

基于非线性扩张状态观测器的低参数敏感度 PMSM 无模型控制研究

蔡舒迟*, 张志锋

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

Research on Model-Free Control of PMSM with Low Parameter Sensitivity Based on Nonlinear Extended State Observer

CAI Shuchi*, ZHANG Zhifeng

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: [Objective] To address the issue that the control performance of model predictive current control for permanent magnet synchronous motor (PMSM) deteriorates under the working condition of motor parameter mismatch, this paper proposes a model-free control strategy for PMSM that does not require the use of motor parameters in the design process.

[Method] Based on the ultra-local model of PMSM, a nonlinear extended state observer (NESO) was designed, and its stability was analyzed using Lyapunov theory. A model-free predictive current control system based on the NESO was constructed. Meanwhile, the influence of the current feedback gain in the ultra-local model on the model-free control performance was analyzed, and online identification of the current feedback gain was performed based on the sampled current iteration. The algorithm was simulated and studied using Matlab/Simulink. Firstly, under the working condition where the given current feedback gain coefficient of the system was the nominal value, the model-free control system based on the NESO proposed in this paper was verified. Then, under the working condition where the given current feedback gain parameter of the system was mismatched, a comparative simulation was conducted with the traditional methods. Finally, the online identification method of the current feedback gain parameter based on the sampled current iteration was verified. [Result] Simulation results show that when the current feedback gain parameters are mismatched in the ultra-local model, the output of the NESO is more stable than that of the traditional linear extended state observer. The current loop tracking effect of the PMSM

control system based on the NESO is better, and the harmonic content in the phase current is also reduced. The online parameter identification method based on sampling current iteration can accurately identify the actual current feedback gain parameters, rapidly converge and maintain stability when the mismatch current feedback gain parameters are continuously applied in simulation. [Conclusion] Compared with the traditional control methods, the control strategy of PMSM based on the NESO reduces the sensitivity of the system's design parameters and offers higher control performance under the working condition of motor parameter mismatch.

Key words: permanent magnet synchronous motor; predictive current control; model-free control; nonlinear extended state observer; ultra-local model

摘 要: 【目的】针对永磁同步电机(PMSM)模型预测电流控制在电机参数失配工况下控制性能下降的问题,本文提出了一种在设计过程中无需使用电机参数的 PMSM 无模型控制策略。【方法】基于 PMSM 的超局部模型,设计了非线性扩张状态观测器(NESO),并根据 Lyapunov 理论进行了稳定性分析,构建了基于 NESO 的无模型预测电流控制系统;同时分析了超局部模型中电流反馈增益对无模型控制性能的影响,基于采样电流迭代对电流反馈增益进行了在线辨识。使用 Matlab/Simulink 对算法进行了仿真研究,首先在系统的给定电流反馈增益系数为标称值的工况下,对本文提出的基于 NESO 的无模型控制系统进行了验证;然后在系统给定电流反馈增益参数失配的工况下,与传统方法进行了仿真对比;最后对基于采样电流迭代的电流反馈增益参数在线辨识方法进行了验证。【结果】仿真结果表明,在超局部模型中电流反馈增益参数失配时,NESO 的输出比传统线性扩张状态观测器

基金项目: 国家自然科学基金(61603263)

National Natural Science Foundation of China (61603263)

更稳定,基于 NESO 的 PMSM 控制系统的电流环跟踪效果更好,相电流中的谐波含量也得到了降低。在仿真持续给定系统失配的电流反馈增益参数时,基于采样电流迭代的在线参数辨识方法可以准确识别实际的电流反馈增益参数,快速收敛并保持稳定。【结论】基于 NESO 的 PMSM 控制策略与传统控制方法相比降低了系统的设计参数敏感度,在电机参数不匹配的工况下具有更高的控制性能。

关键词: 永磁同步电机; 预测电流控制; 无模型控制; 非线性扩张状态观测器; 超局部模型

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 凭借其功率密度高、易于控制等优势被广泛应用于工业生产、电动汽车等领域^[1-2]。由于 PMSM 是一个多变量、强耦合以及非线性的系统^[3-4],因此模型预测电流控制 (Model Predictive Current Control, MPCC) 算法凭借其优良的动态性能被广泛应用于电力电子领域^[5-8]。MPCC 算法依赖于对被控对象建模的准确性,在实际运行中绕组电阻、电感和转子磁链等电机参数的变化会影响电流环模型精确度^[9-10],以及在部分电机驱动场合中,被控电机参数由于不便测量而未知^[11]。这些工况都会使得 MPCC 因参数失配导致性能下降^[12-13]。无模型预测电流控制 (Model-Free Predictive Current Control, MFPPCC) 算法由于在控制器的设计过程中无需电机参数,从本质上消除先验模型对电机参数的依赖成为了参数失配工况下的研究热点^[14]。

