

DOI: 10.7667/PSPC171007

基于正交投影与多新息 RLS 的 PMSM 参数辨识

张秀丽¹, 黄旭², 杨德亮², 吴定会²

(1. 无锡职业技术学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要: 针对永磁同步电机参数辨识过程中收敛速度慢的问题, 提出基于正交投影与多新息递推最小二乘相结合的算法来估计永磁同步电机参数。选择永磁同步电机四阶非线性状态空间模型的数学方程, 将此模型改写为线性回归模型的形式, 省略线性化过程。在仿真过程中加入噪声到电机的运行系统中, 来模拟真实的电机运行环境, 然后将正交投影与多新息递推最小二乘的结合算法分阶段配合应用于永磁同步电机的线性回归模型中进行参数辨识。辨识结果显示出了该结合算法的有效性。

关键词: 永磁同步电机; 参数辨识; 正交投影算法; 多新息理论; 递推最小二乘算法

Identification of PMSM based on orthogonal projection and multi-innovation RLS combined algorithm

ZHANG Xiuli¹, HUANG Xu², YANG Deliang², WU Dinghui²

(1. Wuxi Institute of Technology, Wuxi 214122, China; 2. Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Aiming at the problem of slow convergence during the parameters identification of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), a combined algorithm based on orthogonal projection algorithm and multi-innovation recursive least square algorithm is proposed to estimate the parameters of PMSM. The mathematical equation of the four-order nonlinear state space model of PMSM is selected, and the model is rewritten as a linear regression model. The noise of motor operating system is added into the simulation process to simulate a real motor operating environment, and then the combined algorithm is applied in the identification of PMSM in the form of linear regression. The results show that the combined algorithm is effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61572237).

Key words: PMSM; parameter identification; orthogonal projection algorithm (OPA); multi-innovation theory; recursive least squares (RLS) algorithm

0 引言

风力发电系统主要有恒速恒频风力发电系统和变速恒频风力发电系统两大类, 后者使用永磁同步发电机, 可以在很宽的风速变化范围内实现最大风能捕获, 具有高功率密度, 且无需齿轮箱和滑环及励磁装置, 结构简单, 可靠性高等特点, 是未来风力发电技术发展的主要趋势之一^[1-2]。发电机参数的实时准确辨识是电力系统分析的基础, 能够为系统安全运行提供保障, 因而, 发电机参数辨识一直是电力系统分析研究的热点^[3]。永磁同步电机是一个复杂的非线性系统, 机器的参数相互耦合在一起^[4],

并且会在多重因素的干扰下产生相应的变化, 如温度、机械振动、负载等^[5-6]。电机运行时间增加以及环境变化等因素会导致参数具有不确定性, 并有相当大可能会影响电机运行的性能。所以如果能够精确辨识出电机的参数, 同时能够随着电机参数的变化, 通过反馈来调节控制器的参数, 可大大提高电机的稳定性和动态性能^[7-8]。最小二乘类算法经过多年的发展与应用, 已经是非常成熟的算法, 并广泛应用在参数辨识领域^[9]。如文献[10]将双率残差增广最小二乘算法应用到永磁同步电机的参数辨识中, 并验证了算法的一致收敛。文献[11]提出了在最小二乘算法中引入开关控制器来构造最小二乘参数辨识器, 降低了转动惯量变化对参数辨识造成的误差。文献[12]基于遗忘因子 RLS 辨识算法辨识出系统转

动惯量、负载转矩和摩擦系数等参数,并对定参数与变参数分别进行了仿真,验证了该算法的准确性与实时性。

本文提出采用组合算法进行电机的参数辨识,将正交投影算法(Orthogonal Projection Algorithm, OPA)与多新息递推最小二乘(Multi-innovation Recursive Least Squares, MILS)结合,得到 OPA 与 MILS 结合算法(Orthogonal Projection Algorithm and Multi-innovation Recursive Least Squares, OPA&MILS)。OPA 对于没有噪声的系统进行参数辨识,算法具有收敛速度快特点,但是该算法对噪声较为敏感,噪声的存在会影响算法的收敛情况^[13];RLS 算法则具有非常好的鲁棒性,算法的收敛精度较高,而将单新息拓展为多新息,可加快收敛速度。如果将 OPA&MILS 用于辨识电机在噪声环境下运行时的参数,可以快速精确地辨识出电机在真实运行情况下的电机参数。

