

三相异步电机模糊控制的研究

朱建渠^{1,2}, 张 翼¹

(1.重庆科技学院, 机械与动力工程学院, 重庆 401331;

2.西南交通大学, 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:传统三相异步电机PI控制算法的参数固定不变,不能使控制系统一直处于最佳运行状态。针对此问题,在传统矢量控制系统中引入了模糊PI控制方法,利用模糊控制理论设计出一种新型模糊PI控制器,在Matlab/Simulink仿真软件中设计了模糊PI控制模型。通过仿真分析可知,模糊PI控制比传统PI控制能更快地建立起旋转磁场,且动态响应快,能实时抑制超调量,因此,模糊PI控制法更具有优越性。最后通过实验证明模糊PI控制方法能使系统获得更快的平缓转矩响应。

关键词:异步电机; 矢量控制; 模糊控制

中图分类号:TM343

文献标识码:A

文章编号:1000-100X(2012)07-0081-03

Study of Fuzzy Control of Three-phase Asynchronous Motor

ZHU Jian-qu^{1,2}, ZHANG Gang¹

(1.Chongqing University of Science Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: Because of the parameters of the traditional three-phase asynchronous motor PI control algorithm are fixed, which can not make the control system running at best all the time. Aiming at this problem, the traditional vector control system is designed in the Matlab/Simulink simulation software. Through simulation analysis fuzzy PI control method is better than the traditional PI control method, and it can quickly establish the rotating magnetic field. And fuzzy PI control method is better than the traditional PI control method of fast dynamic response, real-time restraining overshoot, therefore, fuzzy PI control method is better than the conventional control method has more advantages. Finally, experimental verification of the fuzzy PI control method is superior to the traditional PI control method, which can make the system have more smooth torque response.

Keywords: asynchronous motor; vector control; fuzzy control

1 引言

由于经典控制主要针对系统的稳定性、可靠性和精确性进行过程控制,是一种通用性的理论性强的控制方法。但当被控对象具有强非线性、强耦合、大时滞等特性时,无法利用经典控制理论来实现三相异步电机的低速、负载突增突减等工程应用问题,例如三相异步电机等。因此,在传统控制方法的基础上引入模糊控制,使得系统具有更好的控制性能和更强的鲁棒性。

模糊控制作为一种智能控制方法,不依赖被控对象精确的数学模型,能够克服系统非线性因素的影响,并对被控对象的参数变化具有较强的鲁棒性。在此针对三相异步电机进行分析,从矢量

控制中引入模糊控制理论,以改善系统的静、动态响应性能,提高系统的鲁棒性。分析了模糊PI控制与传统PI控制在三相异步电机中的应用,理论分析了模糊PI控制的设计与实现,通过实验证明了模糊控制的优越性^[1-4]。

2 矢量控制原理

为深入分析三相异步电机的控制,首先分析直流电机的控制原理。众所周知,直流电动机的励磁电流与电枢电流是相互独立的,通过调节定子电压来改变磁通,调节电枢电压改变电枢绕组电流。其转速n和转矩T_e公式为:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e C_T \Phi^2} T_e, \quad T_e = C_T \Phi I_a \quad (1)$$

由式(1)可知,在恒定磁通Φ下,可通过调节电枢电流I_a来改变T_e和n,实现对直流电机转速调节。如果异步电机通过励磁电流和转矩电流进行解耦,那么就可根据直流电机的调速方法对异

定稿日期:2011-12-06

作者简介:朱建渠(1973-),男,重庆人,博士研究生,研究方向为控制、模糊算法等。

步电机进行控制。为了实现异步电机励磁电流和转矩电流的相互解耦,F Blaschke 提出了矢量控制理论:以产生同样的旋转磁场为准则,通过 $3s/2r$ 坐标变换将三相静止坐标系下的定子电流 i_A, i_B, i_C 转换到两相同步旋转坐标系下,用两个相互解耦的直流分量 i_d, i_q 进行等效。这样异步电机在 d, q 坐标系下达到了定子电流解耦的目的。然后又通过 $d-q$ 反变换($2r/3s$)转换到三相静止坐标系下,从而实现对异步电机的控制。其矢量控制框图如图 1 所示^[5-6]。

