

DOI: 10.11992/tis.201707028

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20180404.1621.016.html>

磁通切换型定子永磁电机的建模与线性自抗扰控制

王科磊, 陈增强, 孙明玮, 孙青林
(南开大学 计算机与控制工程学院, 天津 300350)

摘要: 磁通切换型永磁 (FSPM) 电机是一种新型的定子永磁型无刷电机, 在制造业及航海等领域具有很好的应用前景。FSPM 电机的高性能控制具有很大的难度。在分析这种电机工作原理的基础上, 建立了其在定子坐标系和转子旋转坐标系下的数学模型。采用电流滞环的 PWM 控制策略, 并将线性自抗扰控制器 (LADRC) 引入到其调速系统中。稳态和动态仿真结果表明, 采用 LADRC 的磁通切换永磁电机比采用 PI 控制的调速系统具有更好的启动特性, 并在转速突变和突加负载扰动时具有更强的鲁棒性。

关键词: 磁通切换; 定子永磁电机; 线性自抗扰控制器; 调速系统; 电流滞环比较; PWM 控制; 鲁棒性

中图分类号: TP18; TM301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2018)03-0339-07

中文引用格式: 王科磊, 陈增强, 孙明玮, 等. 磁通切换型定子永磁电机的建模与线性自抗扰控制[J]. 智能系统学报, 2018, 13(3): 339-345.

英文引用格式: WANG Kelei, CHEN Zengqiang, SUN Mingwei, et al. Modeling and linear active-disturbance-rejection control of flux-switching stator permanent magnet motor[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2018, 13(3): 339-345.

Modeling and linear active-disturbance-rejection control of flux-switching stator permanent magnet motor

WANG Kelei, CHEN Zengqiang, SUN Mingwei, SUN Qinglin
(College of Computer and Control Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China)

Abstract: Flux-switching permanent magnet (FSPM) motor is a new type of stator permanent magnet brushless motor. It has good prospects for application in the manufacturing industry and navigation. However, it is very difficult to realize high-performance control of FSPM motors. In this study, based on an analysis of the working principle of this type of motor, mathematical models are established for the stator coordinate system and the rotor rotating coordinate system. The current-hysteresis PWM control strategy is adopted, and the linear active-disturbance-rejection controller (LADRC) is introduced into the speed control system of this paper. The steady-state and dynamic-state simulation results show that the FSPM with LADRC has better starting characteristics than the PI-controlled speed regulation system. In addition, the proposed system is more robust to mutation of rotation speed and sudden exertion of load disturbance.

Keywords: flux-switching; stator permanent magnet motor; linear active-disturbance-rejection controller; speed regulation system; current hysteresis comparison; PWM control; robustness

传统的转子永磁型电机需要对其转子加装专门的装置, 才能克服转子在运作时所产生的离心力, 因此导致此电机结构复杂, 制造成本高昂。磁通切换型永磁电机 (flux-switching permanent magnet, FSPM) 将永磁体放在定子侧, 是一种较新的定子永磁型电机, 其克服了以上所述的转子永磁电机存在

的问题, 被认为具有广泛的应用价值^[1-3]。定子永磁型电机具有直流偏置磁场、定子外漏磁和端部漏磁等独特的电磁现象^[4], 这使得此类电机的分析和计算难度进一步加大。对于 FSPM 电机的高性能控制, 结合矢量控制和电流滞环控制的电机控制方法^[5], 目前被国内外学者采用较多。针对不同的控制要求, FSPM 电机还可以采用 SVPWM 控制和弱磁控制等策略^[6-7]。近年来, 对于 FSPM 电机的调速系统, 一些先进控制算法^[8-10]也越来越多地被应用于其

收稿日期: 2017-07-17. 网络出版日期: 2018-04-04.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61573199, 61573197).

通信作者: 陈增强. E-mail: chenzq@nankai.edu.cn.

中。文献[11]提出了一种基于电压空间矢量的脉宽调制技术 (SVPWM) 的控制策略, 其目的在于使电机获得幅值恒定的圆形磁场, 提高了系统的精确度, 因此在交流电机的调速系统中得到了较为广泛的应用。文献[12]提出了一种带积分条件的自整定模糊 PI 控制方法, 该方法对电机非线性电磁方面的特性具有良好的适应能力。

