

基于虚拟信号注入的永磁同步电机增量式 模型预测电流控制 MTPA 研究

李耀华¹, 郭伟超¹, 王钦政¹, 种国臣¹, 王自臣¹, 高 赛¹, 吴步昊^{2*}

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064;

2. 青海职业技术大学 青海省高原汽车电动化与智能化技术重点实验室, 青海 西宁 810016)

Research on Incremental MPCC for PMSM Based on Virtual Signal Injection MTPA

Li Yaohua¹, Guo Weichao¹, Wang Qinzhen¹, Chong Guochen¹, Wang Zichen¹,
Gao Sai¹, Wu Buhao^{2*}

(1. School of Automotive, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Qinghai Plateau Key Laboratory of Automotive Electrification and Intelligentization Technology,
Qinghai Vocational and Technical University, Xining 810016, China)

Abstract: [Objective] In order to reduce the dependence of maximum torque per ampere (MTPA) control of permanent magnet synchronous motor (PMSM) on motor parameters, the incremental model predictive current control (MPCC) MTPA for PMSM based on virtual signal injection is established in this paper. And model reference adaptive system (MRAS) is used to identify parameters to improve parameters robustness. [Methods] The traditional formula method was adopted to achieve MTPA, which required three parameters—stator dq -axis inductance and rotor flux. However, mismatches in these three parameters all had a large impact on the MTPA calculation results. An incremental MPCC for PMSM was established, which required three parameters—stator dq -axis inductance and stator resistance. Among them, the mismatch in stator resistance had a relatively small impact. The virtual signal injection method was adopted to achieve MTPA, which required two parameters—stator d -axis inductance and stator resistance. Among them, the mismatch in stator d -axis inductance had a large impact, while the mismatch in stator resistance had a small impact. In summary, an MTPA based on virtual signal injection combined with incremental MPCC for PMSM was established, and the MRAS was adopted to identify the stator

dq -axis inductances. The identified parameters were used in both the incremental model predictive current control and the virtual signal injection MTPA to improve parameter robustness. A simulation model was built based on Matlab/Simulink, and the above methods were simulated and analyzed. [Results] The incremental MPCC for PMSM based on the virtual signal injection MTPA adopted MRAS to identify dq -axis stator inductance. Under both matched and mismatched parameter conditions, the error of the current vector angle β_{MTPA} calculated by the virtual signal injection MTPA was small, and the impact of stator resistance mismatch was small. [Conclusion] The virtual signal injection MTPA only requires d -axis stator inductance and stator resistance, has low parameter dependency, and the impact of stator resistance mismatch is small. The incremental MPCC MTPA for PMSM based on virtual signal injection requires only the identification of the dq -axis inductances. The virtual signal injection MTPA using MRAS for parameter identification has a small error, which improves parameter robustness.

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

基金项目: 青海职业技术大学青海省高原汽车电动化与智能化技术重点实验室开放基金 (QZDSZ03-202502)

Open fund of Qinghai Plateau Key Laboratory of Automotive Electrification and Intelligentization Technology (QZDSZ03-202502)

摘 要: [目的] 为了降低永磁同步电机 (PMSM) 最大转矩电流比控制 (MTPA) 对电机参数的依赖, 本文建立基于虚拟信号注入的永磁同步电机增量式模型预测电流控制

MTPA, 并采用模型参考自适应系统(MRAS)实现参数辨识, 提高参数鲁棒性。【方法】采用传统公式法实现 MTPA, 其需要定子 dq 轴电感和转子磁链 3 个参数, 但这 3 个参数失配对 MTPA 计算结果影响均较大。建立永磁同步电机增量式模型预测电流控制系统, 其需要定子 dq 轴电感和定子电阻 3 个参数, 其中定子电阻参数失配影响较小。采用虚拟注入法实现 MTPA, 其需要定子 d 轴电感和定子电阻 2 个参数, 其中定子 d 轴电感影响较大, 定子电阻失配影响较小。综上, 建立基于虚拟信号注入的永磁同步电机增量式模型预测电流控制 MTPA, 并采用模型参考自适应系统对定子 dq 轴电感进行辨识, 将辨识参数用于增量式模型预测电流控制和虚拟信号注入法 MTPA, 以提高参数鲁棒性。基于 Matlab/Simulink 建立仿真模型, 对上述方法进行仿真分析。【结果】基于虚拟信号注入法 MTPA 的增量式模型预测电流控制采用 MRAS 仅需辨识 dq 轴电感这 2 个参数。采用 MRAS 参数辨识, 在参数匹配和失配情况下, 虚拟信号注入法 MTPA 计算得到的电流矢量角 β_{MTPA} 误差较小, 定子电阻参数失配影响较小。【结论】虚拟信号注入法 MTPA 仅需定子 d 轴电感和定子电阻这两个参数, 参数依赖性小, 且定子电阻失配影响较小。基于虚拟信号注入的永磁同步电机增量式模型预测电流控制 MTPA 仅需辨识 dq 轴电感。采用 MRAS 辨识参数的虚拟信号注入法 MTPA 的误差较小, 提升了参数鲁棒性。

关键词: 永磁同步电机; 模型预测电流控制; 参数辨识; 虚拟信号注入; 模型参考自适应系统

0 引言

内置式永磁同步电机通过最大转矩电流比控制可在相同定子电流下输出最大转矩, 提高电机运行效率^[1-3]。采用理论推导的公式法以电机同步旋转坐标系下数学模型为基础, 计算得到不同负载下的电流矢量角, 进而计算出 dq 轴电流参考值, 实现 MTPA。但公式法计算过程需要定子 dq 轴电感和转子磁链参数, 电机参数依赖性强, 参数失配会产生较大的误差。为了降低 MTPA 控制对电机参数的依赖, 可采用信号注入法。根据注入信号形式, 可分为真实信号注入法和虚拟信号注入法。真实信号注入法中, 注入的高频信号会流入电机, 从而给系统带来额外损耗和转矩脉动。基于虚拟信号注入的永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) MTPA 控制策略所注入的高频虚拟信号并没有流入电机, 可以

