

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.03.006

基于前馈补偿的模糊 PI 永磁同步电机调速系统

邹敏, 文定都, 何宗卿, 吴洪涛, 胡正国

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘要: 针对永磁同步电机在负载突变或受干扰时存在鲁棒性差、抗干扰性能不足等问题, 提出一种基于前馈补偿的永磁同步电机模糊 PI 控制调速系统。此系统将电机联结轴的摩擦力、负载所需要的力矩以及负载惯量所产生的力作为总扰动, 建立扰动前馈模块, 将总扰动辨识出来, 并且补偿到速度环上, 可以很好地解决在电机负载变化时, 电机的响应速度无法跟上系统的问题。对比模型的仿真结果表明, 基于前馈补偿的模糊 PI 永磁同步调速系统具有较好的抗干扰性能和鲁棒性。

关键词: 永磁同步电机; 模糊 PI; 调速系统; 前馈补偿

中图分类号: TM351

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2019)03-0035-06

引文格式: 邹敏, 文定都, 何宗卿, 等. 基于前馈补偿的模糊 PI 永磁同步电机调速系统 [J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(3): 35-40.

Fuzzy PI Permanent Magnet Synchronous Motor Speed Control System Based on Feedforward Compensation

ZOU Min, WEN Dingdou, HE Zongqing, WU Hongtao, HU Zhengguo

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the flaws of poor robustness and anti-jamming performance found in permanent magnet synchronous motor (PMSM) under sudden load changes or disturbance, a proposal has been made of a fuzzy PI control speed regulation system for permanent magnet synchronous motor based on feedforward compensation. This new system, with the frictional force of the motor coupling shaft, the momentum needed by the load and the force produced by the inertia of the load as the total disturbance, seeks to establish a disturbance feedforward module so as to identify the total disturbance, and with its compensation to the speed loop, a solution can be achieved of the problem that the response speed of the motor fails to keep up with the system with the motor load changes. The simulation results show that the fuzzy PI permanent magnet synchronous speed control system, which is based on feedforward compensation, is characterized with the advantages of super anti-disturbance performance and robustness.

Keywords: PMSM; fuzzy PI controller; speed control system; feedforward compensation

1 研究背景

永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM) 的主要特点为电机的内部构造简单、

运行可靠、转矩脉动小、效率高, 拥有多种控制方案, 便于设计多样化与最优化^[1-2]。因此, 在较多领域中, 永磁电机的调速系统一直是研究的焦点。但

收稿日期: 2018-05-31

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2018JJ2100)

作者简介: 邹敏 (1995-), 女, 湖南醴陵人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为电力电子与电力传动,

E-mail: 1195378741@qq.com

通信作者: 文定都 (1969-), 男, 湖南道县人, 湖南工业大学教授, 主要从事电力电子与电力传动方面的教学与研究,

E-mail: 125710811@qq.com

因 PMSM 为多变量、非线性、强耦合系统，易受电机参数变化和负载扰动等不确定因素的影响^[3-4]，且 PMSM 在工程应用中存在闭环控制策略不完善、抗扰动性能不高和控制器参数无法自适应调节等问题，特别是运行过程中负载发生变化时，控制器的相关系数要及时调整，而系统对于扰动所作出的控制器参数调整需要时间，因此系统不能及时响应扰动，导致系统的动态稳定性不足^[5-6]。

为使 PMSM 系统调速范围宽广、动态性能稳定，需考虑负载变更对电机的影响，调速系统需拥有良好的参数自动整定能力，即当运行过程中负载突然变化时，系统能很好地应对控制器参数变化，并及时做出自动调整^[7-8]。针对响应负载突变等一系列状况，国内外学者常用的方法是将相关算法应用到在线识别 PMSM 的运行中^[9]。在线辨别电机工作状态的算法主要有 Laudau 离散时间递推参数辨识算法、积分辨识算法、参数估计梯度算法等^[10]。

