

基于 FFRLS 与转速扰动注入法的 永磁同步电机在线参数辨识

吴敏, 俞烨隆

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 针对永磁同步电机(PMSM)在恒定转速下的参数在线辨识问题,使用了一种基于含遗忘因子的递推最小二乘法(FFRLS)的小转速扰动注入法来同时在线辨识 PMSM 电气参数和机械参数。整个辨识过程分为两步,首先采用 FFRLS 方法,对电机的定子电阻、电感和磁链等参数实时辨识;其次,对于电机转速恒定的应用场景,电机角速度的微分量几乎等于零,很难对电机的转动惯量进行在线辨识,采用在恒定转速中注入扰动的方法进行机械参数实时辨识。仿真结果表明,所提的方法可以在电机转速恒定的条件下较快速准确地辨识电机的电气和机械参数。

关键词: 永磁同步电机; 在线参数辨识; 遗忘因子递推最小二乘法; 转速扰动注入; 恒转速运行

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)04-0044-05

doi: 10.12177/emca.2019.167

Online Parameters Identification for PMSM Based on FFRLS and Speed Disturbance Injection

WU Min, YU Yelong

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at online identification of permanent magnet synchronous motor (PMSM) parameters, a small speed disturbance injection method based on forgetting factor recursive least square (FFRLS) is proposed for online identifying both electrical and mechanical parameters of PMSM. The estimation can be separated into two parts. Electrical parameters such as stator resistance, inductance and flux linkage can be identified in real time by using FFRLS. Considering the operation condition of a constant speed, it is hard to identify the rotational inertia online because the derivative of angular velocity is nearly zero. To solve the problem, the small speed disturbance injection method is used to identify the mechanical parameters. Simulation results show that the proposed method can identify the electrical and mechanical parameters of PMSM accurately and rapidly.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); online parameters identification; forgetting factor recursive least square (FFRLS); speed disturbance injection; constant speed operation

0 引言

永磁同步电机(PMSM)具有功率密度与转矩密度大、效率高等优势,在工业自动领域应用广泛^[1]。为了实现电机的高性能控制,越来越多的

高级控制算法已得到研究。但是这些控制算法均对电机的电气参数和机械参数的准确性和稳定性要求较高。伺服系统在运动过程中电机的状态和参数会发生变化,影响系统控制的精度和稳定性^[2-3]。

收稿日期: 2019-12-02; 收到修改稿日期: 2020-01-02

作者简介: 吴敏(1990—),男,硕士,助理工程师,研究方向为电机及其控制相关研究与实验教学。

俞烨隆(1995—),男,博士研究生,研究方向为电机控制。

为此,研究者们对电机参数的在线辨识进行了研究。文献[4-5]采用最小阶状态观测器和递推最小二乘法(RLS)进行参数在线辨识;文献[6]基于自适应解耦PI控制器来进行在线参数辨识;文献[7-8]利用遗传算法、神经网络和粒子群优化算法等控制技术进行参数辨识和故障运行,对控制芯片的运算能力要求非常高;文献[9]提出了一种基于自适应RLS的在线惯量辨识方法,但是电机转速波动高达300 rad/s;文献[10]在考虑测量噪声的前提下使用自适应算法辨识电机的惯量;文献[11]采用了复杂的频域算法对转动惯量进行辨识,文献[12-13]采用卡尔曼滤波器辨识转动惯量,这类辨识方法对于控制器的运算能力要求较高,因此应用场合比较受限。

本文基于遗忘因子递推最小二乘法(FFRLS),首先设计了电气参数的RLS模型,然后针对电机恒转速运行的场景下电机的机械参数诸如转动惯量等很难辨识的问题,提出一种在电机运行过程中注入微小转速扰动的方法,可以在对电机的电气参数和机械参数进行实时在线辨识的同时不影响电机的整体运行状态。仿真结果表明,该方法可以较快速准确地对电机的电气和机械参数进行在线辨识。

