

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.08.024

PI 自整定永磁伺服系统转动惯量的辨识研究^{*}

马立新,徐镇乾,范洪成,黄阳龙
(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院,上海 200093)

摘要:针对永磁同步电机伺服系统中转动惯量变化问题,设计了一种带PI参数自整定的永磁同步电机转动惯量辨识系统,并提出了一种基于电机机械方程的转动惯量辨识方法。在系统匀加速阶段以相同时间间隔的速度为参量,计算出电机匀加速阶段的加速度,利用加速度与转动惯量的关系,由机械方程解调出电机转动惯量。以转动惯量为基准,利用速度环带零点II型系统对PI参数进行补偿,并将此方法与传统PI控制方法在同一环境中进行仿真实验。研究结果表明,带转动惯量辨识PI自整定控制器的系统与传统PI控制器系统相比,启动无超调,且速度误差率降低0.16%左右。该方法具有更好的动静态性能,能够广泛应用于高精密度数控系统,为解决转动惯量变化问题提供依据。

关键词:永磁同步电机;矢量控制;转动惯量辨识;PI自整定

中图分类号:TH39;TM835;TP273

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)08-1128-04

Inertia identification of PI auto-tuning PMSM servo system

MA Li-xin, XU Zhen-qian, FAN Hong-cheng, Huang Yang-long
(Optical-electronic Information and Computer Engineering University of
Shanghai for Science and Technology Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the change of inertia on PMSM servo system, one system based on PI parameters auto-tuning was designed to solve the problem, and a new method of inertia identification based on motor mechanical equation was proposed. The acceleration was calculated by the acquired speeds at the same time intervals on the uniformly accelerated phase, applying this parameter the inertia was demodulated by the mechanical equation of the motor, then the PI parameters was compensated by the speed loop II system with zero based on the inertia, and this method and the traditional PI control method were experimented in the same environment simulation. The results indicate that inertia identification PI controller system compared with the traditional, starting without overshoot and the speed error decreases about 0.16%. This method has better dynamic and static performance and can be widely applied in high precision CNC system, so as to provide the basis for solving the change of inertia.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); vector control; inertia identification; PI auto-tuning

0 引言

永磁同步电机在伺服系统的应用中,变化的电机转动惯量会对系统的性能造成较大的影响,特别是高精密度数控机床、高性能机器人等对动、静态性能要求苛刻的场合^[1]。如果转动惯量变大可能使系统不稳定,响应慢。如果转动惯量变小,虽系统响应变快,但会加大超调或震荡,甚至会造成低速时的转矩脉动^[2]。

目前的研究大多是通过算法根据速度设定值与反馈值单纯对PI参数进行优化,而忽略了它是一个多变量、内部强耦合的高阶非线性系统^[3],运行过程中很多参数会发生变化,PI控制器的控制与电机参数密切相关,因此电机参数辨识才是电机PI控制系统研究的关键^[4]。

本研究针对永磁同步电机伺服系统中转动惯量变化问题,设计一种带PI参数自整定的永磁同步电机转动惯量辨识系统并对其进行分析和研究。

收稿日期:2015-00-00

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61205076);上海张江国家自主创新示范区专项发展资金重点项目(201310-PI-BZ-008)

作者简介:马立新(1960-),男,陕西安康人,博士,教授,主要从事电力系统稳定性与优化运行、电气系统故障诊断与模式识别、紫外检测与融合技术。E-mail: malx_ali@sina.com

1 永磁同步电机的矢量控制

1.1 坐标变换

利用坐标变换,可实现电机定子电流从静止坐标系到旋转坐标系之间的变换,简化了方程及空间矢量的计算求解,坐标变换如式(1)所示^[7]。

Clarke 变换:即三相 A、B、C 坐标系)到两相 α、β 坐标系之间的 3/2 变换为:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{1}$$

Park 变换:即两相 α、β 坐标系到两相 d、q 坐标系之间的 αβ/dq 变换为:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r \\ -\sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中:θ_r—d 轴与 A 轴之间的夹角^[8]。

1.2 永磁同步电机数学模型

d、q 坐标系下永磁同步电机电压方程为:

$$\begin{cases} u_q = R_s i_q + p\psi_q + \omega_r \psi_d \\ u_d = R_s i_d + p\psi_d - \omega_r \psi_q \end{cases} \tag{3}$$

