

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209305

多参数变化下基于参数辨识的永磁同步电机偏差解耦控制方法*

邓聪颖^{1,2}, 舒杰¹, 陈翔^{1,2}, 王颀^{1,2}, 禄盛^{1,2}

(1. 重庆邮电大学先进制造工程学院 重庆 400065; 2. 重庆邮电大学高等科学研究院 重庆 400065)

摘要:针对矢量控制下永磁同步电机 d-q 轴电流无法动态解耦,导致电机参数的动态变化影响其控制系统稳定性问题,提出一种基于参数辨识的永磁同步电机偏差解耦控制(PI-DDC)方法。以 d-q 轴电流控制器耦合系数为零推导完全解耦下偏差解耦项的传递函数,由此考虑电阻、电感和永磁体磁链等电机参数的动态变化对偏差解耦效果的影响,引入带遗忘因子递推最小二乘法在线辨识电机各参数,通过实时修正偏差解耦控制模型中的电机参数实现 d-q 轴电流解耦。以一台永磁同步电机为例,不同工况下的仿真和实验结果表明,所提的 PI-DDC 方法相比于传统偏差解耦控制方法,d-q 轴电流响应时间缩短约 50%,超调量分别减小约 60% 和 70%,最大波动幅值分别减小约 30% 和 37%,具有更好的控制精度和动态性能。

关键词: 永磁同步电机; 矢量控制; 偏差解耦; 参数辨识

中图分类号: TM341 TH139 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.4075

A deviation decoupling control method of permanent magnet synchronous motor based on parameter identification under multi-parameter variation

Deng Congying^{1,2}, Shu Jie¹, Chen Xiang^{1,2}, Wang Ting^{1,2}, Lu Sheng^{1,2}

(1. School of Advanced Manufacturing Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China;
2. Institute for Advanced Sciences, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: The d-q axis current of the PMSM under the vector control cannot be dynamically decoupled, which brings difficulty in adapting to the dynamic changes of the motor parameters. The stability of the motor control system is affected. To address this issue, this article proposes a deviation decoupling control method of the PMSM based on the parameter identification (PI-DDC). First, taking the coupling coefficient of the d-q axis current controller as zero, and the transfer function of the deviation decoupling could be obtained under this condition. Then, the dynamic changes of the motor parameters that affect the decoupling effect of the deviation decoupling can be considered, such as the resistance, inductance and permanent magnet flux. The recursive least square method with the forgetting factor is introduced to online identify the motor parameters, which are further used to correct the corresponding values in the deviation decoupling control model real time and the current decoupling of d-q axis can be realized. A case study has been carried out on a PMSM. The simulation and experimental results under different working conditions validate the better control accuracy and dynamic performance of the proposed PI-DDC method comparing with the traditional deviation decoupling control method. The response time, overshoot and fluctuation amplitude of the d-q axis current are decreased about 50%, 60% and 70%, and 30% and 37% respectively.

Keywords: permanent magnetic synchronous motor; vector control; current deviation decoupling control; parameter identification

0 引 言

永磁同步电机(permanent magnetic synchronous

motor, PMSM)具有高效率、高功率密度、高转矩电流比、宽调速区间等优点,被广泛应用于电动汽车、风机和机床等旋转设备^[1-3]。PMSM 转子永磁体存在单轴性和凸极效应,直接在三相旋转坐标系下建立其数学模型非常复

收稿日期:2022-02-16 Received Date: 2022-02-16

* 基金项目:国家自然科学基金(51705058)、重庆市教委科学技术研究项目(KJZD-K201900604)资助

杂,增加永磁同步电机精确控制的难度。国内外学者通过引入 d-q 轴坐标系,可以简化永磁同步电机的数学模型。然而,d-q 轴电流存在相互耦合的现象,并且电机工况的复杂变化将加剧此耦合现象^[4-7]。因此,研究两相旋转坐标系下的 d-q 轴电流解耦,对提高永磁同步电机的控制精度至关重要。

目前,永磁同步电机的解耦控制策略主要包括电压前馈解耦、电流反馈解耦^[8]、内模解耦和偏差解耦^[9]。电压前馈解耦和电流反馈解耦可归类为基于模型的解耦控制,但基于模型的解耦控制对电机参数有很强的依赖性,参数误差较大的情况下会导致系统不稳定,电流无法完全解耦^[10]。为解决基于模型的解耦控制性能易受数字延迟和电感参数失配影响的问题,基于扰动补偿的内模解耦和偏差解耦逐渐被应用于永磁同步电机的电流解耦,其中内模解耦需要模拟精确的控制系统模型,且其本质仍是电压前馈解耦,而偏差解耦控制则是内模解耦的变形^[11],无需模拟控制系统的模型,控制算法的复杂度更低。此外,偏差解耦相较于基于模型的解耦控制,避免了延时环节对解耦性能的影响。因此,偏差解耦是目前永磁同步电机比较主流的电流解耦方案。王双全等^[12]采用电流偏差解耦控制实现对 d-q 轴电流解耦,但该控制方法仍然是一种理想的静态解耦控制,当电机运行工况发生变化时,电机电感参数实际值与估计值存在偏差,电流耦合效应仍存在而无法实现动态解耦。