MFPPCC 通过对输入输出数据采样,在线设计训练数据驱动模型^[15-19],根据由数据驱动模型训练的特定结构的不同,当前的研究热点分别基于电流差检测技术、自回归外部输入 (Auto-Regressive with eXogenous input, ARX) 模型结构和超局部模型结构。

文献[20]设计了一种基于电流差检测的无模型控制策略,需要在一个周期内进行两次电流采样,对控制系统硬件要求较高。ARX 模型是一种线性离散时间动态系统模型,广泛应用于无模型控制领域^[21-22]。此种结构的自回归 (AR) 部分和外部输入 (X) 部分的系数需要使用优化算法,如最小二乘法、梯度下降等进行在线辨识^[23-24],

因此在较短周期内完成结构系数的辨识需要处理器拥有较强的算力。

Michel Fliess 在 2009 年最先提出了无模型控制^[25],其基本思想是:对于系统而言,仅需要系统的输入和输出数据就可建立超局部模型,完成对系统的实时控制。由于超局部模型本身结构简单,可以快速对被控对象进行建模,因此该方向研究的难点集中在如何求解超局部模型中的未建模和未知干扰部分(后文中用 F 表示)。文献[26]用当前预测周期的电流和电流调节器选择的最优电压矢量利用微分代数方法在线估计 F 值。文献[14]首次采用了观测器计算 F 值的方法,相比于微分代数法,观测器的收敛速度更快且求解过程更简单,文中设计了线性扩张状态观测器 (Linear Extended State Observer, LESO),设计观测器观测 F 值实现无模型控制成为研究热点。LESO 的设计简单,观测过程中计算量小,然而其设计参数与控制系统的带宽强相关,在应用于无模型控制系统中,由于超局部模型中 F 值的不确定性会影响 LESO 的稳定性。

为了增强无模型控制系统中观测器的稳定性和超局部模型的参数鲁棒性,本文首先设计了非线性扩张状态观测器 (Nonlinear Extended State Observer, NESO) 观测 F 值实现无模型控制,并根据 Lyapunov 理论进行了稳定性分析,实现了更好的观测性能。随后讨论了超局部模型中设计参数对观测器输出的影响,基于采样电流迭代在线识别了设计参数,实时更新 NESO 结构参数,进一步提高了基于 NESO 的设计参数敏感性。最后,通过对比仿真验证了基于 NESO 的 PMSM 无模型控制系统实现了更低的设计参数敏感度和更高的控制性能。

1 PMSM 的超局部模型

超局部模型控制的原理是局部建模,并从输入知识和输出性能两方面对其进行实时更新。一般来说,线性或非线性系统可以用未知微分方程来表示:

$$H\left(y, \frac{dy}{dt}, \frac{d^2y}{dt^2}, \dots, u, \frac{du}{dt}, \frac{d^2u}{dt^2}, \dots, \theta\right) = 0 \quad (1)$$

式中: u 为系统的输入; y 为系统的输出; H 为系统参数的充分光滑函数; θ 为系统的参数集合。

用超局部模型来表示纯数字模型的单输入单输出系统为

$$y^v = F + \alpha u \quad (2)$$

式中: $v \geq 1$, v 为系统的导数阶; α 为一个非物理常数参数, 目的是使 y^v 和 u 具有相同的阶数, 通常由设计者决定适当的比例因子; F 为超局部模型特有的参数, 包括系统的所有结构参数、系统不确定部分、系统扰动及其各阶导数。

对于 PMSM 控制系统, 无模型控制方法采用一阶超局部模型进行设计, 即 $v=1$, 即可实现较好的系统建模精度。单输入单输出系统的一阶超局部模型如式(3)所示:

$$\frac{dY(t)}{dt} = F(t) + \alpha U(t) \quad (3)$$

相比于 PMSM 的传统数学模型, 超局部模型结构会根据设计者目标是电流调节器还是转速调节器的不同对应变化, 无需像传统建模过程中进行方程中某些项的近似省略, 因此提升了建模精度, 进而影响控制性能。本文设计无模型电流控制器, 控制器输出为期望定子电压, 输入为采集反馈的定子电流, 则在同步旋转坐标系下, 用复向量表示 PMSM 的超局部模型为

$$\frac{di_s}{dt} = F + \alpha u_s \quad (4)$$

式中: i_s 为定子电流; u_s 为定子电压。

定子电流方程的标准状态空间:

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{1}{L_s}(u_s - R_s i_s - j\omega\psi_r) \quad (5)$$

