

基于 MRAS 参数辨识的永磁同步电机增量式模型预测电流控制研究

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

Study on Incremental Model Predictive Current Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on MRAS Parameter Identification

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

Abstract: [Objective] To solve the parameter mismatch problem of model predictive current control (MPCC) for permanent magnet synchronous motor (PMSM), incremental MPCC with model reference adaptive system (MRAS) is used for parameters identification in order to improve the parameter robustness of the control system. [Methods] Firstly, the MPCC system based on the incremental model was established to eliminate the flux linkage parameter, and the parameter sensitivity of the incremental MPCC model was also analyzed, in which the resistance parameter mismatch had a small and negligible influence on the current prediction effect. Therefore, based on the dq -axis current, MRAS was used to identify only the dq -axis inductance, thus avoiding the under-rank problem. [Results] Simulation analysis and real-time verification were carried out based on Matlab/Simulink and STM32 platform. The results showed that MRAS could accurately identify the dq -axis inductance parameters. And although the incremental MPCC and MRAS control models need to set the resistance parameter, the mismatch of the resistance parameter had less impact on the identification results of the dq -axis inductance. The added MRAS parameter identification system did not additionally increase the large computational burden, and it had a better real-time performance. [Conclusion] For the four parameters of dq -axis inductance, flux linkage and resistance of PMSM, the incremental MPCC eliminates the flux linkage parameter, while the resistance parameter does not need to be identified precisely, and only the dq -axis inductance need to be identified by MRAS. The mismatch of the resistance

parameter of the MRAS control model and the incremental MPCC has no effect on the control performance, which effectively improves the MPCC parameter mismatch robustness of PMSM.

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

摘 要: 【目的】为解决永磁同步电机(PMSM)模型预测电流控制(MPCC)的参数失配问题,采用增量式 MPCC 与模型参考自适应系统(MRAS)进行参数辨识,以提高控制系统的参数鲁棒性。【方法】首先建立基于增量式模型的 MPCC 系统以消除磁链参数,同时对增量式 MPCC 的参数敏感性进行分析,其中电阻参数失配对电流预测效果影响很小,可忽略不计。因此基于 dq 轴电流,采用 MRAS 仅辨识 dq 轴电感,从而避免欠秩问题。【结果】基于 Matlab/Simulink 与 STM32 平台进行了仿真分析与实时性验证。结果表明,MRAS 可精确辨识 dq 轴电感参数;虽然增量式 MPCC 与 MRAS 控制模型需要设置电阻参数,但电阻参数失配对 dq 轴电感的辨识结果影响较小;加入的 MRAS 参数辨识系统并不额外增加较大的计算负担,具有较好的实时性表现。【结论】对于 PMSM 的 dq 轴电感、磁链与电阻 4 个参数,采用增量式 MPCC 消除了磁链参数,而电阻参数无需精确辨识,仅需通过 MRAS 辨识 dq 轴电感。MRAS 控制模型和增量式 MPCC 的电阻参数失配对控制性能基本无影响,从而有效提升了 PMSM MPCC 参数失配鲁棒性。

关键词: 永磁同步电机;模型预测电流控制;增量式模型;模型参考自适应系统;参数辨识

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) 遍历所有备选电压矢量至电流预测模型, 得到电机未来的 dq 轴电流, 并根据成本函数选择最优备选电压矢量^[1-3]。内置式 PMSM MPCC 系统依赖定子电阻、定子 dq 轴电感和永磁体磁链这四个电机参数。实际应用中, 由于温度变化、电磁饱和及电机老化等因素的影响, MPCC 系统中的模型参数往往与电机真实值存在偏差, 造成参数失配, 影响电流预测值, 进而影响 MPCC 性能^[4-5]。

为了提高电机控制参数鲁棒性, 可采用抗干扰补偿^[6-7]、无模型控制^[8-9]和参数在线辨识^[10]等方法, 其中参数在线辨识通过电机参数识别, 实现精确建模, 得到广泛应用。目前应用于 PMSM 的参数辨识方法主要有递推最小二乘法^[11-12]、模型参考自适应法^[13]、扩展卡尔曼滤波器^[14]和人工智能算法^[15-18]等。对于 PMSM, 需要辨识定子电阻、定子 dq 轴电感和永磁体磁链四个参数, 而定子 dq 电流约束方程有两个, 需辨识参数个数大于方程数, 辨识参数不唯一, 产生欠秩问题^[19-20]。为解决此问题, 目前主要采用分步辨识参数、减少待辨识参数和增设电机状态方程等方法。文献[21]采用分步辨识, 先利用 q 轴电流方程辨识 dq 轴电感, 再向 d 轴注入小电流, 利用已辨识的电感再辨识定子电阻和转子磁链。文献[22]先辨识定子电阻和转子磁链, 辨识结果稳定后, 再辨识 dq 轴电感。文献[23]对于表贴式 PMSM, 采用级联模型参考自适应系统 (Model Reference Adaptive System, MRAS), 先辨识电阻和电感, 再辨识转子磁链。文献[24]采用最大转矩电流比控制, 仅辨识定子 q 轴电感和转子磁链。文献[25]通过采集 dq 轴电流、电压及电角速度信号构建满秩辨识方程。文献[26]注入高频电压信号获取电机高频特性, 增加状态方程, 实现满秩。

本文建立基于增量式电流预测模型的 PMSM MPCC 系统。增量式电流预测模型通过前后两个时刻模型求差, 无需转子磁链参数, 减弱对参数的依赖^[27-29]。本文对增量式预测模型

的参数敏感性进行分析, 发现电阻参数失配对电流预测效果的影响可忽略不计, 无需辨识。因此, 仅需辨识定子 dq 轴电感参数, 从而避免 2 个方程辨识 3 个参数引起的欠秩问题。本文建立 MRAS 实现对定子 dq 轴电感的准确辨识, 且 MRAS 控制模型的电阻参数设定对电感参数辨识和模型预测控制性能基本无影响, 提升了 PMSM MPCC 参数失配鲁棒性。

1 增量式 MPCC

PMSM 传统电流预测模型如式(1)所示。由式(1)可知, 预测模型需要确定子电阻 R 、定子 dq 轴电感 L_d 、 L_q 和永磁体磁链 ψ_f 4 个电机参数。

$$\begin{cases} i_d(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L_d}\right) i_d(k) + \\ T_s \frac{L_q}{L_d} \omega_e(k) i_q(k) + \frac{T_s}{L_d} u_d(k) \\ i_q(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L_q}\right) i_q(k) - \\ T_s \frac{L_d}{L_q} \omega_e(k) i_d(k) + T_s \frac{\psi_f}{L_q} \omega_e(k) - \frac{T_s}{L_q} u_q(k) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i_d(k)$ 和 $i_q(k)$ 为 k 时刻定子 dq 轴实际电流; $i_d(k+1)$ 和 $i_q(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻定子 dq 轴预测电流; u_d 、 u_q 分别为施加备选电压矢量的 d 、 q 轴分量; ω_e 为转子电角速度; T_s 为采样周期。

