

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2022.01.011

基于参数修正的永磁同步直线电机 改进电流预测控制系统

杜鑫, 张团善, 郑灵瑜

(西安工程大学 陕西省智能纺织装备研究院, 陕西 西安 710048)

摘要:针对永磁同步直线电机(PMLSM)因外部干扰和内部参数变化引起的转速波动,导致电流预测控制系统的控制性能降低问题,课题组提出了一种基于参数调整的改进电流预测控制系统。首先通过2步电流预测控制以及校正因子对预测电流进行优化,改善电流预测控制系统,减少响应时间,保证系统的稳定性;再通过参数调整器来修正预测控制器中电机的参数,减小永磁同步直线电机的速度稳态波动,消除由系统扰动引起的稳态电流和暂态误差。仿真结果表明:在永磁同步直线电机参数不匹配的情况下,所提出的控制方案是有效的。

关键词:永磁同步直线电机;电流预测控制;参数调整器;速度稳态波动;暂态误差

中图分类号:TM359.4;TH39 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2022)01-0064-07

Improved Current Predictive Control System of Permanent Magnet Synchronous Linear Motor Based on Parameter Regulator

DU Xin, ZHANG Tuanshan, ZHENG Lingyu

(Shaanxi Intelligent Textile Equipment Research Institute, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: In view of the problem that the speed fluctuation of permanent magnet synchronous linear motor (PMLSM) caused by external disturbance and internal parameter change leads to the decreasing control performance of current predictive control system, an improved current predictive control system based on parameter adjustment was proposed. Firstly, the predictive current was optimized by two-step current predictive control and correction factors to improve the current predictive control system, reduce the response time and ensure the stability of the system. Then the parameters of the motor in the prediction controller were corrected by the parameter regulator to reduce the steady state velocity fluctuation of the permanent magnet synchronous linear motor and eliminate the steady state current and transient error caused by system disturbance. The simulation results show that the proposed control scheme is effective when the parameters of permanent magnet synchronous linear motor do not match.

Keywords: PMLSM (Permanent Magnet Synchronous Linear Motor); current predictive control; parameter regulator; steady state velocity fluctuation; transient error

永磁同步直线电机(permanent magnet synchronous linear motor, PMLSM)相对于传统的旋转电机,减少了中间的传动机构,因此直线电机具有快速响应、高加速和高控制精度的优势。模型预测控制(MPC)因其原理简单、瞬态响应快、处理非线性约束和多变量控制的灵活性而受到越来越多的关注^[1-2]。

高精度的永磁同步直线电机的控制系统主要包括位置环、速度环和电流环。电流环是整个控制系统的核心部分,因此电流环对动态性能有更高的要求。电流预测控制(Predictive Current Control, PCC)可以保证零静态电流误差和高动态响应,因为控制器中的参数与真实的被控对象完全一致^[3-4]。但是,在实际应用中,电机参

收稿日期:2021-06-30;修回日期:2021-10-20

基金项目:国家自然科学基金(61701384);西安市现代智能纺织装备重点实验室基金项目(2019220614SYS021CG043)。

第一作者简介:杜鑫(1996),男,山西吕梁人,硕士研究生,主要研究方向为电机控制。E-mail:1287648121@qq.com

数在不同的工作情况下会发生变化。例如,定子和转子电阻会随着温度变化而变化。当电流预测控制器中设置的电机参数与其实际值不一致时,会使计算出的电压矢量不是最优的,降低了整体控制性能。为了解决这些问题,现有文献研究了几种提高鲁棒性的方法,包括自适应干扰观测器^[5-6]、扩展状态观测器(ESO)^[7-8]和无模型控制(MFC)^[9-10]。基于现代控制理论,可在很大程度上保持PCC的优越性能,并明显提高鲁棒性。

针对参数不匹配问题,课题组提出一种新的改进电流预测控制算法,并结合参数修正器,建立一种降低速度稳态波动,消除由系统扰动引起的稳态电流和暂态误差的PMLSM的双闭环控制系统模型,并对该模型进行仿真,取得良好的控制效果。

