

[电动机]

基于鼠笼式三相异步电动机的多模糊自适应控制

文/上海电力大学 赵永熹 李丝雨 史旭浩

分析了无速度传感器矢量控制系统的不足，提出并建立了基于多模糊自适应控制的无速度传感器矢量控制系统。重点研究了基于转子磁链模型的速度辨识方法，利用Matlab/Simulink仿真平台对所设计的系统作了详细的仿真分析，并与传统的无速度传感器矢量控制系统仿真结果进行对比。

在工业应用中，由于间接矢量控制调速系统更具有经济性、安全性和可靠性，异步电动机（Induction Motor, IM）的无速度传感器矢量控制的使用率远远高于传统矢量控制。随着工业的发展，异步电动机矢量控制的不足也逐渐暴露出来，其控制效果也远达不到实际工程的要求。本质原因是，矢量控制系统通过坐标变换实现励磁与转矩的解耦，增强系统的可控性，是在忽略了工况、系统损耗的理想条件下提出来的。而实际工况中，系统非线性、时变性等都极大地影响到矢量控制的准确度。因此，要想提高控制的准确度，就必须能针对系统的工况迅速做出反应，降低对电动机参数的依赖性，改善系统的调速特性。智能控制从20世纪80年代被提出以来，由于其不需要建立精确的数学模型，只根据实际环境获取信息进行推理并及时反馈的特点，被广泛应用于复杂的工业环境中。智能控制具有感知环境、不断获得学习信息以减小不确定性的能力，对于非线性、时变性的系统具有非常好的控制效果。因此，可以用来解决根本无法用传统数学模型来表示，即无法建模的问题。

针对异步电动机复杂性、非线性、时变性和不确定性的特点，本文将智能控制与矢量控制系统结合运用于系统中。利用智能控制在线自适应调整非线性、实时推理、决策和学习的优点与矢

量控制结合，解决电动机中出现的不确定性、模型复杂性以及高度非线性问题，极大提高了系统的控制准确度与效果。目前，模糊控制和神经网络控制等智能控制被广泛应用于电动机控制中，中外专家近年来也对其有了深入的研究。本文研究对象为笼型三相异步电动机，针对系统高度非线性、复杂性和时变性等特点，将模糊PID自整定控制与矢量结合运用于系统当中，并在磁链、转速和转矩等都加入了模糊PID自整定模块，相对于一般单模糊自整定控制有效提高了系统的响应速度和控制准确度。

三相异步电动机数学模型

1. 三相静止坐标系下的数学模型

(1) 电压方程

$$\begin{cases} u_A = r_1 i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \\ u_B = r_1 i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \\ u_C = r_1 i_C + \frac{d\psi_C}{dt} \\ u_a = r_2 i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \\ u_b = r_2 i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \\ u_c = r_2 i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

u_A 、 u_B 和 u_C 分别是定子绕组A、B和C的三相电压； i_A 、 i_B 和 i_C 分别为定子绕组A、B和C三相电流； ψ_A 、 ψ_B 和 ψ_C 分别为定子绕组A、B和C的三相磁链； r_1 为定子各相绕组电阻。 u_a 、 u_b 和 u_c 分别为转子a、b和c三相的电压； i_a 、 i_b 和 i_c 分别为转子a、b和c三相的电流； ψ_a 、 ψ_b 和 ψ_c 分别为转子a、b和c三相的绕组磁链； r_2 为转子各相绕组电阻。

(2) 磁链方程

$$\bar{\psi} = \begin{bmatrix} \psi_s^T \\ \psi_r^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{L}_{ss} & \bar{L}_{sr} \\ \bar{L}_{rs} & \bar{L}_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_s^T \\ \bar{I}_r^T \end{bmatrix} = \bar{L} \bar{I} \quad (2)$$

$$\bar{L}_{ss} = \begin{bmatrix} L_{ms} + L_{ls} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ms} + L_{ls} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ms} + L_{ls} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\bar{L}_{rr} = \begin{bmatrix} L_{mr} + L_{lr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{mr} + L_{lr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{mr} + L_{lr} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\bar{L}_{sr} = \bar{L}_{rs}^T = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) \\ \cos(\theta+120^\circ) & \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) \\ \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta-120^\circ) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

