

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

丁志强, 郭凯凯*, 高 雄, 赵金涛

(安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

Model Predictive Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Unweighted Factor PID Cost Function

DING Zhiqiang, GUO Kaikai*, GAO Xiong, ZHAO Jintao

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology,
Huainan 232001, China)

Abstract: [Objective] To solve the problem of poor robustness in the model predictive torque control (MPTC) algorithm caused by parameter mismatch in the control model of permanent magnet synchronous motors, an MPTC algorithm based on an unweighted factor proportional integral derivative (PID) cost function was proposed. [Methods] The PID cost function eliminated static error by constructing an integral error value function and suppressed the oscillation of torque and flux linkage errors by constructing a differential error value function. However, since torque and flux linkage had different dimensions, the PID cost function still included weight coefficients. To solve this problem, an unweighted dual-cost function parallel strategy was proposed, which transformed the multi-objective cost function into a single-objective cost function to obtain a set of voltage vectors. The current-type cost function was used as the final criterion to evaluate the optimal voltage vector, thus eliminating the need for weight coefficient. Finally, the proposed unweighted factor PID cost function MPTC was compared with the traditional cost function MPTC through simulations. [Results] The results show that MPTC with unweighted factor PID cost function can suppress torque and flux ripple, reduce the dependence of MPTC on model parameters, and solve the difficulty in adapting to different operating conditions because of the existence of weight coefficient, while maintaining the advantage of MPTC's fast dynamic response. [Conclusion]

The proposed cost function demonstrates good feasibility in MPTC for permanent magnet synchronous motors.

Key words: model predictive torque control; cost function; weight coefficient; robustness; permanent magnet synchronous motor

摘 要: 【目的】为解决永磁同步电机控制模型参数失配时,模型预测转矩控制(MPTC)算法存在鲁棒性较差的问题,提出了一种基于无权重比例积分微分(PID)型代价函数的 MPTC 算法。【方法】PID 型代价函数通过构建积分误差价值函数消除静态误差,构建微分误差价值函数抑制转矩和磁链误差的振荡变化。由于转矩与磁链量纲不同, PID 型代价函数仍然存在权重系数。为解决此问题,又提出一种无权重的双代价函数并行策略,将多目标代价函数转换为单目标代价函数求电压矢量集合,采用电流型代价函数作为评价最优电压矢量的最终依据,从而消除权重系数。最后,通过仿真将文本所提无权重 PID 型代价函数的 MPTC 与传统代价函数 MPTC 进行对比分析。【结果】仿真结果表明,采用无权重 PID 型代价函数的 MPTC 能够抑制转矩脉动和磁链脉动,降低 MPTC 对模型参数的依赖性,解决因存在权重系数而难以适应不同工况条件的问题,同时保留 MPTC 动态响应快的优点。【结论】本文所提代价函数在永磁同步电机 MPTC 上具有良好的可行性。

关键词: 模型预测转矩控制; 代价函数; 权重系数; 鲁棒性; 永磁同步电机

基金项目: 安徽省教育厅基金重大项目(2022AH040110); 国家自然科学基金青年项目(51905003)

Major Fund Project of Anhui Education Department (2022AH040110); Youth Project of National Natural Science Foundation of China (51905003)

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)具有高效率、高功率、高转矩密度和

环保等优点,被广泛用于各种工业和商业领域^[1]。近年来,就如何更进一步提高 PMSM 的控制性能和精度而诞生出许多先进的算法,如模型预测、滑模控制^[2]和自适应控制^[3]等。其中模型预测转矩控制(Model Predictive Torque Control, MPTC)成为研究热点之一。MPTC 可以通过优化控制算法和预测电机状态,在短时间内实现高精度的电机控制,还具有原理直观、设计灵活和多目标易协同等优点。但是 MPTC 高度依赖于准确的电机参数,而电机参数容易受到外部因素的干扰,例如电机的温度升高或磁场饱和现象等。电机参数的变化会导致转矩和磁链的预测值偏离其理论值,从而引起系统输出存在跟踪误差和误差波动较大的问题^[4]。除此之外,由于转矩与磁链的量纲不同,因此需要一个权重系数来调节磁链项对代价函数值的影响程度,而不同的权重系数对电机的控制性能影响很大^[5]。因此对于不同的情况系统需要调节的权重系数不同,在一定程度上增加了系统的复杂性。为实现系统在各种场合的灵活应用,去除其中的权重系数十分必要。