由式(1)可得 k 时刻 PMSM 定子 dq 轴预测电流, 如式(2)所示:

$$\begin{cases} i_d(k) = \left(1 - \frac{RT_s}{L_d}\right) i_d(k-1) + \\ T_s \frac{L_q}{L_d} \omega_e(k-1) i_q(k-1) + \frac{T_s}{L_d} u_d(k-1) \\ i_q(k) = \left(1 - \frac{RT_s}{L_q}\right) i_q(k-1) - \\ T_s \frac{L_d}{L_q} \omega_e(k-1) i_d(k-1) + T_s \frac{\psi_f}{L_q} \omega_e(k-1) - \\ \frac{T_s}{L_q} u_q(k-1) \end{cases} \quad (2)$$

由于 T_s 极小, 转速惯性常数较大, 可近似认为 k 时刻和 $k-1$ 时刻的转速相等, 即 $\omega_e(k) \approx$

$\omega_e(k-1)$, 将式(2)中 $\omega_e(k-1)$ 用 $\omega_e(k)$ 替代, 可得式(3):

$$\begin{cases} i_d(k) = \left(1 - \frac{RT_s}{L_d}\right) i_d(k-1) + T_s \frac{L_q}{L_d} \omega_e(k) i_q(k-1) + \frac{T_s}{L_d} u_d(k-1) \\ i_q(k) = \left(1 - \frac{RT_s}{L_q}\right) i_q(k-1) - T_s \frac{L_d}{L_q} \omega_e(k) i_d(k-1) + T_s \frac{\psi_f}{L_q} \omega_e(k) - \frac{T_s}{L_q} u_q(k-1) \end{cases} \quad (3)$$

将式(1)减去式(3), 可得增量式电流预测模型如式(4)所示:

$$\begin{cases} i_d(k+1) = \left(2 - \frac{T_s R}{L_d}\right) i_d(k) - \left(1 - \frac{T_s R}{L_d}\right) i_d(k-1) + \\ T_s \omega_e(k) \frac{L_q}{L_d} [i_q(k) - i_q(k-1)] + \frac{T_s}{L_d} [u_d(k) - u_d(k-1)] \\ i_q(k+1) = \left(2 - \frac{T_s R}{L_q}\right) i_q(k) - \left(1 - \frac{T_s R}{L_q}\right) i_q(k-1) - \\ T_s \omega_e(k) \frac{L_d}{L_q} [i_d(k) - i_d(k-1)] + \frac{T_s}{L_q} [u_q(k) - u_q(k-1)] \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知, 增量式电流预测模型消除了磁链参数 ψ_f , 将电机参数减小至 3 个。

两电平电压源逆变器共有 8 个开关状态, 可生成 7 个电压矢量如式(5)所示, 其中零电压矢量对应的开关状态 000 或 111 根据开关次数最小原则来确定^[30]。

$$\mathbf{V}_s \in \{\mathbf{V}_0, \mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \mathbf{V}_3, \mathbf{V}_4, \mathbf{V}_5, \mathbf{V}_6\} \quad (5)$$

MPCC 的成本函数如式(6)所示:

$$g = [i_d(k+1) - i_d^*(k)]^2 + [i_q(k+1) - i_q^*(k)]^2 \quad (6)$$

式中: $i_d^*(k)$ 、 $i_q^*(k)$ 分别为 k 时刻定子 d 、 q 轴电流参考值。

由于采样频率较高, 采用当前时刻参考值近似替代下一时刻参考值。PMSM 增量式 MPCC 系统如图 1 所示。

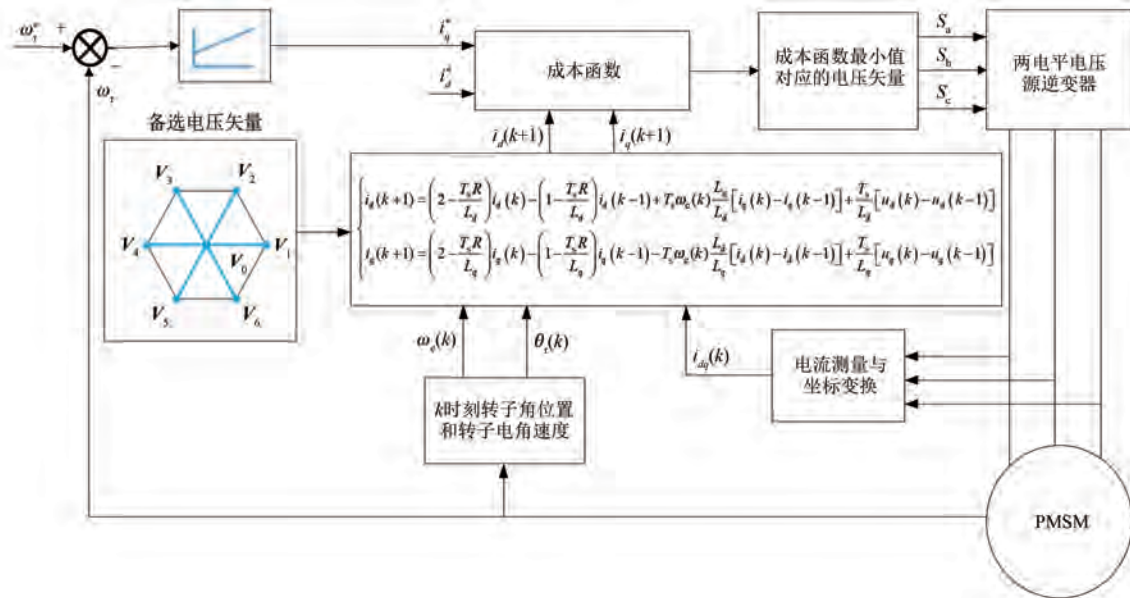


图 1 PMSM 增量式 MPCC 系统

Fig. 1 Incremental MPCC system for PMSM

基于 Matlab 2024a/Simulink 建立 PMSM 增量式 MPCC 系统仿真模型。仿真模型为离散模型,

采用 $i_d = 0$ 控制策略, 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 $[-30\text{ A}, 30\text{ A}]$ 。PMSM 仿真参数如表 1 所示。

表 1 PMSM 仿真参数

Tab. 1 PMSM simulation parameters

参数名称	参数值
定子电阻 R/Ω	0.2
d 轴电感 L_d/H	0.007 5
q 轴电感 L_q/H	0.009 5
永磁体磁链 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