本文提出一种前馈补偿的 PMSM 模糊 PI 调速系统研究方案，以应对使用过程中出现的负载突变情况所产生的影响，其中电流环使用 PI 矢量控制，速度环采用基于前馈补偿的模糊 PI 控制。当电流内环运行后，对交轴电压与直轴电压进行补偿，以便控制电压接近预设值，改善系统动态稳定性能。采用搭建观测器方式辨识惯量，将反馈负载扰动补偿到速度环输出，使电磁转矩输出逼近预设值，实现自动调整 PMSM 电机调速系统参数。根据系统仿真所得图形结果分析可知，该方法具有较高的抗扰性能和鲁棒性。

2 PMSM 基本数学模型

2.1 数学模型的前提条件

本研究以表贴式 PMSM 为研究对象，由于在工程使用过程中，其有非线性、约束条件多的特点，所以为了便于分析和研究，在建立 PMSM 基本数学模型时做如下假设：1) 不计铁芯以及磁路的饱和程度；2) 忽略电机中电枢铁芯的涡流损耗；3) 通入空间相隔 120 电角度的对称三相电。

2.2 dq0 旋转坐标系下的 PMSM 数学模型

旋转 dq0 坐标系下 PMSM 磁链、电压模型如下：

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_f, \tag{1}$$

$$\psi_q = L_q i_q; \tag{2}$$

式(1)(2)中： L_d 、 L_q 分别为交轴和直轴的等效电枢电感； i_d 、 i_q 分别为交轴和直轴的电枢电流分量； ψ_d 、 ψ_q 分别为交轴和直轴的定子磁链分量； ψ_f 为转子磁链。

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q, \tag{3}$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d. \tag{4}$$

式(3)(4)中： u_d 、 u_q 分别为交轴和直轴的电枢电压分量； R_s 为电枢绕组电阻； ω_e 为转子电角速度。

2.3 PMSM 控制系统机械模型

PMSM 的电机运动方程如下：

$$T_e = J \frac{d\omega_e}{dt} + T_L + B\omega_e, \tag{5}$$

$$\frac{d\theta_e}{dx} = \omega_e, \tag{6}$$

$$T_e = K_t i_q. \tag{7}$$

式(5)~(7)中： T_e 为电磁转矩； J 为电枢绕组电阻转动惯量； T_L 为负载转矩； B 为黏滞摩擦系数； θ_e 为转子机械角度； K_t 为电机转矩常数。

3 控制策略基本原理

3.1 模糊控制基本原理

利用 Mamdani 模糊推理机制及反模糊化方法，可获得精确的模糊控制输入量。本研究采用笛卡尔的推理方法求模糊蕴含关系，其模糊集合 \tilde{A} 、 \tilde{B} 和蕴含关系 $\tilde{R}_M(x, y)$ 的关系如下：

$$\mu_{\tilde{R}_M}(x, y) = \mu_{\tilde{A}}(x) \wedge \mu_{\tilde{B}}(y). \tag{8}$$

利用 Mamdani 法运算，以所求得面积求其重心，见式(9)。

$$\mu = \frac{\int x \mu_x(x) dx}{\int \mu_x(x) dx}. \tag{9}$$

实际计算时是计算采样点的离散值，其表达式变为式(10)。

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu_{N_i}}{\sum_{i=1}^n \mu_{N_i}}. \tag{10}$$

本研究建立的模糊控制系统框图如图 1 所示，其中 r 为输入信号， e 为系统误差， ec 为误差的变化率。利用系统误差 e 和误差变化率 ec 为输入，经系列模糊控制算法和模糊判决处理后，通过解模糊化可得控制 PI 调节器的两个输出参数 ΔK_p 、 ΔK_i 。

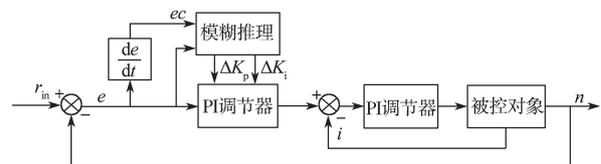


图 1 模糊 PI 控制系统原理图

Fig. 1 Fuzzy PI control system schematic diagram

3.2 模糊 PID 控制规则

本文采用 7 个语言模糊集表示 e 、 ec 和 ΔK_p 、 ΔK_i ，即 NB (负大)，NM (负中)，NS (负小)，ZO (零)，PS (正小)，PM (正中)，PB (正大)，