1 永磁直线同步电机数学模型

永磁直线同步电机是由永磁体产生的磁场和三相对称绕组生成的行波磁场的相互作用力推动次级动子进行直线运行,故该系统是多变量非线性的。考虑由参数变化和未建模动态引起的干扰,PMLSM的电压平衡方程在 d - q 轴同步旋转坐标系中表示为:

$$\left. \begin{aligned} u_q &= Ri_q + L_s \frac{di_q}{dt} + (L_s i_d + \Psi_f) \frac{\pi}{\tau} v + d_q(k); \\ u_d &= Ri_d + L_s \frac{di_d}{dt} - \frac{\pi}{\tau} v L_s i_q + d_d(k)。 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\Delta R = R - R_0$, $\Delta L_s = L_s - L_{s0}$, $\Delta \Psi_f = \Psi_f - \Psi_{f0}$, ε_d 和 ε_q 为系统未建模动态引起的干扰, R_0 为电机的实际电阻, L_{s0} 为电机的实际电感, Ψ_{f0} 为永磁体实际磁链, $\omega_e(k)$ 为第 k 个周期时电机的电角速度。

在传统的电流预测控制器下,只有控制器的参数和电机实际参数一致时,才能保证高动态响应和零静态电流误差。在电机参数与控制器参数不一致的情况下,为提高系统的鲁棒性,需要准确得出 q 轴和 d 轴的扰动量 $D(k)$ 。

2 电流预测控制及改进

2.1 带延迟的预测控制

在自然坐标系下的三相电流 $i_a(k)$, $i_b(k)$ 和 $i_c(k)$

式中: R 为定子电阻; τ 为直线电机极距; Ψ_f 为永磁体磁链; u_q, u_d 分别为 d 轴和 q 轴的电压分量; i_q, i_d 分别为 q 轴和 d 轴的电流分量; L_s 为 q 轴和 d 轴的电感分量; $d_q(k)$ 和 $d_d(k)$ 为因参数不匹配和未建模动态引起的扰动电压。

根据式(1) d 和 q 轴电压方程,可得出离散化的电流模型:

$$\mathbf{I}(k+1) = \mathbf{G} \cdot \mathbf{I}(k) + \mathbf{H} \cdot (\mathbf{V}(k) - \boldsymbol{\lambda}(k) - \mathbf{D}(k))。 \quad (2)$$

$$\text{其中: } \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_s R}{L_s} & -\omega_e(k) T_s \\ \omega_e(k) T_s & 1 - \frac{T_s R}{L_s} \end{bmatrix}; \mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{T_s}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{T_s}{L_s} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{V}(k) = [u_q(k) \quad u_d(k)]^T; \mathbf{I}(K) = [i_q(k) \quad i_d(k)]^T; \mathbf{I}(K+1) = [i_q(k+1) \quad i_d(k+1)]^T; \boldsymbol{\lambda}(k) = [\omega_e(k) \Psi_f \quad 0]^T; \mathbf{D}(k) = [d_q(k) \quad d_d(k)]^T。$$

式中: T_s 为采样时间; k 为离散采样时间; $i_q(k+1)$, $i_d(k+1)$ 分别为第 $k+1$ 个周期 q 轴和 d 轴的电流分量。

电机在运行过程中参数会发生改变(如温度变化导致电阻、电感等参数改变),由式(2)可知 q 轴和 d 轴的电压总扰动分别为:

$$\left. \begin{aligned} d_q(k) &= \Delta R i_q(k) + \frac{\Delta T_s}{T_s} (i_q(k+1) - i_q(k)) + \omega_e(k) \Delta L_s i_d(k) + \omega_e(k) \Delta \Psi_f + \varepsilon_d; \\ d_d(k) &= \Delta R i_d(k) + \frac{\Delta T_s}{T_s} (i_d(k+1) - i_d(k)) - \omega_e(k) \Delta L_s i_q(k) + \varepsilon_q。 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

通过 Clark 变换为 α - β 轴静止坐标系中的电流 $i_\alpha(k)$ 和 $i_\beta(k)$, 然后通过 Park 变换为 d - q 轴同步旋转坐标系下的电流。传统电流预测控制原理是根据电流参考指令 $\mathbf{I}^*(k+1)$ 和采样电流 $\mathbf{I}(k)$, 根据式(2)所示的离散化电压模型,可以得到第 k 采样周期的电压参考指令 $\mathbf{V}^*(k)$ 。

$$\mathbf{V}^*(k) = \mathbf{H}^{-1} \cdot [\mathbf{I}^*(k+1) - \mathbf{G} \cdot \mathbf{I}(k)] + \boldsymbol{\lambda}(k)。 \quad (4)$$