式中:i_d、i_q—直、交轴电流分量;ψ_d、ψ_q—直、交轴磁链;P—微分算子;ω_r—转子角速度^[9]。

d、q 坐标系下永磁同步电机电磁转矩方程为:

$$T = N_p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \tag{4}$$

式中:N_p—极对数,ψ_f—永磁体产生磁链^[10]。

1.3 永磁同步电机 PI 控制方法

永磁同步电机常采用的 PI 控制方法关键就是要找到合适的 K_p 和 K_i,由于伺服系统中参量的变化使 PI 参数具有时变性,传统的 PI 控制方法难以满足要求。采用基于 PI 自整定的转动惯量辨识方法,对速度环 PI 参数进行在线补偿^[11],其控制结构如图 1 所示。

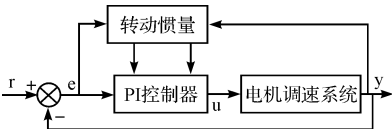


图 1 转动惯量辨识值优化的 PI 控制方式

2 转动惯量辨识方法的 PI 自整定

转动惯量辨识方法有很多,如直接计算法、加减速法、MRAI 等。直接计算法通过复杂公式计算,要占用较多的计算机内存且精确度低。加减速法是一种离线式辨识方法,需要大范围加减速,使用场合要求苛刻。

MRAI(模型参考自适应参数辨识)虽然是在线辨识方法,但是其程序的编写和调试非常困难^[12]。

2.1 新型转动惯量辨识算法

在 i_d=0 的控制方式下,由永磁同步电机 d、q 坐标下的电磁转矩方程(4)得:

$$T = N_p \psi_f i_q \tag{5}$$

由式(5)可知电磁转矩 T 和转矩电流 i_q 成正比例关系,忽略系统摩擦,有机械运动方程得:

$$P \left(\frac{\omega_r}{N_p} \right) = \frac{T_e - T_l}{J} \tag{6}$$

式中:ω_r—转子转速,T_l—负载转矩,J—转动惯量,P—微分算子。

为防止启动或调速过中,电流过大而烧坏电机定子,一般速度 PI 调节的输出会有一个限幅,即电流给定的最大值。当电机以最大电流作匀速运动时有:

$$T = N_p \psi_f i_q(\max) \tag{7}$$

令 i_q(max)=2i_n,则 T_e=2T_n。由式(6)得电机的加速度:

$$a(1) = \frac{2T_n - T_l}{J} \tag{8}$$

选取匀加速过程中的两个时间点 t₁、t₂,在两个时刻分别记下电机转子转速 ω₁、ω₂,有:

$$\omega_2 - \omega_1 = \frac{2T_n - T_l}{J} (t_2 - t_1) \tag{9}$$

再令:i_q(max)=i_n,则有:T_e=T_n。本研究采用相同方法选取两个时间点 t₃、t₄,使 t₄-t₃=t₂-t₁,然后分别记录下此时电机转子的转速 ω₃、ω₄,则有:

$$\omega_4 - \omega_3 = \frac{T_n - T_l}{J} (t_4 - t_3) \tag{10}$$

在两次加速过程中保持负载转矩 T_l 不变,则有:

$$J = T_n \frac{t_4 - t_3}{[(\omega_4 - \omega_3) - (\omega_2 - \omega_1)]} \tag{11}$$

由式(11)得到了转动惯量的计算方法。

2.2 PI 参数自整定

伺服控制系统一般由外环速度环和内环电流环进行永磁同步电机的双闭环控制。电流环简化后,将其视作速度环中的一个环节,电流环为带有零点的二阶系统,传递函数如下:

$$W(s) = \frac{K_p(\tau s + 1)}{\frac{T_{sf}}{K}s^2 + \frac{s}{K} + 1} \tag{12}$$