电动机内的三相绕组各绕组间的最大互感分别为 L_{ms} 、 L_{mr} ，定子每相漏磁通对应的电感为 L_{ls} ，转子每相漏磁通所对应的电感为 L_{lr} 。

(3) 电磁转矩方程

$$T_e = \frac{1}{2} n_p \left[\bar{I}_r^T \frac{d\bar{L}_{rs}}{d\theta} \bar{I}_s + \bar{I}_s^T \frac{d\bar{L}_{sr}}{d\theta} \bar{I}_r \right] \quad (6)$$

(4) 运动方程

$$T_e = T_l = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (7)$$

2. 坐标变换

异步电动机是一个多变量、高度非线性化、强耦合的复杂时变性系统，定转子各相绕组以及定转子之间的耦合关系相当复杂。因此需要经过坐标变换，实现励磁与转矩的解耦，得到两相旋转坐标系下的电动机模型，并在此基础上设计电流环、速度环和磁链环，实现异步电动机的矢量控制。

(1) 三相静止坐标系到两相静止坐标系的变换变换矩阵为

$$C_{3/2} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

(2) 两相静止坐标系到两相旋转坐标系的变换变换矩阵为

$$C_{2s/2r} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

3. 旋转坐标系下三相异步电动机的数学模型

(1) 电压方程

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega \psi_{sq} \\ \omega \psi_{sd} \\ -(\omega - \omega_r) \psi_{rq} \\ (\omega - \omega_r) \psi_{rd} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中， u_{sd} 、 u_{sq} 、 u_{rd} 和 u_{rq} 分别为定子电压、转子电压在 d 轴、 q 轴上的分量； R_s 、 R_r 分别为定子、转子的等效电阻； i_{sd} 、 i_{sq} 、 i_{rd} 和 i_{rq} 分别为定子电流和转子电流在 d 轴和 q 轴的分量； ψ_{sd} 、 ψ_{sq} 、 ψ_{rd} 和 ψ_{rq} 分别为定子绕组磁链和转子绕组磁链在 d 轴和 q 轴上的分量； ω 为定子同步旋转角速度； ω_r 为转子旋转角速度。

(2) 磁链方程

$$\begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中， L_m 为定子和转子的互感； L_s 为定子绕组的等效自感； L_r 为转子绕组的等效自感。

(3) 转矩和运动方程

$$T_e = n_p L_m [i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}] \quad (12)$$

式中， T_e 为电磁转矩； n_p 为双馈电动机的极对数。

无速度传感器矢量控制研究

1. 无速度传感器矢量控制的基本原理

异步电动机矢量控制通过坐标变换实现了励磁转矩与励磁的解耦。在控制系统中，通过分别控制异步电动机的转矩电流分量与励磁电流分量来实现对异步电动机的实时控制。

矢量控制需要强大的速度检测系统实时检测异步电动机转子的旋转速度，构成一个完整的闭环控制系统，提高系统的控制准确度，减小稳

态偏差。速度传感器的安装,会增加系统的复杂性,增强系统的非线性与不确定性,同时也会增加系统的成本。因此,在实际工程中,为了提高电动机的经济性与稳定性,通常省略了传感器装置,而是在控制策略上作出了改进,提出了无速度传感器技术。无速度传感器矢量控制同时也被称为间接矢量控制,其核心在于如何通过电动机可以通过测量实时监测到的电流、电压等信息间接对电动机的转速进行实时监测。

2. 模型参考自适应的速度推算原理

本文采用的是模型参考自适应法(MRAS)来获取电动机转速的信息。通过控制算法时刻调整模型的转速估计值与参考值实时比较,使之不断逼近真实值。

本文中MRAS是基于转子磁链的电压方程和电流方程,用电压方程计算的转子磁链作为系统的参考值,电流方程的输出作为转子磁链的可调值,通过控制器的调整使可调值逐渐逼近真实值,从而计算输出电动机转速。