选取一个四阶非线性的永磁同步电机模型作为辨识模型,该模型在应用过程中可以避免线性化过程降低模型精确度。由该非线性模型推导得到永磁同步电机的线性回归模型^[14],并利用 OPA&MILS 算法对电机进行参数辨识。该算法需分两步进行,即这两种算法需要独立进行辨识,先利用 OPA 在辨识初期阶段收敛速度快特点进行辨识,在合适的条件下,再切换为 MILS 算法进一步辨识,以得到较高的收敛精度。

1 永磁同步电机数学模型

永磁同步电机相对于其他电机,由于内部转子嵌入的是永磁体,虽然转子内部永磁体的嵌入方式有不同的类型,但是相对于感应电机而言,转子结构不需要额外接入励磁电流就可以产生固定的磁场,所以电机的结构相对比较简单。永磁同步电机与所有电机一样,都是由定子和转子构成的,不同的是转子结构比较特殊,可以看作是由一块永磁材料做成,并产生一个固定磁场。定子侧是对称结构三相绕组,通过接入三相对称电流在空间共同作用形成旋转磁场,通过磁场间相互作用带动转子转动^[15]。

由于永磁同步电机是一个复杂非线性系统,并且定转子磁场以及其他参数之间耦合度相对复杂。为了简化研究过程,可以忽略一些影响不大的因素,比如定子铁心饱和、永磁体的阻尼作用等情况,以达到简化永磁同步电机数学模型的目的。

选取永磁同步电机系统的四阶状态空间方程作为研究的数学模型,这样可以更加贴近永磁同步电机的特性,并且经过 PARK 变换将三相 ABC 静止

坐标系下的电机模型转换到 dq 旋转坐标系下^[16],所以得到永磁同步电机的模型如式(1)所示。

$$\dot{x} = Ax + Bu + f(x) \quad (1)$$

式中

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4]^T = [\delta \quad \omega_e \quad i_q \quad i_d]^T,$$

$$u = [u_1 \quad u_2]^T = [v_d \quad v_q]^T,$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1.5p\lambda_f}{J} & 0 \\ 0 & -\frac{\lambda_f p}{L} & -\frac{R_s}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{R_s}{L} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$f = [0 \quad 0 \quad -p\omega_e i_d \quad p\omega_e i_q]^T.$$

其中: v_d 、 v_q 是系统的输入;系统的状态变量 i_d 、 i_q 、 ω_e 、 δ 分别代表 d 、 q 轴的电流、转子角速度和转子角度; R_s 与 L 分别代表电机的定子电阻与电感; λ_f 为磁链。

将非线性模型转换为线性模型,以避免线性化过程中需要简化模型导致降低模型精确度,根据公式 $\dot{x} = [x(k+T_s) - x(k)]/T_s$ 对模型进行离散化处理,如式(12)。

$$i_d = i_m \cos(\delta) = i_m \cos(x_1) \quad (2)$$

$$i_q = i_m \sin(\delta) = i_m \sin(x_1)$$

式中, δ 是 i_m 与 d 、 q 坐标系的夹角,将上式带入(1)中并展开,通过推导得到式(3)~式(6)。

$$x_1[k+T_s] = x_1[k] + T_s x_2[k] \quad (3)$$

$$x_2[k+T_s] = x_2[k] + T_s \left(\frac{1.5p\lambda_f}{J} \right) x_3[k] \quad (4)$$

$$x_3[k+T_s] = T_s \left(\frac{\lambda_f p}{J} \right) x_2[k] + T_s \left(\frac{-R}{L} \right) i_m \sin(x_1[k]) + \quad (5)$$

$$\frac{T_s}{L} u_1[k] + T_s (-P i_m \cos(x_1[k]) x_2[k])$$

$$x_4[k+T_s] = i_m \cos(x_1[k]) + T_s \left(\frac{-R}{L} \right) i_m \cos(x_1[k]) + \quad (6)$$

$$\frac{T_s}{L} u_2 + T_s (P i_m \sin(x_1[k]) x_2[k])$$

选取 $T_s=1$, 则式(4)可以表示为

$$x_2[k+2] = x_2[k+1] + \left(\frac{1.5P\lambda_r}{J} \right) x_3[k+1] \quad (7)$$

