

永磁同步电机新型无差拍直接转矩控制

扶文树^{1,2}, 储建华², 王刚²

(1. 南京信息职业技术学院 智能制造学院, 江苏 南京 210036;

2. 江苏开璇智能科技有限公司, 江苏 苏州 215101)

摘要:针对传统无差拍直接转矩控制中电机内部参数扰动对给定电压矢量的影响,提出一种基于滑模扰动观测器补偿的永磁同步电机无差拍直接转矩控制策略。首先,结合滑模控制理论,分别构建了 d, q 轴滑模扰动观测器,对参数扰动引起的 d, q 轴电压变化量进行观测,将其补偿至给定 d, q 轴电压,提高系统对参数扰动的鲁棒性。其次,对 q 轴滑模扰动观测器进行了重构,在对 q 轴参考电压扰动补偿的同时对转子磁链进行了有效辨识。试验结果验证了新型控制策略的有效性和实用性。

关键词:永磁同步电机;无差拍直接转矩控制;滑模扰动观测器;参数扰动

中图分类号:TM351 **文献标识码:**A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed19951

New Deadbeat Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor

FU Wenshu^{1,2}, CHU Jianhua², WANG Gang²

(1. School of Intelligent Manufacturing Nanjing, Vocational College of Information Technology,

Nanjing 210036, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Kaiserdrive Intelligent

Technology Co., Ltd., Suzhou 215101, Jiangsu, China)

Abstract: Aiming at the influence of motor internal parameter perturbation on the given voltage vector in traditional deadbeat direct torque control (DBDTC), a deadbeat direct torque control strategy for permanent magnet synchronous motor (PMSM) based on sliding mode disturbance observer (SMDO) compensation was proposed. Firstly, combined with the sliding mode control theory, SMDO of d, q axis were constructed respectively to observe the voltage variation caused by parameter perturbation, and compensate it to the given voltage to improve the robustness of the system to parameter perturbation. Secondly, the SMDO of q axis was reconstructed, and the rotor flux linkage was effectively identified while the d, q axis reference voltage disturbance compensation was applied. The experimental results verify the effectiveness and practicability of the new control strategy.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); deadbeat direct torque control (DBDTC); sliding mode disturbance observer (SMDO); parameter perturbation

永磁同步电机具有效率高、功率密度高、转矩脉动小、调速范围宽等优点,对其通常采用磁场定向控制^[1](field oriented control, FOC)和直接转矩控制^[2](direct torque control, DTC)。传统的直接转矩控制无需内环电流控制即可实现转矩和磁链的控制,具有动态特性好、参数变化鲁棒性强的特点。然而,传统的直接转矩控制系统由2个非线性磁滞比较器和一个由6个控制电压矢量组成的开关表组成。电压矢量在每个采样周期开始时变化,每个逆变器的状态以可变的频率变化,因此存在开关频率不固定及转矩、磁链波

动明显的缺点^[3]。此外,逆变器的死区、电机参数的非线性变化也会引起系统波动,限制了直接转矩控制在永磁同步电机中的实现。

针对以上不足,研究者们研究了空间矢量调制(space vector modulation, SVM)直接转矩控制^[4]、模型预测控制^[5](model predictive control, MPC)和占空比调制控制^[6]。无差拍直接转矩控制(deadbeat direct torque control, DBDTC)将经典PI控制结构和空间矢量脉宽调制与直接转矩控制相结合,基于永磁同步电机模型的离散方程,计算并应用下一采样时间的电压矢量^[7-8],其保持了传统

基金项目:国家重点研发项目(2017YFB1300600)

作者简介:扶文树(1978—),男,博士,高级工程师,Email:fuws@njcit.cn

DTC 的快速动态特性和支持向量机的恒定切换频率。另外,电机的内部参数如定子电阻、电感以及转子磁链随运行过程中温度的变化而变化,该参数摄动会引起无差拍直接转矩控制中给定电压空间矢量的变化,影响转矩和磁链控制的性能,有效的扰动观测和参数辨识对于无差拍控制的鲁棒性是必要的。

