

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108665

一种非线性自抗扰控制的 PMSM 速度控制策略研究*

匡萃璋 汪华章

(西南民族大学电气工程学院 成都 610041)

摘要: 针对永磁同步电机伺服系统中存在的抗负载扰动能力差和转速超调等问题,提出一种基于非线性自抗扰控制的新型 PMSM 速度控制策略。通过分析伺服系统的扰动机理,在速度环将传统的 PI 控制器替换为非线性自抗扰控制器。通过跟踪-微分器将给定转速平滑化,克服了响应快速性和超调之间的矛盾,提升系统响应能力;通过引入二阶扩张状态观测器,对外部扰动进行估计并补偿,提高系统的抗干扰能力;通过非线性状态误差反馈控制律,利用“小误差大增益,大误差小增益”的非线性控制,提高系统的控制精度。仿真结果表明,系统具有响应快、无超调、抗负载扰动能力强的特点,对负载变化、转速变化具有较强的鲁棒性,验证了该策略的有效性。

关键词: 永磁同步电机;自抗扰控制器;速度控制;速度-电流双闭环

中图分类号: TM341 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

Research on PMSM speed control strategy of nonlinear active disturbance rejection control

Kuang Cuizhang Wang Huazhang

(School of Electrical Engineering, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China)

Abstract: A novel PMSM speed control strategy based on nonlinear active disturbance rejection control was proposed to solve the problems of poor anti-load disturbance ability and speed overshoot in PMSM servo system. By analyzing the disturbance mechanism of the servo system, the traditional PI controller is replaced by a nonlinear active disturbance rejection controller in the speed loop. The contradiction between response speed and overshoot is overcome by smoothing the given speed with tracking-differentiator, and the response capability of the system is improved. The second order extended state observer is introduced to estimate and compensate the external disturbance and improve the anti-interference ability of the system. Through nonlinear state error feedback control law, the nonlinear control of "small error with large gain, large error with small gain" is used to improve the control precision of the system. Simulation results show that the system has the characteristics of fast response, no overshoot, strong ability to resist load disturbance, and strong robustness to load change and speed change, which verifies the effectiveness of the strategy.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; active disturbance rejection controller; speed control; velocity-current double closed loop

0 引言

随着我国工业化进程的不断加快,相关行业的工艺水平要求不断提高,因此对伺服控制系统性能的要求也在不断提高。在如今诸多的伺服系统中,永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)因其具有转矩电流比高、动态响应性能好、稳定性好,运行效率高等优点,因此被广泛使用。目前,基于传统 PID 控制策略的

PMSM 伺服控制系统仍被普遍采用^[1]。但是由于其是“基于误差来消除误差”^[2],对参数和负载变化适应性差,抗干扰能力较弱,因此难以满足高性能的控制要求。在这样的情况下,就迫切需要一种性能更优良的伺服控制器,所以对 PMSM 伺服控制器的研究成为了热点。

为了减小干扰带来的不利影响,相关研究人员采取了多种控制策略。按是否是基于 PID 的控制策略,可以分为基于 PID 结构的控制策略和非 PID 结构的控制策略^[3]。

收稿日期:2021-12-23

* 基金项目:西南民族大学中央高校基本科研业务费专项资金(2021101)项目资助

对于基于 PID 控制结构的控制策略,据整定策略又可以细分为基于模型的 PID 参数自整定和基于规则的 PID 参数自整定^[4]。对于基于非 PID 控制结构的控制策略,一般是脱离了常用的 PID 结构,并且也不涉及 PID 控制参数的整定。这类控制策略的共性是并不针对系统的某一扰动,而是对系统的全局扰动整体把握,进行抗扰动设计。常见的有内模控制^[5]、滑模变结构控制^[6]和自抗扰控制^[7]等。

