

基于改进的定子电流MRAS无速度传感器在牵引电动机中的应用研究

通过基于定子电流的模型参考自适应(MRAS)法来估算转速。采用改进的积分策略代替传统的积分环节,以避免转速估算算法中由纯积分所引起的直流偏置、误差累积等问题。相比于基于转子磁链的MRAS转速估算法,该方法避免了由于参考模型的不准确所带来的转速估计误差。将整个控制算法应用于轨道交通车辆的牵引控制系统中,利用Matlab/Simulink对整个系统进行了仿真,仿真结果表明该系统运行稳定,具有良好的转速估算准确度,能满足牵引控制需要。

杨雯越/西南交通大学电气工程学院
张靖/成都运达科技股份有限公司

0 引言

目前,我国轨道交通发展迅速,其牵引控制系统在异步牵引电动机的控制策略上主要有矢量控制和直接转矩控制,这两种方法都离不开转速的实时反馈。但速度传感器由于具有价格昂贵、抗干扰性差、故障率较高且不易维修的缺点。因此,近几年来,异步电动机无速度传感器控制技术得到了广泛的研究与应用^[1-3]。基于MRAS的转速估算法模型因具有结构简单、计算量小、容易实现以及动态性能与稳定性好的优点,被认为是最好的转速估算方法之一^[4-6],因此被广泛应用于轨道交通车辆的研究中^[7]。本文在异步牵引电动机矢量控制理论下,将基于定子电流的MRAS法替代常用的基于转子磁链的MRAS法来估计转速,从根本上消除了由于参考模型的不准确所带来的转速估计误差,并利用Matlab/Simulink对控制算法进行仿真

验证。

1 异步牵引电动机矢量控制

异步电动机的数学模型按两相同步旋转(dq)坐标变换,在dq坐标系下,按转子磁场定向,即d轴与转子磁场旋转方向相同,此时电压矩阵方程为^[8]

$$\begin{pmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + L_s p & -\omega_s L_s & L_m p & -\omega_s L_m \\ \omega_s L_s & R_s + L_s p & \omega_s L_m & L_m p \\ L_m p & 0 & R_r + L_r p & 0 \\ \omega_s L_m & 0 & \omega_s L_r & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{pmatrix} \quad (1)$$

转子磁链方程为

$$\psi_r = \frac{L_m i_{sd}}{1 + T_r p} \quad (2)$$

经运算可得转矩方程为

$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_r} i_{sq} \psi_r \quad (3)$$

式中, u_{sd} 、 u_{sq} 为d轴和q轴的定子电压; i_{sd} 、 i_{sq} 为d轴和q轴的定子电流; i_{rd} 、 i_{rq} 为d轴和q轴的转子电流; T_r 为转子励磁时间常数, $T_r = L_r / R_r$ 。

从式(2)、式(3)可以看出,转子磁链 ψ_r 仅由定子磁化电流 i_{sd} 决定,若控制 i_{sd} 使磁链保持恒定,则可通过控制 i_{sq} 对转矩进行瞬时控制,从而调节电动机的转速。

2 定子电流与转速估算

2.1 定子电流的估算模型

本文通过实际测得的异步电动机的定子电流进行坐标变换,得到两相静止



杨雯越/硕士研究生

关键词/Keywords

定子电流·
模型参考自适应·
无速度传感器·
牵引电动机·

坐标系下的定子电流 $i_{s\alpha}$ 、 $i_{s\beta}$ ，将其作为参考模型，用估算所得的定子电流 $\hat{i}_{s\alpha}$ 、 $\hat{i}_{s\beta}$ 作为可调模型。该定子电流估算模型里含有转速信号，经过自适应算法得到的转速反馈回可调模型，使它与参考模型一致。估算定子电流的数学模型可以由电压模型和电流模型联立得到^[10]，即

$$\begin{cases} p\hat{i}_{s\alpha} = \frac{1}{\sigma L_s}u_{s\alpha} - \frac{L_m^2 + T_r L_r R_s}{\sigma L_s T_r L_r} \hat{i}_{s\alpha} + \frac{L_m}{\sigma L_s T_r L_r} \hat{\psi}_{r\alpha} + \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_s L_r} \hat{\psi}_{r\beta} \\ p\hat{i}_{s\beta} = \frac{1}{\sigma L_s}u_{s\beta} - \frac{L_m^2 + T_r L_r R_s}{\sigma L_s T_r L_r} \hat{i}_{s\beta} + \frac{L_m}{\sigma L_s T_r L_r} \hat{\psi}_{r\beta} - \frac{L_m \omega_r}{\sigma L_s L_r} \hat{\psi}_{r\alpha} \end{cases} \quad (4)$$

