

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司

支持

任建,王淑红,黄济文,张根嘉,刘旭.
基于参数辨识的永磁同步电机无位置
传感器控制.
电机与控制应用,2022,49(1):8.

MTST系列 电机型式试验系统



MTST系列 电机型式试验系统①



MTST系列 电机型式试验系统②



MTST系列 电机型式试验系统③



MTST系列 电机型式试验系统④



MTST系列 电机型式试验系统⑤

CS-XY型电机出厂试验测试系统



DZC系列电机定子性能综合测试仪



Tz型电机堵转转矩测试仪



RZJ系列绕组匝间冲击耐电压测试仪



SEARI
上电科



地址: 上海市武宁路505号 传真: 021-62163904

电话: 021-62574990-436、18918357509

邮编: 200063

邮箱: wangcj@seari.com.cn

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.seari.com.cn

基于参数辨识的永磁同步电机无位置传感器控制^{*}

任 建¹, 王淑红¹, 黄济文¹, 张根嘉¹, 刘 旭²

(1. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024; 2. 国网大同供电公司, 山西 大同 037006)

摘 要: 针对电机运行过程中参数变化会影响永磁同步电机(PMSM)无位置传感器控制性能的问题, 将递推的最小二乘法(RLS)用于PMSM参数的在线辨识, 在最大转矩电流比控制策略下, 使用基于BP神经网络改进的模型参考自适应系统构建无位置传感器控制方案, 提出了基于在线参数辨识的PMSM无位置传感器控制方案。运用递推的RLS对PMSM的交轴电感和转子磁链进行在线辨识, 并将参数辨识结果应用于电机无位置传感器算法中。仿真和试验证明了基于递推的RLS参数辨识算法可以对PMSM的转子磁链和交轴电感值进行准确辨识, 基于参数辨识的PMSM无位置传感器控制方案性能更好。

关键词: 永磁同步电机; 无位置传感器控制; 参数辨识; 神经网络

中图分类号: TM341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)01-0008-08

doi: 10.12177/emca.2021.145

Position Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor with Parameter Identification^{*}

REN Jian¹, WANG Shuhong¹, HUANG Jiwen¹, ZHANG Genjia¹, LIU Xu²

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. State Grid Datong Power Supply Company, Datong 037006, China)

Abstract: The change of motor parameters can affect the performance of permanent magnet synchronous motor (PMSM) position sensorless control. In order to solve this problem, the recursive least squares (RLS) algorithm is used for the online identification of PMSM parameters. Under the maximum torque per ampere (MTPA) control strategy, the improved model reference adaptive system (MRAS) based on back propagation (BP) neural network is used to construct a position sensorless control scheme, and a position sensorless control scheme for PMSMs based on parameter identification is proposed. The RLS method is used to identify the quadrature axis inductance and rotor flux of the PMSM online, and the parameter identification results are applied to the PMSM sensorless algorithm. Simulations and experiments prove that the parameter identification algorithm based on the RLS method can accurately identify the rotor flux and quadrature axis inductance of the PMSM, and the PMSM sensorless control scheme based on parameter identification is feasible.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); position sensorless control; parameter identification; neural network

0 引 言

对内置式永磁同步电机(IPMSM)进行矢量

控制时,需要准确的转子位置和转速信息,但是装设传统位置传感器会使系统复杂程度增加并且在一些特殊场合无法使用,所以通过无位置传感器

收稿日期: 2021-11-01; 收到修改稿日期: 2021-11-24

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(52077140)

作者简介: 任 建(1995—),男,硕士研究生,研究方向为特种电机理论与控制技术。

王淑红(1965—),女,博士,教授,研究方向为特种电机理论与控制技术。

黄济文(1995—),男,硕士研究生,研究方向为特种电机理论与控制技术。

控制算法转子位置及转速进行估算已经成为了永磁同步电机(PMSM)控制系统的发展趋势之一^[1]。常见的无位置传感器算法有适用于电机中高速区运行的滑模观测器法^[2],模型参考自适应法(MRAS)^[3],扩展卡尔曼滤波器法^[4](EKF)等,这类方法的性能易受到电机参数变化的影响;在电机零速和低速运行阶段,通过在电机基波信号外加高频激励信号,检测响应来估计电机转子位置信息,这类方法信号处理过程比较复杂,限制了其性能。

