

高速永磁同步电机无速度传感器 矢量控制研究

马志军, 魏西平, 姜旭东

(沈阳远大电力电子科技有限公司, 辽宁 沈阳 110027)

摘要: 针对普通无速度传感器矢量控制算法无法满足永磁同步电机(PMSM)高速运行问题,设计了一种基于模型参考自适应系统(MRAS)的矢量控制方案。该方案由 I/F 控制器和 MRAS 控制器组成。低转速采用 I/F 控制器控制电机转速,高转速采用 MRAS 控制电机转速,特殊处理后使切换过程中电流平滑过渡,以达到高低转速均可正常运行的目的。以磁悬浮 PMSM 作为驱动对象,电机转子联接风机实现带载。试验结果表明,与传统的无传感器矢量控制相比,所提出的控制方案更有效地驱动 PMSM,满足高速运行工况。

关键词: 永磁同步电机; 高速运行; 无速度传感器矢量控制; 模型参考自适应系统

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)02-0036-04

doi: 10.12177/emca.2020.189

Research on Speed Sensorless Vector Control of High-Speed Permanent Magnet Synchronous Motor

MA Zhijun, WEI Xiping, JIANG Xudong

(Shenyang Yuanda Power Electronic Technology Company, Shenyang 110027, China)

Abstract: The traditional speed sensorless vector control algorithm cannot meet the high-speed operation of the permanent magnet synchronous motor (PMSM). In order to solve this problem, a vector control scheme based on model reference adaptive system (MRAS) is designed. The control scheme is composed of an I/F controller and a MRAS. The I/F controller is used to control the motor at low speed and the MRAS is used to control the motor at high speed. After special treatment, the current in the switching process is smoothly transited to realize the normal operation at high and low speeds. The magnetic levitation PMSM is used as the driving object, and the rotor of the motor is connected with the fan to realize loading. The test results show that, compared with the traditional speed sensorless vector control, the proposed control scheme drives the PMSM to meet the high-speed operation conditions more effectively.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); high-speed operation; speed sensorless vector control; model reference adaptive system (MRAS)

0 引言

永磁同步电机(PMSM)具有功率密度大、响应速度快、损耗低、电气时间常数小等优点,广泛应用于电动汽车、鼓风机、飞轮储能、工业驱动等领域^[1-2]。传统 PMSM 的控制系统通常由编码器

获得电机位置信号及转速信号,但编码器的安装降低了系统的稳定性和可靠性,并且高转速电机驱动系统的编码器成本过高。普通无感矢量控制只适用于 500 Hz 以下的系统,因此需要研究适用于高转速 PMSM 驱动系统的无感矢量控制算法。

PMSM 的无速度传感器控制主要有:反电动

收稿日期: 2020-10-15; 收到修改稿日期: 2020-12-09

作者简介: 马志军(1988—),男,硕士,研究方向为电机控制、变频器控制等。

势直接算法^[3]、扩展卡尔曼滤波器^[4-5]、滑模观测器^[6]、模型参考自适应系统(MRAS)^[7-8]。直接计算法是开环计算,动态响应好,但需要精确的电机电阻电感等参数,鲁棒性和抗扰性较差,很少用于工程中。扩展卡尔曼滤波器控制精度高,但需要大量运算,试验中调试参数困难,很难在工程中得到广泛应用。滑模观测器容易引起电机的抖振,需要研究解决抖振问题。

MRAS 已在工程中得到应用,设计理念是将包含所需估计量的方程作为可调模型,将已知量构成的方程作为参考模型,要求 2 个模型输出的物理意义相同^[9-11]。2 个模型同时计算,将其输出的差值利用所设计的自适应率进行实时调节,使可调模型的输出严格跟踪参考模型,达到准确估计所需量的目的^[12]。MRAS 的输出可以是磁链、反电动势、电流等。基于磁链的 MRAS 通过 PI 控制器调节 T 轴磁链为零获得转速,通常应用于异步电机、励磁同步电机的矢量控制。基于反电动势的 MRAS 通过 PI 控制器调节 d 轴反电动势为零获得转速,这种算法易于实现,对电机参数不敏感,但高速的运行性能差,适用于中低频工作场合。基于电流模型的 MRAS 对高速动态性能良好,适用于高频、性能要求高的场合,但对电机参数敏感,起动困难。