理论上若将电压参考指令 $\mathbf{V}^*(k)$ 施加在电机上,经过 1 个采样周期后,电机的采样电流 $\mathbf{I}(k+1)$ 可以跟踪上参考电流 $\mathbf{I}^*(k+1)$ 。因电流采样以及控制算法执行会造成控制延迟,导致计算的指令电压不能得

到即时更新,采样电流 $\mathbf{I}(k+2)$ 在第 $(k+1)$ 个周期结束时才能跟踪上参考电流 $\mathbf{I}^*(k+1)$,从而使 q 轴和 d 轴电流产生较大的误差。此时电流预测控制的工作原理如图 1 所示。

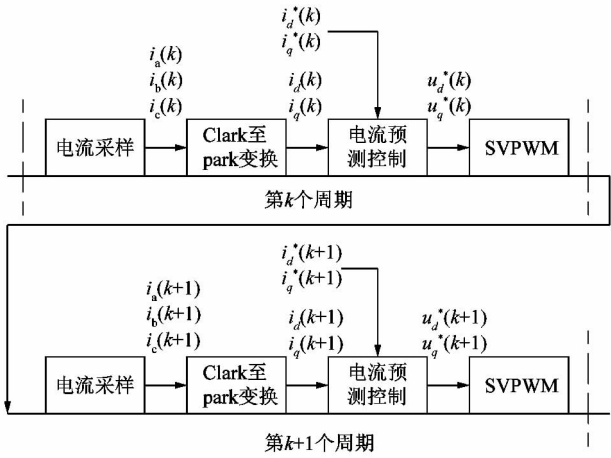


图 1 传统电流预测控的工作原理

Figure 1 Working principle of traditional current predictive control

为了消除延时的问题,课题组采用 2 步电流预测控制,第 $k+1$ 个周期的指令电压为:

$$\mathbf{V}^*(k+1) = \mathbf{H}^{-1} \cdot [\mathbf{I}^*(k+2) - \mathbf{G} \cdot \mathbf{I}(k+1)] + \boldsymbol{\lambda}(k+1). \quad (5)$$

式中 $\mathbf{I}(k+1)$ 为第 $k+1$ 个周期的采样电流,现用第 $k+1$ 个周期的估计电流 $\mathbf{I}^p(k+1)$ 来代替采样电流 $\mathbf{I}(k+1)$,由式(4)可得:

$$\mathbf{I}^p(k+1) = \mathbf{G} \cdot \mathbf{I}(k) + \mathbf{H} \cdot (\mathbf{V}(k) - \boldsymbol{\lambda}(k)). \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)可得出 2 步预测控制的指令电压方程:

$$\mathbf{V}^*(k+1) = \mathbf{H}^{-1} \cdot (\mathbf{I}^*(k+2) - \mathbf{G} \cdot \mathbf{G} \cdot \mathbf{I}(k) - \mathbf{G} \cdot \mathbf{H} \cdot (\mathbf{V}(k) - \boldsymbol{\lambda}(k))) + \boldsymbol{\lambda}(k+1). \quad (7)$$

如果直接采用第 $k+1$ 个周期的估计电流 $\mathbf{I}^p(k+1)$ 来代替实际电流 $\mathbf{I}(k+1)$,会产生较大的电流预测误差,增大电机速度的稳态误差。因此采用一种改进的电流预测控制算法,通过参考电流 $\mathbf{I}^*(k)$ 和采样电流 $\mathbf{I}(k)$ 的误差,以及参考电流 $\mathbf{I}^*(k+1)$ 和预测电流 $\mathbf{I}^p(k+1)$ 的误差的平方根来优化预测电流 $\mathbf{I}^{p1}(k+1)$ 。

$$\mathbf{I}^{p1}(k+1) = \mathbf{I}^p(k+1) - \exp\left(\frac{\Delta \mathbf{I}_e(k+1) + \Delta \mathbf{I}_e(k)}{2\Delta \mathbf{I}_{e1}}\right) \cdot \Delta \mathbf{I}_e(k). \quad (8)$$

其中: $\Delta \mathbf{I}_e(k) = \mathbf{I}^*(k) - \mathbf{I}(k)$, $\Delta \mathbf{I}_e(k+1) = \mathbf{I}^*(k+1) - \mathbf{I}^p(k+1)$, $\Delta \mathbf{I}_{e1} = \sqrt{\Delta \mathbf{I}_e(k)^2 + \Delta \mathbf{I}_e(k+1)^2}$ 。

