

基于模型参考自适应参数辨识的永磁同步电机有限状态集 MPCC

李耀华*, 郭伟超, 种国臣, 王自臣, 王钦政, 高 赛,
徐志雄, 刘亚辉, 张 茜, 黄汉旋
(长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

The FCS-MPCC for PMSM Based on MRAS Parameter Identification

LI Yaohua*, GUO Weichao, CHONG Guochen, WANG Zichen, WANG Qinzheng,
GAO Sai, XU Zhixiong, LIU Yahui, ZHANG Qian, HUANG Hanxuan
(School of Automotive, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the problem of control performance degradation due to parameter mismatch in finite-control-set model predictive current control (FCS-MPCC) of permanent magnet synchronous motor, the model reference adaptive system (MRAS) is used to identify the motor parameters to improve the parameter robustness of FCS-MPCC. [Methods] Firstly, the parameter mismatch robustness of FCS-MPCC was analyzed. Then, in order to solve the problem of under-ranking of three parameters identified by the traditional MRAS method, only the two parameters of inductance and flux linkage, which have a greater influence, were identified, so as to make the FCS-MPCC have a stronger parameter robustness. Finally, the impact of the resistance parameters mismatch of the MRAS model on the identification results and the performance of the motor control was analyzed. [Results] In order to verify the effectiveness of the proposed method, simulation analysis was carried out based on Matlab/Simulink platform. MRAS can accurately recognize the actual values of inductance and flux linkage with high recognition accuracy when the model resistance parameters were set correctly. Although FCS-MPCC and MRAS still need to set the resistance parameters, and the mismatch of the resistance parameters has a large impact on the identification results of the flux linkage parameters of MRAS, but because FCS-MPCC has a certain degree of robustness to the parameter changes, this effect was

reflected in the FCS-MPCC has little impact. [Conclusion] FCS-MPCC selects the voltage vectors whose cost function is the minimum one, which can weaken effects of parameters mismatch and make FCS-MPCC robustness. As effect of resistance parameters mismatch is weak, only inductance and flux linkage are needed to be identified, so as to avoid the problem of under-ranking. Resistance parameters affect a significant impact on MRAS-based inductance and flux linkage identification, but demonstrate minimal influence on FCS-MPCC.

Key words: permanent magnet synchronous motor; model predictive current control; parameter mismatch robustness; parameter identification; model reference adaptive system

摘 要:【目的】针对永磁同步电机的有限状态集模型预测电流控制(FCS-MPCC)参数失配导致的控制性能下降的问题,采用模型参考自适应系统(MRAS)对电机参数进行辨识,以提高 FCS-MPCC 的参数鲁棒性。【方法】首先,对 FCS-MPCC 进行参数失配鲁棒性分析;然后,为解决传统 MRAS 方法辨识 3 个参数的欠秩问题,仅对影响较大的电感与磁链 2 个参数进行辨识,使 FCS-MPCC 具有更强的参数鲁棒性;最后,分析 MRAS 模型电阻参数失配对辨识结果与电机控制性能的影响。【结果】为了验证所提方法的有效性,基于 Matlab/Simulink 平台进行了仿真分析。模型电阻参数设置正确下 MRAS 可以准确辨识出电感与磁链的实际值,辨识精度高。虽然 FCS-MPCC 与 MRAS 仍需设置电阻参数,且电阻参数失配对 MRAS 辨识磁链参数结果影响较大,但由于 FCS-MPCC 对参数变化具有一定的鲁棒性,这种影响体现在 FCS-MPCC 上较小。【结论】FCS-MPCC 采用成本函数寻最小的非定量控制环节来确定最优电压矢量,减弱参数失配的影响,具有一定的参

基金项目: 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助 (300102365821)

Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities, Chang'an University (300102365821)

数鲁棒性。电阻参数失配影响较小,无需精确辨识,仅需估计电感和磁链,从而避免欠秩问题。电阻参数会影响 MRAS 对电感和磁链的辨识效果,但对 FCS-MPCC 影响较小。

关键词: 永磁同步电机; 模型预测电流控制; 参数失配鲁棒性; 参数辨识; 模型参考自适应系统

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 模型预测电流控制 (Model Predictive Current Control, MPCC) 基于 PMSM 转子旋转坐标系下定子电压方程,以定子 dq 轴电流为控制对象,无需权重系数,结构简单,易于实现,近年来成为 PMSM 控制领域的研究热点^[1-5]。

PMSM MPCC 基于电流预测模型计算得出下一时刻的预测电流。因此,预测模型参数的准确性决定 MPCC 的性能。由于测量误差、环境变化等因素,电机的模型参数与实际参数往往并不一致,参数失配会导致基于失配参数建立的预测模型计算出的预测值与实际电机对应值之间出现误差,影响电机的控制性能^[6-10]。

在线辨识电机参数从而实时更新预测模型是解决参数失配的方法之一^[11-13]。目前,常用电机参数辨识算法有递推最小二乘法^[14-16]、扩展卡尔曼滤波^[17-19]和模型参考自适应系统 (Model Reference Adaptive System, MRAS)^[20-23]等方法。由转子坐标系下表贴式永磁同步电机 (Surface-mounted PMSM, SPMSM) 电流预测模型可知,影响预测模型控制性能的参数有定子电阻、定子 dq 轴电感和永磁体磁链 3 个,但仅有 2 个方程,存在状态方程欠秩的问题。文献[24]固定磁链参数,实现对电阻和电感的辨识,但当磁链值与实际值存在偏差,会导致电阻和电感辨识不准确。文献[25]通过注入高频电压信号获取电机的高频特性,增加状态方程,实现多参数辨识,但额外注入信号会引起电流和转速脉动。文献[26]采用分步辨识,首先辨识定子电阻和转子磁链,待这 2 个参数辨识结果稳定后,再辨识定子电感。

本文对参数失配下有限状态集模型预测电流控制 (Finite-Control-Set MPCC, FCS-MPCC) 的性能进行鲁棒性分析,分析不同参数失配对 FCS-