仿真条件设置如下: 初始参考转速为 400 r/min, 2 s 时阶跃为 -400 r/min; 初始负载转矩为 18 N·m, 1 s 时阶跃至 -18 N·m, 3 s 时阶跃至 18 N·m; 仿真总时长为 4 s。

PMSM 增量式 MPCC 系统的电机转速和定子 dq 轴电流的仿真结果如图 2~图 4 所示。

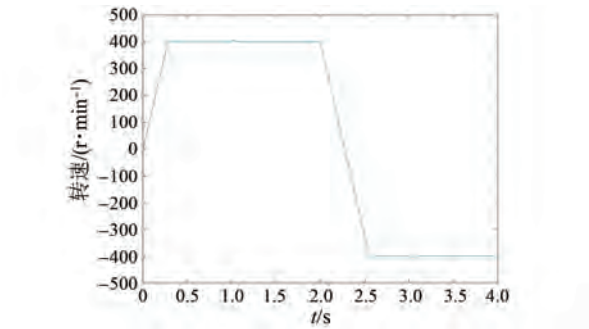


图 2 电机转速

Fig. 2 Motor speed

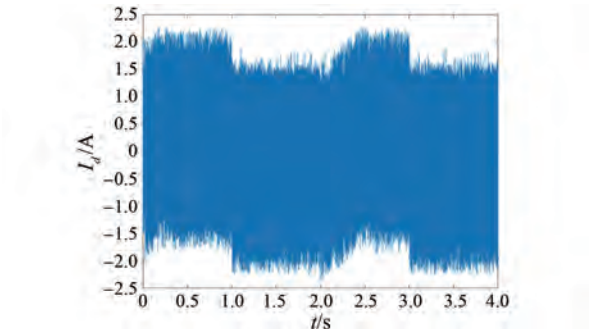


图 3 定子 d 轴电流

Fig. 3 The d -axis stator current

定义定子 d 、 q 轴电流脉动均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) I_{d_RMSE} 、 I_{q_RMSE} 和平均开

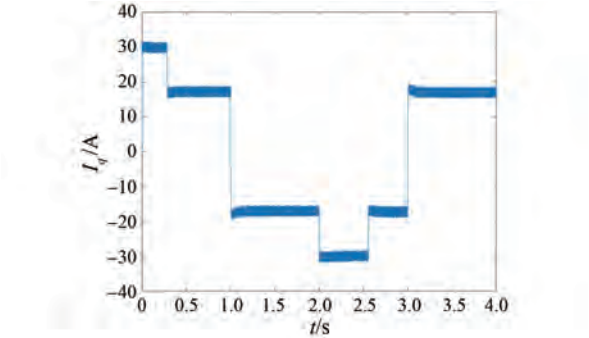


图 4 定子 q 轴电流

Fig. 4 The q -axis stator current

关频率 f_{ave} 分别如式 (7)~式 (9) 所示:

$$I_{d_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (i_d - i_d^*)^2}{N}} \tag{7}$$

$$I_{q_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (i_q - i_q^*)^2}{N}} \tag{8}$$

$$f_{ave} = \frac{N_{switching}}{6 \times t} \tag{9}$$

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

根据式 (7)~式 (9) 得到基于传统电流预测模型与基于增量式电流预测模型的 PMSM MPCC 性能如表 2 所示。

表 2 不同预测模型的 PMSM MPCC 性能

Tab. 2 PMSM MPCC performance for different prediction models

预测模型	I_{d_RMSE}/A	I_{q_RMSE}/A	f_{ave}/kHz
传统	0.927 3	0.809 7	6.24
增量式	0.924 7	0.806 4	6.25

运行增量式 MPCC, 同时并行运行传统 MPCC, 传统 MPCC 的输出电压矢量仅用于与增量式 MPCC 的输出电压矢量进行比较。定义两者输出电压矢量不一致率 η_{v_s} 如式 (10) 所示:

$$\eta_{v_s} = \frac{N_{v_s}}{N} \times 100\% \tag{10}$$

式中: N_{v_s} 为两者选择不同的电压矢量的次数。

经统计, 两者输出电压矢量不一致率仅为 0.87%。由此可知, 基于传统电流预测模型与基于增量式电流预测模型的 PMSM MPCC 性能基本相当。

2 增量式模型参数敏感性分析

电阻、定子 dq 轴电感会引起参数失配。参数失配时,增量式电流预测模型如式(11)所示:

增量式 MPCC 中不存在磁链参数,只有定子

$$\begin{cases} i_{d0}(k+1) = \left(2 - \frac{T_s R_0}{L_{d0}}\right) i_d(k) - \left(1 - \frac{T_s R_0}{L_{d0}}\right) i_d(k-1) + \\ T_s \omega_e(k) \frac{L_{q0}}{L_{d0}} [i_q(k) - i_q(k-1)] + \frac{T_s}{L_{d0}} [u_d(k) - u_d(k-1)] \\ i_{q0}(k+1) = \left(2 - \frac{T_s R_0}{L_{q0}}\right) i_q(k) - \left(1 - \frac{T_s R_0}{L_{q0}}\right) i_q(k-1) - \\ T_s \omega_e(k) \frac{L_{d0}}{L_{q0}} [i_d(k) - i_d(k-1)] + \frac{T_s}{L_{q0}} [u_q(k) - u_q(k-1)] \end{cases} \quad (11)$$

式中: R_0 、 L_{d0} 和 L_{q0} 分别为失配模型的定子电阻、 d 轴电感和 q 轴电感, $R_0 = R + \Delta R$ 、 $L_{d0} = L_d + \Delta L_d$ 、 $L_{q0} = L_q + \Delta L_q$, ΔL_d 、 ΔL_q 和 ΔR 分别为 d 、 q 轴电感失配和电阻失配的差值。

参数匹配时,定子 dq 轴电流如式(4)所示。将式(4)减去式(11),可得 dq 电流预测误差 e_d 、 e_q 如式(12)所示:

$$\begin{cases} e_d = i_d(k+1) - i_{d0}(k+1) = \left(\frac{T_s R_0}{L_{d0}} - \frac{T_s R}{L_d}\right) [i_d(k) - i_d(k-1)] + \\ T_s \omega_e(k) \left(\frac{L_q}{L_d} - \frac{L_{q0}}{L_{d0}}\right) [i_q(k) - i_q(k-1)] + \\ \left(\frac{T_s}{L_d} - \frac{T_s}{L_{d0}}\right) [u_d(k) - u_d(k-1)] = \frac{\Delta R L_d - R \Delta L_d}{L_d(L_d + \Delta L_d)} T_s [i_d(k) - i_d(k-1)] + \\ \frac{L_q \Delta L_d - L_d \Delta L_q}{L_d(L_d + \Delta L_d)} T_s \omega_e(k) [i_q(k) - i_q(k-1)] + \frac{T_s \Delta L_d}{L_d(L_d + \Delta L_d)} [u_d(k) - u_d(k-1)] \\ e_q = i_q(k+1) - i_{q0}(k+1) = \left(\frac{T_s R_0}{L_{q0}} - \frac{T_s R}{L_q}\right) [i_q(k) - i_q(k-1)] - \\ T_s \omega_e(k) \left(\frac{L_d}{L_q} - \frac{L_{d0}}{L_{q0}}\right) [i_d(k) - i_d(k-1)] + \\ \left(\frac{T_s}{L_q} - \frac{T_s}{L_{q0}}\right) [u_q(k) - u_q(k-1)] = \frac{\Delta R L_q - R \Delta L_q}{L_q(L_q + \Delta L_q)} T_s [i_q(k) - i_q(k-1)] + \\ \frac{L_q \Delta L_d - L_d \Delta L_q}{L_q(L_q + \Delta L_q)} T_s \omega_e(k) [i_d(k) - i_d(k-1)] + \frac{T_s \Delta L_q}{L_q(L_q + \Delta L_q)} [u_q(k) - u_q(k-1)] \end{cases} \quad (12)$$

2.1 电阻参数失配

定子电阻失配时,忽略定子 dq 轴电感的影响,即 $\Delta L_d = \Delta L_q = 0$,则式(12)可改写为

$$\begin{cases} e_d = i_d(k+1) - i_{d0}(k+1) = \\ \frac{T_s \Delta R}{L_d} [i_d(k) - i_d(k-1)] \approx 0 \\ e_q = i_q(k+1) - i_{q0}(k+1) = \\ \frac{T_s \Delta R}{L_q} [i_q(k) - i_q(k-1)] \approx 0 \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知,定子电阻失配时, e_d 、 e_q 与 T_s 、 ΔR 及相邻时刻 dq 轴电流差线性相关。由于采样频率较高,电机稳定工作时,相邻时刻的电流变化不大。因此,电阻参数失配时,增量式模型的 dq 轴电流预测误差较小,近似为零。

保持仿真条件不变,不改变实际电机参数,仅改变模型参数。运行参数失配 MPCC,同时将参数失配 MPCC 所选电压矢量作用于参数匹配的电流预测模型。由此,可得相同输入条件下,参数失

配模型与参数匹配模型的 dq 轴电流预测值。

参数失配时, 定义参数失配模型与参数匹配模型的 dq 轴电流预测误差绝对平均值 e_{i_d} 、 e_{i_q} 如式(14)所示:

$$\begin{cases} e_{i_d} = \frac{\sum_{k=1}^N |i_d(k+1) - i_{d0}(k+1)|}{N} \\ e_{i_q} = \frac{\sum_{k=1}^N |i_q(k+1) - i_{q0}(k+1)|}{N} \end{cases} \quad (14)$$

式中: $i_{d0}(k+1)$ 、 $i_{q0}(k+1)$ 和 $i_d(k+1)$ 、 $i_q(k+1)$ 分别为在参数失配 MPCC 所选电压矢量作用下参数失配模型和参数匹配模型的 d 、 q 轴电流预测值。

电阻参数失配时, 定义 $\mu_R = \Delta R/R$ 。不同 μ_R 下, 增量式模型的 dq 轴电流预测误差绝对平均值如图 5 所示。

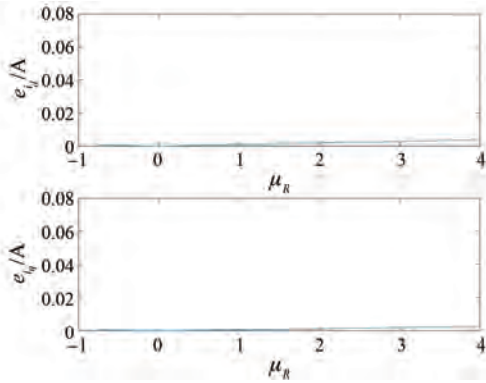


图 5 电阻参数失配时增量式模型的 dq 轴电流预测误差绝对平均值

Fig. 5 Absolute mean of dq -axis current prediction errors for incremental model with resistance parameter mismatch

由图 5 可知, 电阻参数失配时, 增量式模型的 dq 轴电流预测误差绝对平均值均近似为零。

2.2 d 轴电感参数失配

d 轴电感失配时, 忽略定子电阻和 q 轴电感的影响, 即 $\Delta R = \Delta L_q = 0$, 则式(12)可改写为

$$\begin{cases} e_d = i_d(k+1) - i_{d0}(k+1) \approx \\ \frac{T_s \Delta L_d}{L_d(L_d + \Delta L_d)} [u_d(k) - u_d(k-1)] \\ e_q = i_q(k+1) - i_{q0}(k+1) = \\ \frac{T_s \Delta L_d}{L_q} \omega_e(k) [i_d(k) - i_d(k-1)] \approx 0 \end{cases} \quad (15)$$

由式(15)可知, d 轴电感参数失配时, e_d 与 ΔL_d 及相邻时刻 d 轴电压分量差值密切相关; e_q 与电阻失配情况类似, 近似为零。

d 轴电感参数失配时, 定义 $\mu_{L_d} = \Delta L_d/L_d$ 。不同 μ_{L_d} 下, 增量式模型的 dq 轴电流预测误差绝对平均值如图 6 所示。

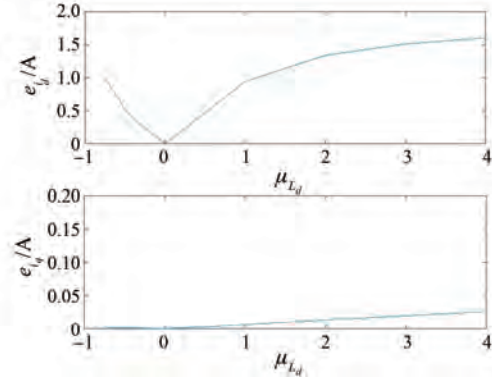


图 6 d 轴电感参数失配时增量式模型的 dq 轴电流预测误差绝对平均值

Fig. 6 Absolute mean of dq -axis current prediction errors for incremental model with d -axis inductance parameter mismatch

由图 6 可知, d 轴电感失配会导致 d 轴电流出现较大预测误差, 而 q 轴电流预测误差近似为零。

2.3 q 轴电感参数失配

q 轴电感失配时, 忽略定子电阻和 d 轴电感的影响, 即 $\Delta R = \Delta L_d = 0$, 则式(12)可改写为

$$\begin{cases} e_d = i_d(k+1) - i_{d0}(k+1) = \\ - \frac{T_s \Delta L_q}{L_d} \omega_e(k) [i_q(k) - i_q(k-1)] \approx 0 \\ e_q = i_q(k+1) - i_{q0}(k+1) \approx \\ \frac{T_s \Delta L_q}{L_q(L_q + \Delta L_q)} [u_q(k) - u_q(k-1)] \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)可知, q 轴电感参数失配时, e_q 与 ΔL_q 及相邻时刻 q 轴电压分量差值密切相关; e_d 与电阻失配情况类似, 近似为零。

q 轴电感参数失配时, 定义 $\mu_{L_q} = \Delta L_q/L_q$ 。不同 μ_{L_q} 下, 增量式模型的 dq 轴电流预测误差绝对平均值如图 7 所示。

