20.2 r/min,而 LADRC 控制下转速误差的标准偏差为 14.3 r/min,约降低 30%,提升了高频注入无感算法求解效果。

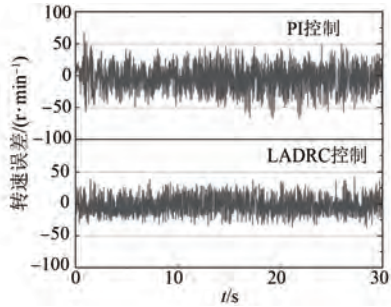


图 15 PI 控制与 LADRC 控制下高频估算转速与传感器转速误差对比

图 16 与图 17 分别为 LADRC 控制下与 PI 控制下无感角度与传感器角度对比,图 18 为 PI 控

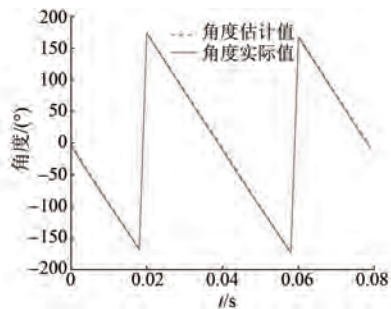


图 16 LADRC 控制下无感角度与传感器角度对比

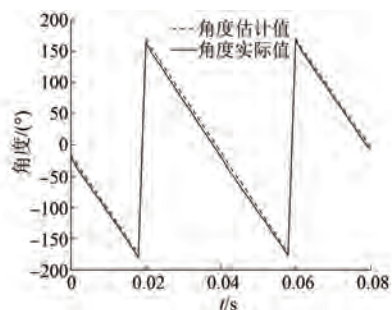


图 17 PI 控制下无感角度与传感器角度对比

制与 LADRC 控制下无感角度与传感器角度误差对比。由图 16~图 18 可知, LADRC 控制下, 平均角度误差为 2.78° , 而 PI 控制下, 平均角度误差为 5.76° 。LADRC 控制有效降低了角度误差 3° , 与仿真结果趋势一致。

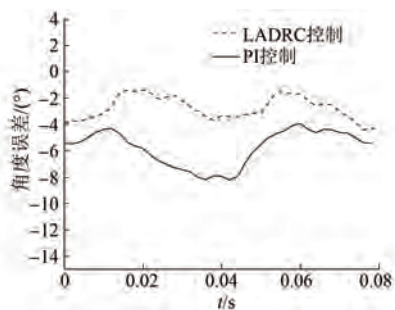


图 18 LADRC 控制与 PI 控制下角度误差对比

图 19 为 LADRC 控制下永磁同步电机分别在空载、 $0.2 \text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $0.3 \text{ N}\cdot\text{m}$ 载荷工况下的三相电流曲线, 该曲线表明了 LADRC 控制下系统的稳定性很好。

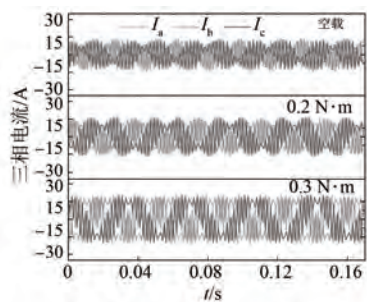


图 19 LADRC 控制下的三相电流曲线

为验证电机控制系统在不同转速下的稳定性, 对电机进行 $0 \sim 500 \text{ r/min}$ 的阶梯转速控制试验, 结果如图 20 所示。由图 20 可知, 系统在各转速下, LADRC 控制与 PI 控制均能使电机在目标转速稳定运行。当目标转速发生变化时, LADRC

控制的超调更小、转速控制更平稳, 且系统具有更好的鲁棒性。

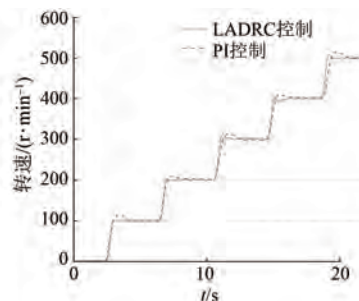


图 20 LADRC 控制与 PI 控制下阶梯转速控制

上述试验结果表明, 与 PI 控制相比, LADRC 控制可有效降低转速超调与波动, 具有较好的鲁棒性, 降低了高频注入无感算法由于滤波器引入所造成的角度滞后, 提高了速度与角度估算精度。试验结果与仿真结果趋势一致, 表明本文所提 LADRC 控制方法具有良好的工程应用前景。