MPCC 的影响。基于参数失配的影响,忽略电阻参数,基于 MRAS 对电感和磁链进行参数辨识,避免参数辨识的欠秩问题。由于 FCS-MPCC 对参数变化具有一定的鲁棒性,电阻参数失配对电感和磁链参数辨识的影响反映在 FCS-MPCC 上较小,可提升 FCS-MPCC 的参数鲁棒性。

1 MPCC

转子旋转坐标系下,SPMSM 定子电流状态方程如式(1)所示:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d}u_d - \frac{1}{L_d}R_s i_d + \frac{L_q}{L_d}\omega_e i_q \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q}u_q - \frac{1}{L_q}R_s i_q - \frac{L_d}{L_q}\omega_e i_d - \frac{1}{L_q}\omega_e \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 和 L_d 、 L_q 分别为定子 dq 轴电压和电感, $L_d=L_q=L$; R_s 为定子电阻; ψ_f 为转子永磁体磁链; ω_e 为转子电角速度。

采用一阶前向欧拉法对式(1)进行离散,可得电流预测模型如式(2)所示:

$$\begin{cases} i_d(k+1) = \frac{T_s}{L}u_d(k) + \left(1 - \frac{T_s}{L}R_s\right)i_d(k) + T_s\omega_e i_q(k) \\ i_q(k+1) = \frac{T_s}{L}u_q(k) + \left(1 - \frac{T_s}{L}R_s\right)i_q(k) - \frac{T_s}{L}\omega_e [Li_d(k) + \psi_f] \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_s 为采样周期; $i_{dq}(k)$ 、 $i_{dq}(k+1)$ 分别为 k 、 $k+1$ 时刻定子 dq 轴实际电流、预测电流。

由电流预测模型可知,需要辨识的 PMSM 参数有电阻 R_s 、电感 L 和磁链 ψ_f ,但要从二维方程中求解 3 个未知量,则解不唯一,即方程欠秩。

两电平电压源逆变器的电压矢量如式(3)所示,其中零电压矢量对应开关状态 000 或 111,以最小开关次数来确定^[27]。

$$V_s \in \{V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6\} \quad (3)$$

FCS-MPCC 遍历所有备选电压矢量至电流预测模型,计算得到下一时刻预测电流,并输出令成本函数最小的电压矢量。成本函数如式(4)所示:

$$g = [i_d(k+1) - i_d^*(k)]^2 + [i_q(k+1) - i_q^*(k)]^2 \quad (4)$$

式中: $i_{dq}^*(k)$ 为 k 时刻定子 dq 轴电流参考值。

由于采样频率较高,采用当前时刻定子 dq 轴电流参考值近似替代下一时刻参考值。PMSM MPCC 系统如图 1 所示。

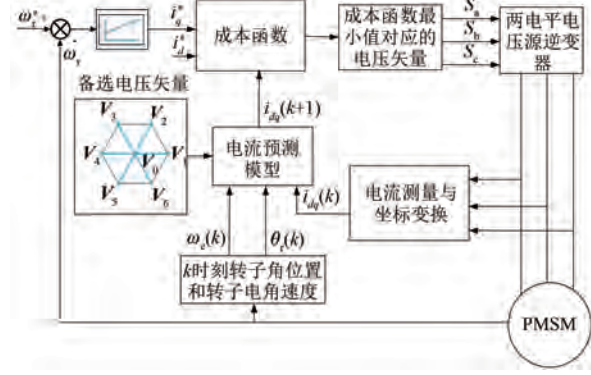


图 1 PMSM MPCC 系统

Fig. 1 MPCC system for PMSM

基于 Matlab 2024a/Simulink 建立 PMSM MPCC 系统仿真模型。仿真模型为离散模型,采样周期为 5×10^{-5} s,直流母线电压为 312 V。转速环比例积分(Proportional Integral, PI)控制器参数设置为 $K_p = 5$ 、 $K_i = 100$,输出上下限为 $[-30 \text{ A}, 30 \text{ A}]$ 。仿真用 PMSM 参数如表 1 所示。

表 1 仿真用 PMSM 参数

Tab. 1 Parameters of PMSM for simulation

参数名称	参数值
定子电阻 R_s/Ω	0.2
d 轴电感 L_d/H	0.008 5
q 轴电感 L_q/H	0.008 5
转子磁链 ψ_f/Wb	0.175
极对数 p	4
转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.089
粘滞阻尼系数 $B/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$	0.005

仿真条件设置为:初始参考转速为 400 rpm, 2 s 时阶跃为 -400 rpm;初始负载转矩为 $18 \text{ N} \cdot \text{m}$, 1 s 时阶跃至 $-18 \text{ N} \cdot \text{m}$, 3 s 时阶跃至 $18 \text{ N} \cdot \text{m}$, 仿真总时长为 4 s。电机转速和定子 dq 轴电流的仿真结果如图 2~图 4 所示。

定义 dq 轴电流脉动均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和平均开关频率 f_{ave} 分别如式(5)~式(7)所示:

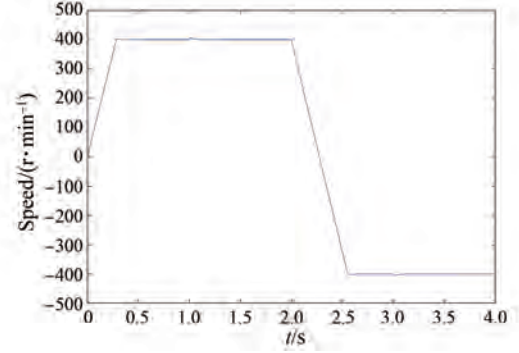


图 2 MPCC 电机转速

Fig. 2 Motor speed of MPCC

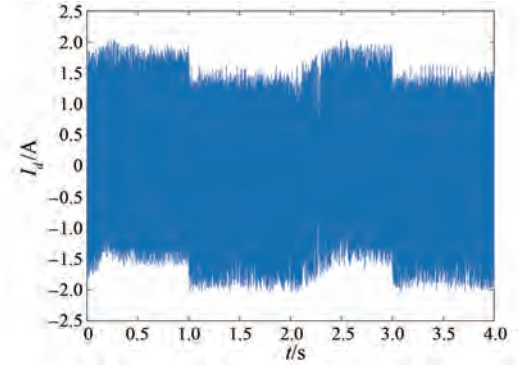


图 3 MPCC d 轴电流

Fig. 3 d -axis current of MPCC

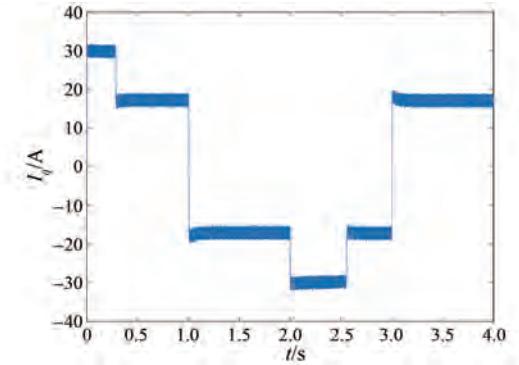


图 4 MPCC q 轴电流

Fig. 4 q -axis current of MPCC

$$I_{d_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (i_d - i_d^*)^2}{N}} \quad (5)$$

$$I_{q_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (i_q - i_q^*)^2}{N}} \quad (6)$$

$$f_{\text{ave}} = \frac{N_{\text{switching}}}{6t} \quad (7)$$

式中: N 为采样个数; $N_{\text{switching}}$ 为逆变器上下桥臂开关次数; t 为仿真总时长。

PMSM MPCC 性能如表 2 所示。

表 2 PMSM MPCC 性能

Tab. 2 MPCC performance of PMSM

I_{d_RMSE}/A	I_{q_RMSE}/A	f_{ave}/kHz
0.83	0.89	6.23

2 电机参数失配分析

保持仿真条件与仿真电机参数不变, 将 MPCC 预测模型 R_s 、 L 和 ψ_f 分别设定为原参数的 0.25 倍与 4 倍。

运行参数失配的 MPCC, 同时并行运行参数匹配的 MPCC, 其中参数匹配的 MPCC 输出电压矢量仅用于比较。

参数失配 MPCC 所选择的电压矢量成本函数与其参数匹配模型的成本函数的平均误差率 η_g 如式(8)所示:

$$\eta_g = \frac{\sum_{n=1}^N \left| \frac{g_{\text{mismatch}} - g_{\text{match}}}{g_{\text{mismatch}}} \right| \times 100\%}{N} \quad (8)$$

参数失配 MPCC 选择的最优电压矢量与相同输入条件下参数匹配 MPCC 选择的最优电压矢量不一致率 η_{V_s} 如式(9)所示:

$$\eta_{V_s} = \left(1 - \frac{N_{V_s}}{N} \right) \times 100\% \quad (9)$$

式中: N_{V_s} 为两者选择的最优电压矢量相同的次数。

经统计, 参数失配下, 成本函数平均误差率、输出电压矢量不一致率及 MPCC 性能如表 3 所示。

表 3 参数失配下 MPCC 性能

Tab. 3 Performance of MPCC under parameters mismatch

参数名称	$\eta_g/\%$	$\eta_{V_s}/\%$	I_{d_RMSE}/A	I_{q_RMSE}/A	f_{ave}/kHz
$4R_s$	57.03	5.53	0.83	0.89	6.25
$0.25R_s$	7.36	1.48	0.82	0.89	6.23
$4L$	3149.21	19.19	0.89	0.98	6.48
$0.25L$	35.63	79.80	1.30	1.04	1.53
$4\psi_f$	590.27	32.41	0.83	0.97	6.26
$0.25\psi_f$	62.12	9.20	0.83	0.91	6.27

由表 3 可知, 参数失配对 MPCC 成本函数计算结果的影响远大于对最终电压矢量选择的影

响。这是因为虽然参数失配对成本函数计算有较大影响, 但该影响对所有电压矢量均存在。同时, MPCC 在计算成本函数后采用成本函数寻最小的非定量控制环节来确定最优电压矢量, 减弱参数失配对最优电压确定的影响, 使得 MPCC 具有一定的参数鲁棒性。表 3 也表明, L 和 ψ_f 参数失配对 MPCC 影响较大, R_s 参数失配对 MPCC 影响较小, 可忽略不计。

3 基于 MRAS 的参数辨识

SPMSM 需要辨识 R_s 、 L 和 ψ_f 这 3 个参数, 而定子 dq 轴电流方程仅有两秩。由于电流状态方程欠秩, 无法唯一确定所有待辨识参数, 存在欠秩问题。研究表明, R_s 参数失配对 MPCC 最优电压矢量选择和控制性能影响较小, 无需精确辨识。因此, 仅需辨识 L 和 ψ_f 这 2 个参数, 从而避免欠秩问题。基于 MRAS 对 L 和 ψ_f 进行参数辨识。

MRAS 将电机 dq 轴电压控制信号同时输入参考模型和可调模型, 参考模型即实际电机定子电流模型。参考模型和可调模型分别输出电机参考电流和可调电流, 并将可调电流、参考电流与可调电流的误差及电压 dq 轴信号输入至参数自适应律模块, 通过参数自适应律得到可调模型中包含电机参数的变量, 将这些变量输入可调模型, 实现电机参数实时更新。重复以上过程, 在参数自适应律作用下, 可调模型输出的可调电流逐渐逼近参考模型输出值, 则认为参考模型与可调模型等价, 可调模型的电机参数即为电机实际的参数。

将式(1)写成如式(10)所示的矩阵方程:

$$p\mathbf{i} = \mathbf{A}\mathbf{i} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{C} \quad (10)$$

$$\text{式中: } \mathbf{u} = [u_d \quad u_q]^T; \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{R_s}{L} & \omega_e \\ -\omega_e & \frac{R_s}{L} \end{bmatrix}; \mathbf{B} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{bmatrix}; \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\omega_e \psi_f}{L} \end{bmatrix}。$$

基于式(10)构造参数可调模型, 如式(11)所示:

$$p\hat{\mathbf{i}} = \hat{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{i}} + \hat{\mathbf{B}}\mathbf{u} + \hat{\mathbf{C}} \quad (11)$$