自抗扰控制器(active disturbance rejection controller, ADRC)是中科院韩京清研究员在研究抑制系统扰动中,吸取传统的 PID 控制思想的精华,结合现代控制理论,提出的一种不依赖对象精确数学模型的新型非线性鲁棒控制技术^[8]。已经有许多关于 ADRC 在电机控制领域方面的研究^[9-16]。其中,文献[9]在 PMSM 电流环中应用改进型的模型补偿 ADRC 控制器,取代传统的 PI 控制器,取得了较好的效果,但控制精度依赖于补偿模型的准确度。文献[10]对非线性多输入多输出 PMSM 系统进行解耦,用 ADRC 对 PMSM 进行矢量控制,降低了参数调试的难度,但同时解耦也增加了系统建模的复杂度,更为繁琐。文献[14]在速度环将 ADRC 与模糊控制器结合,研究系统的抗扰性能,提高了控制精度,但模糊规则的设计全凭经验进行,降低了系统的动态品质。文献[15]借鉴了滑模控制系统,对白抗扰速度控制器进行改进,提高了系统响应性能,但当状态轨迹到达滑动模态面后,难以严格沿着滑动模态面向平衡点滑动,系统容易产生抖振。文献[16]将滑模控制与自抗扰控制相结合,并应用在电流环中,增强了系统抗干扰能力,但转速存在一定抖振。

本文针对 PMSM 伺服系统存在的抗干扰能力差和转速超调等问题,提出一种基于非线性自抗扰控制的控制方法,将 ADRC 应用到 PMSM 伺服系统的速度环中。从传统的位置、速度和电流三环串级控制变为速度和电流的双闭环串级控制,简化了系统的控制结构和参数调试的过程。在建立了 PMSM 数学模型的基础上,给出速度环 ADRC 的设计方法,并在 MATLAB/Simulink 中进行建模,对 PMSM 伺服控制系统的性能进行研究。仿真结果证明了在该控制策略下,系统具有响应快、无超调、抗负载扰动能力强的特点,并对负载变化、转速变化具有较强的鲁棒性,验证了该策略的有效性和可行性。

1 PMSM 数学模型

d - q 同步旋转坐标系下的电机数学模型如下所示,电机定子电压方程为^[17]:

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

式中: u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴电压; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流; ψ_d 、 ψ_q 分别为 d 、 q 轴磁链; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感;

ω_e 为电机转子电角速度。

电机定子磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: ψ_f 为永磁体磁链。

电机转矩方程为:

$$T_e = 1.5 P_n (\psi_d i_q - \psi_q i_d) = 1.5 P_n [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

式中: T_e 为电磁转矩; P_n 为电机极对数。

由于本文是以表贴式转子结构的永磁同步电机为研究对象的,所以有 $L_d = L_q$,并且采用 $i_d = 0$ 的控制策略,此时式(3)可近似改写为:

$$T_e = 1.5 P_n \psi_f i_q \quad (4)$$

电机运动方程为:

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (5)$$

式中: T_L 为负载转矩; J 为转动惯量; B 为粘滞系数; ω_m 为机械角速度。

2 伺服系统自抗扰控制器

2.1 ADRC 简介

典型的二阶自抗扰控制器包括 3 个组成部分,分别是跟踪微分器(tracking differentiator, TD)、扩张状态观测器(extended state observer, ESO)和非线性状态误差反馈控制律(nonlinear state error feedback, NLSEF)。其结构如图 1 所示。

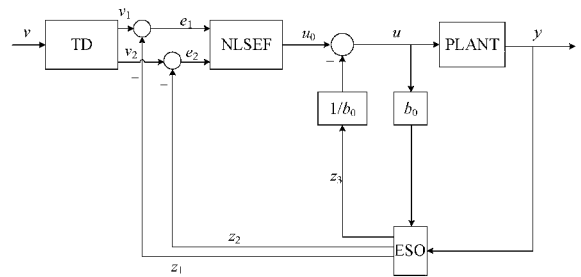


图 1 ADRC 结构

其中,TD 对输入信号 v 进行处理,实现了 v_1 快速无超调跟踪输入信号,而 v_2 是输入信号的近似微分;ESO 观测系统的实时状态变量, z_1 是输出 y 的跟踪信号, z_2 是输出 y 的近似微分, z_3 是系统总扰动的观测值; v_1 、 v_2 与 z_1 、 z_2 分别作差得到 e_1 、 e_2 作为 NLSEF 的输入,在 NLSEF 中引入适当的非线性函数对输入信号处理后得到相应的输出信号 u_0 ,将系统化成了一个标准的积分器串联型系统。