自抗扰控制 (ADRC) 是韩京清教授创立的一种不依赖于被控过程模型的原创性控制思想和方法^[13], 其核心是将系统的外部扰动以及内部未建模动态结合在一起作为“总扰动”, 通过扩张状态观测器 (ESO) 对系统各个状态和总扰动进行在线估计, 并及时地将总扰动补偿到反馈控制中。高志强等学者提出了线性自抗扰控制 (LADRC)^[14], 将 ADRC 的主要环节进行了线性化处理, 使得获得的 LADRC 具有结构简单、易于性能分析和参数整定等特点^[15], 因此极大地促进了自抗扰控制理论的深入发展及在工程中的推广与应用^[16-19]。

以定子 12 槽、转子 10 极的三相 FSPM 电机作为本文的研究对象, 定子绕组采用集中式分布, 其转子结构和开关磁阻电机相似。本文在掌握了其工作原理的基础上, 建立了 FSPM 电机的稳态和动态仿真模型, 并尝试将 LADRC 引入到电机的调速系统中, 数值仿真结果表明本文所提出的 LADRC 控制方案能够有效地提高系统的鲁棒性和抗干扰能力。

1 数学模型

三相 12/10 极 FSPM 电机的结构剖面如图 1 所示, 定子部分由 U 型磁芯顺次组装而成, 每两个磁芯之间嵌入一块永磁体, 转子上无绕组和永磁体。将 12 个电枢线圈共分为 3 组, 每 4 个串联成一相电枢绕组。

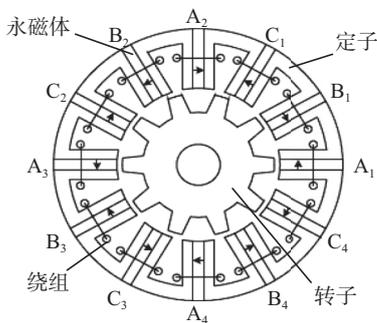


图 1 FSPM 电机结构图
Fig. 1 Sectional view of FSPM motor

当转子齿与同一相线圈下分别属于两个 U 型单元的定子齿对齐时, FSPM 电机的电枢绕组里匝链的永磁磁链的极性会发生变化, 通过 FSPM 电机定转子齿之间这种独特的设计, 来产生感应电势, 可以实现磁通之间的切换。

假设 FSPM 电机的三相绕组结构与参数相同,

忽略铁芯损耗, 由此可得其在定子坐标系下的电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = R_{ph} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L_1 \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{ma} \\ e_{mb} \\ e_{mc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_a 、 u_b 、 u_c 为三相电压; i_a 、 i_b 、 i_c 为三相电流; R_{ph} 为绕组电阻; $L_1 = L_0 - M_0$, 其中 L_0 、 M_0 分别为自感和互感的基波分量; ψ_a 、 ψ_b 、 ψ_c 为三相绕组匝链的总磁链; e_{ma} 、 e_{mb} 、 e_{mc} 为三相反电动势。

在电机运行过程中, 如果转矩脉动过大则会对电机的正常运行产生负面影响。由于 FSPM 电机自身的永磁气隙磁密度比较高, 该电机的齿槽转矩要比传统的转子永磁型电机在数值上大得多。因此考虑齿槽转矩影响后的瞬时电磁转矩为

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_r} = T_{pm} + T_r + T_{cog} \quad (2)$$

式中: P_{em} 为电磁功率; T_{pm} 、 T_r 和 T_{cog} 分别为电机的永磁、磁阻和齿槽转矩。

FSPM 电机的机械运动方程可以表示为

$$T_{em} = J \frac{d\omega_r}{dt} + T_L + B_v \omega_r \quad (3)$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (4)$$

式中: ω_r 为电机机械角速度; T_L 为负载转矩; J 为系统的转动惯量; B_v 为系统的摩擦系数。

FSPM 电机的反电动势和电流均为正弦波波形, 因此其在转子旋转坐标系下 (d - q 轴) 的模型和正弦波永磁同步电机类似。忽略铁芯饱和, 经过 Park 变换后的 FSPM 模型为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{ph} & 0 & 0 \\ 0 & R_{ph} & 0 \\ 0 & 0 & R_{ph} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_e \psi_q \\ \omega_e \psi_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T_{em} = \frac{3 P_{em}}{2 \omega_r} = \frac{3}{2} P_r [\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] + T_{cog} \quad (6)$$

式中: u_d 、 u_q 、 i_d 、 i_q 、 ψ_d 、 ψ_q 分别为定子电压和定子磁链在直轴和交轴上的分量; ω_e 为电角速度, $\omega_e = P_r \omega_r$; P_r 为转子极数。

永磁磁链从定子 abc 坐标系变换到转子 d - q 坐标系后, 仅仅只在 d 轴绕组中匝链一个恒定的永磁磁链, FSPM 的直轴永磁磁链 ψ_{md} 和交轴永磁磁链 ψ_{mq} 满足以下关系式:

$$\begin{cases} \psi_{md} = \psi_m \\ \psi_{mq} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

