

直驱式永磁同步电机改进型无差拍直接转矩控制研究^{*}

马祖阳¹, 王晓璨¹, 林晓刚², 解伟², 周晓莹¹

(1. 厦门理工学院 电气工程与自动化学院, 福建 厦门 361024;

2. 中国科学院海西研究院 泉州装备制造研究所, 福建 泉州 362000)

摘要: 为提高直驱式永磁同步电机(DD-PMSM)的动态响应性能,提出了一种改进型无差拍直接转矩控制(DB-DTC)策略。改进型 DB-DTC 在保留传统 DB-DTC 动态响应性能的基础上,简化了控制过程,降低了实时计算量。通过在 MATLAB/Simulink 环境下搭建仿真模型,对传统 DB-DTC 和改进型 DB-DTC 的控制效果进行对比,并将改进型 DB-DTC 结合位置型阻抗控制策略,验证控制策略的优越性。仿真结果表明,在位置控制模式下,相对于传统 DB-DTC,所提控制策略的电机转动至给定角度以及转速降为零所需的时间减少 0.002 s,稳态运行角度误差减少 0.02°。在速度控制模式下,相对于传统 DB-DTC,所提控制策略的电机达到给定转速的时间减少 0.004 s,稳态转速误差降低 0.03 r/min,稳态转速波动降低 0.06 r/min,在电机进入稳态运行以后, q 轴电流峰值降低 0.193 A, q 轴的电流脉动降低 0.204 A。电机控制系统具有更好的动态性能和更强的抗干扰能力。

关键词: 直驱式永磁同步电机; 无差拍直接转矩控制; 转矩脉动; 动态响应

中图分类号: TM341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2022)08-0014-07

doi: 10.12177/emca.2022.069

Research on Improved Deadbeat Direct Torque Control of Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Motor^{*}

MA Zuyang¹, WANG Xiaocan¹, LIN Xiaogang², XIE Wei², ZHOU Xiaoying¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Haixi Institutes, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou 362000, China)

Abstract: In order to improve the dynamic response performance of direct-drive permanent magnet synchronous motor (DD-PMSM), an improved deadbeat direct torque control (DB-DTC) strategy is proposed. On the basis of retaining the dynamic response performance of traditional DB-DTC, the improved DB-DTC simplifies the control process and reduces the amount of real-time calculation. The control effects of traditional DB-DTC and improved DB-DTC are compared by building a simulation model in MATLAB/Simulink, and the advantages of the proposed control strategy are verified by combining the improved DB-DTC with the position type impedance control strategy. The simulation results show that in the position control mode, compared with the traditional DB-DTC, the time required for the motor to rotate to a given angle and decelerate to zero speed is reduced by 0.002 s, and the steady-state operation

收稿日期: 2022-03-13; 收到修改稿日期: 2022-06-17

^{*} 基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2020J01283)

作者简介: 马祖阳(1994—),男,硕士研究生,研究方向为智能检测与控制。

王晓璨(1984—),女,副教授,硕士生导师,研究方向为先进电机的现代控制。

解伟(1982—),男,研究员,博士生导师,研究方向为电动汽车主驱系统、工业伺服系统等。

angle error is reduced by 0.02° . In the speed control mode, compared with the traditional DB-DTC, the time to reach the given speed is reduced by 0.004 s, the steady-state speed error is reduced by 0.03 r/min, and the steady-state speed fluctuation is reduced by 0.06 r/min. After the motor enters steady-state operation, the q axis peak current is reduced by 0.193 A, and the pulsation of q axis current is reduced by 0.204 A. The motor control system has better dynamic performance and stronger anti-interference ability.