在无位置传感器控制中,为了减小电机辨识误差,获取准确的电机参数非常重要,然而由于电机运行过程中会产生高温退磁和磁路饱和^[5],不同工况运行下电机参数会有变化,而电机参数不准确会影响其控制性能。

对此问题一些学者将参数辨识与无位置传感器算法结合起来进行了研究。文献[3]使用MRAS对表贴式PMSM定子电阻和电感进行了在线辨识,并将辨识结果通过低通滤波器滤波后反馈给电机模型,使电机运行时参数变化对转速及转子位置估计的影响减小;文献[4]使用递推的最小二乘法(RLS)对电机参数进行了辨识,将参数辨识结果反馈后,仅在恒转速下对参数辨识算法进行了研究,未进行调速研究;文献[5]采用MRAS进行无位置传感器控制,使用EKF对两个电机参数进行了辨识,并将辨识结果用于无位置传感器算法中,使转速辨识误差减小;文献[6]使用EKF对电机转子磁链进行了在线辨识,但是并没有对将参数辨识结果用于无位置传感器控制后对其性能的改善进行说明。

根据以上分析本文将递推的RLS的参数辨识方法与BP神经网络改进的无位置控制算法结合起来,采用两种方法实现了对电机转子磁链、交轴电感以及转子位置和速度同时在线辨识,避免了由于多参数辨识存在秩不足的问题,整体系统运行稳定,具有良好的性能,仿真和试验结果表明上述方法可行。

1 IPMSM 无位置传感器控制

1.1 IPMSM 数学模型

在两相旋转坐标系(d - q 轴)下,IPMSM的电压方程^[7]为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q \omega_e i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + L_d \omega_e i_d + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为电机 d 、 q 轴电压; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感; R_s 为定子电阻值; ψ_f 为电机转子磁链值; ω_e 为转子电角速度。

1.2 MRAS 转速和转子位置辨识原理

MRAS主要包括参考模型、可调模型和自适应律三个部分^[8],其结构框图如图1所示。选择含待辨识参数的方程作为可调模型,电机本体作为参考模型,计算两个模型的输出差,然后设计自适应律对电机转速和转子位置进行辨识^[9]。

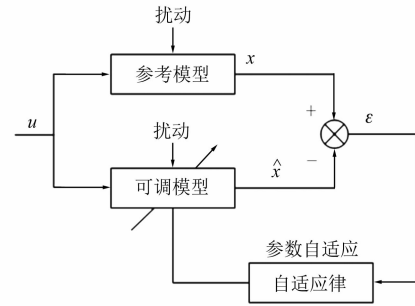


图1 模型参考自适应结构框图

由式(1)得电机的电流方程为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} i_d = -\frac{R}{L_d} i_d + \frac{\omega_e L_q i_q}{L_d} + \frac{U_d}{L_d} \\ \frac{d}{dt} i_q = -\frac{R}{L_q} i_q + \frac{\omega_e L_d i_d}{L_q} - \frac{\omega_e \psi_f}{L_q} + \frac{U_q}{L_q} \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)做变换,得:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d + \frac{\psi_f}{L_d} \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{L_q \omega_e}{L_d} \\ -\frac{L_d \omega_e}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d + \frac{\psi_f}{L_d} \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d + \frac{R_s \psi_f}{L_d} \\ u_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

令 $i'_d = i_d + \frac{\psi_f}{L_d}$; $i'_q = i_q$; $u'_d = u_d + \frac{R_s \psi_f}{L_d}$; $u'_q = u_q$, 则式

(3)变为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{L_q}{L_d} \omega_e \\ -\frac{L_d}{L_q} \omega_e & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

将式(4)写为状态空间表达式,即

$$\frac{d}{dt} i' = A i' + B u' \quad (5)$$

$$\text{式中: } i' = \begin{bmatrix} i'_d \\ i'_q \end{bmatrix}, u' = \begin{bmatrix} u'_d \\ u'_q \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{L_q}{L_d} \omega_e \\ \frac{L_d}{L_q} \omega_e & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix}。$$

