

基于定子磁场定向的永磁辅助同步磁阻电机 无差拍直接转矩控制

翁子恺, 储剑波

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏南京 211100)

摘要: 针对永磁辅助同步磁阻电机(PMASynRM)直接转矩控制(DTC)转矩脉动较大的问题, 研究了基于PMASynRM的无差拍直接转矩控制(DB-DTC)方案。该方案将有效磁链的概念引入PMASynRM, 提取转子位置信息应用于DB-DTC, 提高了电机的运行性能; 采用了基于定子磁场定向的无差拍直接转矩控制方法以简化计算和有效抑制转矩脉动。搭建基于定子磁场定向的无差拍直接转矩磁链控制(DB-DTFC)模型并在MATLAB/Simulink软件上进行仿真实验, 验证了该算法可以有效减小磁链和转矩脉动, 具有较好的动态和稳态性能。

关键词: 永磁辅助同步磁阻电机; 无差拍直接转矩磁链控制; 有效磁链; 无位置传感器

中图分类号: TM341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)05-0020-07

doi: 10.12177/emca.2022.008

Deadbeat Direct Torque Control of PMASynRM Based on Stator Field Orientation

WENG Zikai, CHU Jianbo

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 211100, China)

Abstract: Aiming at the problem of large torque ripple in direct torque control (DTC) of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor (PMASynRM), a deadbeat direct torque control (DB-DTC) scheme based on PMASynRM is proposed. The concept of effective flux is introduced into PMASynRM, so as to extract the rotor position information and apply it to DB-DTC, which improves the operation performance of the motor. The deadbeat torque control model based on stator field orientation is established to effectively simplify the calculation and suppress the torque ripple. The improved deadbeat direct torque and flux control (DB-DTFC) model is built based on MATLAB/Simulink. Simulation results show that the algorithm can effectively reduce the flux and torque ripple and has good dynamic and steady-state performance.

Key words: permanent magnet assisted synchronous reluctance motor (PMASynRM); deadbeat direct torque and flux control (DB-DTFC); effective flux; position sensorless

0 引言

永磁辅助同步磁阻电机(PMASynRM)具有调速范围宽、效率高、功率因数高、凸极比高等优点, 在电动汽车、航空航天、家用电器等领域

具有较好的应用前景^[1-4]。与传统永磁同步电机(PMSM)相比, PMASynRM的电磁转矩由永磁转矩与磁阻转矩组成, 占据主导部分的是磁阻转矩, 其生产成本相对更低, 发展前景较为广阔^[5]。为了降低驱动系统的成本, 提高驱动系

收稿日期: 2022-02-25; 收到修改稿日期: 2022-03-26

作者简介: 翁子恺(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁辅助同步磁阻电机驱动与无位置传感器控制。

储剑波(1972—), 男, 博士, 研究方向为电力电子与电力传动、永磁电机/异步电机控制。

统可靠性,在较多场合下均需要获取转子位置信息,因此无位置传感器方案也是 PMASynRM 研究的一个重点方向^[6]。

与矢量控制策略相比,直接转矩控制(DTC)具有参数鲁棒性好、动态特性好、结构简单等优点,但也存在较大的转矩与磁链脉动。针对以上不足,国内外学者通过改进开关表、空间矢量调制技术、无差拍控制等对 DTC 进行优化。

文献[7]提出了一种基于复合转矩调节器的 DTC 策略,该策略设计了两个可变滞环,消除了转矩偏差和时间延迟对转矩脉动的影响,以优化 DTC 的转矩跟踪性能。文献[8]提出了适应低转速的 DTC 策略,引入转矩角的变化率作为速度估计的补偿,在无位置传感器的状态下更好地获取转速,有效抑制了转矩脉动。文献[9]提出了一种相位自整定定子磁链观测器,增强定子磁通观测器的鲁棒性和准确性,能够抑制转矩和定子磁链脉动。但基于开关表的 DTC 始终存在开关频率不固定及转矩、磁链波动明显的缺点。

