

具有不确定扰动的永磁同步电机自适应控制

李鹏, 柯鹏辉, 李艳杰, 陈人楷, 付国

(长沙市比亚迪汽车有限公司, 长沙 410116)

摘要:考虑到永磁同步电机对电机参数变化和外部扰动的敏感性,本文提出一种自适应控制方案。该方案将电流补偿与反步设计相结合,降低了集总扰动对电机系统的影响。理论分析和仿真试验验证了该方案的有效性。

关键词:永磁同步电机; 自适应控制; 不确定扰动; 跟踪控制

中图分类号:U469.72; TM341

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)06-0019-04

Adaptive Control of Permanent Magnet Synchronous Motor with Uncertain Disturbances

LI Peng, KE Penghui, LI Yanjie, CHEN Renkai, FU Guo

(Changsha BYD Auto Co., Ltd., Changsha 410116, China)

Abstract: Considering the sensitivity of permanent magnet synchronous motor to motor parameter variations and external disturbances, this paper proposes an adaptive control scheme, which integrates current compensation with backstepping design to reduce the influence of lumped disturbances on the controlled motor system. The effectiveness of this scheme is validated through theoretical analysis and simulation experiments.

Key words: permanent magnet synchronous motor; adaptive control; uncertain disturbances; tracking control

由于永磁同步电机在高效率和高功率密度方面具有优势,故其在电动汽车中被广泛应用。但其对参数变化和扰动的高度敏感性,极大地影响其运行性能^[1-3]。为改善电机系统性能,学者们提出过诸多控制策略,如自抗扰控制^[4-6]、自适应控制^[7-10]、预测控制^[11-12]等。本文介绍一种基于电流补偿的自适应控制方法,处理因电机参数变化和外部扰动导致的集总扰动,以提高电机系统的动态性能。

1 永磁同步电机模型

永磁同步电机在理想条件下的两相旋转轴的数学模型为:

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{3P_n\psi_f}{2J}i_q - \frac{B}{J}\omega - \frac{T_L}{J} \\ \dot{i}_q &= -\frac{R_s}{L}i_q - P_n\omega i_d - \frac{P_n\psi_f}{L}\omega + \frac{1}{L}u_q \\ \dot{i}_d &= -\frac{R_s}{L}i_d + P_n\omega i_q + \frac{1}{L}u_d\end{aligned}\quad (1)$$

式中: ω 为机械角速度; i_d 、 i_q 分别为d轴和q轴的电流分量; u_d 、 u_q 分别为d轴和q轴的电压分量; ψ_f 、 R_s 、 L 、 P_n 分别为永磁体磁链、定子电阻、定子电感和极对数; J 、 B 、 T_L 分别为转动惯量、摩擦因数和负载转矩。

为了简化表述,并且尽可能清晰,令

$$\theta_1 = \frac{3P_n\psi_f}{2J}, \theta_2 = \frac{B}{J}, \theta_3 = \frac{T_L}{J},$$

收稿日期:2024-03-12。

基金项目:湖南省重点研发计划(2023GK2044)。

第一作者:李鹏(1983—),男,工程师;主要从事商用车整车研究与开发工作。E-mail: li.peng2@byd.com。

通信作者:柯鹏辉(1988—),男;主要从事商用车整车电器及三电系统开发工作。E-mail: ke.penghui@byd.com。

$$g_1 = \frac{R_s}{L}, g_2 = P_n, g_3 = \frac{P_n \psi_f}{L}, g_4 = \frac{1}{L} \quad (2)$$

并引入坐标变换 $x_1 = \omega$ 、 $x_2 = i_q$ 、 $x_3 = i_d$ ，则永磁同步电机的模型可改写为：

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \theta_1 x_2 - \theta_2 x_1 - \theta_3 \\ \dot{x}_2 &= -g_1 x_2 - g_2 x_1 x_3 - g_3 x_1 + g_4 u_q \\ \dot{x}_3 &= -g_1 x_3 + g_2 x_1 x_2 + g_4 u_d \end{aligned} \quad (3)$$

