

基于磁链规划的PMSM无差拍直接转矩控制策略研究

罗寰亮,王在相,李叶松

(华中科技大学 人工智能与自动化学院,湖北 武汉 430070)

摘要:针对无差拍直接转矩和磁链控制策略(DB-DTFC)依赖电机精确模型、计算量大、转矩与磁链耦合等问题,提出一种基于磁链规划的永磁同步电机DB-DTFC控制策略。首先在定子磁场定向下的磁链坐标系上,对永磁同步电机全速域范围进行磁链规划。其次应用 d 轴磁链对转矩与磁链解耦,设计滑模转矩控制器构建小信号闭环的DB-DTFC简化策略。最终由仿真与实验结果证明,相比于传统DB-DTFC,此简化DB-DTFC计算时间更短、对电机电感的变化不敏感,同时具有更好的磁链与转矩跟踪性能。该策略基于国产335芯片实现了对电机的高性能控制,为DB-DTFC策略在低成本硬件架构中的应用提供了现实的解决方案,对高性能、高性价比的电机控制系统产业发展具有重要意义。

关键词:永磁同步电机;直接转矩控制;无差拍控制;滑模控制

中图分类号:TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26481

Research on Deadbeat Direct Torque Control of PMSM Based on Flux Planning

LUO Huanliang, WANG Zaixiang, LI Yesong

(Academy of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: Aimed at the issues of deadbeat direct torque and flux control strategy (DB-DTFC) such as relying on the accurate motor model, high computational load, and coupling between torque and flux, a simplified strategy of DB-DTFC for permanent magnet synchronous motor which based on flux planning was proposed. Firstly, perform flux linkage planning for the permanent magnet synchronous motor across the full-speed-range within the stator field-oriented flux linkage coordinate system. Secondly, utilizing d -axis flux for decoupling torque and flux linkage, and a sliding mode torque controller was designed to construct a simplified strategy of DB-DTFC with small signal closed-loop. Finally, simulation and experimental results show that compared with the traditional DB-DTFC, the simplified DB-DTFC proposed has a shorter calculation time and is not sensitive to the change of motor inductance. At the same time, it has better flux and torque tracking performance. This strategy achieves high-performance motor control through the domestically developed 335 chip, demonstrating a viable pathway for implementing DB-DTFC methodology in cost-efficient hardware architectures. It provides critical technical validation for advancing industrial-grade motor control systems that balance premium performance with economic feasibility.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); direct torque control (DTC); deadbeat control; sliding mode control (SMC)

永磁同步电机凭借功率密度高、动态响应快,且转子无励磁电流、转子发热小、能避免热变形、保障加工精度的特点,常用作高速主轴电机^[1-3]。目前通常采用的控制策略分为电流型的

型的直接转矩控制(direct torque control, DTC)策略,在电机高速运行时,因基频高、速域宽的特性使得系统对于响应快速性、弱磁与转矩输出的协调能力要求更高^[4]。DTC凭借其结构简单、动态性能高的优点被认为在高速工况下能够有良好

的控制性能^[5]。

但传统基于切换表的DTC逆变器开关频率不固定,电磁转矩与定子电流中存在纹波,电机动态性能受到影响^[6]。结合空间矢量调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)的SVM-DTC可以固定开关频率,有效抑制了转矩脉动,但动态响应因线性调节器带宽限制,控制性能不佳^[7]。以SVM-DTC为基础,利用滑模控制器代替线性PI调节器的SMC-DTC具有类似FOC的系统结构,但作为转矩闭环控制中间变量的转矩角,本质上是转矩与磁链的耦合量,因此失去了DTC简洁高效的特征^[8]。为提升瞬态响应精度,一些研究将预测控制引入PMSM控制系统,主要有模型预测控制(model predictive control, MPC)与无差拍控制^[9-11]。模型预测转矩控制(model predictive torque control, MPTC)依据电机模型与评价函数计算最优电压矢量表,响应快速且多目标易协同^[12],但电压矢量表在线计算耗时长、难以在一个控制周期内完成。文献[13]将最优电压矢量表的计算离线完成,规避了MPTC的高计算复杂度问题,但这部分计算基于电机精确模型难以修调,导致其在宽调速区间内的参数鲁棒性受到影响。无差拍直接转矩和磁链控制(deadbeat direct torque and flux control, DB-DTFC)凭借其良好的稳态控制精度和快速的动态响应近年来也有大量研究^[14-15]。相比于同样基于预测思路的MPTC方法,DB-DTFC不需要不同评价函数的权重系数整定^[16],系统复杂度更低且物理意义明确。

针对传统DB-DTFC基于电机精确模型、计算复杂的问题,众多研究提出了多种改进策略。文献[17]提出了两种新的实现方法,第一种方法在 $d-q$ 坐标系下降低了算法的复杂度和计算时间,对永磁体磁链估计误差不敏感;第二种方法以磁链代替电压作为控制变量,不要求解二次方程,简化了系统结构和计算过程。文献[18]在感应电机中采用闭环Gopinath型磁链观测器估计转子磁链,将电压与电流模型相结合,通过设置合理的控制器参数保证磁链估算随速度增长平滑地从电流模型切换到电压模型,提升了观测器的参数鲁棒性。文献[19]提出了基于磁链差与基于复功率两种DB-DTFC简化策略,将磁链无差拍圆轨迹降阶为直线方程并考虑之前忽略的电阻项影响,进一步提升了控制性能。文献[20]指出了电磁转矩与磁链之间的耦合关系,提出了一种