将式(5)作为可调模型,电机本体作为参考模型。将式(5)以估计值表示得:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}'_d \\ \hat{i}'_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{L_q}{L_d} \hat{\omega}_e \\ -\frac{L_d}{L_q} \hat{\omega}_e & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}'_d \\ \hat{i}'_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{u}'_d \\ \hat{u}'_q \end{bmatrix} \quad (6)$$

简写为

$$\frac{d}{dt} \hat{i}' = \hat{A} \hat{i}' + B u' \quad (7)$$

$$\text{式中: } \hat{i}' = \begin{bmatrix} \hat{i}'_d \\ \hat{i}'_q \end{bmatrix}, \hat{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{L_q}{L_d} \hat{\omega}_e \\ \frac{L_d}{L_q} \hat{\omega}_e & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix}。$$

定义误差 $\text{error} = i' - \hat{i}'$, 将式(5)和式(7)相减可得:

$$\frac{d}{dt} \text{error} = A_e \text{error} - W \quad (8)$$

$$\text{式中: } A_e = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{L_q}{L_d} \omega_e \\ -\frac{L_d}{L_q} \omega_e & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix}, W = J(\omega_e - \hat{\omega}_e) \hat{i}'。$$

根据 Popov 超稳定性理论^[10] 对其积分不等式进行求解得到自适应律为

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_e &= \int_0^t k_i e^T \hat{J} i' d\tau + k_p e^T \hat{J} i' + \hat{\omega}_e(0) = \\ &\left[\frac{L_q}{L_d} \hat{i}_d \hat{i}_q - \frac{L_d}{L_q} \hat{i}_q \hat{i}_d + \frac{\psi_f}{L_d} (\hat{i}_q - i_q) + \hat{i}_d \hat{i}_q \left(\frac{L_d}{L_q} - \frac{L_q}{L_d} \right) \right] \cdot \\ &\left(k_i + \frac{k_p}{p} \right) + \hat{\omega}_e(0) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\hat{\theta}_e = \int \hat{\omega}_e d\tau \quad (10)$$

1.3 基于 BP-MRAS 的无位置传感器控制系统

在实际应用中存在 PI 控制器参数调节的问题,且单一 PI 值应用速度范围有限^[11],针对此问题使用 BP 神经网络算法对基于 MRAS 的无位置传感器控制方法进行改进,使用 BP 神经网络算法设计自适应律,通过 BP 神经网络算法在线学习修正输出值,把参考模型与可调模型的输出值作差,用来调整各层神经元的连接权值以修正辨识的电机转速,当电机参考模型与可调模型的输出差值小于允许误差时,由 BP 神经网络输出的辨识转速即为电机真实转速^[12]。

BP 神经网络算法是一种应用广泛的多层前馈网络算法,根据误差反向传播进行学习训练,包括前向传播和误差反向修正两部分^[13],反向修正环节以网络输出与目标值的误差函数作为指标函数,使其误差平方和最小^[14],算法结构如图 2 所示。

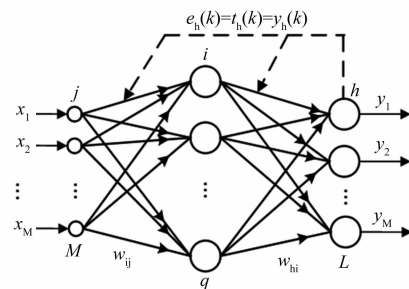


图2 BP神经网络结构图

选取 Sigmoid 函数的变形函数为激活函数:

$$g(x) = \frac{1}{1 + \exp[-(x + \theta_1)/\theta_0]} \quad (11)$$

选取误差指标函数为

$$J(k) = \frac{1}{2} \sum_{h=1}^L [t_h(k) - y_h(k)]^2 \quad (12)$$

式中: t_h 为输出层第 h 个神经元的期望输出值。

本文中用电机定子电压方程作为参考模型, 使用 d 、 q 轴电流采样值作为输入计算出对应的 d 、 q 轴电压作为可调模型的输出, 将其与实际电压的差值 ε 用于调整 BP 神经网络的连接权重, 当 ε 小于允许误差时, 辨识转速即为真实转速。