将式(5)代入式(7)中, 可以得到式(8)。

$$\begin{aligned} x_2[k+2] = & x_2[k+1] + \left(\frac{1.5P\lambda_r}{J} \right) \left(\frac{-\lambda_r P}{L} \right) x_2[k] + \\ & \left(\frac{1.5P\lambda_r}{J} \right) \left(\frac{-R}{L} \right) \sin(x_1[k]) + \\ & \left(\frac{1.5P\lambda_r}{LJ} \right) u_1[k] + \\ & \left(\frac{1.5P\lambda_r}{J} \right) (-P \cos(x_1[k]) x_2[k]) + \\ & \left(\frac{1.5P\lambda_r i_m}{J} \right) \sin(x_1[k]) \end{aligned} \quad (8)$$

根据状态变量之间的关系, 由式(8)可以推导得到式(9)。

$$\begin{aligned} x_1[k+3] - x_1[k+2] = & x_1[k+2] - x_1[k+1] + \\ & \left(\frac{1.5P\lambda_r}{J} \right) \left(\frac{-\lambda_r P}{L} \right) (x_1[k+1] - x_1[k]) + \\ & \left(\frac{1.5P\lambda_r}{J} \right) \left(\frac{-R}{L} \right) \sin(x_1[k]) + \\ & \left(\frac{1.5P\lambda_r}{LJ} \right) u_1[k] + \\ & \left(\frac{1.5P\lambda_r}{J} \right) (-P \cos(x_1[k]) (x_1[k+1] - x_1[k])) \end{aligned} \quad (9)$$

则式(9)可以表示为

$$y[k] = A_1 y_1 + A_2 y_2 + A_3 y_3 + A_4 y_4 + A_5 y_5 \quad (10)$$

所以永磁同步电机模型可以用自回归形式的模型进行转换, 如式(11)所示。

$$\begin{aligned} y[k] &= \boldsymbol{\varphi}^T[k] \boldsymbol{\theta} \\ \boldsymbol{\varphi} &= [y_1 \quad y_2 \quad y_3 \quad y_4]^T \\ \boldsymbol{\theta} &= [A_1 \quad A_2 \quad A_3 \quad A_4] \end{aligned} \quad (11)$$

式中:

$$\begin{aligned} y[k] &= x_1[k+3] - 2x_1[k+2] + x_1[k+1]; \\ y_1 &= (x_1[k+1] - x_1[k]); \\ y_2 &= \sin(x_1[k]); \\ y_3 &= u_1[k]; \\ y_4 &= \cos(x_1[k]) (x_1[k+1] - x_1[k]); \\ A_1 &= \left(\frac{1.5P\lambda_r}{J} \right) \left(\frac{-\lambda_r P}{L} \right); \\ A_2 &= \left(\frac{1.5P\lambda_r}{J} \right) \left(\frac{-R_s}{L} \right) + \left(\frac{1.5P\lambda_r i_m}{J} \right); \\ A_3 &= \left(\frac{1.5P\lambda_r}{LJ} \right); \\ A_4 &= \left(\frac{1.5P\lambda_r}{J} \right) (-P). \end{aligned}$$

该模型是永磁同步电机的四阶状态方程模型, 相对于其他模型, 该模型对电机的参数还原更准确, 通过线性化之后转换为自回归模型, 通过采集永磁同步电机的运行数据, 选取合适的算法进行参数辨识, 最后再通过辨识出来的 A1—A4 值进一步计算出电机的参数。

2 正交投影与多新息递推最小二乘算法结合算法

RLS 算法是参数识别的一个功能强大的工具, 并且对噪声具有鲁棒性, 具有较好的收敛精度, 但由于要计算协方差矩阵, 对收敛速度有一定影响, 将单新息拓展为多新息, 可改善收敛速度。而 OPA 具有较高的收敛速度, 但是在嘈杂的环境下, 鲁棒性差。如果将这两种方法的优点结合起来, 则结合算法同时具备两种算法的优点, 该算法既具备快速的收敛速度, 又具有良好的收敛精度。文献[17]针对该算法进行研究, 充分展示了该结合算法的辨识效果。