修正后的第 $k+1$ 个周期的指令电压为:

$$\mathbf{V}^*(k+1) = \mathbf{H}^{-1} \cdot [\mathbf{I}^*(k+2) - \mathbf{G} \cdot (\mathbf{I}^p(k+1) - \exp\left(\frac{\Delta \mathbf{I}_e(k+1) + \Delta \mathbf{I}_e(k)}{2\Delta \mathbf{I}_{e1}}\right) \cdot \Delta \mathbf{I}_e(k))] + \boldsymbol{\lambda}(k+1). \quad (9)$$

这种方法可以有效地提高实际电流与指令电流的动态跟踪,提高系统的鲁棒性。

2.2 参数变化对控制器的影响

传统的电流预测控制器对电机的参数变化非常敏感。当电机长时间处于工作状态,其内部出现温度升高及磁路饱和等现象,使电机参数发生变化(如电阻阻值增大,导致电机性能降低)。为保证电流预测控制器的良好性能,引入参数修正器以提高系统的鲁棒性。

在理想状态下, $\mathbf{V}^*(k) = \mathbf{V}(k+1)$,从式(3)可知,当温度改变时导致 $R \neq R_0$,则:

$$\left. \begin{aligned} d_q(k) &= \Delta R \cdot i_q(k); \\ d_d(k) &= \Delta R \cdot i_d(k). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

当 $\mathbf{I}(k) > 0$ 时,若预测控制器参数 R 大于直线电机实际参数 R_0 ,扰动电压误差为正,即实际电压 $\mathbf{V}$ 小于参考电压 $\mathbf{V}^*$;若预测控制器参数 R 小于直线电机实际参数 R_0 ,则扰动电压为负,即实际电压 $\mathbf{V}$ 大于参考电压 $\mathbf{V}^*$ 。当 $\mathbf{I}(k) < 0$ 时,扰动电压误差与参数误差的关系是反向的,如表 1 所示。

表 1 参数 R 误差和扰动误差

Table 1 Parameter R error and disturbance error

电阻变化	d_q		d_d	
	$i_q(k) > 0$	$i_q(k) < 0$	$i_d(k) > 0$	$i_d(k) < 0$
$R > R_0$	>0	<0	>0	<0
$R < R_0$	<0	>0	<0	>0

当磁路饱和时,导致电感 $L_s \neq L_{s0}$ 时,由式(2)~(3)可得:

$$\left. \begin{aligned} d_q(k) &= g_q(k) \Delta L_s; \\ d_d(k) &= g_d(k) \Delta L_s. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中: $g_q(k) = \frac{i_q(k+1) - i_q(k)}{T_s} + w_e i_d(k)$, $g_d(k) =$

$$\frac{i_d(k+1) - i_d(k)}{T_s} - w_e i_q(k), g(k) = \begin{bmatrix} g_d(k) \\ g_q(k) \end{bmatrix}。$$

当 $g(k) > 0$ 时,若预测控制器参数 L_s 大于实际参数 L_{s0} ,扰动误差为正,即实际电压 V 小于参考电压 V^* ;若预测控制器参数 L_s 小于实际参数 L_{s0} ,则扰动误差为负,即实际电压 V 大于参考电压 V^* 。当 $g(k) < 0$ 时,扰动电压误差与参数 L_s 误差的关系是反向的,如表 2 所示。

表 2 参数 L_s 误差和扰动误差

Table 1 Parameter L_s error and disturbance error

电感变化	d_q		d_d	
	$g_q(k) > 0$	$g_q(k) < 0$	$g_d(k) > 0$	$g_d(k) < 0$
$L_s > L_{s0}$	> 0	< 0	> 0	< 0
$L_s < L_{s0}$	< 0	> 0	< 0	> 0