基于定子磁链定向的DB-DTFC改进策略,以进一步提升系统的鲁棒性。改进策略主要集中在DB-DTFC算法、参数辨识以及观测器上^[21-22],对于PMSM控制系统的转矩和磁链指令的规划影响较少涉及。

传统弱磁策略与DB-DTFC结合时,定子磁链与转矩的参考值由电流参考值给出,计算依赖电感参数准确性。而电机运行在高速工况时电感非线性变化、永磁磁链下降,将给传统弱磁策略带来挑战。因此为提升系统参数鲁棒性并保证合理弱磁运行,需要改进弱磁策略对磁链进行规划。在此基础上进一步简化DB-DTFC以提升计算效率,并降低算法对磁链观测器预测准确性要求。

本文分析了基于最大电压、最大电流、最深弱磁限制的弱磁磁链规划,同时提出了一种结合滑模控制器的DB-DTFC简化设计策略。降低了系统基于电机差分模型对噪声干扰的敏感性,提升了系统参数鲁棒性。最后通过对比实验分析验证了所提出的简化DB-DTFC策略的可行性和有效性。

1 永磁同步电机数学模型与传统DB-DTFC

PMSM在同步旋转坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + p \Psi_d - \omega_e \Psi_q \\ u_q = R_s i_q + p \Psi_q + \omega_e \Psi_d \end{cases} \quad (1)$$

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

$$T_e = 1.5 n_p (\Psi_{sd} i_{sq} - \Psi_{sq} i_{sd}) \quad (3)$$

式中: $u_d, u_q, i_d, i_q, \Psi_d, \Psi_q, L_d, L_q$ 分别为定子电压、电流、磁链、电感在 d, q 轴上的分量; R_s 为定子电阻; Ψ_f 为永磁体磁链; ω_e 为电角速度; n_p 为极对数。

将式(2)代入式(3)并求导,得到电磁转矩状态方程:

$$\dot{T}_e = 1.5 n_p \left(\dot{\Psi}_d \frac{\Psi_q}{L_q} + \Psi_d \frac{\dot{\Psi}_q}{L_q} - \dot{\Psi}_q \frac{\Psi_d - \Psi_f}{L_d} - \Psi_q \frac{\dot{\Psi}_d}{L_d} \right) \quad (4)$$

假设采样周期 T_s 足够小,且电磁转矩与定子磁链在一个周期内线性变化,将式(1)与式(4)联立可得转矩前向差分方程,变换可得:

$$u_q(k) = M u_d(k) + B \quad (5)$$

其中

$$M = \frac{(L_q - L_d)\Psi_q(k)}{(L_d - L_q)\Psi_d(k) + L_q\Psi_f} \quad (6)$$

$$B = \frac{L_d L_q}{(L_d - L_q)\Psi_d(k) + L_q\Psi_f} \left\{ \frac{2\Delta T_e(k)}{3n_p T_s} + \frac{\omega_e}{L_d L_q} \times \right. \\ \left. [(L_d - L_q)(\Psi_d^2(k) - \Psi_q^2(k)) + \right. \\ \left. L_q\Psi_f\Psi_d(k)] + \frac{R_s\Psi_q(k)}{L_d^2 L_q^2} [(L_d^2 - L_q^2) \cdot \right. \\ \left. \Psi_d(k) + L_q^2\Psi_f] \right\} \quad (7)$$

联立式(1)与式(2),建立磁链的前向差分方程,由于其中定子电阻项相比于转速项可以忽略,简化得到定子磁链在电压坐标系上的前向差分方程为以下圆的形式:

$$|\Psi_s(k+1)|^2 = [\Psi_d(k) + u_d(k)T_s + \omega_e\Psi_q(k)T_s]^2 + \\ [\Psi_q(k) + u_q(k)T_s - \omega_e\Psi_d(k)T_s]^2 \quad (8)$$

令 $T_e(k+1) = T_e^*(k)$, $\Psi_s(k+1) = \Psi_s^*(k)$, 则式(5)与式(8)即为实现转矩与磁链无差拍控制的方程,其满足最大电压与最大电流约束的交点即为DB-DTFC的控制电压:

$$\begin{cases} u_d^*(k) = \frac{-X + \sqrt{X^2 - (M^2 + 1)Y}}{(M^2 + 1)} \\ u_q^*(k) = Mu_d^*(k) + B \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} X = \Psi_d(k)/T_s + \omega_e\Psi_q(k) + M[B + \\ \Psi_q(k)/T_s - \omega_e\Psi_d(k)] \\ Y = B^2 + 2B[\frac{\Psi_q(k)}{T_s} - \omega_e\Psi_d(k)] + \\ \omega_e^2\Psi_s^2(k) - [\Psi_s^{*2}(k) - \Psi_s^2(k)]/T_s^2 \end{cases} \quad (10)$$