1 最小二乘法

RLS在参数辨识中使用广泛,但是RLS随着数据量增多会出现数据饱和现象,导致准确性下降且计算量增大的问题。为了避免这些问题,在递推过程中加入了遗忘因子。

1.1 RLS

对于一个有 N 个输入量且输出量为输入量的线性组合的时变系统,有:

$$y(k) = w_1(k)x_1(k) + w_2(k)x_2(k) + \dots + w_N(k)x_N(k) = \mathbf{W}(k)^T \mathbf{X}(k) \quad (1)$$

式中: y 为系统的输出量; k 为迭代次数; \mathbf{W} 为系统的参数向量,即需要辨识的量; \mathbf{X} 为系统的输入量。

设 $\hat{\mathbf{W}}(k)$ 为辨识出的参数向量,有:

$$h(k) = \hat{w}_1(k)x_1(k) + \hat{w}_2(k)x_2(k) + \dots + \hat{w}_N(k)x_N(k) = \hat{\mathbf{W}}(k)^T \mathbf{X}(k) \quad (2)$$

式中: $h(k)$ 为估算的输出量。

RLS的目标在于使真实输出量 $y(k)$ 和估算输出量 $h(k)$ 之间的误差达到最小值,从而有成本函数:

$$C = \sum_{i=1}^k [y(i) - h(i)]^2 \quad (3)$$

运用偏微分计算 C 的最小值,同时将其转换为递推模式,可得RLS算法式^[14]:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{W}}(k) = \hat{\mathbf{W}}(k-1) + \\ \quad \mathbf{K}(k)[y(k) - \hat{\mathbf{W}}(k-1)^T \mathbf{X}(k)] \\ \mathbf{K}(k) = \frac{\mathbf{P}(k-1)\mathbf{X}(k)}{1 + \mathbf{X}(k)^T \mathbf{P}(k-1)\mathbf{X}(k)} \\ \mathbf{P}(k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\mathbf{X}(k)^T] \mathbf{P}(k-1) \end{cases} \quad (4)$$

设置RLS中的 \mathbf{P} 和 $\hat{\mathbf{W}}(k)$ 的初始值为

$$\begin{cases} \mathbf{P}(0) = \alpha \mathbf{I} \\ \hat{\mathbf{W}}(0) = \boldsymbol{\varepsilon} \end{cases} \quad (5)$$

式中: α 为一个较大的正数 $10^4 \sim 10^{10}$; \mathbf{I} 为单位矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为零矩阵或一个小数值的矩阵。

1.2 FFRLS

RLS的一个显著缺点在于随着数据量的增加,新加入的数据对于辨识参数的影响越来越小,即“数据饱和现象”。解决这个问题一个有效方法是给旧数据加入一个“遗忘因子”,即逐渐减小旧数据对辨识结果的影响,则式(3)可改写为

$$C = \sum_{i=1}^k \lambda^{k-i} [y(i) - h(i)]^2 \quad (6)$$

式中: λ 为遗忘因子,数值在0~1之间。

从而,FFRLS算法如下:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{W}}(k) = \hat{\mathbf{W}}(k-1) + \\ \quad \mathbf{K}(k)[y(k) - \hat{\mathbf{W}}(k-1)^T \mathbf{X}(k)] \\ \mathbf{K}(k) = \frac{\mathbf{P}(k-1)\mathbf{X}(k)}{1 + \mathbf{X}(k)^T \mathbf{P}(k-1)\mathbf{X}(k)} \\ \mathbf{P}(k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\mathbf{X}(k)^T] \mathbf{P}(k-1) / \lambda \end{cases} \quad (7)$$

值得注意的是,当 $\lambda = 1$ 时,FFRLS就变成了一般的RLS算法,即FFRLS是RLS的一种特殊情况。

2 参数在线辨识方法

对于PMSM来说,参数辨识分为2个部分:电气参数辨识和机械参数辨识。电气参数包括电机

的定子电阻、定子电感和磁链等；机械参数包括电机的负载转矩与转动惯量。

2.1 运用 FFRLS 辨识电机的电气参数

在 d - q 坐标系中, PMSM 的电气模型为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d p i_d - \omega_e L_q i_q \\ u_q = R i_q + L_q p i_q + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (8)$$