2.3 参数修正器

电流预测控制器参数 R 和 L_s 的误差会导致通过预测电流求取的指令电压产生误差 $D(k)$,严重影响了系统的性能,故通过参数调整器来调整预测控制器电阻和电感的方法,来提高系统鲁棒性。如图 2 所示, v^* 为电机的指定速度, v 为电机的实际速度,当速度误差减小到 0.003 m/s 时,参数控制器将开启,在线调整电阻和电感的大小。在本研究中,通过上一时刻的采样电流求得指令电压 $V^*(k)$ 和实际电压 $V(k)$ 的电压误差,根据式(9)~(10)算出相对应的参数误差后,可修正电流预测控制器中电阻和电感的参数,从而求出准确的电流预测值。

$$\begin{bmatrix} \frac{i_q^{pl}(k+1) - i_q(k)}{T_s} + w_e \cdot i_d(k) & i_q(k) \\ \frac{i_d^{pl}(k+1) - i_d(k)}{T_s} - w_e \cdot i_q(k) & i_d(k) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta L \\ \Delta R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_q \\ d_d \end{bmatrix}。 \quad (12)$$

由式(10)可知:

$$\left. \begin{aligned} L_{ss} &= L_s + \Delta L; \\ R_{ss} &= R_s + \Delta R。 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中 L_{ss} 和 R_{ss} 分别是电流预测控制器修正之后的电感和电阻。

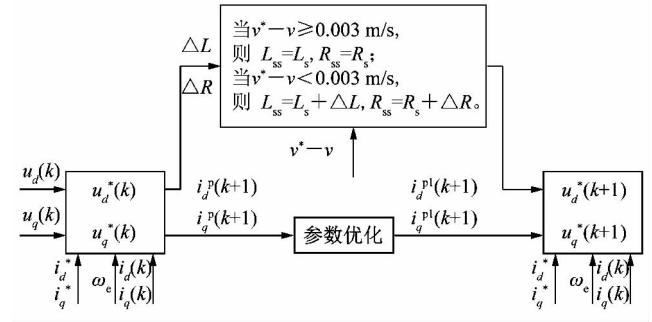


图 2 电流预测控制器

Figure 2 Current prediction controller

3 系统模拟仿真分析

通过 MATLAB 对 PMLSM 进行电流预测控制仿真,永磁同步直线电机的参数为:电感 $L_{s0} = 0.0347$ H, 定子电阻为 $R = 2.6 \Omega$, 永磁体磁链为 $\Psi_f = 0.16$ Wb, 极距 $\tau = 20$ mm。采样时间为 $T_s = 1 \times 10^{-6}$ s。PMLSM 的优化电流预测控制系统如图 3 所示,速度环采用 PI 控制器,电流环采用优化的电流预测控制系统, F 为电机的输出转矩。通过仿真软件搭建传统的电流预测控制和改进的电流预测控制仿真模型,比较调速和变负载的情况下电机速度波形和 q 轴电流波动。

3.1 速度不变情况下改变负载

图 4 所示为在空载状态下,给定值速度为 $v^* = 1.000$ m/s 时,传统电流预测控制算法和本研究提出的改进电流预测控制算法下的突变负载的动态性能变化。在相同的电机参数情况下,初始启动时,传统电流预测控制下速度超调量为 0.143 m/s,改进的电流预测控制速度超调量为 0.106 m/s;在 0.3 s 时,负载突变为 80 N,传统的电流预测控制速度降低到 0.943 m/s,而改进的预测控制速度降低到 0.952 m/s。由图 4 可知,在运行过程中突加负载,改进电流预测控制与传统电流预测控制相比,速度超调量更小。

3.2 电机参数变化鲁棒性验证

为验证课题组所提出的参数修正方法在电机参数失配情况下的性能,选定电阻 R_0 和电感 L_{s0} 作为测量对象。电流预测控制器的定子 R 分别设置为 PMLSM 参数的 50% 和 140%;电感 L_{s0} 分别设置为 PMLSM 参数的 60% 和 240%。

图 5 为预测控制器中的电阻 R 为 $0.5R_0$ 时,在负

载突变的情况下,传统电流预测控制方法和带有参数修正的改进电流预测控制对应的 q 轴实际变化值。传统电流预测控制对参数不匹配较为敏感,在参数不匹配的情况下, q 轴电流的波动约为 ± 0.035 A;而改进的电流预测控制可以减小 q 轴的电流波动,电流波动约为 ± 0.010 A。

图6为预测控制器中的电阻 R 为 $1.4R_0$ 时,传统电流预测控制方法和带有参数修正的改进电流预测控制方法对应的 q 轴实际变化值。由图6可知,在不同负载下,传统的电流预测控制 q 轴的电流波动幅值为 ± 0.028 A;而改进的电流预测控制方法 q 轴电流波动幅值为 ± 0.010 A。