由图 7 可知, q 轴电感失配会导致 q 轴电流出现较大预测误差, 而 d 轴电流预测误差近似

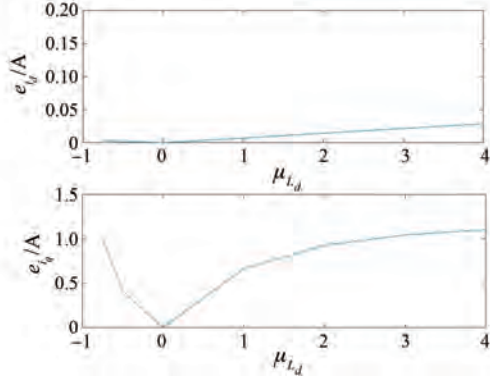


图7 q 轴电感参数失配时增量式模型的 dq 轴
电流预测误差绝对平均值

Fig.7 Absolute mean of dq -axis current prediction
errors for incremental model with q -axis
inductance parameter mismatch

为零。

综上可知,增量式模型中不含转子磁链参数,电阻参数失配对电流预测结果影响极小, d 、 q 轴电感参数失配分别对 d 、 q 轴电流预测产生较大影响。因此, dq 轴电感参数对 PMSM 增量式 MPCC 性能影响较大,电阻参数影响可忽略不计。

3 基于 MRAS 的电机参数辨识

增量式电流预测模型需要辨识 dq 轴电感和定子电阻 3 个参数,定子 dq 轴电流方程仅有两秩,依然存在欠秩问题。上文研究表明,电阻参数失配对增量式 MPCC 性能影响较小,无需精确辨识,则仅需辨识 dq 轴电感两个参数,从而避免欠秩问题。本文基于 MRAS 对 dq 轴电感进行辨识。

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,将输出的电机参考电流和可调电流误差及电压 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,再将这些变量输入可调模型,实现电机参数的实时更新。

将增量式电流预测模型改写为矩阵形式,如式(17)所示:

$$\begin{bmatrix} \Delta i_d(k+1) \\ \Delta i_q(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{T_s R}{L_d} & T_s \omega_e \frac{L_q}{L_d} \\ -T_s \omega_e \frac{L_d}{L_q} & 1 - \frac{T_s R}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d(k) \\ \Delta i_q(k) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \frac{T_s}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{T_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: $\Delta i_d(k+1) = i_d(k+1) - i_d(k)$; $\Delta i_q(k+1) = i_q(k+1) - i_q(k)$; $\Delta u_d = u_d(k) - u_d(k-1)$; $\Delta u_q = u_q(k) - u_q(k-1)$ 。

基于式(17)可得增量式模型状态方程如式(18)所示:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \omega_e \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega_e \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: Δi_d 、 Δi_q 和 Δu_d 、 Δu_q 分别为参考模型前后两时刻的 d 、 q 轴电流和电压差值。

基于式(18)构造参数可调模型,如式(19)所示:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\Delta i}_d \\ \hat{\Delta i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{\hat{L}_d} & \omega_e \frac{\hat{L}_q}{\hat{L}_d} \\ -\omega_e \frac{\hat{L}_d}{\hat{L}_q} & -\frac{R}{\hat{L}_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\Delta i}_d \\ \hat{\Delta i}_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\hat{L}_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\hat{L}_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_d \\ \Delta u_q \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中: $\hat{\Delta i}_d$ 、 $\hat{\Delta i}_q$ 和 $\hat{L}_d$ 、 $\hat{L}_q$ 分别为可调模型前后两时刻的 d 、 q 轴电流差值和电感辨识值。

将参考模型减去可调模型,可得误差状态方程,如式(20)所示:

$$\frac{d}{dt} \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{A} \boldsymbol{\varepsilon} - \mathbf{w} \quad (20)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_d \quad \varepsilon_q]^T = [\Delta i_d - \hat{\Delta i}_d \quad \Delta i_q - \hat{\Delta i}_q]^T$; $\mathbf{w} = -(\mathbf{A} - \hat{\mathbf{A}}) \hat{\Delta i} - (\mathbf{B} - \hat{\mathbf{B}}) \Delta u$, $\hat{\Delta i} = [\hat{\Delta i}_d \quad \hat{\Delta i}_q]^T$, $\mathbf{A} =$

$$\begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \omega_e \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega_e \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{\hat{L}_d} & \omega_e \frac{\hat{L}_q}{\hat{L}_d} \\ -\omega_e \frac{\hat{L}_d}{\hat{L}_q} & -\frac{R}{\hat{L}_q} \end{bmatrix}, \mathbf{B} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\hat{L}_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\hat{L}_q} \end{bmatrix}.$$

基于 Popov 超稳定性理论设计模型参考参数自适应律, 将 MRAS 转化为前向通路线性定常, 反馈通路非线性时变的标准形式如图 8 所示。

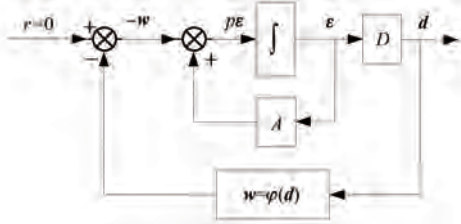


图 8 转变后的 MRAS

Fig. 8 Transformed MRAS

图 8 中, w 为非线性反馈回路的输出; d 为线性定常前向通路的输出, $d = \varepsilon$; D 为补偿器; $r = 0$, 表示参考输入为 0; $w = \varphi(d)$ 为参数辨识自适应律。

令 D 为单位矢量, 则系统前向通路严格正实。为保证系统的全局稳定, 利用 Popov 超稳定性理论对 MRAS 进行设计。如果非线性反馈系统满足积分不等式 (21), 则系统是超稳定的。

$$\forall t > 0, \eta(0, t) = \int_0^t \mathbf{w}^T \mathbf{d} dt \geq -\gamma^2 \quad (21)$$

式中: γ 为有限正实数且与时间 t 无关。

将 d 和 w 代入式 (21), 可得:

$$\begin{aligned} \forall t > 0, \eta(0, t) = \\ -\int_0^t [(\mathbf{A} - \hat{\mathbf{A}}) \Delta \hat{\mathbf{i}} + (\mathbf{B} - \hat{\mathbf{B}}) \Delta \mathbf{u}]^T \varepsilon dt \geq -\gamma^2 \end{aligned} \quad (22)$$