式中: u_d 、 u_q 为 d - q 轴坐标系下的电压; R 、 L_d 、 L_q 分别为电机的定子电感、 d 、 q 轴电感; i_d 、 i_q 为 d - q 轴坐标系下的电流; p 为微分算子; ω_e 、 ψ_f 为电机的电角速度和转子永磁体的磁链。

通常在电机稳定运行时, i_d 、 i_q 为常量, 因此式(8)中的 $p i_d$ 和 $p i_q$ 可以认为接近零, 可以忽略, 则式(8)可以简化为

$$u_d = R i_d - \omega_e L_q i_q = \quad (9)$$

$$[R \quad L_q] [i_d \quad -\omega_e i_q]^T$$

$$u_q - R i_q = \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f = \quad (10)$$

$$[L_d \quad \psi_f] [\omega_e i_d \quad \omega_e]^T$$

基于 FFRLS 算法, 式(9)可用于估算 R 和 L_q , 式(10)可用于估算 L_d 和 ψ_f 。结合式(1)、式(2)、式(7)、式(9)、式(10), 系统中的输入、输出和参数向量分别如下。

估算 R 和 L_q :

$$\begin{cases} X_I = \begin{bmatrix} i_d \\ -\omega_e i_q \end{bmatrix} \\ y_I = u_d \\ \hat{W}_I = \begin{bmatrix} \hat{R} \\ \hat{L}_q \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

估算 L_d 和 ψ_f :

$$\begin{cases} X_{II} = \begin{bmatrix} \omega_e i_d \\ \omega_e \end{bmatrix} \\ y_{II} = u_q - \hat{R} i_q \\ \hat{W}_{II} = \begin{bmatrix} \hat{L}_d \\ \hat{\psi}_f \end{bmatrix} \end{cases} \quad (12)$$

输出量 y_{II} 中 \hat{R} 的值通过式(11)估算可得。此外, P_I 、 P_{II} 、 \hat{W}_I 、 \hat{W}_{II} 的初始值根据式(5)设置。

电气参数的辨识过程如图 1 所示。

2.2 电机机械参数辨识

电机机械方程为

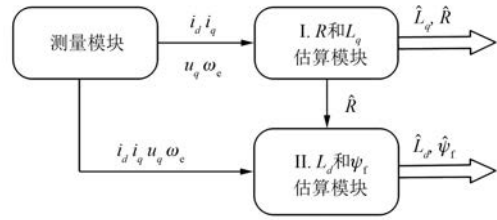


图 1 电气参数辨识过程

$$T_e = T_L + B\omega_m + Jp\omega_m \quad (13)$$

式中: T_e 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; B 为阻尼系数; ω_m 为机械角速度; J 为转动惯量。

当 B 较小时通常可以忽略转动摩擦。与电参数辨识过程类似, 可以运用 FFRLS 估机械参数 J 和 T_L 。

当电机在恒转速状态下运行时, 式(13)中的 $p\omega_m$ 几乎等于零, 因此电机的转动惯量难以辨识。为此, 在电机运行中注入一个极小的扰动量 ω_d , 该扰动量可以根据需要设置为三角波或者正弦波, 从而有:

$$\omega^* = \omega_m + \omega_d \quad (14)$$

在忽略摩擦因数和阻尼系数后, 电机的机械方程可以写为

$$T_e = T_L + Jp\omega^* = [T_L \quad J] [1 \quad p\omega^*]^T \quad (15)$$

基于 FFRLS, 系统输入量、输出量和参数向量可以写为

$$\begin{cases} X_M = \begin{bmatrix} 1 \\ p\omega^* \end{bmatrix} \\ y_M = T_e \\ \hat{W}_M = \begin{bmatrix} \hat{T}_L \\ \hat{J} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (16)$$