3. 仿真分析与研究

本节在Matlab/Simulink仿真平台的上述速度推算控制系统模型如图1所示。图2为模型参考自适应的矢量控制仿真结果。

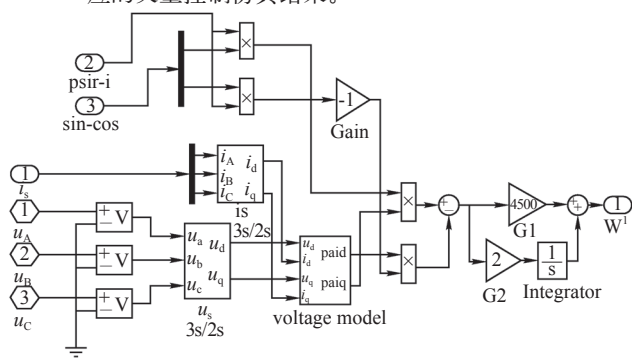


图1 MRAS方法下转速的计算模型

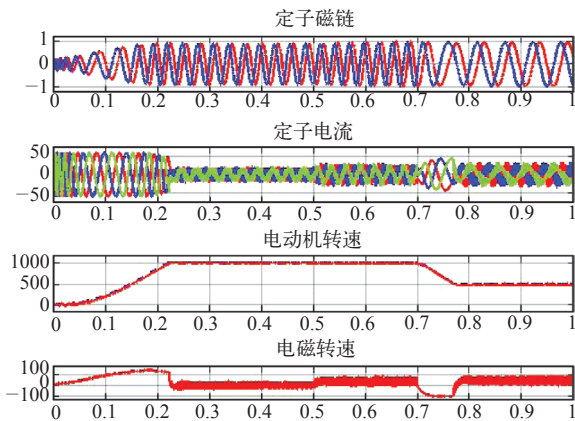


图2 无速度传感器矢量控制系统的仿真结果

图2依次为定子磁链、定子电流、电动机转速和电磁转矩的波形。图2中0~0.22 s为电动机启动过程,接着0.22~0.7 s为不同转矩下保持转速稳定的调节过程,0.7~0.8 s是调速过程。从图2中可以看出虚线为MRAS法下计算的电动机转速与实际电动机转速基本相重合,说明MRAS法基本实现了速度传感器的功能。而从整个过程来看虽然矢量控制能够基本控制住系统,但波动太大,控制效果较差,在实际工程运用中也会对电动机造成不可逆的损伤,实际使用价值较低。

基于多模糊自适应的无速度传感器矢量控制方法研究

智能控制具有实时获取信息并学习推理的功能,对于高度非线性化、时变性的系统能够起到实时反馈并进行控制的优势。基于异步电动机这样复杂的被控对象,本文将模糊PID控制引入无速度传感器矢量控制的闭环控制器中,将起到实时感知信息、反馈信息的功能,起到速度传感器的功能,从而提高控制系统的响应速度和控制准确度。

1. 模糊PID控制的基本理论

虽然模糊控制适用于非线性强耦合的系统,但由于单纯的模糊控制控制效果较差,所以在实际工程中,单独的模糊控制系统的的应用较少,基本都是与其他控制方法结合使用,例如PID控制、专家控制和神经网络控制等。实际工程中,由于传统PID控制具有结构简单易于大量使用,且稳态误差较小等特点依旧被广泛应用。因此本文将模糊控制与传统的PID控制结合构建模糊PID控制器,根据y模糊控制器的推理系统模糊获得理想的PID参数,输出到PID控制器,对系统进行实时控制,提高系统的控制准确度。

2. 模糊PID控制器的设计

在电动机转速、定子磁链和电磁转矩分别添加三个模糊控制器对系统进行实时控制,模糊逻辑部分通过Matlab工具箱制定模糊规则设计模糊函数,提升系统的控制性能,如图3~图5所示。