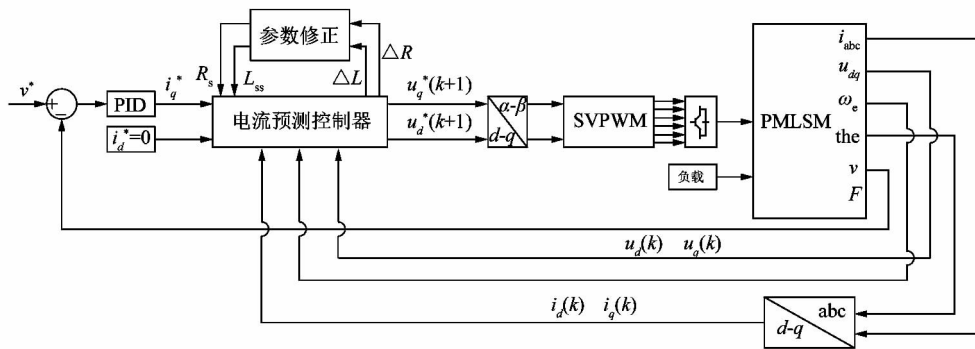


图3 采用参数修正的电流预测控制系统

Figure 3 Predictive current control system with parameter correction

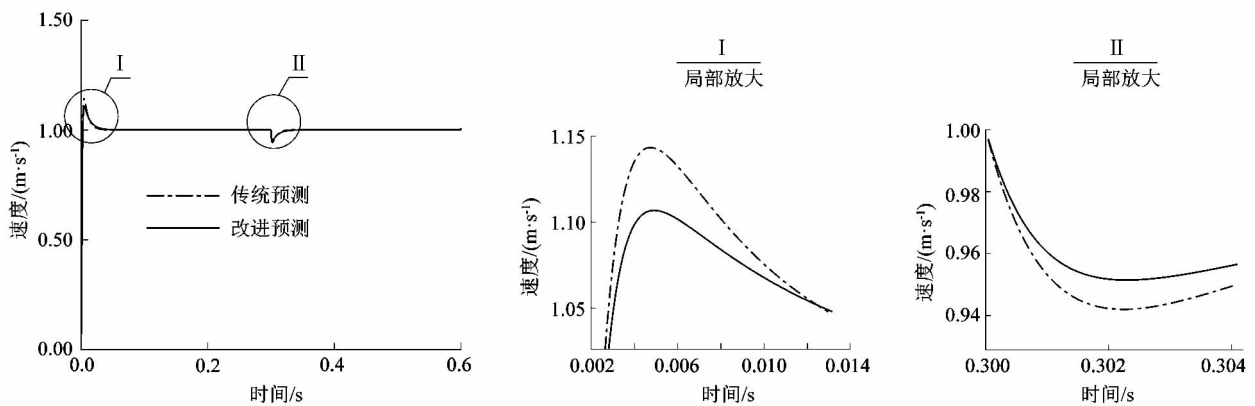


图4 传统预测和改进预测速度仿真对比图

Figure 4 Comparison of traditional prediction and improved prediction speed simulation

