

【引用格式】苏锦智, 张继鹏, 安群涛, 等. 基于无位置传感器的潜航器集成电机推进系统[J]. 数字海洋与水下攻防, 2023, 6(2): 246-250.

基于无位置传感器的潜航器集成电机推进系统

苏锦智^{1, 3}, 张继鹏^{1, 3}, 安群涛^{2, 3}, 王 辉^{1, 3}, 张伟峰^{1, 3}

(1. 包头长安永磁电机有限公司, 内蒙古 包头 014030;

2. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

3. 内蒙古自治区先进永磁电机及其控制技术企业重点实验室, 内蒙古 包头 014030)

摘 要 潜航器对推进电机的可靠性和体积提出了苛刻的要求, 研究采用无位置传感器技术实现驱动器、电机和螺旋桨一体化的集成电机推进 (IMP) 系统, 能够缩小电推进系统体积、提高系统的可靠性。在垂直推进系统中, 潜航器定深工作时对电机系统的动态响应具有较高的要求。为提升永磁同步电机无位置控制下的转速响应, 采用双 dq 坐标切换策略将 IF 起动和滑模观测器 (SMO) 相融合, 改善了起动的平滑性并缩短了起动时间, 对比实验验证了方案的有效性。

关键词 潜航器; 集成电机推进系统; 永磁同步电机; 无位置传感控制; 滑模观测器; 起动策略

中图分类号 TM351

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2023)02-0246-05

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2023.02.013

Sensorless Control Based Integrated Motor Propulsion System of Underwater Vehicles

SU Jinzhi^{1, 3}, ZHANG Jipeng^{1, 3}, AN Quntao^{2, 3}, WANG Hui^{1, 3}, ZHANG Weifeng^{1, 3}

(1. Baotou Changan Permanent Magnet Machine Co., Ltd, Baotou 014599, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. Inner Mongolia Enterprise Key Laboratory of Advanced Permanent Magnet Machine & Its Control Technology, Baotou 014030, China)

Abstract The reliability and volume of the propulsion motor are required strictly in underwater vehicles. The integrated motor propulsion (IMP) system adopts the sensorless control technology, which can reduce the volume of the electric propulsion system and improve the reliability of the system. In the vertical propulsion system, the dynamic response of the motor system is highly required. In order to improve speed response of the sensorless controlled permanent magnet synchronous motor, the dual dq coordinate switch strategy is adopted to integrate the IF start and the sliding mode observer (SMO). This scheme can improve the starting smoothness and shorten the starting time, which is validated by the comparative experiments.

Key words underwater vehicle; integrated motor propulsion system; permanent magnet synchronous motor; sensorless control; sliding mode observer; starting strategy

0 引言

潜航器无轴推进技术取消了传统推进系统的

传动轴, 将推进电机的转子和与螺旋桨一体化设计构成了集成电机推进系统, 具有噪声低、体积小、可靠性高的特点, 得到了研究与应用^[1-2]。永磁同

收稿日期: 2022-10-14

作者简介: 苏锦智 (1983-), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事稀土永磁电机及其控制技术研究。

基金项目: 内蒙古自治区“科技兴蒙”项目“高性能永磁电机及其控制技术与应用研发”(XM2020BT09)。

步电机因效率高、功率密度高、控制特性好,在潜航器推进系统中得到广泛应用^[3]。永磁同步电机的高性能运行控制需要检测转子位置信息,然而在集成电机推进系统中,传统推进电机轴系上的位置传感器极大地增加了水下动密封的难度,给系统的可靠性带来风险,为此,无位置传感器控制技术被应用于水下潜航器推进系统^[4]。

永磁同步电机无位置传感器技术可以分为 2 类: 1) 基于电机凸极效应的高频注入法,受信噪比等因素的影响它仅适合于零速和低速阶段; 2) 基于电机基波模型的方法,主要采用观测器获取电机反电动势或磁链估计值,进而计算转子位置和速度。由于反电动势和磁链的幅值与电机转速成正比,低速下幅值较小导致观测误差较大,因此该类方法仅适合于中、高速阶段。目前常用的观测器方法有滑模观测器 (SMO)^[5]、龙贝格观测器^[6]、模型参考自适应 (MRAS)^[7]、扩张状态观测器 (ESO)^[8]、扩展卡尔曼滤波器 (EKF)^[9]等。与其他方法相比,滑模观测器具有动态响应快、鲁棒性好等优点,得到了研究者的关注^[10]。为实现电机的全速域无位置传感器运行,需要将这类方法相结合。文献[4]研究了高频脉振电压信号注入法和模型参考自适应法相结合的无位置传感器复合检测方法,实现了潜航器推进电机的全速域运行。文献[11]研究了将高频注入与观测器相结合的加权切换策略,减小了切换时的力矩扰动。文献[12]将恒流频比控制 (IF) 起动与滑模观测器结合,通过设计过渡状态实现了 2 种控制策略的平滑切换。