考虑永磁同步电机运行时电感参数随运行工况变化而变化,导致偏差解耦控制器中的电感估计值与实际值无法匹配,影响偏差解耦的动态解耦性能的问题,李春鹏等^[13]和司梦等^[14]将电感变化和电流耦合引起的电压误差视为系统扰动,提出一种基于扰动观测器的偏差解耦控制方法,采用扰动观测器进行电压误差的观测,以其作为补偿信号反馈到输入端抵消扰动对系统的影响。刘宇博等^[15]提出基于滑模观测器的电流偏差解耦控制方法,以定子电流的估计值作为状态变量,利用滑模观测器的跟踪特性,将其反馈到系统输入端进行电流误差值补偿。曾小莉等^[16]提出基于偏差解耦控制的电机电流解耦方案,采用积分滑模控制并引入新的 Z 控制函数,设计只在滑动模态阶段运动的控制律,使其运动在滑模阶段并呈非线性光滑特性,抑制滑模抖振现象并实现 d、q 轴电流较好的解耦效果。赵希梅等^[17]提出了一种基于滑模自抗扰的电流偏差解耦方法,选取积分滑模面以及指数趋近律对滑模自抗扰控制器进行设计,用于扰动观测,并对系统进行补偿,进而实现电流近似完全解耦。但上述研究并未考虑偏差解耦中的永磁体磁链和电阻变化对偏差解耦的影响,也未考虑到通过减小偏差解耦中永磁同步电机参数与实际参数的差值来改善偏差解耦的动态性能。

综上所述,针对永磁同步电机在矢量控制的偏差解耦控制下,偏差解耦性能受制于电机参数变化,以及电机电阻和永磁体磁链变化影响电流解耦效果和电机转矩输出性能的问题,提出一种多参数变化下基于参数辨识的偏差解耦控制方法。首先,建立永磁同步电机 d-q 轴坐标系下的数学模型,基于 d-q 轴电压方程中的交叉耦合项,推导完全解耦下永磁同步电机的 d-q 轴电压方程;其次,推导偏差解耦过程并分析其控制框图,提出采用参数辨识的方法实时辨识偏差解耦控制中所需的参数,以考虑偏差解耦中与电机实时运行时的电感匹配,以及电阻和磁链变化对系统解耦效果的影响;由此,通过公式法和带遗忘因子的递推最小二乘法建立参数辨识模型,进行电阻、磁链和电感的实时辨识,同时在 Simulink 中搭建了基于参数辨识的偏差解耦控制模块;最后,通过不同工况下 Simulink 的算例仿真和一台永磁同步电机的算例实验,验证了基于参数辨识的偏差解耦控制方法,可有效改善永磁同步电机 d-q 轴的电流耦合现象,从而提高电机转矩的输出性能。

1 永磁同步电机数学模型

建立永磁同步电机数学模型时,通常作出如下假设以便于分析:1)忽略铁芯饱和;2)不计涡流和磁滞损耗;3)转子上没有阻尼绕组^[18-19]。式(1)描述了永磁同步电机在 d-q 轴旋转坐标系下的定子电压方程:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \Psi_q \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \Psi_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 为 d、q 轴电压, R_s 为定子电阻, Ψ_d 、 Ψ_q 分别为 d、q 轴磁链, ω_e 为转子电角速度。

其中,d、q 轴磁链可由下式得到:

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

式中: L_d 、 L_q 分别为 d、q 轴电感, i_d 、 i_q 分别为 d、q 轴电流, Ψ_f 为永磁体磁链。

电磁转矩方程为:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p i_q [i_d (L_d - L_q) + \Psi_f] \quad (3)$$

式中: T_e 为电磁转矩, n_p 为永磁体极对数。

永磁同步电机的运动方程为:

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (4)$$

式中: J 为转动惯量, ω_m 为转子机械角速度, T_e 为电磁转矩, T_L 为负载转矩, B 为粘滞系数。

2 d-q 轴电流偏差解耦控制

分析式(1)可知,d-q轴电压分量存在耦合现象,当转速突变、负载突变以及电机参数发生变化时,耦合电压将增大而加剧耦合情况。因此,需消除式(1)中的耦合分量,使d-q轴电压分量只受本轴电流的影响。假设d-q轴电流已完全解耦,则式(1)可表示为:

$$\begin{aligned} u_{d0} &= u_d + \omega L_q i_q = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} \\ u_{q0} &= u_q - \omega(L_d i_d + \Psi_f) = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: u_{d0} 和 u_{q0} 分别为电流完全解耦后的d-q轴电压。因此,本章着重对d-q轴电流的解耦方法进行分析。

图1描述了永磁同步电机偏差解耦的控制框图,偏差解耦将永磁同步电机d-q轴电流在PI电流控制器调节之前,引入外部偏差解耦项,经偏差解耦控制,得到解耦电压量,然后与电流PI控制器输出电压叠在永磁同步电机模型的电压输入端,通过抵消d-q轴电流的耦合量达到解耦目的,此外偏差解耦根据反馈量和给定量的差值对电流实时解耦,具有比电流反馈解耦控制更高的实时性。