因本文是针对永磁同步电机速度环进行自抗扰控制器进行设计,因此以电流作为输入量,以永磁同步电机的转速作为输出量,建立数学模型,如式(5)所示。

对于一个典型的一阶系统:

$$\dot{y} = f(y, \omega(t), t) + bu \quad (6)$$

式中: $\omega(t)$ 为外部扰动值; f 为综合了外部扰动和系统内部扰动的总扰动值; u 为系统的控制量。此时, 令 $y=x$, 可以得到系统的状态方程:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, \omega(t), t) + bu \\ y = x \end{cases} \quad (7)$$

ADRC的核心在于利用ESO观测并估计总扰动值, 并利用误差反馈控制律进行补偿, 从而把系统简化成标准的积分器串联型, 简化控制。

1) 速度环 TD 设计

对PMSM伺服控制系统的输入速度信号进行安排过渡过程的处理, 得到如下数学模型^[18]:

$$\begin{cases} e_1 = z_{11} - y^* \\ \dot{z}_{11} = -rfal(e_1, \alpha_1, \delta_1) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中 fal 函数定义如下:

$$fal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sign}(e), & e > \delta \\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha}}, & e \leq \delta \end{cases} \quad (9)$$

式中: r 为控制跟踪信号快慢的变量, 与跟踪速度成正比; z_{11} 是安排过渡过程后的速度信号; y^* 是给定的速度信号; δ_1 为滤波因子。安排过渡过程要考虑系统的承受能力。

2) 速度环 ESO 设计

对PMSM速度环建立ESO的数学模型^[19]为:

$$\begin{cases} e_2 = z_{21} - y \\ \dot{z}_{21} = z_{22} - \beta_{21}fal(e_2, \alpha_2, \delta_2) + bu \\ \dot{z}_{22} = -\beta_{22}fal(e_2, \alpha_3, \delta_2) \end{cases} \quad (10)$$

式中: z_{21} 是实际输出 y 的观测值; z_{22} 是对系统总扰动的估计值, δ_2 为滤波因子, β_{21} 、 β_{22} 为要调整的参数, e_2 为观测值 z_{21} 与跟踪信号 y 的误差值。

3) 速度环 NLSEF 设计

对PMSM速度环的NLSEF进行设计的数学模型如下:

$$\begin{cases} e_3 = z_{11} - z_{21} \\ u_0 = \beta_{33}fal(e_3, \alpha_4, \delta_3) \\ u = u_0 - \frac{z_{22}}{b} \end{cases} \quad (11)$$

式中: e_3 为安排过渡过程后的速度信号 z_{11} 与实际输出 y 的观测值 z_{21} 的误差, $-z_{22}/b$ 是补偿扰动的分量。

2.2 速度环 ADRC 控制器设计

由式(3)和(5)可得, 在 $i_d=0$ 的控制策略下有:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1.5P_n\psi_f i_q - T_L - B\omega_m}{J} = \frac{1}{J}1.5P_n i_q \psi_f - \frac{1}{J}(B\omega_m + T_L) \quad (12)$$

在 $d-q$ 同步旋转坐标系下的电流方程重写为:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d}(u_d + \omega_r L_q i_q) \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q}(u_q - R_s i_q - \omega_r \psi_f) \end{cases} \quad (13)$$

由式(12)可以看出, i_q 、 T_L 、 ω_r 等因素对电机速度有影响。将 i_q 作为控制的变量, 可以把其他因素视为总扰动, 则总扰动为:

$$a(t) = -\frac{1}{J}(B\omega_m + T_L) \quad (14)$$

那么式(6)可以改写为:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J}1.5P_n\psi_f i_q + a(t) \quad (15)$$

结合第2.1节的内容, 将电流 i_q 视为控制量, 把给定信号 ω_m^* 和实际转速作为ADRC控制器的输入, 则PMSM速度环可以视为一个一阶系统^[20]。图2所示为其控制结构框图。