Key words: direct-drive permanent magnet synchronous motor (DD-PMSM); deadbeat direct torque control (DB-DTC); torque ripple; dynamic response

0 引言

传统的永磁同步电机(PMSM)加机械减速机构的驱动系统存在结构复杂、减速机构易磨损、润滑油渗漏、运行可靠性差、维护成本高以及系统整体效率低等缺点^[1],不符合节能环保的要求。采用直驱式永磁同步电机(DD-PMSM)替代传统的驱动系统成为国内外学者的共识^[2]。根据转子位置的不同,PMSM分为外转子同步电机和内转子同步电机。对比内、外转子同步电机性能,外转子同步电机具有低速大转矩的特点^[3]。DD-PMSM在驱动负载时,不需经过传动装置(如传动皮带等),具有静音、节能、动力强劲等特点。根据其工作特点,DD-PMSM通常采用外转子PMSM^[4]。

DD-PMSM在实际应用中需要实现对给定位置信号的快速响应,同时因其直接驱动负载的结构,负载产生的转矩波动会直接影响控制系统的性能^[5-6]。为提高电机的运行性能,文献[7-11]针对上述问题展开了研究。文献[7]基于无差拍预测控制提出了一种新的PMSM电流控制方法,具有易于实现等优点,但整个系统设计的控制效果不能满足DD-PMSM在实际应用中的需求。文献[8]提出无差拍直接转矩控制(DB-DTC)和模型预测控制结合的控制策略,提高了系统的响应速度和控制精度,但是两种先进算法的复合控制,使系统的计算过程过于复杂,导致系统的稳定性下降。文献[9]在传统DB-DTC的基础上引入状态观测器对系统变量进行观测,以提高系统的控制性能,但其数学模型建立在旋转坐标系中,在定子参考电压的求解中需要进行多次坐标变换,同时需要反复求解一个一元二次方程,实时计算量大。文献[10]提出了一种将空间矢量调制与模型预测控制相结合来实现无差拍控制的方法,有效降低开关损耗,但是降低了系统的响应速度。文献[11]采用阻抗控制设计新型PI控制器,对比传统PI控制器,其控制系统力矩控

制的误差降低了1.64%,但控制算法在面对复杂环境时应用较少。

针对上述控制策略的不足以及DD-PMSM的实际工况,本文提出一种改进型DB-DTC策略。相对于传统DB-DTC策略,所提改进型控制策略直接在静止坐标系中构造算法模型,根据离散电磁转矩表达式计算出负载角参考值,然后由负载角参考值计算出定子磁链在静止坐标轴上的增量,进而求出在静止坐标轴上的定子参考电压,使电磁转矩和定子磁链在一个控制周期内误差为零。本文提出的改进型DB-DTC避免了传统DB-DTC在定子参考电压的计算中需要进行多次坐标变换,以及反复求解一元二次方程的弊端,降低了控制策略的计算量,简化了控制流程,降低了电机运行时的转矩波动。文中介绍了传统DB-DTC和改进型DB-DTC的推导过程,同时将改进型DB-DTC结合位置型阻抗控制,验证所提控制策略在复合控制情况下的动态响应性能。最后通过仿真验证所提控制策略的可行性和有效性。

1 DD-PMSM的数学模型

外转子PMSM是一个强耦合、复杂的非线性系统,通过Clarke和Park变换将控制平面由自然坐标系变换为同步旋转坐标系,将外转子PMSM模型变为他励直流电机模型,实现电压与电流解耦控制。

假设外转子PMSM为理想电机,且满足下列条件:

- (1) 忽略电机铁心的磁饱和;
- (2) 不计电机中的涡流和磁滞损耗;
- (3) 电机中的电流为对称三相正弦波电流。

选用同步旋转坐标系 $d-q$ 下的数学模型^[12],其定子电压方程可以表示为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + \frac{d}{dt}\psi_d - \omega_r\psi_q \\ u_q = Ri_q + \frac{d}{dt}\psi_q + \omega_r\psi_d \end{cases} \quad (1)$$