IF 控制是永磁同步电机无位置控制中常用的起动方式,它通过恒电流频率频比控制拖动电机运行到一定转速,从而开启观测器算法并过渡到闭环控制的无位置模式。为提升 IF 到 SMO 的切换速度,减小切换扰动并提高切换的可靠性。本文将 IF 控制构建的虚拟 dq 坐标系与 SMO 观测的 dq 坐标系相结合,通过 dq 轴电流的平滑过渡,实现 IF 和 SMO 之间的无扰切换。将该策略应用于一台潜航器集成电机推进系统中,实现了电机转速良好的动态响应。

1 永磁同步电机的矢量控制

1.1 数学模型

永磁同步电机的电压、电流、反电动势等变量在 abc 自然坐标系中为交流量,不利于实现高性能控制,通常结合坐标变换思想,建立永磁同步电机在同步旋转转子 dq 坐标系下的数学模型。在 dq 坐标系中,各变量变换为直流量,获取类似于直流电机的控制性能。永磁同步电机在 dq 坐标下的数学模型描述为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \psi_f \\ T_e = \frac{3}{2} n_p [(L_d - L_q) i_d i_q + \psi_f i_q] \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电压和电流; R 为绕组相电阻; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感; ω 为转子电角频率; ψ_f 为永磁磁链; T_e 为电磁转矩; n_p 为电机极对数。

1.2 矢量控制系统

对于交、直轴电感相等的表贴式永磁同步电机,电磁转矩大小与 q 轴电流成正比,且 d 轴电流为 0 时可以实现最大转矩电流比控制。采用 $i_d=0$ 的永磁同步电机矢量控制系统如图 1 所示,它借助坐标变换将检测的绕组电流变换到同步旋转的 dq 坐标系中,在 dq 坐标系下分别对 d 、 q 轴电流分量进行调节,由于 d 、 q 轴的电流为直流量可采用 PI 调节器实现其无静差控制。与基于机械转子位置传

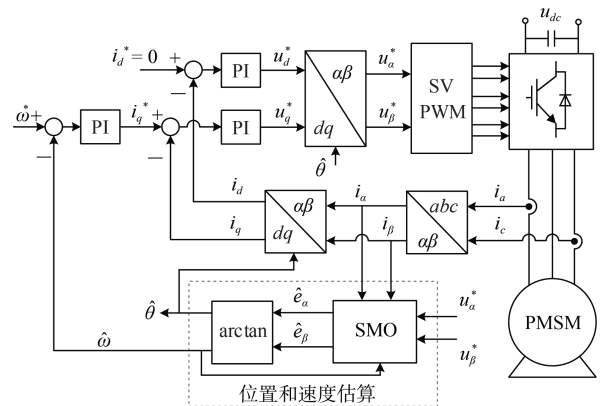


图 1 永磁同步电机无位置传感器矢量控制系统

Fig. 1 Sensorless vector control of PMSM

传感器的矢量控制不同的是,这里电机转子的位置和速度信息通过 SMO 和反正切计算构成的位置和速度估算单元获取,从而取代了传统通过位置传感器检测的方案。SMO 建立在两相静止的 $\alpha\beta$ 坐标系下,根据电机的 α 、 β 轴电压和电流观测得到电机的反电动势估计值 $\hat{e}_\alpha$ 和 $\hat{e}_\beta$, 将其送入到反正切计算单元得到位置估算值 $\hat{\theta}$ 和速度估算值 $\hat{\omega}$, 用于矢量解耦和闭环反馈。

在无位置传感器控制系统中,转子位置和速度获取的响应和精度直接影响到电机的性能甚至稳定性,且在电机运行的全速范围内,电机从零速启动,需要结合低速运行的 IF 策略,并在转速到达一定值后切换至 SMO 模式。同样地,当电机由高速减速到低速运行或停机时,则需要由 SMO 模式切换至 IF 模式。

