

# 基于 PI 观测器的永磁同步电机自抗扰 电流解耦控制

胡 顺, 沈 跃, 刘国海

(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘 要:** 为了提高永磁同步电机(PMSM)电流环的电流解耦效果,提出一种基于PI观测器(PIO)的自抗扰电流解耦方法。该方法将PIO和扩张状态观测器相结合,实时准确地估计系统中的扰动,并将观测出的扰动量作为补偿值反馈到输入端,从而实现 $d$ 、 $q$ 轴间电流解耦、抑制扰动。对改进前后自抗扰控制器(ADRC)的扰动跟踪性能,闭环控制系统的抗扰性及稳定性做了理论分析。仿真和试验结果表明,引入PIO后,ADRC的扰动观测能力和电流解耦效果得到了提高,验证了所提方法的可行性和有效性。

**关键词:** 永磁同步电机; 电流解耦; 自抗扰控制; PI观测器

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)11-0040-07

doi: 10.12177/emca.2020.145

## Current Decoupling Control of PMSM with ADRC Strategy Based on PI Observer

HU Shun, SHEN Yue, LIU Guohai

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** In order to improve the current decoupling effect of permanent magnet synchronous motor (PMSM), an active disturbance rejection control (ADRC) method with current decoupling based on PI observer (PIO) is proposed. In this method, PIO and extended state observer are combined to estimate the disturbance accurately in real time, and the observed disturbance is fed back to the input as compensation value, so as to realize the current decoupling between  $d$  and  $q$  axes and suppress the disturbance. The disturbance tracking performance of the improved ADRC and the disturbance rejection performance and stability of the closed-loop control system are analyzed theoretically. The results of simulation and experiment show that the disturbance estimation ability of ADRC is enhanced and the decoupling effect of current loop is improved after introducing PIO, which verifies the feasibility and effectiveness of the proposed method.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); current decoupling; active disturbance rejection control (ADRC); PI observer (PIO)

## 0 引 言

矢量控制策略将定子电流分解为励磁和转矩分量,期望实现磁通和转矩的独立控制,然而采用

PI控制器的传统电流控制策略无法解决电流环交叉耦合的问题,由于耦合项的存在,当其中一轴上的电流发生变化时,另一轴上的电流会受到干扰而产生一个瞬时误差,降低系统的动态性能<sup>[1]</sup>。

收稿日期: 2020-07-17; 收到修改稿日期: 2020-09-10

作者简介: 胡 顺(1995—),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机高性能控制。

沈 跃(1978—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为农业装备电驱动、无人驾驶。

刘国海(1964—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电机控制、非线性智能控制等。

因此,有必要采取措施对电流环进行解耦控制。

为了提高电流解耦效果,已有学者提出了相关方案。文献[2]采用电流反馈解耦(CFDC)策略来消除耦合影响,即通过获得反馈电流、电感参数和转速信息对耦合电压进行直接计算来消除耦合项。该方法操作简单、易于实现,但对电机电感参数的鲁棒性差,当电感估计值与实际值存在偏差时,耦合项不能够被完全消除。文献[3]介绍了一种内模控制(IMC)电流解耦策略,解耦效果和参数鲁棒性得到了提升,但是系统在进入稳态前容易出现欠阻尼振荡现象。偏差解耦控制(DDC)策略是IMC方法的变形,文献[4]采用该方法来消除耦合效应的影响,但是与IMC方法一样,同样也存在欠阻尼振荡的问题。文献[5]提出了一种基于扰动观测器的偏差解耦控制(DDC-DOB)策略,利用扰动观测器对电流耦合和电感参数变化引起的扰动进行观测和补偿,但所用线性扰动观测器扰动跟踪能力不足会影响解耦效果。文献[6]使用PI观测器(PIO)代替解耦网络,实时观测扰动并前馈补偿,可实现电流环的解耦控制,然而单个线性观测器的扰动跟踪能力有限,解耦效果并非最优。文献[7]采用非线性自抗扰控制(ADRC)代替传统PI控制,该方法解耦效果好、抗扰能力强,但非线性需要整定的参数较多,调节起来较困难。文献[8]设计了新型电流环线性ADRC系统来解决永磁直线同步电机的电流耦合问题,线性ADRC的参数容易整定,但其控制精度不如非线性ADRC。