电机在运行过程中，不可避免地会受到电机参数（如定子电阻、定子电感等）的变化和外部扰动的影响。以 $\dot{x}_1$ 为例，某时刻电机参数 θ_i 产生变化 $\Delta\theta_i$ ($i=1,2,3$)，同时受外部扰动 ε_1 的影响，则，

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= (\theta_1 + \Delta\theta_1) x_2 - (\theta_2 + \Delta\theta) x_1 - (\theta_3 + \Delta\theta) + \varepsilon_1 = \\ &\theta_1 x_2 - \theta_2 x_1 - \theta_3 + f_1 \end{aligned} \quad (4)$$

类似地， $\dot{x}_2$ 和 $\dot{x}_3$ 同样会受到电机参数变化和外部扰动 ε_2 、 ε_3 的影响。因此，模型式可重写为：

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \theta_1 x_2 - \theta_2 x_1 - \theta_3 + f_1 \\ \dot{x}_2 &= -g_1 x_2 - g_2 x_1 x_3 - g_3 x_1 + g_4 u_q + f_2 \\ \dot{x}_3 &= -g_1 x_3 + g_2 x_1 x_2 + g_4 u_d + f_3 \end{aligned} \quad (5)$$

式中： f_1 、 f_2 、 f_3 分别为相应变量由电机参数变化和外部扰动引起的集总扰动。这些扰动是未知的，并且随时间在一定范围内（即有界）变化。

本文的控制目标是为具有未知集总扰动的永磁同步电机设计一个自适应控制器。在集总扰动有界的情况下，将电流补偿引入到反步设计，使得电机系统保持稳定，电机转速可以快速跟踪期望转速。自适应控制器的结构框图如图1所示。

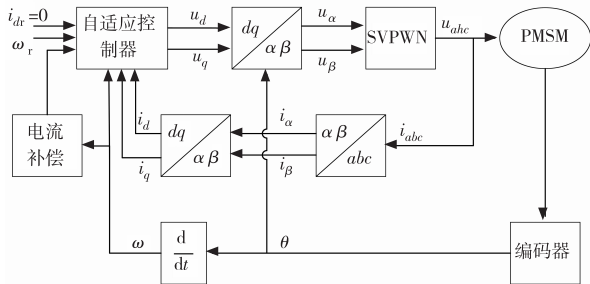


图1 自适应控制器结构框图

为实现控制目标，需引入以下假设：存在未知常数 $\bar{f}_i$ ，使得未知时变的集总扰动 f_i 满足式(6)。

$$|f_i| \leq \bar{f}_i, i=1,2,3 \quad (6)$$

由于实际中集总扰动 f_i ($i=1,2,3$) 一般都有界，这就简化了控制系统的设计。

2 自适应控制器

通过逐步建立误差函数和设计虚拟控制律的方式，在无需知道集总扰动数学表达式的情况下，根据当前的状态误差调整控制策略，提高系统的自适应性。此外，精心设计的控制律使系统在受到集总扰动影响时仍然表现出良好的稳定性。

2.1 控制器设计

为处理未知的集总扰动，设计一个基于电流补偿的自适应控制器。首先引入坐标变换：

$$z_1 = x_r - x_1, z_2 = x_2 - i_{qr}, z_3 = x_3 - i_{dr} \quad (7)$$

其中， x_r 、 i_{qr} 、 i_{dr} 分别为转速、 q 轴电流和 d 轴电流的期望值， $i_{dr}=0$ 。因此， z_1 、 z_2 、 z_3 对时间的导数分别为：

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= -\theta_1(z_2 + i_{dr}) + \theta_2 x_1 + \theta_3 - f_1 \\ \dot{z}_2 &= -g_1 x_2 - g_2 x_1 x_3 - g_3 x_1 + g_4 u_q + f_2 - \frac{\partial i_{qr}}{\partial x_1} \dot{x}_1 - \frac{\partial i_{qr}}{\partial q} \dot{q} \\ \dot{z}_3 &= -g_1 x_3 + g_2 x_1 x_2 + g_4 u_d + f_3 \end{aligned} \quad (8)$$