BP-MRAS 系统中 BP 神经网络使用参考模型与可调模型的输出差值调整权重, 需改写权重调整公式。电机运行时 d 轴电压通常比 q 轴电压小, 而且两者的差值随着负载的增大而增加, 因此将 u_q 用作参考输出量完成神经网络的在线训练。由于本系统中 BP 神经网络输出层只有一个输出(即估计转速), 所以误差函数变为

$$J(k) = e(k) = t(k) - y(k) = u_q(k) - \hat{u}_q(k) \quad (13)$$

式中: $\hat{u}_q$ 为可调模型输出电压。

将 q 轴电压方程代入式(12)得:

$$J(k) = u_q(k) - R_s i_q(k) - L_q \frac{di_q(k)}{dt} - \hat{\omega}_e(k) (L_d i_d(k) + \psi_f) \quad (14)$$

由此可以得到神经网络隐含层和输出层连接权重在线修正公式:

$$\begin{cases} \sigma_h(k) = [L_d i_d(k) + \psi_f] \hat{\omega}_e(k) [1 - \hat{\omega}_e(k)] \\ \sigma_i(k) = [L_d i_d(k) + \psi_f] \hat{\omega}_e(k) [1 - \hat{\omega}_e(k)] \times \\ w_{hi}(k) o_i(k) [1 - o_i(k)] \end{cases} \quad (15)$$

式中: o_i 为隐含层第 i 个神经元输出值; w_{hi} 为输出层权重值。

各神经元连接权重对应学习速率的计算公式为

$$\eta(k) = \eta(k-1) B_s^{sn(k)} \quad (16)$$

式中: B_s 为学习速率增减倍数; η 为学习速率; $sn(k) = \text{sign}[\Delta w(k-1) \Delta \hat{w}(k-2)]$

由上述推导可得 BP-MRAS 神经网络权重增量调整规则如下:

$$\Delta w_{hi}(k) = \eta(k-1) B_s^{snh(k)} [L_d i_d(k) + \psi_f] \times$$

$$\hat{\omega}_e(k) [1 - \hat{\omega}_e(k)] o_i(k) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Delta w_{ij}(k) &= \eta(k-1) B_s^{sni(k)} [L_d i_d(k) + \psi_f] \times \\ \hat{\omega}_e(k) [1 - \hat{\omega}_e(k)] w_{hi}(k) o_i(k) [1 - o_i(k)] x_j(k) \end{aligned} \quad (18)$$

式中:

$$snh(k) = \text{sign}[\Delta w_{hi}(k-1) \Delta \hat{w}_{hi}(k-2)],$$

$$sni(k) = \text{sign}[\Delta w_{ij}(k-1) \Delta \hat{w}_{ij}(k-2)].$$

至此, 可完成 BP-MRAS 在线辨识转子转速。

1.4 参数辨识需求

为了使 PMSM 的无位置传感器控制性能良好, 需要准确的电机参数, 基于 MRAS 的无位置传感器算法的计算需要定子电阻、交直流电感、转子磁链值。图 3(a) 和图 3(b) 为在同一转速各电机参数变化时对 MRAS 算法辨识的转子位置的影响, 位置估计误差为实际位置减去辨识位置。

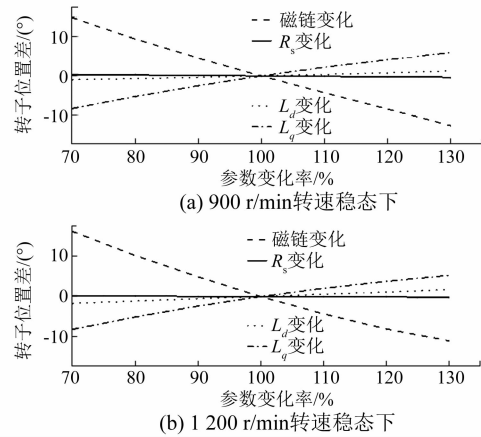


图3 参数变化对 MRAS 性能的影响

通过图 3 仿真结果可知, 给定转速下电机交轴电感和转子磁链的变化对 MRAS 算法转子位置估计的影响大于定子电阻和直轴电感对其的影响。为了减小转子位置辨识误差, 对电机参数进行在线辨识并实时将辨识结果用于无位置传感器算法。