参数辨识结果的平均误差率如式 (18) 所示:

$$\eta = \frac{\sum_{n=1}^N \left| \frac{\hat{A} - A}{A} \right|}{N} \times 100\% \tag{18}$$

式中: $\hat{A}$ 为参数辨识值; A 为参数真实值。

采用辨识结果稳定后 (0.5 s~1 s) 的平均辨识误差率表示准确性,辨识开始到辨识至正确值所需时间表示快速性,不同 PI 参数下 L 和 ψ_f 的辨识结果如表 4、表 5 所示。

表 4 不同 PI 参数下 L 的辨识结果

Tab. 4 L identification results under different

PI parameters			
K_p	K_i	$\eta_L/\%$	辨识所需时间/s
0.1	100	0.708 4	0.290 2
0.1	300	0.664 6	0.111 1
0.1	500	0.655 2	0.060 3
0.1	700	0.671	0.041 2
0.01	100	0.734 8	0.316 5
0.01	300	0.627 4	0.130 3
0.01	500	0.606 4	0.060 2
0.01	700	0.730 3	0.048 6
0.001	100	0.707 5	0.295 2
0.001	300	0.738 5	0.122 2
0.001	500	0.743 9	0.063
0.001	700	0.721 9	0.029 6

表 5 不同 PI 参数下 ψ_f 的辨识结果

Tab. 5 ψ_f identification results under different

PI parameters			
K_p	K_i	$\eta_{\psi_f}/\%$	辨识所需时间/s
0.1	100	2.976 5	0.147 7
0.1	300	2.966 5	0.088 7
0.1	500	2.966 6	0.052 1
0.1	700	2.963 3	0.047 8
0.01	100	2.975 2	0.148 8
0.01	300	2.967 4	0.089
0.01	500	2.952 1	0.053
0.01	700	2.983 4	0.047 9
0.001	100	2.953 0	0.148 7
0.001	300	2.967 6	0.089
0.001	500	2.952 3	0.053
0.001	700	2.973 1	0.047 9

由表 4、表 5 可知,设置不同的 K_p 对辨识误差及所需时间基本无影响;随着 K_i 增大,辨识所需时间逐渐减少,但增大至 700 时,辨识误差开始增大且辨识快速性提升不大。因此,基于辨识准

确性与快速性原则, L 和 ψ_f 辨识的 PI 参数均设置为 $K_p=0.01$ 和 $K_i=500$ 。

对于 MPCC, R_s 无需精确辨识,但 MRAS 参数辨识需设置 R_s 。因此,设定的 R_s 参数失配会对 MRAS 参数辨识结果产生影响。

4.1 电阻参数匹配

保持仿真条件与仿真电机参数不变,令 MPCC 的预测模型及 MRAS 中可调模型及参数自适应律中的 R_s 均与电机实际参数匹配。MRAS 辨识 L 和 ψ_f 的结果如图 7、图 8 所示。

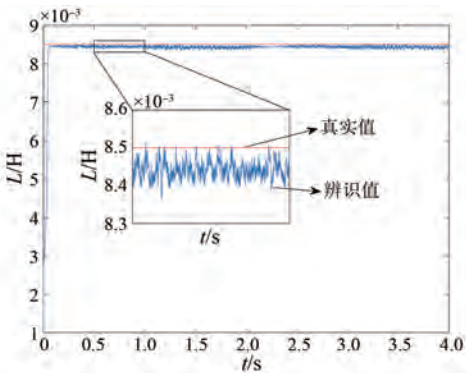


图 7 R_s 参数匹配下 L 辨识结果

Fig. 7 L identification results with matched R_s parameter

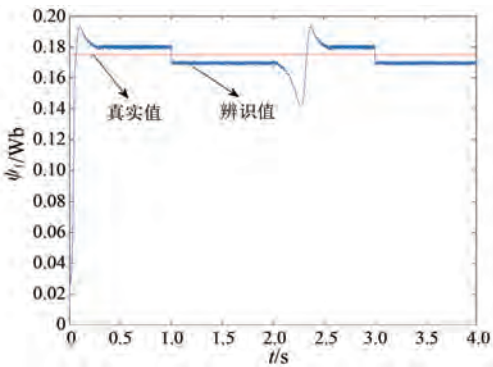


图 8 R_s 参数匹配下 ψ_f 辨识结果

Fig. 8 ψ_f identification results with matched R_s parameter

R_s 参数匹配下,MRAS 辨识 L 和 ψ_f 的平均误差率如表 6 所示。

表 6 R_s 参数匹配下辨识平均误差率

Tab. 6 Identification mean error rate with

matched R_s parameter	
$\eta_L/\%$	$\eta_{\psi_f}/\%$
1.35	4.53

由辨识结果可知, R_s 参数匹配下, MRAS 可快速准确辨识出电机 L 和 ψ_f 的真实值, 其中 L 辨识效果优于 ψ_f 。

此时, 采用 MRAS 实时辨识参数的 PMSM MPCC 仿真结果如图 9~图 11 所示, 控制性能如表 7 所示。

运行采用 MRAS 实时辨识参数的 PMSM MPCC, 同时并行运行电机参数完全匹配的 MPCC, 两者输出电压矢量不一致率为 1.19%。

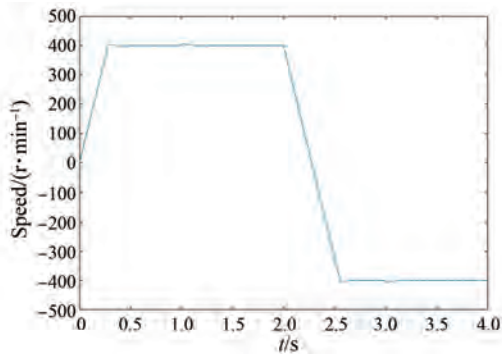


图 9 R_s 参数匹配下基于 MRAS 的 MPCC 电机转速
Fig. 9 Motor speed in MRAS-based MPCC with matched R_s parameter