为了增强系统的鲁棒性并减少对参数的敏感度,众多国内外研究者提出了多种改进算法。例如,扰动观测技术,该技术将由电机参数波动引起的控制偏差视为外部扰动,通过扰动观测器来确定这一扰动的具体大小,并利用前馈控制策略进行补偿,以此来中和系统性能受到参数变化的影响^[6-7]。扰动观测技术能够在对实时性能要求较高的应用场景中发挥作用,通过迅速检测和补偿外部扰动,增强系统的动态响应能力和稳定性^[8]。然而,扰动观测器的性能高度依赖于对外部扰动的精确评估,在实际操作中,扰动的估计可能存在偏差,这可能导致控制效果不佳;此外,通过补偿外部扰动来处理模型参数不匹配的问题,通常只能减少稳态误差,而无法有效减小由于电感参数不准确所引起的波动误差^[9]。

参数识别技术旨在实时识别 PMSM 的多个参数,并将这些参数在线输入系统,以优化预测模型。这样,即便在电机参数未知或不匹配的情况下,也能确保控制系统的性能^[10]。然而,在同时识别多个参数时,系统可能会面临识别方程矩阵秩不足的问题,可能导致产生多个辨识结果,使得系统陷入局部最优而非全局最优解^[11-12]。为了

解决这一问题,通常采取的策略是分步进行参数识别,减少单次识别的参数数量,专注于系统中几个关键的参数^[13-14]。不过,逆变器的死区效应、传感器的测量误差以及系统动态的变化等因素可能引起数据的不确定性和噪声,这些都可能干扰参数识别的精确性,使得在实际操作中实现高精度的参数辨识面临挑战^[15]。

为了克服权重系数引发的问题^[16],在某些不依赖权重系数的 MPTC 方法中,研究者们引入了模糊逻辑和粒子群优化算法来动态调整权重系数,以实现实时优化^[17-18]。然而,这种方法需要在已有的预测模型之上融入额外的优化机制,从而增加了系统的复杂性和计算负担。为了简化这一过程,一些研究者们提出了直接基于预测模型的新方法:一种方法是对各个基本电压矢量所产生的转矩和磁链误差进行计算,随后对这些误差值进行排序,以此选择最佳的电压矢量^[19];另一方法则是将预测的转矩和磁链误差视作基本电压矢量与最优电压矢量之间差异的度量,借此确定最优矢量^[20-21]。这两种方法均未增加系统的复杂性,而是通过将转矩和磁链的单位标准化,有效避免了代价函数中权重系数的使用。

为提高 MPTC 算法的参数鲁棒性并实现权重系数的消除,本文提出了一种无权重(Unweighted Factor, UWF)比例积分微分(Proportional Integral Derivative, PID)型代价函数。该代价函数在面对预测模型参数不匹配时,能够提升转矩和磁链的控制效果。通过建立积分误差价值函数来消除静态误差;同时,通过构建微分误差价值函数来抑制转矩和磁链误差的波动。在消除权重系数方面,利用 UWF 的双代价函数并行策略,将多目标型代价函数转换为单目标代价函数求电压矢量集合,采用电流型代价函数作为评价最优电压矢量的最终依据,从而消除权重系数,同时保留传统预测模型动态响应快的特点。

1 永磁同步电机模型预测转矩控制

1.1 PMSM 数学模型

忽略铁心的饱和效应、涡流损耗以及磁滞损耗,假定电机内部流过的是三相对称的正弦波形电流。在与转子磁通同步旋转的 $d-q$ 坐标系中,对于表贴式 PMSM,其电压方程为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e \psi_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e \psi_d \end{cases} \quad (1)$$

定子磁链方程为

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

$$\psi_s = \sqrt{\psi_d^2 + \psi_q^2} \quad (3)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \psi_f i_q \quad (4)$$

式中: u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴的定子电压和定子电流; ψ_s 为定子磁链; ψ_d 、 ψ_q 分别为定子磁链 d 、 q 轴分量; R 为定子电阻; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴定子电感; T_e 为电磁转矩; ω_e 为电角速度; p_n 为极对数; ψ_f 为永磁体磁链。

1.2 预测转矩控制

通过在 k 时刻应用一阶前向欧拉方程对定子电压方程进行离散化处理,可以得到相应的离散化预测模型,如式(5)所示:

$$\begin{cases} i_{d(k+1)}^p = i_{d(k)} + \frac{T_s}{L_d} (u_{d(k)} - Ri_{d(k)} + \omega_e L_q i_{q(k)}) \\ i_{q(k+1)}^p = i_{q(k)} + \frac{T_s}{L_q} (u_{q(k)} - Ri_{q(k)} - \omega_e L_d i_{d(k)} - \omega_e \psi_f) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $i_{d(k+1)}^p$ 、 $i_{q(k+1)}^p$ 分别为 $k+1$ 时刻 d 、 q 轴定子电流预测值; $i_{d(k)}$ 、 $i_{q(k)}$ 分别为 k 时刻 d 、 q 轴定子电流; $u_{d(k)}$ 、 $u_{q(k)}$ 和 $u_{d(k+1)}$ 、 $u_{q(k+1)}$ 分别为 k 和 $k+1$ 时刻 d 、 q 轴定子电压; T_s 为采样周期。