传统DB-DTFC能够实现对转矩与磁链的快速响应,但存在以下问题:定子磁链与转矩之间存在耦合、参考电压矢量求解复杂、电气参数依赖度高。此外,若采用传统弱磁策略,通过电机模型将电流参考转化为转矩与磁链参考,在电感参数变化时系统的稳定性将进一步降低。

2 简化DB-DTFC策略

2.1 磁链规划

为提升系统的参数鲁棒性,并降低转矩与磁链参考计算的复杂度,考虑设计与DB-DTFC更适配的弱磁磁链规划策略。将PMSM运行状态按转速从低到高分三个阶段:恒转矩区、弱磁区 I、

弱磁区 II,如图1所示。对不同的运行阶段,根据限制条件分别规划转矩与磁链。

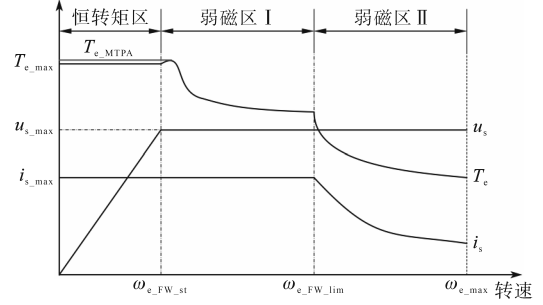


图1 PMSM运行区间划分

Fig.1 Running interval division of PMSM

电机正常工作必须满足最大电流与最大电压限制条件。在恒转矩区,速度未达到磁链调整起始速度,电压限制圆半径较大,限制转矩输出的是最大电流椭圆,表述在旋转磁链坐标系下为

$$\left(\frac{\Psi_d - \Psi_f}{L_d}\right)^2 + \left(\frac{\Psi_q}{L_q}\right)^2 = I_{\max}^2 \quad (11)$$

当转速上升到电压限制圆与电流限制椭圆产生交点时,进入弱磁区 I,此时由于转速较大,电压中其他项相较于反电动势项可以忽略,因此最大电压限幅简化成关于磁链圆的方程如下:

$$\Psi_d^2 + \Psi_q^2 = \left(\frac{u_{\max}}{\omega_e}\right)^2 \quad (12)$$

联立式(11)与式(12),解得交点处的 d,q 轴磁链分别为

$$\begin{cases} \Psi_d = \frac{L_q^2\Psi_f}{L_q^2 - L_d^2} - \frac{L_d L_q}{L_q^2 - L_d^2} \times \\ \sqrt{\frac{u_{\max}^2}{\omega_e^2} \left(\frac{L_d^2}{L_q^2} - 1\right) + (L_q^2 - L_d^2)I_{\max}^2} + \Psi_f^2 \\ \Psi_q = \sqrt{\left(\frac{u_{\max}}{\omega_e}\right)^2 - \Psi_d^2} \end{cases} \quad (13)$$

令 $\Psi_d = \Psi_f$ 可得进入弱磁区 I 的弱磁起始转速。若采用电流最大转矩(maximum torque per ampere, MTPA)算法,以最大电流椭圆为条件,对电磁转矩公式求条件极值,计算出 MTPA 磁链矢量后与式(12)联立可得对应的极限转速。

随着转速进一步上升,磁链轨迹沿着最大电流椭圆向 d 轴负向移动,直至弱磁极限,进一步弱磁会永久性损坏永磁体。此时进入弱磁区 II,直轴磁链恒定为最大弱磁极限,交轴磁链随最大电压约束圆收缩而下降。

根据被控电机的具体类型与材料,设定弱磁极限系数 k_{FW} , $\Psi_d \geq \Psi_{d_lim} = k_{FW}\Psi_f$, 将其代入式(13)

可得进入弱磁区 II 的弱磁极限转速。

PMSM 在全频率范围的磁链规划与转矩限幅可表示为旋转磁链坐标系上的轨迹,如图 2 中粗实线所示。

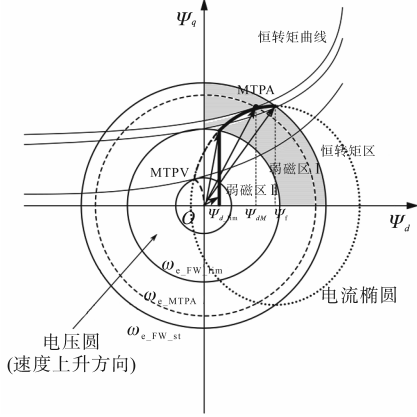


图 2 全频率磁链轨迹规划

Fig.2 Full frequency range flux trajectory planning

以上磁链规划目标为最大转矩输出能力,保障较高的动态过程响应速度。具体设计实现时,当转速低于 MTPA 极限转速,以电流余量作为稳态误差,非线性环节限制最终直轴磁链给定值 Ψ_d^* 在规划值 Ψ_{d_cmd} 与 Ψ_f 之间。当转速上升,最大电压作为主要限制时,以电压余量为稳态误差。由于高速运行时弱磁程度较深,并考虑电机温度升高、永磁体退磁的影响,弱磁上限缩小为 $\min\{0.5(\Psi_f - \Psi_{d_cmd}), u_{\max}/\omega_e - \Psi_{d_lim}\}$ 。