式中， $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 为 α 轴和 β 轴的定子电压； $\hat{i}_{s\alpha}$ 、 $\hat{i}_{s\beta}$ 为 α 轴和 β 轴的定子电流； $\hat{\psi}_{r\alpha}$ 、 $\hat{\psi}_{r\beta}$ 为 α 轴和 β 轴的转子磁链； R_s 、 L_s 、 L_r 和 L_m 分别为定子电阻、定子电感、转子电感和励磁电感； σ 为漏感系数， $\sigma = 1 - L_m^2/(L_s L_r)$ 。

式(4)中的转子磁链通过电流型磁链估算模型得到，即

$$\begin{cases} p\hat{\psi}_{r\alpha} = \frac{1}{T_r}(L_m i_{s\alpha} - \hat{\psi}_{r\alpha}) - \omega_r \hat{\psi}_{r\beta} \\ p\hat{\psi}_{r\beta} = \frac{1}{T_r}(L_m i_{s\beta} - \hat{\psi}_{r\beta}) + \omega_r \hat{\psi}_{r\alpha} \end{cases} \quad (5)$$

2.2 转子磁链改进电流模型

为了避免算法中积分环节的误差累积和直流偏置等问题，采用一种改进的积分策略来估算转子磁链，其结构如图1所示。图中， X 是输入； Y 是输出； Z 是输出经限幅后的反馈值。

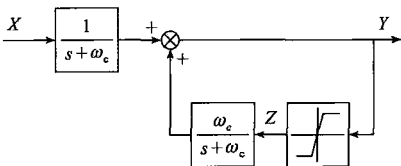


图1 改进的积分策略框图

根据输出的表达式 $Y = \frac{1}{s + \omega_c} X + \frac{\omega_c}{s + \omega_c} Z$ 可知：当 $Z = 0$ 时，该积分策略就是一个一阶惯性环节；当 $Z = Y$ 时，该积分策略就是一个纯积分环节。通过分析可以看出这种改进的积分策略介于一阶惯性环节和纯积分之间，输出反馈信号 Z 可以

补偿惯性环节带来的幅值和相位误差，该积分策略可以提高转子磁链的辨识度。

2.3 转速的自适应估算

不含转速信息的实测定子电流与含有转速信息的估算定子电流组成模型参考自适应系统，根据超稳定性理论或李雅普诺夫方法设计自适应率，可得到转速的辨识公式为

$$\hat{\omega}_r = K_p(e_{is\alpha}\hat{\psi}_{r\beta} - e_{is\beta}\hat{\psi}_{r\alpha}) + K_I \int (e_{is\alpha}\hat{\psi}_{r\beta} - e_{is\beta}\hat{\psi}_{r\alpha}) dt \quad (6)$$

基于定子电流的MRAS法进行转速估算的框图如图2所示。定子电流模型和转子磁链模型都通过估算的转速进行调节。

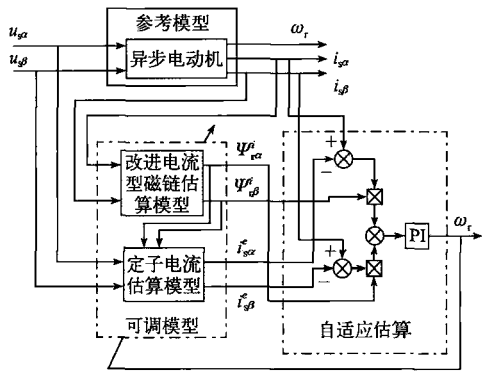


图2 基于定子电流的MRAS结构框图

3 无速度传感器矢量控制仿真与分析

3.1 建立仿真模型

利用Matlab/Simulink搭建牵引电动机无速度传感器矢量控制的仿真模型，该仿真系统主要包括了两部分：一部分是基于定子电流的MRAS转速估算法，由测量的定子电压和定子电流根据定子电流的估算模型得到定子电流估算值，将定子电流误差通过自适应机构实现电动机转速的辨识，代替实际采集的转速信息用于矢量控制中的转速闭环控制；另一部分是异步电动机间接磁场定向矢量控制，主要涉及坐标变换、矢量控制计算以及电流内环和转速外环的PI调节等模块。整个系统的控制策略如图3所示。