进一步地,根据图1写出系统的控制方程:

$$\begin{aligned} G_1(s) i_d^* + G_4(s) i_q^* - (G_4(s) - \omega_e L_q) i_q &= \\ (G_1(s) + R_s + sL_d) i_d & \\ G_2(s) i_q^* + G_3(s) i_d^* - (G_3(s) + \omega_e L_d) i_d &= \\ (G_2(s) + R_s + sL_q) i_q & \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{cases} A_{dd} = \frac{G_1(s)(G_2(s) + R_s + L_q s) + \omega_e L_q G_3(s) + G_3(s)G_4(s)}{(G_1(s) + R_s + L_d s)(G_2(s) + R_s + L_q s) + (G_3(s) + \omega_e L_d)(G_4(s) + \omega_e L_q)} \\ A_{dq} = \frac{-G_4(s)(R_s + L_q s) + \omega_e L_q G_2(s)}{(G_1(s) + R_s + L_d s)(G_2(s) + R_s + L_q s) + (G_3(s) + \omega_e L_d)(G_4(s) + \omega_e L_q)} \\ A_{qd} = \frac{G_3(s)(R_s + L_d s) - \omega_e L_d G_1(s)}{(G_1(s) + R_s + L_d s)(G_2(s) + R_s + L_q s) + (G_3(s) + \omega_e L_d)(G_4(s) + \omega_e L_q)} \\ A_{qq} = \frac{G_2(s)(G_1(s) + R_s + L_d s) + \omega_e L_d G_4(s) + G_3(s)G_4(s)}{(G_1(s) + R_s + L_d s)(G_2(s) + R_s + L_q s) + (G_3(s) + \omega_e L_d)(G_4(s) + \omega_e L_q)} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可得,仅有 $A_{dq} = A_{qd} = 0$ 时,d、q轴电流才能完全解耦,则解耦控制器的传递函数可表示为:

$$\begin{cases} G_3(s) = \frac{L_d \omega_e}{R_s + L_d s} G_1(s) \\ G_4(s) = \frac{L_q \omega_e}{R_s + L_q s} G_2(s) \end{cases} \quad (9)$$

根据式(9)简化图1所示的偏差解耦控制框图,并将控制器的参数 R_s 、 L_d 、 L_q 用电机铭牌参数 R_s^* 、 L_d^* 、 L_q^* 代替,得到偏差解耦等效控制框图如图2所示。

由式(8)和图2可以看出,只有当 $L_d^* = L_d$ 、 $L_q^* = L_q$ 时,d-q轴电流才能实现完全解耦,通过引入传递函数作为外部解耦项,偏差解耦控制可以调节不可测干扰造成

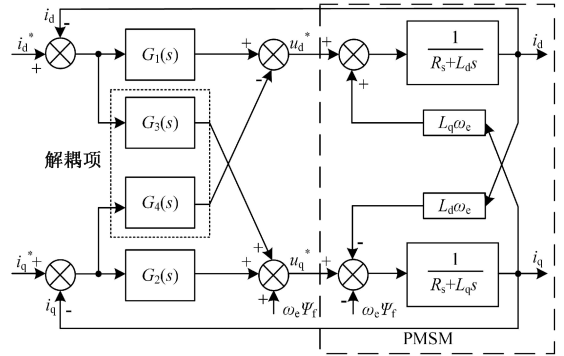


图1 偏差解耦控制框图

Fig. 1 Structure diagram of the current deviation decouple controller

整理式(6)可得出电流给定值与反馈值之间的函数关系如式(7)所示。

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{dd} & A_{dq} \\ A_{qd} & A_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: A_{dd} 和 A_{qq} 分别是d、q轴电流控制器的比例系数, A_{dq} 和 A_{qd} 分别是d、q轴电流控制器的耦合系数, A_{dd} 、 A_{qq} 、 A_{dq} 和 A_{qd} 可按下式获取:

的输出误差,受参数变化的影响较小,电流解耦性能更优。在式(5)描述的电流完全解耦条件下,d-q轴电压受电感和电阻的影响,而电感参数将随控制系统运行中电流的增大而变化,且负载、温度等因素的变化,将改变定子电阻 R_s 和永磁体磁链 Ψ_f ,进而影响整体的解耦效果。因此,需要对定子电感、电阻和永磁体磁链进行参数辨识,以提高偏差解耦的动态解耦效果。