将式 (22) 分解为 $\eta_1(0, t_0)$ 和 $\eta_2(0, t_0)$ 两个部分, 则求解不等式 (22) 可转变为求解不等式 $\eta_1(0, t_0) \geq -\gamma_1^2$ 与不等式 $\eta_2(0, t_0) \geq -\gamma_2^2$, 如式 (23) 所示:

$$\begin{cases} \eta_1(0, t_0) = -\int_0^{t_0} [(\mathbf{A} - \hat{\mathbf{A}}) \Delta \hat{\mathbf{i}}]^T \varepsilon dt \geq -\gamma_1^2 \\ \eta_2(0, t_0) = -\int_0^{t_0} [(\mathbf{B} - \hat{\mathbf{B}}) \Delta \mathbf{u}]^T \varepsilon dt \geq -\gamma_2^2 \end{cases} \quad (23)$$

当非线性时变反馈系统达到稳定状态, 式 (23) 中 $\eta_1(0, t_0) \geq -\gamma_1^2$ 和 $\eta_2(0, t_0) \geq -\gamma_2^2$ 应全部

成立, 则 $\eta_1(0, t_0) \geq -\gamma_1^2$ 和 $\eta_2(0, t_0) \geq -\gamma_2^2$ 中任意一个表达式都可推导出参数自适应律。对比发现, $\eta_2(0, t_0) \geq -\gamma_2^2$ 不含参数 L_d 和 L_q 的耦合项。因此, 根据 $\eta_2(0, t_0) \geq -\gamma_2^2$ 推导参数 L_d 、 L_q 辨识的自适应律更为简单。

将 $\eta_2(0, t_0) \geq -\gamma_2^2$ 进一步分解可得:

$$\int_0^{t_0} \left(\frac{1}{\hat{L}_d} - \frac{1}{L_d} \right) \varepsilon_d \Delta u_d dt \geq -\gamma_3^2 \quad (24)$$

$$\int_0^{t_0} \left(\frac{1}{\hat{L}_q} - \frac{1}{L_q} \right) \varepsilon_q \Delta u_q dt \geq -\gamma_4^2 \quad (25)$$

为了保证式 (24) 成立, 选择 PI 形式, 可得 d 轴电感辨识的自适应律为

$$\frac{1}{\hat{L}_d} = \left(K_{p-d} + \frac{K_{i-d}}{s} \right) \varepsilon_d \Delta u_d + \frac{1}{L_d(0)} \quad (26)$$

式中: K_{p-d} 、 K_{i-d} 分别为 d 轴比例、积分参数; $L_d(0)$ 为 d 轴电感初始值

同理, 为了保证式 (25) 成立, 可得 q 轴电感辨识的自适应律为

$$\frac{1}{\hat{L}_q} = \left(K_{p-q} + \frac{K_{i-q}}{s} \right) \varepsilon_q \Delta u_q + \frac{1}{L_q(0)} \quad (27)$$

式中: K_{p-q} 和 K_{i-q} 分别为 q 轴比例、积分参数; $L_q(0)$ 为 q 轴电感初始值。

综上所述, 虽然定子电阻对增量式 MPCC 的影响较小, 无需辨识, MRAS 仅需辨识定子 dq 轴电感, 但 MRAS 可调模型需设置电阻参数。因此, 需考虑 MRAS 中电阻参数设定不准确对于电感参数辨识的影响。

4 仿真验证

根据 dq 轴电流建立基于 MRAS 的定子 dq 轴电感辨识的 PMSM 增量式 MPCC 系统仿真模型, 将 dq 轴电感辨识结果用于增量式电流预测模型。仿真条件保持不变。对于 MRAS 参数辨识系统, 为保证较小的辨识误差, K_p 取值应较小; 为保证较快的辨识速度, K_i 取值应较大, 但 K_i 过大会导致辨识误差增大。综合考虑辨识准确性与快速性, 通过多次试验, 最终确定用于定子 dq 轴电感辨识的 PI 参数均为 $K_p = 0.01$ 、 $K_i = 500$ 。MRAS 可根据系统当前的参数估计值与实际响应之间的差异, 自动调整参数估计值, 最终使参数估计值稳定在正确值附近。因此, 定子 dq 轴电感初始值设置对辨识结果影响不

大。本文设置定子 dq 轴电感初始值均为 0.01 H。

4.1 电阻参数匹配

增量式 MPCC 与 MRAS 模型设定的电阻值与电机实际电阻值匹配时,基于 MRAS 的 dq 轴电感辨识结果如图 9 和图 10 所示。

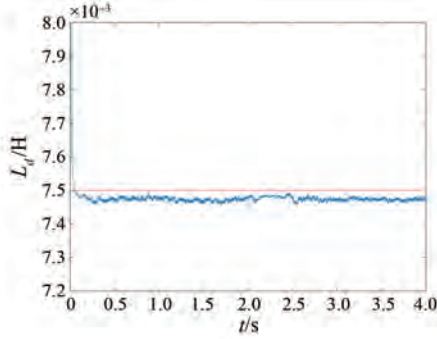


图 9 电阻参数匹配时 d 轴电感辨识结果

Fig. 9 d -axis inductance identification result with resistance parameter match

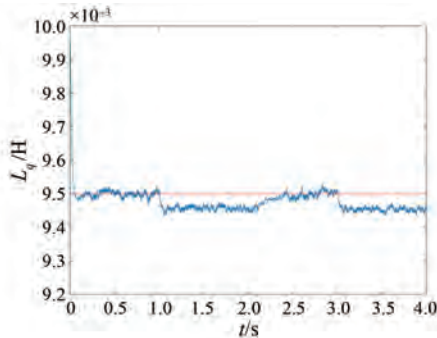


图 10 电阻参数匹配时 q 轴电感辨识结果

Fig. 10 q -axis inductance identification result with resistance parameter match

定义 MRAS 辨识的 d, q 轴电感的平均误差率 η_{L_d}, η_{L_q} 为

$$\eta_{L_d} = \frac{\sum_{n=1}^N \left| \frac{L_{d_real} - L_{d_estimate}}{L_{d_real}} \right|}{N} \times 100\% \quad (28)$$

$$\eta_{L_q} = \frac{\sum_{n=1}^N \left| \frac{L_{q_real} - L_{q_estimate}}{L_{q_real}} \right|}{N} \times 100\% \quad (29)$$

式中:下标 real、estimate 分别为真实值、MRAS 辨识值。

根据式(28)和式(29)得到 MRAS 辨识的 d, q 轴电感的平均误差率如表 3 所示。

由表 3 可知,电阻参数匹配时,MRAS 可以实现对 dq 轴电感的快速辨识,准确率均较高。

表 3 电阻参数匹配时 d, q 轴电感辨识平均误差率

Tab. 3 Average error rate of d and q -axis inductance identification with resistance parameter match

