

doi: 10.7690/bgzdh.2014.02.021

一种离线辨识异步电动机励磁互感曲线方法

于燕秀¹, 李作庆²

(1. 大连理工大学城市学院, 辽宁 大连 116600; 2. 大连光洋科技工程有限公司研发中心, 辽宁 大连 116600)

摘要: 为实现异步电动机矢量控制中的转子磁链准确定向及提高弱磁控制的性能, 提出一种离线辨识异步电动机互感变化曲线的方法。通过对异步电动机等效模型的分析, 可知通过施加单轴测试信号可以测得互感变化曲线。以 TMS320F2812 为主控制器的驱动器及 1 台 5.5 kW 电机进行试验。实验结果表明: 该方法是有用的, 可较为准确地测出异步电动机的互感变化曲线。

关键词: 异步电动机; 励磁互感; 矢量控制; 离线辨识

中图分类号: TP273 **文献标志码:** B

An Offline Identification Method of Asynchronous Motor Excitation Mutual Inductance Curve

Yu Yanxiu¹, Li Zuoqing²

(1. City Institute, Dalian University of Technology, Dalian 116600, China; 2. Research & Development Center, Dalian Guangyang Science & Technology Engineering Co., Ltd., Dalian 116600, China)

Abstract: To achieve accurate directional of the rotor flux in the asynchronous motor vector control and improve the performance of weakening control, this paper presents a line identification asynchronous motor mutual inductance curve approach. Through the analysis of asynchronous motor equivalent model, we know that by applying a single axial test signal can be measured mutual inductance curve. TMS320F2812-based controller with a drive and a 5.5 kW motor tests. Experimental results show that the method is effective and can more accurately measure the mutual induction motor curve.

Keywords: asynchronous motor; mutual inductance; vector control; offline identification

0 引言

矢量控制的出现和发展, 使异步电动机有了能与直流电机相媲美的控制性能。其中基于转子磁链定向控制 (field oriented control, FOC) 方法使励磁控制与转矩控制实现解耦, 从而提高了异步电机的性能^[1-3]。间接矢量控制是工程实践中常用的矢量控制方案, 但该方法对电机参数有依赖, 尤其对转子电阻和互感的变化敏感。在非弱磁区域 (一般是基速以下区域) 运行, 电机磁场恒定, 互感也保持恒定。在弱磁区域, 电机磁场减弱, 同时互感也呈非线性变化。所以要实现准确弱磁控制和转子磁场定向, 必须进行电机的互感变化曲线的辨识。笔者提出了一种适于在变频器上进行测试的离线辨识互感曲线方法, 通过逆变器施加单轴激励信号辨识磁化曲线。

1 异步电机等效模型分析

1.1 基本分析模型与互感对弱磁控制的影响

分析异步电机常用等效模型为 T 型等效电路^[4], 如图 1 所示。该模型中有 5 个基本参数: 定子电阻 R_s 和转子电阻 R_r , 定子漏感 $L_{s\sigma}$ 和转子漏感 $L_{r\sigma}$, 以

及互感 L_m 。定子电感 L_s , 转子电感 L_r , 瞬态电感 L_σ (通常也称总漏感), 转子时间常数为 T_r , 它们之间的关系如下:

$$L_s = L_m + L_{s\sigma}, \quad L_r = L_m + L_{r\sigma}, \quad L_\sigma = L_s \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}\right), \quad T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

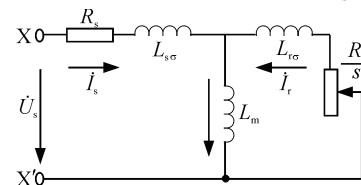


图 1 三相异步电动机的 T 等效电路

基于转子磁链定向的电压解耦模型由式 (1) ~ 式 (6) 组成。

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + L_\sigma \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s L_\sigma i_{sq} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_r}{dt} \quad (1)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + L_\sigma \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_s L_\sigma i_{sd} + \omega_e \frac{L_m}{L_r} \psi_r \quad (2)$$

$$i_{sd} = i_{mr} + T_r \frac{di_{mr}}{dt} \quad (3)$$

$$\omega_s = \omega_r + \frac{i_{sd}}{T_r i_{mr}} \quad (4)$$

收稿日期: 2013-08-14; 修回日期: 2013-09-26

作者简介: 于燕秀(1986—), 女, 山东人, 工学硕士, 工程师, 从事电力电子与电气传动方面的研究和教学工作。

$$\psi_r = L_m i_{mr} \tag{5}$$

$$T_e = \frac{L_m}{L_r} \psi_r i_{sq} \tag{6}$$

式中： u_{sd} 和 u_{sq} 分别为定子 D 轴和 Q 轴电压； i_{sd} 和 i_{sq} 分别为定子 D 轴和 Q 轴电流； ω_s 和 ω_r 分别为定子磁场转速和电机转子转速； ψ_r 为转子磁链； i_{mr} 为转子磁场励磁电流分量。