与其他解耦方法相比,ADRC具有对电机参数摄动鲁棒性好、抗扰能力强的优点,线性扩张状态观测器(LESO)的参数容易整定,便于工程实现,但其扰动观测能力不足会影响解耦效果。为此,本文分析了自抗扰电流解耦方法,在此基础上提出了一种基于PIO的自抗扰解耦控制策略,通过将PIO与LESO相结合,可以克服单个LESO扰动跟踪能力不足的问题。本文对于所提控制器的扰动跟踪性能、闭环控制系统的抗扰性及稳定性做了理论分析和讨论。最后,通过仿真和试验验证了所提方法的可行性和有效性。

## 1 电流环扰动分析

### 1.1 永磁同步电机数学模型

永磁同步电机(PMSM)在dq旋转坐标系下

的数学模型为

$$\begin{cases} \dot{i}_d = \frac{u_d}{L_d} - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{\omega_e L_q}{L_d}i_q \\ \dot{i}_q = \frac{u_q}{L_q} - \frac{R}{L_q}i_q - \frac{\omega_e L_d}{L_q}i_d - \frac{\omega_e \psi_f}{L_q} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i_d$ 、 $i_q$ 分别为d、q轴电流; $u_d$ 、 $u_q$ 分别为d、q轴电压; $L_d$ 、 $L_q$ 分别为d、q轴电感; $R$ 为定子电阻; $\omega_e$ 为转子的电角速度; $\psi_f$ 为转子永磁体磁链。

式(1)中的电流耦合项为 $\omega_e L_d i_d$ 和 $\omega_e L_q i_q$ ,耦合效应与转子的转速成正比,导致电机在高速运行时的电流耦合现象更为严重,若不采取有效措施消除耦合效应的影响,将会严重降低系统的动态性能。

### 1.2 PMSM 等效控制模型

电机参数变化、定子电阻压降、电流耦合项、系统未建模部分和各种外部扰动均可视为电流环的扰动量,用 $\gamma(t)$ 表示。则式(1)可重新表示为

$$\begin{cases} \dot{i}_d = \frac{1}{L_d s} (u_d + \gamma_d) \\ \dot{i}_q = \frac{1}{L_q s} (u_q + \gamma_q) \end{cases} \quad (2)$$

若采取适当的方法,观测出扰动量 $\gamma_d$ 、 $\gamma_q$ ,并进行补偿,可将PMSM模型简化为一阶纯积分环节,如图1所示。

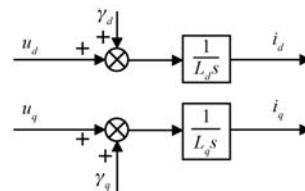


图1 PMSM 等效控制模型

## 2 自抗扰解耦控制

### 2.1 ADRC 设计

由于d轴和q轴电流环ADRC的设计方法类似,这里以d轴为例进行说明。

令总扰动 $a = \gamma_d / L_d$ ,根据式(2),d轴电流方程可以表示为

$$\dot{i}_d = \frac{1}{L_d} u_d + a \quad (3)$$

取状态变量 $x_1 = i_d$ , $x_2 = a(t)$ ,令 $u = u_d$ , $b = 1 / L_d$ ,则有:

$$\dot{x}_1 = bu + x_2 \quad (4)$$

为了便于参数整定,采用 LESO 观测扰动。  
LESO 设计为

$$\begin{cases} e_{s1} = s_1 - x_1 \\ \dot{s}_1 = s_2 - \beta_{01}e_{s1} + bu \\ \dot{s}_2 = -\beta_{02}e_{s1} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $e_{s1}$  为误差信号;  $s_1$  为  $x_1$  的跟踪信号;  $s_2$  为总扰动  $a(t)$  的观测信号;  $\beta_{01}, \beta_{02}$  为观测器增益。