辨识过程前期阶段, 对算法收敛速度的需求大于收敛精度, 所以前期可以使用 OPA 辨识以得到良好的收敛速度, 在短时间内收敛到一定的精度, 达到切换要求后切换为 MILS 算法进行辨识, 目的是在辨识的后期阶段, 通过 MILS 算法在噪声环境中的强鲁棒性, 辨识得到精确的辨识值。

2.1 正交投影算法

对于自回归系统, 有

$$\mathbf{y}(t) = \boldsymbol{\varphi}^T(t) \boldsymbol{\theta} + \mathbf{v}(t)$$

其中: $\boldsymbol{\varphi}^T(t)$ 代表在 t 时刻时由系统的输入输出数据构造成的信息向量; $\boldsymbol{\theta}$ 为参数向量, 由所需要辨识的参数构成; $\mathbf{v}(t)$ 为系统的噪声向量。

则递推形式的 OPA 参数辨识过程的更新公式如下所示。

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\theta}}(t) &= \begin{cases} \frac{P(t-2) \boldsymbol{\varphi}^T(t-1)}{\boldsymbol{\varphi}^T(t-1) P(t-2) \boldsymbol{\varphi}(t-1)} (y(t) - \\ \boldsymbol{\varphi}^T(t-1) \hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1)) + \hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1) & \text{if } \boldsymbol{\varphi}^T(t-1) P(t-2) \boldsymbol{\varphi}(t-1) \neq 0 \\ \hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1) & \text{if } \boldsymbol{\varphi}^T(t-1) P(t-2) \boldsymbol{\varphi}(t-1) = 0 \end{cases} \quad (12) \\ P(t-1) &= \begin{cases} \frac{P(t-2) \boldsymbol{\varphi}(t-1) \boldsymbol{\varphi}^T(t-1) P(t-2)}{\boldsymbol{\varphi}^T(t-1) P(t-2) \boldsymbol{\varphi}(t-1)} (y(t) - \boldsymbol{\varphi}^T(t-1) \hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1)) + \\ P(t-2) & \text{if } \boldsymbol{\varphi}^T(t-1) P(t-2) \boldsymbol{\varphi}(t-1) \neq 0 \\ P(t-2) & \text{if } \boldsymbol{\varphi}^T(t-1) P(t-2) \boldsymbol{\varphi}(t-1) = 0 \end{cases} \quad (13) \end{aligned}$$

式(12)、式(13)表示 OPA 在辨识过程中每次进行迭

代时参数向量 θ 、协方差阵 P 的更新公式, 根据以上公式便可通过迭代得到辨识结果。

2.2 正交投影算法与多新息递推最小二乘算法结合算法

通过式(12)、式(13)表示 OPA 进行参数辨识可以得到相应的辨识结果, 但是该算法在噪声存在的情况下容易出现较大的误差。将 OPA&MILS 结合解决前者收敛效果不好的问题。

先通过 OPA 的快速性将参数估计的误差收敛在一定的范围内, 并提供一个相对较好的参数辨识结果作为 MILS 算法的初始值继续进行下一步辨识, 并利用 MILS 算法良好的收敛精度得到系统的精确参数。

递推形式的 RLS 算法如下所示^[18]。

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \frac{P(t-1)\varphi^T(t)}{1 + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)}(y(t) - \varphi^T(t)\hat{\theta}(t-1)) \quad (14)$$

$$P(t) = P(t-1) - \frac{P(t-1)\varphi(t)[P(t-1)\varphi(t)]^T}{1 + \varphi^T(t)P(t-1)\varphi(t)} \quad (15)$$

式中, $\hat{\theta}(0) = 1_n / p_0$; $p(0) = 10^6 I_n$; 1_n 是一个元均为 1 的 n 维列向量; I_n 为 n 阶单位矩阵。

为了进一步改善 RLS 算法的收敛速度, 引入多新息理论^[19-20], 扩展 $y(t)$ 、 $\varphi(t)$ 由单新息到多新息。

$$\Phi(p, t) = [\varphi(t) \quad \varphi(t-1) \quad \cdots \quad \varphi(t-p+1)] \in \mathbb{R}^{lp} \quad (16)$$

$$Y(p, t) = [y(t) \quad y(t-1) \quad \cdots \quad y(t-p+1)] \in \mathbb{R}^{lp} \quad (17)$$