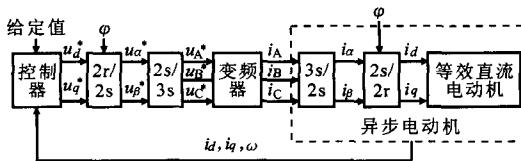


图 1 矢量控制的系统框图

Fig. 1 Block diagram of vector control

三相异步电机控制拓扑结构如图 2 所示。可见,上、下桥臂的两个功率开关管不能同时导通,否则将造成短路。在设计时,上、下桥臂的开关管应选用互补的触发信号,以避免误导通。为了分析方便,对上桥臂开关管的触发状态进行分析。例如,假设 VS_1, VS_4, VS_6 导通,则 VS_2, VS_3, VS_5 必然关断,此时对应的开关状态为 [100]。这样 3 组功率开关管可组合成 8 种开关状态:[000], [001], [011], [010], [110], [100], [101], [111], 在异步电机的三相对称绕组中形成 8 个基本电压矢量。其中 [000] 和 [111] 对应的电压矢量既不能改变异步电机的磁链幅值和相位,又不能使异步电机从直流侧吸收电能,称为零矢量或无效电压矢量。其余 6 种电压矢量都可以改变磁链的幅值和相位。

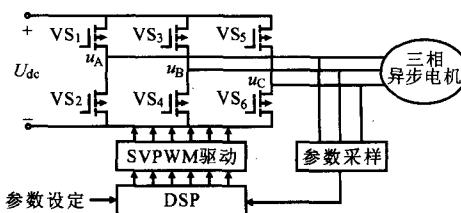


图 2 三相异步电机控制拓扑结构图

Fig. 2 Topology diagram of three phase asynchronous motor

三相异步电机采用的 SVPWM 控制方法就是基于这 8 种开关状态的组合控制。这样可以推出三相逆变器输出的线电压矢量 $[U_{AB} \ U_{BC} \ U_{CA}]^T$ 、相电压矢量 $[U_A \ U_B \ U_C]^T$ 与开关状态矢量 $[a \ b \ c]^T$ 之间的关系为:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} &= U_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} &= \frac{1}{3} U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: a, b, c 为三相上桥臂开关状态,取值为 0 或 1。

式(2)中第 2 式经过 $3s/2r$ 变换后,可用两相静止坐标系下的电压矢量等效三相静止坐标系下的电压矢量,其变换前后对应关系见参考文献[7]。

3 模糊 PI 控制器的设计与实现

PID 控制器是利用误差 $e(t)$ 以及误差变化率 $de(t)/dt$ 对系统进行精确控制。PID 控制算法已成为最基本的控制方法,其数学表达式为:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3)$$

式中: K_p 为比例增益; T_i, T_d 为积分、微分时间常数。

设 $T_i = \lambda T_d$, 则积分增益可表示为:

$$K_i = K_p^2 / (\lambda K_d) \quad (4)$$

式中: K_d 为微分增益。

对传统 PI 控制进行分析,设 K_p 调整范围为 $[K_{p\min}, K_{p\max}]$, K_i 调整范围为 $[K_{i\min}, K_{i\max}]$, λ 变化范围为 $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$, 则可得 K_d 调整范围 $[K_{d\min}, K_{d\max}]$ 。为使模糊 PI 控制器能够充分利用现有的模糊规则,将 K_i 调整范围映射到 K_d 调整范围,通过调节 K_p, K_d 来间接调整 K_i ,从而实现模糊 PI 的自适应动态调整。通常将实际 K_p 和 K_d 归算到 $[0, 1]$ 区间,即:

$$K_p' = \frac{K_p - K_{p\min}}{K_{p\max} - K_{p\min}}, \quad K_d' = \frac{K_d - K_{d\min}}{K_{d\max} - K_{d\min}} \quad (5)$$

图 3 示出所设计的模糊 PI 控制器结构框图。

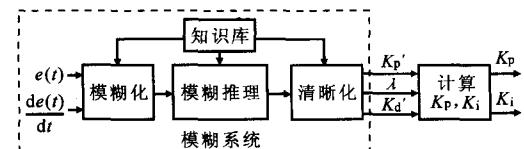


图 3 模糊 PI 控制器的结构框图

Fig. 3 Block diagram of fuzzy PI controller

可见, $e(t)$ 和 $de(t)/dt$ 经过模糊化处理被映射到相应的模糊集合,然后模糊推理模块根据模糊输入和知识库中的模糊规则推理出相应的模糊输出,最后再经过清晰化处理将模糊输出映射到清晰域中,计算出 K_p, K_i 。

4 仿真分析

在三相异步电机交流调速系统中,为了提高

CPU的运算速度,仅在交流调速环节采用模糊PI控制,其速度调节环上的PI参数为: $K_p=0.8$ 和 $K_i=50$ 。其他环节的PI参数保持不变。

模糊PI控制器的参数设置为: $e(t)$ 限定在给定转速的2%内, $de(t)/dt$ 不超过误差范围的5%, K_p 的调整范围限定为[0.6,2], K_i 的调整范围限定为[10,100]。由 λ 的隶属度分布函数和中心解模糊方法,可推得 λ 的取值范围为[2,5]。图4分别为模糊PI控制和传统PI控制的转子磁链轨迹。可见,模糊PI控制较传统PI控制能够更快地建立起旋转磁场。