定子磁链方程为

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

电磁转矩方程为

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

电机的机械运动方程为

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

式中: u_d 、 u_q 为定子电压的 d 、 q 轴分量; i_d 、 i_q 为定子电流 d 、 q 轴分量; R 为定子的电阻; p 为极对数; ψ_d 、 ψ_q 为定子磁链的 d 、 q 轴分量; ω_r 为电角速度; L_d 、 L_q 为 d 、 q 轴电感分量; ψ_f 为永磁体磁链; ω_m 为电机的机械角速度; J 为转动惯量; B 为阻尼系数; T_L 为负载转矩。

2 改进型 DB-DTC 系统设计

2.1 DB-DTC

DB-DTC 将无差拍控制思想与直接转矩控制系统结合, 在一个控制周期内使实际观测的转矩和磁链能够跟踪上期望值。

DB-DTC 系统外环为 PI 控制器, 内环为 DB-DTC 器。在图 1 所示的控制框图中, 给定参考速度与实际转速的差值送入 PI 控制器得到参考转矩, 将参考转矩与实际观测出的转矩信号的差值、给定磁链与实际观测磁链的差值, 一起送入 DB-DTC 模块, 计算出同时满足消除转矩和磁链误差的参考电压, 经 Park 逆变器和空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 模块调制后驱动电机运行^[13]。

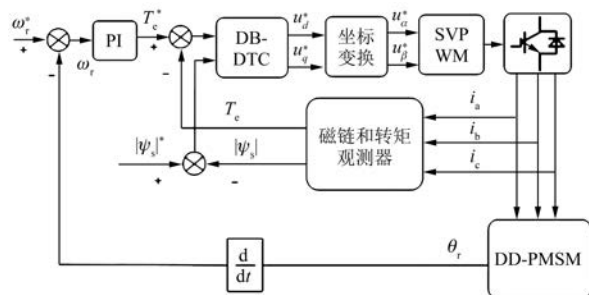


图 1 DB-DTC 控制框图

传统 DB-DTC 的公式推导如下。将式(2)代入式(1)中, 消除电流, 化简整理得到 d 、 q 轴磁链的离散化公式:

$$\begin{cases} \psi_d(k+1) = u_d(k)T_s + \psi_d(k) - \omega_r T_s L \psi_q(k) - \frac{R\psi_d(k)T_s}{L} + \frac{R\psi_f(k)T_s}{L} \\ \psi_q(k+1) = u_q(k)T_s + \psi_q(k) + \omega_r T_s \psi_d(k) - \frac{R\psi_q(k)T_s}{L} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\psi_d(k)$ 、 $\psi_q(k)$ 分别为当前时刻定子磁链在 d 、 q 轴的分量; $\psi_d(k+1)$ 、 $\psi_q(k+1)$ 分别为下一时刻定子磁链在 d 、 q 轴的分量; $u_d(k)$ 、 $u_q(k)$ 分别为当前时刻 d 、 q 轴电压; $\psi_f(k)$ 为 k 时刻永磁体磁链; T_s 为一个控制周期; $L = L_d = L_q$ 。

将式(2)代入式(3)中, 得到定子磁链与转矩的关系:

$$T_e = \frac{3}{2} p \left(\frac{\psi_q \psi_f}{L} \right) \quad (6)$$

对电磁转矩求导并进行离散化处理:

$$T_e(k+1) - T_e(k) = \frac{3}{2} p [\psi_q(k+1) - \psi_q(k)] \frac{\psi_f}{L} \quad (7)$$

式中: $T_e(k+1)$ 、 $T_e(k)$ 分别为下一时刻和当前时刻电磁转矩。

将式(5)代入式(7)中, 化简整理得到 q 轴上定子参考电压:

$$u_q(k) = \frac{2}{3} \frac{L}{p\psi_f T_s} [T_e(k+1) - T_e(k)] + \omega_r \psi_q(k) + \frac{R\psi_q(k)}{L} \quad (8)$$