针对上述问题分析,本文提出了一种基于滑模扰动观测器补偿的永磁同步电机无差拍直接转矩控制策略。首先,结合滑模控制理论,构建了dq轴滑模扰动观测器,对参数摄动引起的轴电压变化量进行观测,将其补偿至给定轴电压,提高系统对参数摄动的鲁棒性。在此基础上,对定子电阻和电感值进行离线辨识。其次,对q轴滑模扰动观测器进行了重构,在对q轴参考电压扰动补偿的同时对转子磁链进行了有效辨识。试验结果证明本文提出控制策略的有效性。

1 基于滑模扰动观测器的无差拍控制

无差拍直接转矩控制的d,q轴参考电压给定与定子电阻R、电感L以及转子永磁体磁链Ψ_r相关。考虑到电机运行过程中的温度变化,以上三种电机参数会发生摄动,因此,需分别对无差拍控制中三种电机参数摄动造成的系统扰动进行观测并有效补偿。

1.1 基于扰动观测器的参数辨识

根据d-q旋转坐标系下的永磁同步电机数学模型,若考虑电机实际运行过程中的定子电阻R、电感L以及转子永磁体磁链Ψ_r摄动量ΔR,ΔL和ΔΨ_r引起的系统扰动,d-q旋转坐标系下的永磁同步电机电压方程可改写为

$$\begin{cases} u_d = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega Li_q + f_d \\ \frac{df_d}{dt} = 0 \\ u_q = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega Li_d + \omega \Psi_r + f_q \\ \frac{df_q}{dt} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} f_d &= \Delta L \frac{di_d}{dt} + \Delta Ri_d - \Delta L \omega i_q \\ f_q &= \Delta L \frac{di_q}{dt} + \Delta Ri_q + \Delta L \omega i_d + \Delta \Psi_r \omega \end{aligned}$$

式中:u_d,u_q分别为电机定子d,q轴电压分量;i_d,i_q

分别为电机定子d,q轴电流分量;R为定子电阻;ω为转子电角速度;f_d,f_q为参数摄动引起的d,q轴电压变化量。

构建滑模扰动观测器为

$$\begin{cases} u_d = L \frac{d\hat{i}_d}{dt} + R\hat{i}_d - \omega Li_q + \hat{f}_d + U_{dsmo} \\ \frac{d\hat{f}_d}{dt} = g_d U_{dsmo} \\ u_q = L \frac{d\hat{i}_q}{dt} + R\hat{i}_q + \omega Li_d + \omega \Psi_r + \hat{f}_q + U_{qsmo} \\ \frac{d\hat{f}_q}{dt} = g_q U_{qsmo} \end{cases} \quad (2)$$

式中:̂i_d,̂i_q为d,q轴电流估计;̂f_d,̂f_q为参数摄动引起的d,q轴电压变化量估计;g_d,g_q为滑模参数;U_{dsmo},U_{qsmo}为滑模控制函数。

将式(2)与式(1)相减,得到

$$\begin{cases} \frac{de_1}{dt} = -\frac{R}{L} e_1 - \frac{1}{L} e_2 - \frac{1}{L} U_{dsmo} \\ \frac{de_2}{dt} = g_d U_{dsmo} \\ \frac{de_3}{dt} = -\frac{R}{L} e_3 - \frac{1}{L} e_4 - \frac{1}{L} U_{qsmo} \\ \frac{de_4}{dt} = g_q U_{qsmo} \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} e_1 &= \hat{i}_d - i_d & e_3 &= \hat{i}_q - i_q \\ e_2 &= \hat{f}_d - f_d & e_4 &= \hat{f}_q - f_q \end{aligned}$$

式中:e₁,e₃为d,q轴电流估计误差;e₂,e₄为d,q轴扰动估计误差。

选取如下滑模面:

$$\begin{cases} s_d = \hat{i}_d - i_d \\ s_q = \hat{i}_q - i_q \end{cases} \quad (4)$$