3 最小二乘法参数辨识下的偏差解耦

递推算法具有结构简单、计算量小等优点,在参数辨识领域得到广泛的应用。因此,本文采用递推最小二乘

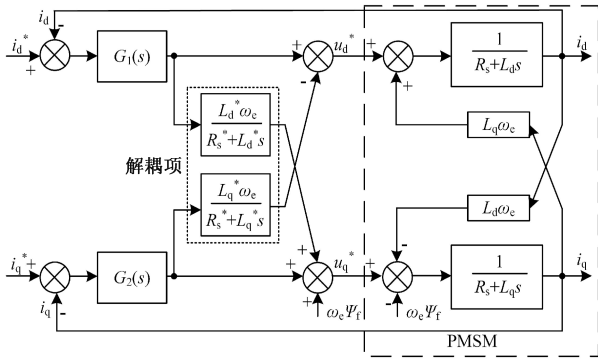


图2 偏差解耦等效控制框图

Fig. 2 Equivalent structure diagram of the deviation decouple controller

法辨识定子电阻、电感和永磁体磁链。首先,设系统的输入和输出可表达为:

$$y(k) = \varphi^T(k)\theta(k) + \varepsilon(k) \quad (10)$$

式中: $y(k)$ 为系统输出矩阵, $\varphi^T(k)$ 为输入矩阵, $\theta(k)$ 待辨识的参数矩阵, $\varepsilon(k)$ 为平均值为0的误差矩阵。

以系统输出真实值与预测值之间的差值作为目标函数:

$$J(\theta) = [y(k) - \varphi^T(k)\theta(k)]^2 \quad (11)$$

令 $J(\theta)$ 偏导为0,得到递推最小二乘法的递推式:

$$\theta(k) = \theta(k-1) + K(k)[y(k) - \varphi^T(k)\theta(k-1)] \quad (12)$$

$$P(k) = [I - K(k)\varphi^T(k)]P(k-1) \quad (13)$$

$$K(k) = \frac{\varphi(k)P(k-1)}{\varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)} \quad (14)$$

在传统最小二乘法的计算过程中, $P(k)$ 将随着运算次数增加而逐渐趋向于0,由此失去相应的修正功能。因此,本文引入遗忘因子 λ 来解决该问题。

遗忘因子 λ 是大于0小于1的实数,其实质是在迭代中增加当前时刻数据的权值,降低前一时刻数据的权值,通过减缓 $P(k)$ 、 $K(k)$ 趋近0的速度并加快迭代过程。采用遗忘因子 λ 改写式(13)和(14)如式(15)和(16)所示。

$$P(k) = \frac{1}{\lambda}[I - K(k)\varphi^T(k)]P(k-1) \quad (15)$$

$$K(k) = \frac{\varphi(k)P(k-1)}{\lambda + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)} \quad (16)$$

由本文2.1节可知,偏差解耦的性能取决于电机实时电感、电阻和永磁体磁链,因此本文利用最小二乘法按以下步骤获得上述参数的实时信息:

1) 将式(2)代入式(1)得到 d-q 轴电压方程:

$$\begin{aligned} u_d &= R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ u_q &= R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega(L_d i_d + \Psi_f) \end{aligned} \quad (17)$$

2) 将式(17)改写为输入输出的形式为:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d & -\omega_e i_q & \frac{di_d}{dt} & 0 \\ i_q & \frac{di_q}{dt} & \omega_e i_d & \omega_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_s \\ L_q \\ L_d \\ \Psi_f \end{bmatrix} \quad (18)$$

则参数辨识矩阵 $\theta(k)$ 可由式(19)表示:

$$\theta(k) = \begin{bmatrix} R_s \\ L_q \\ L_d \\ \Psi_f \end{bmatrix} \quad (19)$$

3) 由式(18)和(19),改写式(12)为对应的算法模型如式(20)所示:

$$\begin{bmatrix} R_s(k) \\ L_q(k) \\ L_d(k) \\ \Psi_f(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s(k-1) \\ L_q(k-1) \\ L_d(k-1) \\ \psi_f(k-1) \end{bmatrix} + K(k) \begin{bmatrix} i_d & i_q \\ -\omega_e i_q & \frac{di_q}{dt} \\ \frac{di_d}{dt} & \omega_e i_d \\ 0 & \omega_e \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} R_s(k-1) \\ L_q(k-1) \\ L_d(k-1) \\ \psi_f(k-1) \end{bmatrix} \quad (20)$$

上式中:输入 $\varphi^T(k)$ 和输出矩阵 $y(k)$ 分别为:

$$y(k) = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}, \varphi^T(k) = \begin{bmatrix} i_d & -\omega_e i_q & \frac{di_d}{dt} & 0 \\ i_q & \frac{di_q}{dt} & \omega_e i_d & \omega_e \end{bmatrix} \quad (21)$$

4) 将系统输入矩阵 $\varphi^T(k)$ 、上一时刻参数辨识矩阵 $\theta(k-1)$ 以及系统输出矩阵 $y(k)$ 代入式(20)中,可求出当前时刻的参数辨识矩阵 $\theta(k)$,从而得到当前时刻的电阻、电感和永磁体磁链。因此,通过优化当前时刻的 $P(k)$ 和 $K(k)$,并进一步利用式(15)、(16)计算下一时刻的辨识矩阵式(19),可提高每一时刻的参数辨识精度。

4 仿真与实验结果分析

4.1 仿真结果与分析

为验证本文所提出的基于参数辨识的永磁同步电机偏差解耦控制策略的有效性,根据表1中永磁同步电机的基本参数,在 Simulink 仿真软件中建立永磁同步电机控制系统的仿真模型进行仿真验证,并将本文所提算法与传统偏差解耦的仿真结果进行对比分析。