并设变量论域均为 $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$; 以三角形函数和 S 形函数组合描述确定其隶属函数。在设置 ΔK_p 、 ΔK_i 参数时, 可以依据误差逐级逼近原则进行参考, 本文以建立 ΔK_p 参数为例, 在开始时设定 ΔK_p 为一个较小值, 系统快稳定时, 逐渐加大其值, 稳定后期减小其值, 模糊控制规则表见表 1、表 2。

表 1 ΔK_p 的模糊控制规则表
Table 1 Fuzzy control rules of ΔK_p

ec	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	ZO
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 ΔK_i 的模糊控制规则表
Table 2 Fuzzy control rules of ΔK_i

ec	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	NS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	NS	PM	PB	NB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	NB	NB

由表 1 和 2 可得 ΔK_p 、 ΔK_i 参数公式如下:

$$K_p = K_p(0) + \Delta K_p, \quad (11)$$

$$K_i = K_i(0) + \Delta K_i. \quad (12)$$

式 (11) ~ (12) 中, $K_p(0)$ 、 $K_i(0)$ 分别为比例系数初始值、积分系数初始值。

4 前馈补偿模糊 PI 控制器的设计

4.1 基于前馈补偿的模糊 PI 原理

在传统 PMSM 调速系统的基础上, 针对速度环进行改进, 速度环使用模糊 PI 控制, 在提升抗扰动方面搭建了一种新型观测器。这种控制方式既具备模糊推理、可及时修改参数的优点, 又具备传统 PI 响应快的优势。

当负载发生变化时, 负载惯量受到扰动的影 响, 总惯量会发生相应变化, 因而会导致调速系统控制器需重新计算参数, 响应速度变慢。本研究中对于观测器的建立, 采用一种扰动前馈补偿的方式。本研究中先将所有扰动归为一类, 即将电机联结轴摩擦力、负载所需力矩及负载惯量产生的力归为一类, 其后不

再分开处理每个细节。辨识出总扰动并补偿到速度环上。补偿时先整定速度环的控制器参数, 再整定电流环的控制器参数, 最终得到全局最优的速度环和电流环控制器参数。

4.2 观测器的搭建

由电机驱动机械部分的公式如式 (5)~(7) 所示, 将负载转矩和扰动转矩合并, 且将式 (5) 右边第 2、3 项合并, 得到公式 (13)。

$$T_e = J_m \frac{d\omega_e}{dt} + \hat{\Delta}, \quad (13)$$

$$\hat{\Delta} = T_L + B \frac{d\omega}{dt} + J_L \frac{d\omega}{dt}, \quad (14)$$

$$J = J_m + J_L. \quad (15)$$

式 (13)~(15) 中: $\hat{\Delta}$ 为扰动观测值; J_m 为电机惯量; J_L 为负载惯量。

假设采样期间的扰动为一常数, 可得:

$$\frac{d\hat{\Delta}}{dt} = 0. \quad (16)$$

由式 (13)~(16) 可推导出如下系统状态方程:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + Bu, \\ y = Cx. \end{cases} \quad (17)$$

式中: A 、 B 、 C 分别为参数矩阵; x 为输入值; u 为输出值。

由式 (13)~(17) 可得 $x = [\omega_e \ \Delta]^T$, $u = T_e$, $y = \omega_e$ 。

将式 (17) 进一步整理成所需状态方程, 可得:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C = [1 \ 0].$$

由状态方程构建扰动 Δ 的最小阶观测器, 方程如公式 (18) (19)。

$$\frac{dz}{dt} = -z + \lambda J_m \omega_r + T_e, \quad (18)$$

$$\hat{\Delta} = -\lambda z + \lambda J_m \omega_r. \quad (19)$$

式中: z 、 λ 分别为中间变量与观测数据。

为获取观测器可用方程, 需对式 (18) (19) 进行拉氏变换, 抵消掉中间变量 z ; 配观测器零点极点时, $-\lambda$ ($\lambda > 0$) 为极点, 结果如下:

$$\hat{\Delta} = \frac{\lambda}{s + \lambda} T_e(s) - J_m \frac{\lambda s}{s + \lambda} \omega_r(s).$$