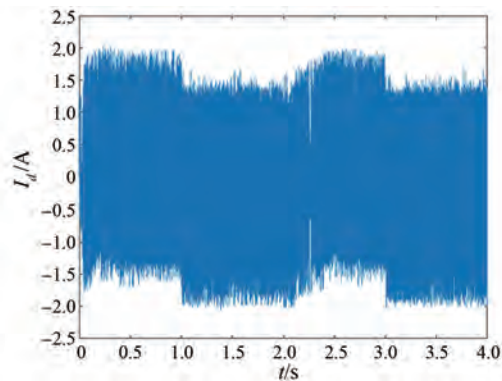


图 10 R_s 参数匹配下基于 MRAS 的 MPCC d 轴电流
Fig. 10 d -current in MRAS-based MPCC with matched R_s parameter

表 7 R_s 参数匹配下基于 MRAS 的 MPCC 性能

Tab. 7 Performance of MRAS-based MPCC with matched R_s parameter

$I_{d_rip_RMSE}/A$	$I_{q_rip_RMSE}/A$	f_{ave}/kHz
0.819 3	0.890 3	6.18

综上所述, R_s 参数匹配下, 采用 MRAS 辨识 L 和 ψ_f 的 PMSM MPCC 性能良好, 选择电压矢量与参数完全匹配的 MPCC 基本相同, 两者控制性能

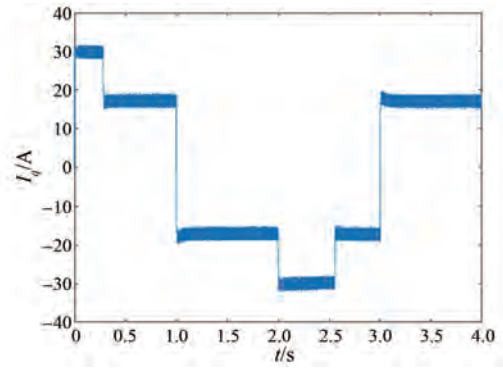


图 11 R_s 参数匹配下基于 MRAS 的 MPCC q 轴电流

Fig. 11 q -current in MRAS-based MPCC with matched R_s parameter

基本相当。

为验证全速域内参数辨识的有效性, 电机转速设定为低速 100 rpm、高速 1 000 rpm, 仿真转速保持不变。低速和高速下, L 和 ψ_f 辨识平均误差率如表 8 所示。

表 8 低速和高速下的辨识平均误差率

Tab. 8 Identification mean error rate at low and high speeds

转速/($r \cdot \min^{-1}$)	$\eta_L/\%$	$\eta_{\psi_f}/\%$
100	2.42	6.29
1 000	1.88	3.53

由表 8 可知, 该参数辨识方法在低速和高速下均可实现 L 和 ψ_f 的精确辨识。

4.2 电阻参数失配

将 MPCC 的预测模型及 MRAS 中可调模型及参数自适应律中的电阻参数设置为电机实际参数的 0.25 倍与 4 倍, 将参数失配下 MRAS 辨识得到的参数用于 MPCC, 同时并行运行电阻参数匹配的 MRAS, 其辨识结果仅用于比较。