为解决系统控制器程序运行中的延时问题,实施两阶段的预测策略。初始阶段利用 k 时刻的定子电流测量值及电机参数,预测出 $k+1$ 时刻 d - q 坐标系下的定子电流。继而,根据式(6)继续处理:

$$\begin{cases} i_{d(k+2)}^p = i_{d(k+1)}^p + \frac{T_s}{L_d} (u_{d(k+1)} - Ri_{d(k+1)}^p + \omega_e L_q i_{q(k+1)}^p) \\ i_{q(k+2)}^p = i_{q(k+1)}^p + \frac{T_s}{L_q} (u_{q(k+1)} - Ri_{q(k+1)}^p - \omega_e L_d i_{d(k+1)}^p - \omega_e \psi_f) \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)计算出 $k+2$ 时刻的 d 、 q 轴预测电流,从而进一步得到 $k+2$ 时刻的转矩和磁链的预测值,分别如式(7)和式(8)所示:

$$T_{e(k+2)}^p = \frac{3}{2} p_n \psi_f i_{q(k+2)}^p \quad (7)$$

$$\psi_{s(k+2)}^p = \sqrt{(L_d i_{d(k+2)}^p + \psi_f)^2 + (L_q i_{q(k+2)}^p)^2} \quad (8)$$

1.3 传统代价函数

在常规的 PMSM MPTC 系统中,代价函数根据式(9)进行定义。转矩参考值 T_{eref} 由调节速度的外部比例积分(Proportional Integral, PI)控制器提供,磁链参考值根据最大转矩电流比利用式(10)和转矩参考值计算得到,进一步将 8 个基本电压矢量分别代入式(5)~式(9),以确定使代价函数 J 取值最小的最优电压矢量。最终,将最优电压矢量作用于三相两电平逆变器,实现对电机的精确控制。

$$J = (T_{eref} - T_{e(k+2)}^p)^2 + \lambda (\psi_{sref} - \psi_{s(k+2)}^p)^2 \quad (9)$$

式中: λ 为磁链项的权重因子; ψ_{sref} 为参考磁链,其表达式为

$$|\psi_{sref}| = \sqrt{\psi_f^2 + \left(\frac{L_q T_{eref}}{1.5 p_n \psi_f} \right)^2} \quad (10)$$

在传统代价函数的设计中,通过选择使预测的转矩和磁链矢量与其参考值之间的欧几里得距离达到最小(即误差最小)的点来进行控制。然而,这种方法并未充分考虑转矩和磁链预测的精确性以及控制误差的累积效应。因此,无法确保在稳态下误差为零,也无法实现最佳的纹波抑制。特别是在预测模型参数不匹配的情况下,系统的鲁棒性表现不佳。

2 基于 PID 型代价函数的 MPTC

为解决电机在运行过程中,因电机发热和环境因素等变化,造成电机电阻、电感和磁链偏离额定值,导致预测模型参数失配而使控制系统鲁棒性较差的问题。本文构建了一个以 PID 原理为基础的新型代价函数,该函数的构思借鉴了传统的负反馈 PID 控制机制。由于积分环节能减少系统的稳态误差,因此对 MPTC 的累积控制误差进行积分,构建积分误差价值函数,以消除系统的静态偏差;微分环节则用于预测误差的波动趋势,减少系统误差的振荡,通过设计微

分误差价值函数来抑制转矩和磁链的波动,提升系统稳定性。

2.1 积分误差价值函数

在 PID 控制器的积分部分中,通常利用后向差分的计算式来进行数值上的近似计算。即:

$$I_{(k)} = I_{(k-1)} + k_1 T_s e_k \quad (11)$$

式中: I 为积分误差价值函数; e_k 为在 k 时刻的控制偏差; k_1 为积分增益系数。

PID 控制器的积分部分旨在减少控制量的稳态误差。类似地,对转矩和磁链的控制偏差 e_T 、 e_ψ 进行积分操作,如式 (12) 所示:

$$\begin{cases} I_{T(k)} = I_{T(k-1)} + k_1 T_s e_{T(k)} \\ I_{\psi(k)} = I_{\psi(k-1)} + k_1 T_s e_{\psi(k)} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} e_{T(k)} = T_{\text{eref}} - T_{e(k)} \\ e_{\psi(k)} = \psi_{\text{sref}} - \psi_{s(k)} \end{cases} \quad (13)$$