$\eta_{L_d}/\%$	$\eta_{L_q}/\%$
0.39	0.31

采用 MRAS 参数辨识和参数完全匹配的 PMSM MPCC 系统性能如表 4 所示。

表 4 MRAS 参数辨识和参数匹配的 PMSM MPCC 性能

Tab. 4 PMSM MPCC performance of MRAS parameter identification and parameter matching

模型参数	I_{d_RMSE}/A	I_{q_RMSE}/A	f_{ave}/kHz
参数匹配	0.924 7	0.806 4	6.25
MRAS 辨识	0.917 5	0.812	6.22

运行基于 MRAS 的 MPCC,同时并行运行参数完全匹配的 MPCC。经统计,此时输出电压矢量不一致率 η_{v_s} 仅为 0.38%。由此可知,采用 MRAS 参数辨识的 MPCC 与参数完全匹配的 MPCC 的控制效果基本相当。

4.2 电阻参数失配

将增量式 MPCC 和 MRAS 模型的电阻值分别设定为实际参数的 5 倍和 0.2 倍,此时模型电阻与实际电阻值失配。得到电阻参数失配时,基于 MRAS 的 dq 轴电感辨识结果如图 11 ~ 图 14 所示。

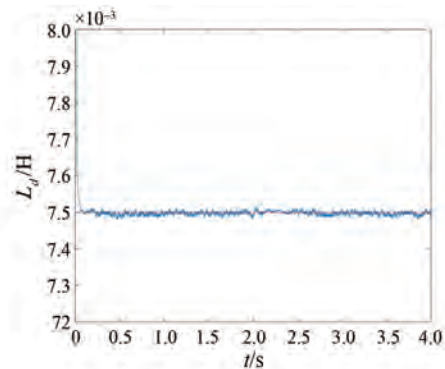


图 11 模型电阻为 $5R$ 下 d 轴电感辨识结果

Fig. 11 Identification results of d -axis inductance with model resistance of $5R$

电阻参数失配时,MRAS 辨识 d, q 轴电感的平均误差率如表 5 所示。

由表 5 可知,电阻参数失配时,MRAS 对 d, q 轴电感的辨识准确率依然较高,与模型电阻参数匹配情况下的辨识结果基本相当。

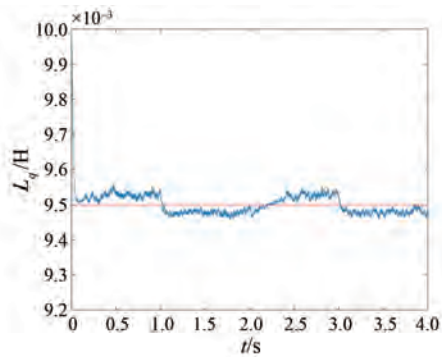


图 12 模型电阻为 $5R$ 下 q 轴电感辨识结果

Fig. 12 Identification results of q -axis inductance with model resistance of $5R$

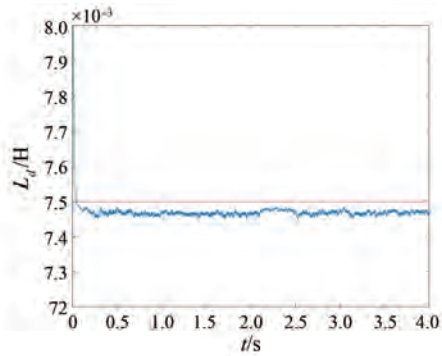


图 13 模型电阻为 $0.2R$ 下 d 轴电感辨识结果

Fig. 13 Identification results of d -axis inductance with model resistance of $0.2R$

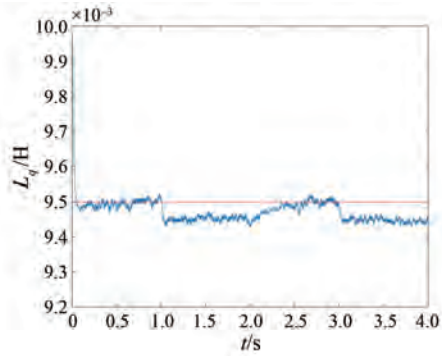


图 14 模型电阻为 $0.2R$ 下 q 轴电感辨识结果

Fig. 14 Identification results of q -axis inductance with model resistance of $0.2R$

表 5 电阻参数失配时 d 、 q 轴电感辨识平均误差率

Tab. 5 Average error rate of d and q -axis inductance identification with resistance parameter mismatch		
电阻参数	$\eta_{L_d}/\%$	$\eta_{L_q}/\%$
$5R$	0.11	0.25
$0.2R$	0.47	0.35

电阻参数失配下, 基于 MRAS 的 PMSM MPCC 系统性能如表 6 所示。

电阻参数失配时, 运行基于 MRAS 的 MPCC, 同时并行运行参数完全匹配的 MPCC, 此时输出电压矢量不一致率如表 7 所示。

表 6 电阻参数失配下基于 MRAS 的 PMSM MPCC 性能

Tab. 6 Performance of MRAS-based PMSM MPCC with resistance parameter mismatch			
电阻参数	I_{d_RMSE}/A	I_{q_RMSE}/A	f_{ave}/kHz
$5R$	0.920 4	0.814 2	6.23
$0.2R$	0.922 2	0.813	6.23

表 7 输出电压矢量不一致率

Tab. 7 Output voltage vector inconsistency	
电阻参数	$\eta_{V_s}/\%$
$5R$	0.49
$0.2R$	0.42

由表 7 可知, 模型电阻参数失配时基于 MRAS 的增量式 MPCC 与电阻参数匹配的 MPCC 的控制效果基本相当, 两者输出电压矢量基本一致。

综上所述, MRAS 可精确辨识 d 、 q 轴电感参数。虽然 MRAS 控制模型需要设置电阻参数, 但电阻参数失配对 d 、 q 轴电感的辨识结果影响较小。MRAS 控制模型与增量式电流预测模型的电阻参数失配对模型预测控制性能基本无影响。

5 实时性验证

基于 STM32 单片机平台, 对增量式 MPCC 与 MRAS 参数辨识的增量式 MPCC 进行实时性验证。单片机实时性验证参数与仿真电机参数一致, 输入数据来自仿真数据, 如表 8 所示。

表 8 实时性测试输入数据

Tab. 8 Real-time test input data	
参数名称	参数值
q 轴参考电流/A	-16.97
d 轴参考电流/A	0
上一时刻 d 轴实际电流/A	1.14
上一时刻 q 轴实际电流/A	-17.46
当前时刻 d 轴实际电流/A	0.94
当前时刻 q 轴实际电流/A	-16.5
当前时刻转子电角速度/ $(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	167.56
当前时刻转子电角度/rad	264.41