2 基于 RLS 的 IPMSM 参数辨识

2.1 RLS

RLS 在误差估计、系统辨识及预测等诸多学科领域得到广泛应用, 通过使误差平方最小来估算数据^[15]。

RLS 输入输出关系为

$$z(k) = \mathbf{h}^T(k) \boldsymbol{\theta}(k) + \varepsilon(k) \quad (19)$$

式中: $\mathbf{z}(k)$ 为系统的输出矩阵; $\mathbf{h}^\top(k)$ 为可观测到的中间量矩阵; $\boldsymbol{\theta}(k)$ 为待辨识的参数矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}(k)$ 为值接近于零的随机变量矩阵。

取准则函数:

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{k=1}^{\infty} (\mathbf{z}(k) - \mathbf{h}^{\text{T}}(k)\boldsymbol{\theta})^2 \quad (20)$$

使 $J(\theta) = \min$, 得参数 θ 的最小二乘递推公式为

$$\boldsymbol{\theta}(k) = \boldsymbol{\theta}(k-1) + K(k) [\mathbf{z}(k) - \mathbf{h}^T(k)\boldsymbol{\theta}(k-1)] \quad (21)$$

$$P(k) = \frac{1}{\lambda} [I - K(k)\mathbf{h}^T(k)] P(k-1) \quad (22)$$

$$K(k) = \frac{\mathbf{h}(k)P(k-1)}{\lambda + \mathbf{h}^\top(k)P(k-1)\mathbf{h}(k)} \quad (23)$$

式中: $P(k)$ 、 $K(k)$ 为中间变量。

2.2 基于 RLS 的参数辨识算法

在 PMSM 调速运行过程中,电机温度的变化以及电流变化导致的磁路饱和使电机参数发生变化^[16],进而影响无位置传感器控制的性能,因此对 PMSM 参数进行在线辨识非常重要,本文使用递推的 RLS 对电机转子磁链和交轴电感进行辨识。

式(1)为 IPMSM 电压暂态方程,将式(1)进行离散化处理得^[17]:

$$U_d(k) = R_s i_d(k) - \omega_e L_q i_q(k) + L_d \frac{i_d(k+1) - i_d(k)}{T} \quad (24)$$

$$U_q(k) = R_s i_q(k) + \omega_e (L_d i_d(k) + \psi_f) + L_q \frac{i_q(k+1) - i_q(k)}{T} \quad (25)$$

将式(24)和式(25)进行转化得:

$$U_d(k) - R_s i_d(k) - L_d \frac{i_d(k+1) - i_d(k)}{T} = -\omega_e L_o i_o(k) \quad (26)$$

$$U_q(k) - R_s i_q(k) - \omega_e (L_d i_d(k) + \psi_f) = L_q \frac{i_q(k+1) - i_q(k)}{T} \quad (27)$$

其输出变量为

$$y_1(k) = U_d(k) - R_s i_d(k) - L_d \frac{i_d(k+1) - i_d(k)}{T} \quad (28)$$

$$y_2(k) = U_q(k) - R_s i_q(k) - \omega_e (L_d i_d(k) + \psi_f) \quad (29)$$

该系统的最小二乘表达式为

$$\begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega_e i_q(k) & 0 \\ \frac{i_q(k+1) - i_q(k)}{T} & \omega_e \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} L_q \\ \psi_f \end{bmatrix} \quad (30)$$

式中:

$$\mathbf{h}^T(k) = \begin{bmatrix} -\omega_e i_q(k) & 0 \\ \frac{i_q(k+1) - i_q(k)}{T} & \omega_e \end{bmatrix} \circ$$

对式(26)~(30)进行迭代,得到参数辨识算法为

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} L_q(k) \\ \psi_f(k) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_q(k-1) \\ \psi_f(k-1) \end{bmatrix} + \\
K(k) \left\{ \begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} - \varphi^T(k) \times \begin{bmatrix} L_q(k-1) \\ \psi_f(k-1) \end{bmatrix} \right\} P(k) &= \\
\frac{1}{\lambda} [I - K(k)h^T(k)] P(k-1) &\quad (31)
\end{aligned}$$

$$K(k) = \frac{h(k)P(k-1)}{\lambda + h^T(k)P(k-1)h(k)} \quad (32)$$

3 具有参数辨识的无位置传感器控制方案

在电机调速时,电流的超调会造成参数辨识结果的波动,所以将参数辨识结果反馈给控制系统时,通过低通滤波器对辨识结果进行滤波,减小调速瞬间的信号干扰,将滤波后的结果用于参数辨识闭环,参数辨识下 PMSM 无位置传感器控制方案结构框图如图 4 所示。