为达到一个控制周期内消除被控转矩误差的控制效果^[14], 令 $T_e(k+1) = T_e^*$ 。

对 $k+1$ 时刻定子磁链幅值进行离散化处理:

$$\psi_s(k+1)^2 = \psi_d(k+1)^2 + \psi_q(k+1)^2 \quad (9)$$

为达到无差拍控制的效果, 令 $\psi_s(k+1) = \psi_s(k)^*$, 化简得到 d 轴上定子参考电压^[15]:

$$\begin{cases} u_d(k) = \frac{-\psi_d(k) \pm \sqrt{\psi_d(k)^2 - J}}{T_s} \\ J = \psi_d(k)^2 + \psi_q(k)^2 + \psi_q(k)^2 T_s^2 + 2[\psi_q(k)u_q(k)T_s] - [\psi_s(k)^*]^2 \end{cases} \quad (10)$$

2.2 改进型 DB-DTC

传统 DB-DTC 电机运行的过程中需要在旋转变换坐标系中计算定子参考电压, 在此坐标系下,

电磁转矩和定子磁通幅值均不解耦。同时在定子参考电压的计算中,需要反复求解一元二次方程,实时计算量大,对控制系统的硬件要求比较高^[16]。

本文所提的策略在保留传统 DB-DTC 动态响应能力的情况下,简化整个控制过程,直接求出参考定子电压在静止坐标系 α 、 β 轴上的分量,避免在求解定子参考电压时频繁的坐标变换和一元二次方程的反复求解,减少了实时计算量,降低了电机运行的转矩波动。改进型 DB-DTC 对电磁转矩表达式进行离散化处理求出参考负载角,由参考负载角求出参考定子磁链在静止坐标轴上的增量,进一步求出静止坐标轴上的参考电压分量,然后控制电机运行使电磁转矩和定子磁链在一个控制周期内误差为零。文中所提改进型 DB-DTC 坐标系定义如图 2 所示。图中 α - β 轴为定子静止坐标系, α 轴与 A 相绕组重合。 d - q 轴是旋转坐标系; α 轴和 d 轴的夹角为电角度 θ_r ; θ_s 是定子磁链的相位角;定子磁链 ψ_s 和 d 轴的夹角定义为负载角 δ ; $\Delta\psi_{s\beta}$ 和 $\Delta\psi_{s\alpha}$ 是定子磁链在 α 、 β 轴上的增量; ψ_s^* 为期望的定子磁链; δ^* 为期望的负载角。

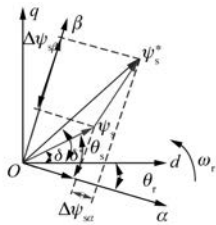


图 2 改进型 DB-DTC 坐标系定义

改进型 DB-DTC 公式推导如下,对定子磁通进一步推导,得到定子磁链幅值在旋转坐标 d - q 轴分量:

$$\begin{cases} \psi_d = |\psi_s| \cos\delta \\ \psi_q = |\psi_s| \sin\delta \end{cases} \quad (11)$$

根据式(2)、式(11),可以推导出旋转坐标系下的定子电流与定子磁链幅值之间的关系:

$$\begin{cases} i_d = \frac{|\psi_s| \cos\delta - \psi_f}{L} \\ i_q = \frac{|\psi_s| \sin\delta}{L} \end{cases} \quad (12)$$

将式(11)和式(12)代入式(3),得到电磁转

矩与负载角的表达式:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{L^2} |\psi_s| (\psi_f L \sin\delta) \quad (13)$$

当定子磁链幅值恒定时,电机的电磁转矩仅与负载角有关。对式(13)中电磁转矩求导,得到电磁转矩变化率与负载角变化率的关系表达式:

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{3}{2} \frac{p}{L^2} |\psi_s| (\psi_f L \cos\delta) \frac{d\delta}{dt} \quad (14)$$

利用前向欧拉离散化对式(14)进行离散,并将转矩期望值赋值给下一时刻,得到期望转矩与负载角的表达式:

$$\begin{cases} \frac{T_e^* - T_e(k)}{T} = A(k) \frac{\delta^* - \delta(k)}{T} \\ A(k) = \frac{3}{2} \frac{p}{L^2} |\psi_s(k)| [\psi_f L \cos\delta(k)] \end{cases} \quad (15)$$