减少所需电机参数^[4-9]。

PMSM 模型预测电流控制 (Model Predictive Current Control, MPCC) 基于转子坐标下电流预测模型, 以定子 dq 轴电流为对象, 无需权重系数, 结构简单, 易于实现, 近年来成为永磁同步电机控制领域的研究热点^[10-13]。但传统电流预测模型需要定子 dq 轴电感、转子磁链和定子电阻等多个参数, 参数依赖性强^[14-15]。为降低参数依赖性, 可采用增量式电流预测模型, 消除转子磁链参数, 减小参数依赖^[16-20]。

虚拟信号注入 MTPA 和增量式模型预测电流控制均可降低参数依赖, 但依然存在参数失配问题。在线辨识电机参数是解决参数失配的有效方法^[21-22]。模型参考自适应系统 (Model Reference Adaptive System, MRAS) 构造两个模型, 一个为不含待辨识参数的参考模型, 一个为含待辨识参数的可调模型, 并将这两个模型输出求差, 将误差输入至自适应率实时调整, 当两者误差为零时, 可调模型等效于参考模型, 实现参数辨识。MRAS 在永磁同步电机参数辨识中得到了广泛应用^[23-27]。

本文建立基于虚拟信号注入的永磁同步电机增量式模型预测电流控制 MTPA 系统, 采用虚拟信号注入法实现 MTPA, 仅需 d 轴电感和定子电阻, 采用增量式电流预测模型减小对转子磁链参数的依赖。仿真分析证明定子电阻对虚拟信号注入法 MTPA 和增量式模型预测电流控制影响较小, 可无需辨识。采用模型参考自适应对电机 dq 轴电感进行辨识, 将辨识参数用于虚拟信号注入法 MTPA 和增量式模型预测电流控制, 实现基于 MRAS 参数辨识的永磁同步电机增量式模型预测电流控制虚拟信号注入法 MTPA。仿真分析表明, 参数匹配和失配下, 基于 MRAS 参数辨识的虚拟信号注入法 MTPA 计算结果误差较小, 可忽略电阻参数影响。

1 基于公式法的永磁同步电机 MTPA

永磁同步电机 MTPA 控制是在定子电流最小的情况下, 通过对定子 dq 轴电流分配, 使得输出电磁转矩最大化的控制方式。

永磁同步电机转矩方程如下式所示:

$$T_e = 1.5p[\psi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (1)$$

式中: T_e 为电机转矩; p 为电机极对数; ψ_f 为转子永磁体磁链; L_d 和 L_q 分别为电机定子 d 、 q 轴电感; i_d 和 i_q 分别为电机定子 d 、 q 轴电流。

定子电流矢量角 β 为定子电流矢量在 dq 轴的角位置,如图 1 所示,其中 I_s 为定子电流幅值。

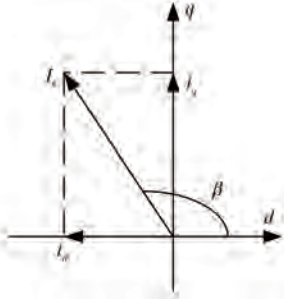


图 1 定子电流矢量角

Fig. 1 Stator current vector angle

由图 1 可知:

$$\begin{cases} i_d = I_s \cos \beta \\ i_q = I_s \sin \beta \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可得:

$$T_e = \frac{3}{2}p[\psi_f I_s \sin \beta + (L_d - L_q) I_s^2 \sin \beta \cos \beta] \quad (3)$$

由式(3)可知,满足 MTPA 的控制条件如下式所示:

$$\begin{cases} \frac{dT_e}{d\beta} = \frac{3}{2}p[\psi_f I_s \cos \beta + (L_d - L_q) I_s^2 \cos 2\beta] = 0 \\ \frac{d^2 T_e}{d\beta^2} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

由此可得,满足最大转矩电流比控制的电流矢量角 β_{MTPA} 如下式所示:

$$\beta_{MTPA} = \arccos \left[\frac{-\psi_f + \sqrt{\psi_f^2 + 8(L_d - L_q)^2 I_s^2}}{4(L_d - L_q) I_s} \right] \quad (5)$$

由式(5)可知,基于公式法实现 MTPA 需要 L_d 、 L_q 和 ψ_f 三个电机参数。

2 基于增量式 MPCC 的永磁同步电机公式法 MTPA

永磁同步电机增量式电流预测模型如下式所示:

$$\begin{cases} i_d(k+1) = \left(2 - \frac{T_s R_s}{L_d}\right) i_d(k) - \left(1 - \frac{T_s R_s}{L_d}\right) i_d(k-1) + T_s \omega_e(k) \frac{L_q}{L_d} [i_q(k) - i_q(k-1)] + \frac{T_s}{L_d} [u_d(k) - u_d(k-1)] \\ i_q(k+1) = \left(2 - \frac{T_s R_s}{L_q}\right) i_q(k) - \left(1 - \frac{T_s R_s}{L_q}\right) i_q(k-1) - T_s \omega_e(k) \frac{L_q}{L_d} [i_d(k) - i_d(k-1)] + \frac{T_s}{L_q} [u_q(k) - u_q(k-1)] \end{cases} \quad (6)$$

式中: $i_d(k)$ 和 $i_q(k)$ 分别为 k 时刻定子 d 、 q 轴电流实际值; $i_d(k-1)$ 、 $i_q(k-1)$ 、 $i_d(k+1)$ 和 $i_q(k+1)$ 分别为 $(k-1)$ 和 $(k+1)$ 时刻定子 d 、 q 轴实际电流; $u_d(k-1)$ 和 $u_q(k-1)$ 为 $(k-1)$ 和 $(k+1)$ 时刻实际施加电压矢量 d 、 q 轴分量; $u_d(k)$ 和 $u_q(k)$ 分别为施加备选电压矢量的 d 、 q 轴分量; R_s 为定子电阻; ω_e 为转子电角速度; T_s 为采样周期。

由式(6)可知,永磁同步电机增量式电流预测模型需要 R_s 、 L_d 和 L_q 三个电机参数。

两电平电压源逆变器的电压矢量如下式所示,其中零电压矢量对应开关状态 000 或 111,以开关次数最小来确定^[28]。

$$\mathbf{V}_s \in \{\mathbf{V}_0, \mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \mathbf{V}_3, \mathbf{V}_4, \mathbf{V}_5, \mathbf{V}_6\} \quad (7)$$