文献[10]提出了一种基于 M-T 坐标系的 SVM-DTC 策略,将转速和转矩的 PI 控制器转化为转矩和磁链的 PI 控制器,降低了转矩和定子磁链脉动。文献[11]提出了一种定子磁链自适应的 SVM-DTC 策略,降低电机三相电流的输出,保持较低的转矩脉动,提高系统的功率因数,具有良好的稳态和动态性能。文献[12]提出了一种基于观测器的最优 SVM-DTC 策略,在静止参考系中采用最优控制理论来同时控制速度、转矩和磁链变量,该方法具有计算量小、转矩和磁链脉动小、鲁棒性强、瞬态响应好等优点。但由于 PI 控制器的引入,导致转矩的动态性能受 PI 参数的影响较大。

文献[13]提出了一种基于有效磁链观测器的无差拍直接转矩磁链控制(DB-DTFC)方法,实现了电机的无速度传感器控制,但其计算方法较为复杂,且受参数影响较大。文献[14]提出了一种基于静止坐标系的 DB-DTC 策略,但仅适用于隐极性 PMSM。文献[15]提出了一种简化的 DB-DTC 策略,将电压的计算与磁链分离,该策略不受永磁磁链估计误差的影响,减少了算法的计算时间和复杂性,但可进行进一步的简化。文献[16]提出了一种基于定子磁场定向的 DB-DTFC 策略,

将电压的计算与磁链分离,实现了对电磁转矩和定子磁链的解耦,减小电磁转矩和定子电流的脉动,并使动态响应、计算量以及鲁棒性等方面性能均得到了改善,但是需要进行坐标变换。

为降低直接转矩控制的转矩脉动,提出了一种改进型 DB-DTFC 算法。基于有效磁链估算转子角度,并基于电机的数学模型推导 DB-DTFC 的公式,说明其能应用于 PMASynRM。在 x-y 坐标系上建立电压分量与定子磁链和转矩的关系,实现基于定子磁场定向的 DB-DTFC,降低了 DB-DTC 算法的复杂度。通过仿真证明本文提出控制策略的有效性。

1 PMASynRM 的基本方程与有效磁链

图 1 为 PMASynRM 的结构示意图。与同步磁阻电机相比,PMASynRM 转子中加入的铁氧体永磁材料只起到辅助励磁的作用。

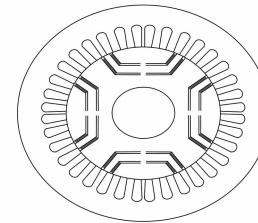


图 1 PMASynRM 结构示意图

1.1 电机数学模型

为了便于简化分析,对 PMASynRM 做出如下假设:忽略铁心饱和问题,不考虑铁心涡流和磁滞损耗;永磁材料的导电性为零;磁场在气隙中呈正弦分布。

当 PMASynRM 稳态运行时,其转子坐标系下的电压方程为

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

其中:

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

式中: $u_d, u_q, i_d, i_q, \psi_d, \psi_q$ 分别为定子电压 u_s 、定子电流 i_s 和定子磁链 ψ_s 在 d, q 轴上的投影; R_s 为

定子电阻; ω_e 为转子电角速度; L_d, L_q 分别为 d, q 轴电感; ψ_f 为电机永磁磁链。

电磁转矩方程为

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

式中: p 为电机的极对数。

电磁转矩 T_e 同样可以用定子磁链幅值和转矩角 δ 表示为

$$T_e = \frac{3p|\psi_s|}{4L_d L_q} [2\psi_f L_d \cos\delta + |\psi_s|(L_d - L_q) \sin 2\delta] \quad (4)$$