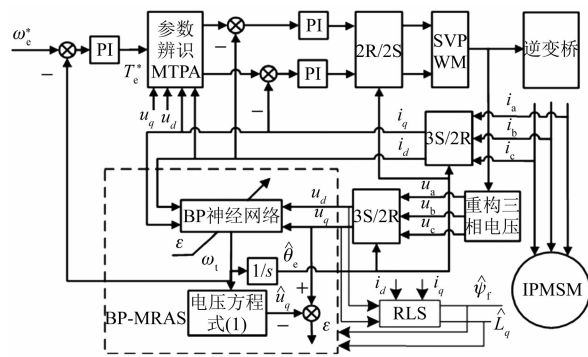


图4 具有参数辨识的无位置传感器控制框图

4 仿真与试验

4.1 试验平台

本文通过搭建 2.2 kW PMSM 矢量控制平台

对所提方案进行验证,该平台以半实物仿真系统 dSPACE 为控制器,采用如图 5 所示的系统进行试验。

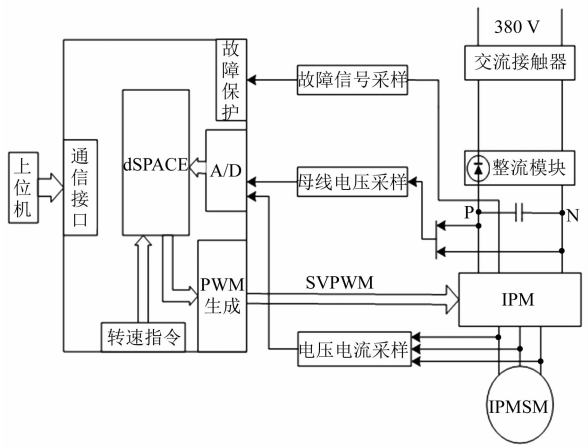


图 5 试验系统框图

仿真及试验采用的电机参数如表 1 所示,试验中通过将码盘转速信息 and 无位置算法估算结果进行对比来判定无位置传感器的控制性能,根据参数辨识结果,并将其滤波后反馈至无位置传感器算法后电机转子位置的误差来判定系统是否可行。

表 1 试验与仿真电机参数

参数名称	参数值
转子磁链 $\psi_f/(V \cdot s)$	0.93
定子电阻 R_s/Ω	2.483
交轴电感 L_q/mH	0.237
直轴电感 L_d/mH	0.108
额定转速 $n/(r \cdot \min^{-1})$	1 500
极对数 p	2

4.2 仿 真

对基于 MRAS 的无位置传感器算法和基于 RLS 的参数辨识方法进行仿真,BP-MRAS 算法比较复杂,所以模块程序使用 s-Function 编写,封装成模块使用。

图 6 为电机调速的无位置传感器控制和参数辨识仿真波形,转速给定为 $600 \rightarrow 1\,500 \rightarrow 1\,200\text{ r/min}$,通过参数辨识算法,其辨识值 ψ_f 和 L_q 可以快速稳定到其给定值 0.237 H 和 $0.93\text{ V} \cdot \text{s}$,且在加减负载时动态响应快速,稳定时间在 0.1 s 左右。