为提高滑模扰动观测器的观测准确性,选取等速趋近律为

$$\frac{ds}{dt} = -k \cdot \text{sign}(s) \quad (5)$$

式中:k为趋近律系数。

将式(4)代入式(5),得到:

$$\begin{cases} \frac{de_1}{dt} = -k_d \cdot \text{sign}(e_1) \\ \frac{de_3}{dt} = -k_q \cdot \text{sign}(e_3) \end{cases} \quad (6)$$

式中:k_d,k_q分别为d,q轴趋近律系数。将式(3)入式(6),得到:

$$\begin{cases} -\frac{R}{L}e_1 - \frac{1}{L}e_2 - \frac{1}{L}U_{dsmo} = -k_d \cdot \text{sign}(e_1) \\ -\frac{R}{L}e_3 - \frac{1}{L}e_4 - \frac{1}{L}U_{qsmo} = -k_q \cdot \text{sign}(e_3) \end{cases} \quad (7)$$

对式(7)求解,得到控制函数为

$$\begin{cases} U_{dsmo} = -R \cdot e_1 + Lk_d \cdot \text{sign}(e_1) \\ U_{qsmo} = -R \cdot e_3 + Lk_q \cdot \text{sign}(e_3) \end{cases} \quad (8)$$

为保证滑模系统的收敛性,选取滑模参数 k_d, k_q 和 g_d, g_q 需满足:

$$\begin{cases} e_1 \cdot \dot{e}_1 = e_1 \left(-\frac{R}{L}e_1 - \frac{1}{L}e_2 - \frac{1}{L}U_{dsmo} \right) \leq 0 \\ e_3 \cdot \dot{e}_3 = e_3 \left(-\frac{R}{L}e_3 - \frac{1}{L}e_4 - \frac{1}{L}U_{qsmo} \right) \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

对式(9)求解,得到:

$$\begin{cases} k_d > |e_2|/L \\ k_q > |e_4|/L \end{cases} \quad (10)$$

当系统进入滑动模式,式(3)简化为

$$\begin{cases} \dot{e}_2 + g_d e_2 = 0 \\ \dot{e}_4 + g_q e_4 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

对式(11)求解,得到:

$$\begin{cases} e_2 = C e^{-g_d t} \\ e_4 = C e^{-g_q t} \end{cases} \quad (12)$$

对式(2)离散化处理,得到:

$$\begin{cases} \hat{i}_d(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) \hat{i}_d(k) + \frac{T_s}{L} u_d(k) + \\ T_s \omega(k) i_q(k) - \frac{T_s}{L} \hat{f}_d(k) - \\ - \frac{T_s}{L} U_{dsmo}(k) \\ \hat{f}_d(k+1) = \hat{f}_d(k) + T_s g_d U_{dsmo}(k) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \hat{i}_q(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) \hat{i}_q(k) + \frac{T_s}{L} u_q(k) - \\ \frac{T_s \Psi_f}{L} \omega(k) - \frac{T_s}{L} \hat{f}_q(k) - \\ \frac{T_s}{L} U_{qsmo}(k) \\ \hat{f}_q(k+1) = \hat{f}_q(k) + T_s g_q U_{qsmo}(k) \end{cases} \quad (14)$$

式中: T_s 为系统电流控制周期。

根据式(13)、式(14)构建的离散型扰动滑模观测器,可观测出参数摄动引起的 d, q 轴电压变化量,将其补偿到 d, q 轴参考电压给定 u_d^*, u_q^* ,得到最终 d, q 轴参考电压给定 U_d^*, U_q^* 为

$$\begin{cases} U_d^* = u_d^*(k) + \hat{f}_d(k+1) \\ U_q^* = u_q^*(k) + \hat{f}_q(k+1) \end{cases} \quad (15)$$

当系统进入滑动模式,参数摄动引起的 d, q 轴电压变化量简化为

$$\begin{cases} \hat{f}_d = -\Delta L \omega i_q \\ \hat{f}_q = \Delta R i_q + \Delta \Psi_f \omega \end{cases} \quad (16)$$