控制率采用比例控制,则输出的控制电压  $u_0$  和  $u_d$  为

$$\begin{cases} u_0 = r(i_d^* - i_d) \\ u_d = u_0 - \frac{s_2}{b} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $r$  为比例控制器增益;  $i_d^*$ 、 $i_d$  分别为  $d$  轴电流环的给定电流信号和反馈电流信号。

将式(6)代入式(3),可得到扰动补偿后的电流方程为

$$\dot{i}_d = bu_0 + (a - s_2) \quad (7)$$

只要观测的扰动量  $s_2$  足够准确,便可将实际扰动  $a$  完全消除,从而达到解耦和抗扰的目的。自抗扰解耦控制框图如图 2 所示。

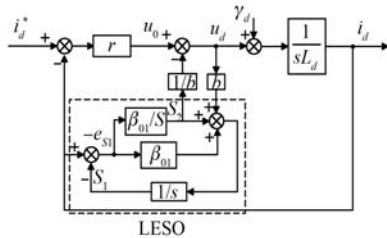


图 2 自抗扰解耦控制框图

### 2.2 LESO 跟踪性能分析

由式(4)和式(5)可得扰动估计误差传递函数<sup>[9]</sup>:

$$\frac{s_2(s) - x_2(s)}{x_2(s)} = -\frac{s^2 + \beta_{01}s}{s^2 + \beta_{01}s + \beta_{02}} \quad (8)$$

当扰动为阶跃扰动时,稳态误差为零。当扰动为斜坡扰动,即  $x_2(t) = kt$ ,  $k$  为扰动系数时,稳态误差为  $-k\beta_{01}/\beta_{02}$ 。

可见,自抗扰解耦控制方法对跟踪阶跃扰动的稳态误差为零,对斜坡扰动存在稳态误差。

### 2.3 扰动抑制性能分析

根据图 2 所示的控制系统框图,可列出输出

信号  $x_1$  与扰动信号  $\gamma_d$  之间的传递函数:

$$\frac{x_1(s)}{\gamma_d(s)} = \frac{b}{s + rb} \cdot \frac{s^2 + \beta_{01}s}{s^2 + \beta_{01}s + \beta_{02}} \quad (9)$$

由该传递函数可绘制出相应的伯德图,根据幅频特性曲线即可判断出系统输出对扰动的抑制能力。

## 3 基于 PIO 的自抗扰解耦方法

### 3.1 基于 PIO 的自抗扰解耦控制器设计

PIO 的输入信号为控制信号  $u_0$ ,  $z_1$  为被控对象在理想模型状态下的输出量,控制系统实际输出  $x_1$  与  $z_1$  的差值经 PIO 得到扰动观测信号  $z_2$ 。所设计的 PIO 状态方程如下:

$$\begin{cases} e_1 = z_1 - x_1 \\ \dot{z}_2 = -e_1(k_p + k_i/s) \\ \dot{z}_1 = bu_0 \end{cases} \quad (10)$$

将 PIO 观测出的扰动量  $z_2$  作为已知量加入到 LESO 中,可设计出相应的 LESO 如下:

$$\begin{cases} e_{s1} = s_1 - x_1 \\ \dot{s}_1 = s_2 - \beta_{01}e_{s1} + bu + z_2 \\ \dot{s}_2 = -\beta_{02}e_{s1} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $s_2$  为 LESO 观测出的扰动量,即系统中除  $z_2$  以外的剩余扰动,有  $x_2 \approx z_2 + s_2$ ;  $\beta_{01}, \beta_{02}$  为 LESO 增益,采用带宽整定法,  $\beta_{01}$  取  $2\omega$ ,  $\beta_{02}$  取  $\omega^2$ 。