则由式(14)、式(15)推导得到带有多新息的递推最小二乘算法(MILS):

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \frac{P(t-1)\Phi(p, t)}{I_p + \Phi^T(p, t)P(t-1)\Phi(p, t)}(Y(p, t) - \Phi^T(p, t)\hat{\theta}(t-1)) \quad (18)$$

$$P(t) = P(t-1) - \frac{P(t-1)\Phi(p, t)\Phi^T(p, t)P(t-1)}{I_p + \Phi^T(p, t)P(t-1)\Phi(p, t)} \quad (19)$$

通过将式(12)、式(13)与式(18)、式(19)结合在一起进行运算便得到 OPA&MILS 结合算法, 该算法的具体辨识步骤如下。

1) 算法初始化过程: 令时间 $t=1$, 迭代向量 $L=0$, 初始化各参数的初始值, 令 $\hat{\theta}(0) = 1_n / p_0$, $p(0) = 10^6 I_n$, 其中 1_n 是一个元均为 1 的 n 维列向量, I_n 为 n 阶单位矩阵;

2) 采集数据, 组成矩阵 $y(t)$ 、 $\varphi(t)$, 计算

$\varphi^T(t-1)P(t-2)\varphi(t-1)$ 的值;

3) 如果 $\varphi^T(t-1)P(t-2)\varphi(t-1) = 0$, $t = t+1$ 并返回第 2)步;

4) 如果 $\varphi^T(t-1)P(t-2)\varphi(t-1) \neq 0$, 根据式(12)更新 $\hat{\theta}(t)$, 式(13)更新 $P(t-1)$, $L = L+1$ 。

5) 如果 $L < n$, $t = t+1$ 并返回第 2)步; 否则 OPA 结束, 开始 MILS 算法辨识。

6) 将第 5)步的结果 $\hat{\theta}(t)$ 作为 MILS 算法的初始值, $p(t) = 10^6 I_n$, 通过式(18)更新 $\hat{\theta}(t)$, 式(19)更新 $P(t-1)$ 。

按照该流程, 在算法开始阶段采集系统的数据, 采用 OPA 对系统进行辨识, 通过第 5)步进行判断, 当满足判断要求则在第 6)步中利用 MILS 算法进行进一步的辨识, 通过 MILS 算法的迭代最终得到系统的精确参数。

3 基于正交投影与多新息递推最小二乘的 PMSM 参数辨识

选取 2 200 W 凸装式永磁同步电机为实验对象, 该电机由于其转子结构的原因, 电机的模型略有不同, 主要表现在凸装式永磁同步电机在 dq 坐标系下的交直流电感基本相同, 即 $L_d = L_q$, 其具体参数值如表 1 所示。

表 1 永磁同步电机模型参数

Table 1 PMSM parameters

参数	值
定子电阻/ Ω	2.875
电感 L /H	0.008 5
转动惯量 J /($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	0.008
磁通/Wb	0.175
极对数 p	12

搭建电机的运行系统^[21-22], 并采集电机的运行过程中的电流电压等数据, 根据式(11)所示的电机自回归模型构造信息向量 $\varphi^T[k]$, 结合 OPA&MILS 算法的辨识, 得到以下辨识结果。

图 1 为基于 OPA&MILS 算法的永磁同步电机参数估计误差 δ 收敛曲线。从图中可以看出, 辨识开始阶段采用 OPA 进行辨识, 参数估计误差 δ 收敛曲线迅速收敛, 但是伴随着波动的存在。在算法收敛到一定的精度下, 切换为利用 MILS 算法进行辨识, 参数估计误差 δ 在该算法的辨识作用下, 在 OPA 的辨识结果的基础上, 迅速下降并收敛到较小的误差范围。

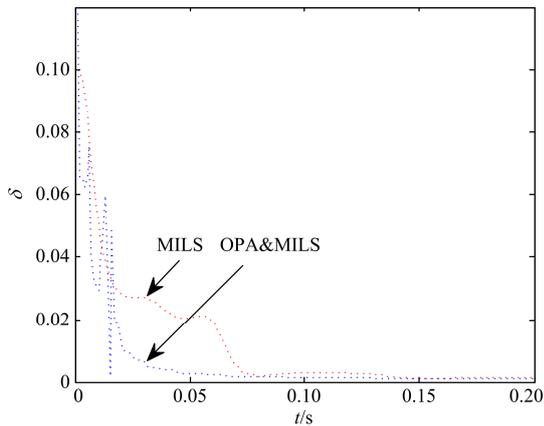


图 1 OPA&MILS 算法参数估计误差收敛曲线
Fig. 1 OPA&MILS algorithm parameter estimation error convergence curve