3.2 仿真结果

仿真所使用的异步电动机参数为地铁车辆实

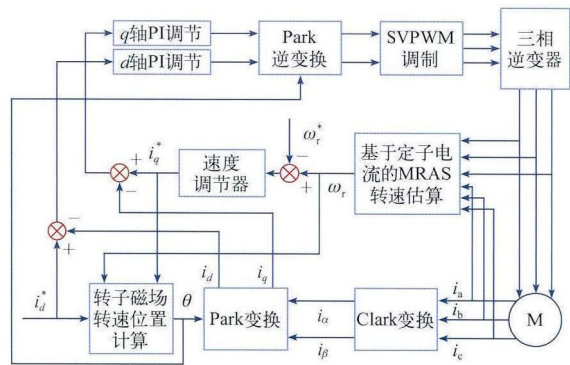


图3 无速度传感器矢量控制系统结构框图

际异步牵引电动机参数，具体如下表所示。

表 仿真中电动机模型的参数

参数	数值	参数	数值
额定功率 P_N/kW	190	定子电阻 R_s/Ω	0.143
额定电压 U_N/V	1 100	转子电阻 R_r/Ω	0.074 5
额定频率 f_N/Hz	60	定子漏感 L_{ls}/mH	0.946
极对数 p_n	2	转子漏感 L_{lr}/mH	1.2
转动惯量 $J/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	30	互感 L_{m}/mH	37.1

速度给定为125 rad/s电动机空载起动的实际转速与估计转速、转矩和定子电流 i_a 的仿真曲线如图4、图5所示。从图中可以看出，转速在 $t=3.7$ s时达到给定值，估算转速能很好地跟踪实际转速。

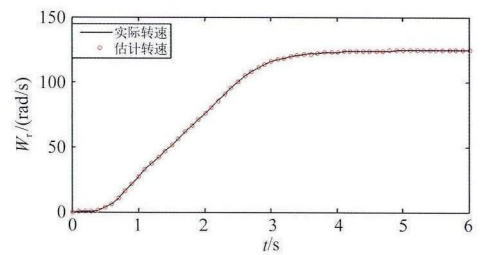


图4 实际转速与估计转速

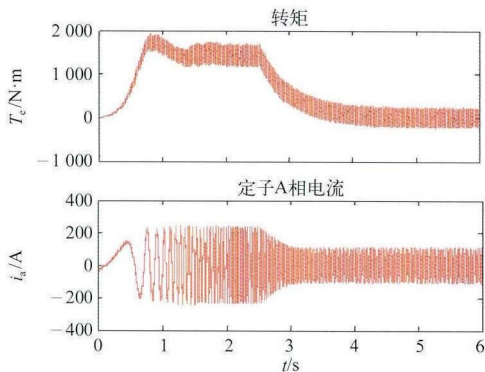


图5 电动机空载起动响应

转矩输出脉动小，具有良好的转矩特性。

图6为电动机带恒定 $T_m=400\text{ N}\cdot\text{m}$ 的负载启动，指定转速为100 rad/s，在 $t=6\text{ s}$ 时转速给定突变为140 rad/s的仿真结果。从图中可以看出估计转速和实际转速一致，转速响应快，也验证了该转速估算法的正确性。