控制率采用比例控制,控制增益为  $r$ ,则输出的控制电压  $u_0$  和  $u_d$  分别为

$$\begin{cases} u_0 = r(i_d^* - i_d) \\ u_d = u_0 - \frac{z_2 + s_2}{b} \end{cases} \quad (12)$$

基于 PIO 的自抗扰解耦控制框图如图 3 所示。

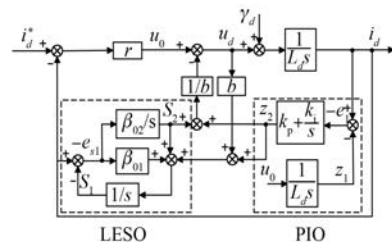


图 3 基于 PIO 的自抗扰解耦控制框图

### 3.2 扰动跟踪性能分析

由式(10)和式(11)可得 PIO 扰动估计误差表达式:

$$\frac{z_2(s) - x_2(s)}{x_2(s)} = \frac{s^2 + \beta_{01}s + \beta_{02}}{s^2 + (\beta_{01} + G_c)s + G_c\beta_{01} + \beta_{02}} \quad (13)$$

式中:  $G_c$  为 PIO 中的 PI 调节器传递函数,  $G_c = k_p + k_i/s$ 。

由式(11)可得  $s_2(s)$  的表达式:

$$s_2(s) = -\frac{\beta_{02}}{s^2 + \beta_{01}s + \beta_{02}} [z_2(s) - x_2(s)] \quad (14)$$

根据式(13)和式(14), 可得扰动估计误差的传递函数:

$$\frac{z_2(s) + s_2(s) - x_2(s)}{x_2(s)} = \frac{s^3 + \beta_{01}s^2}{s^3 + (\beta_{01} + k_p)s^2 + (\beta_{02} + k_i + k_p\beta_{01})s + k_i\beta_{01}} \quad (15)$$

当扰动为阶跃和斜坡扰动时, 稳态误差为零。当扰动为加速度扰动, 即  $x_2(t) = kt^2$ ,  $k$  为扰动系数时, 稳态误差为  $-k/k_i$ 。

与采用单个 LESO 的扰动估计方法相比, 本文提出的控制方法, 对于阶跃和斜坡扰动时的稳态估计误差为零, 只在加速度扰动情况下才出现稳态误差, 因而扰动跟踪性能得到了提高。

### 3.3 扰动抑制性能分析

为了分析控制系统的抗扰动能力, 根据图 3 的控制系统框图, 可列出输出信号  $x_1$  与扰动信号  $\gamma_d$  之间的传递函数:

$$\frac{x_1(s)}{\gamma_d(s)} = \frac{b}{s + rb}$$

其中:  $\Delta = s^4 + (\beta_{01} + k_p + rb)s^3 + (\beta_{02} + k_i + k_p\beta_{01} + rb\beta_{01} + rbk_p)s^2 + (k_i\beta_{01} + rb\beta_{02} + rbk_p\beta_{01} + rbk_i)s + rbk_i\beta_{01}$ 。

$\Delta=0$  即为系统的特征方程, 列出劳斯表如下:

$s^4$	1	$\beta_{02} + k_i + k_p\beta_{01} + rb\beta_{01} + rbk_p$	$rbk_i\beta_{01}$
$s^3$	$\beta_{01} + k_p + rb$	$k_i\beta_{01} + rb\beta_{02} + rbk_i + rbk_p\beta_{01}$	
$s^2$	$\Delta_1$	$rbk_i\beta_{01}$	
$s^1$	$\Delta_2$		
$s^0$	$rbk_i\beta_{01}$		