定义正定函数

$$V = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2} z_3^2 + \frac{1}{2\gamma} \dot{q}^2 \quad (9)$$

其中， γ 为正常数， q 为 q 轴电流补偿。那么，

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq z_1 \dot{z}_1 + z_2 \dot{z}_2 + z_3 \dot{z}_3 + \frac{1}{\gamma} \dot{q} \dot{q} \leq -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - \\ &c_3 z_3^2 - \frac{c_4}{\gamma} \dot{q}^2 + z_1 \left(-\theta_1 i_{qr} + c_1 z_1 + \theta_2 x_1 + \theta_3 + \frac{1}{\chi} z_1 + q \right) + \\ &z_2 \left(g_4 u_q + c_2 z_2 - \theta_1 z_1 - g_1 x_2 - g_3 x_1 + \frac{1}{\chi} z_2 - \frac{\partial i_{qr}}{\partial x_1} \dot{x}_1 - \frac{\partial i_{qr}}{\partial q} \dot{q} \right) + \\ &z_3 \left(g_4 u_d + c_3 z_3 - g_2 x_1 z_2 - g_1 x_3 + g_2 x_1 x_2 + \frac{1}{\chi} z_3 \right) + \\ &\frac{1}{\gamma} \dot{q} (\dot{q} - \gamma z_1 + c_4 q) + \chi_1 + \chi_2 + \chi_3 \end{aligned} \quad (10)$$

其中， c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 为可调正标量， χ 、 χ_1 、 χ_2 、 χ_3 为设计过程中产生的正常数。进而，将虚拟控制律 i_{qr} ，系统实际控制律 u_q 和 u_d ，以及电流补偿更新律 $\dot{q}$ 设计为：

$$i_{qr} = \frac{1}{\theta_1} \left(c_1 z_1 + \theta_2 x_1 + \theta_3 + \frac{1}{\chi} z_1 + q \right) \quad (11)$$

$$u_q = -\frac{1}{g_4} \left(c_2 z_2 - \theta_1 z_1 - g_1 x_2 - g_3 x_1 + \frac{1}{\chi} z_2 - \frac{\partial i_{qr}}{\partial x_1} \dot{x}_1 - \frac{\partial i_{qr}}{\partial q} \dot{q} \right) \quad (12)$$

$$u_d = -\frac{1}{g_4} \left(c_3 z_3 - g_2 x_1 z_2 - g_1 x_3 + g_2 x_1 x_2 + \frac{1}{\chi} z_3 \right) \quad (13)$$

$$\dot{q} = \gamma z_1 - c_4 q \quad (14)$$

因此,

$$\dot{V} \leq -\sum_{i=1}^3 c_i z_i^2 - \frac{c_4}{\gamma} q^2 + \chi_1 + \chi_2 + \chi_3 \quad (15)$$

2.2 稳定性分析

为保证自适应控制方案能可靠工作,还应分析其稳定性。具体而言,要证明该方案能够确保电机系统的所有状态有界,并且能够实现电机转速对期望转速的快速跟踪。

对于式(15),定义一个用于辅助证明的正常数 C 满足式(16)。

$$c_i \geq C, i=1,2,3,4 \quad (16)$$

结合式(9),式(15)可放缩简化为:

$$\dot{V} \leq -2CV + D \quad (17)$$

其中, $D = \chi_1 + \chi_2 + \chi_3$ 。在 $t \in [0, +\infty)$ 求解不等式。

$$0 \leq V \leq \left(V(0) - \frac{D}{2C} \right) e^{-2Ct} + \frac{D}{2C} \quad (18)$$

通过式(9)和式(18)可知 z_1, z_2, z_3, q 是有界的。再由式(7)、式(11)和式(14)可以推导出系统状态参数 x_1, x_2, x_3 , 虚拟控制律 i_{qr} 和电流补偿更新律 $\dot{q}$ 也是有界的。进而,由式(12)、式(13)可推断系统的实际控制律 u_q 和 u_d 也是有界的。因此,电机系统的所有状态都是有界的。又因为

$$\frac{1}{2} z_1^2 \leq V \Rightarrow \lim_{t \rightarrow +\infty} |z_1| = \lim_{t \rightarrow +\infty} |x_r - x_1| \leq \sqrt{\frac{D}{C}} \quad (19)$$