模型预测电流控制成本函数如式(8)所示,式中 $i_d^*(k)$ 和 $i_q^*(k)$ 分别为 k 时刻定子 d 、 q 轴电流参考值。由于采样频率较高,采用当前时刻定子 d 、 q 轴电流参考值近似替代下一时刻参考值。 $g = [i_d(k+1) - i_d^*(k)]^2 + [i_q(k+1) - i_q^*(k)]^2$ (8)

基于增量式模型预测电流控制的永磁同步电机 MTPA 系统如图 2 所示。

基于 MATLAB/Simulink 建立永磁同步电机增量式模型预测电流控制公式法 MTPA 系统仿真模型。仿真模型为离散模型,采样频率为 20 kHz,直流母线电压为 312 V。转速环 PI 控制器参数设

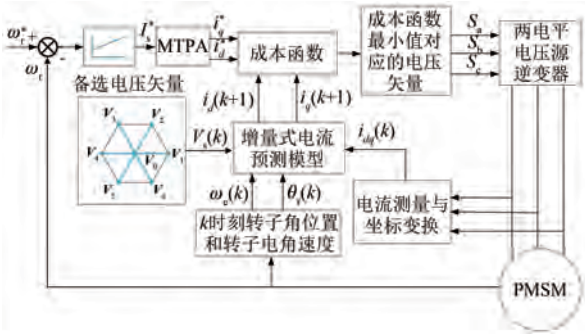


图 2 基于增量式 MPCC 的永磁同步电机 MTPA 系统

Fig. 2 The PMSM MTPA system based on incremental MPCC

置为 $K_p = 5, K_i = 100$, 输出上下限为 $[-30\text{ A}, 30\text{ A}]$ 。参考转速设置为 400 r/min , 负载转矩设置为 $18\text{ N}\cdot\text{m}$ 。仿真用永磁同步电机的参数见表 1。

表 1 仿真用永磁同步电机参数

Tab. 1 Parameters of PMSM used in simulation

参数名称	参数值
定子电阻 R_s/Ω	0.2
d 轴电感 L_d/H	0.007 5
q 轴电感 L_q/H	0.009 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
黏滞阻尼 $F/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})$	0.005

基于增量式模型预测电流控制的永磁同步电机公式法 MTPA 系统仿真结果如图 3~图 5 所示。

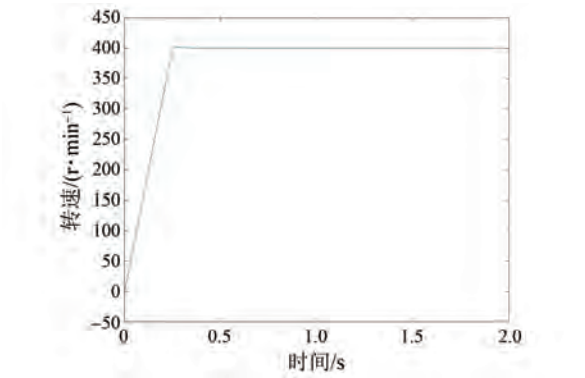


图 3 电机转速

Fig. 3 Speed of motor

运行参数匹配下基于增量式模型预测电流控制的永磁同步电机 MTPA 系统仿真模型,同时并

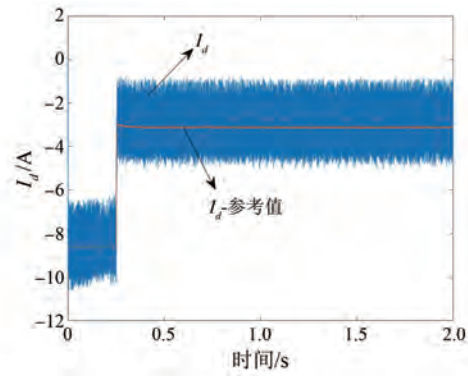


图 4 定子 d 轴电流

Fig. 4 The d -axis current

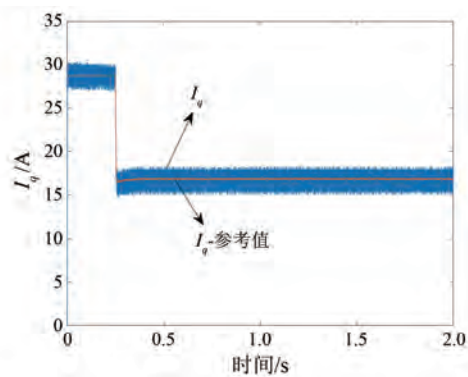


图 5 定子 q 轴电流

Fig. 5 The q -axis current

行计算采用公式法在不同 dq 轴电感和转子磁链参数下的电流矢量角 β_{MTPA} 。相同输入下,参数匹配和参数失配公式法电流矢量角 β_{MTPA} 和电流-转矩输出结果如图 6~图 11 所示。

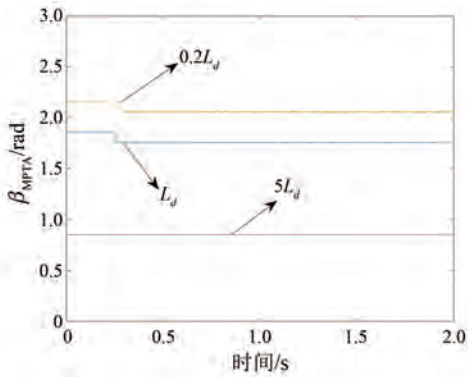
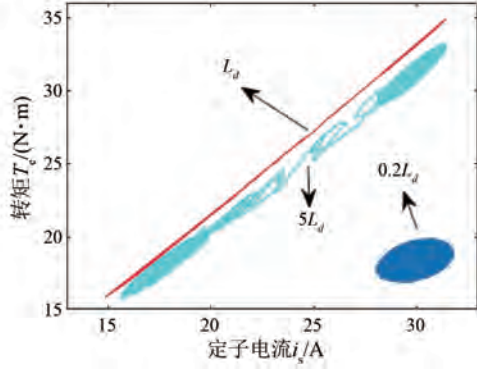
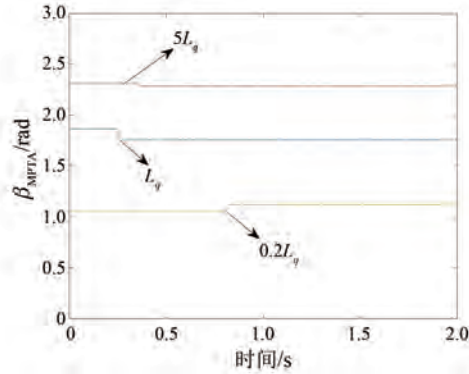
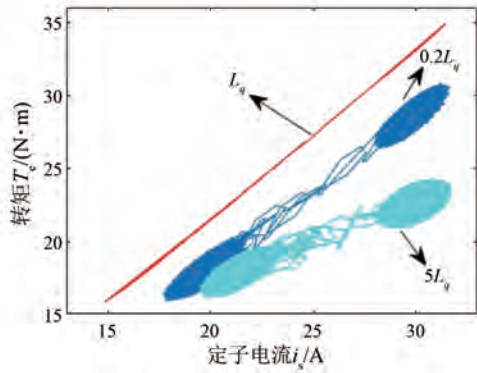


