

永磁同步电机鲁棒有限集模型预测 电流控制算法

钟灼臻, 曾岳南, 罗伟维
(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

摘要: 在永磁同步电机(PMSM)驱动系统中,基于有限集模型预测电流控制(FCS-MPCC)算法所设计的系统电流内环控制器,性能受电机参数变化的影响。推导了PMSM预测模型,同时以电压矢量为约束项重构价值函数,并针对数字延时导致的电流纹波问题进行了补偿。提出了一种鲁棒性较强的FCS-MPCC算法,通过在预测模型中引入权重系数并定量调节,以降低算法对参数的敏感性。仿真结果表明,所提算法有效,能使系统具备良好的动态性能和稳态精度。

关键词: 永磁同步电机;有限集模型预测电流控制;价值函数;鲁棒预测

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)03-0017-06

doi: 10.12177/emca.2019.172

Robust Finite Control Set Model Predictive Current Control Algorithm for Permanent Magnet Synchronous Motor

ZHONG Zhuozhen, ZENG Yuenan, LUO Weiwei

(School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In the permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive system, the system current inner loop controller based on the finite control set model predictive current control (FCS-MPCC) algorithm is affected by the variation of motor parameters. The prediction model of PMSM is derived. The cost function is reconstructed with the voltage vector as the constraint, and the current ripple problem caused by the digital delay is compensated. A robust FCS-MPCC algorithm is proposed, which reduces the sensitivity of the algorithm to the parameters by introducing weight coefficients and quantitative adjustments in the prediction model. The simulation results show that the proposed algorithm is effective and can make the system have good dynamic performance and steady state accuracy.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); finite control set model predictive current control (FCS-MPCC); cost function; robust prediction

0 引言

有限集模型预测电流控制(FCS-MPCC)算法正逐渐成为电力电子及电机控制领域上的研究热点之一^[1-3],将其应用于电流控制器的设计可有效提高系统的动态性能^[4-5]。FCS-MPCC

算法根据离散电流预测模型,采样电机当前控制周期的电流和速度信息,直接预测出电机在下一控制周期的状态,同时结合逆变器的离散特性,定义由逆变器的8个基本电压矢量建立的控制集为有限集,通过枚举基本电压矢量,选取能使价值函数取最小值的电压矢量,作为控制

收稿日期: 2019-11-15; 收到修改稿日期: 2020-01-02

作者简介: 钟灼臻(1994—),男,硕士研究生,研究方向为电机控制。

曾岳南(1962—),男,教授,硕士生导师,研究方向为电力电子功率变换器、电力传动运动控制。

罗伟维(1997—),男,硕士研究生,研究方向为电机控制。

器输出的最优解^[6]。

有限集模型预测控制(FCS-MPC)算法的实施在一定程度上会受到参数时变的影响。文献[7]基于三相逆变器的预测模型,详细讨论了负载电感的变化给算法性能带来的影响较大,而电阻变化带来的影响很小。文献[8]通过在预测过程中综合考虑上一控制周期的预测误差,以补偿模型参数不确定对预测精确性造成的影响,提高了算法的鲁棒性。文献[9]构造了Luenberger扰动观测器,结合参数误差补偿来消除感应电机驱动系统受到的扰动,从而使预测电流能精确跟踪参考值,但这类方法的关键取决于观测器的稳定性^[10]。文献[11]结合了模型参考自适应算法,通过在线辨识电感值实时刷新FCS-MPC算法的模型参数,辅助效果明显,但使用时需要占用一定的系统资源,使算法的时效性受到影响。

本文以永磁同步电机(PMSM)为研究对象,通过推导预测模型并引入权重系数对FCS-MPCC算法的鲁棒性能进行改善。所提鲁棒预测算法具有反馈控制的特点,无需借助观测器或系统参数辨识等外部手段,旨在提高算法自身的抗干扰能力。最后,将所提算法与传统FCS-MPCC算法进行仿真对比,验证了理论推导的正确性和所提算法的有效性。

1 FCS-MPCC 算法

1.1 基于PMSM的预测模型

PMSM在同步旋转坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f \\ T_e = \frac{3}{2} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电压和电流; ω_e 为电角速度; ψ_f 、 R 、 L_d 、 L_q 分别为永磁体磁链、定子电阻和 d 、 q 轴电感; T_e 为电磁转矩; p 为极对数。