所设计磁链规划校正策略框图如图 3 所示,在电机稳态运行时,通过减小弱磁程度,提升电流与电压利用率。

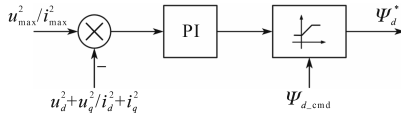


图 3 磁链规划校正框图

Fig.3 Diagram of flux planning correction

得到直轴磁链的给定后,根据工况分别由电流限幅式(11)与电压限幅式(13)结合转矩方程式(3)计算出对应的最大转矩输出限幅,对速度闭环输出处理后得到转矩参考给定。

在采用传统 DB-DTFC 算法时,需要将转矩给定结合磁链与转矩方程计算交轴磁链给定,再计算总的定子磁链参考。本质上是基于电机模型将转矩与磁链再次耦合,降低了系统的参数鲁棒性与控制性能。

此外,由于 Ψ_s 中同时包含了弱磁与转矩两个不同控制目标的信息,因此对 Ψ_s 的无差拍控制与

对转矩的无差拍控制也存在难以独立控制的问题,需要对 DB-DTFC 进行解耦与简化。

2.2 简化 DB-DTFC 原理

基于上一节的磁链规划,在保持转矩无差拍控制的同时,只对 d 轴磁链进行无差拍控制,可实现转矩与弱磁的解耦。

与转矩无差拍控制类似,假设采样周期 T_s 足够小,且 Ψ_d 在一个周期内线性变化,可由式(1)得到其前向差分方程:

$$u_d^*(k) = \frac{\Psi_d^*(k) - \Psi_d(k)}{T_s} - \omega_e \Psi_q(k) + R_s i_d(k) \quad (14)$$

将弱磁无差拍控制方程代入转矩无差拍控制方程,并用电流观测值表示电阻压降项,可得 DB-DTFC 控制电压矢量为

$$\begin{cases} u_d^*(k) = \frac{\Delta \Psi_d(k)}{T_s} + R_s i_d(k) - \omega_e \Psi_q(k) \\ u_q^*(k) = \frac{L_d L_q M}{(L_q - L_d) \Psi_q(k)} \frac{2 \Delta T_e(k)}{3 n_p T_s} + M \frac{\Delta \Psi_d(k)}{T_s} + R_s i_q(k) + \omega_e \Psi_d(k) \end{cases} \quad (15)$$

其中 M 与式(6)一致。

若为表贴式电机, $L_d = L_q = L_s, M = 0$, 此时直轴电压不变,交轴电压为

$$u_q^*(k) = \frac{L_s}{\Psi_f} \frac{2 \Delta T_e(k)}{3 n_p T_s} + R_s i_q(k) + \omega_e \Psi_d(k) \quad (16)$$

对比 PMSM 电压方程与 DB-DTFC 控制电压矢量方程,可将磁链变化率项与无差拍预测补偿项等价。其中 d 轴电压中 $p \Psi_d$ 为弱磁无差拍控制目标,而 q 轴电压中 $p \Psi_q$ 同时包含转矩无差拍控制目标与电机凸极性对弱磁无差拍控制的影响。

当电感参数变化为 $L'_{dq} = L_{dq} + \Delta L_{dq}$ 时, u_d^* 保持不变, u_q^* 中无差拍预测补偿项系数发生改变,可将所有误差视为实现无差拍控制的扰动项:

$$u_q^*(k) = u_{q_cmd}^*(k) + \frac{K_1 \frac{\Delta T_e(k)}{T_s} + K_2 \frac{\Delta \Psi_d(k)}{T_s}}{\Delta u_q} \quad (17)$$

其中

$$\begin{cases} K_1 = \left[\frac{(L_d + \Delta L_d)(L_q + \Delta L_q)(M + K_2)}{L_q - L_d + \Delta L_q - \Delta L_d} - \frac{L_d L_q M}{L_q - L_d} \right] \frac{2}{3 n_p \Psi_q(k)} \\ K_2 = \frac{\Psi_q(k)}{\frac{L_q + \Delta L_q}{L_q - L_d + \Delta L_q - \Delta L_d} \Psi_f - \Psi_d(k)} - M \end{cases} \quad (18)$$

所提出的简化DB-DTFC策略的控制效果与对电感变化的抗扰能力进行对比实验验证。

仿真所采用的PMSM参数与其它仿真参数如表1所示。

表1 仿真实验参数

Tab.1 Parameters of simulation experiment

参数	数值	参数	数值
额定电流/A	6	永磁磁链/Wb	0.196 01
额定转速/(r·min ⁻¹)	2 000	转子惯量/(kg·m ²)	0.001 029
逆变器母线电压/V	300	阻尼系数/[N·m(rad/s) ⁻¹]	0.005
<i>d</i> 轴电感/H	0.007 472	极对数	4
<i>q</i> 轴电感/H	0.009 721	编码器分辨率/ppr	10 000
电枢电阻/W	0.75	控制周期/μs	100