1.2 PMASynRM 的有效磁链

对于 PMASynRM, 定义有效磁链 ψ_a 与 q 轴方向一致, 其公式为

$$\psi_a = (L_q - L_d) i_q - \psi_f \quad (5)$$

将式(5)代入电机磁链方程式(2)中:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d \\ \psi_q = L_d i_q - \psi_f + (L_q - L_d) i_q = L_d i_q + \psi_a \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)经过坐标转换, 可得 $\alpha\beta$ 坐标系下的有效磁链:

$$\begin{cases} \psi_{a\alpha} = \psi_{s\alpha} - L_d i_\alpha \\ \psi_{a\beta} = \psi_{s\beta} - L_d i_\beta \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}, \psi_{a\alpha}, \psi_{a\beta}, i_\alpha, i_\beta$ 分别为定子磁链、有效磁链以及定子电流在 $\alpha\beta$ 坐标系下的分量。

定子磁链经过式(7)的计算后, 根据有效磁链提取的估计角度值为

$$\theta_{aq} = \arctan \frac{\psi_{a\beta}}{\psi_{a\alpha}} \quad (8)$$

这一角度即 α 轴与永磁磁链的夹角, 计算得到的角度值和传统定义的电角度值 θ_r 相差 90° , 因此有:

$$\theta_r = \theta_{aq} + \frac{\pi}{2} \quad (9)$$

为了降低参考定子电压的计算复杂性和难度, 定义基于定子磁链定向的两相旋转坐标系, 新坐标系的 x 轴位于定子磁链矢量上, y 轴与 x 轴垂直, 如图 2 所示。 $\alpha\beta$ 坐标系中变量可通过定子磁链角 θ_s 变换到 xy 坐标系中, 电流矢量变换如下所示:

$$\begin{bmatrix} i_x \\ i_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_s & \sin\theta_s \\ -\sin\theta_s & \cos\theta_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: i_x, i_y 为定子电流在 xy 坐标系下的分量。

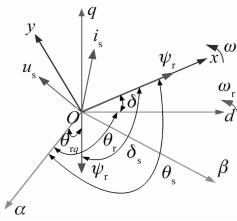


图 2 定子磁链矢量分布图

2 PMASynRM 的 DB-DTC 及其优化

传统 DB-DTC 应用于 PMASynRM 的计算繁琐, 公式推导复杂, 因此设计了改进型 DB-DTC 算法, 以优化控制性能。

2.1 传统 DB-DTC 在 PMASynRM 的理论分析

将式(1)所示电机的电压方程移项并代入磁链方程式(2), 并对其进行整理和离散化:

$$\begin{cases} \psi_d(k+1) = u_d(k) T_s + X \\ \psi_q(k+1) = u_q(k) T_s + Y \end{cases} \quad (11)$$

其中:

$$\begin{aligned} X &= \psi_d(k) + \omega_r T_s \psi_q(k) - R_s i_d(k) T_s = \\ &\quad \psi_d(k) + \omega_r T_s \psi_q(k) - \frac{R_s}{L_d} \psi_d(k) T_s \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} Y &= \psi_q(k) - \omega_r T_s \psi_d(k) - R_s i_q(k) T_s = \\ &\quad \psi_q(k) - \omega_r T_s \psi_d(k) - \frac{R_s}{L_q} \psi_q(k) T_s - \frac{R_s}{L_q} \psi_f T_s \end{aligned} \quad (13)$$

将式(2)代入转矩方程式(3)中求导并离散化得:

$$\frac{T_e(k+1) - T_e(k)}{T_s} = \frac{3}{2}p \left[\frac{\psi_q(k) + \psi_f}{L_q} \Delta\psi_d + \right. \\ \left. \frac{\psi_d(k)}{L_q} \Delta\psi_q - \frac{\psi_d(k)}{L_d} \Delta\psi_q - \frac{\psi_q(k)}{L_d} \Delta\psi_d \right] \quad (14)$$

式中: T_s 为采样周期; k 为当前采样时刻; d 轴磁链变化量 $\Delta\psi_d = \psi_d(k+1) - \psi_d(k)$; q 轴磁链变化量 $\Delta\psi_q = \psi_q(k+1) - \psi_q(k)$ 。

