

电动汽车用永磁同步电机模型预测 MRAS 无速度传感器控制

潘 峰^{1,2}, 秦国锋³, 王淳标², 袁 媛⁴

- (1. 茅台学院 酿酒工程自动化系, 贵州 遵义 564507;
2. 太原科技大学 电子信息工程学院, 山西 太原 030024;
3. 国网山西省电力公司 忻州供电公司, 山西 忻州 034000;
4. 太原科技大学 交通与物流学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 针对电动汽车机械式传感器在复杂工作环境下易失效的问题, 将基于模型参考自适应(MRAS)的无速度传感器技术应用于电动汽车中。针对传统 MRAS 无速度传感器控制存在的转子位置估计相位延迟较大、转速估计误差较大等问题, 将模型预测控制算法应用到 MRAS 中。参考模型选用永磁同步电机(PMSM)电流磁链方程, 可调模型选取电压磁链方程, 代价函数是磁链的差值, 待估计参数选择转子位置。与传统 MRAS 无速度传感器控制算法相比, 转速、转子位置估计结果更加精确, 估计误差较小, 动态性能和稳态性能优良。通过仿真和试验验证了算法的可行性和有效性。

关键词: 电动汽车; 永磁同步电机; 模型参考自适应; 无速度传感器控制; 模型预测控制

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)10-0104-07

Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle Based on Model Predictive MRAS

PAN Feng^{1,2}, QIN Guofeng³, WANG Chunbiao², YUAN Yuan⁴

- (1. Department of Brewing Engineering Automation, Moutai Institute, Zunyi 564507, China;
2. School of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;
3. Xinzhou Power Supply Company, State Grid Shanxi Electric Power Company, Xinzhou 034000, China;
4. School of Transportation and Logistics, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Aiming at the problem that mechanical sensors of electric vehicle were easy to fail in complex working environment, the speed sensorless technology based on model reference adaptive system (MRAS) was applied to electric vehicle. In order to solve the problem of large phase delay of rotor position estimation and large speed estimation error in traditional MRAS speed sensorless control, the model predictive control algorithm was applied to MRAS. Permanent magnet synchronous motor (PMSM) current flux linkage equation was selected as the reference model, and voltage flux linkage equation was selected as the adjustable model. The cost function was the difference of flux linkage, and the rotor position was selected as the estimated parameters. Compared with the traditional MRAS speed sensorless control algorithm, the proposed algorithm had more accurate speed and rotor position estimation, less estimation error, and excellent dynamic and steady-state performance. The feasibility and effectiveness of the algorithm

作者简介: 潘 峰(1974—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向为现代电力传动与控制、分布式配电网。

秦国锋(1993—), 男, 硕士, 研究方向为现代传动控制技术。

王淳标(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为现代传动控制技术。

were verified by simulation and experiment.

Key words: electric vehicle; permanent magnet synchronous motor (PMSM); model reference adaptive system (MRAS); speed sensorless control; model predictive control (MPC)

0 引言

电动汽车最核心的环节是电力驱动系统^[1], 一个可靠稳定的控制系统是电动汽车能够稳定运行的基础^[2]。永磁同步电机(PMSM)的高性能控制需要精确的位置信号。在汽车的电驱控制中, 传感器的同轴安装会造成电机体积的增大和电驱系统成本的提高。此外, 当电动汽车的驱动电机工作在高温、潮湿、强振动以及强磁场干扰的恶劣环境中时, 传感器容易失效^[3], 会导致控制精度下降, 严重影响电机控制算法的运行, 甚至造成电机的堵转或者过流, 从而损坏逆变器和电机。如果能够用软件来替代速度传感器, 将极大地提高电动汽车的整体性能以及竞争性^[4]。

无传感器技术通常指的是通过对电机定子电压或者电流的检测, 并根据算法估算出转子位置、速度等信息^[5]。无速度传感器控制技术在节约旋转变压器、编码器以及线缆等成本的同时, 提高了电机驱动系统的可靠性^[6]。