电机弱磁极限 $k_{FW}=0.93$, 在给定转速 2 000 r/min、空载运行时,不同控制策略升速过程的转矩与磁链控制效果如图5与图6所示。其中传统DB-DTFC也采用本文提出的磁链规划策略。

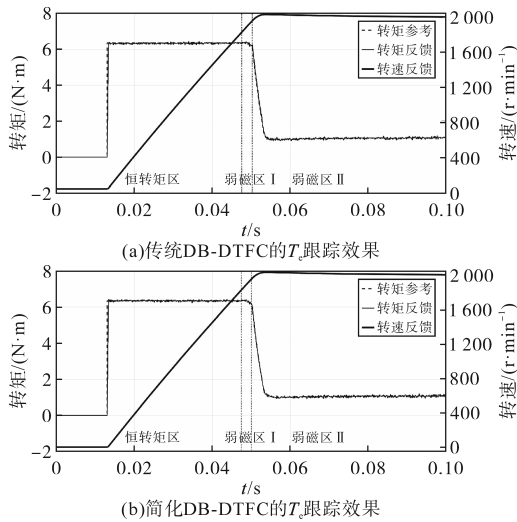


图5 转矩跟踪波形

Fig.5 Waveforms of torque tracking

在全速域范围内,简化DB-DTFC策略的转矩跟踪效果与传统DB-DTFC策略相同,而磁链的跟踪效果更好。

在电机进入2 000 r/min、空载稳态运行后,在0.1 s时突加2 N·m负载,0.13 s时减少0.5 N·m负载,两种控制策略对应转矩和磁链波动如图7所示。

负载突增时转矩跟踪波形如图8所示。在负载突增后,简化DB-DTFC策略下的电磁转矩较快进入稳态,*d*轴磁链无明显变化。采用滑模转矩控制器对转矩无差拍预测补偿项校正能够提升系统稳态性能,同时对DB-DTFC系统的动态性能影响不大。