式中: L_s 为定子电感; ψ_r 为转子磁链; ω 为电机角速度; R_s 为定子电阻。

结合推导可得超局部模型中 F 值为

$$F = \frac{-R_s i_s - j\omega\psi_r}{L_s} \quad (6)$$

PMSM 同步旋转坐标系下, d 、 q 轴 F 值分别为

$$\begin{cases} F_q = -\frac{R_s}{L_s} i_q - \frac{1}{L_s}(L_s \omega i_d + \omega\psi_f) \\ F_d = -\frac{R_s}{L_s} i_d + \omega i_q \end{cases} \quad (7)$$

式中: i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流; ψ_f 为永磁体磁链。

结合式(4)和式(7)可求电流反馈增益, 即超局部模型中非物理常量参数为

$$\alpha = \frac{1}{L_s} \quad (8)$$

2 基于 NESO 的无模型控制策略

2.1 NESO 的设计

基于 LESO 求解 PMSM 超局部模型时, 由于没有关于被控对象的初始状态参数, 观测值与真实状态的较大差异会导致观测器初期的响应较为剧烈, 在无模型电流预测过程中表现为超局部模型中 F 值的观测曲线在第一个尖峰处出现超调。而 NESO 由于将系统状态变量的反馈增益替换为非线性 fal 函数, 既实现了近似滤波的效果, 又没有滤波器对于系统时延的影响。

$$fal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sign}(e), & |e| > \delta \\ \frac{e}{\delta^{1-\alpha}}, & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (9)$$

以 i_s 和 F 为状态变量, 以电流误差为反馈的 NESO 可构造为

$$\begin{cases} e_{rr} = z_1 - i_s \\ \dot{z}_1 = z_2 + \alpha u_s - \beta_1 e_{rr} \\ \dot{z}_2 = -\beta_2 fal(e_{rr}, \alpha, \delta) \end{cases} \quad (10)$$

式中: e_{rr} 为系统误差; z_1 为定子电流的观测值; z_2 为超局部模型中 F 的观测值; β_1 和 $fal(\beta_2, \alpha, \delta)$ 为误差反馈增益; $\dot{z}_1$ 、 $\dot{z}_2$ 分别为 z_1 、 z_2 的一阶导数。

采样欧拉法对式(10)进行一阶离散后可得:

$$\begin{cases} e_{rr}(k) = \hat{i}_s(k) - i_s(k) \\ \hat{i}_s(k+1) = \hat{i}_s(k) - T_s \beta_1 e_{rr}(k) + T_s [\hat{F}(k) + \alpha u_s(k)] \\ \hat{F}(k+1) = \hat{F}(k) - T_s fal(\beta_2, \alpha, \delta) e_{rr}(k) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $e_{rr}(k)$ 为第 k 周期的系统误差; $\hat{i}_s(k)$ 、 $i_s(k)$ 分别为当前时刻定子电流观测值、实际值; $\hat{i}_s(k+1)$ 为下一周期定子电流观测值; $u_s(k)$ 为当前时刻定子电压; $\hat{F}(k)$ 、 $\hat{F}(k+1)$ 分别为当前时刻、下一周期超局部模型的 F 值; T_s 为离散系统的采样步长。

由于欧拉离散法是基于前向差分的线性近似, 离散步长越小则精度越高, 本文仿真研究中离散采样步长为 $1 \mu s$ 。

2.2 NESO 的稳定性分析

选择一个典型的李雅普诺夫函数:

$$V(z_1, z_2) = \frac{1}{2}z_1^2 + \frac{1}{2}z_2^2 \quad (12)$$

计算李雅普诺夫函数的时间导数:

$$\dot{V} = z_1\dot{z}_1 + z_2\dot{z}_2 \quad (13)$$

将式(10)代入式(13)后,整理可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & z_1z_2 + \alpha u_s z_1 - \beta_1 z_1^2 + \beta_1 z_1 i_s - \\ & \beta_2 z_2 fal(z_1 - i_s, \alpha, \delta) \end{aligned} \quad (14)$$

δ 为 fal 函数的滤波因子,增大 δ 会加强滤波效果,但跟踪延迟会增加,设计参数时在滤波效果和跟踪速度之间折衷选择。根据文献[27]中自抗扰控制器中 NESO 的参数确定原则, δ 取 $5 T_s \leq \delta \leq 10 T_s$ 之间的采样步长的整数倍, α 一般取 $0 \leq \alpha \leq 1$ 之间的常数, α 越小,跟踪越快,而滤波效果会变差。