模型参考自适应(MRAS)自 20 世纪 50 年代被提出之后, 以其自适应的优势得到广泛的研究和飞速的发展^[7]。PMSM 的无速度传感器控制系统中, 系统的参考模型由电机的数学模型可得^[8]。采用 MRAS 实现对 PMSM 的位置识别较为简单、可靠^[9]。传统 MRAS 使用 PI 调节器, 只能在特定的速度范围内达到最佳的控制性能, 随着转速调节范围的增大, 转子位置的估计将产生一定的相角延迟。针对上述问题, 本文在 PMSM 的 MRAS 无速度传感器控制技术中引入了模型预测控制(MPC)理论, 从而提高传统 MRAS 控制的抗干扰能力, 改善系统的性能。在实现电动汽车控制过程中的控制器采用模型预测转矩控制(MPTC)策略, 观测器采用模型预测 MRAS 无速度传感器, 从而实现优良的控制效果。

1 电动汽车驱动控制系统

电动汽车驱动技术大多采用矢量控制和直接转矩控制(DTC)技术, 驱动电机通常选用综合性

能最佳的 PMSM^[10]。MPTC 是一种先进的控制技术。与矢量控制相比, MPTC 不需要复杂的坐标变换, 在保证稳态性能的同时, 极大地提高了系统的动态响应速度^[11]。与 DTC 相比, MPTC 在保证系统动态性能的前提下, 大幅地提升了系统的稳态性能^[12], 且电流以及转矩的脉动明显减小。

MPTC 的控制原理与 DTC 相似, 根据对磁链和转矩变化趋势的预测来进行开关状态的选择, 从而实现对转矩的直接控制^[13]。图 1 所示为 MPTC 控制框图。

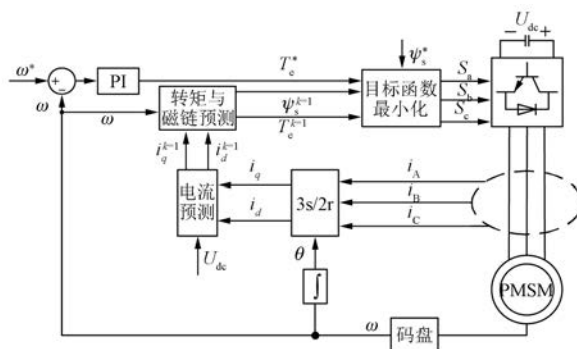


图 1 MPTC 控制框图

图 1 中, 外环是速度环, 内环是磁链和转矩环, 三相定子电流 i_A 、 i_B 、 i_C 通过坐标变换 $3s/2r$ 模块得到两相旋转坐标系电流 i_d 、 i_q 。通过电流预测模块以及转矩、磁链预测模块能够预测出转矩和磁链的值, 转矩给定通过速度环 PI 调节得出。最后, 把转矩和磁链的给定值和预测值代入目标最小化函数, 选择出最优的电压矢量来控制 PMSM。

2 PMSM 模型预测 MRAS

2.1 传统 MRAS 的 PMSM 速度与位置估算

在基于 MRAS 的 PMSM 速度辨识模型建立的过程中, 参考模型通常指的是电机的实际模型。PMSM 的定子电流通过 Clarke 变换和 Park 变换, 可得 dq 坐标系下的电流方程, 即辨识系统的可调模型。2 个模型并联后, 能够得出估算的转速, 积分后得到估计的转子位置^[14]。

由电机 dq 坐标数学模型可得:

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

式中: R_s ——定子电阻;

ψ_f ——转子永磁体磁链。

对于表贴式 PMSM, 满足 $L_s = L_d = L_q = L$, 则可得 PMSM 的电流方程:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L} i_d + \omega i_q + \frac{u_d}{L} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L} i_q - \omega i_d - \frac{\psi_f}{L} \omega + \frac{u_q}{L} \end{cases} \quad (2)$$

从式(2)可得, 表贴式 PMSM 的电流只与转速参数相关, 故辨识系统的可调模型可以用电流方程表示, 而参考模型就是电机的实际模型, 因此 PMSM 的转速辨识可以采用并联的结构。

令 $i'_d = i_d$, $i'_q = i_q + \frac{\psi_f}{L}$, $u'_d = u_d + \frac{R_s \psi_f}{L}$, $u'_q = u_q$, 则式

(2)可写为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_s}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)可写为

$$\frac{di'}{dt} = \mathbf{A}i' + \mathbf{B}u' \quad (4)$$

$$\text{其中: } i' = \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_s}{L} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \frac{1}{L}, u' = \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix}。$$