由于取控制参数  $r>0, k_p>0, k_i>0, \beta_{01}=2\omega>0, \beta_{02}=\omega^2>0, b=\frac{1}{L_d}>0$ , 经计算可知  $\Delta_1$  与  $\Delta_2$  中的所有项

$$\frac{s^3 + \beta_{01}s^2}{s^3 + (\beta_{01} + k_p)s^2 + (\beta_{02} + k_i + k_p\beta_{01})s + k_i\beta_{01}} \quad (16)$$

根据式(9)和式(16), 可绘制出引入 PIO 前后的控制系统输出  $x_1$  与输入扰动信号  $\gamma_d$  之间的传递函数伯德图, 如图 4 所示。图 4 中, 控制器参数  $r = 50, k_p = 30, k_i = 7\ 000$ , 电机参数  $L_d = 1.649\text{ mH}$ 。

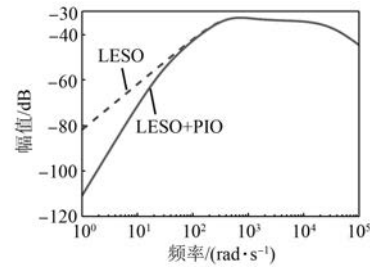


图 4 控制系统闭环传递函数伯德图

图 4 表明, 引入 PIO 后的 ADRC 系统在低频段具有较优的扰动抑制能力, 而在高频段二者的扰动抑制能力近乎相同。

### 3.4 控制系统稳定性分析

由图 3 的控制系统, 可得:

$$(i_d^* - x_1)r - \frac{z_2 + s_2}{b} + \frac{x_2}{b} = \frac{x_1s}{b} \quad (17)$$

将式(15)代入式(17)可得闭环控制系统的传递函数:

$$x_1 = \left[ \frac{s^3 + (\beta_{01} + k_p)s^2 + (\beta_{02} + k_i + k_p\beta_{01})s}{\Delta} + \frac{k_i\beta_{01}}{\Delta} \right] rbi_d^* + \frac{s^3 + \beta_{01}s^2}{\Delta} \cdot x_2 \quad (18)$$

均大于零,劳斯表的第一列元素均为正数,闭环系统稳定。

## 4 仿真分析与试验验证

### 4.1 仿真分析

为了验证所提控制算法的有效性,在 MATLAB 中搭建了仿真模型,并与传统 PI 控制器、ADRC 控制策略和改进后 ADRC 控制策略的控制效果进行对比分析。电机运行工况为空载运行于 1 000 r/min,突加负载至  $q$  轴电流为 10 A,通过观测  $q$  轴电流突变时  $d$  轴电流的动态过程,判断  $d$ 、 $q$  轴间电流耦合效应的大小。电机参数如表 1 所示。

表 1 电机参数

参数名称	参数值
额定功率 $P_N/\text{kW}$	0.75
额定电压 $U_N/\text{V}$	220
极对数 $P$	4
$d$ 轴电感 $L_d/\text{mH}$	1.649
$q$ 轴电感 $L_q/\text{mH}$	1.649
额定转矩 $T_N/(\text{N} \cdot \text{m})$	2.39
定子电阻 $R/\Omega$	0.747
额定转速 $n_N/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	3 000

图 5 为采用 PI 控制时的电流仿真波形。从图 5 可以看出  $q$  轴电流发生阶跃时, $d$  轴电流也产生一个瞬时突变, $d$ 、 $q$  轴间的电流耦合现象较为明显。

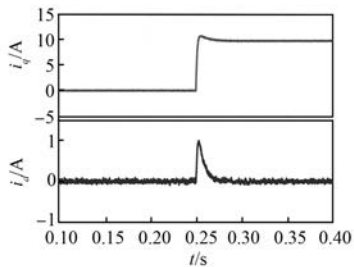


图 5 PI 控制时  $d$ 、 $q$  轴电流仿真波形

图 6 和图 7 分别为采用 ADRC 控制策略和所提控制策略时的  $d$ 、 $q$  轴电流仿真波形。与图 5 相比,采用 ADRC 控制时,在  $q$  轴电流阶跃瞬间, $d$  轴电流的突变幅值由 1 A 降为了 0.32 A,恢复时间也由 0.025 s 减小到 0.007 s,解耦效果明显。而