同完全是 MILS 算法的辨识过程相比较, 算法在辨识初期在快速性上有一定优势, 在辨识后期由于切换后 MILS 算法辨识具有较好的初始值, 所以能够在较短时间内收敛到精确值。

通过辨识出来的 A1—A4 值, 经过计算便可以得到电机定子电阻 R_s 与电感 L 的辨识值, 将它们分别反映在收敛曲线上, 如图 2 和图 3 所示; 为论证算法的优点, 采用遗忘因子随机梯度算法作对比对电机电阻和电感参数进行辨识, 辨识结果分别如图 4 和图 5 所示。

图 4 为使用遗忘梯度算法对电机定子电阻的辨识结果, 设置遗忘因子 FF 为 0.94, 该方法计算量小, 但收敛速度慢, 且抗干扰性较差, 从图中可以看出参数在 0.15 s 内算法缓慢收敛。

图 2 为使用 OPA&MILS 算法对永磁同步电机电阻的辨识结果, 从图中可以看出, 在辨识初期阶段, 通过 OPA 进行辨识, 算法在 0.05 s 内快速收敛,

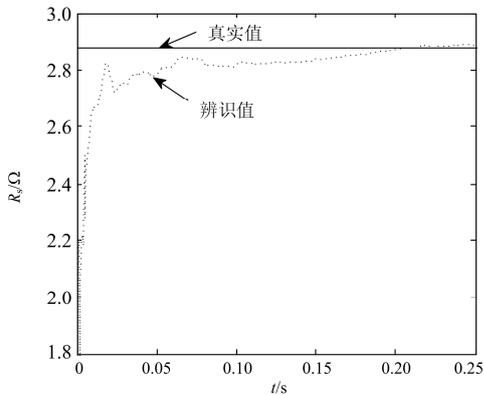


图 2 使用 OPA&MILS 算法定子电阻辨识结果
Fig. 2 Stator resistance identification results based on OPA&MILS algorithm

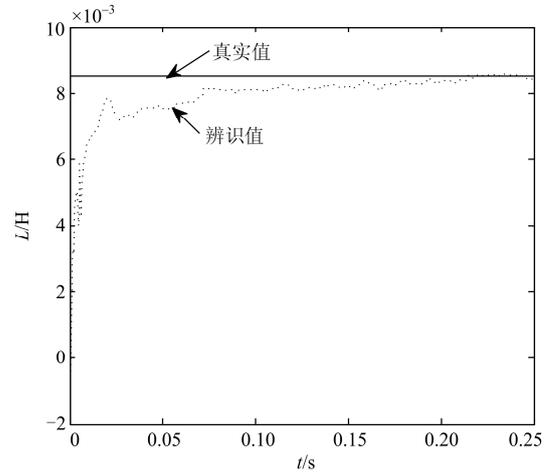


图 3 使用 OPA&MILS 算法电感辨识结果
Fig. 3 Inductance identification results based on OPA&MILS algorithm

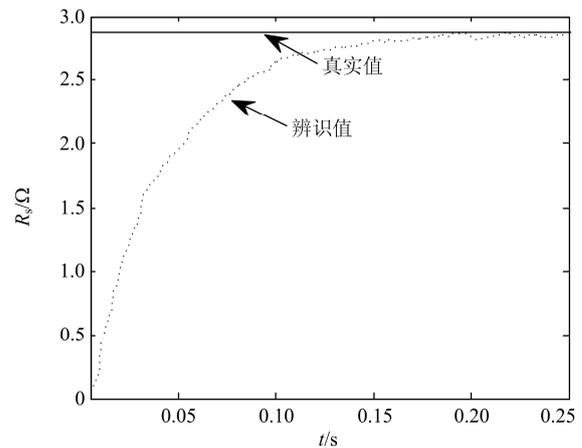


图 4 使用遗忘梯度算法定子电阻辨识结果
Fig. 4 Stator resistance identification results based on FF-SG algorithm