对于表贴式PMSM有 $L_d = L_q = L$,根据式(1)的电压方程,选择电机 d 、 q 轴电流为状态变量,可得状态空间表达式:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega_e \\ -\omega_e & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\psi_f}{L} \omega_e \end{bmatrix} \quad (2)$$

在设定采样时间 T_s 较小的情况下,采用一阶前向欧拉法对式(2)进行离散化,可得:

$$\begin{bmatrix} i_d(k+1) \\ i_q(k+1) \end{bmatrix} = \mathbf{A}(k) \cdot \begin{bmatrix} i_d(k) \\ i_q(k) \end{bmatrix} + \mathbf{B} \cdot \begin{bmatrix} u_d(k) \\ u_q(k) \end{bmatrix} + \mathbf{C}(k) \quad (3)$$

其中:

$$\mathbf{A}(k) = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_s R}{L} & T_s \omega_e(k) \\ -T_s \omega_e(k) & 1 - \frac{T_s R}{L} \end{bmatrix}; \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{T_s}{L} & 0 \\ 0 & \frac{T_s}{L} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C}(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{T_s \psi_f}{L} \omega_e(k) \end{bmatrix}; i_d(k+1)、i_q(k+1) \text{ 为下一控制周期的电流预测值。}$$

根据FCS-MPCC算法使电流预测值精确等于电流参考值 $i_d^*(k+1)$ 、 $i_q^*(k+1)$ 的控制目标,即:

$$\begin{cases} i_d(k+1) = i_d^*(k+1) \\ i_q(k+1) = i_q^*(k+1) \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3),可得同步旋转坐标系下的参考电压矢量预测模型为

$$\begin{bmatrix} u_d^*(k) \\ u_q^*(k) \end{bmatrix} = \mathbf{B}^{-1} \left\{ \begin{bmatrix} i_d^*(k+1) \\ i_q^*(k+1) \end{bmatrix} - \mathbf{A}(k) \cdot \begin{bmatrix} i_d(k) \\ i_q(k) \end{bmatrix} - \mathbf{C}(k) \right\} \quad (5)$$

式中: $u_d^*(k)$ 、 $u_q^*(k)$ 分别为 d 、 q 轴参考电压矢量。

1.2 价值函数

FCS-MPCC算法的另一个核心环节是价值函数。以参考电压矢量与控制集内各个基本电压矢量间的误差最小为约束项,构建价值函数:

$$g = [u_d^*(k) - u_d(k)]^2 + [u_q^*(k) - u_q(k)]^2 \quad (6)$$

与传统 FCS-MPCC 算法相比,采用反向预测参考电压矢量的方法能避免 8 次重复电流预测,直接根据参考电压矢量快速推选出最优电压矢量,减少算法冗余。

控制集由三相电压源型逆变器提供的 8 个基本电压矢量 ($U_0 \sim U_7$) 组成,对应着 8 种不同的开关状态,如表 1 所示。

表 1 开关状态与电压矢量的对应关系

U_n	$[S_a \ S_b \ S_c]$	$[u_\alpha, u_\beta]$
U_0	$[0 \ 0 \ 0]$	$[0, 0]$
U_1	$[1 \ 0 \ 0]$	$[2u_{dc}/3, 0]$
U_2	$[1 \ 1 \ 0]$	$[u_{dc}/3, \sqrt{3}u_{dc}/3]$
U_3	$[0 \ 1 \ 0]$	$[-u_{dc}/3, \sqrt{3}u_{dc}/3]$
U_4	$[0 \ 1 \ 1]$	$[-2u_{dc}/3, 0]$
U_5	$[0 \ 0 \ 1]$	$[-u_{dc}/3, -\sqrt{3}u_{dc}/3]$
U_6	$[1 \ 0 \ 1]$	$[u_{dc}/3, -\sqrt{3}u_{dc}/3]$
U_7	$[1 \ 1 \ 1]$	$[0, 0]$

1.3 数字系统延时补偿

数字控制系统中存在一个周期的延时,会导致电流围绕其参考值周期性振荡,增加电流纹波。本文采用两步预测方法,根据式(3),首先使用上个控制周期推算出的电压矢量计算电流 $i_d(k+1)$ 和 $i_q(k+1)$ 作为起始值,预测参考电压矢量 $u_d^*(k+1)$ 和 $u_q^*(k+1)$,以补偿延时。电流参考值 $i_d^*(k+2)$ 和 $i_q^*(k+2)$ 可根据拉格朗日插值法求得:

$$\begin{cases} \hat{i}_d^*(k+2) = 6i_d^*(k) - 8i_d^*(k-1) + 3i_d^*(k-2) \\ \hat{i}_q^*(k+2) = 6i_q^*(k) - 8i_q^*(k-1) + 3i_q^*(k-2) \end{cases} \quad (7)$$