根据式(16)中 \hat{f}_d 表达式,可得电感参数辨识,根据 \hat{f}_q 表达式,给定两次 i_q 值,可得电阻参数辨识,即

$$\begin{cases} L_0 = L + \Delta L = L - \frac{\hat{f}_d}{\omega i_q} \\ R_0 = R + \Delta R = R + \frac{\omega_1 \hat{f}_{q2} - \omega_2 \hat{f}_{q1}}{i_{q2} \omega_1 - i_{q1} \omega_2} \end{cases} \quad (17)$$

式中: L_0, R_0 为电感、电阻参数辨识值; i_{q1}, i_{q2} 为两次给定 i_q 下的 q 轴实际电流; ω_1, ω_2 为两次给定 i_q 下的转子电角速度; $\hat{f}_{q1}, \hat{f}_{q2}$ 为两次给定 i_q 下的 q 轴电压变化量估计。

综上,基于扰动滑模观测器的参数辨识原理框图如图1所示。

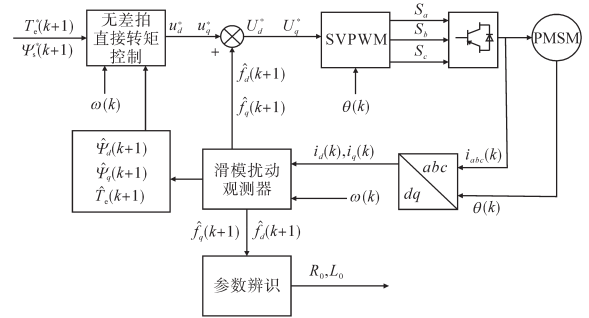


图1 基于扰动滑模观测器的参数辨识框图

Fig.1 Block diagram of parameters identification based on disturbance sliding mode observer

1.2 基于扰动补偿的无差拍控制

根据电机输出电磁转矩方程,转子永磁体磁链 Ψ_f 的准确性对电机控制性能影响较大,因此,需重新构建 q 轴扰动滑模观测器,对其进行相应辨识。

假定只考虑电感参数摄动,式(1)可改写为下式:

$$\begin{cases} u_q = L \frac{di_q}{dt} + R_0 i_q + \omega L i_d + \omega \Psi_{f0} + f_q \\ \frac{df_q}{dt} = 0 \\ f_q = \Delta L \frac{di_q}{dt} + \Delta L \omega i_d \end{cases} \quad (18)$$

重构 q 轴扰动滑模观测器为

$$\begin{cases} u_q = L \frac{d\hat{i}_q}{dt} + R_0 \hat{i}_q + \omega L i_d + \omega \hat{\Psi}_f + \hat{f}_q + U_{qsmo} \\ \frac{d\hat{f}_q}{dt} = g_q U_{qsmo} \end{cases} \quad (19)$$

将式(18)与式(19)相减,得到:

$$\begin{cases} \frac{de_3}{dt} = -\frac{R_0}{L} e_3 - \frac{\omega}{L} \Delta\Psi_f - \frac{1}{L} e_4 - \frac{1}{L} U_{qsmo} \\ \frac{de_4}{dt} = g_q U_{qsmo} \end{cases} \quad (20)$$

选取 $s_q = \hat{i}_q - i_q$ 为滑模面, $ds/dt = -k \cdot \text{sign}(s)$ 为趋近律,结合式(20),得到:

$$-\frac{R_0}{L} e_3 - \frac{\omega}{L} \Delta\Psi_f - \frac{1}{L} e_4 - \frac{1}{L} U_{qsmo} = -k \cdot \text{sign}(e_3) \quad (21)$$

其中

$$U_{qsmo} = -R_0 \cdot e_3 + Lk_q \text{sign}(e_3)$$

为保证滑模系统收敛性,需满足如下条件:

$$\begin{aligned} s_q \cdot \dot{s}_q &= e_3 \cdot \dot{e}_3 \\ &= e_3 \left(-\frac{R_0}{L} e_3 - \frac{\omega}{L} \Delta\Psi_f - \frac{1}{L} e_4 - \frac{1}{L} U_{qsmo} \right) \\ &\leq 0 \end{aligned} \quad (22)$$