表 1 永磁同步电机参数
Table 1 Parameters of the PMSM

参数	数值
额定转速 $n_c / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	3 000
额定功率 P / kW	1
额定转矩 $T_e / (\text{N} \cdot \text{m})$	4
极对数 P_n	4
定子电阻 R_s / Ω	0.021
永磁体磁链 Ψ_f / Wb	0.08
转动惯量	0.003

图 3 描述了基于参数辨识的永磁同步电机偏差解耦控制系统,其中永磁同步电机矢量控制系统主要由速度控制器、d-q 轴电流控制器、Clark 变换、Park 变换、Park 逆变换、SVPWM 模块、转子位置传感器、逆变电路和永磁同步电机组成。电流控制器采用偏差解耦电流控制器,通过计算反馈电流与给定电流的差值,获取电流 PI 控制器的计算量和偏差解耦控制器的计算量,并以其作为 d-q 轴电压前馈输入进行 d-q 轴电流解耦。同时,为了解决电机参数变化对偏差解耦性能的影响,采用式 (20) 表达的参数辨识算法,实时辨识电机参数并将其代入式 (9) 中计算偏差解耦项,以提高偏差解耦的解耦效果和动态性能。

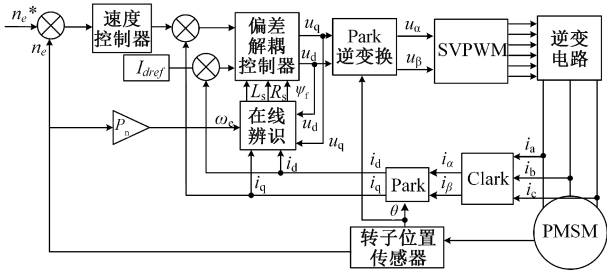


图 3 永磁同步电机控制框图

Fig. 3 Structure diagram of the PMSM controller

图 4 和 5 为不同解耦方法下 d-q 轴电流动态响应仿真曲线,对应工况为:定速 1 000 r/min,起动转矩为空载启动,在 $t = 1 \text{ s}$ 时突加 $3 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的负载转矩。图 6 和 7 为不同解耦方法下 d-q 轴电流动态响应仿真曲线,对应工况为:定速 1 000 r/min,起动转矩为 $3 \text{ N} \cdot \text{m}$,在 $t = 1 \text{ s}$ 时刻突减为空载状态运行。表 2 描述了突加负载工况的仿真环境下不同解耦方法的电流性能对比。

由图 4~7 可以看出,电机负载转矩的变化使电机参数随之变化,而传统偏差解耦算法中,永磁同步电机的电阻、电感和永磁体磁链与电机实时参数不匹配,在带载运行条件下 d-q 轴电流无法完全解耦,造成电流幅值波动

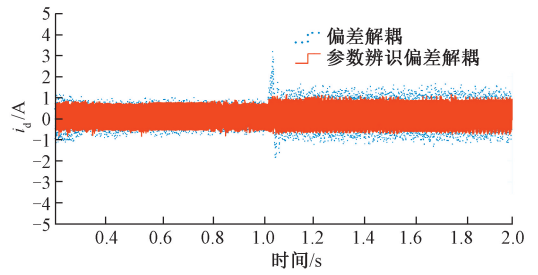


图 4 仿真下突加负载 d 轴电流响应曲线

Fig. 4 The d axis current response curve of the sudden loading in simulation

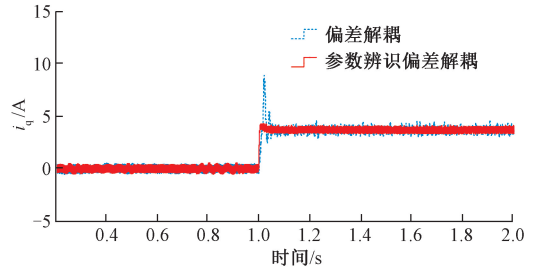


图 5 仿真下突加负载 q 轴电流响应曲线

Fig. 5 The q axis current response curve of the sudden loading in simulation

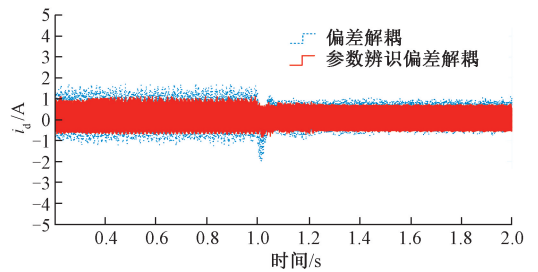


图 6 仿真下突减负载 d 轴电流响应曲线

Fig. 6 The d axis current response curve of the sudden unloading in simulation

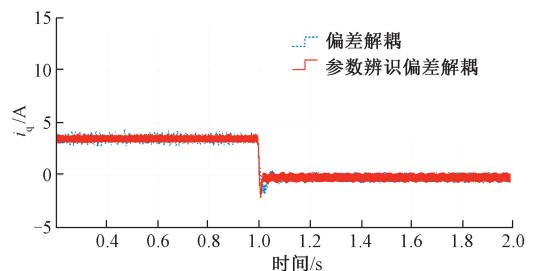


图 7 仿真下突减负载 q 轴电流响应曲线

Fig. 7 The q axis current response curve of the sudden unloading in simulation

表 2 仿真环境下突加负载的电流性能

Table 2 The current performance of the sudden loading in simulation environment

电流指标	偏差解耦		参数辨识偏差解耦	
	i_d	i_q	i_d	i_q
调节时间/s	0.030	0.032	0.015	0.015
超调峰值电流/A	3.2	5.5	1.2	1.5
电流稳态波动幅值/A	1.50	0.95	0.95	0.60