式中 s 为复变量。

利用 Matlab/Simulink 对负载转矩观测器建模, 并利用状态方程搭建如图 2 所示结构框图。

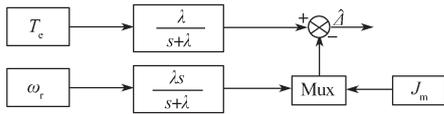


图2 负载转矩观测器结构框图

Fig. 2 Structure diagram of the load torque observer

4.3 抗扰辨识模块的搭建

根据式(20)(21)对 q 轴电流环框图进行改进:对于扰动,补偿 ΔT_e ,用 T_e^* 除以磁链,此处磁链为转子磁链加上交、直轴电感之差乘以 d 轴电流产生的磁链之和;用电磁转矩 T_e^* 除以磁链得到的电流为 I_q^* ,加上补偿的 q 轴电流,进行PI调节,产生 ΔU_q 。为此,对系统补偿 \hat{U}_q ,此处的 \hat{U}_q 为 q 轴电流乘以定子电阻加上转子磁链乘以转速加上 d 轴产生的电压和,得到 U_q^* ,如图3所示。

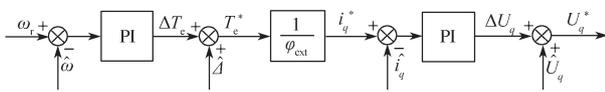


图3 改进的 q 轴框图

Fig. 3 Improved q -axis block diagram

$$\varphi_{ext} = \varphi_r + (L_d - L_q) \cdot i_d^* \quad (20)$$

$$\hat{U}_q = R_s i_q^* + \omega_r L_d i_d^* + \omega_r \varphi_r \quad (21)$$

对于 d 轴,根据式(22)改进,具体如下:将 I_d 与反馈的 d 轴电流整合进行PI调节,产生 ΔU_d ;为此,对系统补偿 U_d , U_d 为 d 轴电流乘定子电阻,再减去 d 轴电感乘 q 轴电流乘转速产生的电压差,得到 U_d^* ,改进的 d 轴框图见图4。

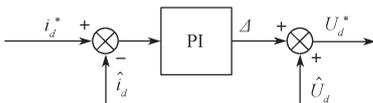


图4 改进的 d 轴框图

Fig. 4 Improved d -axis block diagram

$$\hat{U}_d = R_s i_d^* - \omega_r L_d i_q^* \quad (22)$$

为此,搭建如图5所示的扰动模块、辨识模块。

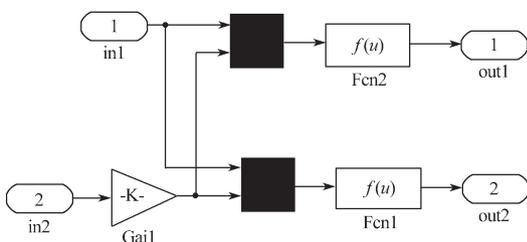


图5 扰动辨识模块的搭建

Fig. 5 Construction of the disturbance identification module

进入稳态后, $d\omega/dt=0$,则 Δ 辨识值等于 T_e 。在加、减速时, Δ 辨识值等于 T_e 减 $d\omega/dt$ 。总之,恒有 Δ 辨识值等于 T_e 减 $d\omega/dt$ 。为此,必须求得导数加滤波的值。导数加滤波的传递函数为