式中: I_T 和 I_ψ 分别为转矩和磁链的积分误差价值函数。

在价值函数中加入转矩和磁链的积分误差项,只要控制偏差存在,就会不断地对偏差进行积分,从而使累计控制误差趋于零。

2.2 微分误差价值函数

虽然利用积分误差价值函数可以消除稳态控制误差,但面对电机参数不匹配所引起的波动误差却无法抑制。为此,引入微分误差价值函数以预测转矩和磁链误差的动态变化趋势,以此来抑制误差的振荡性变化。鉴于控制系统输入量的离散性质,传统 PID 控制器中的微分部分无法用于预测系统的瞬态响应。因此,基于纹波误差产生的基本原理,定义每个控制周期内由转矩和磁链单位变化所引起的预测误差,并将这些误差作为微分误差价值函数的系数,分别表示为 G_T 和 G_ψ ,即:

$$\begin{cases} G_{T(k)} = LPF \left(k_D \frac{T_{e(k)} - T_{e(k-1)}^p}{T_{e(k)} - T_{e(k-1)}} \right) \\ G_{\psi(k)} = LPF \left(k_D \frac{\psi_{s(k)} - \psi_{s(k-1)}^p}{\psi_{s(k)} - \psi_{s(k-1)}} \right) \end{cases} \quad (14)$$

式中: $T_{e(k)}$ 、 $T_{e(k-1)}$ 和 $\psi_{s(k)}$ 、 $\psi_{s(k-1)}$ 分别为 k 、 $k-1$ 时刻的转矩和磁链; k_D 为微分增益系数; LPF 为低通滤波器函数。

使用一阶低通滤波器时,式 (14) 变为

$$\begin{cases} G_{T(k)} = (1 - \beta) G_{T(k-1)} + \beta \left(k_D \frac{T_{e(k)} - T_{e(k-1)}^p}{T_{e(k)} - T_{e(k-1)}} \right) \\ G_{\psi(k)} = (1 - \beta) G_{\psi(k-1)} + \beta \left(k_D \frac{\psi_{s(k)} - \psi_{s(k-1)}^p}{\psi_{s(k)} - \psi_{s(k-1)}} \right) \end{cases} \quad (15)$$

式中: β 为一阶低通滤波器系数。

故微分误差价值函数为系数 G_T 与预测转矩变化量的乘积加上系数 G_ψ 与预测磁链变化量的乘积,即:

$$\begin{cases} D_{T(k)} = G_{T(k)} (T_{e(k+2)}^p - T_{e(k+1)}^p) \\ D_{\psi(k)} = G_{\psi(k)} (\psi_{s(k+2)}^p - \psi_{s(k+1)}^p) \end{cases} \quad (16)$$

为防止预测变化量乘积的分母接近零而造成微分误差价值函数出现误差,设置阈值 δ ,当转矩和磁链变化率过低时不更新 G_T 和 G_ψ ,即:

$$\begin{cases} G_{T(k)} = (1 - \beta) G_{T(k-1)}, \quad |T_{e(k)} - T_{e(k-1)}| \leq \delta \\ G_{\psi(k)} = (1 - \beta) G_{\psi(k-1)}, \quad |\psi_{s(k)} - \psi_{s(k-1)}| \leq \delta \end{cases} \quad (17)$$

因此,引入积分和微分误差价值函数后的 PID 型代价函数 J 为

$$J = (P_{T(k)} + I_{T(k)} + D_{T(k)})^2 + \lambda (P_{\psi(k)} + I_{\psi(k)} + D_{\psi(k)})^2 \quad (18)$$

式中: P 为比例误差价值函数,由传统代价函数中转矩和磁链的误差项构成,其表达式为

$$\begin{cases} P_{T(k)} = T_{\text{eref}} - T_{e(k+2)}^p \\ P_{\psi(k)} = \psi_{\text{sref}} - \psi_{s(k+2)}^p \end{cases} \quad (19)$$

显然,由于转矩和磁链量纲的不一致,PID 型代价函数中仍然包含一个权重系数 λ ,其作用是调整磁链项在整个代价函数中所占的比重。然而,依据经验设计的权重系数难以适应不同工况,且不同的权重系数对电机的控制性能影响很大。