2 基于 LADRC 的 FSPM 矢量控制

2.1 矢量控制

近年来矢量控制已在无刷交流调速系统中得到了较为广泛的应用。对调速系统而言, 其运行区域一般可分为恒转矩区和恒功率区, 其中恒转矩区是

指电机转速处于低于额定转速的运行区域, 恒功率区则相反。

目前在恒转矩区常采用的电流控制方法有 4 种, 分别为 $i_d = 0$ 、恒磁链、 $\cos \phi = 1$ 和最大转矩电流比控制; 这 4 种电流控制算法是根据给定的电磁转矩 T_{em}^* 对直轴电流 i_d^* 和交轴电流 i_q^* 的大小进行合理的分配。

在恒功率区通常采取弱磁控制, 弱磁控制的目的在于通过在 d 轴施加与永磁磁链极性相反的电流分量以产生一个电枢反应磁链来减小或抵消永磁磁链, 因此能够减小合成电动势, 保持电枢绕组电压的平衡, 拓宽了系统的调速范围。

$i_d = 0$ 是上述 4 种电流控制算法中最简单的一种, 这种控制方法使得用来调节磁场的直轴电流为 0, 并根据给定的电磁转矩 T_{em}^* 通过计算得到交轴电流 i_q^* , 本文采用 $i_d = 0$ 控制, 则其电磁转矩公式可简化为

$$T_{em} = T_{pm} + T_{cog} = \frac{3}{2} P_r \psi_m i_q + T_{cog} \quad (8)$$

2.2 线性自抗扰控制

自抗扰控制技术是基于控制理论上发展起来的一种新型实用技术, 它不仅吸收了现代控制理论的丰硕成果, 更是对 PID 控制的延续和升华。通过实时地估计系统的总扰动并加以补偿, 实现动态系统的反馈线性化, 将非线性系统转化为线性系统的串联积分器的形式, 然后针对该串联积分器标准型设计反馈控制。

下面以一阶 LADRC 为例来说明控制器的设计原理。设一类不确定对象为

$$\dot{y} = -ay + w + bu \quad (9)$$

式中: u 为控制量; y 为输出量; w 为未知外部扰动; b 为系统的放大倍数。为了将系统转化为标准的串联积分器的形式, 设 $f = -ay + w + (b - b_0)u$ 为总扰动; b_0 为 b 的估计值。

将式 (9) 写成状态方程的形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + b_0 u \\ \dot{x}_2 = \dot{f} = h \\ y = x_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中: $x_2 = f$ 是未知的被扩张的状态变量, 且 $\dot{f} = h$, 可由式 (11) 表示的线性扩张状态观测器 (LESO) 估计出来:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1(z_1 - y) + b_0 u \\ \dot{z}_2 = -\beta_2(z_1 - y) \end{cases} \quad (11)$$

通过选择合适的观测器增益 β_1 、 β_2 , LESO 各状态量 $z_i(t)$ 可分别对系统式 (10) 中的各个状态量 $x_i(t)$ 进行跟踪和估计, 即

$$z_1(t) \rightarrow y(t), z_2(t) \rightarrow f$$

选取控制律为

$$u = \frac{(-z_2 + u_0)}{b_0} \quad (12)$$

将式 (9) 简化为一个积分串联结构, 即

$$\dot{y} = (f - z_2) + u_0 \approx u_0 \quad (13)$$

设计 P 控制器对给定值与反馈值的误差进行校正:

$$u_0 = k_p(v - z_1) \quad (14)$$

转速调节器采用一阶线性自抗扰控制器。FSPM 电机的转速方程表示为

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{J}(T_{em} - T_L - B_v \omega_r) = \frac{1}{a(x) + bu} \quad (15)$$

式中: u 为输入, $u = T_{em}$; $b = \frac{1}{J}$; B_v 为摩擦系数, 一般取为 0。

设 $f = a(x) + (b - b_0)u$, f 为转速环的总扰动。将式 (15) 转化为如式 (16) 标准形式:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_r = f + b_0 u \\ y = \omega_r \end{cases} \quad (16)$$

转速环采用二阶线性扩张状态观测器:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1(z_1 - \omega_r) + b_0 u \\ \dot{z}_2 = -\beta_2(z_1 - \omega_r) \end{cases} \quad (17)$$