转矩误差可写成 $\Delta T_e = T_e(k+1) - T_e(k)$, 整理后得:

$$u_q(k) T_s = M u_d(k) T_s + B \quad (15)$$

其中:

$$M = \frac{(L_d - L_q) \psi_q(k) + L_d \psi_f}{(L_q - L_d) \psi_d(k)} \quad (16)$$

$$B = \frac{ML_dL_q}{(L_d - L_q)\psi_d(k)} \cdot \left\{ \frac{2}{3n_p} \Delta T_e(k) - \omega_r T_s \{ (L_q - L_d) [\psi_d(k)^2 - \psi_q(k)^2] + L_d \psi_q(k) \psi_f \} - \frac{R_s T_s \psi_d(k)}{L_d^2 L_q^2} [(L_q^2 - L_d^2) \psi_q(k) - L_d^2 \psi_f] \right\} \quad (17)$$

同时,由于DB-DTC的控制目标为在一个控制周期内,消除被控转矩的误差,则令 $T_e(k+1)=T_e^*$ 。

为了对磁链也进行无差拍控制,令 $\psi_s(k+1)=\psi_s^*$,定子磁链在离散系统中可表示为

$$[\psi_s(k+1)]^2 = [\psi_d(k+1)]^2 + [\psi_q(k+1)]^2 = [u_d(k)T_s + X]^2 + [u_q(k)T_s + Y]^2 \quad (18)$$

最终解一元二次方程得到:

$$u_d(k) = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (19)$$

$$u_q(k) = \frac{MT_s u_d(k) + B}{T_s} \quad (20)$$

其中:

$$\begin{cases} a = (1 + M^2) T_s^2 \\ b = 2XT_s + 2MT_s(B + Y) \\ c = X^2 + (B + Y)^2 - (\|\psi_s\|^*)^2 \end{cases}$$

式(19)与式(20)即为DB-DTFC控制律,根据观测 k 时刻电机的定子磁链、电磁转矩、转速及所需的其他电机参数,可以分别计算出 k 时刻应施加在定子端的电压 $u_d(k)$ 、 $u_q(k)$ 。 $u_d(k)$ 、 $u_q(k)$ 经过旋转坐标逆变换即可得到两相静止坐标系下的目标电压 $u_\alpha(k)$ 、 $u_\beta(k)$ 。

2.2 基于定子磁场定向的DB-DTFC

传统DB-DTFC是根据 dq 轴的磁链与转矩方程进行推导,而对基于 xy 坐标系的磁链与转矩方程进行推导可降低参考定子电压的计算复杂性。

xy 坐标系中的定子电压可表示为

$$\begin{cases} u_{sx} = R_s i_{sx} + \frac{d\psi_{sx}}{dt} - \omega_s \psi_{sy} \\ u_{sy} = R_s i_{sy} + \frac{d\psi_{sy}}{dt} + \omega_s \psi_{sx} \end{cases} \quad (21)$$

定子磁链矢量位于 x 轴上,因此:

$$\begin{cases} \psi_{sx} = \psi_s \\ \psi_{sy} = 0 \\ \omega_s = \omega_r + d\delta/dt \end{cases} \quad (22)$$

把式(22)代入式(21)中, xy 坐标系下的定子电压可进一步推导为

$$\begin{cases} u_{sx}(k) = R_s i_{sx}(k) + \frac{\psi_s(k+1) - \psi_s(k)}{T_s} \\ u_{sy}(k) = R_s i_{sy}(k) + \left[\omega_r + \frac{\delta(k+1) - \delta(k)}{T_s} \right] \psi_s(k) \end{cases} \quad (23)$$