4 结 语

(1) 针对高频正弦电压注入的永磁同步电机控制系统, 提出了基于线性自抗扰的转速闭环控制方法, 提升了电机的控制精度与控制效果。

(2) 建了 Simulink 仿真模型并进行仿真分析, 仿真结果验证了所提策略的正确性与有效性, 能够实现永磁同步电机零速、低速下的起动需求。

(3) 基于 MC9S12ZVM 单片机设计电机控制器并进行试验, 试验结果表明该方法有效降低高频正弦电压无感算法的转速与角度估算误差, 并且具有较好的鲁棒性, 同时验证了该方法在工程实际应用中的可行性。

【参考文献】

- [1] 周涛. 永磁同步电机调速系统的自抗扰控制[J]. 光学精密工程, 2016, 24(3): 582.
- [2] 封志鹏, 李白雅, 张宇祥. 自抗扰 ESO 改进及其在 PMSM 控制中的应用[J]. 微电机, 2022, 55(3): 47.
- [3] 焦姣姣, 张兴华. 永磁同步电机调速系统的自抗扰控制器设计[J]. 微电机, 2015, 48(11): 77.
- [4] 栾东雪, 许鸣珠, 刘进志. 永磁同步电机的线性自抗扰控制及其参数整定研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2015, 28(3): 62.
- [5] 廖自力, 赵其进, 刘春光. 基于自抗扰技术的

- PMSM 无位置传感器优化控制[J]. 微电机, 2018, 51(7):44.
- [6] YOON Y D, SUL S K, MORIMOTO S, et al. High-bandwidth sensorless algorithm for AC machines based on square-wave-type voltage injection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3):1361.
- [7] 谢平, 包广清, 祁武刚, 等. 高频信号注入的 PMSM 无传感器低速运行优化控制[J]. 兰州理工大学学报, 2022, 48(5):85.
- [8] 邵俊波, 王辉, 黄守道, 等. 一种表贴式永磁同步电机无位置传感器低速控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5):1534.
- [9] 吕睿龙, 孙丽萍, 杨贵杰. 基于高频旋转电压注入法的 IPMSM 转子位置估算策略[J]. 微特电机, 2014, 42(3):21.
- [10] 范立荣, 黄景鹏, 李怀俊. 一种改进型高频注入无位置控制算法实现[J]. 广东交通职业技术学院学报, 2021, 20(2):41.
- [11] 巫庆辉, 黄成鑫, 侯元祥. 基于高频方波电压注入法和改进龙伯格观测器的永磁同步电机转速估计的研究[J]. 电气工程学报, 2021, 16(4):120.
- [12] 王清清, 胡继胜. 基于高频注入法的内置式永磁同步电机无传感器控制[J]. 电工技术, 2022(17):197.
- [13] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学, 2007(1):24.
- [14] 唐彬彬, 徐道明, 吴若鹭. 永磁同步电机自抗扰控制调速系统[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(3):12.
- [15] 迟世伟, 刘慧博. 基于前馈补偿的永磁同步电机自抗扰控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(1):9.
- [16] 袁雷, 胡冰新, 魏克银, 等. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2016.
- [17] 胡锦涛, 邵宜祥, 周百灵, 等. 基于新型高频注入的永磁同步电机无传感器控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(9):34.
- [18] 宋同月, 颜建虎, 应展峰, 等. 基于脉振高频注入法的零低速永磁直线同步电机无位置传感器控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(11):10.
- [19] 曹以龙, 郭茂, 邵嗣杨, 等. 基于脉振高频注入的 PMSM 无传感器控制[J]. 上海电力大学学报, 2022, 38(1):17.

[期刊简介]

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发行人,邮发代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的

贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。近年还被 JST 日本科学技术振兴机构数据库(日)和 Pж(AJ)文摘杂志(俄)等国外数据库收录。为及时刊载上述技术领域的最新研究动态,推广研发成果,推动研究与应用的紧密结合,欢迎各高校相关课题组及团队和科研技术人员等向本刊投稿,本刊不收取任何版面费或审稿费等费用!

《电机与控制应用》官网: <http://www.motor-abc.cn/djykyz/home>.