根据式(15)可进一步求出期望负载角:

$$\delta^* = \delta(k) + \frac{T_e^* - T_e(k)}{A(k)} \quad (16)$$

由期望负载角计算出定子磁链在 α 、 β 轴上的增量 $\Delta\psi_{s\alpha}$ 、 $\Delta\psi_{s\beta}$:

$$\begin{cases} \Delta\psi_{s\alpha} = |\psi_s| \cos(\theta_r + \delta^*) - |\psi_s| \cos(\theta_r + \delta) \\ \Delta\psi_{s\beta} = |\psi_s| \sin(\theta_r + \delta^*) - |\psi_s| \sin(\theta_r + \delta) \end{cases} \quad (17)$$

由增量 $\Delta\psi_{s\alpha}$ 、 $\Delta\psi_{s\beta}$ 求得定子参考电压:

$$\begin{cases} u_{\alpha}^* = Ri_{\alpha} + \frac{\Delta\psi_{s\alpha}}{T} \\ u_{\beta}^* = Ri_{\beta} + \frac{\Delta\psi_{s\beta}}{T} \end{cases} \quad (18)$$

将式(18)中定子参考电压在静止坐标轴上的分量输入 SVPWM 模块控制电机运行。改进型 DB-DTC 整体流程框图如图 3 所示。

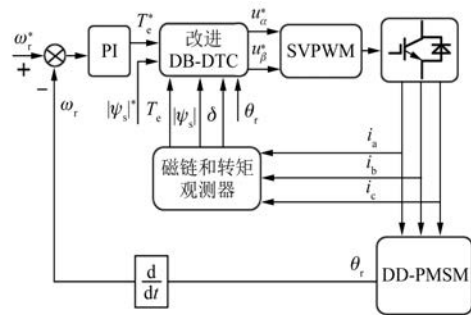


图 3 改进型 DB-DTC 控制框图

3 位置型阻抗控制

将改进型 DB-DTC 结合位置型阻抗控制验证所提控制策略的控制性能。位置型阻抗控制的关键是建立位置和力之间的二阶阻抗模型关系,以达到柔顺控制的目的。位置和力之间的动态关系是阻抗控制的核心思想。由阻抗控制原理可得到阻抗系统的动态方程:

$$f(t) = m\ddot{x} + b\dot{x} + kx \quad (19)$$

式中: m 、 b 、 k 分别为物块质量、系统阻尼和弹性; f 为系统施加外力; x 为末端偏移量。当 m 、 b 、 k 参数确定时, 即可得到期望动态响应^[17]。

位置型阻抗控制框图如图 4 所示。由图 4 可以看出,整个阻抗控制分为两部分,分别为 PI 控制和力反馈阻抗控制。其中控制策略为改进型 DB-DTC, θ^* 为期望角度, $p_b(\theta)$ 为力反馈补偿角度, $p_b^*(\theta)$ 为期望角度经过力矩补偿后得到的复合期望角, ω_r 、 ω_r^* 分别为实际电角速度和期望电角速度, T_e^* 为期望输出转矩, k_e 为环境刚度, T_b 为补偿力, f 为外力干扰, s 为补偿力和外力的误差, m_d 、 b_d 、 k_d 为阻抗控制的调控参数。对于阻抗控制调控参数而言, m_d 越大稳定接触力越大, 越小则稳定接触力越小; b_d 为阻尼参数, 增大阻尼参数, 会使响应超调减小, 力峰值显著下降, 但过大的阻尼参数会导致响应达到稳定的时间变慢; k_d 反映了系统刚度的变化, 它的调整直接反映了电机在与环境接触时是呈现刚的特性还是柔的特性, 通常减小 k_d 会使电机与环境的接触力变小, 增大 k_d 会使电机与环境接触力变大。