迭代过程中 P_M 和 \hat{W}_M 的初始量按照式(5)进行设定。为了减小对电气参数辨识结果的依赖性, 电机的电磁转矩估算式为

$$T_e = \frac{3}{2\omega_m} [(u_d - R i_d) i_d + (u_q - R i_q) i_q] \quad (17)$$

3 仿真分析

基于 MATLAB/Simulink 对上述算法进行仿真分析, 以验证辨识算法的有效性。仿真系统整体结构如图 2 所示。

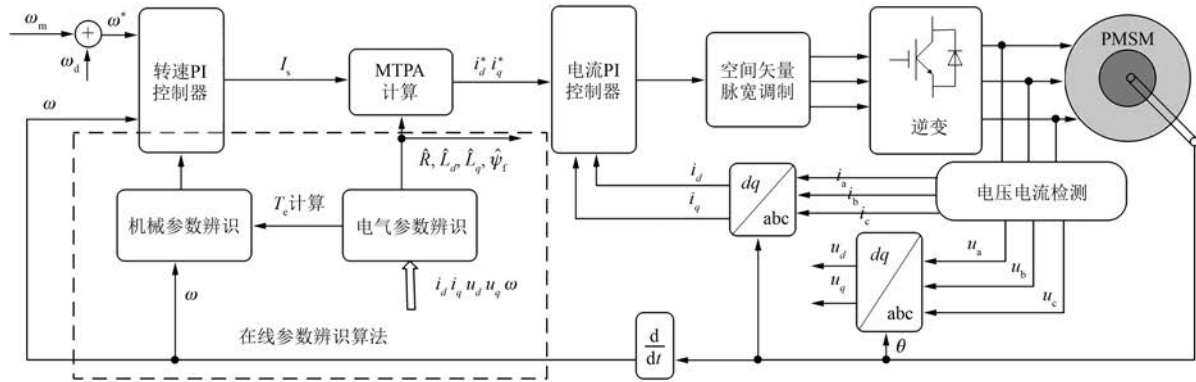


图2 控制系统仿真整体结构示意图

仿真用PMSM的电参数如表1所示。

表1 仿真用PMSM的电参数

参数名称	参数值
定子电阻 R/Ω	4.3
d 轴电感 L_d/mH	33.6
q 轴电感 L_q/mH	73.6
磁链 $\psi_f/(V \cdot s)$	0.8

在仿真过程中,电机以 1 000 r/min (104.72 rad/s) 的恒转速运行,转速中注入幅值为 0.1 rad/s 的三角波小扰动。RLS 加入的遗忘因子为 0.9。负载转矩在 3 s 时从 2 N·m 突变为 3 N·m。图3所示为电机的电参数辨识结果。可以看出,估算值可以很快地收敛到实际值,当负载转矩发生突变时,辨识结果会发生波动,但是仍然

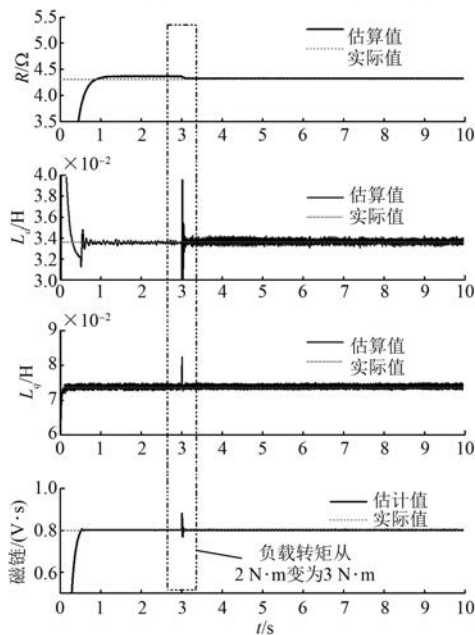


图3 电气参数辨识结果

可以很快收敛到正确值。

在转动惯量辨识过程中,在恒转速中注入幅值为 0.1 rad/s 的转速波动量,在线辨识时的转速波形如图4所示,在对转速准确性要求不严格的应用场合不会影响系统的性能。

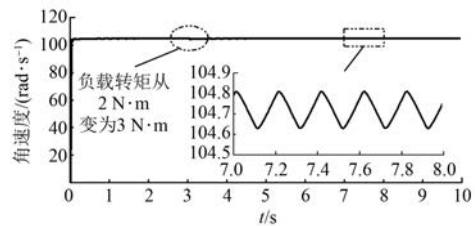


图4 扰动注入时转速波形

图5和图6对比了在不采用转速扰动注入和采用转速扰动注入时的转动惯量辨识结果。辨识过程中,在6 s 时使电机的转动惯量从 0.015 kg·m²变为 0.030 kg·m²。