图 6 不同 d 轴电感下的 β_{MTPA}

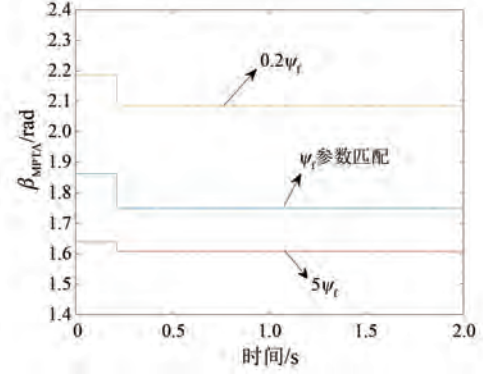
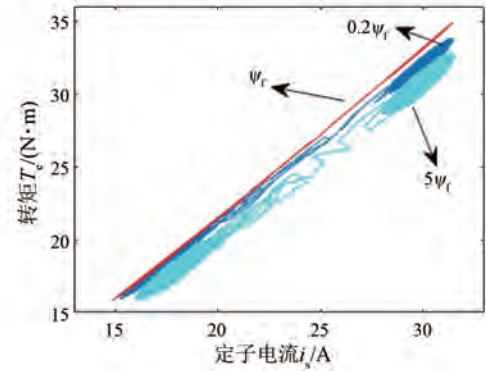
Fig. 6 β_{MTPA} at different d -axis inductance conditions

以参数匹配下公式法计算得到的电流矢量角 β_{MTPA} 为基准,稳态阶段取 $0.5\sim 2\text{ s}$ 。参数失配下电流矢量角 β_{MTPA} 的计算误差如表 2 所示,其中绝

图7 不同 L_d 下的电流-转矩输出结果Fig. 7 The i_s - T_e output results at different L_d conditions图8 不同 q 轴电感下的 β_{MTPA} Fig. 8 β_{MTPA} at different q -axis inductance conditions图9 不同 L_q 下的电流-转矩输出结果Fig. 9 The i_s - T_e output results at different L_q conditions

对误差平均值 $E_{r\beta}$ 和相对误差平均值 η_β 的计算式如式(9)~式(10)所示。式中 β_{MTPA_match} 和 $\beta_{MTPA_mismatch}$ 分别为参数匹配和参数失配下电流矢量角 β_{MTPA} 的值, N 为采样总个数, 本文取 30 000。

$$E_{r\beta} = \left| \frac{\sum (\beta_{MTPA_match} - \beta_{MTPA_mismatch})}{N} \right| \quad (9)$$

图10 不同转子磁链下的 β_{MTPA} Fig. 10 β_{MTPA} at different rotor flux conditions图11 不同 ψ_f 下的电流-转矩输出结果Fig. 11 The i_s - T_e output results at different ψ_f conditions

$$\eta_\beta = \frac{\sum \left| \frac{\beta_{MTPA_match} - \beta_{MTPA_mismatch}}{\beta_{MTPA_match}} \right|}{N} \times 100\% \quad (10)$$

表2 参数失配下公式法电流矢量角 β_{MTPA} 的误差Tab. 2 Error of β_{MTPA} at parameters mismatch

参数名称	$E_{r\beta}$ /rad	η_β /%
$5L_d$	0.900 4	51.32
$0.2 L_d$	0.302 6	17.25
$5L_q$	0.530 9	30.25
$0.2 L_q$	0.645 2	36.78
$5\psi_f$	0.144 1	8.21
$0.2\psi_f$	0.349 0	19.90

由仿真结果可知,公式法计算电流矢量角 β_{MTPA} 所需的 3 个参数 L_d 、 L_q 和 ψ_f 对计算结果影响均较大。参数失配下,公式法计算得到的电流矢量角 β_{MTPA} 误差较大,会影响 MTPA 性能。

3 基于虚拟信号注入法的 MTPA

虚拟信号注入法 MTPA 在控制算法中虚拟注入信号,通过构建注入信号后的电机模型实现对电机的控制,使转矩方程中带有高频信号分量,再利用滤波器对转矩判据进行提取,以实现 MTPA 控制。

设注入高频电流信号 $\Delta\beta$ 如式(11)所示,其中 A 为注入高频电流幅值, ω_h 为注入高频电流频率。

$$\Delta\beta = A\sin(\omega_h t) \quad (11)$$

此时,定子 dq 轴电流如下式所示:

$$\begin{cases} i_d^h = I_s \cos(\beta + \Delta\beta) \\ i_q^h = I_s \sin(\beta + \Delta\beta) \end{cases} \quad (12)$$

将式(12)代入式(1)可得注入虚拟高频信号的电机转矩方程,如下:

$$T_e^h[\beta + A\sin(\omega_h t)] = \frac{3}{2}p[\psi_f + (L_d - L_q)i_d^h]i_q^h \quad (13)$$

永磁同步电机电压和转矩方程如下式所示:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d - \omega_e L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt} \\ u_q = R_s i_q + \omega_e (\psi_f + L_d i_d) + L_q \frac{di_q}{dt} \end{cases} \quad (14)$$

当电机处于稳态时,微分项极小,可以忽略不计,则式(14)可简化为

$$\begin{cases} L_q = -\frac{u_d - R_s i_d}{\omega_e i_q} \\ \psi_f = \frac{u_q - R_s i_q}{\omega_e} - L_d i_d \end{cases} \quad (15)$$