2 鲁棒 FCS-MPCC 算法

由于实际工作环境不同引起电机参数变化或电机参数本身测量时存在误差,会导致 FCS-MPCC 算法得到的最优电压矢量在作用时,难以继续保证电机实际输出的电流精确等于电流预测值^[5]。所产生的实际电流值可表示为

$$\begin{bmatrix} i_d(k+1) \\ i_q(k+1) \end{bmatrix} = \mathbf{A}_0(k) \cdot \begin{bmatrix} i_d(k) \\ i_q(k) \end{bmatrix} + \mathbf{B}_0 \cdot \begin{bmatrix} u_d(k) \\ u_q(k) \end{bmatrix} + \mathbf{C}_0(k) \quad (8)$$

$$\text{其中: } \mathbf{A}_0(k) = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_s R_0}{L_0} & T_s \omega_e(k) \\ -T_s \omega_e(k) & 1 - \frac{T_s R_0}{L_0} \end{bmatrix}; \mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} \frac{T_s}{L_0} & 0 \\ 0 & \frac{T_s}{L_0} \end{bmatrix}; \mathbf{C}_0(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{T_s \psi_{f0}}{L_0} \omega_e(k) \end{bmatrix}; R_0, L_0, \psi_{f0} \text{ 分}$$

别为电机实际电阻、电感、永磁体磁链。

针对上述问题,本文提出一种鲁棒 FCS-MPCC 算法,从控制器自身的抗干扰能力出发,削弱模型参数不匹配给控制性能带来的影响。将预测模型中采样电流的输入项改写为

$$\begin{cases} i_{d, \text{modified}}(k) = \lambda_1 i_d^p(k) + \lambda_2 i_d(k) \\ i_{q, \text{modified}}(k) = \lambda_1 i_q^p(k) + \lambda_2 i_q(k) \end{cases} \quad (9)$$

式中: λ_1, λ_2 为取值范围在 0~1 之间的权重系数,且 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$; $i_d^p(k), i_q^p(k)$ 为控制周期 $(k-1)$ 所得的 d, q 轴电流预测值, $i_d^p(k) = i_d^*(k), i_q^p(k) = i_q^*(k)$; $i_d(k), i_q(k)$ 为 d, q 轴电流采样值。

将式(9)代入式(5),可得:

$$\begin{cases} u_d^*(k) = \left(R - \frac{L}{T_s}\right) [\lambda_1 i_d^p(k) + \lambda_2 i_d(k)] + \frac{L}{T_s} i_d^*(k+1) - \omega_e(k)L[\lambda_1 i_q^p(k) + \lambda_2 i_q(k)] \\ u_q^*(k) = \left(R - \frac{L}{T_s}\right) [\lambda_1 i_q^p(k) + \lambda_2 i_q(k)] + \frac{L}{T_s} i_q^*(k+1) + \omega_e(k)L[\lambda_1 i_d^p(k) + \lambda_2 i_d(k)] + \omega_e(k)\psi_f \end{cases} \quad (10)$$

将式(10)代入式(8),可得控制器模型参数不匹配时,实际电流响应和电机参数间的关系:

$$\begin{aligned} i_q(k+1) = & \left[\left(1 - \frac{T_s R_0}{L_0}\right) + \left(\frac{T_s R}{L_0} - \frac{L}{L_0}\right) \lambda_2 \right] i_q(k) + \\ & \frac{L}{L_0} i_q^*(k+1) + \left(\frac{T_s R}{L_0} - \frac{L}{L_0}\right) \lambda_1 i_q^p(k) + \\ & \frac{T_s}{L_0} \omega_e(k) (\psi_f - \psi_{f0}) - T_s \omega_e(k) i_d(k) + \\ & \frac{T_s}{L_0} \omega_e(k) L [\lambda_1 i_d^p(k) + \lambda_2 i_d(k)] \end{aligned} \quad (11)$$