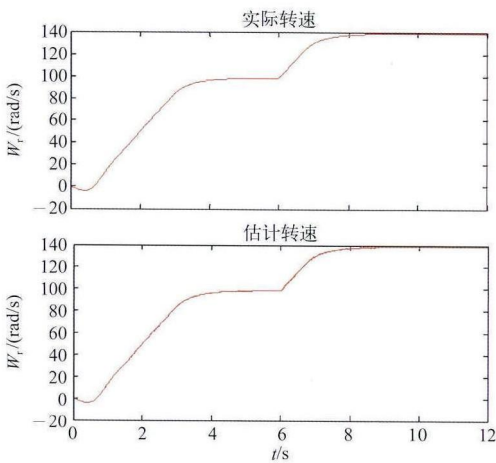
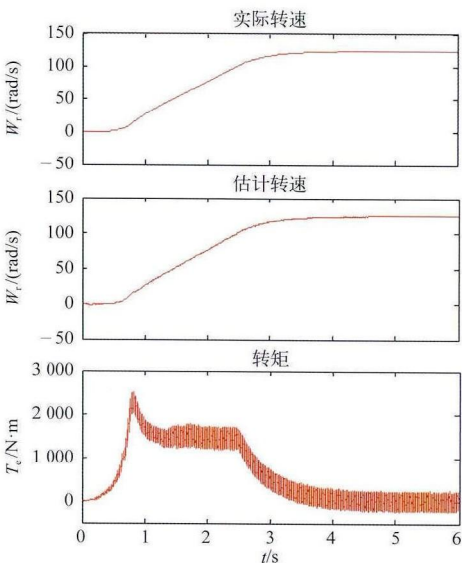
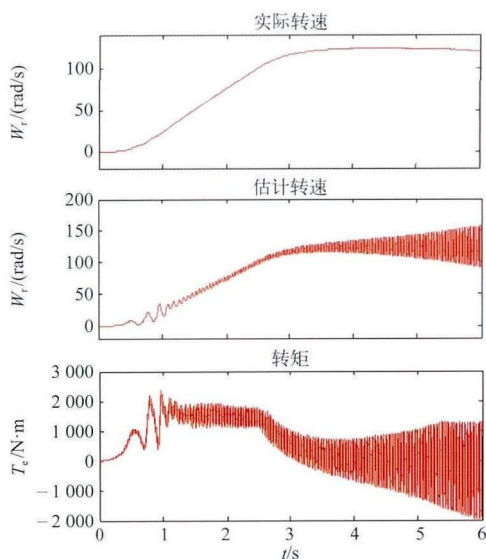


图6 带载时转速突变曲线

图7为定子电阻不准确时的仿真结果，控制中所用的定子电阻为电动机设定参数中定子电阻的1.3倍，即 $R_{s\text{控}}=1.3R_{s\text{实}}$ 。从图7a、b可以看出，基于定子电流的MRAS法所估算的转速仍然能较好地跟踪实际转速，而基于转子磁链的MRAS法在转速估算上受参数变化影响更大，转矩输出脉动大，系统失去稳定。



(a) 基于定子电流的MRAS仿真结果



(b) 基于转子磁链的MRAS仿真结果

图7 定子电阻不准时空载起动响应

4 结束语

介绍了一种基于定子电流的MRAS法，代替常用的基于转子磁链的MRAS法进行转速估算，并将其运用到异步牵引电动机矢量控制中，构建了牵引电动机无速度传感器矢量控制系统。仿真结果表明该转速估算方法能对转速进行准确的估计，实时跟踪实际转速，转速响应快，受参数影响较小，整个系统控制性能良好，运行平稳，能满足牵引控制需要。

参考文献

- [1] A V Ravi Teja, Vimlesh Verma, Chandan Chakraborty. A new formulation of reactive-power-based model reference adaptive system for sensorless induction motor drive [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2015, 62 (11): 6797-6808.
- [2] 李洁, 钟彦儒. 异步电机无速度传感器控制技术研究现状与展望 [J]. 电力电子技术, 2007 (5): 3-11.

- [3] 张永昌, 张虎, 李正熙. 异步电机无速度传感器高性能控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015: 20-21.
- [4] Ahmad Razani Haron, Nik Rumzi Nik Idris. Simulation of MRAS-based speed sensorless estimation of induction motor drives using Matlab/Simulink [C]. First International Power and Energy Conference, Putrajaya, Malaysia, 2006: 411-415.
- [5] Dybkowski M, Orłowska-Kowalska T. Performance of the speed sensorless induction motor drive for traction application with MRAS type speed and flux estimator [C]. 2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2012: 477-481.
- [6] Gadoue S M, Giaouris D, Finch J M. MRAS sensorless vector control of an induction motor using new sliding-mode and fuzzy-logic adaptation mechanisms [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25 (2): 394-402.
- [7] 魏佳丹, 陈长春, 刘颖. 基于无位置传感器技术的舵机伺服系统特性研究 [J]. 电气工程学报, 2016, 11 (1): 19-23.
- [8] 冯晓云. 电力牵引交流传动及其控制系统 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 157-159.
- [9] 李肥翔, 薛重德, 朱威威. 基于MRAS的异步电机无速度传感器的矢量控制 [J]. 电子设计工程, 2013, 21 (22): 115-117.
- [10] Teresa Orłowska-Kowalska, Mateusz Dybkowski. Stator-current-based MRAS estimation for a wide range speed-sensorless induction-motor drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57 (4): 1296-1308.

(收稿日期: 2016-12-12) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告