结合 NESO 调参原则与观测器稳定条件,即满足式(14)负定的条件下,本文取 δ 为采样步长的 10 倍,即 0.000 01; α 取 0.5。本文仿真研究的脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)周期设置为 0.1 ms,根据文献[28]的 ESO 参数内模控制整定法设置 β_1 、 β_2 分别为 10 000 和 25 000 000,则式(9)可得:

$$\begin{aligned} & fal[e_r(k), 0.5, 0.2] = \\ & \begin{cases} \sqrt{|e_r(k)|} sign[e_r(k)], & |e_r(k)| > 0.2 \\ \frac{e_r(k)}{\delta^{1-\alpha}}, & |e_r(k)| \leq 0.2 \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

3 电流反馈增益在线识别

3.1 基于采样电流迭代的在线辨识

非物理意义参数 α 由式(8)可知,通常设计为电感的倒数,而在实际工况中电感参数发生 λ 倍偏移时,结合式(6)可知观测器输出 F 的误差为

$$\Delta F = -\lambda \alpha (R_s i_s + j\omega \psi_r) \quad (16)$$

该误差与设计参数 α ,即电流反馈增益正相关,对 α 进行实时的参数辨识对于观测器输出的精确性和整个控制系统的稳定性有重要意义。基于采样电流迭代的电流反馈增益识别是根据预测参考电流和实际采样电流之间的误差,提取电流

反馈增益 α 的失配信息。

定子电压为输出、定子电流为输入的 PMSM 的超局部模型对当前时刻的定子电压方程进行一阶离散,可得:

$$u_s(k) = \frac{i_s(k+1) - i_s(k)}{\alpha T_s} - \frac{\hat{F}(k)}{\alpha} \quad (17)$$

整理可得:

$$i_s(k+1) = i_s(k) + T_s [F + \alpha u_s(k)] \quad (18)$$

当前周期和上一采样周期的定子电流差为

$$\begin{cases} \Delta i_s(k) = i_s(k) - i_s(k-1) = \\ T_s [\alpha u_s(k-1) + F(k)] \\ \Delta i_s(k-1) = i_s(k-1) - i_s(k-2) = \\ T_s [\alpha u_s(k-2) + F(k-1)] \end{cases} \quad (19)$$

则电流反馈增益为

$$\alpha = \frac{\Delta i_s(k) - \Delta i_s(k-1)}{T_s [u_s(k-1) - u_s(k-2)]} \quad (20)$$

3.2 无差拍参考电压计算

假如 $k+1$ 时刻的电压可以达到参考电压,则式(17)可改写为

$$u_s^{\text{ref}} = \frac{i_s^{\text{ref}} - i_s^k}{\alpha T_s} - \frac{\hat{F}(k)}{\alpha} \quad (21)$$

式中: u_s^{ref} 为定子参考电压; i_s^{ref} 为定子参考电流。

由于电流采样造成一个周期的延迟,进行一差拍延时补偿的参考电压计算为

$$u_s^{\text{ref}} = u_s^{k+1} = \frac{i_s^{\text{ref}}(k+2) - i_s^{k+1}}{\alpha T_s} - \frac{\hat{F}(k+1)}{\alpha} \quad (22)$$

$$i_s^{\text{ref}}(k+2) = i_s^{\text{ref}}(k) \cdot e^{j(\theta_r^k + 2\omega T_s)} \quad (23)$$

4 仿真结果与分析

使用 Matlab/Simulink 对算法进行建模仿真,并对结果进行比较和分析。

仿真中初始给定转速为 1 000 rpm,0.2 s 后将给定转速升高至 1 200 rpm;空载起动 0.3 s 后突加 5 N·m 负载。仿真中开关频率为 10 kHz,PMSM 的主要参数如表 1 所示。

4.1 电流反馈增益标称工况

首先,在电流反馈增益参数准确,即电感参数的偏移倍数 $\lambda=0$ 时,电流反馈增益 α 等于电机定子电感倒数 117 的标称工况下验证本文基于 NESO 的 PMSM 无模型控制策略。

表 1 PMSM 主要参数

Tab.1 PMSM main parameters

参数名称	参数值
额定功率/kW	1
额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	1 200
额定电压/V	380
定子电阻/ Ω	3
d, q 轴电感/mH	8.5
永磁体磁链/Wb	0.169
转动惯量/($kg \cdot m^2$)	0.02
阻尼系数	0.000 5
极对数 p	4