对式(22)求解,得到:

$$k_q > \frac{|e_4 + \omega \Delta\Psi_f|}{L} \quad (23)$$

当滑模系统收敛时,式(20)可简化为

$$\begin{cases} 0 = 0 - \frac{\omega}{L} \Delta\Psi_f - \frac{1}{L} e_4 - \frac{1}{L} U_{qsmo} \\ \frac{de_4}{dt} = g_q U_{qsmo} \end{cases} \quad (24)$$

即

$$\dot{e}_4 + g_q e_4 + g_q \omega \Delta\Psi_f = 0 \quad (25)$$

由式(25)可知,为使 e_4 收敛,需满足 $g_q > 0$ 。因此,合理选取 k_q, g_q 大小,可保证 q 轴扰动滑模观测器的稳定性。

为保证 \hat{f}_q 收敛性的同时 $\hat{\Psi}_f$ 也收敛,建立 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} e_4^2 + \frac{1}{2} \frac{\Delta\Psi_f^2}{b} \quad b > 0 \quad (26)$$

对式(26)求导,得到:

$$\dot{V} = e_4 \dot{e}_4 + \frac{\Delta\Psi_f}{b} \Delta\dot{\Psi}_f \quad (27)$$

对式(24)求解,得到:

$$\begin{cases} \dot{e}_4 = -\omega \Delta\Psi_f - U_{qsmo} \\ \dot{e}_4 = g_q U_{qsmo} \end{cases} \quad (28)$$

将式(28)代入式(27)中,得到:

$$\dot{V} = -g_q U_{qsmo}^2 - \omega \Delta\Psi_f g_q U_{qsmo} + \frac{\Delta\Psi_f}{b} \Delta\dot{\Psi}_f \quad (29)$$

分析式(29)可知,由于 $g_q > 0$, 则 $-g_q U_{qsmo}^2 < 0$, 要使 $\dot{V} < 0$, 需满足:

$$-\omega \Delta\Psi_f g_q U_{qsmo} + \frac{\Delta\Psi_f}{b} \Delta\dot{\Psi}_f = 0 \quad (30)$$

整理式(30),得到:

$$\dot{\Psi}_f = (\hat{\Psi}_f - \Psi_{f0})' = \Delta\dot{\Psi}_f = b \omega g_q U_{qsmo} \quad (31)$$

最终与式(19)重构 q 轴扰动滑模观测器联立可辨识出转子永磁体磁链 $\hat{\Psi}_f$ 。

综上,基于扰动滑模观测器补偿的无差拍直接转矩控制原理框图如图2所示。

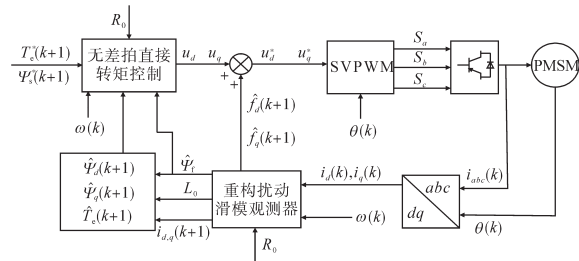


图2 基于扰动滑模观测器补偿的无差拍直接转矩控制框图
Fig.2 Deadbeat direct torque control block diagram based on disturbance sliding mode observer compensation

2 试验研究

在永磁同步电机交流调速试验平台上,将本文提出的基于扰动滑模观测器补偿的无差拍直接转矩控制策略与传统直接转矩控制作对比试验,对应的试验电机参数如下:额定功率 $P_N = 400$ W, 额定电压 $U_N = 220$ V, 额定电流 $I_N = 2.6$ A, 额定转矩 $T_N = 1.2$ N·m, 额定转速 $n_N = 3000$ r/min, 定子电阻 $R = 2.3$ Ω, 定子电感 $L = 7.34$ mH, 转子磁链 $\Psi_f = 0.122$ Wb, 电机极对数 $p = 4$ 。