式中: $u_{sx}(k)$ 、 $u_{sy}(k)$ 、 $i_{sx}(k)$ 、 $i_{sy}(k)$ 为第 k 时刻的 xy 坐标系下的定子电压与电流, $\psi_s(k+1)$ 、 $\delta(k+1)$ 为第 $k+1$ 时刻的定子磁链幅值和转矩角。

根据式(4),对电磁转矩求导并离散化得:

$$\frac{T_e^* - T_e(k)}{T_s} = \frac{3p |\psi_s(k)|}{2L_d L_q} \{ -\psi_f L_d \sin[\delta(k)] + |\psi_s| (L_d - L_q) \cos[2\delta(k)] \} \frac{\delta^* - \delta(k)}{T_s} \quad (24)$$

电磁转矩和转矩角之间的关系可以进一步推导为

$$\begin{cases} \delta^* - \delta(k) = \frac{1}{A} [T_e^* - T_e(k)] \\ A = \frac{3p |\psi_s(k)|}{2L_d L_q} \{ -\psi_f L_d \sin[\delta(k)] + |\psi_s| (L_d - L_q) \cos[2\delta(k)] \} \end{cases} \quad (25)$$

根据无差拍原理,把参考定子磁链幅值和转矩角赋给第 $k+1$ 时刻的定子磁链幅值和转矩角,并结合式(23)与式(25),参考定子电压可表示为

$$\begin{cases} u_{sx}^* = R_s i_{sx}(k) + \frac{\psi_s^* - \psi_s(k)}{T_s} \\ u_{sy}^* = R_s i_{sy}(k) + \left[\omega_r + \frac{T_e^* - T_e(k)}{AT_s} \right] \psi_s(k) \end{cases} \quad (26)$$

由此可见, x 轴的电压分量只与定子磁链的幅值有关,与转矩的幅值无关; y 轴的电压分量只与转矩的幅值有关,与定子磁链的幅值无关,从而对定子磁链与电磁转矩进行解耦。采用式(10)的逆变换矩阵,将式(26)变换到 $\alpha\beta$ 轴上的参考定子电压。

但是,以上计算公式仅适用于磁链恒定时,在需要改变磁链大小的情况下转矩对时间微分并离散化得:

$$\frac{T_e^* - T_e(k)}{T_s} = \frac{3p |\psi_s(k)|}{2L_d L_q} \{ -\psi_f L_d \sin[\delta(k)] +$$

$$\begin{aligned} & |\psi_s| (L_d - L_q) \cos[2\delta(k)] \} \frac{\delta^* - \delta(k)}{T_s} + \\ & \frac{3p}{2L_d L_q} \{ -\psi_i L_d \cos[\delta(k)] + \\ & |\psi_s| (L_d - L_q) \sin[2\delta(k)] \} \frac{|\psi_s|^* - |\psi_s|}{T_s} \end{aligned} \quad (27)$$

令转矩角变化量为 $\Delta\delta = \delta^* - \delta(k)$ 。此时有:

$$\Delta\delta = -\frac{M''}{N''} \cdot \Delta |\psi_s| + \frac{2\Delta T_e}{3pN''} \quad (28)$$

其中:

$$M'' = -\frac{\psi_f}{L_q} \cos\delta + \frac{L_d - L_q}{L_d L_q} \sin 2\delta |\psi_s| \quad (29)$$

$$N'' = -\frac{\psi_f |\psi_s|}{L_q} \sin\delta + \frac{L_d - L_q}{L_d L_q} \cos 2\delta |\psi_s|^2 \quad (30)$$

此外,该方法能够对静止坐标系中 SVM-DTC 的表示方法进行推导。在 SVM-DTC 中,下一时刻的电压给定由给定磁链幅值和定子磁链角共同计算得到:

$$\begin{cases} u_\alpha^* = \frac{\psi_s^* \cos\theta_s^* - \psi_s \cos\theta_s}{T_s} + i_\alpha R_s \\ u_\beta^* = \frac{\psi_s^* \sin\theta_s^* - \psi_s \sin\theta_s}{T_s} + i_\beta R_s \end{cases} \quad (31)$$