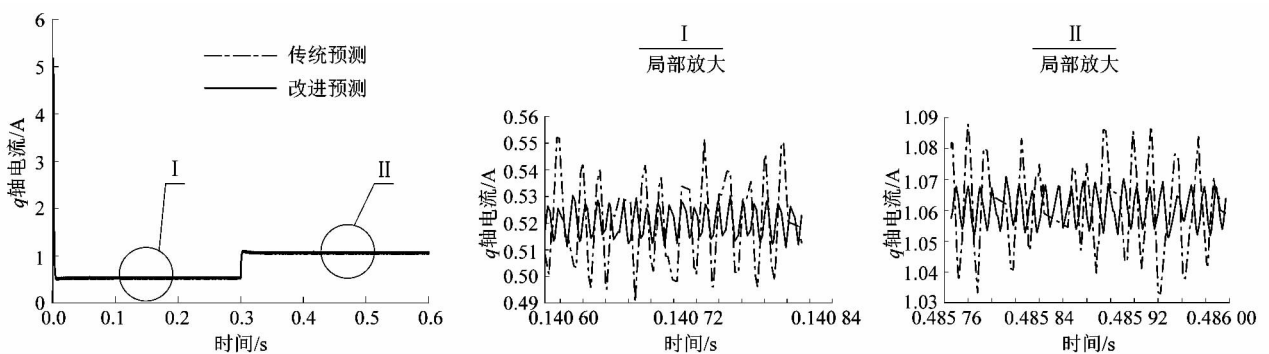


图5 $R = 0.5R_0$ 时 q 轴电流仿真对比

Figure 5 Comparison of q -axis current simulation when $R = 0.5R_0$

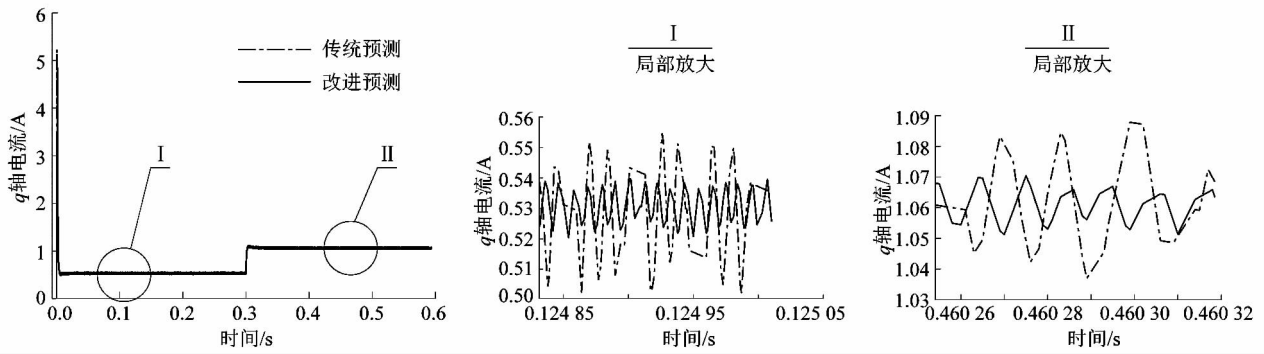
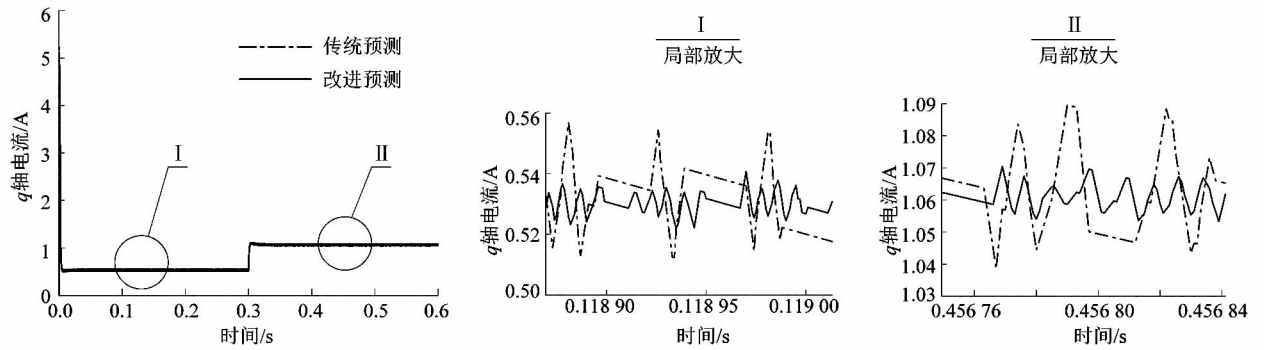
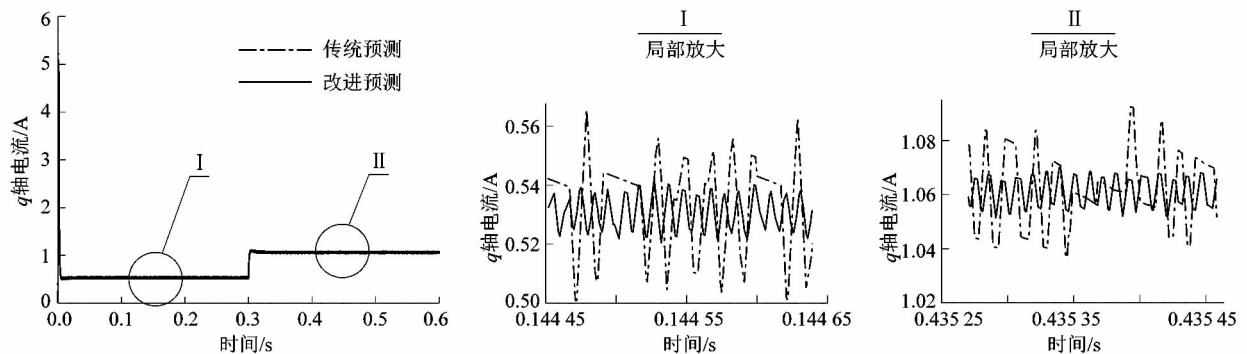
图6 $R = 1.4R_0$ 时 q 轴电流仿真对比Figure 6 Comparison of q -axis current simulation when $R = 1.4R_0$