4.2.1 $0.25R_s$

电阻参数失配 ($0.25R_s$) 与电阻参数匹配下, MRAS 辨识 L 和 ψ_f 的结果如图 12~图 13 及表 9 所示。

表 9 $0.25R_s$ 电阻参数失配下辨识平均误差率

Tab. 9 Identification mean error rate with mismatched $0.25R_s$ parameter

MRAS	$\eta_L/\%$	$\eta_{\psi_f}/\%$
参数失配	1.51	17.96
参数匹配	1.37	4.52

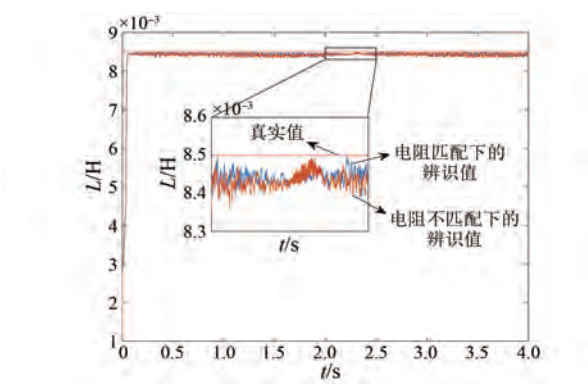


图 12 $0.25R_s$ 电阻参数失配下 L 辨识结果

Fig. 12 L identification results with mismatched $0.25R_s$ parameter

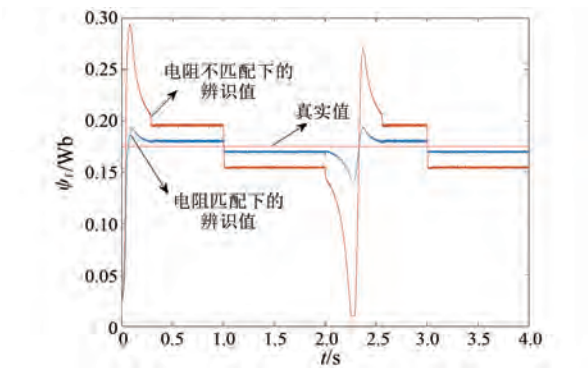


图 13 $0.25R_s$ 电阻参数失配下 ψ_f 辨识结果

Fig. 13 ψ_f identification results with mismatched $0.25R_s$ parameter

此时,采用 MRAS 实时辨识参数的 PMSM MPCC 仿真结果如图 14~图 16 所示,控制性能如表 10 所示。

运行采用 MRAS 实时辨识参数的 PMSM

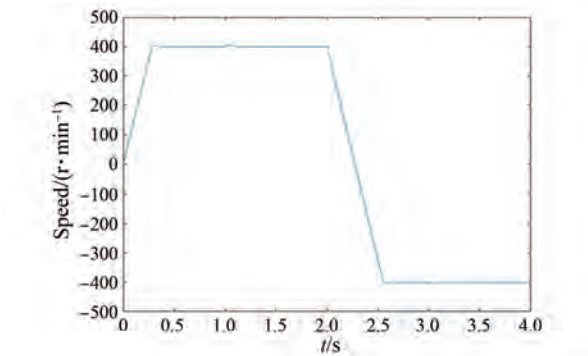


图 14 $0.25R_s$ 电阻参数失配下基于 MRAS 的 MPCC 电机转速

Fig. 14 Motor speed in MRAS-based MPCC with mismatched $0.25R_s$ parameter

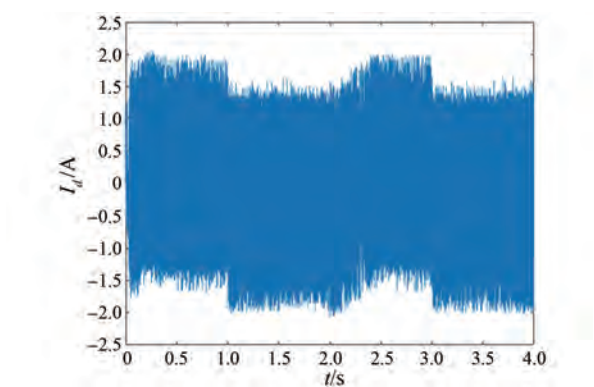


图 15 $0.25R_s$ 电阻参数失配下基于 MRAS 的 MPCC d 轴电流

Fig. 15 d -current in MRAS-based MPCC with mismatched $0.25R_s$ parameter

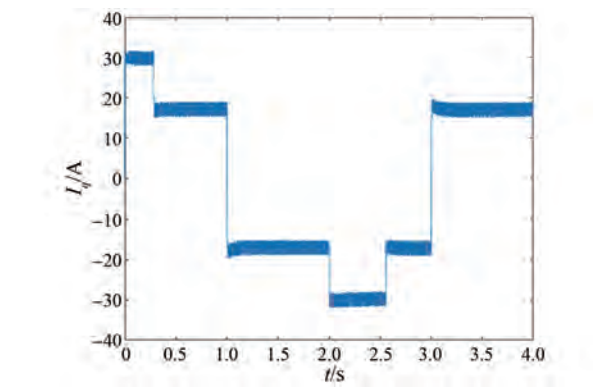


图 16 $0.25R_s$ 电阻参数失配下基于 MRAS 的 MPCC q 轴电流

Fig. 16 q -current in MRAS-based MPCC with mismatched $0.25R_s$ parameter

MPCC,同时并行运行电机参数完全匹配的 MPCC,两者输出电压矢量不一致率为 1.18%。

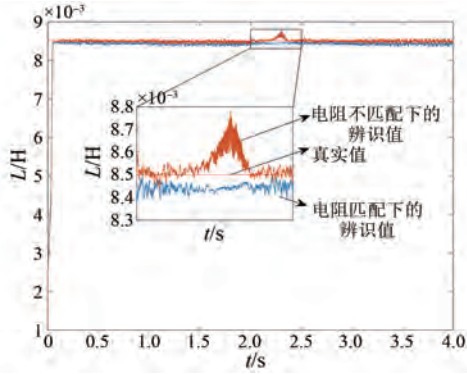
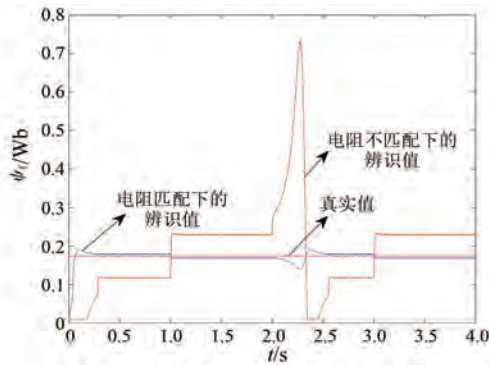
表 10 $0.25R_s$ 电阻参数失配下基于 MRAS 的 MPCC 性能

Tab. 10 Performance of MRAS-based MPCC with mismatched $0.25R_s$ parameter		
$I_{d_rip_RMSE}/A$	$I_{q_rip_RMSE}/A$	f_{ave}/kHz
0.817 4	0.891 6	6.16

4. 2. 2 $4R_s$

电阻参数失配 ($4R_s$) 与电阻参数匹配下, MRAS 辨识 L 和 ψ_f 的结果如图 17~图 18 及表 11 所示。

此时,采用 MRAS 实时辨识参数的 PMSM MPCC 仿真结果如图 19~图 21 所示,控制性能如表 12 所示。

图 17 $4R_s$ 电阻参数失配下 L 辨识结果Fig. 17 L identification results with mismatched $4R_s$ parameter图 18 $4R_s$ 电阻参数失配下 ψ_f 辨识结果Fig. 18 ψ_f identification results with mismatched $4R_s$ parameter表 11 $4R_s$ 电阻参数失配下辨识平均误差率Tab. 11 Identification mean error rate with mismatched $4R_s$ parameter

MRAS	$\eta_L/\%$	$\eta_{\psi_f}/\%$
参数失配	0.89	48.36
参数匹配	1.39	4.51

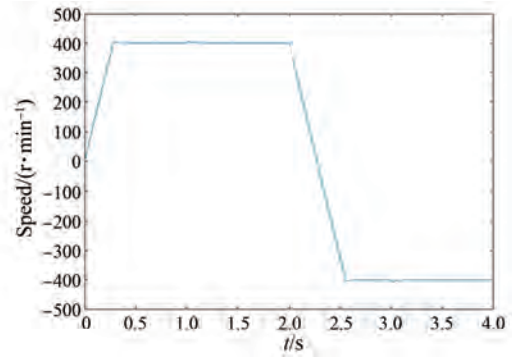
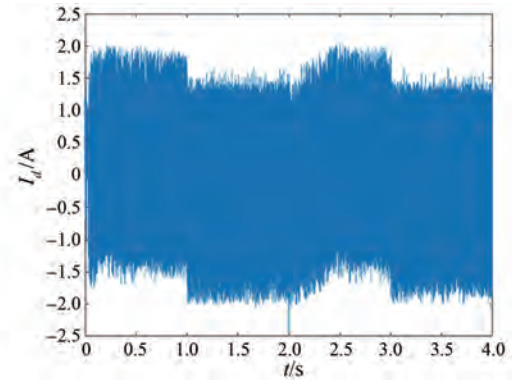
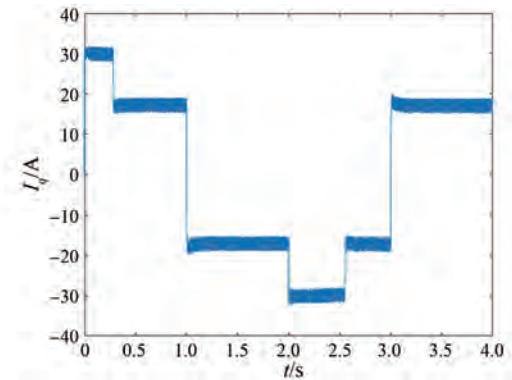
表 12 $4R_s$ 电阻参数失配下基于 MRAS 的 MPCC 性能Tab. 12 Performance of MRAS-base MPCC with mismatched $4R_s$ parameter