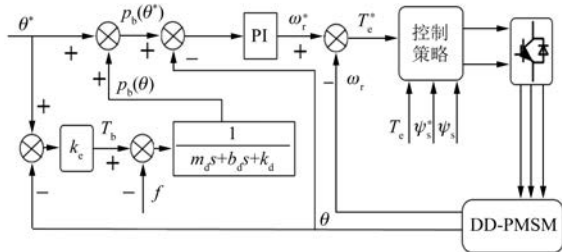


图 4 位置型阻抗控制

4 仿真分析

4.1 仿真模型搭建

通过在 MATLAB/Simulink 环境下搭建三闭环电机控制系统仿真模型,将传统 DB-DTC 和改

进型 DB-DTC 的控制效果进行对比,并且结合位置型阻抗控制策略验证改进型 DB-DTC 的动态响应性能。图 5 中仿真模型由 Simulink 仿真结合 s 函数构成。传统 DB-DTC 和改进型 DB-DTC 采用 MATLAB 的 s 函数编程实现^[18]。采用 DD-PMSM 作为被控对象,电机的相关参数和仿真条件如表 1 和表 2 所示,其中 f_{pwm} 为一个周期内信号从高电平到低电平再回到高电平的次数。

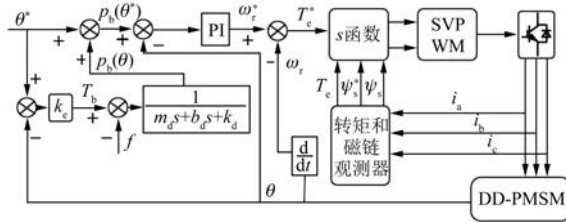


图5 基于改进型 DB-DTC 的 DD-PMSM 仿真模型

表 1 DD-PMSM 参数

参数名称	参数值
极对数	21
L_d/H	1×10^{-5}
L_q/H	1×10^{-5}
R/Ω	0.004
$J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.002
ψ_t/Wb	0.005
$B/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2})$	0

表 2 仿真参数

参数名称	参数值
电机母线电压/V	48
f_{pwm} /kHz	10
T_s /s	2×10^{-6}
运行时长/s	0.08

4.2 仿真结果分析

在给定 0.5 N 额定负载,位置 20° 的情况下进行传统 DB-DTC 与改进 DB-DTC 下电机位置响应对比仿真,得到的位置响应波形如图 6 所示,同等仿真情况下的速度响应波形如图 7 所示。在给定 0.5 N 额定负载,转速 40 r/min 的情况下进行传统 DB-DTC 与改进 DB-DTC 下电机转速对比仿真,得到的电机速度波形如图 8 所示,同等仿真情况下的 q 轴电流波形如图 9 所示。图 10 为给定 0.5 N 额定负载,转速 40 r/min 的情况下,改进型 DB-DTC 及其结合位置型阻抗控制策略的位置响应波形图。