将 PMSM 控制算法单步循环 10 000 次,并记录总运行时间,共进行 3 组试验,取平均值作为算法运行时间。

增量式 MPCC 与 MRAS 参数辨识的增量式 MPCC 运行时间对比如表 9 所示。

表 9 不同策略的运行时间对比

Tab. 9 Runtime comparison of different strategies

控制策略	运行时间/ms
增量式 MPCC	87.3
MRAS 参数辨识的增量式 MPCC	100.97

实时性结果表明,增量式 MPCC 在加入 MRAS 参数辨识后,算法耗时增大有限,没有过多增加计算负担。

6 结语

(1)基于增量式 MPCC 与基于传统 MPCC 的 PMSM 控制性能基本相当,但增量式 MPCC 可消除磁链参数,仅需辨识 d 、 q 轴电感和定子电阻 3 个参数。

(2)对于增量式模型, d 轴电感失配会导致 d 轴电流出现较大预测误差, q 轴电感失配会导致 q 轴电流出现较大预测误差,电阻参数变化对控制效果基本无影响。因此,可不辨识电阻参数,通过 dq 轴电流辨识 dq 轴电感两个参数,避免参数辨识的欠秩问题。

(3)MRAS 可精确辨识 dq 轴电感参数。虽然 MRAS 控制模型需要设置电阻参数,但电阻参数失配对 dq 轴电感的辨识结果影响较小。MRAS 控制模型与增量式电流预测模型的电阻参数失配对模型预测控制性能基本无影响。

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、王钦政、王自臣进行了仿真研究,高赛、种国臣、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, Wang Qinzhen and Wang Zichen. The manuscript was revised by Gao Sai, Chong Guochen, 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] 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] 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.
- [5] YOUNG H A, PEREZ M A, RODRIGUEZ 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.
- [6] 殷恺轩, 高琳, 付文华, 等. 永磁同步电机的改进模型预测自抗扰前馈控制[J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(4): 29-38.
YIN K X, GAO L, FU W H, et al. An improved

- prediction control model for PMSM with active disturbance rejection and feed-forward control strategy [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(4): 29-38.
- [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] ZHOU C H, ZHANG Y C, YANG H T. Model-free predictive control of motor drives: A review [J]. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, 2025, 9(1): 2096-3564.
- [9] 李耀华, 种国臣, 刘子焜, 等. 基于二阶超局部模型的永磁同步电机两步无模型预测电流控制[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(12): 39-49.
- LI Y H, CHONG G C, LIU Z K, et al. Two-step model-free predictive current control for permanent magnet synchronous motor based on second-order ultralocal model [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(12): 39-49.
- [10] 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.
- [11] 石建飞, 戈宝军, 吕艳玲, 等. 永磁同步电机在线参数辨识方法研究[J]. *电机与控制学报*, 2018, 22(3): 17-24.
- SHI J F, GE B J, LYU Y L, et al. Research of parameter identification of permanent magnet synchronous motor on line [J]. *Electric Machines and Control*, 2018, 22(3): 17-24.
- [12] 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.
- [13] 李耀华, 郭伟超, 种国臣, 等. 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 [J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(6): 596-607.
- LI Y H, GUO W C, CHONG G C, et al. The FCS-MPCC for PMSM based on MRAS parameter identification [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(6): 596-607.
- [14] 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.
- [15] 肖曦, 许青松, 王雅婷, 等. 基于遗传算法的内埋式永磁同步电机参数辨识方法[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(3): 21-25.
- XIAO X, XU Q S, WANG Y T, et al. Parameter identification of interior permanent magnet synchronous motors based on genetic algorithm [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(3): 21-25.
- [16] 刘细平, 胡卫平, 丁卫中, 等. 永磁同步电机多参数辨识方法研究[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(6): 1198-1207.
- LIU X P, HU W P, DING W Z, et al. Research on multi-parameter identification method of permanent magnet synchronous motor [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(6): 1198-1207.
- [17] 何静, 唐润忠, 张昌凡, 等. 基于 Adaline 神经网络参数辨识的 PMSM 鲁棒电流预测控制[J]. *电机与控制学报*, 2023, 27(4): 127-139.
- HE J, TANG R Z, ZHANG C F, et al. Robust current predictive control for PMSM based on Adaline neural network parameter identification [J]. *Electric Machines and Control*, 2023, 27(4): 127-139.
- [18] ZHANG X, YU X, ZHANG G. Adaptive model predictive current control for PMSM drives based on Bayesian inference [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2025, 40(6): 8490-8502.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 杨宗军,王莉娜. 表贴式永磁同步电机的多参数在线辨识[J]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 111-118.
- YANG Z J, WANG L N. Online multi-parameter identification for surface-mounted permanent magnet synchronous motors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(3): 111-118.
- [22] 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.
- [23] 姚绪梁,黄乘齐,王景芳,等. 具有参数辨识功能的永磁同步电机双矢量模型预测电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 9319-9330.
- YAO X L, HUANG C Q, WANG J F, et al. A two-vector-based model predictive current control with online parameter identification for PMSM drives [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 9319-9330.
- [24] 金宁治,周凯,HEBERT H I. 带有自适应参数辨识的IPMSM MTPA控制[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(7): 90-101.
- JIN Y Z, ZHOU K, HEBERT H I. Model reference adaptive identification based MTPA control method for interior PM synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(7): 90-101.
- [25] 孙凯翔,胡兆稳,阚超豪,等. 基于满秩辨识方程的内置式永磁同步电机多参数在线辨识[J]. 电子测量技术, 2018, 41(24): 112-118.
- SUN K X, HU Z W, KAN C H, et al. Full rank identification equation based multi-parameter online identification for interior permanent magnet synchronous motors [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(24): 112-118.
- [26] BUI M X, RAHMAN M F, GUAN D, et al. A new and fast method for on-line estimation of d and q axes 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.
- [27] 张硕,孙永禄,赵明威,等. PMSM 电流鲁棒性增量预测控制[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(10): 1073-1079.
- ZHANG S, SUN Y L, ZHAO M W, et al. PMSM current robust incremental predictive control [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(10): 1073-1079.
- [28] LI H F, SHAO J Y, LIU Z Y. Incremental model predictive current control for PMSM with online compensation for parameter mismatch [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(2): 1050-1059.
- [29] ZHANG X G, WANG Z W. Simple robust model predictive current control for PMSM drives without flux-linkage parameter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(4): 3515-3524.
- [30] 李耀华,杨启东,曲亚飞. 自适应变电压矢量PMSM直接转矩控制开关表[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(9): 73-83.
- 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): 73-83.

收稿日期:2025-05-20

收到修改稿日期:2025-07-03

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。