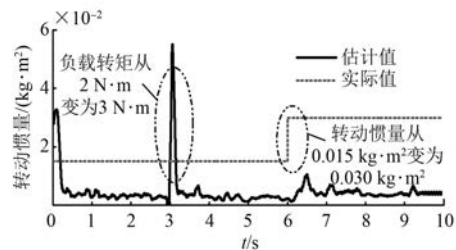


图5 不采用扰动注入时的转动惯量辨识结果

对比图5和图6可以看出,在转速恒定时,不采用转速扰动条件下FFRLS辨识出的转动惯量不能收敛到准确值,而采用转速扰动注入法的FFRLS在0.3 s内即可收敛到实际转动惯量,大幅提高了转动惯量的辨识精确度和收敛速度。在负

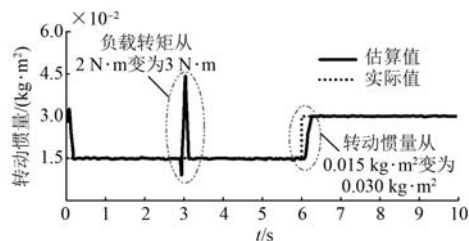


图6 采用扰动注入时的转动惯量辨识结果

载转矩发生突变时,辨识量有一个峰值,但是也能在短时间内收敛到正确值。

4 结 语

本文基于 FFRLS 对 PMSM 的电气参数和机械参数进行在线实时辨识。首先根据 FFRLS 设计了辨识算法对电机的电气参数进行辨识;为了解决 PMSM 在恒转速运行状态下难以对转动惯量等机械参数进行准确辨识的问题,基于 FFRLS,提出了在转速中注入一个幅值为 0.1 rad/s 的扰动进行机械参数估算的方法。通过仿真分析可知,该辨识算法可以在电机以恒定转速运行状态下较快速准确地对电机的电气参数和机械参数进行在线辨识,且具有一定的抗扰动性。

【参 考 文 献】

- [1] 张韬,鲍海静,张静.基于重构系统的永磁交流伺服系统在线转动惯量辨识[J].电机与控制应用,2018,45(6): 27.
- [2] KRISHNAN R, BHARADWAJ A S. A review of parameter sensitivity and adaptation in indirect vector controlled induction motor drive systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1991, 6(4): 695.
- [3] DIENY B, GOLDFARB R B, LEE K. Introduction to Magnetic Random-Access Memory [M]. Piscataway, NJ: IEEE, 2016.
- [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] 李耀宇,高强.考虑铁耗电阻的感应电机参数在线辨识技术[J].电机与控制应用,2019,46(9): 58.
- [6] DANG D Q, RAFAQ M S, CHOI H H, et al. Online parameter estimation technique for adaptive control applications of interior PM synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(3): 1438.
- [7] 黄玉水,丁雄勇.运用于交流电机矢量控制的遗传算法参数辨识[J].电测与仪表,2010,47(4): 17.
- [8] NYANTEH Y, EDRINGTON C, SRIVASTAVA S, et al. Application of artificial intelligence to real-time fault detection in permanent-magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(3): 1205.
- [9] LIU Z, YANG M, XU D. A novel algorithm for on-line inertia identification via adaptive recursive least squares [C] // IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017.
- [10] 李嘉诚,全力,左月飞,等.考虑测量噪声的朗道自适应惯量辨识方法[J].电机与控制应用,2019,46(2): 32.
- [11] NIU L, XU D, YANG M, et al. On-line inertia identification algorithm for PI parameters optimization in speed loop [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 849.
- [12] ALONGE F, CIRRINCIONE M, D'IPPOLITO F, et al. Descriptor-type Kalman filter and TLS EXIN speed estimate for sensorless control of a linear induction motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(6): 3754.
- [13] YIN Z, ZHAO C, ZHONG Y, et al. Research on robust performance of speed-sensorless vector control for the induction motor using an interfacing multiple-model extended Kalman filter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(6): 3011.
- [14] 荀倩,王培良,李祖欣,等.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.