因此,在静止坐标系中根据无差拍原理求取下一时刻的定子磁链角即可实现无差拍控制,如下式所示:

$$\theta_s^* = \theta_s + \omega_r T_s + \Delta\delta \quad (32)$$

式(32)中 $\Delta\delta$ 可通过式(25)或式(28)中的转矩角变化量求得。与 2.1 节中的 DB-DTC 方案相比,该方案无需进行坐标变换,无需求解一元二次方程,简化了计算。与 SVM-DTC 相比,该方案的定子磁链角给定值根据无差拍原理获取而非 PI 环的输出,同时由于其结构的相似性,对 DB-DTFC 和 SVM-DTC 进行仿真对比。

3 仿真验证与结果分析

根据 PMASynRM 的 dq 轴电压、电流等公式,在 MATLAB/Simulink 工具中搭建电机数学模型。基于磁链转矩方程、无差拍等搭建电机的 DB-DTFC 系统,如图 3 所示。DB-DTFC 系统包括磁

链转矩计算模块、SVPWM 模块、无差拍模块等若干子系统模块。

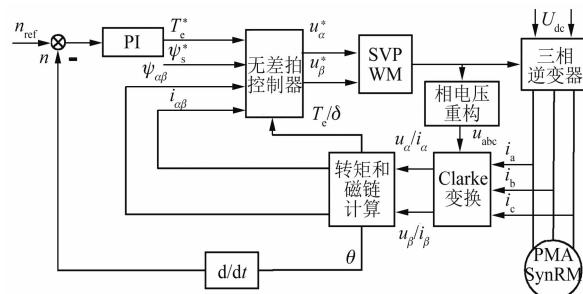


图 3 基于 DB-DTFC 的 PMASynRM 控制框图

电机仿真参数如表 1 所示。

表 1 PMASynRM 电机参数表

参数名称	参数值
定子电阻 R_s/Ω	2.2
d 轴电感/mH	40.9
q 轴电感/mH	12.1
极对数 p	2
永磁磁链 ψ_f/Wb	0.030 5
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.000 633

采用 PMASynRM DTC, 仿真条件为, 电机给定转速 $n^* = 12000 \text{ r/min}$, 给定形式为斜坡函数, 斜率为 $3000 \text{ r}/(\text{min} \cdot \text{s})$; 直流侧电压 $U_{dc} = 311 \text{ V}$; 负载转矩初始给定 $T_L = 0.1 \text{ N} \cdot \text{m}$; 仿真时长为 10 s , 在 $t=0.2 \text{ s}$ 时系统切换成 DB-DTFC 算法, 将磁链转矩观测器估算的电机转速和角度信息反馈至转速环和无差拍计算模块。

图 4~图 6 是 12000 r/min 转速下 SVM-DTC 和改进型 DB-DTFC 系统的波形对比图。

由图 4 的波形对比可知, SVM-DTC 控制方案的电机转速存在 50 r/min 左右的超调, 且转速振荡较大, 动态性能一般; 采用改进型 DB-DTFC 则转速波动较小, 无明显超调, 动态性能优秀。

对比图 5 波形, SVM-DTC 的定子磁链脉动为 7.6% 。改进型 DB-DTFC 的定子磁链脉动为 5.8% 。证明改进型 DB-DTFC 能较为有效地减小磁链波动。

对比图 6 波形可知, SVM-DTC 的转矩脉动为 $\pm 0.045 \text{ N} \cdot \text{m}$, 改进型 DB-DTFC 的转矩脉动为 $\pm 0.025 \text{ N} \cdot \text{m}$, 改进型 DB-DTFC 的转矩脉动比