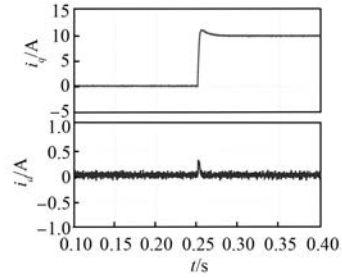


图 6 ADRC 控制时  $d$ 、 $q$  轴电流仿真波形

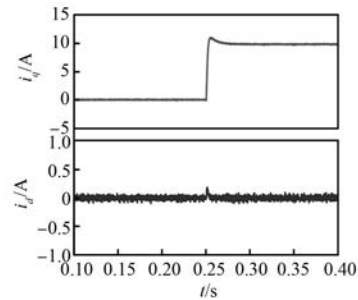


图 7 所提策略  $d$ 、 $q$  轴电流仿真波形

所提控制策略的  $d$  轴电流突变幅值为 0.2 A,恢复时间为 0.006 s,在传统 ADRC 的基础上,进一步提升了解耦效果。

图 8 和图 9 分别为采用 ADRC 控制策略和所提控制策略时的扰动观测波形。因为仿真中不存在实际的外部干扰,系统的模型参数也是确定的,所以实际的扰动值可视为  $(-Ri_d + \omega_e L_q i_q)/L_d$ 。与图 8 相比,图 9 中扰动观测误差在稳态时的平均值更小,在 0.20~0.24 s 时间内,图 8 中的扰动观测误差平均值为 41.25 V,而图 9 中的扰动观测误差平均值只有 -9.85 V。在扰动突变瞬间,改进后 ADRC 控制器的最大扰动跟踪误差也有所降低,图 9 中的跟踪误差最大值为 -1 021 V,而图 8 中

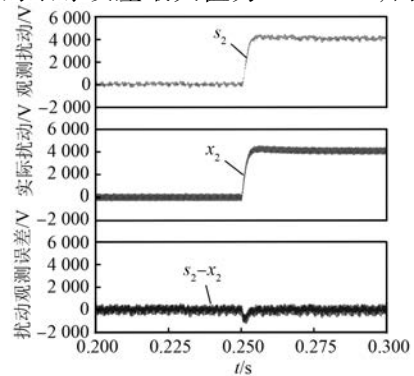


图 8 ADRC 扰动观测值及观测误差波形

为-1 187 V。仿真结果表明改进后的 ADRC 控制器具有更优的扰动跟踪能力,因而可以提高解耦效果。

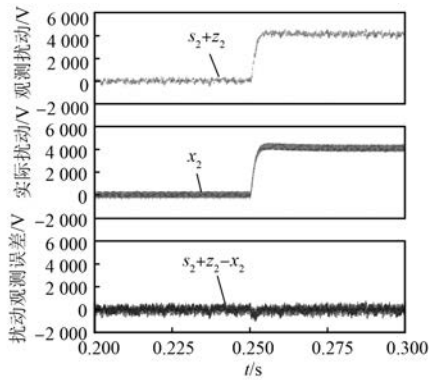


图9 所提策略扰动观测值及观测误差波形

### 4.2 试验验证

为了验证控制效果,搭建 PMSM 伺服系统试验平台,如图 10 所示。试验用电机参数与表 1 一致。电机运行于 1 000 r/min,调节磁粉制动器加载至  $q$  轴电流为 1 A,在电机稳定运行后突卸负载,在示波器中观察  $d$ 、 $q$  轴电流的变化情况。