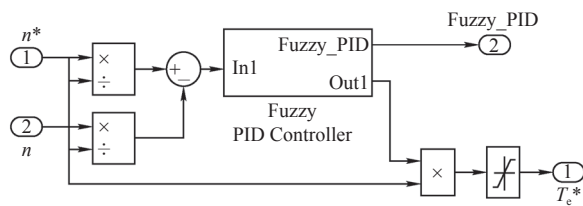


图3 模糊控制(电动机转速)子模块

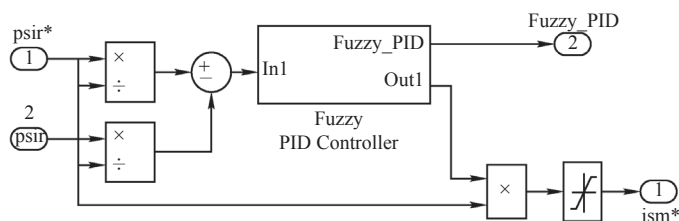


图4 模糊控制（定子磁链）子模块

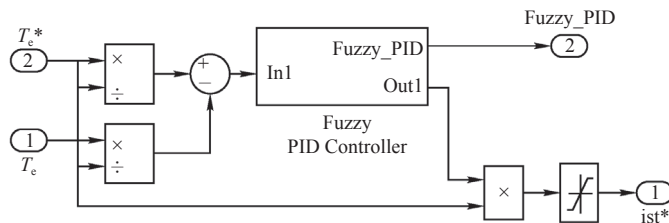


图5 模糊控制（电磁转矩）子模块

3. 仿真分析与研究

本节在Matlab/Simulink仿真平台搭建了上述控制系统的模型，对所设计的控制系统进行仿真验证，如图6、图7所示。

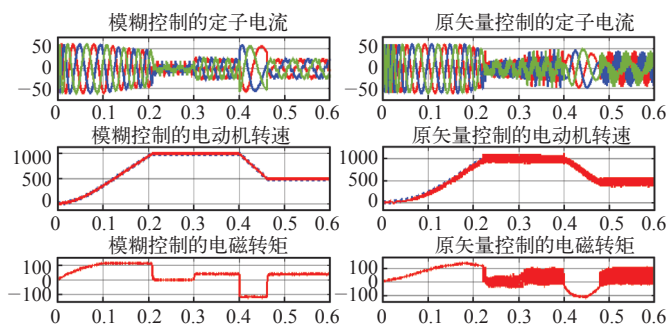


图6 基于多模糊自适应的无速度传感器矢量控制系统

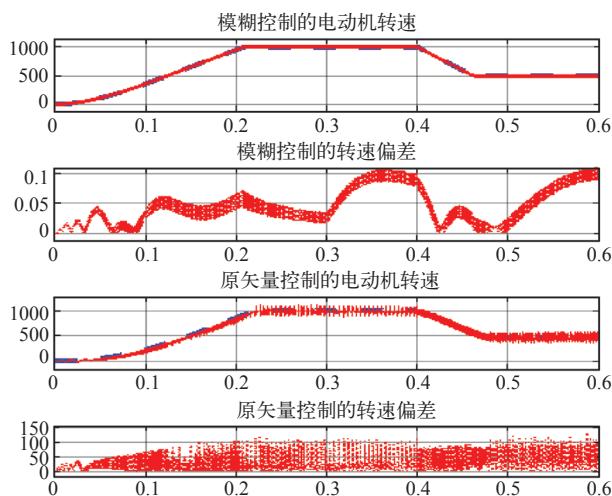


图7 基于多模糊自适应的无速度传感器矢量控制系统与普通无速度传感器矢量控制系统的波动分析

图6为多模糊控制与原矢量控制定子转速、电动机转速、电磁转矩的仿真结果对比图。在添加

模糊控制器后，整个动态过程中，电动机的转速并不随着转矩分量的变化而改变。在转矩变化的过程中，随着转矩的变化进行调速，保持转速的稳定，调节定子电流的大小。在起动或减速时，系统达到给定值，而且没有稳态误差和超调，并且具有很强的抗负载扰动能力。

图7为添加多模糊控制前后系统控制性能的对比图。多模糊控制器输出实时的PID控制参数对系统进行控制，并且在线实时获取学习系统信息，对控制参数及时作出调整，以达到较为准确地控制准确度。如图所示，多模糊控制下，对系统的控制准确度极高，实现了对电动机转速精确地实时监控，误差极小基本在0.1 r/min以下。未加模糊控制器的无速度传感器的矢量控制的误差在0~100 r/min之间，控制准确度远远达不到多模糊控制。

结束语

本文应用Matlab仿真平台对对笼型三相异步电动机的无速度传感器的矢量控制进行了改进，通过分别对电动机转速定子磁链和电磁转矩添加模糊控制器，优化系统的PID参数，对系统进行控制，起到了实时监测系统转速的功能，对系统有较好的控制效果。多模糊自适应PID控制策略增强了系统的鲁棒性和动态响应性能，提高系统的调速性能，实现异步电动机对负载扰动和参考值变化的快速响应。本文提出的控制方案易于实现，硬件结构简单，系统可靠性高，更有益于大量在实际工程中使用。EA

(收稿日期：2019.09.28)

(编辑：朱金凤)