

基于最小二乘法的永磁同步电机电感辨识研究^{*}

刘旭¹, 王旭平¹, 王淑红¹, 梁力波², 黄济文¹

(1. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024;

2. 国网太原供电公司, 山西 太原 030024)

摘要: 内置式永磁同步电机(PMSM)的电感会随着磁路的饱和程度加深而减小,导致电机控制系统中,不同运行状态下,电感参数会发生变化,因此准确辨识电感参数对电机的控制性能影响很大。针对这一问题,提出了利用PMSM瞬态电压方程建立基于带遗忘因子的最小二乘法的电感辨识方法。搭建了仿真模型,分析了在转速、转矩发生变化时该辨识方法的辨识结果,并在基于dSPACE的试验平台上试验验证了该辨识方法。通过对比仿真和试验的结果,证明该方法在内置式PMSM控制中具有良好的实时性和有效性。

关键词: 永磁同步电机; 电感辨识; 瞬态电压方程; 遗忘因子; 最小二乘法

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)06-0001-05

doi: 10.12177/emca.2020.033

Inductance Identification of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Least Square Method^{*}

LIU Xu¹, WANG Xuping¹, WANG Shuhong¹, LIANG Libo², HUANG Jiwen¹

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

2. State Grid Taiyuan Power Supply Company, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The inductance of the internal permanent magnet synchronous motor (PMSM) will decrease as the saturation of the magnetic circuit deepens, which results in parameters variation with the running condition varying in the motor control system. Therefore, the accurate identification of inductance parameters has a great influence on the control performance of the motor. To solve this problem, a least squares inductance identification method based on forgetting factor is proposed using the transient voltage equation of PMSM. A simulation model is established, and the results of the identification method are obtained when the speed and torque change. Based on the dSPACE experiment platform, the identification method is verified by experiments. Comparison between simulation and experimental results proves that this method has good real-time performance and effectiveness in the control of internal PMSM.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); inductance identification; transient voltage equation; forgetting factor; least square method

0 引言

内置式永磁同步电机(IPMSM)以其功率密度高、调速范围广以及效率高等特点广泛应用于

航空航天、工业控制、电动汽车等领域^[1]。目前,IPMSM主流的控制策略是最大转矩电流比(MTPA)控制策略,这种方法充分利用了IPMSM独有的磁阻转矩。MTPA控制策略中最优工作点

收稿日期: 2020-02-22; 收到修改稿日期: 2020-04-13

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51477110)

作者简介: 刘旭(1994—),男,硕士研究生,研究方向为特种电机理论与控制技术。

王旭平(1976—),女,博士,副教授,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。

的推导非常依赖于电机电感参数的准确性,若电感参数不准确,将导致推导所得最优工作点与电机实际最优工作点产生偏移。因此,实时且准确的电感参数是该方法能精确控制电机的前提。

文献[2]提出了一种电感离线辨识方法,且在考虑磁路饱和效应的基础上能够获得不同 d 、 q 轴电流条件下对应的 d 、 q 轴电感。文献[3]采用恒电流辨识原理并检测电机相电流,并将此电流应用于参数辨识,但此方法仍为离线辨识方法。文献[4]采用忽略交叉饱和影响的有限元法以及冻结磁导率法计算了永磁同步电机(PMSM)样机电感参数,并用离线实验方法加以验证。文献[5]提出采用基于旋转高频电压注入的 d 、 q 轴电感辨识算法,由于其需要注入高频电压信号,因此硬件要求较高,在实际系统中不易实现。文献[6]提出了一种基于自适应同步的非线性结构 PMSM 参数辨识方法。文献[7]提出一种基于最小二乘法递推的电机温升检测方法,但收敛速度较慢。文献[8]提出了一种利用神经网络及脉冲注入法来化解状态方程的辨识方法,但该方法辨识结果稳定性有待进一步提高。文献[9]在电机数学模型的基础上提出了一种基于遗传算法的参数辨识方法,鲁棒性强但算法复杂。文献[10]提出利用带遗忘因子的最小二乘法来进行参数辨识,但其辨识模型基于稳态方程搭建。