3 无权重双代价函数并行策略

为消除代价函数内的权重系数,本文引入一种不依赖于权重的双代价函数并行策略。该策略将原本的多目标代价函数简化为单目标代价函数,以确定电压矢量的集合。在多目标代价函数 MPTC 的体系中,权重系数的作用是调节转矩误差与磁链误差在控制中的相对重要性,这也同样决定着旋转坐标系下定子电流的 d 轴和 q 轴分量的控制比重。通过将电流型代价函数设定为评价

大,传统代价函数 MPTC 的 E_{RMS} 整体呈现增大趋势。因系统对电阻参数不敏感,因此图 2 中波形变化不明显;而图 4 中因传统代价函数 MPTC 系统鲁棒性较差,因此当模型磁链小于额定磁链且当系统模型磁链参数的不匹配的程度增大时,磁链的不准确估计将会直接影响转矩的计算,导致系统整体控制误差较大。上述分析结果表明,UWF-PID-MPTC 系统对于电阻、电感及磁链参数波动具有较低的敏感度。即便在系统参数不匹配时,该系统仍能保持较佳的鲁棒性,并且能够维持较小的控制误差。

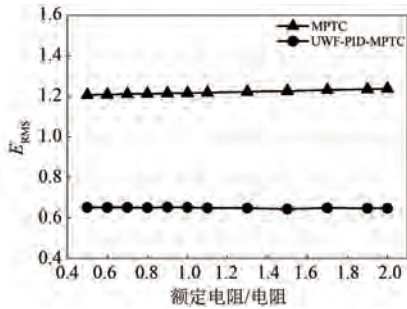


图 2 电感和磁链额定控制误差随电阻变化曲线
Fig. 2 Curves of control error with varying resistance at rated inductance and flux linkage

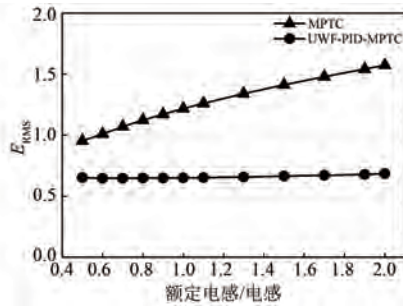


图 3 电阻和磁链额定控制误差随电感变化曲线
Fig. 3 Curves of control error with varying inductance at rated resistance and flux linkage

设定 UWF-PID-MPTC 和传统代价函数 MPTC 系统中预测模型的电感、电阻和永磁体磁链均为 150% 额定值和均为 50% 额定值,转矩和磁链的波形对比结果如图 5~图 8 所示。

由图 5~图 8 可知,相比于传统代价函数 MPTC,UWF-PID-MPTC 的转矩脉动和磁链脉动更小、系统鲁棒性更强。且两种方法在启动和转矩突变的瞬间均能实现转矩的快速跟踪,说明 UWF-PID-MPTC 可保留传统 MPTC 动态响应的优点。

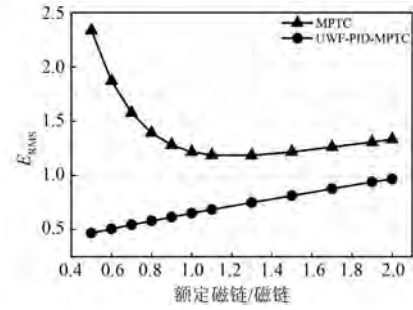


图 4 电阻和电感额定控制误差随磁链变化曲线
Fig. 4 Curves of control error with varying flux linkage at rated resistance and inductance

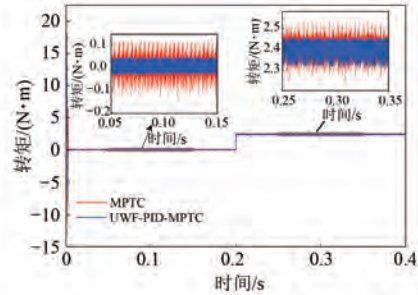


图 5 模型参数为 50% 额定值时的转矩波形对比
Fig. 5 Torque waveform comparison at 50% rated model parameters

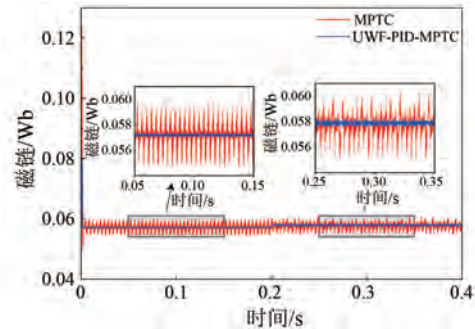


图 6 模型参数为 50% 额定值时的磁链波形对比
Fig. 6 Comparison of flux linkage waveform at 50% rated model parameters