所以,通过调整可调标量 c_1, c_2, c_3, c_4 ,跟踪误差便可收敛到原点附近的任意小邻域,电机的转速可以快速跟踪期望转速。因此,在集总扰动有界的情况下,本文提出的自适应控制器可以使电机系统稳定运行。

3 仿真分析

为验证本文所提出的自适应控制方案对具有不

确定扰动的永磁同步电机(PMSM)系统的有效性,搭建 PMSM 控制系统,其具体参数见表 1^[7]。

表 1 永磁同步电机参数

参数名称	参数值
额定转矩 $T_N / \text{N} \cdot \text{m}$	50
额定转速 $n_N / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	3 000
定子电阻 R_s / Ω	0.545
dq 轴电感 L / mH	1.65
永磁体磁链 ψ_f / Wb	0.109
转动惯量 $J / \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.54
摩擦系数 B	0.02

本文设计的控制器的参数选择为 $c_1 = 2\ 200, c_2 = 1\ 200, c_3 = 1\ 600, c_4 = 50, \gamma = 10, \chi = 0.001$, 集总扰动设置为 $f_1 = 500 + 500 \sin(800\pi t), f_2 = 500 \sin(800\pi t), f_3 = 500 \cos(800\pi t)$, 电机将从静止状态启动, x_1, x_2, x_3 的初始值都是 0。

1) 电机空转工况下,同时受到集总扰动 f_1, f_2, f_3 影响时,电机的转速响应如图 2 所示。结果显示,本文方案的响应速度快且转速波动小,展示了其良好的抗干扰能力。

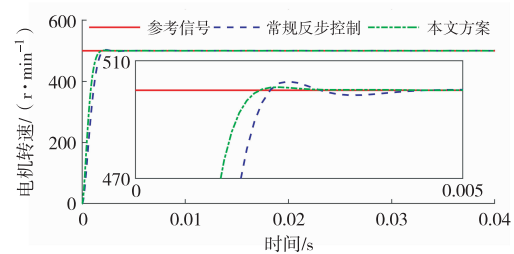


图 2 电机空转时的转速响应

2) 系统稳定运行工况下, $t = 0.02 \text{ s}$ 时负载转矩 T_L 由 0 变为 T_N , 同时受到集总扰动 f_1, f_2, f_3 影响时, 电机的转速响应如图 3 所示。在这种更为复杂的工况下, 本文方案不仅保持了响应速度快和转速波动小的优势, 而且展示了其在负载变化下良好的抗干扰能力。

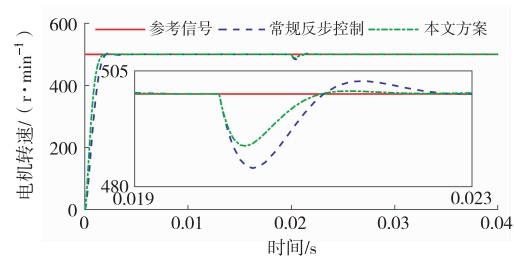


图 3 负载转矩变化时的转速响应

3) 电机转速 ω 从 500 r/min 升高到 1 000 r/min, 负载转矩 $T_L = T_N/2$, 同时受到集总扰动 f_1 、 f_2 、 f_3 影响时, 电机的升速响应如图 4 所示。在此工况下, 本文方案依然保持了响应速度快和转速波动小的优势, 展示了其在动态升速条件下良好的抗干扰能力。