1 控制系统设计

PMSM 的无速度传感器矢量控制系统框图如图 1 所示。MRAS 控制器输入为 d 、 q 轴电压和电流,输出为估计转速和估计角度。估计转速作为速度控制器的反馈,利用估计控制角进行坐标变换。

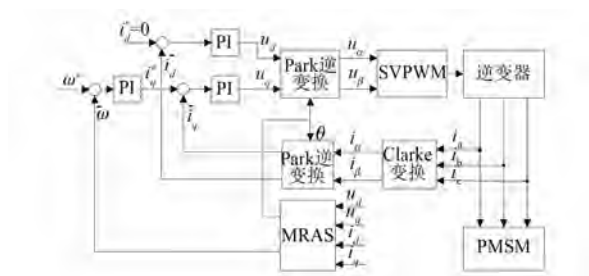


图 1 PMSM 无感矢量控制系统框图

2 MRAS 控制

在磁场定向条件下,对 PMSM 进行矢量控

制,电机电压方程为^[13]

$$u_d = L_d \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega L_q i_q \quad (1)$$

$$u_q = L_q \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega L_d i_d + \omega \lambda_{PM} \quad (2)$$

当系统的采样周期足够小时($50 \mu s$),可以认为 2 个采样点间的速度为常值、电流变化为线性关系,因此电机电压方程式(1)和式(2)在离散状态下可以改写为

$$\begin{aligned} \hat{i}_d(n+1) &= i_d(n) \left(1 - \frac{R}{L_d} \Delta t\right) + \\ &\omega(n) \frac{L_q}{L_d} \Delta t \cdot i_q(n) + \frac{\Delta t}{L_d} u_d \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \hat{i}_q(n+1) &= i_q(n) \left(1 - \frac{R}{L_q} \Delta t\right) - \\ &\omega(n) \frac{L_d}{L_q} \Delta t \cdot i_d(n) - \omega(n) \frac{\lambda_{PM} \Delta t}{L_q} + \frac{\Delta t}{L_q} u_q \end{aligned} \quad (4)$$

式(3)和式(4)为电流模型方程式。因为电流模型中包含转速信息,所以将电流模型作为控制的可调模型,将采样定子电流经坐标系变换后的 i_d 和 i_q 作为参考模型。

d 、 q 轴电感相同时,用 L 表示 d 、 q 轴电感,根据 Popov 稳定性原理可以得到速度估算自适应式。该自适应律为比例积分关系,估计的速度可表示为

$$\hat{\omega} = \left(\frac{K_i}{p} + K_p \right) \varepsilon \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} \varepsilon(n) &= i_d(n) \cdot \hat{i}_q(n) - i_q(n) \cdot \hat{i}_d(n) - \\ &[i_q(n) - \hat{i}_q(n)] \cdot \frac{\lambda_{PM}}{L} \end{aligned} \quad (6)$$

对转速进行积分可以得到 PMSM 的位置。在实际工程应用中,由于速度的估计依赖电流信号,而电流的采样存在毛刺,因此估计出的速度信号用来作速度闭环反馈时,需要对 MRAS 的输出速度信号进行滤波处理。

3 低速起动与切换

对于 PMSM,一般认为转速在 15% 额定转速以下时为低速状态,电机电压小,模型偏差较大时,MRAS 估计的转子位置和速度不准确,通常在低速时选择高频信号注入法控制或开环控制。高

频信号注入法需要复杂的滤波算法与信号分析,对控制芯片的计算能力要求较高。开环控制简单且容易实现,但起动不稳定。因此,电机的低速起运行采用半闭环的 I/F 控制,即不经过转速环调节,给定 i_q 的值根据负载大小直接设定,给定变化的虚拟角度作为旋转坐标系控制角,从而拖动电机运行。