4.2 不同工况下对比分析

为研究 UWF-PID-MPTC 在不同工况下的适用性。设定第一种工况为额定负载转矩条件下,转速设定值从 500 r/min 逐步提升至额定转速 3 000 r/min;第二种工况为额定转速条件下,负载转矩设定值从 0 N·m 逐步增加至额定负载转矩 2.4 N·m。两种工况下磁链脉动与转矩脉动如图 9~图 12 所示。

由图 9~图 12 可知,在代价函数无权重系数

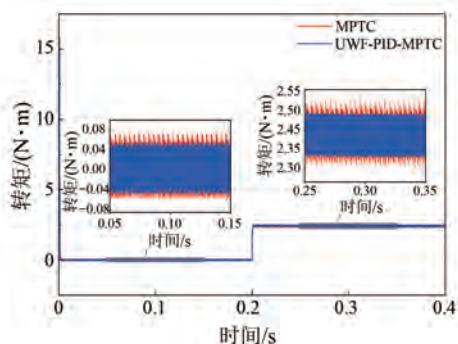


图 7 模型参数为 150%额定值时的转矩波形对比

Fig. 7 Torque waveform comparison at 150% rated model parameters

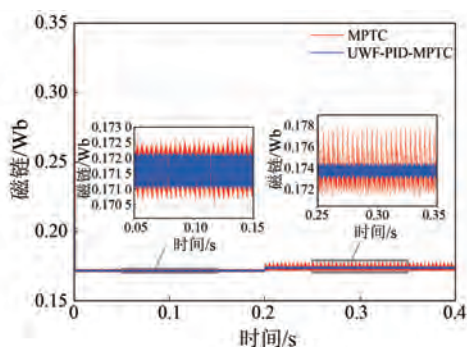


图 8 模型参数为 150%额定值时的磁链波形对比

Fig. 8 Comparison of flux linkage waveform at 150% rated model parameters

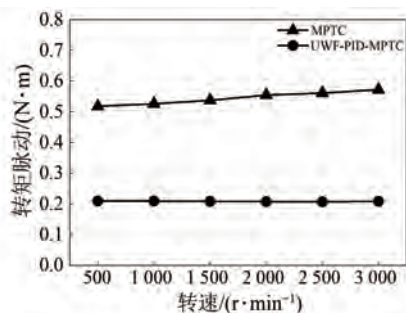


图 9 额定转矩不同转速下转矩脉动

Fig. 9 Torque ripple at rated torque under different speeds

的情况下,相较于传统代价函数 MPTC,本文所提 UWF-PID-MPTC 在转矩和磁链的脉动控制表现更优,且不会对系统的动态性能造成负面影响。

5 结语

针对模型参数失配时 MPTC 算法存在鲁棒性较差的问题以及 PID 型代价函数中存在权重系数而难以适应不同工况的问题,本文提出一种基于

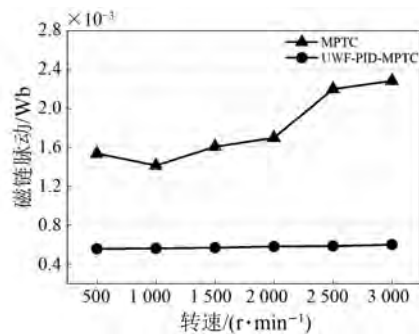


图 10 额定转矩不同转速下磁链脉动

Fig. 10 Flux fluctuation at rated torque under different speeds

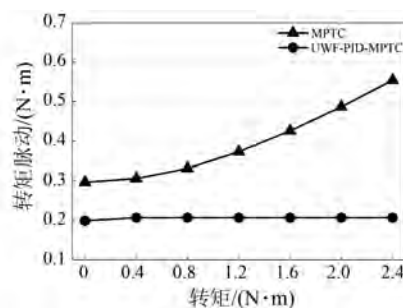


图 11 额定转速不同转矩下转矩脉动

Fig. 11 Torque ripple at different torque levels at rated speed

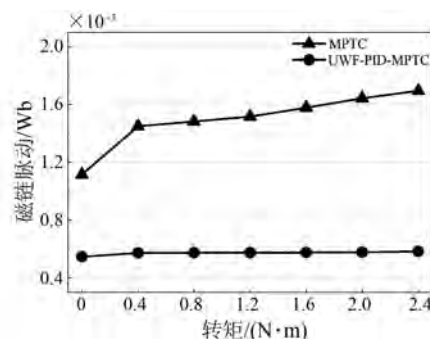


图 12 额定转速不同转矩下磁链脉动

Fig. 12 Flux fluctuation at different torque levels at rated speed

无权重 PID 型代价函数的 MPTC 算法。通过构建积分误差价值函数消除静态误差;构建微分误差价值函数抑制转矩和磁链误差的振荡变化。将多目标 PID 型代价函数转换为单目标 PID 型代价函数以求取电压矢量集合。采用电流型代价函数作为评价最优电压矢量的最终依据,从而消除权重系数。仿真结果表明,采用基于 PID 型无权重代价函数的 MPTC 策略,能够抑制转矩脉动和磁链脉动,降低系统对模型参数的依赖性,增强系统