将式(15)代入至式(13)可得含有高频电流信号的电磁转矩方程,如下所示:

$$\begin{aligned} T_e^h[\beta + A\sin(\omega_h t)] = & \frac{3}{2}p \left[\frac{u_q - R_s i_q}{\omega_e} - L_d i_d + \left(L_d + \frac{u_d - R_s i_d}{i_q \omega_e} \right) i_d^h \right] i_q^h = \\ & \frac{3}{2}p \left[\frac{u_q - R_s i_q}{\omega_e} - L_d (i_d - i_d^h) + \frac{u_d - R_s i_d}{i_q \omega_e} i_d^h \right] i_q^h \end{aligned} \quad (16)$$

由式(16)可知,含有高频电流信号的电磁转矩方程仅需 d 轴电感和电阻。将含高频电流信号的电磁转矩通过带通滤波器过滤高频和低频分

量,得到基频分量 T_{BPF} 。将基频分量 T_{BPF} 与 $\sin(\omega_h t)$ 相乘得到二次频率分量 T_h 。二次频率分量 T_h 由正比于 $\partial T_e / \partial \beta$ 的常数项 T_e 与二次注入频率项组成。将二次频率分量 T_h 通过低通滤波器滤除掉二次注入频率项,则可得到与 $\partial T_e / \partial \beta$ 成比例关系的直流分量 T_e ,将其输入到 PI 调节器。当电磁转矩的一阶偏导数 $\partial T_e / \partial \beta$ 项为零时,电机运行在 MTPA 工作点上。当电磁转矩的一阶偏导数 $\partial T_e / \partial \beta$ 项不为零时,电机运行在 MTPA 工作点外, T_e 不为零,PI 调节器将持续进行调节,直到一阶偏导数 $\partial T_e / \partial \beta$ 项等于零为止,使得电机运行在 MTPA 工作点上。

基于虚拟信号注入法的 MTPA 实现过程如图 12 所示。



图 12 基于虚拟信号注入法的 MTPA 实现过程

Fig. 12 The implementation process of MTPA based on virtual signal injection method

建立永磁同步电机增量式模型预测电流控制虚拟信号注入法 MTPA 系统仿真模型,虚拟信号注入法初始设置电流角为 $\pi/2$,注入高频信号为 $0.7\sin(200\pi t)$,PI 参数为 $K_p = 0.01, K_i = 1$ 。仿真条件设置与上文相同,运行参数匹配下永磁同步电机增量式模型预测电流控制虚拟信号注入法 MTPA,同时并行计算参数匹配下公式法电流矢量角 β_{MTPA} 和参数失配下虚拟信号注入法电流矢量角 β_{MTPA} 。不同 d 轴电感和定子电阻下, β_{MTPA} 和电流-转矩的输出结果如图 13~图 18 所示。

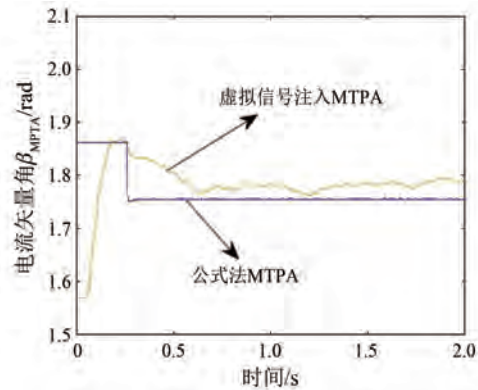


图 13 参数匹配下的 β_{MTPA}

Fig. 13 β_{MTPA} at parameters match

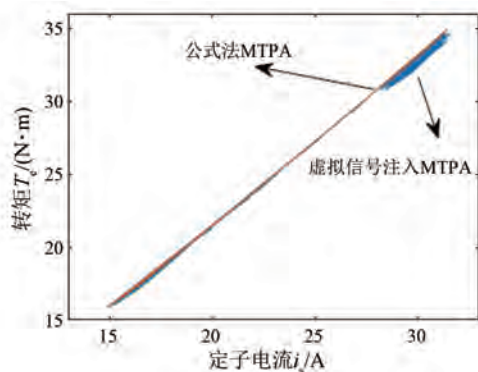
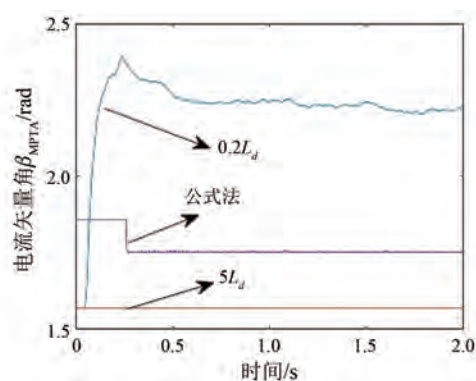
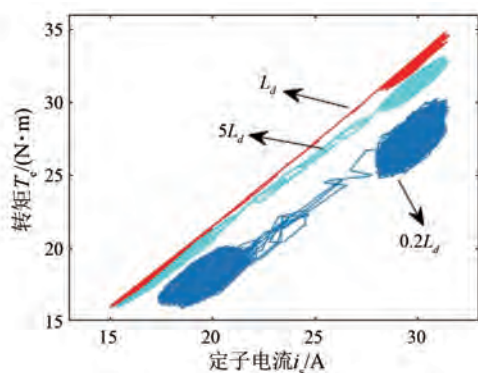


图 14 参数匹配下的电流-转矩输出结果

Fig. 14 The i_s - T_e output results at parameters match图 15 不同 d 轴电感下的 β_{MTPA} Fig. 15 β_{MTPA} at different d -axis stator inductance图 16 不同 d 轴电感下的电流-转矩输出结果Fig. 16 The i_s - T_e output results at different d -axis stator inductance

以参数匹配下公式法计算得到的 β_{MTPA} 为基准,稳态阶段取 0.5~2 s,参数匹配和参数失配下虚拟信号注入法得到的 β_{MTPA} 计算误差见表 3。