较大,且有一定程度的超调,需要较长的时间达到稳态运行状态。根据表 2 的电流性能可知,负载转矩变化时,在参数辨识偏差解耦控制下,d-q 轴电流的调节时间均缩短了约 50%,d 轴电流的超调量减小约 60%,q 轴电流的超调量减小约 70%,稳态运行时 d 轴电流波动幅值减小约 30%,q 轴电流的波动幅值减小约 37%。

综上所述,仿真结果表明永磁同步电机偏差解耦控制性能受到电机实时参数的影响,而基于电机参数实时辨识的偏差解耦具有良好的动态解耦效果,提高了 d-q 轴电流的解耦效果,使电流波动幅值更小、抗扰性更强、超调量更低且到达稳态时间更短,增强了偏差解耦对电机参数变化的鲁棒性。

4.2 实验结果与分析

为进一步验证所提算法的有效性和准确性,采用两台 1 kW 的永磁同步电机进行对拖,一台作为测试电机,另一台作为负载电机,建立如图 8 所示的永磁同步电机实验平台。实验平台采用 TI 公司的 TMS320F28335 DSP 作为主控芯片,该芯片用于输出控制算法的六路 PWM 波和电流采集,通过 IPM 驱动板实现逆变、过电流和过电压检测。

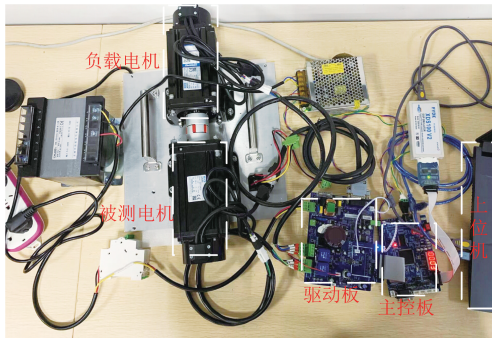


图 8 永磁同步电机实验平台

Fig. 8 Experimental platform of the PMSM

本文实验工况与仿真保持一致,电机给定转速为定速 1 000 r/min,空载启动,在 $t = 0.5$ s 时刻给永磁同步电机突加 3 N·m 的负载转矩,图 9 和 10 为不同解耦算法下的 d-q 轴电流响应实验曲线。图 11 和 12 为永磁同步

电机在转速 1 000 r/min、负载为 3 N·m 的负载转矩下运行时,在 $t = 0.5$ s 时刻突减 3 N·m 负载,使电机空载运行的 d-q 轴电流响应曲线。表 3 描述了突加负载工况的实验下,不同解耦方法的电流性能对比。

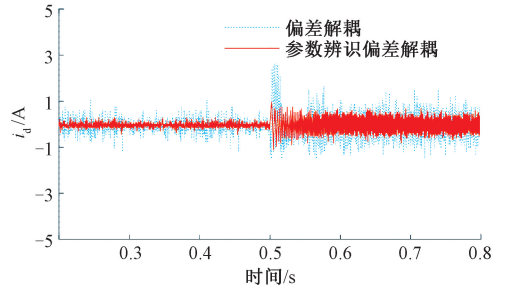


图 9 实验下突加负载 d 轴电流响应曲线

Fig. 9 The experimental d axis current response curve of the sudden loading

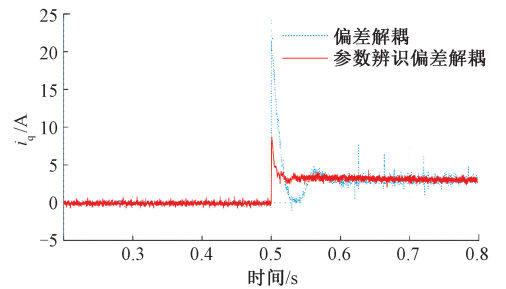


图 10 实验下突加负载 q 轴电流响应曲线

Fig. 10 The experimental q axis current response curve of the sudden loading

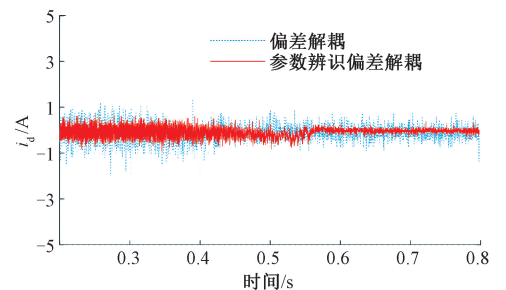


图 11 实验下突减负载 d 轴电流响应曲线

Fig. 11 The experimental d axis current response curve of the sudden unloading

电机在转速 1 000 r/min、负载为 3 N·m 的负载转矩下运行时,在 $t = 0.5$ s 时刻突减 3 N·m 负载,使电机空载运行的 d-q 轴电流响应曲线。图 9~12 描述了采用传统偏差解耦和基于参数辨识偏差解耦的永磁同步电机电流响应曲线。在电机负载变化时,传统偏差解耦受限于电机参数的变化,到达稳态的响应时间较长,且对应的电流波动幅值较大,而参数辨识偏差解耦控制策略在电机运行过程中,通过辨识算法实时辨识电感、电阻和永磁体磁链,提高 d-q 轴电流的解