式(3)结合磁链方程可得:

$$\begin{cases} i'_d = \frac{1}{L}(Li_d + \psi_f) = \frac{1}{L}\psi_d \\ i'_q = \frac{1}{L}\psi_q \end{cases} \quad (5)$$

式中: i'_d —— d 轴电流, 即等效励磁电流, i'_d 可以看成 d 轴永磁体的作用, 满足 $i'_d = i_d$ 。

式(4)的 $\mathbf{A}$ 中包含了转速信息, 可以作为 MRAS 的可调模型。

2.2 MPC 的 MRAS 算法

2.2.1 MPC 原理

MPC 通常由预测模型、滚动优化以及反馈校

正 3 个环节组成。图 2 所示为 MPC 基本控制框图。MPC 主要原理是通过模型的构建, 根据预测值和给定值的误差进行滚动优化, 然后反馈校正, 选择最优的控制矢量^[15]。在建立模型的过程中因为 MPC 只注重功能, 所以建模较为方便, 滚动优化的过程很好地与实际值结合, 根据反馈信号在线优化, 受工作环境因素的影响较小, 系统的鲁棒性较强。

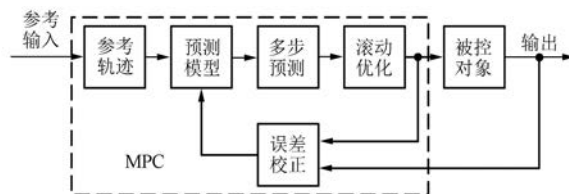


图 2 MPC 结构框图

2.2.2 模型预测 MRAS 无传感器控制

传统 MRAS 需要合理地选择参考模型以及可调模型。参考模型和可调模型输出的差值通过自适应律不断调整待估计参数, 从而确保系统辨识的参数能够接近于实际值。参考模型和可调模型的选择并不唯一, 通常参考模型选择电机模型, 可调模型一般选取电流或磁链模型, 自适应律一般用 PI 控制。传统 MRAS 因为使用 PI 调节器, 所以只能在特定的速度范围内达到最佳的控制性能, 且随着转速调节范围的增大, 转子位置的估计将会产生一定的相角延迟。针对上述问题, 本文在 MRAS 无速度传感器控制技术中引入 MPC 理论, 参考模型选用 PMSM 电流磁链方程, 可调模型选取电压磁链方程, 代价函数是磁链的差值, 待估计参数选择转子位置。在前一个控制周期内选择使代价函数最小的转子位置值, 从而提高传统 MRAS 控制的抗干扰能力, 改善系统的性能。

PMSM 在 $\alpha\beta$ 坐标系的磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_\alpha = \int_0^t (u_\alpha - Ri_\alpha) dt + \psi_f \cos \theta \\ \psi_\beta = \int_0^t (u_\beta - Ri_\beta) dt + \psi_f \sin \theta \end{cases} \quad (6)$$

经过 Park 变换, 可得 dq 坐标系下的磁链方程:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_\alpha \\ \psi_\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

磁链误差:

$$e = |\psi_d \hat{\psi}_q - \psi_q \hat{\psi}_d| \tag{8}$$

模型预测 MRAS 参考模型选择基于电流模型的定子磁链式,可调模型选择基于电压模型的定子磁链式,MPC 算法代替传统自适应律。可调参数选择的是转子位置,磁链误差[式(8)]是 MPC 算法的代价函数。图 3 所示为模型预测 MRAS 的位置辨识框图。

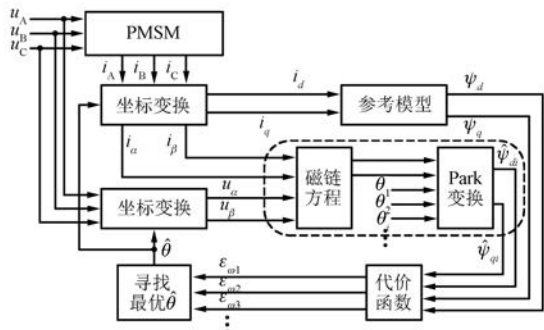


图 3 模型预测 MRAS 的位置辨识框图

PMSM 转子的位置角在 $0 \sim 2\pi$ 范围内变化,将角度离散化处理,通过式(8)的代价函数可以计算出各个角度的误差值,然后对这些误差值进行比较,可以找出最佳的角度。因为采样周期时间很短,电机转子的角度在一个采样周期内变化范围很小,所以能够根据上一个采样时刻转子的位置来寻找最佳的角度。