将带有磁链的反电动势项作为控制器的扰动,且采用 $i_d=0$ 的控制方案时,考虑在采样时间 T_s 足够小的情况下,式(11)可简写为

$$i_q(k+1) + \left(\frac{L}{L_0}\lambda_2 - 1\right) i_q(k) = \frac{L}{L_0} i_q^*(k+1) - \lambda_1 \frac{L}{L_0} i_q^p(k) \quad (12)$$

将式(12)表示为离散形式的传递函数:

$$\frac{i_q(z)}{i_q^*(z)} = \frac{z \frac{L}{L_0} - \lambda_1 \frac{L}{L_0}}{z + \left(\frac{L}{L_0}\lambda_2 - 1\right)} \quad (13)$$

根据式(13),当且仅当闭环系统特征方程的所有根均位于 z 平面单位圆内,即 $|z| < 1$,该离散控制系统是稳定的,则根据根的取值范围可推导出:

$$0 < L < \frac{2L_0}{\lambda_2}, \lambda_2 \in (0, 1] \quad (14)$$

由此可知,随着权重系数 λ_2 减小,系统维持稳定所允许的电感变化范围得到增加,能使 FCS-MPCC 算法具备应对较大实际电感误差干扰的能力。

从性能鲁棒性的角度对鲁棒 FCS-MPCC 算法进行分析,在 $i_d=0$ 控制方案下, d 轴采样电流的作用基本可以忽略,则 q 轴参考电压计算式可表示为

$$u_q^*(k) = \left(R - \frac{L}{T_s}\right) [\lambda_1 i_q^p(k) + \lambda_2 i_q(k)] + \frac{L}{T_s} i_q^*(k+1) + \omega_e(k) \psi_f \quad (15)$$

由于电阻压降通常较小,对电流响应的影响不明显,将电阻压降与反电动势项 $\omega_e(k) \psi_f$ 之和记为 $E_q(k)$,则鲁棒 FCS-MPCC 算法可表示为

$$u_q^*(k) = \frac{L}{T_s} [i_q^*(k+1) - \lambda_2 i_q(k)] - \frac{L}{T_s} \lambda_1 i_q^p(k) + E_q(k) \quad (16)$$

由式(16)可知,当 $\lambda_2 = 1$ 时,鲁棒 FCS-MPCC 算法与式(5)是完全等效的,而当 λ_2 在 $0 \sim 1$ 之间取值时,鲁棒 FCS-MPCC 算法通过在控制器中引入了反馈校正项,构成了闭环控制系统。改进后的算法不断利用上一控制周期的

预测结果对当前预测模型进行修正,进而使得价值函数在每次矢量选取过程中不仅考虑了当前周期的模型参数,而且借助了反馈信息,以确保受控电流在实际电机参数变化下仍然能精确收敛。

λ_1 可看作是反馈校正系数,算法的稳定性能会随着 λ_1 取值的不同而发生改变,当 λ_1 取较小值时,算法的稳定性更好,然而,根据负反馈控制的原理,如果 λ_1 取值较大时,电流响应会出现明显波动;同时 λ_2 值越小,电流预测值与采样值间的误差越大,需要的调节时间越长,响应速度也相应变慢,因此鲁棒 FCS-MPCC 算法在改善系统稳定性的同时,是以降低系统的一部分动态性能为代价的。

根据所提鲁棒 FCS-MPCC 算法,构建结构框图如图1所示。

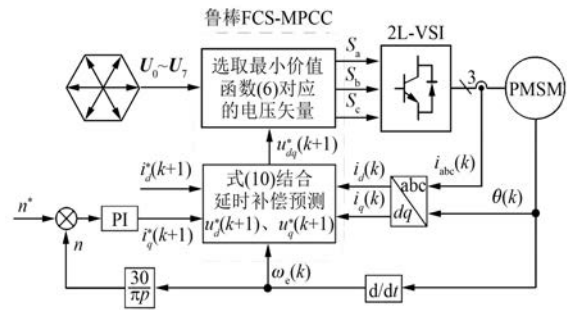


图1 PMSM 鲁棒 FCS-MPCC 结构图

3 仿真结果及分析

利用 MATLAB/Simulink 仿真环境将所提算法与传统算法进行对比验证。仿真用 PMSM 参数如表2所示。系统的采样频率设定为 16 kHz,速度环采用传统 PI 调节器且每次均设定为同一 PI 参数。仿真条件:电机空载起动,在 0.01 s 时转速给定阶跃为额定转速 2 500 r/min,在 0.20 s 时加载至额定负载 7.5 N·m,在 0.60 s 时突卸负载。