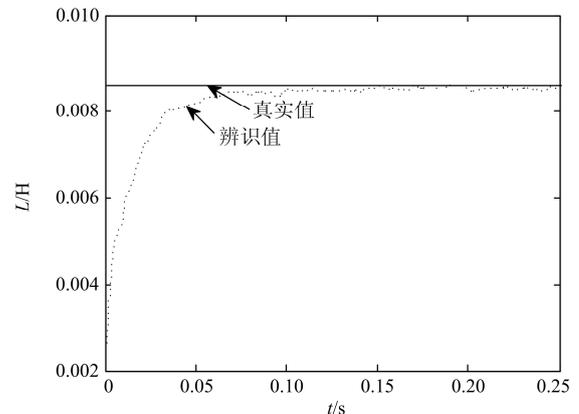


图 5 使用遗忘梯度算法电感辨识结果
Fig. 5 Inductance identification results based on FF-SG algorithm

相比遗忘梯度算法明显提高了收敛速度；在达到要求后改由 MILS 算法进行辨识，算法收敛精度较好，并且也验证了 MILS 算法对噪声的鲁棒性。

图 5 为使用遗忘梯度算法对电机电感的辨识结果，辨识参数在 0.1 s 左右达到收敛效果，稍有波动。

图 3 为使用 OPA&MILS 算法对电感的辨识结果，对比图 5 可以看出，算法收敛速度稍快，最终收敛精度也优于遗忘梯度算法。

4 结论

本文介绍了基于 OPA&MILS 算法的永磁同步电机参数辨识。将永磁同步电机数学模型转换为自回归模型，通过采集定子电流、电压和电机转速等数据，首先利用 OPA 的快速性进行辨识，辨识结果快速收敛，但存在一定的波动情况，在达到切换条件后，再用 MILS 算法精确地辨识出定子电阻和定子电感。并且当所采集的数据经过滤后仍然存在噪声的情况下，利用 MILS 算法在噪声环境中的鲁棒性，电阻电感辨识结果依然有较高的精度。同传统的遗忘因子随机梯度辨识算法相比，OPA&MILS 算法的参数辨识结果在收敛速度及辨识精度方面均有一定优势。

参考文献

- [1] 程辉, 杨克立, 王克军, 等. PMSG 风力发电系统转速估计算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 24-29.
CHENG Hui, YANG Keli, WANG Kejun, et al. Study on a rotor speed estimation algorithm of PMSG wind power system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 24-29.
- [2] 张彦兵, 谢文龙, 王伟, 等. 永磁直驱风机直流并网的启停控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 143-148.
ZHANG Yanbing, XIE Wenlong, WANG Wei, et al. Start/stop control of permanent magnet direct drive wind turbine on DC grid connection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 143-148.
- [3] 陈剑, 王茂海, 刘连光. 同步发电机辨识参数对数据误差的敏感性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 1-6.
CHEN Jian, WANG Maohai, LIU Lianguang. Sensitivity of identification parameters to PMU data error of synchronous generator[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 1-6.
- [4] 孔小兵, 刘向杰. 永磁同步电机高效非线性模型预测控制[J]. 自动化学报, 2014, 40(9): 1958-1966.
KONG Xiaobing, LIU Xiangjie. Efficient nonlinear model predictive control for permanent magnet synchronous motor[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(9): 1958-1966.
- [5] 王松. 永磁同步电机的参数辨识及控制策略研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
WANG Song. Parameter identification and control strategy of permanent magnet synchronous motor[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [6] 王东刚. 永磁同步电机高频振动与噪声研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
WANG Donggang. Study on high frequency vibration and noise of permanent magnet synchronous motor[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [7] TÜRKER T, BUYUKKELES U, BAKAN A F. A robust predictive current controller for PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3906-3914.
- [8] 王庆龙, 张兴, 张崇巍. 永磁同步电机矢量控制双滑模模型参考自适应系统转速辨识[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 897-902.
WANG Qinglong, ZHANG Xing, ZHANG Chongwei. Double sliding-mode model reference adaptive system speed identification for vector control of permanent magnet synchronous motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 897-902.
- [9] XU Y P, LEI Y, SHA D Z. Backstepping direct torque control of permanent magnet synchronous motor with RLS parameter identification[C] // Electrical Machines and Systems (ICEMS), 17th International Conference on, October 22-25, 2014, Hangzhou, China: 573-578.
- [10] 徐鹏, 肖建, 杨奕, 等. 永磁同步电机双率残差增广最小二乘参数辨识[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(4): 45-51.
XU Peng, XIAO Jian, YANG Yi, et al. Residual based extended least squares identification method of permanent magnet synchronous motor dual-rate sampling data system[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(4): 45-51.
- [11] 刘永钦, 沈艳霞, 纪志成. 基于改进型最小二乘法的感应电机转动惯量辨识[J]. 电机与控制应用, 2008, 35(12): 13-17.
LIU Yongqin, SHEN Yanxia, JI Zhicheng. Identification of induction motors based on improved least square algorithm[J]. Electric Machines & Control, 2008, 35(12): 13-17.
- [12] 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):