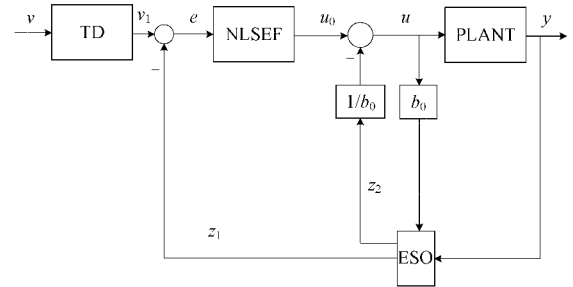


图2 PMSM速度环ADRC结构框图

3 仿真研究及结果分析

本章节针对PMSM速度环在传统PI控制器和非线性自抗扰控制器下, 对PMSM伺服控制系统的额定转速响应、抗负载转矩扰动速度响应、不同转速设定值下响应鲁棒性和额定转速带负载下其他的电机性能指标进行对比分析, 验证非线性自抗扰控制器的有效性和可行性, 说明非线性自抗扰控制器较之传统的PI控制器, 可以使电机转速响应快速无超调, 具有更好的抗负载扰动能力, 转速响应的鲁棒性好。

3.1 Simulink 模型搭建

为验证ADRC控制器的有效性, 在MATLAB/Simulink搭建模型。其基本框图如图3、4所示。

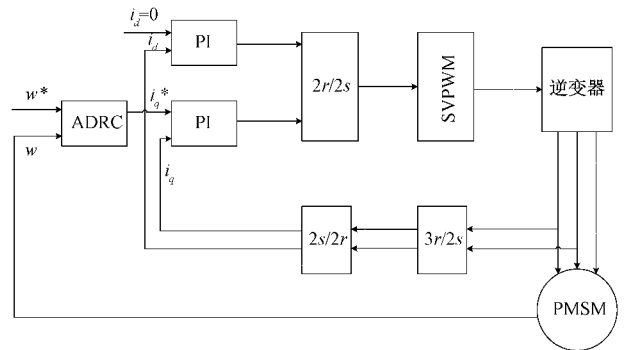


图3 基于自抗扰控制的PMSM控制系统框图

仿真中的永磁同步电机参数如下: 极对数 $P_n=4$; 交、直轴电感 $L_d=L_q=6.5$ mH, 定子电阻 $R_s=1.96$ Ω , 永磁

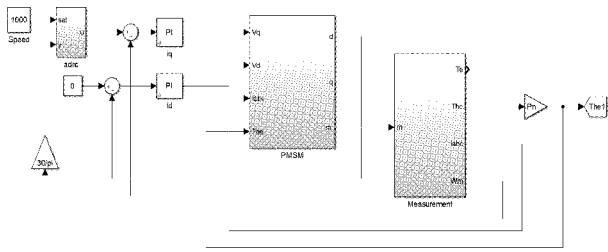


图 4 ADRC 闭环控制系统 Simulink 仿真框图

体磁链 $\psi_f=0.23$ Wb,转动惯量 $J=0.003$ kg·m²,粘滞系数 $B=0.008$ N·m²,额定转速为 1 000 r/s,额定电压为 311 V。为了验证上述理论,本文将传统 PI 控制与基于 ADRC 的控制器进行对比分析。

3.2 仿真结果及分析

1) 额定转速响应

如图 5 所示为 ADRC 与 PI 控制的转速仿真结果波形对比。给定额定转速 1 000 r/min,可以看到在 ADRC 控制下,电机在 0.03 s 时达到指定转速,并且无明显超调。

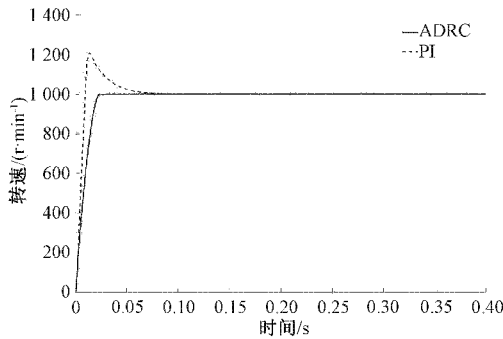


图 5 额定转速下速度跟踪波形

传统 PI 控制器存在着明显超调。由于在速度环 ADRC 控制器中跟踪微分器安排了过渡过程,所以 PI 控制下的启动快速性是略微高于 ADRC 控制的。也正是由于跟踪微分器的存在,所以解决了系统响应快速性和超调这一矛盾。