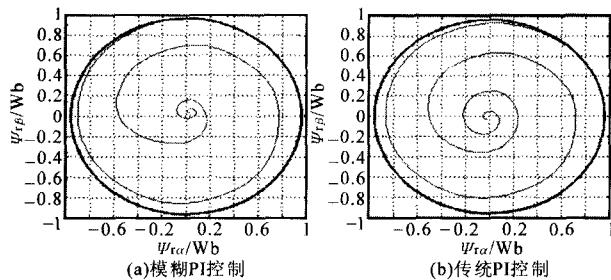


图4 转子磁链轨迹

Fig. 4 Path of rotor flux linkage

图5为模糊PI控制和传统PI控制的转速响应曲线。可见,在空载启动过程,传统PI控制的转速超调量约为 $40 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,而模糊PI控制转速超调量仅为 $28 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$;在 $t=1 \text{ s}$ 时,负载突增 $10 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的动态响应过程中,模糊PI控制方法的转速跌落较小,因此,速度变化不大,而传统PI控制,速度跌落较大,几乎接近零;在 $t=1.4 \text{ s}$ 时转速给定值设为 $100 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,传统PI控制的转速响应有较大抖动,模糊PI控制的转速很平滑地调节到 $100 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从仿真分析可知,模糊PI控制方法比传统PI控制方法的动态响应性能好,能够抑制超调量。

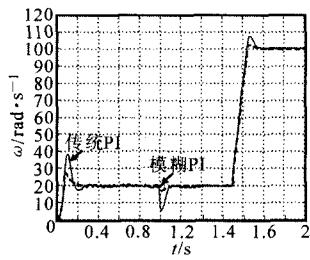


图5 转速响应曲线

Fig. 5 The curves of speed response

5 实验验证

在此对传统PI控制方法和模糊PI控制方法

进行了对比实验。在DSP控制软件程序中,主程序增加了模糊PI控制算法。模糊PI控制器的参数设置为:速度误差设定为 $[-2, 2] \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 范围之内,速度误差变化率设定在 $[-0.05, 0.05] \text{ r} \cdot \text{min}^{-2}$ 范围之内, K_p 的调整范围为[20,80], K_i 的调整参数为[0.1,1], K_d 的设定值为[100,1000]。

图6为传统PI控制和模糊PI控制下空载启动时转矩响应测试波形。对比图6a,b可知,传统PI控制的最大负向调整转矩约为 $-1 \text{ N} \cdot \text{m}$,而模糊PI控制的最大负向调整转矩仅约为 $-0.1 \text{ N} \cdot \text{m}$,与仿真分析结果相同。

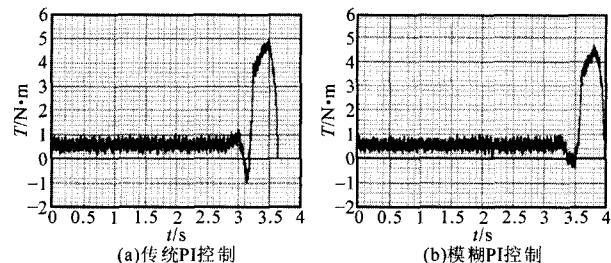


图6 实验波形

Fig. 6 Experimental waveforms

6 结论

对三相异步电机的转速及其矢量控制原理进行了分析,详细对比了传统PI控制与模糊PI控制的方法。通过仿真分析可知,模糊PI控制法比传统PI控制法能够更快地建立旋转磁场,且动态响应快,能实时抑制超调量,因此,模糊PI控制法比传统控制法更具有优越性。通过实验验证了模糊PI控制法能使系统获得更快的平缓转矩响应。

参考文献

- [1] 丁辉.基于DSP的三相交流异步电机矢量控制系统[D].大连:大连理工大学,2007.
- [2] B W Williams, T C Green. Steady-state Control of an Induction Motor by Estimation of Stator Flux Magnitude [J]. IEEE Proc. B., 1991, 138(2): 69–74.
- [3] 王成元,周美文,郭庆鼎.矢量控制交流伺服驱动电动机[M].北京:机械工业出版社,1995.
- [4] 刘勇.基于多采样率和模糊控制的交流调速系统的研究与实现[D].成都:西南交通大学,2011.
- [5] 蔡华斌.多采样率直接转矩控制系统研究[D].成都:南交通大学,2007.
- [6] 吴桢生.模糊控制在矢量控制系统中的应用研究[D].成都:西南交通大学,2009.
- [7] 肖建.多采样率数字控制系统[M].北京:科学出版社,2003.