P 控制器:

$$u_0 = k_p(v - z_1) \quad (18)$$

则系统式 (15) 等同于以下线性系统:

$$\dot{\omega}_r = u_0 \quad (19)$$

本文采用电流滞环比较的 PWM 矢量控制策略, 并将线性自抗扰控制器引入到 FSPM 电机的调速系统中, 整个闭环系统的控制结构如图 2 所示。

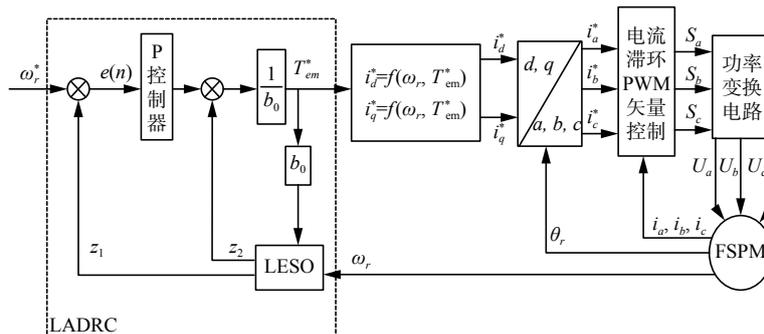


图 2 FSPM 电机矢量控制系统结构图

Fig. 2 Vector control diagram of FSPM machine

3 基于 MATLAB/Simulink 的仿真

为了验证所建立 FSPM 电机数学模型的正确性, 分别建立其稳态和动态仿真模型。

3.1 稳态仿真结果

FSPM 电机的稳态模型是在给定转速和转矩的前提下建立的, 对电机的机械特性进行研究。根据表 1 设置三相 FSPM 电机的电磁和电气参数。

表 1 三相 FSPM 电机仿真参数
Table 1 Parameters of three-phase FSPM Motor

参数	值	参数	值
直流侧额定电压/V	440	定子齿数	12
额定电流有效值/A	3.1	转子极数	10
直轴永磁磁链/Wb	0.166	相数	3
每相绕组电阻/ Ω	1.436	基速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	600
转动惯量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$	8×10^{-4}	直轴电感/mH	14.308
额定转矩/ $\text{N} \cdot \text{m}$	12.23	交轴电感/mH	15.533

图 3(a) 为电机实际三相电流波形, 图 3(b) 为给定电流 i_a^* 和反馈电流 i_a 的对比曲线。可以看出电流的跟踪效果较好。图 3(c) 为转矩分量曲线, 可以看出 T_{em} 的平均值在理论值上下波动; 而磁阻转矩 T_r 近乎为零, 因为选取了 $i_d = 0$ 控制; 明显看出齿槽转矩是造成电磁转矩脉动的主要原因, 与理论分析一致。图 3(d) 为直轴电流 i_d 和交轴电流 i_q 的实时波形, 可以看出, i_d 在 0 值附近波动, i_q 在 4.37 A 附近波动, 与理论值一致。

3.2 动态仿真结果

本节重点研究了将一阶 LADRC 引入到 FSPM 电机的调速系统之后系统的动态响应, 并与采用传统 PI 控制的转速响应进行对比分析。LADRC 参数选取为: $b_0 = 12.5, \omega_{o1} = 120, k_{p1} = 200$ 。动态仿真主要从以下 3 个方面进行研究。

1) 空载启动

图 4 为 FSPM 电机在空载时的启动特性, 电机转速的设定值为 600 r/min。从图 4(a)、(b) 中可以看出, 经过参数整定后的 LADRC 能使电机在很短的时间内 (0.004 2 s) 运行到设定的转速值, 并且几乎没有超调。PI 控制器参数整定为: $k_p = 1.805, k_i = 0.01$, 此时得到系统的超调量为 2.5%, 调节时间为 0.055 s。因此可以得出结论, LADRC 较 PI 控制具有更优的转速跟踪效果。由图 4(c)、(d) 可见, 因为电机空载启动, 因此电磁转矩稳定在 0 值附近, 稳态时交轴电流也近乎为 0 值。