试验过程包括动态试验和稳态试验。

在图3为给定负载转矩突变下的电磁转矩响应波形,给定电机 1000 r/min 的转速值,在 0~1.5 s 时间段通过测功机给定 1.2 N·m 的负载转矩,在 1.5 s~3.0 s 时间段负载转矩突变至 0.3 N·m,在 3.0 s~4.5 s 时间段再次突变至 1.2 N·m。其中,图 3a 为传统直接转矩控制下的响应波形,图 3b 为基于扰动滑模观测器补偿的无差拍直接转矩控制下的响应波形,对比图 3a 与图 3b 可以看出,基于扰动滑模观测器补偿的无差拍直接转矩控制保持了传统直接转矩良好的转矩动态性能,在此基

基础上,转矩纹波系数大幅度降低,由原先的25%降低至14%。

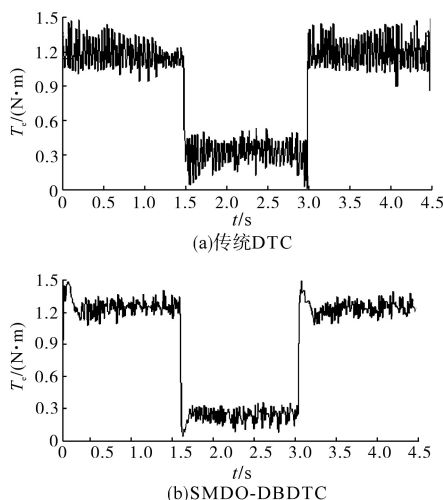


图3 给定负载突变下的电磁转矩

Fig.3 Electromagnetic torque under given abrupt load change

图4~图6分别为给稳态下的转速、电磁转矩和定子磁链对比试验波形,稳态条件给定电机2000 r/min的转速值以及1.2 N·m的负载转矩。

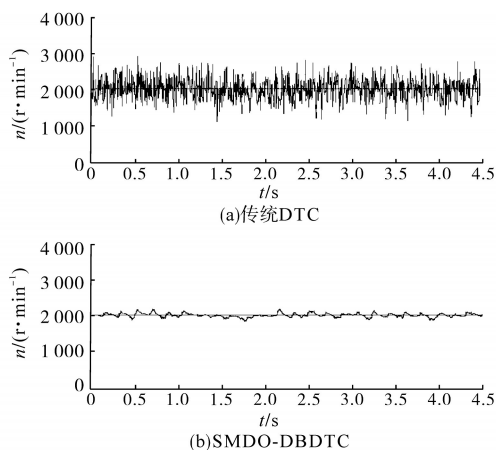


图4 稳态下的转速
Fig.4 Steady-state speed

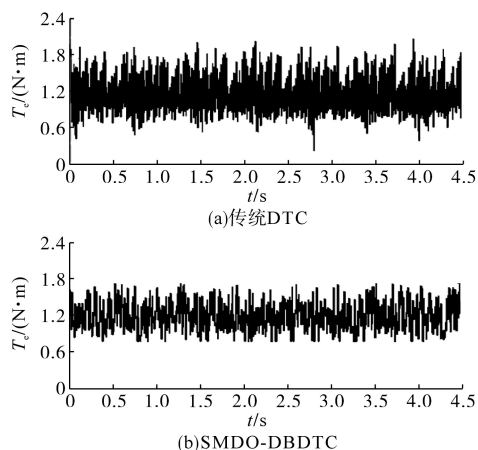


图5 稳态下的电磁转矩

Fig.5 Steady-state electromagnetic torque

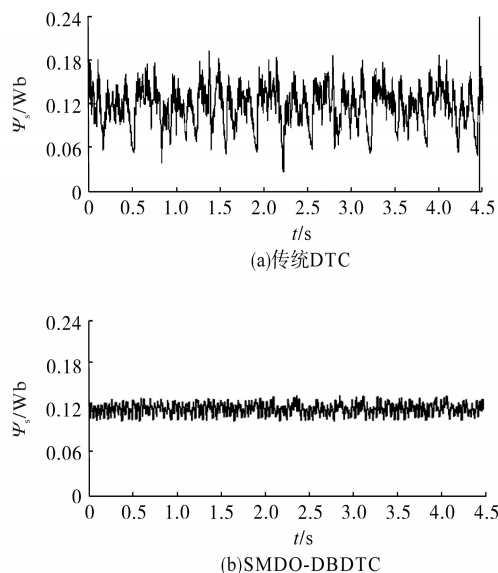


Fig.6 Steady-state stator flux linkage

对比图由图4~图6可知,基于扰动滑模观测器补偿的无差拍直接转矩控制稳态下的转速脉动由25%降低至5%,电磁转矩和磁链脉动大幅度降低,由此验证了基于扰动滑模观测器补偿的无差拍直接转矩控制的有效性。