由仿真结果可知,参数匹配下,虚拟信号注入法 MTPA 与公式法 MTPA 得到的电流矢量角 β_{MTPA} 和 MTPA 控制效果基本一致,表明参数匹配

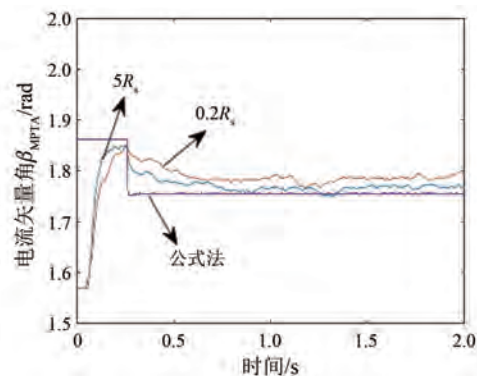
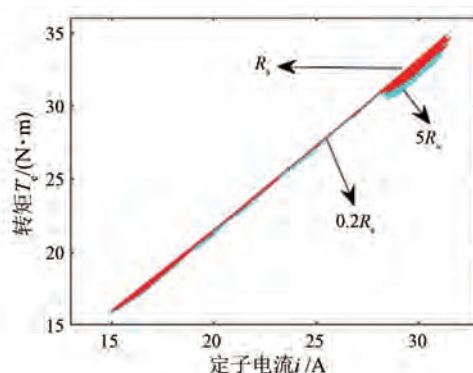
图 17 不同定子电阻下的 β_{MTPA} Fig. 17 β_{MTPA} at different stator resistance

图 18 不同定子电阻下的电流-转矩输出结果

Fig. 18 The i_s - T_e output results at different stator resistance

下,虚拟信号注入法 MTPA 可准确计算得到 β_{MTPA} 。 d 轴电感参数对虚拟信号注入法 MTPA 电流角输出结果和 MTPA 控制效果的影响很大,而定子电阻的影响较小。

表 3 虚拟信号注入法 β_{MTPA} 的计算误差Tab. 3 Error of β_{MTPA} using virtual signal injection

参数名称	E_{β}/rad	$\eta_{\beta}/\%$
匹配	0.0130	0.74
$5L_d$	0.1862	10.60
$0.2 L_d$	0.4396	25.02
$5R_s$	0.0296	1.68
$0.2 R_s$	0.0075	0.43

4 基于 MRAS 定子 dq 轴电感辨识

虚拟信号注入法 MTPA 仅需定子 d 轴电感和定子电阻,且可忽略定子电阻影响。因此,虚拟信号注入法 MTPA 仅需精确获取 d 轴电感参数即

可。增量式模型预测电流控制需要定子 dq 轴电感和定子电阻。研究表明,电阻参数失配对增量式模型预测电流控制性能影响较小,无需精确辨识^[29]。因此,增量式模型预测电流控制仅需精确获取定子 dq 轴电感这两个参数。

综上可知,永磁同步电机增量式模型预测电流控制虚拟信号注入法 MTPA 系统仅需辨识定子 dq 轴电感这两个参数。

MRAS 将电机交直流电压控制信号同时送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的误差及电压交直流信号输入至参数自适应率模块,通过参数自适应率得到可调模型中包含电机参数的变量,再将这些变量送入可调模型,实现电机参数实时更新。

基于 MRAS 的 dq 轴电感辨识的自适应律如式(17)所示:

$$\begin{cases} \frac{1}{\hat{L}_d} = \left(K_{P_d} + \frac{K_{L_d}}{s} \right) \varepsilon_d \Delta u_d + \frac{1}{L_d(0)} \\ \frac{1}{\hat{L}_q} = \left(K_{P_q} + \frac{K_{L_q}}{s} \right) \varepsilon_q \Delta u_q + \frac{1}{L_q(0)} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $\hat{L}_d$ 和 $\hat{L}_q$ 分别为 d 、 q 轴电感的辨识值; K_{P_d} 、 K_{L_d} 、 K_{P_q} 和 K_{L_q} 分别为比例积分参数; ε_d 和 ε_q 分别为参考模型和可调模型前后两时刻的 d 、 q 轴电流差值的偏差; Δu_d 与 Δu_q 分别为参考模型前后两时刻的 d 、 q 轴电压分量差值; $L_d(0)$ 和 $L_q(0)$ 分别为 d 、 q 轴的电感初始值。

这里需要指出,虽然定子电阻对增量式模型预测电流控制及虚拟信号注入法 MTPA 的影响较小,无需辨识,但 MRAS 可调模型需设置电阻参数。研究表明可调模型电阻失配对 dq 轴电感的 MRAS 辨识结果影响较小^[29]。因此,可采用 MRAS 对定子 dq 轴电感进行辨识,增强参数鲁棒性。

5 仿真分析

采用 MRAS 辨识定子 dq 轴电感,将辨识得到的 dq 轴电感用于增量式模型预测电流控制与虚拟注入法 MTPA,从而实现基于 MRAS 参数辨识的永磁同步电机增量式模型预测电流控制虚拟信号注入法 MTPA,同时并行计算采用公式法的电流矢量角 β_{MTPA} ,其中公式法参数保持匹配。在相