图7为预测控制器中的电感 L_s 为 $0.6L_{s0}$ 时,传统电流预测控制方法和带有参数修正的改进电流预测控制对应的 q 轴实际变化值。由图7可知,在不同负载下,传统的电流预测控制 q 轴的电流波动幅值为 ± 0.022 A;而改进的电流预测控制方法 q 轴电流波动幅值为 ± 0.009 A。

图8为预测控制器中的电感 L_s 为 $2.4L_{s0}$ 时,传统电流预测控制方法和带有参数修正的改进电流预测控制对应的 q 轴实际变化值。由图8可知,在不同负载下,传统的电流预测控制 q 轴的电流波动幅值为 ± 0.026 A;而改进的电流预测控制方法 q 轴电流波动幅值为 ± 0.010 A。

图7 $L_s = 0.6L_{s0}$ 时 q 轴电流仿真对比Figure 7 Comparison of q -axis current simulation when $L_s = 0.6L_{s0}$ 图8 $L_s = 2.4L_{s0}$ 时 q 轴电流仿真对比Figure 8 Comparison of q -axis current simulation when $L_s = 2.4L_{s0}$

上述结果表明:改进的电流预测控制可以有效地减少 q 轴电流波动,对速度稳态误差有良好的控制效果,改善了永磁同步直线电机推力的波动。

4 结语

针对参数失调导致 PMLSM 电流波动增大而对速度控制产生较大影响的问题,课题组采用双闭环控制系统,结合了参数修正的改进预测电流控制策略。该控制策略可以有效地减小电流稳态波动和速度稳态波动,同时解决电流预测控制器与电机参数不匹配的问题。仿真结果可以看出:该控制策略响应快、超调小,速度稳态状态下无震荡,显著提高了对电机性能的控制。该控制系统对于无负载的改善效果不明显,对于参数修正的稳定性有待进一步的提高。

参考文献:

- [1] ZHANG Y C, XIA B, YANG H T, et al. Overview of model predictive control for induction motor drives[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2016, 2(1): 62-76.
- [2] VAZQUEZ S, RODRIGUEZ J, RIVERA M, et al. Model predictive control for power converters and drives: advances and trends[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 935-947.
- [3] 王金兵. 永磁同步直线电机电流预测控制策略研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020: 9-30.
- [4] 白聪. 永磁同步直线电机电流预测控制方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019: 10-42.
- [5] YANG R, WANG M Y, LI L Y, et al. Robust predictive current control with variable-gain adaptive disturbance observer for PMLSM[J]. IEEE Access, 2018, 6: 13158-13169.
- [6] 尹忠刚, 白聪, 杜超, 等. 基于内模干扰观测器的永磁同步直线电机无差拍电流预测控制方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(24): 5741-5750.
- [7] 王立俊. 基于自适应扰动观测器的永磁同步直线电机无差拍预测电流控制研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2019: 8-31.
- [8] 林健, 刘哈, 万其, 等. 基于 ESO 的 PMSLM 无差拍电流预测控制[J]. 微电机, 2019, 52(7): 52-55.
- [9] ZHOU Y N, LI H M, YAO H Y. Model-free control of surface mounted PMSM drive system[C]//2016 IEEE International Conference on Industrial Technology. Taipei: IEEE, 2016: 175-180.
- [10] LIN C K, YU J T, LAI Y S, et al. Improved model-free predictive current control for synchronous reluctance motor drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3942-3953.

QC检测仪器网
WWW.QCTESTER.COM

QC检测仪器网
(www.QCtester.com)
您身边的仪器采购专家