$$G(s) = 1 / (T_i * s + 1) \quad (25)$$

式中, T_i 为采样周期,常取10~20倍开关周期。

代入数据可得导数加滤波的传递函数为

$$G(s) = 1 / (2 \times 10^{-3} s + 1) \quad (26)$$

为此,搭建如图6所示的扰动辨识模块。

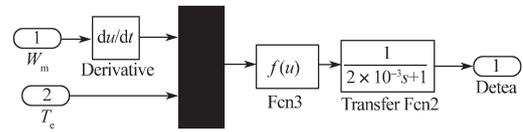


图6 扰动辨识模块

Fig. 6 Disturbance and identification modules

5 系统实验分析

5.1 系统仿真模型

根据前述的控制理论建立 Matlab/Simulink 的 PMSM 调速系统仿真模型,在 PMSM 调速系统上分别对常规 PI 控制、模糊 PI 控制和前馈补偿模糊 PI 控制方式进行比较。系统的仿真模型分别如图7~9所示。

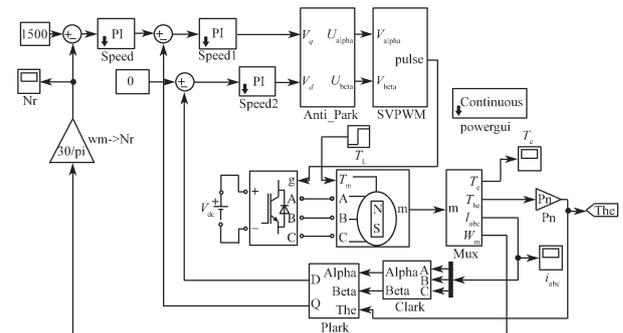


图7 PMSM 常规 PI 控制仿真模型

Fig. 7 Conventional PI control simulation model for PMSM

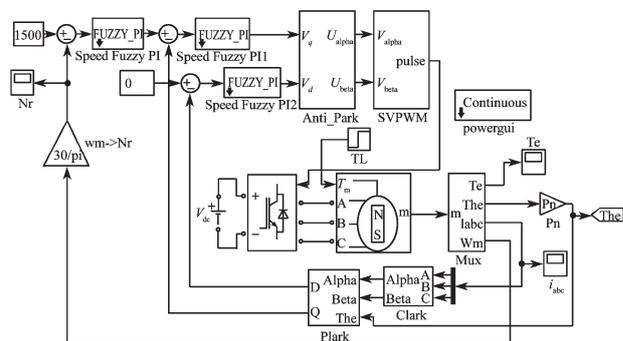


图8 PMSM 模糊 PI 控制仿真模型

Fig. 8 Fuzzy PI control simulation model of PMSM

本文的控制策略都采用了 $I_d=0$ 控制,因为 d 轴与磁场同向,在运动当中不会产生力矩而只能产生热量,所以减少 d 轴的电流分量能够有效地控制电磁转矩 T_e 与 I_q 的线性关系,能够使永磁同步电机调速性能近似直流电机的调速性能。