同仿真条件和不同电机参数下,基于参数辨识的虚拟信号 MTPA 和参数匹配公式法计算得到的 β_{MTPA} 和电流-转矩输出结果如图 19~图 28 所示。

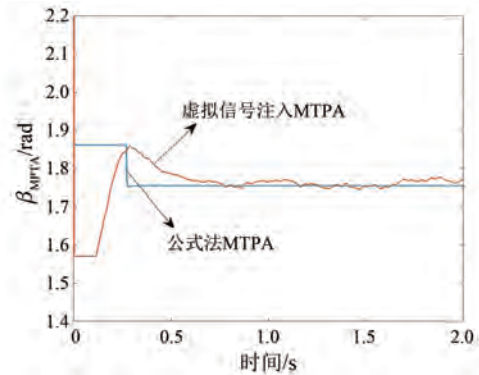


图 19 原参数下的 β_{MTPA}

Fig. 19 β_{MTPA} at unchanged parameters

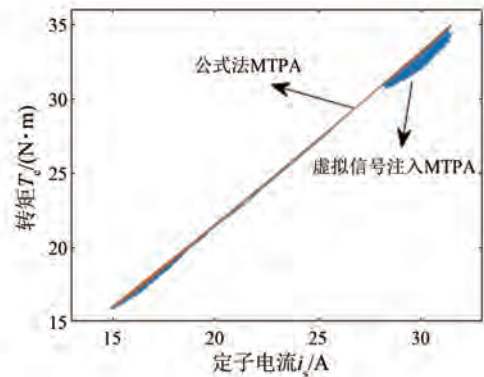


图 20 原参数下电流-转矩输出结果

Fig. 20 The i_s - T_e output results at unchanged parameters

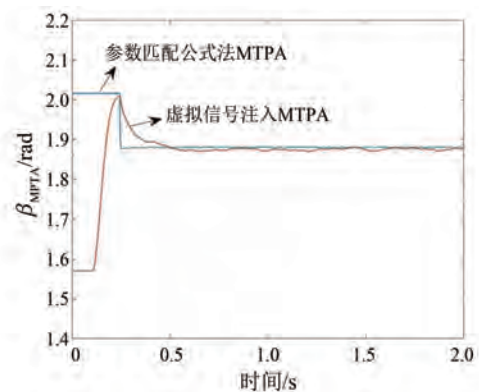


图 21 2 倍 dq 轴电感下 β_{MTPA}

Fig. 21 β_{MTPA} at $2L_d$ and $2L_q$

以参数匹配下公式法计算得到的 β_{MTPA} 为基准,稳态阶段取 0.5~2 s,参数匹配和参数失配下虚拟信号注入法得到的 β_{MTPA} 计算误差见表 4。

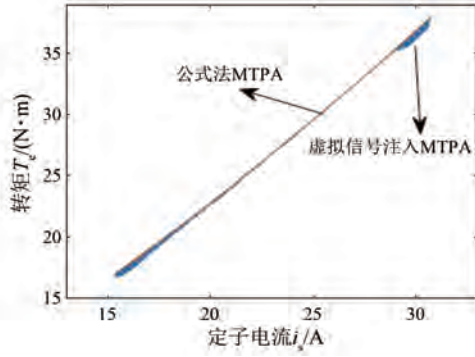
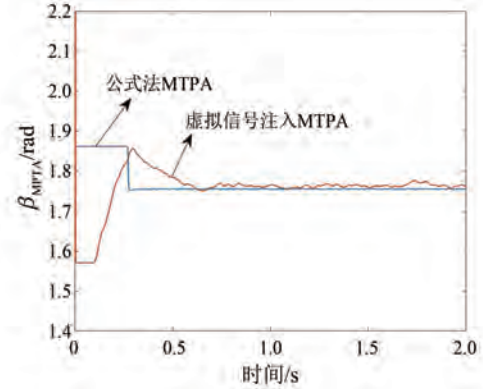
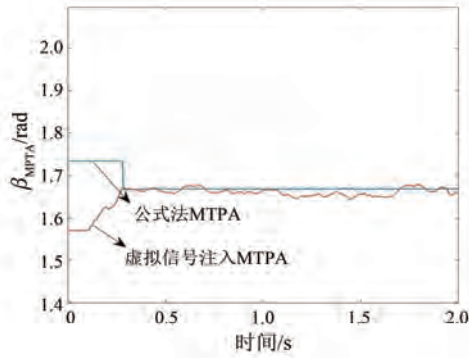
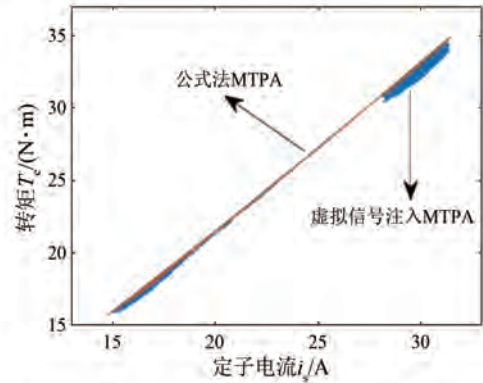
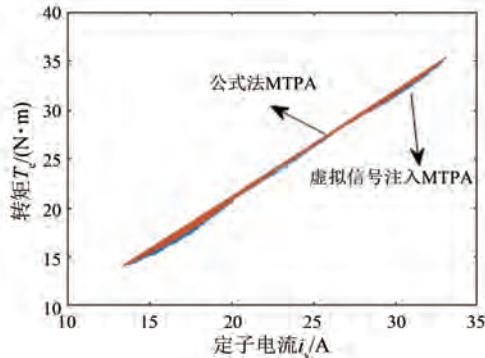
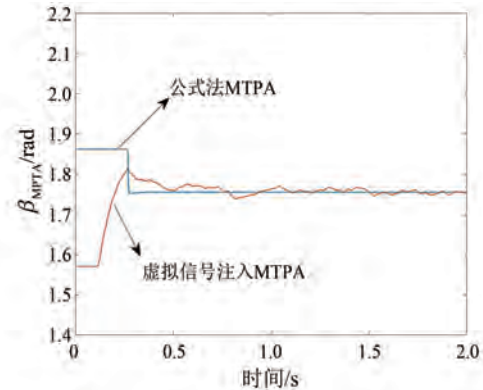
图 22 2 倍 dq 轴电感下电流-转矩输出结果Fig. 22 The i_s - T_e output results at $2L_d$ and $2L_q$ 图 25 2 倍定子电阻下 β_{MTPA} Fig. 25 β_{MTPA} at $2R_s$ 图 23 0.5 倍 dq 轴电感下的 β_{MTPA} Fig. 23 β_{MTPA} at $0.5L_d$ and $0.5L_q$ 

图 26 2 倍定子电阻下电流-转矩输出结果

Fig. 26 The i_s - T_e output results at $2R_s$ 图 24 0.5 倍 dq 轴电感下电流-转矩输出结果Fig. 24 The i_s - T_e output results at $0.5L_d$ and $0.5L_q$ 图 27 0.5 倍定子电阻下 β_{MTPA} Fig. 27 β_{MTPA} at $0.5R_s$ 表 4 基于 MRAS 参数辨识的虚拟信号注入法 β_{MTPA} 计算误差Tab. 4 Error of β_{MTPA} using virtual signal injection based on MRAS identification

参数名称	$E_{\text{avg}}/\text{rad}$	$\eta_{\beta}/\%$
匹配	0.0094	0.53
$2L$	0.0073	0.38
$0.5L$	0.0174	0.88
$2R_s$	0.0086	0.48
$0.5R_s$	0.0064	0.36

仿真结果表明,参数匹配和失配下,基于 MRAS 参数辨识的虚拟信号注入法 MTPA 计算得到的电流矢量角 β_{MTPA} 与公式法计算得到的电流矢量角 β_{MTPA} 基本一致,电机模型与 MRAS 可调模型中的电阻参数失配对电流矢量角 β_{MTPA} 的影响较小。