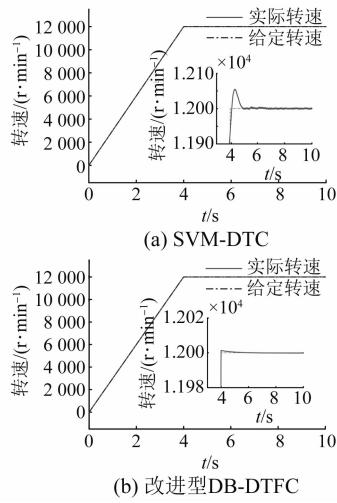


图 4 电机转速波形

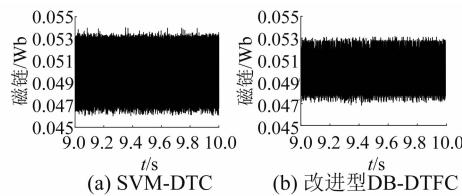


图 5 电机磁链波形

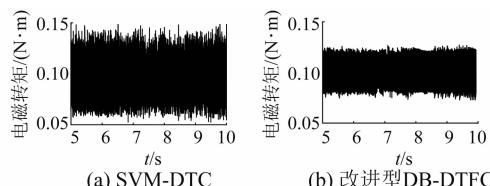


图 6 电磁转矩波形

SVM-DTC 大幅度减小。

对仿真系统做给定转速突增突减测试。在 $t=6$ s 时分别对给定转速突增和突减 1 000 r/min, 其余仿真条件如上。

由图 7~图 10 波形可知, 在对电机突增或突减给定转速时, SVM-DTC 的速度向上和向下阶跃的响应时间分别为 0.21 s 和 0.14 s; 改进型 DB-DTFC 策略的速度向上和向下阶跃的响应时间分别为 0.14 s 和 0.10 s。改进型 DB-DTFC 策略的转矩和速度动态响应时间快于 SVM-DTC 策略, 有良好的动态性能。

对仿真系统做负载阶跃测试。在给定转速 600 r/min 下 $t=0.3$ s 时分别令负载转矩 T_L 由 0

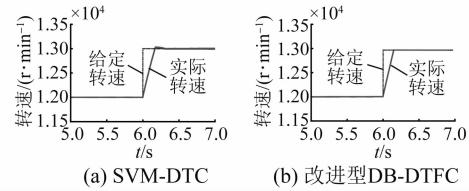


图 7 给定转速突增 1 000 r/min 时电机转速波形

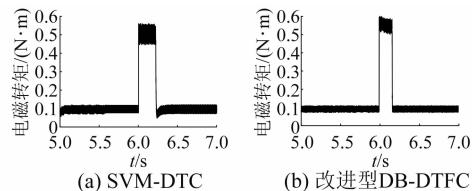


图 8 给定转速突增 1 000 r/min 时电机转矩波形

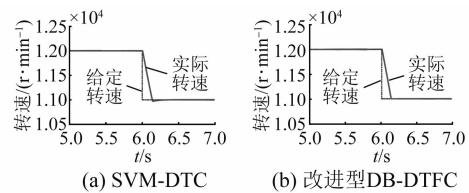


图 9 给定转速突减 1 000 r/min 时电机转速波形

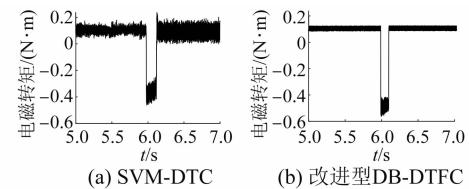


图 10 给定转速突减 1 000 r/min 时电机转矩波形

增加至 2 N·m 及由 2 N·m 减小至 0。

由图 11 和图 12 波形的对比可知, 当负载转矩突增时, SVM-DTC 和改进型 DB-DTFC 电磁转矩值分别经过 0.003 s 和 0.002 s 调节至新的负载电磁转矩值, 当负载转矩突减时分别经过 0.0025 s 和 0.0017 s 调节至新的负载电磁转矩值。改进型 DB-DTFC 能有效地抑制转矩脉动且转矩动态响应性能优于 SVM-DTC。