图 7 为在转速 $1\,200\text{ r/min}$ 下,负载突变时系统无位置传感器控制和参数辨识的仿真结果,由

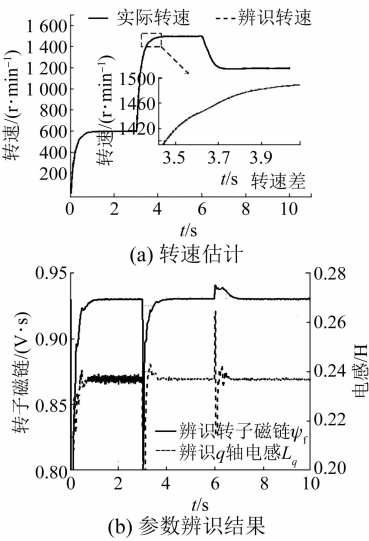


图 6 参数辨识闭环调速仿真

图 7 可知在负载转矩突变时,无位置传感器转速控制性能和参数辨识结果都具有良好的动态响应,根据以上仿真结果可知此方案初步可行。

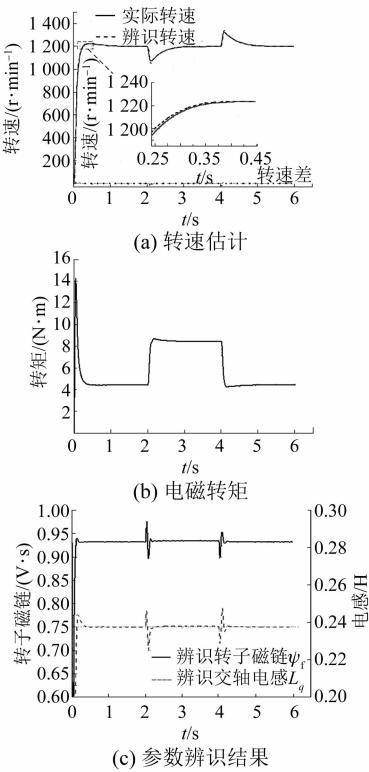


图 7 辨识结果闭环变载仿真

4.3 试 验

图 8 为空载状况下 PMSM 未将参数辨识结果用于无位置传感器控制算法的试验结果波

形。图 8(a)为电机转速辨识结果,图 8(b)为调速中电机转子位置误差的波形,图 8(c)为调速时的电机转子磁链值 ψ_f 和交轴电感值 L_q 的在线辨识结果。

由图 8 可知在试验调速过程中电机可以稳定运行,电机转速误差在 $\pm 15 \text{ r/min}$ 内,转子位置估计误差小于 $\pm 0.2 \text{ rad}$,由图 8(c)可知电机突加速过程中交轴电感 L_q 的辨识值会减小然后稳定,突减速时值会突然变大,根据电感特性分析,电机加速时定子电流会迅速变大以满足加速要求,而电流增大时会使电机磁路趋于饱和,会使电机的交轴电感值变小,电机突减速时特性正好相反。

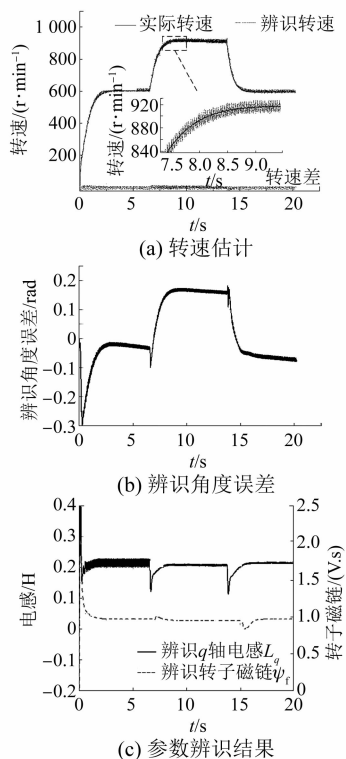


图 8 无参数辨识闭环调速试验

图 9 为空载情况下将参数辨识结果经滤波器滤波后用于无位置传感器控制的调速试验波形。图 9(a)为转速辨识图,图 9(b)为调速过程中的辨识角度误差,根据图 9(b)可知在整个调速过程中转子位置误差在 $\pm 0.15 \text{ rad}$ 之内,误差小于无参数辨识闭环时的转子误差,综上证明将参数辨识结果闭环可以减小电机无位置传感器转子位置辨识误差。