2 基于滑模观测器的位置和速度估算

2.1 滑模观测器

根据永磁同步电机的数学模型可以构建 $\alpha\beta$ 坐标系下的状态方程为

$$\begin{cases} L \frac{di_\alpha}{dt} = -Ri_\alpha + u_\alpha - e_\alpha \\ L \frac{di_\beta}{dt} = -Ri_\beta + u_\beta - e_\beta \end{cases} \quad (2)$$

式中: e_α 、 e_β 、 i_α 、 i_β 、 u_α 、 u_β 分别为电机 α 、 β 轴的反电动势、电流和电压; L 为绕组电感,对于隐极电机有 $L_d=L_q=L$ 。这里的反电动势为转速 ω 和位置 θ 的函数,即

$$\begin{cases} e_\alpha = -\omega\psi_f \sin \theta \\ e_\beta = \omega\psi_f \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

根据式 (2) 可以构建电流状态观测模型为

$$\begin{cases} L \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = -R\hat{i}_\alpha + u_\alpha - z_\alpha \\ L \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = -R\hat{i}_\beta + u_\beta - z_\beta \end{cases} \quad (4)$$

式中: “ $\hat{\cdot}$ ”表示变量的估算值; z_α 和 z_β 为滑模切换函数,通常采用如下符号函数:

$$\begin{cases} z_\alpha = k \operatorname{sgn}(\tilde{i}_\alpha) \\ z_\beta = k \operatorname{sgn}(\tilde{i}_\beta) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 表示符号函数; k 为增益,为保证观测器稳定,取 $k > \max\{|e_\alpha|, |e_\beta|\}$; $\tilde{i}_\alpha = \hat{i}_\alpha - i_\alpha$ 、 $\tilde{i}_\beta = \hat{i}_\beta - i_\beta$ 分别为 α 、 β 轴的电流误差。将式 (4) 代入到式 (2) 中,得到 SMO 的状态误差方程为

$$\begin{cases} L \frac{d\tilde{i}_\alpha}{dt} = -R\tilde{i}_\alpha + e_\alpha - z_\alpha \\ L \frac{d\tilde{i}_\beta}{dt} = -R\tilde{i}_\beta + e_\beta - z_\beta \end{cases} \quad (6)$$

在控制量 z_α 和 z_β 的调节下系统收敛,上式的 α 、 β 轴电流误差趋于 0,这样电机的反电势可由控制量 z_α 、 z_β 进行低通滤波后得到,即滑模观测器估算 $\alpha\beta$ 轴反电势为

$$\begin{bmatrix} \hat{e}_\alpha \\ \hat{e}_\beta \end{bmatrix} = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \begin{bmatrix} z_\alpha \\ z_\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: ω_c 为低通滤波器的截至频率,滤波后的反电势包含电机的转速与位置信息,可以按如下公式进行求取:

$$\begin{cases} \hat{\theta} = \arctan\left(\frac{-\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta}\right) \\ \hat{\omega}_e = \frac{\sqrt{(\hat{e}_\alpha)^2 + (\hat{e}_\beta)^2}}{\psi_f} \end{cases} \quad (8)$$

滑模观测器的结构框图如图 2 所示。

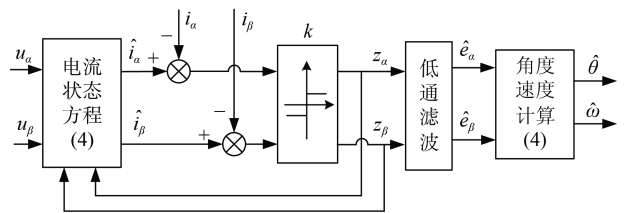


图 2 滑模观测器结构框图
Fig. 2 Diagram of the SMO

2.2 起动与切换策略

电机起动时转速和反电动势均为 0, 无法通过观测器获取转子位置, 可以通过恒流频比的 IF 控制拖动电机起动。IF 控制下, 电机转子角度由控制器给定, 且频率逐步提升。在电流 i_{q^*} 的拖动下, 电机逐步旋转起来, 给定坐标系 d^*q^* 将超前于实际坐标系 dq 一个负载角 $\Delta\theta$, 如图 3 所示, 电机的力矩为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \psi_f i_{q^*} \cos \Delta \theta \quad (9)$$