角度的变化量可以表示为

$$\Delta\theta = 0.35^\circ = 0.006\ 136\ \text{rad} \tag{9}$$

3 仿真对比与分析

基于 MPTC 控制策略,在 MATLAB/Simulink 中搭建传统 MRAS 无速度传感器以及本文所提出的模型预测 MRAS 无速度传感器的仿真模型。理论分析用表贴式 PMSM 参数如表 1 所示。

表 1 表贴式 PMSM 参数

参数名称	参数值
额定功率 P_N/kW	1.5
额定转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	2 000
额定转矩 $T_N/(\text{N}\cdot\text{m})$	7.15
定子电阻 R_s/Ω	0.2
定子电感 L_s/mH	8.5
永磁体磁链 ψ_f/Wb	0.24
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.001 2
极对数 p	4

仿真中,电机带 $2\ \text{N}\cdot\text{m}$ 恒定负载,转速在 $0.2\ \text{s}$ 从 $1\ 000\ \text{r/min}$ 降到 $600\ \text{r/min}$ 。模型预测 MRAS 无速度传感器的转速仿真结果如图 4 所示。图 4(a)是转速波形,其中实线表示电机实际转速 n ,虚线表示转速估计值 $\hat{n}$,由于估计误差很小,实际转速和估计转速基本重合;图 4(b)是转速估计误差。传统 MRAS 无速度传感器的转速仿真结果如图 5 所示。图 5(a)是转速波形,其中实线表示电机实际转速 n ,虚线表示转速估计值 $\hat{n}$;图 5(b)是转速估计误差。

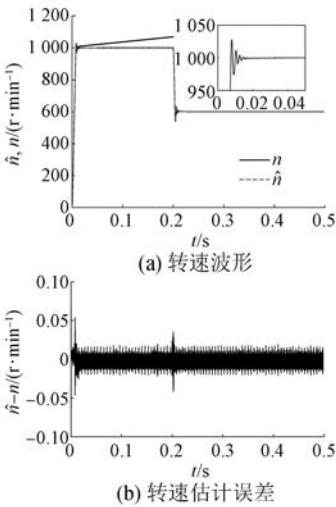


图 4 模型预测 MRAS 无传感器转速仿真结果

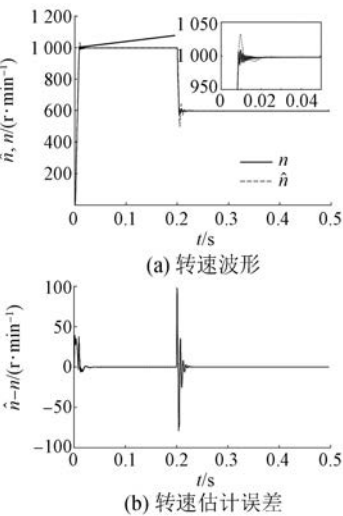


图 5 传统 MRAS 无传感器转速仿真结果

由图 4(a)可知,模型预测 MRAS 观测器能够精确地实现对转子速度的估计。从图 4(b)可以

看出,估计的转速误差峰值在 0.060 r/min, 最终稳定在 0.016 r/min 以内,在减速后转速估计误差迅速降到了稳定值。由图 5(a)可得,传统 MRAS 观测器在电机起动和减速过程中转速估计值不能较好地跟踪实际值。由图 5(b)可知,传统 MRAS 观测器在电机起动以及调速过程中转速估计误差特别大,在 0.20 s 时速度估计误差峰值达到了 100 r/min,在 0.23 s 时转速估计误差达到了稳定值,转速估计过程中振荡较大,估计效果较差。