电机在弱磁转速以下运行时，一般控制转子磁链 ψ_r 恒定，即励磁电流 i_{mr} 与互感 L_m 都为定值。 ψ_r 值确定的依据是使主磁路达到适度程度的饱和，这样可以充分利用磁性材料，获得高的转矩/电流比。当电机在弱磁转速以上区域进行时，需要进行弱磁控制，此时电机主磁路退出饱和状态，互感 L_m 随励磁电流减小而变大^[5-6]。由于互感的变化将会引起瞬态电感和转子常数等控制参数的变化，同时也会影响励磁电流给定的计算，因此互感参数的准确性会影响电机在弱磁区域的动态性能。故需要根据励磁电流的变化对跟互感 L_m 相关的参数进行修正补偿。

励磁电流 i_{mr} 与互感 L_m 及磁链 ψ_r 的关系如图 2 和图 3 所示。当励磁电流增大后，电机的主磁路会逐渐进入饱和区，电感也会逐渐减小。在这一过程中励磁电感(即互感)随励磁电流变化而变化，通常用如式 (7) 的方程式表示互感 L_m 同转子磁场励磁电流 i_{mr} 的关系^[7]。

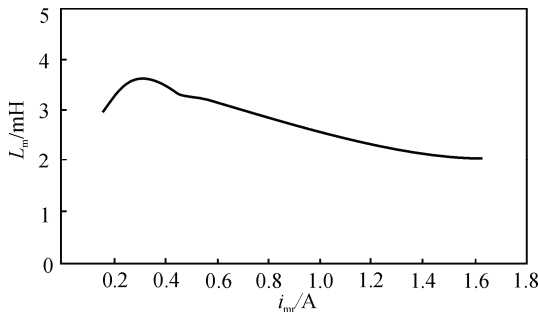


图 2 互感变化曲线

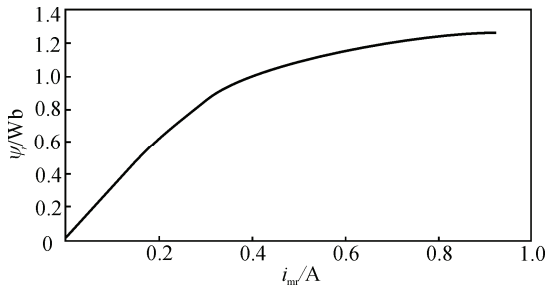


图 3 转子磁链磁化曲线

$$L_m = \frac{A}{e^{\frac{i_{mr}}{C}}} - \frac{B}{e^{\frac{i_{mr}}{D}}} + E \tag{7}$$

1.2 异步电机的单轴模型

在对异步电机进行矢量控制分析时，通常需要用 Γ 型等效电路，如图 4 所示。

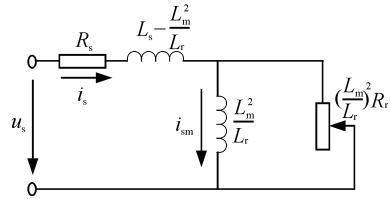


图 4 三相异步电动机的 Γ 型等效电路

Γ 型等效电路可以由 T 型等效电路变换得到。在 Γ 型等效电路中可以增加直观地体现矢量控制模型中的内部参数关系。经过分析^[8]可知， Γ 型等效电路同单轴激励等效电路(如图 6 所示)形式相同。单轴激励即是取电机三相中任意两相连接，注入正弦或其他形式的激励测试信号，如图 5 所示。图 6 为单轴激励的等效电路，跟 Γ 型等效电路相比较没有转差率 s 一项。笔者就是利用电机的单轴模型，辨识互感 L_m 随励磁电流 i_{mr} 的变化关系，即辨识如图 2 所示的磁化曲线关系。

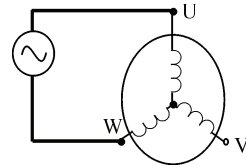


图 5 异步电机单轴激励示意图

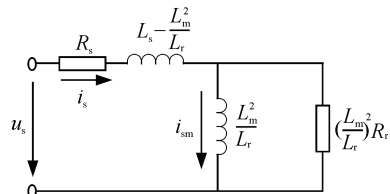


图 6 异步电机单轴激励等效电路

2 互感测试方法

2.1 测试原理

由图 2 可以得到：

$$u_m = u_s - R_s i_s - L_\sigma \frac{di_s}{dt} \tag{8}$$

式中： R_s 为定子电阻； L_σ 为瞬态电感； u_s 为输入电压； i_s 为输入定子电流。假设磁链

$$\psi_{sm} = \frac{L_m}{L_r} i_{sm} \tag{9}$$

注意：由于单轴等效模型中 L_m 同样随励磁电流 i_{mr} 变化， ψ_{sm} 同样是励磁电流的函数。由式 (8) 可得：

$$\psi_{sm} = \int (u_s - R_s i_s) dt - L_\sigma i_s \tag{10}$$

对电机施加电流测试信号，在已知定子电阻 R_s 及瞬态电感 L_σ 的情况下，可以利用式 (10) 求得磁

链 ψ_{sm} 。这个过程中，由于瞬态电感 L_{σ} 受互感 L_m 变化影响较小，可以认为瞬态电感是不变的。

由图 6 可得：

$$i_{sm} = i_s - \frac{u_m}{\left(\frac{L_m}{L_r}\right)^2 R_r} \quad (11)$$

$$\frac{L_m^2}{L_r} = \frac{\psi_{sm}}{i_{sm}} \quad (12)$$

前文已介绍 $L_r = L_m + L_{r\sigma}$ ，在转子漏感 $L_{r\sigma}$ 已知的情况下，利用式 (11) 和式 (12) 通过求解方程的方法可以计算出相应的互感 L_m 。