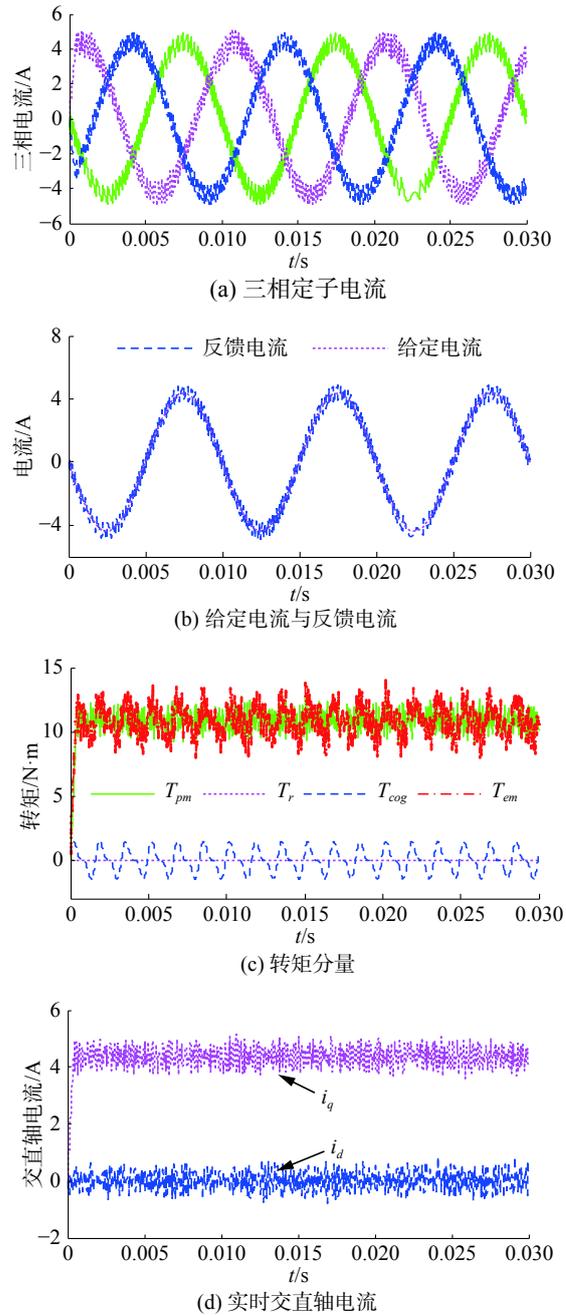


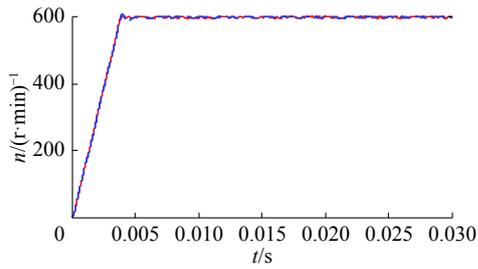
图 3 FSPM 电机的稳态仿真结果

Fig. 3 Steady state simulation results of FSPM motor

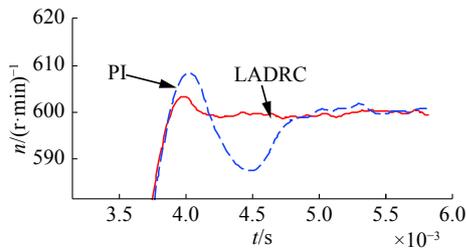
2) 负载转矩恒定, 转速突变

图 5 是在保持额定负载为 4 N·m 不变的情况下, 仿真时间在 0.015 s 时, 将给定转速由 600 r/min 突变为 1 000 r/min 时系统的动态响应曲线。

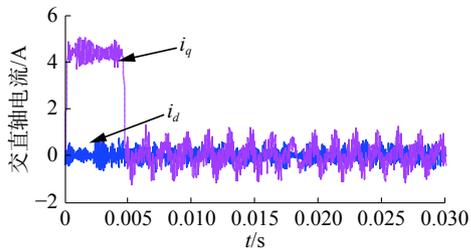
由图 5(a)、(b) 可知, 在转速突变时, LADRC 控制器的参数无需再次调节就可以达到良好的控制效果。而 PI 控制器的参数需要重新调节, 整定后的参数为: $k_p = 2.25, k_i = 0.06$ 。仿真结果说明, 采用 LADRC 控制的 FSPM 电机的转速响应曲线脉动更小, 并且能以较快的速度恢复到稳态值; 同时也说明经过参数整定后的 LADRC 控制器在转速突变时参数无需重新调整, 因此比 PI 控制器具有更强的鲁棒性。



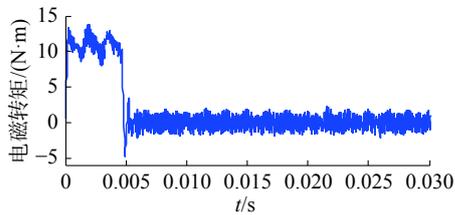
(a) 转速响应



(b) 转速响应(局部放大)