对图 6 的仿真结果对比分析可得,电机由 0°

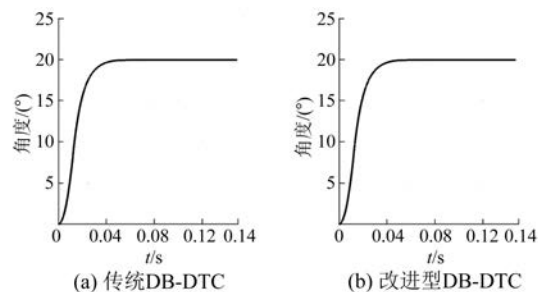


图6 传统 DB-DTC 与改进型 DB-DTC 位置响应波形图

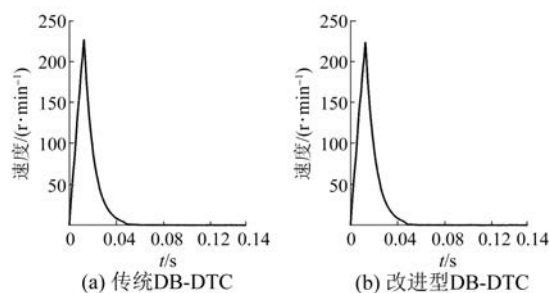


图7 传统 DB-DTC 与改进型 DB-DTC 速度响应波形图

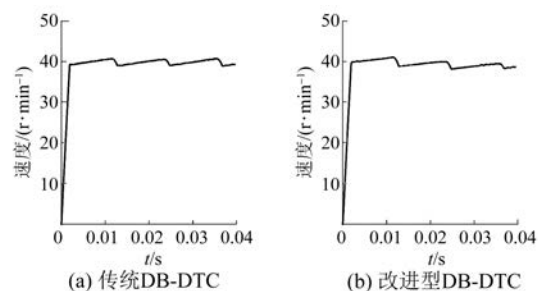
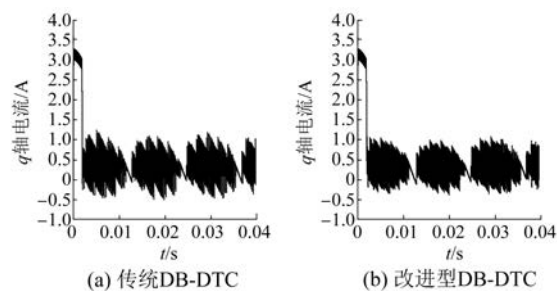


图8 传统 DB-DTC 与改进型 DB-DTC 转速波形图

图9 传统 DB-DTC 与改进型 DB-DTC 的 q 轴电流波形图

转动到 20° 时,传统 DB-DTC 下电机转动至给定角度所需时间大约为 0.049 s ,稳态运行角度误差为 0.12° 。改进型 DB-DTC 下电机转动至给定角度所需时间大约为 0.047 s ,稳态运行角度误差为 0.10° 。在图 7 中,传统 DB-DTC 下电机转动至给定

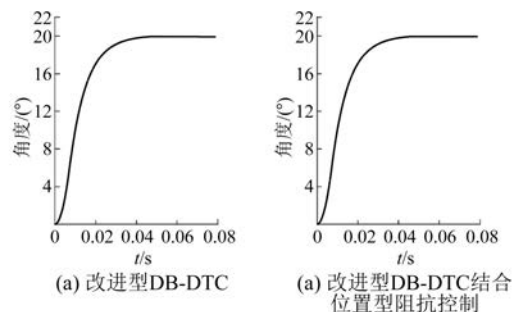


图10 改进型 DB-DTC 与位置型阻抗控制策略的位置响应波形图

角度时电机转速降为零所需时间大约为 0.049 s ,改进型 DB-DTC 下电机转动至给定角度时电机转速降为零所需时间大约为 0.047 s 。在位置控制模式下,相对于传统 DB-DTC,改进型 DB-DTC 下电机转动至给定角度时转速降为零所需时间减少 0.002 s ,稳态运行角度误差减少 0.02° 。

图 8 仿真结果表明,传统 DB-DTC 下电机速度上升至给定速度所需时间大约为 0.006 s ,稳态转速误差为 0.59 r/min ,稳态转速波动为 1.18 r/min 。改进型 DB-DTC 下电机速度上升至给定速度所需时间大约为 0.002 s ,稳态转速误差为 0.56 r/min ,稳态转速波动为 1.12 r/min 。在速度控制模式下,相对于传统 DB-DTC,改进型 DB-DTC 下电机达到给定转速的时间减少 0.004 s ,稳态转速误差降低 0.03 r/min ,稳态转速波动降低 0.06 r/min 。图 9 中,传统 DB-DTC 下电机稳态运行时 q 轴电流峰值为 1.227 A , q 轴的电流脉动为 1.707 A 。改进型 DB-DTC 下电机稳态运行时 q 轴电流峰值为 1.034 A , q 轴的电流脉动为 1.503 A 。在速度控制模式下,改进型 DB-DTC 电机进入稳态运行以后, q 轴电流峰值降低 0.193 A , q 轴电流脉动降低 0.204 A 。图 10 中,改进型 DB-DTC 结合位置型阻抗控制策略位置响应对比改进型 DB-DTC 单独控制,电机转动相同角度所需的时间相差不多。