基于 NESO 的 PMSM 无模型控制策略的电流跟踪波形、转速跟踪波形和输出转矩波形分别如图 1、图 2 和图 3 所示。

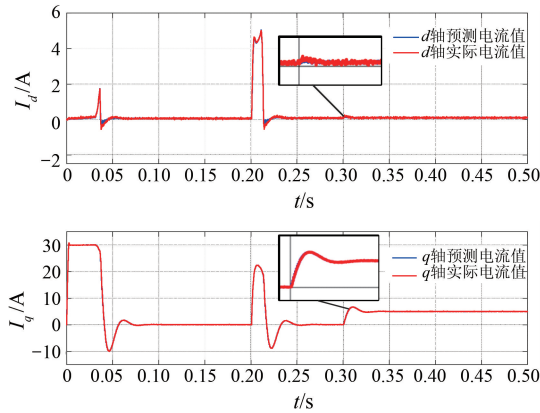


图 1 电流跟踪波形

Fig.1 Current tracking waveform

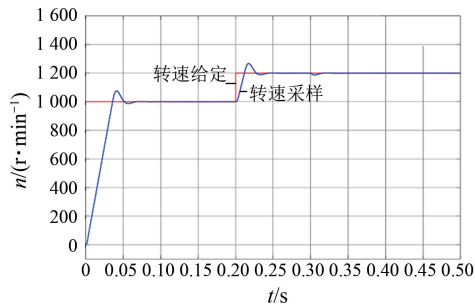


图 2 转速跟踪波形

Fig.2 Rotor speed tracking waveform

由图 1 可知,当起动和突加负载时, q 轴电流可以快速提升到最大值,同时 d, q 轴的预测电流和实际电流跟踪性能良好。

由图 2 和图 3 可知,转速跟踪快且超调量小,起动时输出转矩能快速提升且带载稳态下输出稳定,转矩脉动在 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 以内。

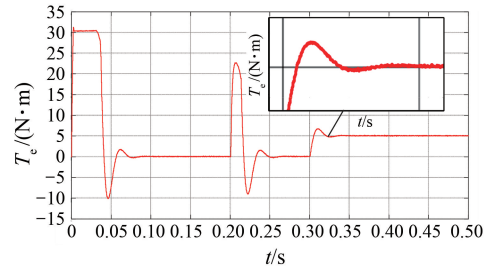


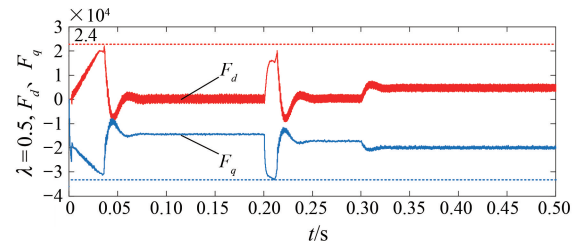
图 3 转矩输出波形

Fig.3 Torque output waveform

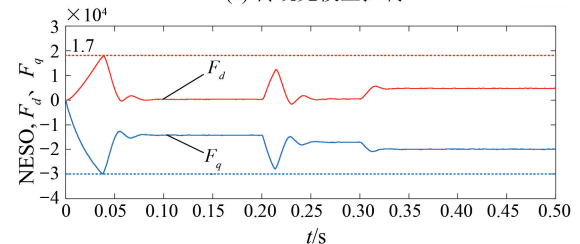
4.2 电流反馈增益失配工况

为验证基于 NESO 的无模型控制策略在电流反馈增益参数失配工况下的可行性和有效性,在电感参数偏移倍数 $\lambda = 0.5$ 、系统初始电流反馈增益 α 等于 58 的工况下,与传统无模型控制策略进行对比仿真研究,对比结果如表 2 所示。系统的其他参数与参数标称工况下相同。

图 4 为观测器输出 F 值的波形对比图,图 5



(a) 传统无模型控制



(b) 基于 NESO 的低参数敏感度无模型控制

图 4 电流反馈增益失配工况观测器输出波形

Fig.4 Observer output waveforms under current feedback gain mismatch condition

表 2 电流反馈增益失配工况电流跟踪效果

Tab.2 Current tracking effect under current feedback gain mismatch condition

	传统无模型控制	低参数敏感度 无模型控制
F_d 观测超调量	2.4×10^4	1.7×10^4
F_q 观测超调量	-3.4×10^4	-3×10^4
d 轴电流双峰差值/A	4	1
q 轴电流双峰差值/A	1.7	1.5
相电流总谐波畸变率/%	10.55	2.18