图10 试验平台

图 11~图 13 分别为采用 PI 控制、ADRC 控制和所提控制策略时的  $d$ 、 $q$  轴电流波形。通过对比可以发现,在  $q$  轴电流发生突变时,所提策略下的  $d$  轴电流变化幅值最小,恢复时间最快,解耦效

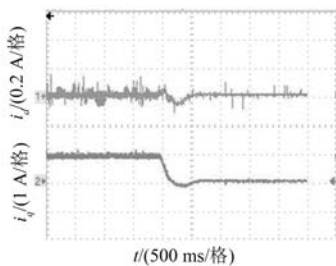


图11 PI控制时  $d$ 、 $q$  轴电流试验波形

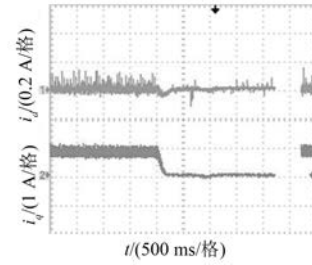


图12 ADRC控制时  $d$ 、 $q$  轴电流试验波形

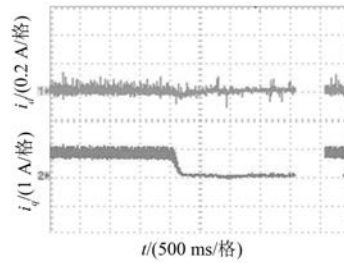


图13 所提策略  $d$ 、 $q$  轴电流试验波形

果最优。试验效果与仿真一致,验证了所提控制策略的有效性。

图 14 是采用所提控制策略观测的扰动量波形。图 14 中显示,在  $q$  轴电流发生变化时,观测出的扰动量变化规律与  $q$  轴电流一致,且可以跟随  $q$  轴电流而变化,说明控制方法具有良好的扰动跟踪能力。

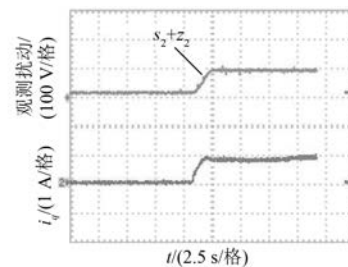


图14 所提策略扰动观测波形

## 5 结 语

本文针对 PI 控制器无法实现电流解耦的问题,在 ADRC 的基础上,提出一种引入 PIO 的改进方法。通过理论分析、仿真和试验对比,得出如下结论:

(1) 与 PI 控制器相比,采用 ADRC 的解耦控制方法将耦合项视为扰动量,通过估计系统中的扰动来消除耦合,并且控制器的设计不依赖于电

机的精确参数,因而具有较好的解耦效果。

(2) 传统 ADRC 控制器采用单个 LESO 来观测扰动,在系统扰动突变瞬间,由于扰动估计负担较重,难以准确、快速地观测出全部扰动量,进而影响解耦效果。

(3) 理论分析表明,与传统 ADRC 控制相比,引入 PIO 后的 ADRC 控制器具有更优的扰动跟踪能力,闭环控制系统也具有更强的扰动抑制性能。仿真和试验结果表明,本文提出的控制策略在电流解耦效果上优于传统 ADRC 策略。