为实现永磁同步电机全速范围内的无位置传感器控制, 需要实现 IF 控制与 SMO 双闭环控制之间切换。在状态切换过程中, 电机可能会切换策略不当、切换过程中负载扰动等因素导致电机失步。常见的加权函数状态切换法能改善切换时的转矩和转速扰动, 但对负载的适应性较差。基于功角自平衡原理逐步减小电流幅值的切换策略对负载的适应性较好, 但快速性较差且容易因为负载扰动导致电机失步。

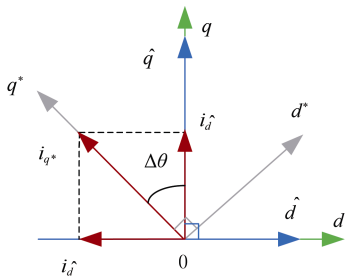


图 3 IF 坐标系与观测坐标系之间的关系

Fig. 3 Relationship between IF coordinate system and observing coordinate system

下面介绍在双 dq 坐标系实现的状态切换策略。电机起动到一定转速后, SMO 可以准确估算出转子的位置, 这样 SMO 估算坐标系 $\hat{d}\hat{q}$ 与实际坐标系 dq 重合。在 IF 控制下, 由于 d^*q^* 坐标系与 dq 坐标系之间存在角度差 $\Delta\theta$, 由 IF 控制直接切换到转速闭环模式时, 将产生较大的扰动且容易出现失步。为提高切换的稳定性、加快响应, d^*q^* 的电流指令赋值给 $\hat{d}\hat{q}$ 坐标系中, 使切换前后电流矢量的大小和方向均保持不变, 即

$$\begin{cases} i_q^* = \hat{i}_q = i_{q^*} \cos \Delta \theta \\ i_d^* = \hat{i}_d = -i_{q^*} \sin \Delta \theta \end{cases} \quad (10)$$

切换到闭环模式后, 逐步将 i_d^* 减小到 0, 完成起动过程。SMO 向 IF 切换遵从上述过程的逆过程, 将切换时刻的 q 轴电流指令、运行频率赋值给 IF 状态, 实现 SMO 到 IF 的平滑切换。该切换策略与实际运行的电流大小无关, 因此适应于各种功率的电机系统。由于采用 IF 的起动策略, 因此存在 IF 运行效率低、加减速受限的缺点。

3 实验结果

设计 1 kW 集成电机推进系统, 并对本文所采用的无位置控制算法和切换策略进行验证。电机额定转速为 1 200 r/min, 额定转矩为 8 N·m, 系统供电电压为 270 V。控制器采用 TMS320F28335 作为主控芯片, 逆变器选用集成功率模块 (IPM), 开关频率为 10 kHz。

电机轴上分别施加 5 N·m 和 8 N·m 负载力矩, 采用传统减小电流矢量幅值切换策略的位置波形分别如图 4 和图 5 所示。在 5 N·m 负载力矩下电机由 IF 切换至 SMO 过程中, 转速出现大幅落后后能够逐步稳定到 SMO 模式运行, 并且在多次测试中偶尔会出现切换失败导致电机失步现象。在 8 N·m 负载力矩下, IF 至 SMO 切换过程中电机频繁出现失步停机, 并且多次实验表明, 电机所带负载越大失步的概率越高。上述实验表明: IF 与 SMO 之间切换过程中, 切换策略的选取影响到电机的带载能力, 决定了电机对负载扰动的抵抗性能。传统通过逐步减小电流使负载角趋于零时进行切换的策略存在易受负载扰动影响, 切换时间较长的问题。