I/F 的控制角度与电机转子实际角度存在偏差,重载控制性能差,在性能要求较高的场合需要切换到矢量控制。控制算法直接切换将导致切换时出现电流尖峰,甚至切换失败,对永磁电机造成伤害,因此平滑地切换到矢量控制是无感矢量控制算法应用的关键。为了使 2 种控制方法平滑切换,在 I/F 控制电机运行时,将 I/F 的给定电流送给速度环调节器,将控制角度送给 MRAS 控制器,在 MRAS 控制电机运行时,将 q 轴电流、估计转速、估计角度送给 I/F 控制器,以保证在切换时控制角和转速不发生突变,从而达到电流平滑过渡的目的。

低转速时的 I/F 控制取消了矢量控制所需的转速环,只有电流环,控制角度由给定转速积分获得,控制过程简单并且算法与电机模型无关。高转速时的基于 MRAS 的无感矢量控制,需要电机参数,通过构建电机电流模型估计转速及控制角,以实现转速的有效控制。在设定的频率点进行开环和闭环的相互切换,控制切换框图如图 2 所示。

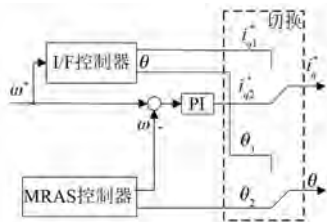


图 2 控制切换框图

4 试验与分析

为了验证所设计控制系统的有效性,设计并开发了高速 PMSM 控制器,驱动磁悬浮 PMSM 进行试验,电机转子连接风机叶片作为负载。分别采用传统基于反电动势的 MRAS 无感矢量控制和所设计的基于电流模型的 MRAS 无感矢量控制进行试验对比。试验中 2 种控制方式的控制对象为同一个电机,PMSM 参数为:额定功率 150 kW,额

定电压 350 V,额定电流 295 A,额定频率 834 Hz,额定转速 25 020 r/min。取相额定电流峰值作为电流基值,即 417.13 A。基于 DSP 的 PMSM 控制器如图 3 所示。该控制器采用 TMS320F28335 DSP 为核心控制单元。

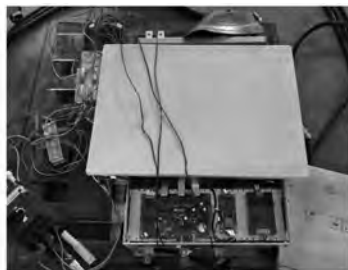


图 3 基于 DSP 的 PMSM 控制器

首先采用基于反电动势的 MRAS 算法进行试验,此算法不需要开环过程即可启动,但驱动电机运行至 600 Hz 时,电流发散失控。在 600 Hz 运行的相电流 i_A 和调制波的 T 波形(调制波与载波比较后得到的占空比波形)如图 4 所示。可以看出,电流波形较差,接近失控。

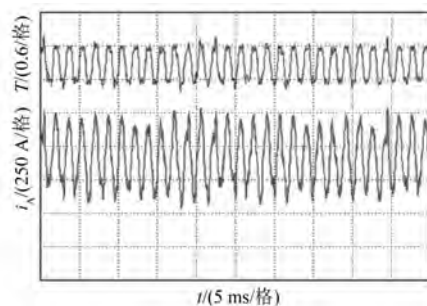


图 4 基于反电动势模型的 600 Hz 运行波形

采用所设计的 MRAS 控制算法进行试验。在较低转速运行时,MRAS 估计出的角度和速度不准确容易造成电机失控,因此 I/F 切换到 MRAS 的电机切换频率选为 110 Hz。切换过程如图 5 所示。从图 5 可以看出,控制方法切换到 MRAS 后,电流变小,调制波变小,切换过程中控制角度没有突变,没有电流尖峰,切换后约 30 ms 后电流恢复正常。