$I_{d_rip_RMSE}/A$	$I_{q_rip_RMSE}/A$	f_{ave}/kHz
0.823 1	0.886 7	6.19

运行采用 MRAS 实时辨识参数的 PMSM MPCC, 同时并行运行电机参数完全匹配的 MPCC, 两者输出电压矢量不一致率为 1.49%。

4.2.3 结果分析

对比 MRAS 电阻 R_s 参数匹配与失配模型的

图 19 $4R_s$ 电阻参数失配下基于 MRAS 的 MPCC 电机转速Fig. 19 Motor speed in MRAS-based MPCC with mismatched $4R_s$ parameter图 20 $4R_s$ 电阻参数失配下基于 MRAS 的 MPCC d 轴电流Fig. 20 d -axis current in MRAS-base MPCC with mismatched $4R_s$ parameter图 21 $4R_s$ 电阻参数失配下基于 MRAS 的 MPCC q 轴电流Fig. 21 q -axis current in MRAS-base MPCC with mismatched $4R_s$ parameter

辨识结果可知, R_s 参数设置不准确会降低 MRAS 辨识 L 和 ψ_f 的精度。 R_s 参数偏差对 L 辨识影响较低, 对 ψ_f 参数辨识影响较大。 R_s 参数的误差

ΔR 会导致 MRAS 模型的 dq 轴电流误差信号中包含额外的偏差 Δe_d 与 Δe_q , 其中 q 轴电流误差为 $e_q + \Delta e_q$ 。而 ψ_f 辨识的自适应律对 $e_q \omega_e$ 的积分非常敏感, 这些偏差会通过 MRAS 的自适应律放大, 导致 ψ_f 参数辨识结果偏离真实值。同时可调模型中 q 轴电流方程包含 ψ_f 相关项, 现在的 ψ_f 辨识误差又会反映在之后的 q 轴电流的跟踪误差中, 进而加剧了 ψ_f 辨识的偏差。电流信号中的 R_s 误差相关分量无法被完全消除, 导致 L 和 ψ_f 的辨识结果被迫补偿 R_s 误差的影响, 进而影响辨识结果。

同时, 由仿真结果可知, 虽然 R_s 参数失配对 L 和 ψ_f 辨识产生影响, 但由于 MPCC 具有一定的参数鲁棒性, 使得 R_s 、 L 和 ψ_f 参数失配下, MPCC 性能依然良好, 选择电压矢量与参数完全匹配的 MPCC 基本相同, 两者控制性能基本相当。

5 结语

(1) 参数失配直接影响 MPCC, 但由于该影响针对所有备选电压矢量且 MPCC 采用成本函数寻最小的非定量控制环节来确定最优电压矢量, 减弱了参数失配对 MPCC 最优电压确定的影响, 使得 MPCC 具有一定的参数鲁棒性。

(2) R_s 参数失配对 MPCC 最优电压矢量选择和性能影响较小, 无需精确辨识, 仅需估计 L 和 ψ_f , 从而避免 SPMSM 参数辨识的欠秩问题。

(3) MRAS 可同时辨识 L 和 ψ_f , 但其依赖电阻参数。 R_s 参数匹配下, MRAS 可精确辨识 L 和 ψ_f 。 R_s 参数失配会降低 MRAS 辨识 L 和 ψ_f 的精度, 其对 L 辨识影响较小, 对 ψ_f 辨识影响较大。

(4) 虽然 R_s 参数失配会影响 L 和 ψ_f 参数辨识结果, 但 MPCC 具有一定的参数鲁棒性, 使得 R_s 、 L 和 ψ_f 均失配下, 电机系统依然运行良好, 从而可降低对参数识别精度的要求。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

李耀华进行了方案设计和论文撰写, 郭伟超、

种国臣、王自臣、王钦政进行了仿真研究, 高赛、徐志雄、刘亚辉、张茜、黄汉旋进行了论文的审核和修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design and paper writing were carried out by Li Yaohua. The simulation was conducted by Guo Weichao, Chong Guochen, Wang Zichen and Wang Qinzhen. The manuscript was revised by Gao Sai, Xu Zhixiong, Liu Yahui, Zhang Qian and Huang Hanxuan. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] RODRIGUEZ J, GARCIA C, MORA A, et al. Latest advances of model predictive control in electrical drives-part I: Basic concepts and advanced strategies [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 37(4): 3927-3942.
- [2] RODRIGUEZ J, GARCIA C, MORA A, et al. Latest advances of model predictive control in electrical drives-part II: Applications and benchmarking with classical control methods [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 37(5): 5047-5061.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 李自成, 易亚文, 王后能, 等. 基于有限集电流预测控制的永磁同步电机转矩脉动抑制 [J]. 电机与控制应用, 2020, 47(8): 13-28.
LI Z C, YI Y W, WANG H N, et al. Torque ripple suppression of permanent magnet synchronous motor based on finite set current predictive control [J].