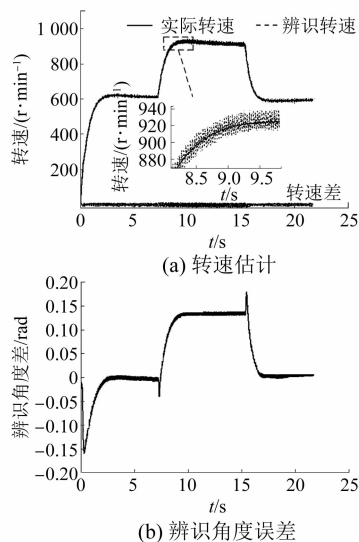


图 9 参数辨识闭环调速试验

5 结 语

本文通过 PMSM 数学模型对参数辨识下的无位置传感器控制算法进行了研究,引入 BP 神经网络设计自适应律,改进 MRAS 算法,并通过分析电机运行过程中参数的波动对无位置传感器算法位置检测误差的影响引入了电机的参数辨识需求,通过 RLS 对电机转子磁链值和交轴电感进行了在线辨识,通过仿真证明该算法可行,最后将参数辨识结果用于电机无位置传感器控制系统并进行了试验验证,参数辨识算法可以准确有效地辨识出电机交轴电感和转子磁链值,并且将参数辨识结果用于无位置传感器控制后,将码盘实测的转速与转子位置和通过无位置算法估算的值进行比较,试验表明可以有效减小转子位置的辨识误差,因此证明基于参数辨识的 PMSM 无位置传感器控制方案可行。

【参考文献】

- [1] 李辉,谢翔杰,刘行中. 风电变桨电机参数对控制系统影响分析及改进辨识方法[J]. 电机与控制学报,2019,23(7): 9.
- [2] 王莉娜,杨宗军. SIMULINK 中 PMSM 模型的改进及在参数辨识中的应用[J]. 电机与控制学报,2012,16(7): 77.
- [3] 陈再发,刘彦呈,卢亨宇. 具有参数辨识的船舶永磁同步推进电机无位置传感器控制[J]. 电机与控

- 制学报, 2020, 24(3): 53.
- [4] ICHIKAWA S, TOMITA M, DOKI S, et al. Sensorless control of permanent magnet synchronous motors using online parameter identification based on system identification theory[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(2): 363.
- [5] 李旭春, 张鹏, 严乐阳, 等. 具有参数辨识的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 139.
- [6] 史宇超, 孙凯, 马鸿雁, 等. 内埋式永磁同步电机永磁磁链的在线辨识[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 48.
- [7] 金宁治, 周凯, HERBERT H I. 带有自适应参数辨识的 IPMSM MTPA 控制[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(7): 90.
- [8] 黄守道, 高剑, 肖磊. 压缩机用内置式永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 182.
- [9] LIU Z, ZHANG J, ZHOU S, et al. Coevolutionary particle swarm optimization using AIS and its application in multi-parameter estimation of PMSM [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2013, 43(6): 1921.
- [10] ZHENG Y, LING H, GUAN Q. Adaptive parameters for a modified comprehensive learning particle swarm optimizer[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012: 207318.
- [11] INOUE Y, YAMADA K, MORIMOTO S, et al. Effectiveness of voltage error compensation and parameter identification for model-based sensorless control of IPMSM[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(1): 213.
- [12] KECHICHE O B H, ATTIA H S, SAMMOUD H, et al. Continuous HFSI techniques applied to rotor position estimation of IPMSM at standstill and low speed—a survey[C]//8th IEEE International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, 2011.
- [13] 谢文超, 赵延明, 方紫微, 等. 带可变遗忘因子递推最小二乘法的超级电容模组等效模型参数辨识方法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(5): 996.
- [14] 李涛, 邵光保, 孙楚杰, 等. 改进型 BP 神经网络无刷直流电机速度控制方法[J]. 湖北工业大学学报, 2019, 34(5): 1.
- [15] 石建飞, 戈宝军, 吕艳玲, 等. 永磁同步电机在线参数辨识方法研究[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(3): 17.
- [16] 肖曦, 许青松, 王雅婷, 等. 基于遗传算法的内埋式永磁同步电机参数辨识方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 21.
- [17] 荀倩, 王培良, 李祖欣. 基于递推最小二乘法的永磁伺服系统参数辨识[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 161.

(上接第 7 页)

- [8] TSUJI M, KOJIMA K, MANGINDAAN G M C, et al. Stability study of a permanent magnet synchronous motor sensorless vector control system based on extended EMF model[J]. IEEJ Journal of Industry Applications, 2012, 1(3): 148.
- [9] 杨宗军, 王莉娜. 表贴式永磁同步电机的多参数在线辨识[J]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 111.
- [10] 陈未敏. 永磁同步电机在线参数辨识研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.

扫码关注
《电机与控制应用》
微信公众号