针对 IPMSM 电感参数辨识的问题,本文提出一种带遗忘因子的最小二乘辨识方法,并在电压瞬态方程的基础上构建辨识模型,辨识得到电机的稳态和瞬态电感值。该方法辨识精度高且易于实现。试验验证该方法得到的电感参数与仿真结果相吻合。

1 IPMSM 数学模型

IPMSM 三相原始动态模型相对复杂。为了简化分析,通常利用坐标变化将其模型变换至两相旋转坐标系下。

IPMSM 在 dq 坐标系下的电压数学模型为

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \quad (1)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d \quad (2)$$

磁链方程为

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_f \quad (3)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (4)$$

式中: u_d 、 u_q 为电机 d 、 q 轴电压; R_s 为电机定子电阻; i_d 、 i_q 为电机 d 、 q 轴电流; ψ_d 、 ψ_q 为电机 d 、 q 轴磁链; ω_e 为电机转子电角速度; L_d 、 L_q 为电机 d 、 q 轴电感; ψ_f 为转子永磁体磁链。

为了使计算快速、简便,本文在计算时忽略电感随时间的变化。整理式(1)~式(4),可得:

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \quad (5)$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f \quad (6)$$

2 带遗忘因子的最小二乘参数辨识方法

IPMSM 控制中常用到的参数有定子电阻、永磁体磁链、 d 轴电感、 q 轴电感,且随着电机工况的不同,这些参数也会发生变化。当电流增大时,由于磁路的饱和,电机的电感值会随饱和程度的加深而减小。相对于电感来说,电阻和磁链对电流大小的变化不敏感,因此本文中将电阻和磁链作为常量,以此为依据,重点研究不同工况下电感的辨识。递推最小二乘法具有存储空间小、计算精度较高等优点,因此本文采用递推最小二乘法进行参数辨识。

2.1 最小二乘法

假设系统的输入量和输出量可以表达为

$$\mathbf{y}(k) = \boldsymbol{\varphi}^T(k) \boldsymbol{\theta}(k) + \boldsymbol{\varepsilon}(k) \quad (7)$$

式中: $\mathbf{y}(k)$ 为系统的输出矩阵; $\boldsymbol{\varphi}^T(k)$ 为可观测到的中间量矩阵; $\boldsymbol{\theta}(k)$ 为待辨识的参数矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}(k)$ 为平均值为零的随机变量矩阵。

构建其目标函数如下:

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) = [\mathbf{y}(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k) \boldsymbol{\theta}]^2 \quad (8)$$

令 $\frac{\partial \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}} = 0$, 则其递推最小二乘法的递推

式为

$$\boldsymbol{\theta}(k) = \boldsymbol{\theta}(k-1) + \mathbf{K}(k) [\mathbf{y}(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k) \boldsymbol{\theta}(k-1)] \quad (9)$$

$$\mathbf{P}(k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k) \boldsymbol{\varphi}^T(k)] \mathbf{P}(k-1) \quad (10)$$

$$\mathbf{K}(k) = \frac{\boldsymbol{\varphi}(k) \mathbf{P}(k-1)}{\boldsymbol{\varphi}^T(k) \mathbf{P}(k-1) \boldsymbol{\varphi}(k)} \quad (11)$$

式中： $\mathbf{P}(k)$ 、 $\mathbf{K}(k)$ 为递推公式中的中间变量。

传统最小二乘法的计算过程中,随着运算次数的增加, $\mathbf{P}(k)$ 逐渐趋向于零,进而失去其修正功能,因此本文中引入遗忘因子 λ 来解决这一问题。

2.2 带遗忘因子的最小二乘法

遗忘因子 λ 是大于 0 小于 1 的任何实数,其本质是在迭代中引入权值概念,在迭代过程中增加此时刻数据的权值,降低上一时刻数据的权值,以此方法来减缓 $\mathbf{P}(k)$ 、 $\mathbf{K}(k)$ 趋近零的速度,并加快迭代过程。引入遗忘因子后,其方程为

$$\mathbf{P}(k) = \frac{1}{\lambda} [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\boldsymbol{\varphi}^T(k)]\mathbf{P}(k-1) \quad (12)$$

$$\mathbf{K}(k) = \frac{\boldsymbol{\varphi}(k)\mathbf{P}(k-1)}{\lambda + \boldsymbol{\varphi}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k)} \quad (13)$$