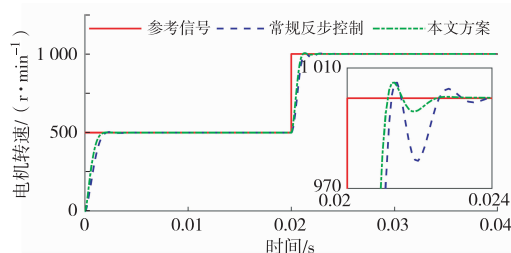


图4 电机升速响应

4) 电机转速 ω 从 1 000 r/min 降低到 500 r/min, 负载转矩 $T_L = T_N/2$, 同时受到集总扰动 f_1 、 f_2 、 f_3 影响时, 电机的减速响应如图 5 所示。在此工况下, 本文方案同样保持了响应速度快和转速波动小的优势, 展示了其在动态减速条件下良好的抗干扰能力。

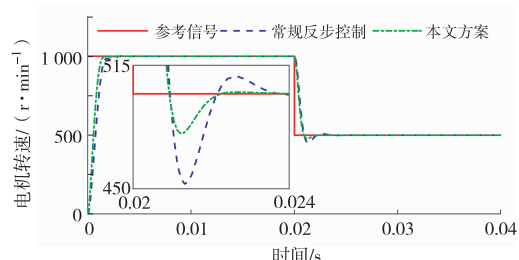


图5 电机减速响应

综上可知, 当电机受到集总扰动影响时, 本文提出的自适应控制方案可以有效地对系统进行补偿。在电机空转、负载变化、升速响应和减速响应等情况下, 该方案能够快速跟踪期望转速。相较于常规自适应控制方案, 本方案具有更好的响应速度和抗干扰能力。

4 结束语

本文针对受集总扰动影响的永磁同步电机系统, 提出了一种基于电流补偿的自适应控制方案。该方案结合电流补偿和反步设计, 优化处理集总扰动的影响, 从而实现转速快速跟踪期望值。仿真结果表明,

该方案在响应速度和抗干扰能力方面展示出更好的性能。

参考文献:

- [1] WANG Weiran, TAN Fei, WU Jiaxin, et al. Adaptive Integral Backstepping Controller for PMSM with AWPSO Parameters Optimization[J]. Energies, 2019, 12(13): 1-24.
- [2] DING Shihong, HOU Qianqiang, WANG Hai. Disturbance - Observer - Based Second - Order Sliding Mode Controller for Speed Control of PMSM Drives[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2023, 38(1): 100-110.
- [3] ZHANG Yongchang, JIN Jialin, HUANG Lanlan. Model-Free Predictive Current Control of PMSM Drives Based on Extended State Observer Using Ultralocal Model[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(2): 993-1003.
- [4] 余致廷, 董旺华, 秦亚胜, 等. 基于反步滑模变结构的 PMSM 速度控制[J]. 控制工程, 2016, 23(S1): 1-5.
- [5] 闫峰, 夏斌, 程燃. 基于自抗扰控制的永磁同步电机速度跟踪控制[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(8): 134-136.
- [6] 魏学良, 汤廷孝, 邓益民. 基于线性自抗扰的永磁同步电机速度控制研究[J]. 机械制造, 2021, 59(10): 44-48.
- [7] 杨启涯, 庄海, 张颖杰. 永磁同步电机积分反步自适应控制[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(8): 15-18.
- [8] LIU Xudong, LI Ke, ZHANG Chenghui. Improved Backstepping Control with Nonlinear Disturbance Observer for the Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2019, 14(1): 275-285.
- [9] LI Longfei, XIAO Jie, ZHAO Yun, et al. Robust position anti-interference control for PMSM servo system with uncertain disturbance[J]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2020, 4(2): 151-160.
- [10] 包海强, 李小华. 多参数不确定的永磁同步电机自适应跟踪控制[J]. 辽宁科技大学学报, 2022, 45(1): 59-64.
- [11] 邱建琪, 毛意涵, 陈卓易, 等. 永磁同步电机新型有限集模型预测速度控制[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(4): 1-9.
- [12] 杨亚, 朱强, 徐杰. 模型预测转矩自抗扰控制下直驱永磁同步发电机最大追踪系统[J]. 西安工程大学学报, 2024, 38(1): 16-23.