2.2 测试信号及需要已知的测试参数

测试信号可以选择正弦信号或者脉冲直流信号。笔者采用的测试信号为正弦电流信号。电流信号的频率为电动机的额定转差频率，电流峰值为电动机额定电流的 3/2 倍，如图 7 所示。

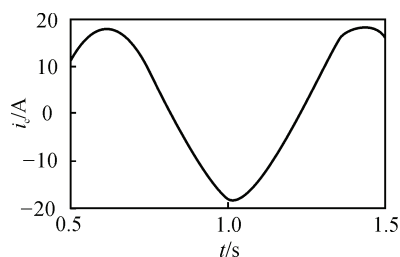


图 7 测试电流波形

测试结构如图 8 所示。通过施加正弦电压控制信号产生正弦电流，并且电流进行闭环控制，通过 PI 调节器保证正弦电流峰值等于给定值。待电流稳定后，采集 1/4 正弦周期的电流和电压数据，计算互感 L_m 变化曲线。为了使辨识更准确，也可以采集多个周期的数据，进行平均计算。

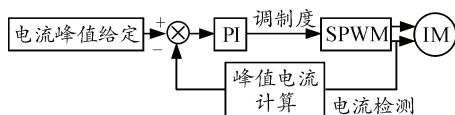


图 8 测试电流控制示意图

测试中需要预先知道定子电阻 R_s ，转子电阻 R_r ，转子漏感 $L_{r\sigma}$ ，瞬态电感 L_{σ} 等参数。这些参数可以通过常规的辨识方法获得（定子电流电压法，单相激励法）。这其中瞬态电感中同样包含互感值，但由于其值比较小，可以认为是不变的。

3 实验结果

实验平台以 TMS320F2812 为主控制器开发的伺服驱动器。实验电机为北京超同步 5.5 kW 异步主

轴电机。电机铭牌参数为：额定电流 11.5 A，额定扭矩 35 N·m，级数 4，功率因数 0.81，额定转速 1 500 r/min，最高转速 8 000 r/min。测试中需要的其他电机参数使用的是北京超同步提供的电机设计参数。

测试电流波形如图 7 所示，互感 L_m 测试结果如图 9 所示。超同步提供的电机互感参数为 143 mH。根据测试结果可知，笔者的方法可以较为准确地测出异步电动机的互感变化曲线。

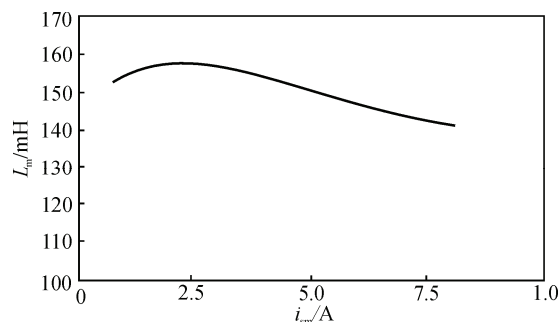


图 9 互感变化曲线测试结果

4 结论

笔者提出了一种在变频器或者伺服驱动器上进行离线辨识异步电动机互感变化曲线的方法，其测试原理来源于对异步电动机单轴激励模型的分析。测试时，通过对任意两相接线端施加电流测试信号，辨识电动机的互感变化曲线。实验结果证明，该方法较为准确有效。

参考文献：

- [1] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2003: 206-214.
- [2] 博斯. 现代电力电子学与交流传动[M]. 王聪, 译. 北京: 机械工业出版社, 2006: 266-308.
- [3] 杨建, 周绪利, 彭世忠. 交流伺服系统高精度电流矢量控制[J]. 兵工自动化, 2012, 31(6): 81-82.
- [4] Novotny D. W, Lipo T. A. Vector Control and Dynamics of AC Drives[M]. Oxford, U.K.: Clarendon, 1996: 151-164.
- [5] Fernando B, Degner M W, Lorenz R D. Analysis and design of current regulators using complex vectors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(3): 817-825.
- [6] Stankovic A, Benedict E. R, John V, et al. A novel method for measuring induction machine magnetizing inductance[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(5): 1257-1263.
- [7] 张鸿斌. 基于 DSP 的步进电机控制系统的设计[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(7): 88.
- [8] Ganji A., Guillaume P., Pintelon R. Induction motor dynamic and static inductance identification using a broadband excitation technique[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1998, 13(1): 15-20.