图 6 所示为模型预测 MRAS 无传感器转子位置估计结果图。从图 6(a)可以看出,在整个起动和调速过程中模型预测 MRAS 无传感器算法能够实现转子位置的精确估计。从图 6(b)可以看出,转子估计误差在起动和减速时有振荡,但估计的误差峰值仅为 1.48×10^{-5} rad,并且能够在 0.07 s 后迅速恢复到稳态值 9.8×10^{-6} rad,转子位置的估计误差极小,没有明显的相位滞后,系统的动态和稳态性能较好。图 7 所示为传统 MRAS 无传感器转子位置仿真结果。由图 7(a)可以看出,转子估计位置比实际位置明显滞后。由图 7(b)可知,在 0.2 s 时位置估计误差峰值达到了 0.152 rad,整个系统的动、静态性能较差。

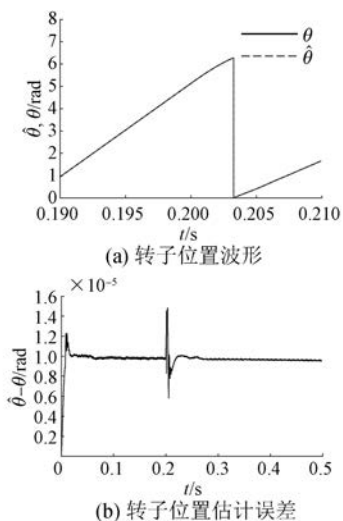


图 6 模型预测 MRAS 无传感器转子位置仿真结果

4 试验结果分析

为了进一步验证本文所提出的基于 MPTC 的模型预测 MRAS 无速度传感器驱动控制系统的可行性,在基于 TMS320F2812 型的 DSP 综合试验开

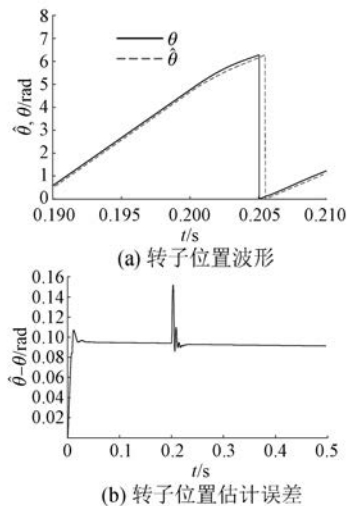


图 7 传统 MRAS 无传感器转子位置仿真结果

发平台进行验证性试验研究。试验用电机额定转速即基准值为 1 500 r/min,转速用标么值表示,系统给定磁链周期为 100 ms,程序中显示函数的抽样频率为 $585 \mu\text{s}^{-1}$,因此一个周期显示数值为 171,半个周期为 85.5。

图 8 所示为电机空载状态加速的转速波形。电机在第 215 ms 时从 450 r/min 加速到 900 r/min,整个加速过程中平稳无超调,在 60 ms 内转速稳定在给定转速。图 9 所示为 A 相、B 相电流波形。从图 9 可以看出,电机在加速过程中定子电流波形频率增大,并且稳定按正弦规律变化。整个加速过程,系统表现出优良的调速性能。

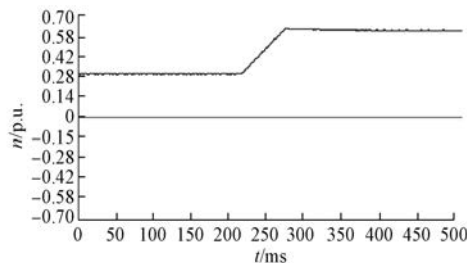


图 8 电机空载状态加速的转速波形

图 10 所示为电机空载状态正转到反转切换转速波形。电机从正转 1 050 r/min 切换到反转 1 050 r/min 仅用时 265 ms,整个正反转切换平稳,无明显超调,整个系统的动态和稳态性能好。图 11 所示为电机空载状态正转到反转 A 相、B 相电流波形。从图 11 可以看出,当转速达到稳态值后