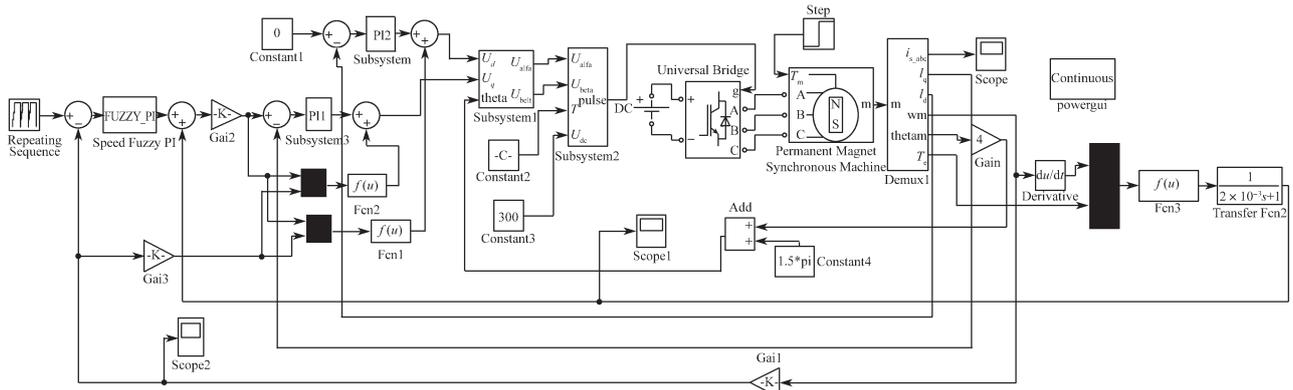


图9 PMSM 前馈补偿模糊PI控制仿真模型

Fig. 9 Feedforward compensation fuzzy PI control simulation model for PMSM

实验电机的参数设定如表3所示。

表3 实验电机参数
Table 3 Motor parameters table

参数	取值	参数	取值
额定转矩 / (N·m)	2.39	d, q 轴电感 / H	9×10^{-3}
额定电流 / A	3.9	极对数	4
额定功率 / kW	0.75	编码器线数 / PPR	2 500
转子惯量 / (kg·m ²)	0.924×10^{-4}	转矩系数 / (N·m·A ⁻¹)	0.6
额定转速 / (r·min ⁻¹)	3 000	磁链 / Wb	0.1
最高转速 / (r·min ⁻¹)	5 000		

5.2 仿真结果分析

5.2.1 3种控制方式的仿真结果

本研究中3种调速系统控制策略的转速期望值为1 500 r/min。图10为传统PI控制下负载突变的转速随时间变化的曲线,从图中可以看出,在开始启动时,转速最大为1 860 r/min,超调量为24%,回归稳态的时间大致为0.03 s。在0.1 s时加上1.2 N·m的负载,系统在0.116 5 s处重新达稳态。

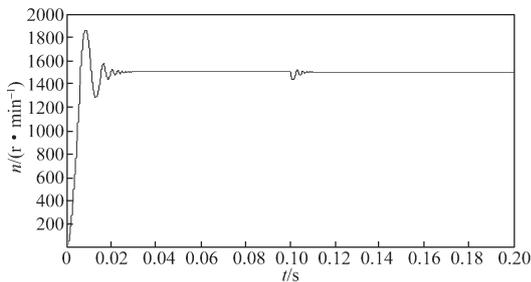


图10 PMSM 传统PI控制的转速响应曲线
Fig.10 Speed response curve of conventional PI control for PMSM

图11是使用模糊PI控制策略的调速系统负载突变时转速随时间的变化曲线。由图可知运行后转速迅速达最高值,将近1 730 r/min,超调量达15.3%,系统达到稳定的时间差不多为0.024 s。在0.1 s时加上1.2 N·m的负载,系统在0.113 0 s处重新达稳态。

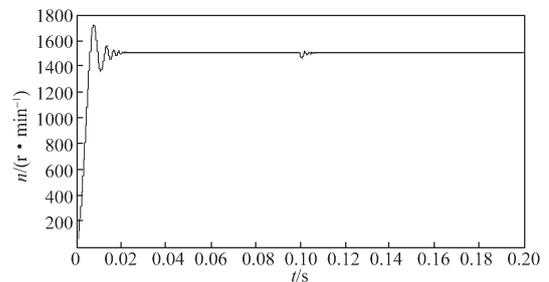


图11 PMSM 模糊PI控制的转速响应曲线

Fig.11 Speed response curve of fuzzy PI control for PMSM

图12为前馈模糊PI控制下负载突变时转速随时间的变化曲线。从图中可以看出其响应速度非常快,转速迅速达到1 560 r/min,超调量为4%,达到稳定的时间差不多为0.02 s。在0.1 s时加上1.2 N·m的负载,系统在0.110 s处重新达稳态。

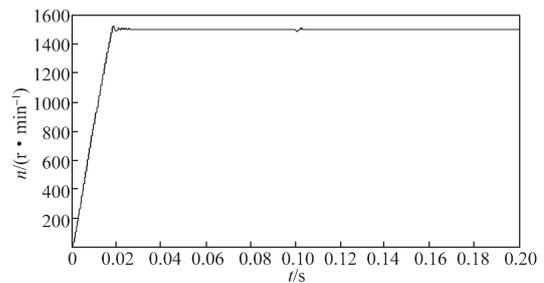


图12 PMSM 前馈补偿的模糊PI控制的转速响应曲线

Fig. 12 Speed response curve of fuzzy PI control with feed compensation for PMSM

5.2.2 3种仿真结果对比分析

由上述调速方案的仿真结果可知,永磁同步电机常规PI控制下的转速响应曲线,在动态变化过程中转速上升缓慢,需较长时间才能达预设值,稳定后电机匀速运转。在0.1 s时,突然加负载,电机的转速震荡强烈,表明系统响应慢,调节时间过长。