图2所示为进行延时补偿前后 FCS-MPCC 算法得到的三相定子电流波形。对比图2(a)和图2(b)可知,进行延时补偿后电流纹波较小,波形有较高的正弦度,电流畸变率降低,系统具有较好的稳定性。因此,对下文的结果均进行延时补偿。

表 2 仿真用 PMSM 参数

电机参数	参数值
功率/kW	1.5
转矩/(N·m)	7.5
转速/(r·min ⁻¹)	2 500
转动惯量/(kg·m ²)	0.001 25
定子电阻/Ω	0.886
轴电感/mH	2.974 6
电流/A	7.5
极对数/p	4
永磁体磁链/Wb	0.163 3

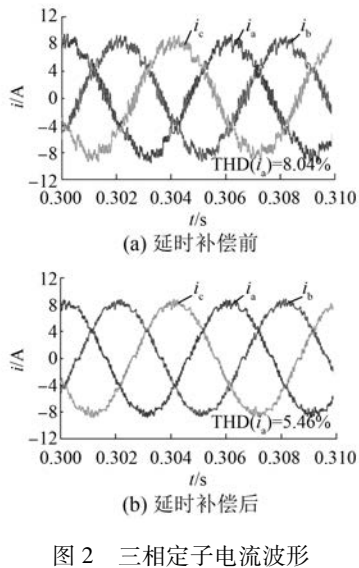
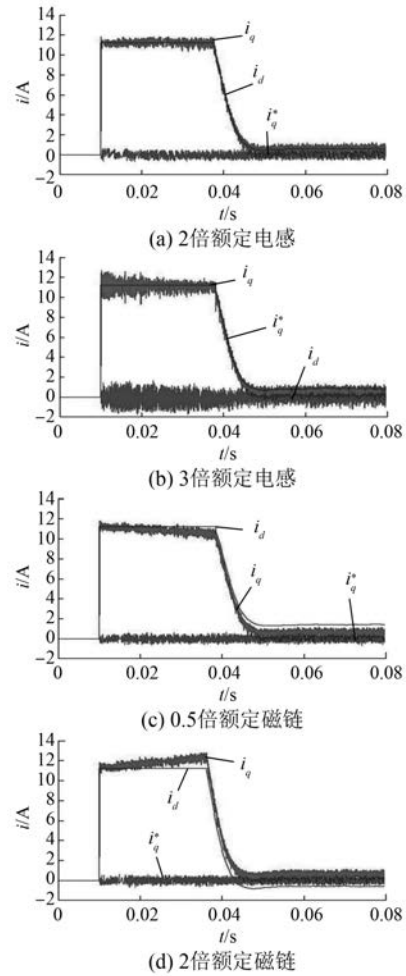


图 2 三相定子电流波形

图 3 所示为控制器模型参数有误差时传统 FCS-MPCC 算法的 d, q 轴电流响应波形。由于电阻误差对算法的影响较小^[12], 因此下文着重分析电感和磁链存在误差时的电流波形。由图 3 可知, 当模型电感取 0.5 倍额定电感时电流纹波较小, 而取 2 倍额定电感时电流出现振荡, 系统有发散的趋势。磁链误差只影响 q 轴电流, 主要表现在恒流加速过程中, 而当处于恒速运行时会导致实际电流与参考电流出现静差。

图 4 所示为模型参数有误差时鲁棒 FCS-MPCC 算法的 d, q 轴电流响应波形。由上述结果得出模型电感偏小对算法的影响较小, 故下文分析模型电感取 2 倍、3 倍额定值, 磁链取 0.5 倍、2 倍额定值时电流的控制效果。其中, 鲁棒 FCS-MPCC 算法的权重系数 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$ 。仿真结果表明, 该算法能够有效抑制由电感误差导致的电流振荡, 且能够有效消除磁链误差引起的电流静差,