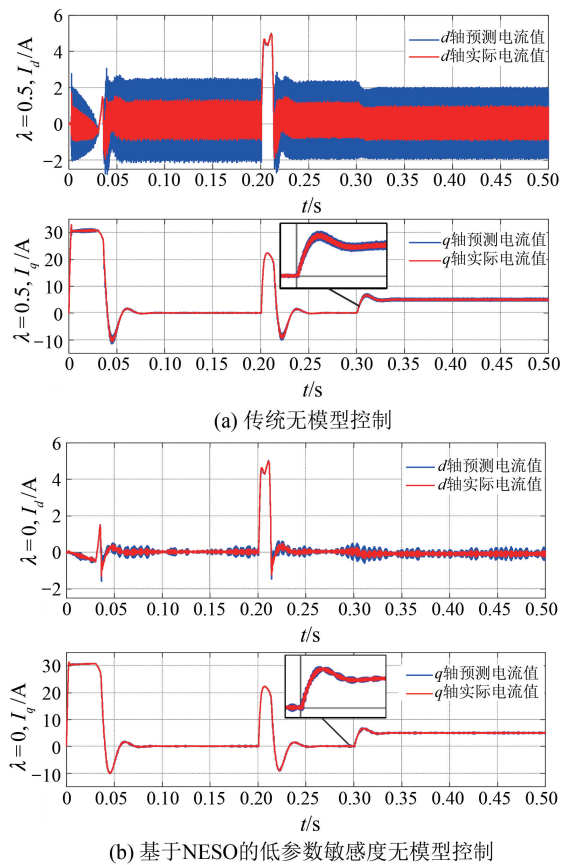


图 5 参数失配工况电流跟踪波形对比

Fig. 5 Comparison of current tracking waveforms under parameter mismatch condition

为 d 、 q 轴电流跟踪波形, 图 6 为相电流快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 分析结果, 图 7 为基于采样电流迭代在线识别电流反馈增益 α 的辨识波形。

由图 4(a) 仿真结果可知, 传统无模型控制系统在电流反馈增益失配的工况下, 观测器输出 F 值超调增加, F_d 、 F_q 的观测值超调量分别为 2.4×10^4 、 -3.4×10^4 , 且在加载稳态时振荡严重, 振荡范围为 0.5×10^4 ; 采用基于 NESO 的低参数敏感度无模型控制时观测器输出 F 值超调降低, F_d 、 F_q 的观测值超调量分别为 1.7×10^4 、 -3×10^4 , 且输出观测值平滑无振荡。由于超局部模型理论在原理上可以将结构自身的内部扰动纳入 F 的计算中进行补偿, 但电流反馈增益失配较大时, 无模型电流控制器的输入输出差值始终有较大数量级, 导致观测器稳定性降低。对比图 4(b), NESO 输出 F 值相对于传统无模型控制超调量更小, 收敛速度更快, 且无稳态振荡, 观测器快速且准确的输出 F

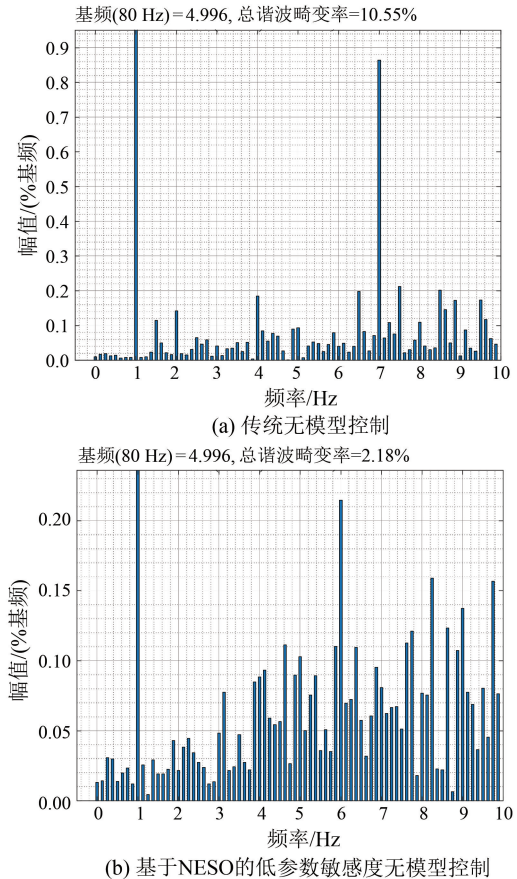


图 6 参数失配工况下电流的 FFT 分析对比

Fig. 6 Comparison of FFT analysis of current under parameter mismatch condition

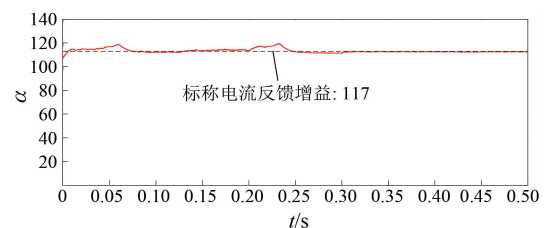


图 7 采样电流迭代在线辨识 α

Fig. 7 Online identification of α using sampled current iteration

值, 有助于提高整个无模型控制系统的控制性能。

由图 5 电流跟踪波形可知, 传统无模型控制下的 d 轴电流在 $-2.5 \text{ A} \sim 2 \text{ A}$ 范围内振荡, 而基于 NESO 的无模型控制的 d 轴电流在 $-0.5 \text{ A} \sim 0.5 \text{ A}$ 范围内振荡; 传统无模型控制下的 q 轴电流在 $4.2 \text{ A} \sim 5.8 \text{ A}$ 范围内振荡, 而基于 NESO 的无模型控制的 q 轴电流在 $4.5 \text{ A} \sim 5.5 \text{ A}$ 范围内振荡。在电流反馈增益失配工况下, 该控制系统的 d 、 q 轴电流预测的准确性和电流控制器的稳定性依旧能