- Electric Machines & Control Application, 2020, 47 (8): 13-28.
- [6] 顾子杰, 卜飞飞, 张得礼, 等. 考虑参数失配的永磁同步电机电流预测控制研究[J]. 电气工程学报, 2023, 18(4): 50-57.
- GU Z J, BU F F, ZHANG D L, et al. Research on predictive current control of permanent magnet synchronous motor considering parameter mismatch [J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18 (4): 50-57.
- [7] YOUNG H A, PEREZ M A, RODRIGUES J. Analysis of finite-control-set model predictive current control with model parameter mismatch in a three-phase inverter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3100-3107.
- [8] 钟灼臻, 曾岳南, 罗伟维. 永磁同步电机鲁棒有限集模型预测电流控制算法[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(3): 17-22+33.
- ZHONG Z Z, ZENG Y N, LUO W W. Robust finite control set model predictive current control algorithm for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47 (3): 17-22+33.
- [9] 高锋阳, 罗引航, 李明明, 等. 失配参数在线矫正的永磁同步电机预测电流控制[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(5): 603-614.
- GAO F Y, LUO Y H, LI M M, et al. Predictive current control of permanent magnet synchronous motor based on online correction of mismatch parameters [J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(5): 603-614.
- [10] 李键, 牛峰, 黄晓艳, 等. 永磁同步电机有限控制集模型预测电流控制预测误差分析[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(4): 1-7.
- LI J, NIU F, HUANG X Y, et al. Prediction error analysis of finite-control-set model predictive current control for PMSMs [J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(4): 1-7.
- [11] 李红梅, 陈涛. 永磁同步电机参数辨识研究综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 638-647.
- LI H M, CHNE T. Review of research on parameter identification of PMSM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2015, 29 (5): 638-647.
- [12] 刘少博, 王高林, 王奇维, 等. 永磁同步电机参数在线辨识方法研究综述[J]. 东北电力大学学报, 2024, 44(3): 1-10.
- LIU S B, WANG G L, WANG Q W, et al. Review on online identification methods of permanent magnet synchronous motor parameters [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2024, 44(3): 1-10.
- [13] 刘伟, 王俊. 永磁同步电机参数辨识研究综述[J]. 电气技术, 2020, 21(8): 1-5+135.
- LIU W, WANG J. Review of research on parameter identification of permanent magnet synchronous motor [J]. Electrical Engineering, 2020, 21 (8): 1-5 + 135.
- [14] 林巨光, 陈桐. 基于改进 RLS 算法的永磁同步电机参数辨识[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(7): 876-880+934.
- LIN J G, CHEN T. PMSM parameters identification based on improved RLS method [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2019, 42(7): 876-880+934.
- [15] 刘刚, 张婧, 郑世强, 等. 基于参数在线辨识的高速永磁电机无差拍电流预测控制[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(9): 98-108.
- LIU G, ZHANG J, ZHENG S Q, et al. Deadbeat predictive current control of high speed permanent magnet motor based on online parameter identification [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(9): 98-108.
- [16] 刘政, 庄佳林, 杨怀志, 等. 表贴式永磁同步电机多参数辨识研究[J]. 微电机, 2022, 55(9): 32-38.
- LIU Z, ZHUANG J L, YANG H Z, et al. Research on multi-parameter identification of SPMSM [J]. Micromotors, 2022, 55(9): 32-38.
- [17] 徐玺声, 颜黎明, 郭鑫, 等. 基于 DUKF 参数辨识的永磁电机无差拍预测控制[J]. 电气工程学报, 2025, 20(1): 65-77.
- XU X S, YAN L M, GUO X, et al. Deadbeat predictive control of permanent magnet motor using DUKF parameter identification [J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 20(1): 65-77.
- [18] 李洪凤, 徐浩博, 徐越. 扩展卡尔曼滤波参数辨识下永磁同步电机模型预测转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(9): 19-30.
- LI H F, XU H B, XU Y. Model prediction torque control of PMSM based on extended Kalman filter

- parameter identification [J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(9): 19-30.
- [19] 李洪宇, 王群京, 李国丽, 等. 基于扩展卡尔曼滤波器的电机参数辨识算法[J]. 电气工程学报, 2015, 10(5): 34-42.
- LI H Y, WANG Q J, LI G L, et al. Electromagnetic parameter identification algorithm of AC motor based on extended Kalman filter[J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(5): 34-42.
- [20] 胡升, 史婷娜. 基于模型参考自适应的表贴式永磁同步电机参数在线辨识策略[J]. 电气传动, 2014, 44(1): 13-16.
- HU S, SHI T N. Online parameter identification of SPMSM based on model reference adaptive [J]. Electric Drive, 2014, 44(1): 13-16.
- [21] 张华强, 严洪峰, 冷艳礼, 等. 基于模型参考自适应的永磁同步电机在线辨识研究[J]. 电气传动, 2015, 45(12): 3-7+16.
- ZHANG H Q, YAN H F, LENG Y L, et al. Study on online identification of PMSM based on MRAS [J]. Electric Drive, 2015, 45(12): 3-7+16.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] BOILEAU T, LEBOEUF N, NAHID-MOBARAKEH B, et al. Online identification of PMSM parameters: Parameter identifiability and estimator comparative study [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(4): 1944-1957.
- [25] BUI M X, RAHMAN M F, GUAN D, et al. A new and fast method for on-line estimation of d and q axis inductances of interior permanent magnet synchronous machines using measurements of current derivatives and inverter DC-bus voltage [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(10): 7488-7497.
- [26] 李垣江, 董鑫, 魏海峰, 等. 基于改进模型参考自适应系统的永磁同步电机参数辨识[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(9): 1983-1988.
- LI Y J, DONG X, WEI H F, et al. Parameter identification method of permanent magnet synchronous motor based on improved model reference adaptive system [J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(9): 1983-1988.
- [27] 李耀华, 杨启东, 曲亚飞, 等. 自适应变电压矢量永磁同步电机直接转矩控制开关表[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(9): 75-83.
- LI Y H, YANG Q D, QU Y F, et al. Adaptive variable voltage vectors switching table in direct torque control for PMSM [J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(9): 75-83.

收稿日期:2025-02-10

收到修改稿日期:2025-04-05

作者简介:

李耀华(1980-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电机电控与新能源汽车技术, nuaaliyaohua@126.com;

* 通信作者:李耀华(1980-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电机电控与新能源汽车技术, nuaaliyaohua@126.com。