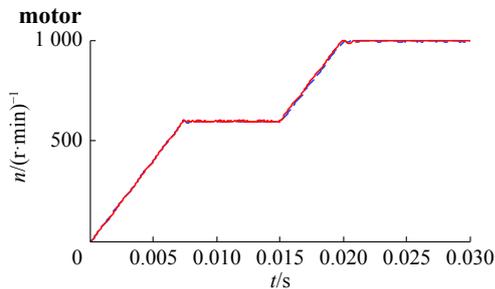
(c) 交直流轴电流波形



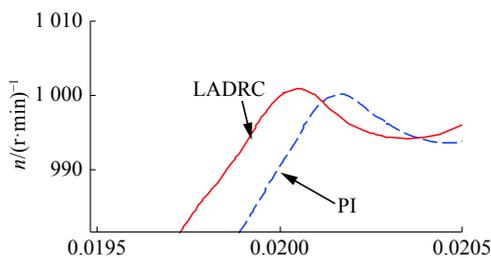
(d) 电磁转矩波形

图 4 电机空载启动的动态响应特性

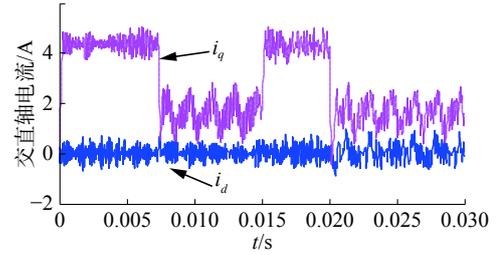
Fig. 4 Dynamic response under no-load starting of FSPM motor



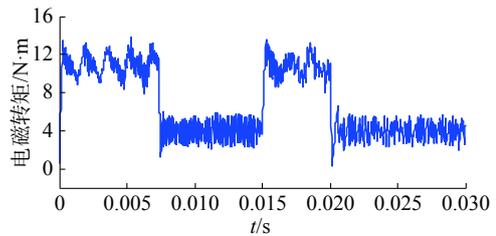
(a) 转速响应



(b) 转速响应(局部放大)



(c) 交直流轴电流波形



(d) 电磁转矩波形

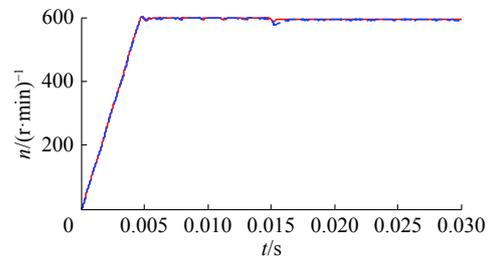
图 5 FSPM 在转速突变时的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of FSPM under speed mutation

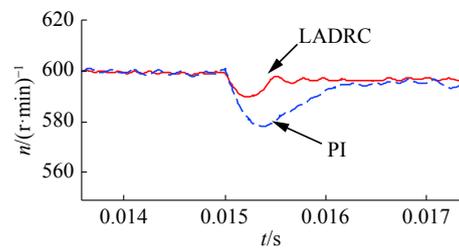
从图 5(c)、(d) 中可以看出, 系统的电磁转矩和交轴电流都有一个小的抖动, 电磁转矩最终达到 4 N·m, 交轴电流稳定在理论计算值 1.6 A。

3) 转速恒定, 负载转矩突变

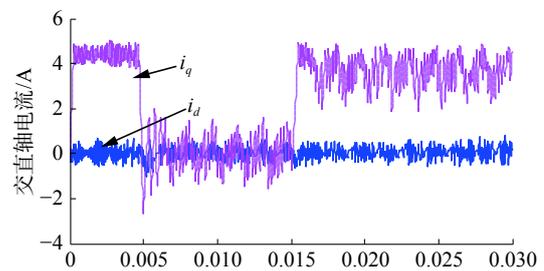
图 6 显示的是在保持转速为 600 r/min 不变的情况下, 负载转矩在 0.001 5 s 时由 0 N·m 突变为 8 N·m 时电机的动态响应特性。



(a) 转速响应



(b) 转速响应(局部放大)



(c) 交直流轴电流波形

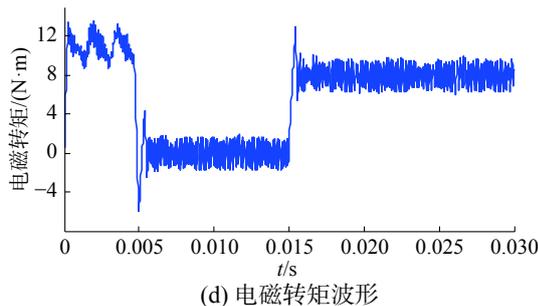


图 6 FSPM 在负载突变时的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of FSPM under load torque mutations