2.3 基于带遗忘因子的最小二乘法的参数辨识

利用带遗忘因子的最小二乘法进行 IPMSM 的参数辨识可以加快收敛速度。目前很多文献中对 IPMSM 电感辨识时均采用稳态方程进行辨识,该类方法的计算量小,对电机稳态参数的辨识准确,但是由于忽略了在电机动态过程中电流的变化对电机电感参数带来的影响,因此当电机的运行状态发生变化时,利用稳态方程辨识的电感参数比真实值有很大的偏差。本文中利用 IPMSM 的瞬态方程来做最小二乘法辨识,当电机处于稳定状态时,电流对时间的导数几乎为零,此时辨识结果与利用稳态方程辨识的结果相差较小。当电机处于动态变化过程时,该方法辨识结果更加精确。

式(5)和式(6)作离散处理后,可得:

$$u_d(k) = R_s i_d(k) - L_q i_q(k)\omega_e + L_d \frac{i_d(k+1) - i_d(k)}{T} \quad (14)$$

$$u_q(k) = R_s i_q(k) + \omega_e [L_d i_d(k) + \psi_f] + L_q \frac{i_q(k+1) - i_q(k)}{T} \quad (15)$$

为了使方程更加直观地表现出辨识关系,将式(14)和式(15)修改为

$$u_d(k) - R_s i_d(k) = L_d \frac{i_d(k+1) - i_d(k)}{T} - L_q \omega_e i_q(k) \quad (16)$$

$$u_q(k) - R_s i_q(k) - \omega_e \psi_f =$$

$$L_q \omega_e i_d(k) + L_q \frac{i_q(k+1) - i_q(k)}{T} \quad (17)$$

取其输出量为

$$y_1(k) = u_d(k) - R_s i_d(k) \quad (18)$$

$$y_2(k) = u_q(k) - R_s i_q(k) - \omega_e \psi_f \quad (19)$$

则该系统的最小二乘表达式为

$$\begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{i_d(k+1) - i_d(k)}{T} & -i_q(k)\omega_e(k) \\ \omega_e(k)i_d(k) & \frac{i_q(k+1) - i_q(k)}{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_d(k) \\ L_q(k) \end{bmatrix} \quad (20)$$

取:

$$\boldsymbol{\varphi}^T(k) = \begin{bmatrix} \frac{i_d(k+1) - i_d(k)}{T} & -i_q(k)\omega_e(k) \\ \omega_e(k)i_d(k) & \frac{i_q(k+1) - i_q(k)}{T} \end{bmatrix} \quad (21)$$

则在式(9)的基础上引入遗忘因子 λ ,并代入式(9)后,其最小二乘法的递推公式可变为

$$\begin{bmatrix} L_d(k) \\ L_q(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d(k-1) \\ L_q(k-1) \end{bmatrix} + \mathbf{K}(k) \left\{ \begin{bmatrix} y_1(k) \\ y_2(k) \end{bmatrix} - \boldsymbol{\varphi}^T(k) \begin{bmatrix} L_d(k-1) \\ L_q(k-1) \end{bmatrix} \right\} \quad (22)$$

$$\mathbf{P}(k) = \frac{1}{\lambda} [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\boldsymbol{\varphi}^T(k)]\mathbf{P}(k-1) \quad (23)$$

$$\mathbf{K}(k) = \frac{\boldsymbol{\varphi}(k)\mathbf{P}(k-1)}{\lambda + \boldsymbol{\varphi}^T(k)\mathbf{P}(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k)} \quad (24)$$

3 仿真验证

为了验证本文提出的基于带遗忘因子最小二乘法的 IPMSM 电感参数辨识的有效性与实时性,首先在 Simulink 中搭建最小二乘辨识法及 IPMSM 仿真模型进行仿真验证。IPMSM 电感辨识仿真框图如图 1 所示。IPMSM 参数如表 1 所示。

IPMSM 0 s 时给定 d 、 q 轴电感参数分别为 0.05、0.25 H,1 s 后分别将电机 d 、 q 轴电感参数阶跃变为 0.069、0.350 H,2 s 后分别将电机 d 、 q 轴电感参数阶跃变为 0.08、0.29 H,其余参数保持不变,应用带遗忘因子的最小二乘法辨识仿真结