### 【参考文献】

- [ 1 ] YEPES A G, VIDAL A, MALVAR J, et al. Tuning method aimed at optimized settling time and overshoot for synchronous proportional-integral current control in electric machines [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(6) : 3041.
- [ 2 ] MORIMOTO S, SANADA M, TAKEDA Y. Wide-speed operation of interior permanent magnet synchronous motors with high-performance current regulator [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(4) : 920.
- [ 3 ] HARNEFORS L, NEE H. Model-based current control of AC machines using the internal model control method [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(1) : 133.
- [ 4 ] 周志刚. 一种感应电机的解耦控制方法 [ J ]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2) : 121.
- [ 5 ] 李春鹏, 贲洪奇, 刘博, 等. 采用扰动观测器的偏差解耦控制方法 [ J ]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22) : 5859.
- [ 6 ] DE SORICELLIS M, DA RÙ D, BOLOGNANI S. A robust current control based on proportional-integral observers for permanent magnet synchronous machines [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(2) : 1437.
- [ 7 ] 杨淑英, 王玉柱, 储昭晗, 等. 基于增益连续扩张状态观测器的永磁同步电机电流解耦控制 [ J ]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6) : 1985.
- [ 8 ] 董家臣, 高钦和. 永磁直线同步电机电流环新型线性自抗扰控制 [ J ]. 电机与控制应用, 2019, 46(1) : 1.
- [ 9 ] WANG G, LIU R, ZHAO N, et al. Enhanced linear ADRC strategy for HF pulse voltage signal injection-based sensorless IPMSM drives [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1) : 514.
- [ 1 ] YEPES A G, VIDAL A, MALVAR J, et al. Tuning method aimed at optimized settling time and overshoot for synchronous proportional-integral current control in electric machines [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(6) : 3041.
- [ 2 ] MORIMOTO S, SANADA M, TAKEDA Y. Wide-speed operation of interior permanent magnet synchronous motors with high-performance current regulator [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(4) : 920.
- [ 3 ] HARNEFORS L, NEE H. Model-based current control of AC machines using the internal model control method [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(1) : 133.
- [ 4 ] 周志刚. 一种感应电机的解耦控制方法 [ J ]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2) : 121.
- [ 5 ] 李春鹏, 贲洪奇, 刘博, 等. 采用扰动观测器的偏差解耦控制方法 [ J ]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22) : 5859.
- [ 6 ] DE SORICELLIS M, DA RÙ D, BOLOGNANI S. A robust current control based on proportional-integral observers for permanent magnet synchronous machines [ J ]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(2) : 1437.
- [ 7 ] 杨淑英, 王玉柱, 储昭晗, 等. 基于增益连续扩张状态观测器的永磁同步电机电流解耦控制 [ J ]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6) : 1985.
- [ 8 ] 董家臣, 高钦和. 永磁直线同步电机电流环新型线性自抗扰控制 [ J ]. 电机与控制应用, 2019, 46(1) : 1.
- [ 9 ] WANG G, LIU R, ZHAO N, et al. Enhanced linear ADRC strategy for HF pulse voltage signal injection-based sensorless IPMSM drives [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(1) : 514.
- [ 2 ] JEZERNIK K, KORELIC J, HORVAT R. PMSM sliding mode FPGA-based control for torque ripple reduction [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(7) : 3549.
- [ 3 ] LIN F, HUNG Y, HWANG J, et al. Fault-tolerant control of a six-phase motor drive system using a Takagi-Sugeno-Kang type fuzzy neural network with asymmetric membership function [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(7) : 3557.
- [ 4 ] 徐丽莉, 叶云岳. 基于线性霍尔元件的圆筒型永磁直线同步电机位置检测 [ J ]. 微电机, 2007, 40(3) : 23.
- [ 5 ] 黄明, 尚群立, 余善恩. 线性霍尔传感器在直线位移中的应用 [ J ]. 自动化仪表, 2010, 31(3) : 66.
- [ 6 ] 蔡炯炯, 张亚成, 蒋丽君, 等. 基于马鞍形磁场的永磁直线电机位置解算方法 [ J ]. 电机与控制应用, 2019, 46(9) : 46.
- [ 7 ] 刘刚, 肖焯然, 宋欣达. 永磁同步电机用线性霍尔位置检测的误差补偿 [ J ]. 电机与控制学报, 2014, 18(8) : 36.
- [ 8 ] 刘晓, 叶云岳, 郑灼, 等. 一种低成本的线性霍尔位置检测方法研究 [ J ]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(7) : 1204.

(上接第 39 页)

扫码关注

《电机与控制应用》

微信公众号