从图 6(a)、(b) 中可见, LADRC 控制在突加负载扰动时较 PI 控制的电机转速具有更优的动态响应特性, 此时 PI 控制器参数为: $k_p = 2.05, k_i = 0.02$ 。在 0.015 s 的时候负载突增到 8 N·m, 为了达到稳定的平衡状态, 系统电磁转矩需要增大, 而电磁转矩的增大依赖于交轴电流的增大。因此, 由图 6(c)、(d) 可见, 交轴电流在 0.015 s 时有突变, 经过一个短暂的过渡阶段后, 电磁转矩在 8 N·m 附近波动, 电机进入稳定运行状态。

4 结束语

为实现 FSPM 电机的高性能控制, 本文提出了基于线性自抗扰的新型矢量控制方案。建立的 FSPM 电机的稳态和动态仿真模型为系统分析该调速系统的实际控制效果提供了理论分析的工具。通过与传统的 PI 控制进行对比分析, 验证了经过参数整定后的 LADRC 具有更好的转速跟踪效果, 并且在转速突变或负载扰动时无需再进行参数整定, 因此 LADRC 较 PI 具有更强的抗干扰能力和鲁棒性, 有助于今后进一步研究线性自抗扰控制器在 FSPM 电机运行控制中的应用。

参考文献:

- [1] CHENG Ming, HUA Wei, ZHANG Jianzhong, et al. Overview of stator-permanent magnet brushless machines[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2011, 58(11): 5087–5101.
- [2] ZHU Z Q, PANG Y, HOWE D, et al. Analysis of electromagnetic performance of flux-switching permanent-magnet machines by nonlinear adaptive lumped parameter magnetic circuit model[J]. IEEE transactions on magnetics, 2005, 41(11): 4277–4287.
- [3] 花为, 程明, ZHU Z Q, 等. 新型磁通切换型双凸极永磁电机的静态特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(13): 129–134.
HUA Wei, CHENG Ming, ZHU Z Q, et al. Study on static characteristics of novel flux-switching doubly-salient PM machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(13): 129–134.
- [4] 程明, 张淦, 花为. 定子永磁型无刷电机系统及其关键技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5204–5220.
CHENG Ming, ZHANG Gan, HUA Wei. Overview of stator permanent magnet brushless machine systems and their key technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5204–5220.
- [5] HUA Wei, CHENG Ming, LU Wei, et al. A new stator-flux orientation strategy for flux-switching permanent magnet motor based on current-hysteresis control[J]. Journal of applied physics, 2009, 105(7): 07F112.
- [6] ZHU Z Q, CHEN J T. Advanced flux-switching permanent magnet brushless machines[J]. IEEE transactions on magnetics, 2010, 46(6): 1447–1453.
- [7] WANG Lie, ALEKSANDROV S, TANG Yang, et al. Fault-tolerant electric drive and space-phasor modulation of flux-switching permanent magnet machine for aerospace application[J]. IET electric power applications, 2017, 11(8): 1416–1423.
- [8] 贾红云, 程明, 花为, 等. 基于死区补偿的磁通切换永磁电机定子磁场定向控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 48–55.
JIA Hongyun, CHENG Ming, HUA Wei, et al. Stator-flux-oriented control for flux-switching permanent magnet motor based on dead-time compensation[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2010, 25(11): 48–55.
- [9] JIA Hongyun, CHENG Ming, HUA Wei, et al. A new stator-flux orientation strategy for flux-switching permanent motor drive based on voltage space-vector[C]//International Conference on Electrical Machines and Systems. IEEE, 2009:3032–3036.
- [10] 金建勋, 郑陆海. 基于 SVPWM 的 PMLSM 控制系统仿真与实现[J]. 智能系统学报, 2009, 4(3): 251–257.
JIN Jianxun, ZHENG Luhai. A permanent magnet linear synchronous motor control system based on space vector pulse width modulation[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2009, 4(3): 251–257.
- [11] 朱瑛, 程明, 花为, 等. 磁通切换永磁电机的空间矢量脉宽调制控制[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(3): 45–50.
ZHU Ying, CHENG Ming, HUA Wei, et al. Space-vector PWM control of flux-switching permanent magnet motor[J]. Electric machines and control, 2010, 14(3): 45–50.
- [12] CHENG Ming, SUN Qiang, ZHOU E. New self-tuning fuzzy PI control of a novel doubly salient permanent-magnet motor drive[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2006, 53(3): 814–821.
- [13] HAN Jingqing. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2009, 56(3): 900–906.