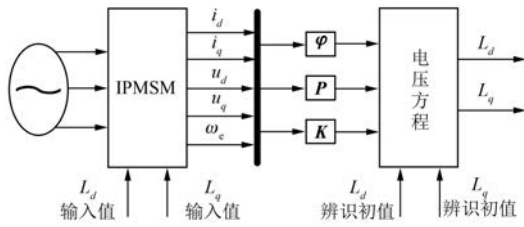


图1 IPMSM 电感辨识仿真框图

表1 IPMSM 参数

参数名称	参数值
额定电压 U_N/V	380
额定电流 I_N/A	3.7
额定功率 P_N/kW	2.2
额定转速 $n_N/(r \cdot \min^{-1})$	1 500
额定转矩 $T_N/(N \cdot m)$	14
定子电阻 R_s/Ω	2.483
转动惯量 $J/(kg \cdot m^2)$	0.007 1
极对数 p	2

果如图 2 和图 3 所示。

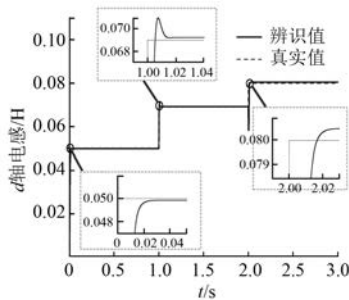


图2 IPMSM d 轴电感仿真波形

图 2 给出的是基于最小二乘法的 IPMSM d 轴电感辨识波形,虚线为电机电感实际值,实线为本文提出算法的辨识值。0~1 s 内, d 轴电感参数实际值为 0.050 H,若以 1% 作为允许误差,则辨识值在 0.018 75 s 后已稳定在允许误差之内,且其最终误差为 0.3%;1~2 s 内, d 轴电感参数实际值为 0.069 H,若以 1% 作为允许误差,则辨识值在 0.011 07 s 后已稳定在允许误差之内,且其最终误差为 0.33%;2~3 s 内, d 轴电感参数实际值为 0.080 H,若以 1% 作为允许误差,则辨识值在 0.014 13 s 后已稳定在允许误差之内,且其最终误差为 0.62%。

图 3 所示为基于最小二乘法的 IPMSM q 轴电感辨识波形,虚线为电机电感实际值,实线为本文

所提算法的辨识值。0~1 s 内, q 轴电感参数实际值为 0.25 H,若以 1% 作为允许误差,则辨识值在 0.017 71 s 后已稳定在允许误差之内,且其最终误差为 0.03%;1~2 s 内, q 轴电感参数实际值为 0.35 H,若以 1% 作为允许误差,则辨识值在 0.009 15 s 后已稳定在允许误差之内,且其最终误差为 0.03%;2~3 s 内, q 轴电感参数实际值为 0.29 H,若以 1% 作为允许误差,则辨识值在 0.005 59 s 后已稳定在允许误差之内,且其最终误差为 0.02%。

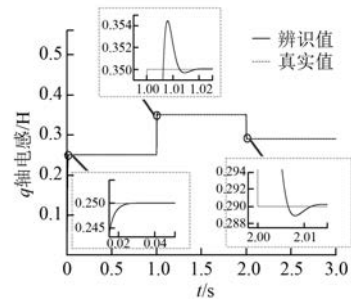


图3 IPMSM q 轴电感仿真波形

仿真表明,本文提出的基于电机瞬态方程的最小二乘辨识方法对 IPMSM 电感的辨识具有很高的精度和很快的收敛速度。

4 试验验证

搭建的 2.2 kW IPMSM 控制平台如图 4 所示。试验验证所提辨识方法辨识结果的准确性。采用变参数 MTPA 控制策略,控制器为半实物仿真系统 dSPACE,其所用的 64 位中央处理单元能快速处理采样所得信号的计算。



图4 IPMSM 试验平台

4.1 不同转速辨识结果

为了验证本文所提算法在不同转速下的辨识精度,分别在 IPMSM 控制平台下转速为 300、600、900、1 200、1 500 r/min 时,电机空载、半载、满载运