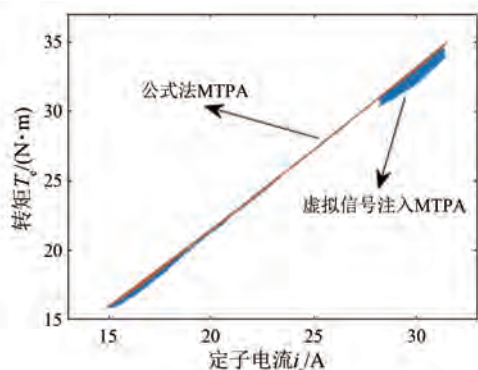


图 28 0.5 倍定子电阻下电流-转矩输出结果

Fig. 28 The i_s - T_e output results at $0.5R_s$

6 结语

公式法 MTPA 可精确计算得到电流矢量角 β_{MTPA} , 但公式法依赖 L_d 、 L_q 和 ψ_f 三个电机参数, 且这三个参数失配对 β_{MTPA} 计算误差影响均较大, 需对 3 个参数全部辨识。

虚拟信号注入法 MTPA 得到的电流矢量角 β_{MTPA} 与公式法 MTPA 基本一致。虚拟信号注入法 MTPA 依赖 L_d 和 R_s 两个参数, 其中 d 轴电感参数对计算结果影响较大, 定子电阻影响较小, 仅需辨识 L_d 。

增量式电流预测模型依赖 3 个参数 L_d 、 L_q 和 R_s , 其中, 电阻参数影响较小, 仅需辨识 L_d 和 L_q 。因此, 永磁同步电机增量式模型预测电流控制虚拟信号注入法 MTPA 系统也仅需辨识 L_d 和 L_q 。

采用 MRAS 辨识定子 dq 轴电感, 将辨识得到的 dq 轴电感参数用于增量式模型预测电流控制及虚拟注入法 MTPA。参数匹配和失配下, 基于 MRAS 参数辨识的虚拟信号注入法 MTPA 计算得到的 β_{MTPA} 与公式法计算得到的基本一致, 电机模型与 MRAS 可调模型中的电阻参数失配影响较小。

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、种国臣、王自臣和高赛进行了仿真研究, 吴步昊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, Chong Guochen, Wang Zichen and Gao Sai. The manuscript was revised by Wu Buhao. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] Sadegh V Z. Control of permanent magnet synchronous motors [M]. Oxford: Oxford University Press, 2018.
- [2] Li K, Wang Y. Maximum torque per ampere (MTPA) control for IPMSM drives based on a variable-equivalent-parameter MTPA control law [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34 (7): 7092-7102.
- [3] 李桂丹, 任宗芹, 李斌, 等. 多单元永磁同步电机功率分配最大转矩电流比控制 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(22): 8352-8363.
- Li G D, Ren Z Q, Li B, et al. Maximum torque per ampere control of multi-unit permanent magnet synchronous motor under power sharing [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42 (22): 8352-8363.
- [4] Zhang J H, Liu G H, Chen Q. MTPA control of sensorless IPMSM drive system based on virtual and actual high-frequency signal injection [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(3): 1516-1526.
- [5] 赵文祥, 刘恒, 陶涛, 等. 基于虚拟信号和高频脉振信号注入的无位置传感器内置式永磁同步电机 MTPA 控制 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(24): 5092-5100.
- Zhao W X, Liu H, Tao T, et al. MTPA control of sensorless IPMSM based on virtual signal and high-frequency pulsating signal injection [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36 (24): 5092-5100.
- [6] 邱建琪, 宋攀, 陈卓易, 等. 改进虚拟信号注入永磁同步电机 MTPA 控制 [J]. 电机与控制学报, 2022, 26(9): 1-8.

- Qiu J Q, Song P, Chen Z Y, et al. Improved virtual signal injection control for MTPA operation of permanent magnet synchronous motor[J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(9): 1-8.
- [7] 孙天夫, 杨日阳, 梁嘉宁, 等. 考虑电机参数偏导项的同步磁阻电机虚拟信号注入 MTPA 控制[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(24): 8326-8334.
- Sun T F, Yang R Y, Liang J N, et al. MTPA control of synchronous reluctance motors based on virtual signal injection control considering derivative terms [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(24): 8326-8334.
- [8] 王玉彬, 刘瀚文. 改进虚拟方波信号注入的内置式永磁同步电机最大转矩电流比控制策略[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(20): 6474-6486.
- Wang Y B, Liu H W. Improved virtual square wave signal injection MTPA control of interior permanent magnet synchronous motor[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(20): 6474-6486.
- [9] 李峰, 宋佳星. 考虑电感变化的永磁同步电动机 MTPA 控制方法[J]. *微特电机*, 2026, 54(1): 76-81.
- Li F, Song J X. MTPA control method for permanent magnet synchronous machine taking inductance variation into account[J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2026, 54(1): 76-81.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 李耀华, 郭伟超, 马德军, 等. 表贴式永磁同步电机增量式模型预测电流控制研究[J]. *微特电机*, 2026, 54(2): 68-75.
- Li Y H, Guo W C, Ma D J, et al. Study on incremental MPCC of surface PMSM [J]. *Small & Special Electric Machines*, 2026, 54(2): 68-75.

- [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): 111-117.
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): 111-117.
- [22] 诸自强, 刘侃, 梁大卫. 永磁同步电机参数辨识[M]. 北京: 机械工业出版社, 2026.
Zhu Z Q, Liu K, Liang D W. Parameter estimation of permanent magnet synchronous machines [M]. Beijing: China Machine Press, 2026.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 张懿, 徐斌, 魏海峰, 等. 新型模型参考自适应的 PMSM 无差拍电流预测控制[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(9): 156-167.
Zhang Y, Xu B, Wei H F, et al. A new model reference adaptive deadbeat predictive current control of PMSM[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(9): 156-167.
- [28] 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): 75-83.
- [29] 李耀华, 郭伟超, 王钦政, 等. 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[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(10): 1050-1062.
Li Y H, Guo W C, Wang Q Z, et al. Study on incremental model predictive current control for permanent magnet synchronous motor based on MRAS parameter identification [J]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(10): 1050-1062.

收稿日期:2026-02-19

收到修改稿日期:2026-03-23

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:吴步昊(1996—),男,博士,助理教授,研究方向为车辆系统动力学,1207688117@qq.com。