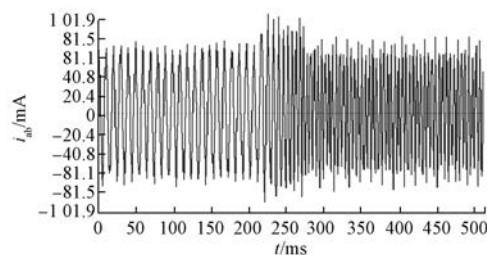


图9 空载状态加速 A 相、B 相电流波形

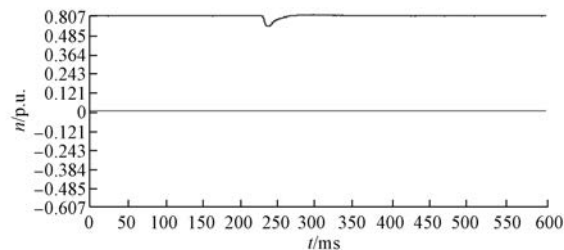


图12 突加负载转速波形

正反转切换时,电流波形能够按照正弦规律均匀地变化。

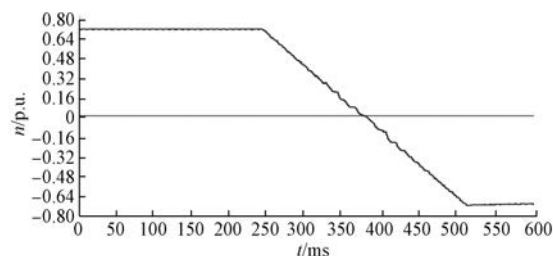


图10 空载状态正转到反转转速波形

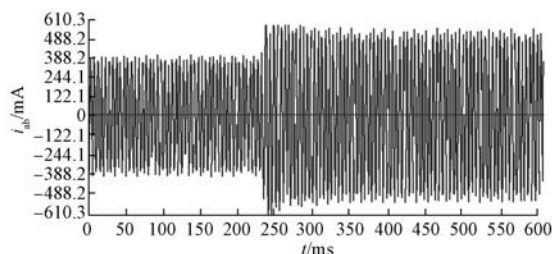


图13 突加负载 A 相、B 相电流波形

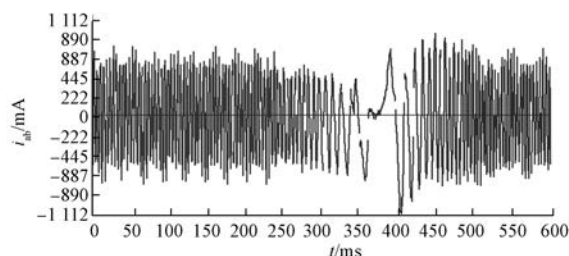


图11 空载状态正转到反转 A 相、B 相电流波形

为了验证控制系统的鲁棒性,对电机进行加载试验。试验中的负载是通过磁粉制动器实现的,图12~图13所示为加载试验结果图。

图12为突加负载转速波形,给定电机转速为900 r/min,在0.226 s时电机所带负载从3 N·m加到5 N·m,在此过程中电机转速下降约55 r/min后,在0.260 s迅速恢复到了给定值900 r/min,转速波动幅度小且平稳。图13为负载突变时A相、B相电流波形。从图13可以看出,电机加载后电流波形幅值变大,电机带载运行时定子电流依然可以平稳的按正弦规律变化。整个加载过程验证了该系统具有较强的抗干扰能力,且动态和稳态性能良好。

5 结 语

本文将MPC算法应用到PMSM的MRAS中,改变了传统MRAS算法的参考模型和可调模型等参数的选取方式,将MPTC控制策略和模型预测MRAS无速度传感器相结合应用于电动汽车驱动控制中。与传统的MRAS无速度传感器相比,所提方法的转速、转子位置估计结果更加精确,估计误差较小,动态性能和稳态性能优良。通过仿真和试验验证了算法的可行性和有效性。

【参考文献】

- [1] 陈清泉.现代电动车、电机驱动及电力电子技术[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [2] 赵剑飞,丁朋飞,翟雪松.基于模糊神经网络的纯电动车永磁同步电机矢量控制[J].电机与控制应用,2018,45(12): 108.
- [3] 陈凯.电动汽车用PMSM无传感器控制策略研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2017.
- [4] 张立伟,余超,李志军,等.无位置传感器内置式永磁同步电机参数的在线辨识方法[J].北京交通大学学报,2018,42(5): 77.
- [5] 梁艳,李永东.无传感器永磁同步电机矢量控制系统概述[J].电气传动,2003,33(4): 4.
- [6] 金硕,曹勇,赵文秀,等.电动汽车永磁同步电机无