根据上述分析可以得出所提改进型 DB-DTC 在减少计算量的情况下达到了与传统 DB-DTC 一样的控制效果,简化了控制过程,电机控制系统具有更好的动态性能和更强的抗干扰能力。并且所提控制策略结合其他控制策略时电机的动态响应时间基本不变,进一步证明所提控制策略的优越性。

5 结 语

为提升 DD-PMSM 控制性能,本文提出一种改进型 DB-DTC 策略,在保留传统 DB-DTC 动态响应特性的基础上,简化了控制流程,减少了控制策略的实时计算量,降低了电机运行时的转矩波动。文中提出的改进型 DB-DTC 在静止坐标系中建立数学模型,直接计算出参考定子电压,避免了传统 DB-DTC 在定子参考电压的计算中需要进行多次坐标变换以及反复求解一元二次方程的弊端。仿真结果表明,在位置控制模式和速度控制模式下,改进型 DB-DTC 策略的电机响应时间减少,转速误差和转速波动降低。在电机进入稳态运行以后, q 轴电流峰值降低,电流脉动得到抑制。并且所提控制策略可以结合其他控制策略而不影响电机的动态响应性能,为实现 DD-PMSM 位置的高精度控制提供了有效的方法。

【参考文献】

- [1] GAO Y, QU R, LI D, et al. Design of a dual-stator LTS vernier machine for direct-drive wind power generation [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4): 5204505.
- [2] XIN Y, FANG Y, HUANG X, et al. Analytical modeling of a novel vernier pseudo-direct-drive permanent-magnet machine [C] // 2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC), 2016.
- [3] 赵伽敏,刘金泽. 外转子电机关键技术及解决措施 [J]. 微电机, 2004, 37(2): 51.
- [4] CHEN M, CHEN H, WANG X, et al. Design and control of a novel single leg structure of electrically driven quadruped robot [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 3943867.
- [5] 张海洋,许海平,方程,等. 基于负载转矩观测器的直驱式永磁同步电机新型速度控制器设计 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 2923.
- [6] 杨浩,赵强,杨钊,等. 基于新型双滑模的永磁同步电机无传感器矢量控制 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(6): 2252.
- [7] 孙静,刘旭东. 基于无差拍预测控制和扰动观测器的永磁同步电机电流控制 [J]. 电机与控制应用, 2017, 44(10): 25.
- [8] XIE W, WANG X, DAJAKU G, et al. Analysis and improvement of high efficiency and low cost drive system based on direct torque control [C] // 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 2013.
- [9] 唐红雨,刘贤兴. 基于无差拍的永磁同步电动机直接转矩控制方法研究 [J]. 微特电机, 2015, 43(3): 5.
- [10] 李耀华,周逸凡,赵承辉,等. 表贴式永磁同步电机磁链和转矩无差拍控制系统 [J]. 电机与控制应用, 2020, 47(1): 1.
- [11] 李晓静,叶震,李攀. 基于导纳控制算法的机器人控制方法及系统: CN109249394A [P]. 2019-01-22.
- [12] 袁雷,胡冰新,魏克银,等. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2016.
- [13] 颜华珍. 永磁同步电机无差拍直接转矩-磁链控制算法研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2017.
- [14] 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): 5.
- [15] 李耀华,周逸凡,赵承辉,等. 基于拓展电压矢量集合的表贴式永磁同步电机磁链和转矩无差拍控制 [J]. 电机与控制应用, 2020, 47(10): 10.
- [16] 廖永衡,冯晓云,王珍. 无差拍空间矢量调制直接转矩控制简化设计 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 95.
- [17] 崔超然. 基于动力学参数辨识的阻抗控制研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.
- [18] 李献,骆志伟. 精通 MATLAB/Simulink 系统仿真 [M]. 北京:清华大学出版社, 2015.