第二种模糊PI在负载对象不变时,加速阶段的加速时间和传统PI控制差别甚微,但其超调量更小,系统能更快达稳定状态,但是其超调量和抗干扰性能还存在不足。

从第三种永磁同步电机前馈补偿的模糊 PI 仿真图可看出,电机加速时间还是很快,表明系统响应快。同时,转速的超调量非常小,达到理想效果。且在突然施加负载时,电机的转速非常平稳,几无波动。

6 结语

本文分别对常规 PI 控制、模糊 PI 控制和前馈补偿模糊 PI 控制方式的仿真模型进行了搭建,并对比分析其仿真结果,得知前馈补偿模糊 PID 控制方式对电机转速有着更好的控制效果,不仅速度响应快,调节时间短,而且抗干扰性能好,为永磁同步电机调速性能的提高提供了可靠的依据和途径,在生产研发中有着重要的实用价值。

参考文献:

- [1] 崔茂振. 基于 DSP 的永磁同步电机调速系统研究 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2012.
CUI Maozhen. Research of the Permanent Magnet Synchronous Motor Speed Drive System Based on DSP[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2012.
- [2] 孙凯, 许镇琳, 盖廓, 等. 基于自抗扰控制器的永磁同步电机位置伺服系统 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(15): 43-46.
SUN Kai, XU Zhenlin, GAI Kuo, et al. A Novel Position Controller of PMSM Servo System Based on Active-Disturbance Rejection Controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(15): 43-46.
- [3] COLTON S W. A Modified Synchronous Current Regulator for Field-Oriented Control of Permanent Magnet Synchronous Motors[C]//Vehicle Power & Propulsion Conference. Seoul: IEEE, 2012: 7-12.
- [4] 杨文强, 蔡旭, 姜建国. 矢量控制系统的积分型滑模变结构速度控制 [J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(3): 426-433.
YANG Wenqiang, CAI Xu, JIANG Jianguo. Sliding-Mode Variable Structure Speed Control with Integral Action for Vector Controlled Asynchronous Motor[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(3): 426-433.
- [5] 郭宇婕, 黄立培, 邱阳. 交流伺服系统的转动惯量辨识及调节器参数自整定 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(9): 1180-1183.
GUO Yujie, HUANG Lipei, QIU Yang. Inertia and Auto-Tuning of Speed Controllers for AC Servo Systems[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2002, 42(9): 1180-1183.
- [7] 杜帅. 永磁同步电机转动惯量辨识研究 [J]. 电机与控制应用, 2012, 39(4): 17-22.
DU Shuai. Research of Inertia Identification of Permanent Magnet Synchronous Motor Servo System[J]. Electric Machines & Control Applications, 2012, 39(4): 17-22.
- [8] 余浩赞, 王辉, 黄首道. 永磁同步电机控制系统全数字化实现 [J]. 电力电子技术, 2009, 36(1): 8-11.
YU Haozan, WANG Hui, HUANG Shoudao. Realization of Digital Permanent Magnet Synchronous Motor Control System[J]. Power Electronics, 2009, 36(1): 8-11.
- [9] 杨书生, 钟宜生. 永磁同步电机转速伺服系统鲁棒控制器设计 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 84-90.
YANG Shusheng, ZHONG Yisheng. Robust Controller Design for PMSM Speed Servo Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(3): 84-90.
- [10] LI Shihua, LIU Zhigang. Adaptive Speed Control for Permanent Magnet Synchronous Motor System with Variations of Load Inertia[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(8): 3050-3059.

(责任编辑: 廖友媛)