2) 抗负载转矩扰动

其他参数不变下,在 0.2 s 突然加上 10 N·m 的负载,如图 6 所示,在自抗扰控制器下速度波动幅值绝对值远小于 PI 控制器的,且恢复到额定转速的时间更短,说明带负载时该控制策略仍具有较好的抗干扰性能。

3) 不同设定值下的转速响应

为了测试所用控制策略的鲁棒性,在额定转速下,保持系统原有参数不变,分别将转速设置为额定转速的 1.2 倍、0.8 倍,让永磁同步电机在额定转速下实现正反转以及进行加减速实验,测试系统性能。仿真结果如图 7~10 所示。实验结果表明,在转速设置为额定转速 1.2 倍和 0.8 倍时,转速波形响应结果基本与 3.1 节所述一致。在 0.3 s 时将设定转速突然设置为 -1 000 r/min,仿真结果表明,自抗扰

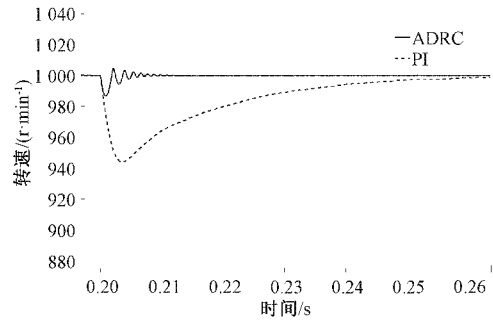


图 6 0.2 s 突加负载速度响应波形

控制器下的电机反转时仍无明显超调,且具有较好的快速性。在初始时设置转速为 600 r/min,0.2 s 时设置为额定转速,0.4 s 时再次设置为 600 r/min,实验结果验证了自抗扰控制器下电机加减速仍快速无超调,具有较好的控制性能。

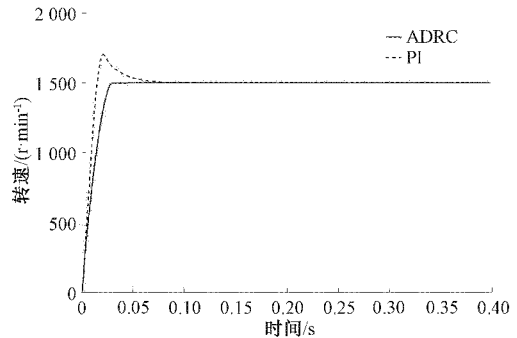


图 7 设定值 1 200 r/min 速度响应波形

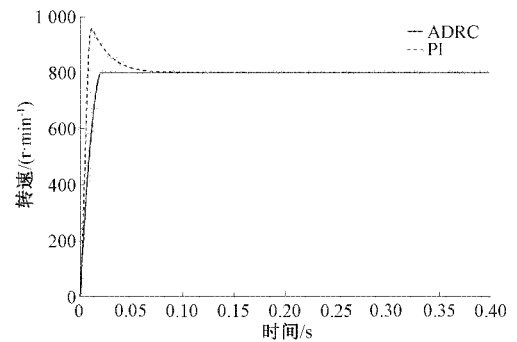


图 8 设定值 800 r/min 速度响应波形

4) 额定转速带负载下其他指标对比

为了更深入研究两种控制器的性能,现在额定转速带负载的情况下,分别将 PMSM 的转矩, d 轴电流和三相电流在两种控制策略下的仿真波形进行对比。

图 11 为 ADRC 与传统 PI 控制下电机电磁转矩的响应波形对比曲线,可以看出在 ADRC 控制下的转矩波形更为平滑,起始最大转矩更小,显示出了更好的起动力性能。

图 12 为电机实际 d 轴电流的输出波形。可以看出在 ADRC 的控制策略下, d 轴电流值的波动在 $[-1, 3]$ 左右的范围内,而传统 PI 控制器的 d 轴电流值波动在 $[-4, 4]$ 左