对不同工况的适用性,同时保留 MPTC 动态响应快的优点。

参考文献

- [1] 周华伟, 陈斌, 赵宇恒, 等. 基于自然容错开关表的五相永磁同步电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1618-1629.
ZHOU H W, CHEN C, ZHAO Y H, et al. Natural fault-tolerant switching-table-based DTC for five-phase PMSM [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1618-1629.
- [2] 张乃峰, 郭凯凯, 刘晨, 等. 基于新型趋近律的三相永磁同步电机滑模控制研究[J/OL]. 重庆工商大学学报(自然科学版): 2024-05-24. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1155.N.20240226.1207.010.html>.
ZHANG N F, GUO K K, LIU C, et al. Research on sliding mode control of three-phase permanent magnet synchronous motor based on new reaching law [J/OL]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition): 2024-05-24. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1155.N.20240226.1207.010.html>.
- [3] LI C, GUO K K, LIU C, et al. High-precision spiral motion control of linear rotary motor with E-shaped stator [C]//Proceedings of 2023 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices, Tianjin, 2023.
- [4] 张平化, 范慧妍, 王爽. 一种改进的双三相永磁同步电机无价值函数模型预测转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(5): 30-38.
ZHANG P H, FAN H Y, WANG S. An improved model predictive torque control for DTP-PMSM without cost function [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(5): 30-38.
- [5] 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 B, ZHOU Y Z, ZHONG T Y. 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.
- [6] 赵凯辉, 戴旺珂, 周瑞睿, 等. 基于扩展滑模扰动观测器的永磁同步电机新型无模型滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(6): 2375-2386.
ZHAO K H, DAI W K, ZHOU R R, et al. Novel model-free sliding mode control of permanent magnet synchronous motor based on extended sliding mode disturbance observer [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2375-2386.
- [7] 陈琰, 刘军. 基于扰动观测的 PMSM 非奇异快速终端滑模电流预测控制[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(4): 32-37+44.
CHEN Y, LIU J. Nonsingular fast terminal sliding mode current predictive control of PMSM based on disturbance observation [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(4): 32-37+44.
- [8] 张彦平, 尹忠刚, 苏明, 等. 基于共振扩张状态观测器的内置式永磁同步电机统一全速域无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22): 6070-6081.
ZHANG Y P, YIN Z G, SU M, et al. Unified full speed sensorless control of interior permanent magnet synchronous motor based on resonance extended state observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(22): 6070-6081.
- [9] 张超硕, 储剑波. 基于增量模型的 PMSM 鲁棒性模型预测控制算法研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(7): 21-32.
ZHANG C S, CHU J B. Research on robust model predictive control method of PMSM based on incremental model [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(7): 21-32.
- [10] 马钦林, 袁浩, 尹威, 等. 考虑等效电磁损耗电阻偏移的永磁同步电机直流信号注入在线参数辨识方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(22): 6015-6026.
MA Y L, YUAN H, YIN W, et al. DC-signal-injection-based online parameters identification for permanent magnet synchronous machine considering variation of equivalent electromagnetic loss resistance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(22): 6015-6026.
- [11] LI X Y, KENNEL R. General formulation of Kalman-filter based online parameter identification methods for VSI-fed PMSM [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 68(4): 2856-2864.
- [12] 李婕, 杨淑英, 谢震, 等. 基于有效信息迭代快速粒子群优化算法的永磁同步电机参数在线辨识[J]. 电工技术学报, 2022, 37(18): 4604-4613.
LI J, YANG S Y, XIE Z, et al. On-line parameter