行情况下进行辨识试验,结果如表 2~表 4 所示。

表 2 空载时各转速下辨识结果

转速/($r \cdot \min^{-1}$)	d 轴电感/H	q 轴电感/H
300	0.102 0	0.251
600	0.103 2	0.249
900	0.102 2	0.252
1 200	0.102 5	0.251
1 500	0.101 3	0.247

表 3 半载时各转速下辨识结果

转速/($r \cdot \min^{-1}$)	d 轴电感/H	q 轴电感/H
300	0.095 0	0.210
600	0.096 5	0.208
900	0.095 0	0.212
1 200	0.098 0	0.203
1 500	0.094 2	0.199

表 4 满载时各转速下辨识结果

转速/($r \cdot \min^{-1}$)	d 轴电感/H	q 轴电感/H
300	0.084 00	0.178
600	0.083 50	0.181
900	0.085 00	0.182
1 200	0.086 84	0.176
1 500	0.084 00	0.175

表 5 所示为空载、半载、满载时电机电感参数的 ANSYS 仿真值。

表 5 ANSYS 空载、半载、满载电感仿真结果

负载状况	d 轴电感/H	q 轴电感/H
空载	0.100 43	0.248 93
半载	0.096 64	0.203 85
满载	0.085 36	0.179 63

从试验结果可以看出,当电机负载(即电机电流)一定时,电机转速对电机电感的影响很小,从以上各表数据分析可得,当电机负载情况相同时,电机转速的变化会使电机电感有小于 5% 的波动,几乎可以忽略。当电机的负载情况发生变化时,电感值会有所变化,且随着负载加大,电流增加,电感饱和程度加深,电感值随之下降,其电感变化情况与表 5 中相差不大,误差始终小于 5%。

4.2 相同转速不同电流辨识结果

在基于 dSPACE 的 2.2 kW IPMSM 控制平台中,给同步电机施加频率为 20 Hz 的电压,控制电机转速为 600 r/min,改变电机负载,使 d 轴电流从

0 至 -3 A 变化, q 轴电流从 0 至 5 A 变化,试验得出 d 、 q 轴电感随 d 、 q 轴电流变化,在 Origin 软件中处理后得到 d 、 q 轴电感波形,分别如图 5、图 6 所示。

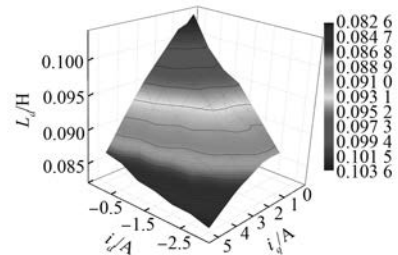


图 5 IPMSM d 轴电感波形

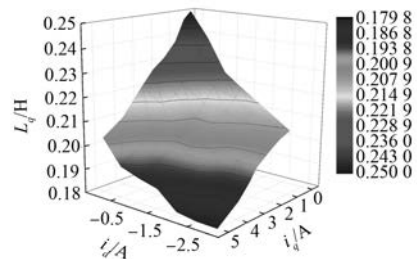


图 6 IPMSM q 轴电感波形

从图 5、图 6 可见,随着电流的增加,电感饱和程度加深,电感随之下降。

5 结 语

本文提出基于最小二乘法的 IPMSM 电感辨识方法,仿真分析了动态模型下的电感辨识,搭建了 IPMSM 的 dSPACE 试验台,并采用 dSPACE 半实物仿真模型,试验得出了考虑交叉饱和的电感参数,给出了 d 、 q 轴电感参数辨识三维曲线。试验结果与仿真结果相吻合,验证了所提方法的有效性。本文对于需要 IPMSM 电感参数的工业应用领域具有理论和实际参考价值。

【参考文献】

- [1] 符荣,窦满峰.电动汽车驱动用内置式永磁同步电机设计与实验研究[J].西北工业大学学报,2014,32(5): 737.
- [2] NAKATSUGAWA J, NOTOHARA Y, LI D, et al. Inductance measurement method for permanent magnet synchronous motors using AC with DC bias [C]//2008 18th International Conference on Electrical Machines, 2008. (下转第 32 页)