电机在额定频率 834 Hz 运行的波形如图 6 所示。可以看出,电机的控制角度和调制波波形良好,电流的有效值为 262 A,接近满载。与图 4 对比可知,基于电流模型的 MRAS 电流正弦度更高,在高速大负载工作场合的控制性能更好。

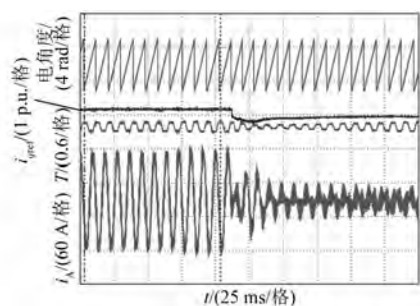


图5 I/F 切换到 MRAS 的波形

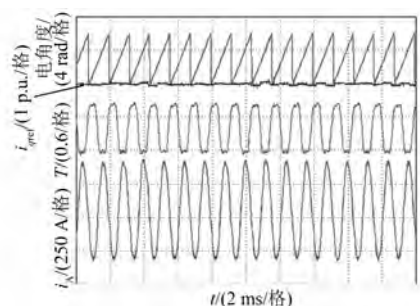


图6 基于电流模型的 MRAS 额定频率(834 Hz)波形

5 结 语

针对普通无感矢量控制算法无法满足 PMSM 高速运行的需求,本文设计了一种适用于全速范围的无速度传感器矢量控制方案。I/F 控制及切换算法解决了 PMSM 无感控制低速运行困难问题,MRAS 保证了系统的高频运行性能。试验结果表明,所设计的 MRAS 矢量控制算法与普通无感控制算法相比,具有更广的速度带宽,更优的高速运行性能。

【参考文献】

- [1] 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.
- [2] 姚骏,刘瑞阔,尹潇. 永磁同步电机三矢量低开关频率模型预测控制研究[J]. 电工技术学报,2018,33(13): 2935.
- [3] 王子辉,叶云岳. 反电势算法的永磁同步电机无位置传感器自启动过程[J]. 电机与控制学报,2011,15(10): 36.
- [4] 丁文,梁得亮,罗战强. 两级滤波滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 电机与控制学报,2012,16(11): 1.
- [5] 余致廷,邹薇,董旺华,等. 扩展卡尔曼滤波结合前馈补偿永磁同步电机位置估计[J]. 控制理论与应用,2016,33(10): 1312.
- [6] 李佳伦,宋桂英,郭慧敏. 改进型自适应滑模观测器的 PMSM 无速度传感器[J]. 微电机,2020,53(1): 47.
- [7] 张洪帅,王平,韩邦成. 基于模糊 PI 模型参考自适应的高速永磁同步电机转子位置检测[J]. 中国电机工程学报,2014,34(12): 1889.
- [8] 潘峰,秦国锋,王淳标,等. 电动汽车用永磁同步电机模型预测 MRAS 无速度传感器控制[J]. 电机与控制应用,2019,46(10): 104.
- [9] 吴伟,杜昭平. 改进 MRAS 的永磁同步电机无速度传感器控制策略[J]. 微电机,2019,52(12): 53.
- [10] 王庆龙,张兴,张崇巍. 永磁同步电机矢量控制双滑模模型参考自适应系统转速辨识[J]. 中国电机工程学报,2014,34(6): 897.
- [11] 齐放,邓智泉,仇志坚,等. 一种永磁同步电机无速度传感器的矢量控制[J]. 电工技术学报,2007,22(10): 30.
- [12] 时维国,刘坤亮. 基于 MRAS 的永磁同步电机无位置传感器控制策略研究[J]. 电机与控制应用,2019,46(7): 39.
- [13] KONTARČEK A, NEMEC M, BAJEC P, et al. Single open-phase fault detection with fault-tolerant control of an inverter-fed permanent magnet synchronous machine[J]. Automatika, 2014, 55(4): 474.

声 明

本刊已许可万方数据、重庆维普、中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网

络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊相关费用抵消。如作者不同意文章被收录,请在来稿时向本刊声明,本刊将做适当处理。

《电机与控制应用》编辑部