图 3 模型参数有误差时传统 FCS-MPCC 算法的 d, q 轴电流响应波形

同时能够有效降低算法对模型参数变化的敏感度, 使算法的鲁棒性得到改善。

考虑权重系数 λ_1 和 λ_2 的取值对鲁棒 FCS-MPCC 算法动态和稳态性能间的影响, 在模型电感取 2 倍额定电感的情况下, 权重系数设定为 $\lambda_1 = 0.8, \lambda_2 = 0.2$, d, q 轴电流响应波形如图 5 所示。观察图 5 可知, 虽然算法的鲁棒性得到进一步提高, 但随着权重系数 λ_1 增大和 λ_2 减小, q 轴电流需要一段时间才能跟踪上参考值, 且 d 轴电流出现了明显的波动。因此, 关于鲁棒 FCS-MPCC 算法的权重系数取值需要同时兼顾动态和稳态性能。

图 6 所示为所提鲁棒 FCS-MPCC 算法下的电机转速波形。由图 6 可见, 该算法能够实现电机平稳启动, 响应超调较小, 相对稳定性较好, 且在

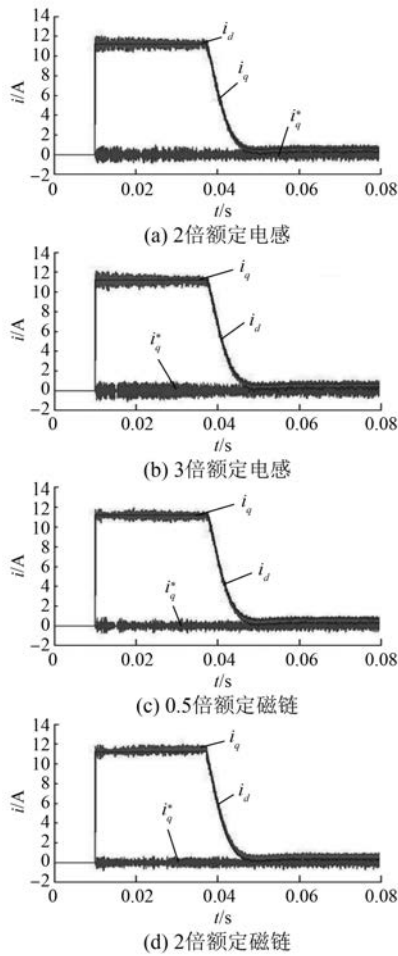


图4 模型参数有误差时鲁棒 FCS-MPCC 算法的 d, q 轴电流响应波形

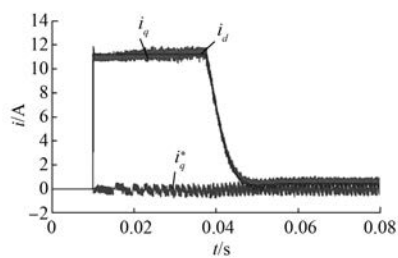


图5 2倍额定电情况下改变权重系数时 d, q 轴电流响应波形

突加减负载时仅出现较小的转速波动,恢复时间较短,抗扰性能良好。

4 结 语

本文基于 FCS-MPCC 算法的原理设计了 PMSM 驱动系统的电流内环控制器。以电压矢量

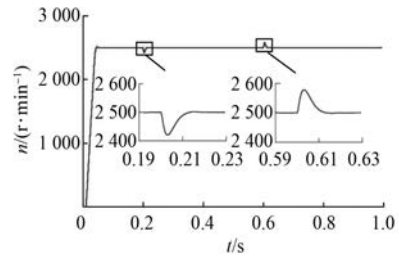


图6 鲁棒 FCS-MPCC 算法下的电机转速波形

为约束项重构价值函数,使算法表达更直观。经过数字延时补偿后,能明显减小电流纹波,且降低了电流谐波畸变。所提鲁棒 FCS-MPCC 算法能有效降低算法对模型参数变化的敏感度,增加控制系统对于参数存在误差时的稳定范围,使电机电流更加精确地跟随参考值。该算法能使系统稳定可靠运行,为 FCS-MPCC 算法在工程中的应用提供了参考依据。

【参考文献】

[1] AGUILERA R P, LEZANA P, QUEVEDO D E. Finite-control-set model predictive control with improved steady-state performance [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2) : 658.

[2] 徐楠, 吕彦, 谢后晴. 永磁同步电机改进预测电流控制 [J]. 电机与控制应用, 2017, 44(7) : 42.

[3] ROVERE L, FORMENTINI A, GAETA A, et al. Sensorless finite-control set model predictive control for IPMSM drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(9) : 5921.

[4] 涂文聪, 骆光照, 刘卫国. 基于模糊动态代价函数的永磁同步电机有限控制集模型预测电流控制 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(16) : 89.