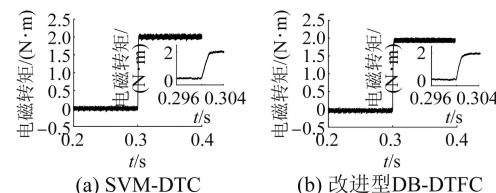


图 11 突加 2 N·m 负载转矩时电机转矩波形

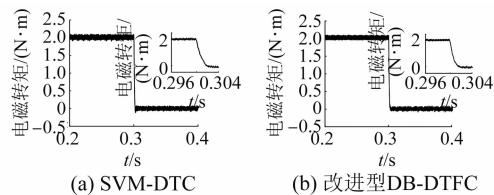


图 12 突减 2 N·m 负载转矩时电机转矩波形

4 结语

为提高 PMASynRM DTC 的动稳态性能,设计了一种改进型 DB-DTFC 算法。该算法基于定子磁场定向的坐标系上的电压分量实现了定子磁链和转矩的解耦控制,并将其应用于静止坐标系中。仿真与分析结果表明,改进型 DB-DTFC 算法相比于 SVM-DTC 算法,拥有较好的稳态、动态性能,能够有效地抑制转矩脉动。

【参考文献】

- [1] 徐媚媚, 刘国海, 陈前, 等. 永磁辅助同步磁阻电机设计及其关键技术发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 7033.
- [2] SARKAR P, SRINIVAS S. MTPA based DTC for permanent magnet assisted synchronous reluctance motor for electric vehicle application[C]//2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), 2019.
- [3] 郭伟, 赵争鸣. 新型同步磁阻永磁电机的结构与电磁参数关系分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 124.
- [4] 吴昌隆, 储剑波. 永磁辅助同步磁阻电机改进型滑模观测器无位置传感器控制[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(7): 26.
- [5] 李新华, 刘伟, 赵云. 新能源汽车永磁辅助式同步磁阻电机研发综述[C]//第十九届中国小电机技术研讨会论文集, 2014: 46.
- [6] 葛宇. 噪声矩阵优化的降阶 EKF 的永磁同步电机无传感器控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [7] WANG X, WANG Z, XU Z, et al. Optimization of torque tracking performance for direct-torque-controlled PMSM drives with composite torque regulator [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(12): 10095.

- [8] WANG Z, INOUE Y, MORIMOTO S, et al. A comparative study on operating characteristics of PMSM based on direct torque control in low speed region[C]//2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2020.
- [9] LIN X, HUANG W, JIANG W, et al. A stator flux observer with phase self-tuning for direct torque control of permanent magnet synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 6140.
- [10] VUJJI A, DAHIYA R. Design of PI controller for space vector modulation based direct flux and torque control of PMSM drive[C]//2020 First IEEE International Conference on Measurement, Instrumentation, Control and Automation (ICMICHA), 2020.
- [11] PENG Y, YIN D, HU Y. The stator flux linkage adaptive SVM-DTC control strategy of permanent magnet synchronous motor[C]//2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), 2021.
- [12] REHMAN A U, CHOI H H, JUNG J. An optimal direct torque control strategy for surface-mounted permanent magnet synchronous motor drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(11): 7390.
- [13] 文婷, 张兴华. 基于有效磁链观测器的内置式永磁同步电机的无差拍直接转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(5): 27.
- [14] 王斌, 王跃, 王兆安. 无速度传感器的永磁同步电机无差拍直接转矩控制方法[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(6): 42.
- [15] GAONA D E, KHATIB H E, LONG T, et al. Analysis of implementation methodologies of deadbeat direct-torque and flux control (DB-DTFC) for IPMSMs in stationary and rotatory reference frames[C]//2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2020.
- [16] LIN X, HUANG W, JIANG W, et al. Deadbeat direct torque and flux control for permanent magnet synchronous motor based on stator flux oriented[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 35(5): 5078.