将仿真模型中的 q 轴电感提升50%,给定转速2 000 r/min、空载运行,以验证简化DB-DTFC

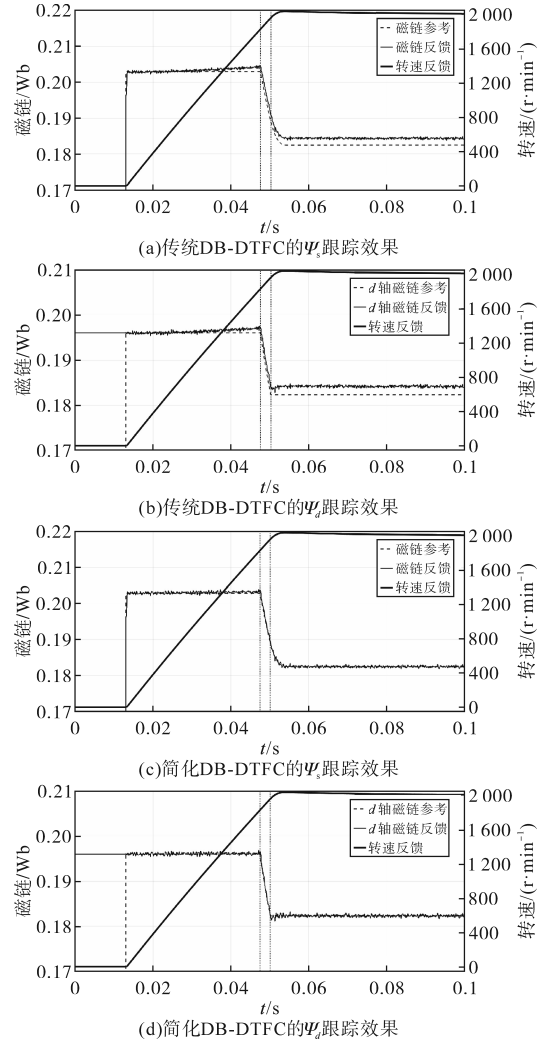


图6 磁链跟踪波形

Fig.6 Waveforms of flux tracking

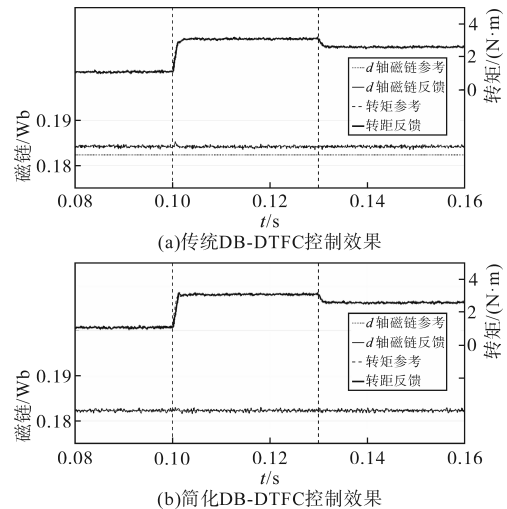


图7 负载突变时的转矩与磁链动态性能

Fig.7 Dynamic performances of torque and flux when load abrupt change

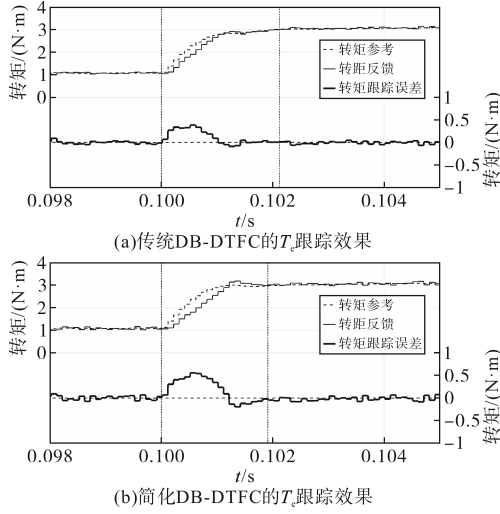
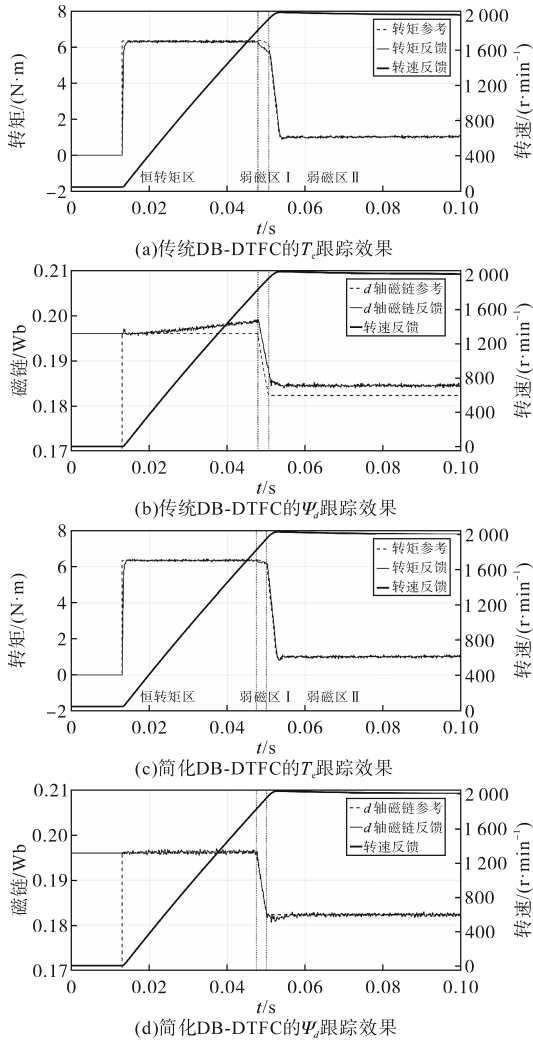


图8 负载突增时转矩跟踪波形

Fig.8 Waveforms of torque tracking when load bursts

策略的电感参数鲁棒性。不同控制策略升速过程的转矩与磁链控制效果如图9所示。

图9 L_q 增大50%时转矩与磁链跟踪波形Fig.9 Torque and flux tracking waveforms with 50% increase of L_q
传统 DB-DTFC 在动态过程中转矩与磁链的

波动幅度未上升,但跟踪性能进一步下降。而本文的简化DB-DTFC策略在动态过程中,针对参数变化带来的电压不足能更好地保证磁链控制性能,最大化提升了转矩输出能力,使得转矩在弱磁区 I 中仍能有效跟踪参考信号。本文提出的简化DB-DTFC策略具有更强的鲁棒性。

3.2 实验结果

搭建如图10所示的实验平台,验证本文所提控制策略的可行性,并与传统DB-DTFC策略进行对比。

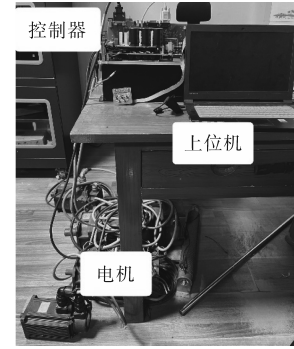


图10 PMSM实验平台

Fig.10 Experimental platform of PMSM

实验所使用PMSM参数与控制参数与仿真一致,控制器以国产AVP32F335 DSP与英特尔cyclone IV EP4CE10 FPGA为核心。

基于成熟的矢量控制工程,测得永磁体磁链不会非线性下降的弱磁极限为 $k_{fw} = 0.93$ 。转速从1500 r/min上升至2000 r/min、空载运行时,不同控制策略升速过程的转矩与磁链控制效果如图11所示。