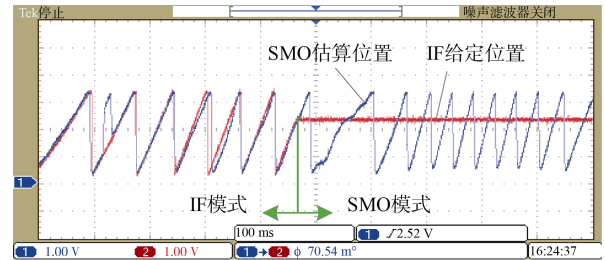


图 4 切换过程中的转速扰动

Fig. 4 Speed disturbance when switching from IF to SMO

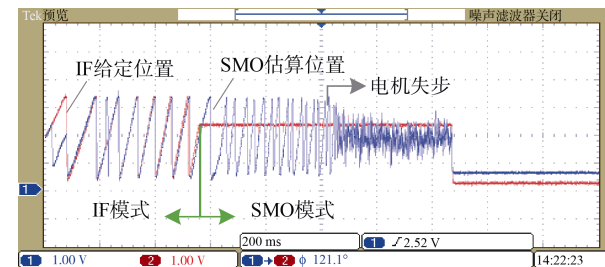


图 5 切换过程中的失步

Fig. 5 The motor is out of step when switching from IF to SMO

图6为采用本文所述的双 dq 坐标系切换策略的实验结果,电机带额定的 $8\text{ N}\cdot\text{m}$ 负载起动,由IF至SMO模式可以平滑切换,切换前后转速平稳无扰动,并且多次测试中电机均能快速平滑地起动和稳定运行。对集成电机推进系统进行水下起动和正反转测试,测试结果表明:采用本文所设计的算法电机表现出良好的动态特性和稳定性,满足潜航器对集成电机推进系统的要求。

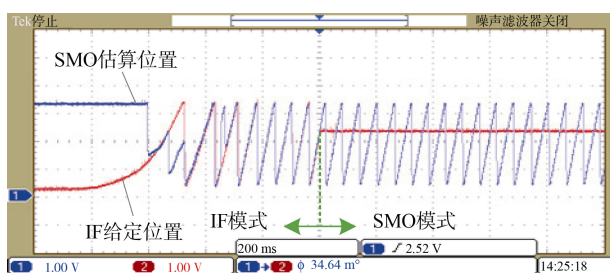


图6 双 dq 坐标系下的平滑切换

Fig. 6 Smooth switching under the double dq frames

基于该算法开发的集成推进电机系统已应用于潜航器中,经过4年左右的充分验证,表明了该算法可靠性高、性能稳定。

4 结束语

采用无位置传感器控制永磁同步电机的潜航器集成电机推进系统具有体积小、效率高、可靠性高等优点。本文设计了基于滑模观测器的永磁同步电机无位置控制系统,通过对电机起动过程的研究,低速段采用IF控制,高速段为SMO无位置控制,采用双 dq 坐标系的切换策略实现了IF控制和SMO控制的无扰切换,提升了系统运行的稳定性和快速性。测试结果验证了该系统具有良好的综合性能,能够满足潜航器垂推系统的需求。

参考文献

- [1] 张晓飞,叶家玮,曾晓鹏. 对转集成电机推进器研究[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(12): 59-62.

- [2] 安斌,石秀华,宋绍忠. 新型水下集成电机推进器的特种电机研究[J]. 微特电机, 2005(1): 8-10.
- [3] 许家群. 水下机器人永磁推进系统技术概况[J]. 机器人产业, 2021(4): 58-63.
- [4] 马景,彭志凌,杨煜,等. 基于无位置传感器的水下航行器推进系统研究[J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41(6): 106-111.
- [5] KIM H, SON J, LEE J. A High-speed sliding-mode observer for the sensorless speed control of a PMSM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(9): 4069-4077.
- [6] WU C, CHEN Z, CHEN Q. Hybrid-modulation-based full-speed sensorless control for permanent magnet synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 5908-5917.
- [7] TANG Y, XU W, LIU Y, et al. Dynamic performance enhancement method based on improved model reference adaptive system for SPMSM sensorless drives[J]. IEEE Access, 2021, 9: 135012-135023.
- [8] ZHANG Y, YIN Z, BAI C, et al. A rotor position and speed estimation method using an improved linear extended state observer for IPMSM sensorless drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(12): 14062-14073.
- [9] QUANG N K, HIEU N T, HA Q P. FPGA-based sensorless PMSM speed control using reduced-order extended KALMAN filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(2): 6574-6582.
- [10] AN Q T, ZHANG J Q, AN Q, et al. Frequency-adaptive complex-coefficient filter-based enhanced sliding mode observer for sensorless control of permanent magnet synchronous motor drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(1): 335-343.
- [11] 王高林,张国强,贵献国,等. 永磁同步电机无位置传感器混合控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 103-109.
- [12] 刘计龙,肖飞,麦志勤,等. IF控制结合滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器复合控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(4): 919-929.

(责任编辑:肖楚楚)