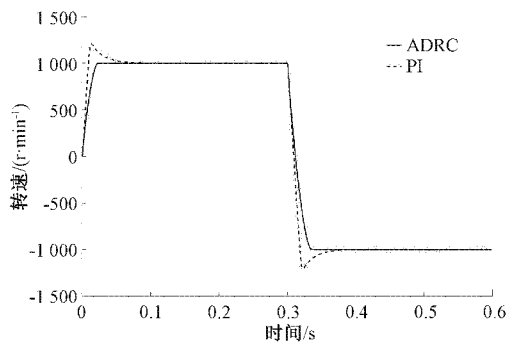


图9 额定转速正反转速响应波形

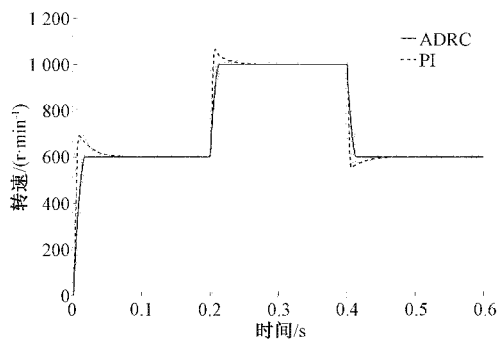


图10 加减速度响应波形

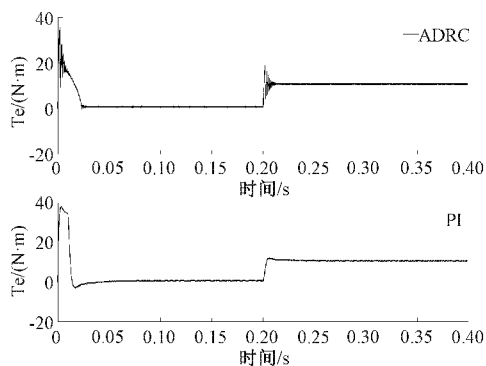


图11 额定转速带负载下电磁转矩响应波形对比

右的范围内。结果表明在ADRC控制器作用下 d 轴电流环的实际性能表现也是优于PI控制器的。

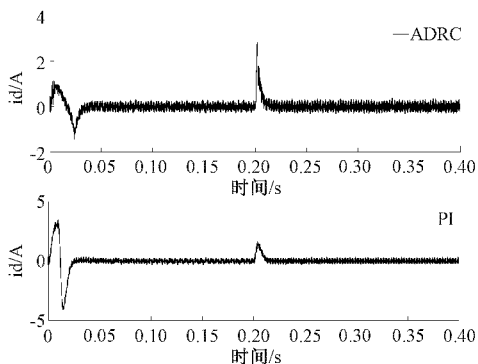
图12 额定转速带负载下 d 轴电流波形对比

图13为电机三相电流在两种控制方案下的实际输出波形。可以看出,ADRC控制下的三相电流峰值更小,在达到稳态时,三相电流的输出波接近于正弦波,可以更好地产生旋转磁动势。

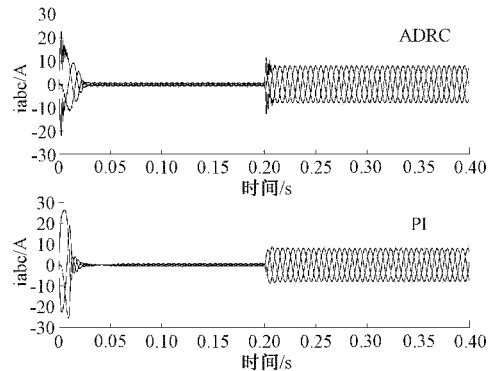


图13 额定转速带负载下电机三相电流波形对比

基于以上仿真实验结果,本文所提出的基于非线性自抗扰控制的PMSM速度控制策略是有效且可行的,不仅提高了系统的抗干扰能力,解决了响应快速性和转速超调的矛盾,同时也具有更强的鲁棒性。