- [14] HUANG Congzhi, GAO Zhiqiang. On transfer function representation and frequency response of linear active disturbance rejection control[C]//Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference. Xi'an, China, 2013: 72-77.
- [15] TAN Wen, FU Caifen. Linear active disturbance-rejection control: analysis and tuning via IMC[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2016, 63(4): 2350-2359.
- [16] 李杰, 齐晓慧, 夏元清, 等. 线性/非线性自抗扰切换控制方法研究[J]. 自动化学报, 2016, 42(2): 202-212.
LI Jie, QI Xiaohui, XIA Yuanqing, et al. On linear/nonlinear active disturbance rejection switching control[J]. Acta automatica sinica, 2016, 42(2): 202-212.
- [17] 陈增强, 程赟, 孙明玮, 等. 线性自抗扰控制理论及工程应用的若干进展[J]. 信息与控制, 2017, 46(3): 257-266.
CHEN Zengqiang, CHENG Yun, SUN Mingwei, et al. Surveys on theory and engineering applications for linear active disturbance rejection control[J]. Information and control, 2017, 46(3): 257-266.
- [18] 陈增强, 孙明玮, 杨瑞光. 线性自抗扰控制器的稳定性研究[J]. 自动化学报, 2013, 39(5): 574-580.
CHEN Zengqiang, SUN Mingwei, YANG Ruiguang. On the stability of linear active disturbance rejection control [J]. Acta automatica sinica, 2013, 39(5): 574-580.
- [19] GAO Zhiqiang. On the centrality of disturbance rejection

in automatic control[J]. ISA transactions, 2014, 53(4): 850-857.

作者简介:



王科磊,女,1993年生,硕士研究生,主要研究方向为定子励磁无刷电机的高性能控制。



陈增强,男,1964年生,教授,博士生导师,主要研究方向为复杂系统建模与控制、智能预测控制、自抗扰控制。主持完成国家“863”基金和国家自然科学基金6项,获得省部级科技进步奖4次,在国内外期刊发表论文200余篇。



孙明玮,男,1972年生,教授,博士生导师,主要研究方向为飞行器制导与控制、自抗扰控制。主持国防科技攻关基金和国家自然科学基金4项,获得国防科技进步奖3次,在国内外期刊发表论文50余篇。

书讯:《探秘机器人王国》

由蔡自兴教授和翁环高级讲师合著的《探秘机器人王国》已由清华大学出版社隆重出版,向全国发行,正在京东和当当等书店热售中。

本书是一本以机器人学和人工智能知识和机器人技术为中心内容的科普及科幻长篇小说。书中通过形象与连续的故事和插图,介绍机器人的发展历史、基本结构与分类,在工矿业与农林业、空间与海洋探索、国防与安保、医疗卫生、家庭服务、文化娱乐、教育教学等方面的应用,以及智能化工厂、未来宇宙开发与星际航行和发展方向等。此外,还展望了其它一些新技术或潜在高新技术的未来应用。

本书密切联系实际,适当加入一些科学预测知识,故事情节生动,图文并茂,寓知识性、趣味性和娱乐性于一体,是广大青少年、大中小学生、中小学教师、机器人和人工智能产业园科技与工作人员以及从事科技与产业管理的政府与企业人员的课外阅读佳作,也是对机器人感兴趣的公众值得一看的好作品。小学高年级学生可以在家长和老师指导下阅读。

本书作者之一蔡自兴教授是一位在智能科技领域硕果累累、德高望重、著作等身和桃李满天下的科学家、教授。他在百忙中挤出宝贵时间,撰写科普小说和科普文章,普及机器人学和人工智能知识,培养广大青少年对科学技术的兴趣。他与夫人翁环老师合作编著这部《探秘机器人王国》科普与科幻著作长篇小说,是他们对科普教育的一个新贡献。读者通过阅读本书,能够了解机器人的过去、现在和将来,增进对机器人技术的兴趣与认识,因而能够对广大青少年读者有所裨益。

中国工程院院士、哈尔滨工业大学蔡鹤皋教授为本书作序,对本书给予高度评价。他说:本书的出版必将为广大读者,特别是青少年学生提供一份不可多得的精神快餐,为机器人学和人工智能的知识传播与普及发挥不可替代的重要作用,进而为我国建设智能强国贡献重要力量。

世界这么广大,想要探访的领域很多很多。厉害啦,机器人来了!让我们跟随《探秘机器人王国》的足迹去揭开机器人王国的神秘面纱,探索机器人家族的奥秘,拥抱多彩多姿的机器人,看看他们都干了哪些“雷倒众生”的新鲜事儿。