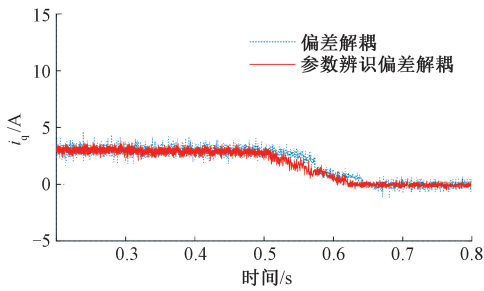


图12 实验下突减负载 q 轴电流响应曲线

Fig. 12 The experimental q axis current response curve of the sudden unloading

表3 实验环境下突加负载的电流性能

Table 3 The current performance of the sudden loading in experiment environment

电流指标	偏差解耦		参数辨识偏差解耦	
	i_d	i_q	i_d	i_q
调节时间/s	0.04	0.09	0.02	0.04
超调峰值电流/A	2.9	18	1.2	5.5
电流稳态波动幅值/A	0.9	0.8	0.6	0.5

耦效果。表3中,在参数辨识的偏差解耦控制下,永磁同步电机的 d-q 轴电流的调节时间缩短约为 50%,d 轴电流的超调量减小约 58%,q 轴电流的超调量减小约 70%,稳态运行时 d 轴电流波动幅值减小约 30%,q 轴电流的波动幅值减小约 37%,稳态时电流波动的幅值更小,可有效提高电机的转矩输出性能。

综上所述,通过加载和减载两种运行工况的实验,验证了本文所提出的参数辨识偏差解耦算法的有效性,且实验结果与仿真结果基本一致,验证了基于参数辨识的偏差解耦算法的优良动态性能。

5 结 论

本文针对永磁同步电机矢量控制模型下,d-q 轴电流存在的耦合现象,提出了基于偏差解耦的电流解耦算法,以提高电机转矩输出的动态性能。

1) 在 d-q 轴电流给定值与反馈值的误差处引入外部解耦项,以抵消电机中 d-q 轴电流的耦合,从而通过电流环控制器实现偏差解耦,有效改善 d-q 轴电流的耦合现象,提高永磁同步电机的转矩输出性能。

2) 考虑到偏差解耦的性能受限于电机的电感、电阻和磁链 3 个参数,采用带遗忘因子的递推最小二乘法辨识电机电感、电阻和永磁体磁链,将实时辨识的电机参数

代入解耦项的计算中,进一步提高偏差解耦的电流解耦效果和控制精度。

3) 搭建矢量控制下的永磁同步电机仿真和实验模型,实时辨识加载和减载两种运行工况下的电机参数,并将辨识结果代入偏差解耦控制模型中,电流的超调量、响应时间和稳态运行时的电流波动幅值均优于传统偏差解耦控制,验证了本文所提的控制方法可有效提高传统偏差解耦的电流解耦效果和控制精度。

参考文献

- [1] 王要强,冯玉涛,马小勇,等. 永磁同步电机转子位置符合检测及启动运行策略[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 230-238.
WANG Y Q, FENG Y T, MA X Y, et al. Rotor position composite detection and start operation strategy of permanent magnet synchronous motor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40 (8): 230-238.
- [2] HUANG ZH R, LIN CH, XING J L. A parameter-independent optimal field-weakening control strategy of ipmsm for electric vehicles over full speed range [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4): 4659-4671.
- [3] 申永鹏,郑竹风,王耀南,等. 基于 PLL 自适应滑模观测器的 PMSM 无传感器控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 22-29.
SHEN Y P, ZHENG ZH F, WANG Y N, et al. Adaptive sliding mode observer based on PLL in sensorless control of PMSM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8): 22-29.
- [4] 刘栋良,任劲松,林伟杰,等. 基于电感辨识的电流解耦算法在内置式永磁同步电机弱磁控制中的应用[J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 98-105.
LIU D L, REN J S, LIN W J, et al. Current decoupling algorithm based on inductance identification in the application of interior permanent magnet synchronous motor flux-weakening control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16): 98-105.
- [5] 许成俊,张兴,洪剑锋. 永磁同步电机复矢量电流调节器解耦性能分析[J]. 电力电子技术, 2020, 54(9): 1-3.
XU CH J, ZHANG X, HONG J F. Decoupling performance analysis of permanent magnet synchronous