4 结论

本文从传统PI控制的PMSM伺服系统存在转速响应超调量大,抗干扰能力差的角度出发,根据自抗扰控制机理,将非线性自抗扰控制器引入转速环,给出了典型速度环自抗扰控制器的一般设计方法,将自抗扰控制策略与传统PI控制策略进行对比研究。仿真和实验结果表明,本文提出的非线性自抗扰控制器应用在速度环,解决了速度响应存在超调的问题,并且具备一定的抗干扰能力,鲁棒性较强。说明该控制策略具有一定的实际应用价值,是一种有效的永磁同步电机调速策略。但该控制策略在负载突变等扰动下,系统响应性能还有提升空间,抗扰能力还有待加强。下一步主要对在电机参数失配、大负载突变等情况下该控制策略的有效性进行研究。改进的方向包括在电流环使用非线性自抗扰控制器和对非线性自抗扰控制中的非线性函数进行改进,以提升PMSM伺服系统的性能。

参考文献

- [1] 张文娟. 高性能永磁同步电机控制方法的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [2] 曹正策, 楚育博. 基于自抗扰的永磁同步电机矢量控制系统[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(1): 67-71.
- [3] 黄文俊. 基于优化ADRC的伺服控制技术的研究与开发[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
- [4] 李红梅, 陈涛. 永磁同步电机参数辨识研究综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 638-647.
- [5] 刘宗锋, 荣德慧, 王世国, 等. 永磁同步电机模糊PID-内模控制系统研究[J]. 机械设计与制造, 2021(9): 85-89.

- [6] 张永硕,王浩,周显龙,等. 永磁同步电机的改进型滑模变结构控制研究[J]. 机电元件,2021,41(3):20-23.
- [7] 黄庆. 交流永磁电机伺服系统复合自抗扰控制策略研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.
- [8] 韩京清. 一类不确定对象的扩张状态观测器[J]. 控制与决策,1995,(1): 85-88.
- [9] GAO Y N, HUO X, MA K M, et al. Modified model-compensation ADRC controller and its application in PMSM current loop[J]. International Journal of Modelling, Identification and Control,2021, 35(2):140.
- [10] LIU Y H, WEN J Y, XU D CH, et al. The decoupled vector-control of PMSM based on nonlinear multi-input multi-output decoupling ADRC [J]. Advances in Mechanical Engineering,2020.
- [11] 崔东明,任俊杰,黄济文,等. 永磁同步电机调速系统自抗扰控制策略的研究[J]. 电机与控制应用,2021, 48(5):14-20.
- [12] GUO B, BACHA S, ALAMIR M. A review on ADRC based PMSM control designs [C]. IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, 2017: 1747-1753.
- [13] MENG Y B, LIU B Y, WANG L C. Speed control of PMSM based on an optimized ADRC controller[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019.
- [14] SU G. Fuzzy ADRC controller design for PMSM speed regulation system[C]. Advanced Materials Research, Trans Tech Publications Ltd, 2011, 201: 2405-2408.
- [15] RONG Z, HUANG Q. A new PMSM speed modulation system with sliding mode based on active-disturbance-rejection control [J]. Journal of Central South University, 2016, 23(6): 1406-1415.
- [16] 任丽媛,张旭秀. 基于滑模自抗扰的永磁同步电机电流环控制方法研究[J]. 电子测量技术,2019,42(9): 14-18.
- [17] 蒋文坚. 基于改进 ADRC 技术的永磁同步电机伺服系统抗干扰研究[J]. 微电机, 2021,54(4):69-71,93.
- [18] 崔东明,任俊杰,黄济文,等. 永磁同步电机调速系统自抗扰控制策略的研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(5): 14-20.
- [19] 王坤,张立广,王琪. 基于改进型粒子群算法的扩张状态观测器[J]. 国外电子测量技术,2017,36(8):66-70.
- [20] 白晨光,魏晓静,邱鑫,等. 永磁同步电机非线性自抗扰复合型控制策略研究[J]. 微特电机, 2021, 49(4): 46-50.

作者简介

匡萃璋,硕士研究生,主要研究方向为永磁同步电机伺服控制技术。

E-mail:kcw@stu.swun.edu.cn

汪华章(通信作者),教授,硕士生导师,主要研究方向为智能控制与模式识别、通信与信息系统、电机驱动及控制。

E-mail:wanghuazhang@swun.edu.cn