够保持较高性能。

由图 6 相电流 FFT 分析结果可知,在电流反馈增益参数失配工况下,基于 NESO 的低参数敏感度的无模型控制有效降低了相电流中的总谐波畸变率。

由图 7 反馈增益 α 的辨识波形可知,即使系统在初始电流反馈增益 α 的设定值为 58 的工况下起动,其仍可以快速收敛至标称值 117 附近。此时模拟实际工况下,系统参数持续保持失配给定,但由于迭代算法仅根据实际采样电流求解电流反馈增益,因此系统不受失配给定的影响。起动 0.3 s 进入带载稳态运行后,辨识值稳定在标称值 117 附近,可以看出该控制策略降低了无模型控制系统的设计参数敏感度。

5 结语

本文设计了基于 NESO 的 PMSM MFPC 系统,利用 Lyapunov 理论对 NESO 进行了稳定性分析,分析了超局部模型中唯一设计参数 α 对观测器稳定性以及无模型控制性能的影响,根据采样电流迭代辨识 α ,降低了无模型控制系统的设计参数敏感度。最后通过仿真验证了设计的 NESO 有更好的观测性能,该无模型控制策略既无需被控电机参数,也能在线辨识超局部模型唯一设计参数,有良好的动静态性能和鲁棒性。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

作者贡献

蔡舒迟进行了方案设计、仿真研究与论文撰写,张志锋对论文进行了审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, simulation studies and paper writing were carried out by Cai Shuchi. The manuscript was reviewed and revised by Zhang Zhifeng. All authors have read the final version of paper and consented for submission.

参考文献

[1] 常勇,包广清,杨梅,等. 模型预测控制在永磁同

步电机系统中的应用发展综述[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(8): 11-17.

CHANG Y, BAO G Q, YANG M, et al. Application and development of model predictive control in permanent magnet synchronous motor system [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(8): 11-17.

[2] 卢宏平,赵文祥,陶涛,等. 永磁同步电机低载波比精确无差拍预测电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2024, 26(8): 1-10.

LU H P, ZHAO W X, TAO T, et al. Precise deadbeat predictive current control of PMSM with low carrier ratio [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 26(8): 1-10.

[3] 颜学龙,谢刚,孙天夫,等. 基于模型预测控制的永磁同步电机电流控制技术综述[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9): 1-11.

YAN X L, XIE G, SUN T F, et al. Review on permanent magnet synchronous motor current control techniques based on model predictive control [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(9): 1-11.

[4] 苏晓杨,兰志勇,蔡兵兵. 永磁同步电机模型预测电流控制比较研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(10): 7-13.

SU X Y, LAN Z Y, CAI B B. A comparative research of model predictive current control for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(10): 7-13.

[5] 张永昌,屈祈延,杨海涛. 基于空间矢量调制的 Vienna 整流器无模型预测电流控制[J]. 电工技术学报, 2022, 37(21): 5541-5547.

ZHANG Y C, QU Q Y, YANG H T. Model free predictive current control of vienna rectifier based on space vector modulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(21): 5541-5547.

[6] 安一凡,储剑波,唐旭. 基于参考电流斜率的永磁同步电机三矢量模型预测电流控制[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(11): 22-29+73.

AN Y F, CHU J B, TANG X. Three-vector model predictive current control for permanent magnet synchronous motor based on reference current slope [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(11): 22-29+73.