式中:T_{if}—电流反馈通道滤波时间;T_{sf}=T_{if}+T_s;T_s—开关周期,都为时间常数;K_p,τ—调整器参数;K=1/2T_{sf}。

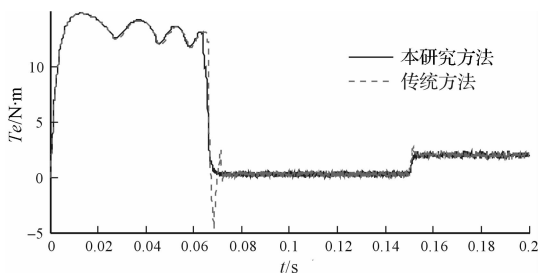


图5 转矩波形曲线

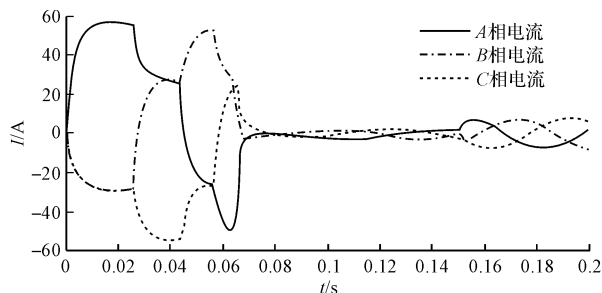


图6 本研究三相逆变输出电流波形曲线

统转速和转矩波形都要比传统方法波形曲线要平缓,而且从启动到速度稳定阶段速度无超调、响应快,实现永磁同步电机的平滑启动,说明该方法的系统稳定速度快,具有更好的动态性能;在速度稳定阶段实际速度非常接近设定值,提高了速度的精确度,速度误差率减少了0.16%左右,说明系统具有良好的静态性能。系统在负载变化时电机三相电流无尖峰,且为标准正弦波形,为坐标变换提供方便。采用本研究方法的系统具有良好的动、静态性能,不但可以提高系统响应速度,而且可以提高系统控制精度。

4 结束语

笔者研究了带PI参数自整定的永磁同步电机伺服系统转动惯量辨识问题,转动惯量在线辨识方法有利于提高永磁伺服控制系统的抗扰能力,使系统性能不受转动惯量变化的影响;提出了一种新型转动惯量辨识的PI参数自整定优化算法,并与传统PI控制方法在相同环境下进行仿真实验。

通过实验波形对比分析可知,相对传统方法来说该方法收敛快、无超调,且速度精确度相比传统方法高出0.16%左右;实现了转矩启动无尖峰,进而减小启动

尖峰电流对控制系统的冲击,提高了系统可靠性,更具优越性。

下阶段,本研究会将该方法应用到高精密度数控机床和高性能机器人等实际伺服系统中进一步完善,以提高系统的运行效率和控制精度,改善控制性能。

参考文献 (References):

- [1] LIU Hui-xian, LI Shi-hua. Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer [J]. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2012, 59(2): 1171-1183.
- [2] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统运动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [3] 罗慧, 尹泉, 孙明明. 交流伺服系统参数辨识方法综述[J]. *伺服控制*, 2012, 35(1): 27-29.
- [4] 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.
- [5] 周虎. 永磁同步电机参数在线辨识算法研究[D]. 成都:电子科技大学自动化工程学院, 2012.
- [6] WU Yang-yang. Global Dynamic Sliding Mode Control of PMSM Speed Servo Systems Base on Extended State Observer[C]. *Control Conference (CCC)*, 2013 32 and Chinese. 2013: 4432-44.
- [7] 徐东, 王田苗, 魏洪兴. 一种基于简化模型的永磁同步电机转动惯量辨识和误差补偿[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(2): 126-131.
- [8] 刘竹. 带PI参数自整定的永磁同步电机伺服系统的设计与实现[D]. 长沙:湖南大学电气与信息工程学院, 2013.
- [9] 丁文双. 永磁同步电机PI参数自整定[D]. 南京:南京航空航天大学自动化学院, 2012.
- [10] 韩亚荣, 邱鑫, 朱德明. 交流伺服系统转动惯量辨识方法[J]. *电工电能新技术*, 2013, 32(3): 36-40.
- [11] 何杰, 王家军. 基于SVPWM的永磁同步电动机系统建模与仿真[J]. *机电工程*, 2009, 26(7): 77-82.
- [12] SENJYU T, KINJO K, URASSKI N, et al. Parameter measurement for PMSM using adaptive identification[J]. *IEEE Trans. On Power Electronics*, 2011, 45(12): 1344-1354.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

马立新, 徐镇乾, 范洪成, 等. PI自整定永磁伺服系统转动惯量的辨识研究[J]. *机电工程*, 2015, 32(8): 1128-1131.

MA Li-xin, XU Zhen-qian, FAN Hong-cheng, et al. Inertia identification of PI auto-tuning PMSM servo system[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(8): 1128-1131.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>