图7为两种控制策略下的电机启动过程转速响应波形。

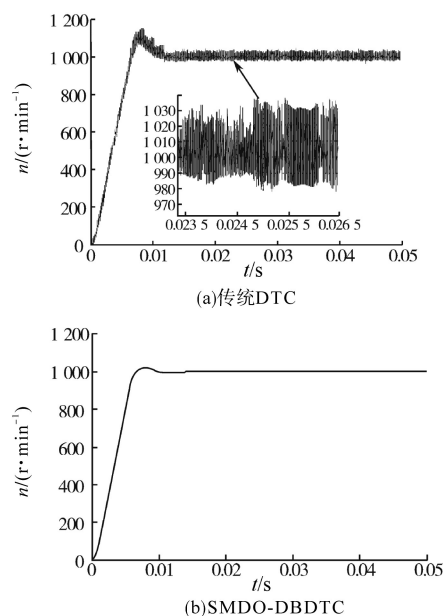


图7 启动过程转速响应波形

Fig.7 Speed response waveform in starting process

根据图7a可以发现,传统DTC控制策略下的电机转速存在180 r/min左右的超调,经过大约5 ms左右的调节时间达到稳态值。并且其在启动与稳态过程中存在较大的转速波动。对比图7b中的SMDO-DBDTC控制可知,SMDO-DBDTC控制

策略下的转速超调仅仅为 10 r/min 左右,无明显转速波动。

3 结论

本文针对传统无差拍直接转矩控制中电机内部参数摄动对给定电压矢量的影响,提出了一种基于滑模扰动观测器补偿的永磁同步电机无差拍直接转矩控制策略。

首先,结合滑模控制理论,构建了 d, q 轴滑模扰动观测器,对参数摄动引起的 d, q 轴电压变化量进行观测,将其补偿至给定轴电压,提高系统对参数摄动的鲁棒性。在此基础上,对定子电阻和电感值进行离线辨识。

其次,对 q 轴滑模扰动观测器进行了重构,在对 q 轴参考电压扰动补偿的同时对转子磁链进行了有效辨识。试验对比传统直接转矩控制与本文控制策略,结果验证了本文提出控制策略的有效性和可行性。

参考文献

[1] 朱沙,卢子广,王子豪,等. 永磁同步电机转矩预测虚拟电压

矢量控制[J]. 电气传动, 2019, 49(6): 24-29.

- [2] 厉虹,韩晔,王久和. 改进的永磁同步电机直接转矩控制系统研究[J]. 电气传动, 2017, 47(11): 9-15.
- [3] Choi Y S, Han H C, Jung J W. Feedback linearization direct torque control with reduced torque and flux ripples for IPMSM drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(5): 3728-3737.
- [4] 龙觉敏,孙强,赵朝会. 基于空间矢量调制的永磁同步电机无磁链环直接转矩控制方法研究[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(9): 44-50.
- [5] 牛峰,李奎,王尧. 永磁同步电机模型预测直接转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(12): 60-67.
- [6] 吕帅帅,林辉,马冬麒. 基于最优占空比调制的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 35-42.
- [7] Saur M, Erazo D E G, Zdravkovic J, *et al.* Minimizing torque ripple of highly saturated salient pole synchronous machines by Applying DB-DTFC[J]. IEEE Transactions on Industry applications, 2017, 53(4): 3643-3651.
- [8] 王斌,王跃,郭伟,等. 基于定子磁链降阶状态观测的永磁同步电机无差拍直接转矩控制系统[J]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 160-171.

收稿日期: 2019-02-20

修改稿日期: 2019-06-21