- 161-169.
XUN Qian, WANG Peliang, LI Zuxin, et al. Parameter identification of permanent magnet servo system based on recursive least squares method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 161-169.
- [13] GHANBARI M, YOUSEFI I, MOSSADEGH V. Online parameter estimation of permanent magnet synchronous motor using orthogonal projection algorithm[J]. Indian Journal Scientific Research, 2014, 2(1): 32-36.
- [14] 李程. 永磁同步电机参数辨识研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
LI Cheng. Research on parameter identification of permanent magnet synchronous motor[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
- [15] 唐朝晖, 丁强, 喻寿益, 等. 表面贴装式永磁同步电机弱磁控制策略的研究[J]. 控制工程, 2011, 18(3): 384-387.
TANG Chaohui, DING Qiang, YU Shouyi, et al. Research of flux weakening strategy of an surface mounted permanent magnet synchronous motor[J]. Control Engineering of China, 2011, 18(3): 384-387.
- [16] PARVATHY A K, DEVANATHAN R, KAMARAJ V. Application of quadratic linearization to control of permanent magnet synchronous motor[C] // International Conference on Electrical Energy Systems, January 3-5, 2011, Newport Beach, USA: 158-163.
- [17] ZHAO J, KANELLAKOPOULOS I. Active identification for discrete-time nonlinear control I: output-feedback systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(2): 210-224.
- [18] 赵海森, 杜中兰, 刘晓芳, 等. 基于递推最小二乘法与模型参考自适应法的鼠笼式异步电机转子电阻在线辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(30): 5386-5394.
ZHAO Haisen, DU Zhonglan, LIU Xiaofang, et al. An on-line identification method for rotor resistance of squirrel cage induction motors based on recursive least square method and model reference adaptive system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5386-5394.
- [19] 丁锋. 系统辨识(6): 多新息辨识理论与方法[J]. 南京信息工程大学学报, 2012, 4(1): 1-28.
DING Feng. System identification (6): multiple innovation theory and method[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology, 2012, 4(1): 1-28.
- [20] FENG Ding. Several multi-innovation identification methods[J]. Digital Signal Processing, 2010, 20(4): 1027-1039.
- [21] HEMALATHA G, CHINNAIYAN V K. Performance analysis of permanent magnet synchronous motor using SVPWM technique[C] // Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE), 2014 International Conference on, March 6-8, 2014, Coimbatore, India: 1-5.
- [22] 柏建勇, 滕青芳, 杜永栋, 等. 永磁同步电机控制策略比较研究[J]. 控制工程, 2015, 22(3): 490-494.
BAI Jianyong, TENG Qingfang, DU Yongdong, et al. Comparison of control strategies for permanent magnet synchronous motor[J]. Control Engineering of China, 2015, 22(3): 490-494.

收稿日期: 2017-07-07; 修回日期: 2017-10-07

作者简介:

张秀丽(1970—), 女, 高级工程师, 主要从事新能源控制等方面的教学与科研工作; E-mail: wh033098@163.com

黄旭(1994—), 男, 硕士, 研究方向为参数辨识; E-mail: hx122294@163.com

杨德亮(1993—), 男, 硕士, 研究方向为电机控制。 E-mail: yangdeliang159@163.com

(编辑 葛艳娜)