- motor complex vector current regulator [J]. *Power Electronics*, 2020, 54(9): 1-3.
- [6] 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): 1985-1996.
- YANG SH Y, WANG Y ZH, CHU ZH H, et al. Current decoupling control of pmsm based on an extended state observer with continuous gains [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(6): 1985-1996.
- [7] 陈汝兵, 曹太强, 邓吉利, 等. 基于 MRAS 的永磁同步电机无速度传感器控制[J]. *电测与仪表*, 2021, 58(8): 179-184.
- CHEN R B, CAO T Q, DENG J L, et al. Speed sensorless control of permanent magnet synchronous motors based on MRAS [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(8): 179-184.
- [8] ZHANG Z J, JING L, WU X Z, et al. A deadbeat PI controller with modified feedforward for PMSM under low carrier ratio[J]. *IEEE Access*, 2021, 9:63463-63474.
- [9] 吴荒原, 王双红, 辜承林, 等. 内嵌式永磁同步电机改进型解耦控制[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(1): 30-37.
- WU H Y, WANG SH H, GU CH L, et al. An improved decoupling control strategy for the IPMSMS [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(1): 30-37.
- [10] ZHOU S ZH, LIU J J, ZHOU L Y, et al. DQ current control of voltage source converters with a decoupling method based on preprocessed reference current feedforward[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(11): 8904-8921.
- [11] 鲍旭聪, 王晓琳, 彭旭衡, 等. 高速电机驱动关键技术研究综述[J/OL]. *中国电机工程学报*; 1-16 [2022-05-25]. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.211524.
- BAO X C, WANG X L, PENG X H, et al. Review of key technologies of high speed motor drive [J/OL]. *Proceedings of the CSEE*; 1-16 [2022-05-25]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211524.
- [12] 王双全, 朱元, 吴志红, 等. 车用永磁同步电机偏差解耦控制系统性能[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(7), 1077-1082.
- WANG SH Q, ZHU Y, WU ZH H, et al. Deviation decoupling control system performance of permanent magnet synchronous motor in vehicle application [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2012, 40(7): 1077-1082.
- [13] 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): 5859-5868.
- LI CH P, BEN H Q, LIU B, et al. Deviation decouple control method based on disturbance observer [J]. *Proceedings of CSEE*, 2015, 35(22): 5859-5868.
- [14] 司梦, 李好文, 郑岗, 等. 永磁同步电机偏差解耦控制策略研究[J]. *电气传动*. 2020, 50(1): 30-35.
- SI M, LI H W, ZHENG G, et al. Study on deviation decoupling control strategy of permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Drive*, 2020, 50(1): 30-35.
- [15] 刘宇博, 王旭东, 周凯. 基于滑模观测器的永磁同步电机电流偏差解耦控制[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(8): 1642-1652.
- LIU Y B, WANG X D, ZHOU K. Current deviation decoupling control with a sliding mode observer for permanent magnet synchronous motor [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(8): 1642-1652.
- [16] 曾小莉, 王维庆, 王海云. 基于电流偏差的永磁同步电机滑模电流解耦控制[J/OL]. *控制理论与应用*; 1-10 [2022-05-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20220321.1139.012.html>.
- ZENG X L, WANG W Q, WANG H Y. Decoupled current control of permanent magnet synchronous motors drives with sliding mode control strategy based on current deviation [J/OL]. *Control Theory & Applications*; 1-10 [2022-05-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1240.TP.20220321.1139.012.html>.
- [17] 赵希梅, 吴岑. 基于滑模自抗扰的 PMLSM 电流偏差解耦控制[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(4): 431-441.
- ZHAO X M, WU C. Current deviation decoupling control based on sliding mode active disturbance rejection for PMLSM [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(4), 431-441.
- [18] 吴忠强, 杜春奇, 李峰, 等. 基于蝙蝠算法的永磁同

步电机健康状态监测[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3): 695-702.

WU ZH Q, DU CH Q, LI F, et al. Health condition monitoring of the permanent magnet synchronous motor based on bat algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(3): 695-702.

[19] 赵凯辉, 殷童欢, 张昌凡, 等. 永磁同步电机无模型滑模控制方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(4): 172-180.

ZHAO K H, YIN T H, ZHANG CH F, et al. Research on model-free sliding mode control of permanent magnet synchronous motor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32 (4): 172-180.

作者简介



邓聪颖, 2012 年和 2016 年于四川大学获得学士学位和博士学位, 现为重庆邮电大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为机床动力学和汽车动力学。

E-mail: dengcy@cqupt.edu.cn

Deng Congying received her B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Sichuan University in 2012 and 2016, respectively. She is currently an associate professor and a master advisor at Chongqing University of Posts and Telecommunications. Her main research interests include the machine tool dynamics and automotive dynamics.



禄盛 (通信作者), 2004 年于西安交通大学获得学士学位, 2009 年于韩国仁荷大学获得博士学位, 现为重庆邮电大学教授, 硕士生导师, 主要研究方向为汽车工程中相关力学与控制问题。

E-mail: lusheng@cqupt.edu.cn

Lu Sheng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 2004, and received his Ph. D. degree from Inha University in 2009. He is currently a professor and a master advisor at Chongqing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include the mechanics and controls in automotive engineering.