传统DB-DTFC策略在6 ms时进入弱磁区 I、8.8 ms时抵达弱磁极限转速。简化DB-DTFC策略则分别在5.6 ms与8.3 ms时进入弱磁区 I 和弱磁区 II,且在恒转矩区与弱磁区 II 具有更好的转矩和d轴磁链跟踪性能。本文所提出的简化DB-DTFC在保留了传统无差拍策略优秀动态性能的同时,具有更好的稳态性能。

由于电机参数为离线辨识获得,存在一定误差,因此在对转矩与d轴磁链实现相互独立的闭环控制后,总的定子磁链幅值会与根据电机理想模型计算的参考值不一致。

对比图11c、图11f,工作在弱磁区 I、磁链变化导致电压不足时,简化DB-DTFC策略能够在保障永磁体不过度弱磁的前提下最大化电机转矩输出能力、保证d轴磁链快速跟踪。

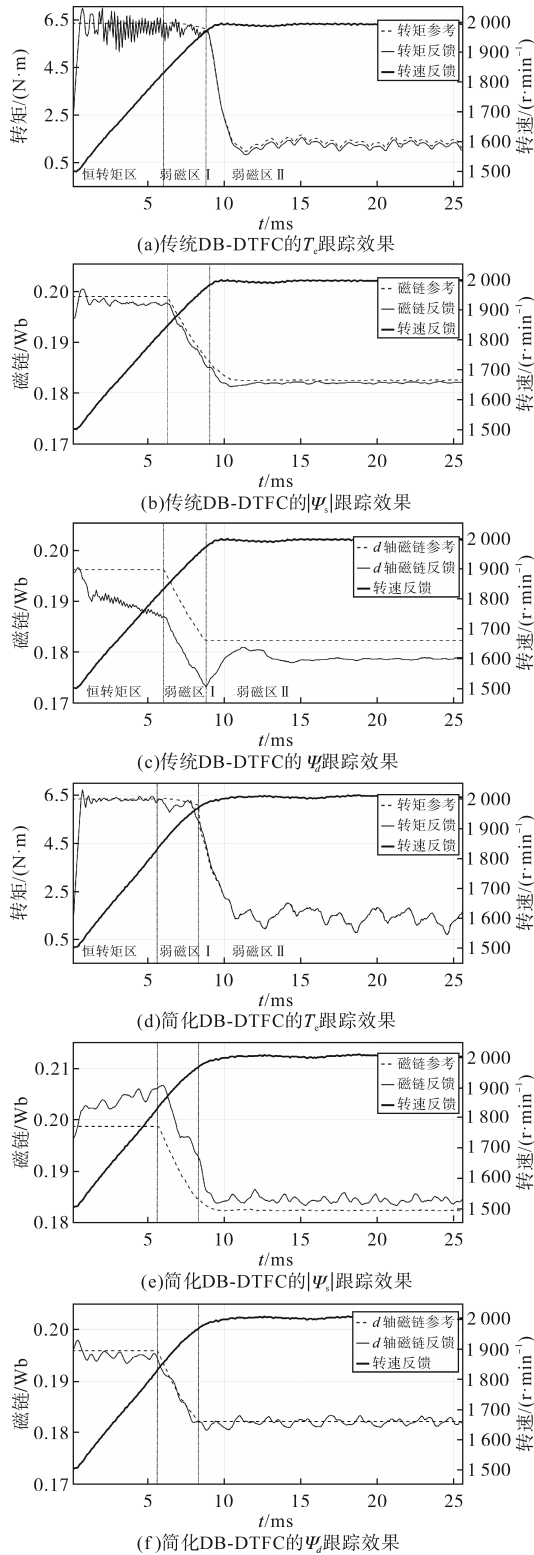


图 11 两种 DB-DTFC 升速过程的转矩、磁链波形

Fig.11 Torque and flux waveforms for the speed-up process of two DB-DTFC method

在算法实现上,传统 DB-DTFC 算法用时 3 126 个 CPU 时钟周期,简化 DB-DTFC 算法与 SMC 校正总用时 1 990 个 CPU 时钟周期,用时缩短 7.57 μ s,证明了本文简化策略能够有效降低

DB-DTFC 的计算复杂度。

4 结论

本文针对永磁同步电机 DB-DTFC 策略计算复杂、参数鲁棒性较低等问题,提出了一种基于磁链规划的 DB-DTFC 简化策略,针对电压中的无差拍预测补偿项构建了采用滑模控制的闭环控制结构,通过仿真与实验分析得出以下结论:

1) 本文提出的简化 DB-DTFC 策略实现了磁链与转矩的解耦控制,对磁链的跟踪效果更好。

2) 与传统 DB-DTFC 相比,简化 DB-DTFC 在电感参数变化时能够有效维持磁链,具有更强的鲁棒性。

3) 与传统 DB-DTFC 相比,简化 DB-DTFC 策略计算效率大幅提高,算法复杂度较低。

参考文献

- [1] 李佳南. 高速加工机床的设计与应用[J]. 科技广场, 2011 (1): 197-199.
LI Jianan. Design and application of high speed machine tool [J]. Science Mosaic, 2011 (1): 197-199.
- [2] 曹玉. 永磁同步电机的高速运行控制[D]. 天津: 河北工业大学, 2019.
CAO Yu. Control of permanent magnet synchronous machines at high speed[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2019.
- [3] GU B G, CHOI J H, JUNG I S. Development and analysis of in-tertia short fault model of PMSMs with series and parallel winding connections[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 29(4): 2016-2026.
- [4] 尹旭. 电动汽车永磁同步电机全速域驱动控制系统研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
YIN Xu. Research on full-speed domain drive control system of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2022.
- [5] BIAN C, REN S, MA L. Study on direct torque control of super high-speed PMSM[J]. IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2007(21): 2711-2715.
- [6] MARTINS C A, ROBOAM X, MEYNARD T A, et al. Switching frequency imposition and ripple reduction in DTC drives by using a multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(2): 286-297.
- [7] LIU Yang, ZHAO Jin, LUO Hui, et al. Model reference adaptive control-based speed control of brushless DC motors with low-resolution hall-effect sensors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1514-1522.
- [8] 高函. 基于超螺旋滑模自抗扰控制的永磁同步电机直接转矩控制研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2023.

- GAO Han. Research on direct torque control of permanent magnet synchronous motor based on super-twisting sliding mode active disturbance rejection control[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2023.
- [9] 罗引航. 永磁同步电机有限集模型预测电流控制研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- LUO Yinhang. Research on finite-control-set model predictive current control of permanent magnet synchronous motor[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022.
- [10] 王馨. 永磁同步电机无差拍直接转矩控制的研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2012.
- WANG Xin. Research on dead-beat direct torque control of permanent magnet synchronous motor[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2012.
- [11] 杨帆, 赵希梅, 金鸿雁, 等. 基于无参数PMSM的自适应有限集模型预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(22): 8935–8943.
- YANG Fan, ZHAO Ximei, JIN Hongyan, et al. Parameter-free adaptive finite control set model predictive control for PMSM[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(22): 8935–8943.
- [12] 潘斌, 周扬忠, 钟天云. 结合预测开关表的六相串联三相双PMSM系统模型预测转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6846–6856.
- PAN Bin, ZHOU Yangzhong, ZHONG Tianyun. Model predictive torque control with predictive switching table for six-phase and three-phase PMSM series-connected system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6846–6856.
- [13] 赵俊杰, 刘旭东, 肖朋, 等. 模型预测永磁同步电机直接转矩控制系统[J]. 长春师范大学学报, 2022, 41(10): 38–46.
- ZHAO Junjie, LIU Xudong, XIAO Peng, et al. Model predictive direct torque control of permanent magnet synchronous motor[J]. Journal of Changchun Normal University, 2022, 41(10): 38–46.
- [14] GAONA D E, EI Khatib H, 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: 6071–6078.
- [15] ZUO Y, ZHAO C, WANG H, et al. DB-DTFC for PMSM in the stationary reference frame using reference flux vector calculator [C]//IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2022.
- [16] 丁志强, 郭凯凯, 高雄, 等. 基于无权重PID型代价函数的永磁同步电机模型预测转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(11): 44–52.
- DING Zhiqiang, GUO Kaikai, GAO Xiong, et al. Model predictive torque control of permanent magnet synchronous motor based on unweighted factor PID cost function[J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(11): 44–52.
- [17] 陈殷. 永磁同步电机无差拍直接转矩控制系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- CHEN Yin. Research on dead-beat direct torque control of PMSM system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [18] 殷腾飞. 全频率域永磁同步电机无差拍直接转矩控制策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- YIN Tengfei. Deadbeat direct torque control strategy of permanent magnet synchronous motor in full frequency range[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2021.
- [19] WANG Wusen, LIU Chunhua, ZHAO Hang, et al. Improved deadbeat-direct torque and flux control for PMSM with less computation and enhanced robustness[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(3): 2254–2263.
- [20] 张家祥, 刘素芳, 海方. 基于定子磁链定向的永磁同步电机无差拍直接转矩和磁通控制策略[J]. 微电机, 2022, 55(5): 67–88.
- ZHANG Jiaxiang, LIU Sufang, HAI Fang. Dead-beat direct torque and flux control strategy of permanent magnet synchronous motor based on stator flux orientation[J]. Micromotors, 2022, 55(5): 67–88.
- [21] 扶文树, 储建华, 王刚. 永磁同步电机新型无差拍直接转矩控制[J]. 电气传动, 2021, 51(2): 9–14.
- FU Wenshu, CHU Jianhua, WANG Gang. New deadbeat direct torque control of permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Drive, 2021, 51(2): 9–14.
- [22] 孙嘉伟, 郑泽东, 李永东. 无差拍直接转矩控制的MRAS参数辨识方法[J]. 电气传动, 2018, 48(5): 3–7.
- SUN Jiawei, ZHENG Zedong, LI Yongdong. Parameter identification based on MRAS deadbeat-direct torque and flux control [J]. Electric Drive, 2018, 48(5): 3–7.

收稿日期: 2025-02-27

修改稿日期: 2025-04-21