- 速度传感器矢量驱动系统的研究[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2015, 35(1): 6.
- [7] 王杰, 谢源, 谢涛, 等. 基于 MRAS 的永磁同步电机无传感器矢量控制研究[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(1): 30.
- [8] KHLAIEF A, BOUSSAK M, CHAARI A. A MRAS-based stator resistance and speed estimation for sensorless vector controlled IPMSM drive[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 108: 1.
- [9] 周博, 徐大林, 顾兆丹. 基于 MRAS 和模糊算法的 PMSM 无传感器控制[J]. 电子测量技术, 2013, 36(2): 39.
- [10] 陈永贵. 浅谈新能源汽车发展现状及应用前景[J]. 南方农机, 2017, 48(13): 142.
- [11] 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.
- [12] MORA A, ORELLANA A, JULIET J, et al. Model predictive torque control for torque ripple compensation in variable-speed PMSMs [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4584.
- [13] 张晓光, 张亮, 侯本帅. 永磁同步电机优化模型预测转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4800.
- [14] ZBEDE Y B, GADOUE S M, ATKINSON D J. Model predictive MRAS estimator for sensorless induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3511.
- [15] XIE W, WANG X, WANG F, et al. Finite-control-set model predictive torque control with a deadbeat solution for PMSM drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(9): 5402.

收稿日期: 2019-07-03

(上接第 76 页)

- [5] 朱常兴, 王殿友, 朱常权, 等. 西气东输工程 20 MW-2P 电动机转子系统临界转速计算[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(11): 59.
- [6] 张贵滨, 巩魁鑫. 超高速大功率电动机轴系不平衡响应分析[J]. 防爆电机, 2017, 52(4): 26.
- [7] 伍宙敏. 滑动轴承顶轴油设计[J]. 热力透平, 2013, 42(2): 100.
- [8] 林盛雄. 汽轮机组液压顶轴装置的设计[J]. 动力工程, 1981(4): 7.
- [9] 谢尉扬. 汽轮机顶轴油系统及相关问题研究[J]. 汽轮机技术, 2016, 58(3): 223.
- [10] 罗吉江, 赵正清, 邹伟明. AP1000 核电汽轮发电机组顶轴油调试[J]. 热力透平, 2017, 46(2): 148.
- [11] 杨灵, 陈赤, 何显富. 顶轴系统的设计[J]. 东方电气评论, 2002(3): 1.
- [12] 赵海廷, 赵彦铭. 采用低速动平衡解决汽轮发电机的一阶临界异常振动[J]. 发电设备, 2009, 23(1): 27.
- [13] 寇胜利. 发电机的现场平衡[J]. 大电机技术, 2006(1): 14.
- [14] 祝剑虹, 许永利. 局部预负荷对可倾瓦轴承性能的影响[J]. 动力工程学报, 2018, 38(7): 539.
- [15] 郑展友, 李辉, 傅滨. 300 MW 汽轮机低速碾瓦的分析及处理[J]. 山西电力, 2012(4): 60.
- [16] 张学超, 张宝, 李卫军. 600 MW 汽轮发电机组轴颈损伤事故分析与处理[J]. 发电设备, 2006, 20(3): 166.
- [17] 尹延国, 焦明华, 解挺, 等. 滑动轴承材料的研究进展[J]. 润滑与密封, 2006(5): 183.

收稿日期: 2019-06-11

(上接第 98 页)

- [7] 杜爱民, 张东旭, 孙明明, 等. 混合动力汽车用油冷永磁同步电机温度场研究[J]. 汽车技术, 2019(4): 34.
- [8] 童莉莉, 余剑, 朱克非. 电动客车用电机壳体设计[J]. 时代汽车, 2018(7): 98.
- [9] 郭军朝, 章国光, 邓丽梅, 等. 电机水套散热仿真与试验研究[J]. 电机与控制应用, 2015, 42(9): 61.
- [10] 郑国丽, 丰帆, 周黎民, 等. 电机的热分析方法与应用[J]. 微特电机, 2017, 45(10): 78.
- [11] STATON D, BOGLIETTI A, CAVAGNINO A. Solving the more difficult aspects of electric motor thermal analysis in small and medium size industrial induction motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(3): 620.
- [12] BOGLIETTI A, CAVAGNINO A, STATON D. Determination of critical parameters in electrical machine thermal models [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(4): 1150.

收稿日期: 2019-07-09