- identification of permanent magnet synchronous motor based on effective information iterative fast particle swarm optimization algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37 (18): 4604-4613.
- [13] CHEN Z Y, QIU J Q, JIN M J. Adaptive finite-control-set model predictive current control for IPMSM drives with inductance variation [J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11 (5): 874-884.
- [14] 吴春, 赵宇伟, 孙明轩. 采用测量电压的永磁同步电机多参数在线辨识[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(13): 4329-4340.
- WU C, ZHAO Y W, SUN M X. Multiparameter online identification for permanent magnet synchronous machines using voltage measurements [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40 (13): 4329-4340.
- [15] QIU T F, WEN X H, ZHAO F. Adaptive-linear-neuron-based dead-time effects compensation scheme for PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 31(3): 2530-2538.
- [16] 李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 等. 表面式永磁同步电机有限集模型预测转矩控制成本函数研究[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9): 12-18.
- LI Y H, QIN H, SU J S, et al. Cost function of finite control set model predictive torque control of surface permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(9): 12-18.
- [17] 李家祥, 汪凤翔, 柯栋梁, 等. 基于粒子群算法的永磁同步电机模型预测控制权重系数设计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(1): 50-59+76.
- LI J X, WANG F X, KE D L, et al. Weighting factors design of model predictive control for permanent magnet synchronous machine using particle swarm optimization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(1): 50-59+76.
- [18] 梅杨, 易高. 间接矩阵变换器-异步电机调速系统模型预测控制权重系数自整定方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(18): 3938-3948.
- MEI Y, YI G. A weighting factor self-tuning method in model prediction control for indirect matrix converter with induction motor system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(18): 3938-3948.
- [19] MEESALA R E K, KUNISSETTI V P K, THIPPIRIPATI V K. Enhanced predictive torque control for open end winding induction motor drive without weighting factor assignment [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34 (1): 503-513.
- [20] 张晓光, 张亮, 侯本帅. 永磁同步电机优化模型预测转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 (16): 4800-4809+4905.
- ZHANG X G, ZHANG L, HOU B S. Predictive torque control of PMSM optimization model [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37 (16): 4800-4809+4905.
- [21] 夏长亮, 张天一, 周湛清, 等. 结合开关表的三电平逆变器永磁同步电机模型预测转矩控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 83-92+110.
- XIA C L, ZHANG T Y, ZHOU Z Q, et al. Model predictive torque control with switching table for neutral point clamped three-level inverter-fed permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 83-92+110.

收稿日期:2024-05-28

收到修改稿日期:2024-09-04

作者简介:

丁志强(1997-),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机模型预测控制,1135271637@qq.com;

*通信作者:郭凯凯(1987-),男,博士,副教授,研究方向为永磁电机结构设计及其控制系统,guokai0072000@gmail.com。

Model Predictive Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Unweighted Factor PID Cost Function

DING Zhiqiang, GUO Kaikai^{*}, GAO Xiong, ZHAO Jintao

(School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology,
Huainan 232001, China)

Key words: model predictive torque control; cost function; weight coefficient; robustness; permanent magnet synchronous motor

Since model predictive torque control (MPTC) heavily depends on motor parameters, system robustness is poor when parameters are mismatched. Additionally, the proportional integral derivative (PID) cost function is challenging to adapt to various operating conditions due to the presence of weight coefficients. To address these issues, this paper proposes an MPTC algorithm for permanent magnet synchronous motors (PMSMs) based on an unweighted factor PID cost function.

An MPTC model for PMSM was established, and a two-step prediction method was used to compensate for system delay, yielding the delay-compensated predictive torque and flux linkage. An integral error value function was constructed by taking the predicted torque and flux linkage errors as input data, eliminating static errors through the integration component. A differential error value function was also constructed, using the per-cycle unit change in torque and flux linkage as the coefficient of the differential error value function. The differential component calculated the trend of changes in predictive torque and flux linkage errors, suppressing oscillations in these errors. A PID cost function was then formed based on both the integral and differential error value functions.

Due to the different dimensions of torque and flux linkage, the PID cost function still included weight coefficients. To eliminate these coefficients, an unweighted dual-objective cost function parallel strategy was proposed, transforming the multi-objective PID cost function into two single-objective PID cost functions for torque and flux linkage. The delay-compensated predictive torque and flux linkage were substituted into these single-objective PID cost functions, generating a set of voltage vectors for the PID torque and flux linkage cost functions. This set of voltage vectors was then input into the current-type cost function, with the voltage vector that minimized the current-type cost function serving as the optimal value, thus removing the weight coefficients.

Simulations were conducted in Matlab/Simulink to compare the proposed unweighted factor PID cost function-based MPTC with the conventional cost function-based MPTC. The results show that the proposed unweighted factor PID cost function-based MPTC can suppress torque and flux ripple, reduce system dependence on model parameters, and improve adaptability to different operating conditions while retaining the advantage of MPTC's fast dynamic response.