[5] 金楠, 窦智峰, 李琰琰, 等. 电压源并网变换器有限控制集预测电流控制 [J]. 电机与控制学报, 2019, 23(9) : 123.

[6] 颜学龙, 谢刚, 孙天夫, 等. 基于模型预测控制的永磁同步电机电流控制技术综述 [J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9) : 1.

[7] YOUNG H A, PEREZ M A, RODRIGUEZ J. Analysis of finite-control-set model predictive current control with model parameter mismatch in a three-phase inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(5) : 3100.

(下转第 33 页)

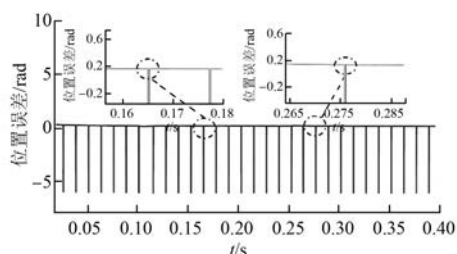


图 11 不同载荷下转子位置误差曲线

5 结 语

本文在传统 PMSM 无位置传感器控制系统的基础上,提出了基于改进滤波器的新型 SMO,在传统 SMO 的基础上运用 Sigmoid 函数代替切换函数,降低了转速和位置观测值的抖振。同时,通过变截止 LPF 和卡尔曼滤波器组成的级联滤波器可以有效降低测量噪声和测量误差,运用 PLL 可以获得较为精确的电机转速信息和位置信息,通过仿真的手段验证了该系统具有较好的控制效果。

【参 考 文 献】

- [1] 于帅,章玮.应用特征谐波消除改进脉振高频电压注入法[J].电机与控制学报,2016,20(12):17.
- [2] 杜逸康,廖勇,李福,等.同步磁阻电动机改进高频注入位置估算算法研究[J].微特电机,2019,47(4):43.
- [3] JANG J, SUI S, HA J. Sensorless drive of surface-mounted permanent magnet motor by high-frequency signal injection based on magnetic saliency[J]. IEEE

Transactions on Industry Applications, 2003, 39(4): 1031.

- [4] 郭伟,王跃,李宁,等.永磁同步电机模型参考自适应无速度控制研究[J].电力电子技术,2016,50(8):75.
- [5] 孙宇新,唐敬伟,施凯,等.基于改进型 MRAS 无轴异步电机矢量控制系统转速辨识研究[J].电机与控制应用,2018,45(3):51.
- [6] SRIKANTH V, DUTT A A. A comparative study on the effect of switching functions in SMO for PMSM drives[C]//2012 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2012.
- [7] LIN S, ZHANG W. An adaptive sliding-mode observer with a tangent function-based PLL structure for position sensorless PMSM drives [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 88: 63.
- [8] 鲁文其,胡育文,杜栩杨,等.永磁同步电机新型滑模观测器无传感器矢量控制调速系统[J].中国电机工程学报,2010,30(33):78.
- [9] 华志广,窦满峰,赵冬冬,等.基于改进型滑模观测器的 PMSM 无位置传感器控制[J].西北工业大学学报,2018,36(4):754.
- [10] 邱忠才,郭冀岭,王斌,等.基于卡尔曼滤波滑模变结构转子位置观测器的 PMSM 无差拍控制[J].电机与控制学报,2014,18(4):60.
- [11] 丁文,梁得亮,罗战强,等.两级滤波滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制[J].电机与控制学报,2012,16(11):1.

(上接第 22 页)

- [8] SIAMI M, KHABURI D A, ABBASZADEH A, et al. Robustness improvement of predictive current control using prediction error correction for permanent-magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3458.
- [9] WANG B, CHEN X, YU Y, et al. Robust predictive current control with online disturbance estimation for induction machine drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(6): 4663.
- [10] LEE K J, PARK B G, KIM R Y, et al. Robust predictive current controller based on a disturbance estimator in a three-phase grid-connected inverter[J].

IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(1): 276.

- [11] LIU X, WANG D, PENG Z. Improved finite-control-set model predictive control for active front-end rectifiers with simplified computational approach and on-line parameter identification [J]. ISA Transactions, 2017, 69: 51.
- [12] BOGADO B, BARRERO F, ARAHAL M R, et al. Sensitivity to electrical parameter variations of predictive current control in multiphase drives [C]//IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013.