- [7] 姚绪梁, 麻宸伟, 王景芳, 等. 基于预测误差补偿的鲁棒型永磁同步电机模型预测电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 6071-6081.
YAO X L, MA C W, WANG J F, et al. Robust model predictive current control for PMSM based on prediction error compensation [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 6071-6081.
- [8] 李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 等. 表贴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.
- [9] 牛里, 杨明, 王庚, 等. 基于无差拍控制的永磁同步电机鲁棒电流控制算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(15): 78-85.
NIU L, YANG M, WANG G, et al. Research on the robust current control algorithm of permanent magnet synchronous motor based on deadbeat control principle [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(15): 78-85.
- [10] 汪琦, 王爽, 付俊永, 等. 基于模型参考自适应参数辨识的永磁同步电机电流预测控制[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(7): 48-53.
WANG Q, WANG S, FU J Y, et al. Predictive current control for permanent magnet synchronous motor based on model reference adaptive system parameter identification [J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(7): 48-53.
- [11] 魏尧, 柯栋梁, 黄东晓, 等. 基于超局部化时间序列的永磁同步电机无模型预测电流滑模控制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(4): 1022-1032.
WEI Y, KE D L, HUANG D X, et al. Model-free predictive sliding mode control using ultra-localized time-series for permanent magnet synchronous motor drives [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(4): 1022-1032.
- [12] 刘向辰, 熊志誉, 薛二桥. 基于全阶状态滑模观测器的永磁同步电机模型预测电流控制策略[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(3): 36-41.
LIU X C, XIONG Z Y, XUE E Q. Model predictive current control strategy of PMSM based on full-order state sliding mode observer [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(3): 36-41.
- [13] 何文, 王恩南, 杨沛豪, 等. 基于扰动观测器的三相逆变电路改进型模型预测控制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(6): 55-61.
HE W, WANG E N, YANG P H, et al. Advanced model predictive control for three-phase inverter circuit based on disturbance observer [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(6): 55-61.
- [14] ZHANG Y C, JIN J L, HUANG L L. Model-free predictive current control of PMSM drives based on extended state observer using ultralocal model [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(2): 993-1003.
- [15] WEI Y, KE D L. Adaptive inertia observer-based model-free predictive current control for PMSM driving system of electrical vehicle [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(4): 6252-6262.
- [16] ZERDALI E, WHEELER P. Model-free simplified predictive current control of PMSM drive with ultra-local model-based EKF [C] // 2021 3rd Global Power, Energy and Communication Conference, Antalya, 2021.
- [17] XU L L, CHEN G M, LI Q Y. Ultra-local model-free predictive current control based on nonlinear disturbance compensation for permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Access, 2020, 8: 127690-127699.
- [18] ZHAO J, ZHANG Y, WANG X. Model-free predictive current control of PMSM drives based on variable sequence space vector modulation using an ultra-local model [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2024, 10(2): 3518-3528.
- [19] FENG Y, ZHANG S, ZHANG C. An improved model-free predictive current control for PMSM under low-speed condition [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(1): 555-565.
- [20] CHEN Y, LIU T H, HSIAO C F, et al. Implementation of adaptive inverse controller for an interior permanent magnet synchronous motor adjustable speed drive system based on predictive current control [J]. IET Electric Power Applications, 2015, 9(1): 60-70.
- [21] LI F, ZHENG T, HE N B, et al. Data-driven hybrid

- neural fuzzy network and ARX modeling approach to practical industrial process identification [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022, 9(9): 1702-1705.
- [22] YANG C S, ZHANG Y C, JIANG T, et al. Data-driven model-free predictive current control for brushless doubly-fed induction generator [C] // 2023 26th International Conference on Electrical Machines and Systems, Zhuhai, 2023.
- [23] KERMADI M, REBAI A, BAGHLI L, et al. Model-free predictive current controller for voltage source inverters using ARX model and recursive least squares [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2024, 71(5): 2619-2623
- [24] HEYDARI R, YOUNG H, FLORES-BAHAMONDE F, et al. Model-free predictive control of grid-forming inverters with LCL filters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9200-9211.
- [25] CHOI S, FLIESS M, MOUNIE H, et al. Model-free control of automotive engine and brake for Stop-and-Go scenarios [C] // 2009 European Control Conference, Budapest, 2009.
- [26] 苏光靖, 李红梅, 李争, 等. 永磁同步直线电机无模型电流控制 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(15): 3182-3190.
- SU G J, LI H M, LI Z, et al. Research on model-free current control of permanent magnet synchronous linear motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(15): 3182-3190.
- [27] 韩京清. 自抗扰控制技术 [J]. 前沿科学, 2007, (1): 24-31.
- HAN J Q. Auto disturbance rejection control technology [J]. Frontier Science, 2007, (1): 24-31.
- [28] 徐琦, 孙明玮, 陈增强, 等. 扩张状态观测器的内模控制分析与设计 [C] // 第三十二届中国控制会议论文集(D卷), 西安, 2013.
- XU Q, SUN M W, CHEN Z Q, et al. Analysis and design of the extended state observer using internal mode control [C] // Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference (Volume D), Xi'an, 2013.
-
- 收稿日期:2024-10-11
收到修改稿日期:2024-11-07
作者简介:
蔡舒迟(2000-),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机系统及其控制,18780571097@163.com;
*通信作者:蔡舒迟(2000-),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机系统及其控制,18780571097@163.com。