

一种基于静态特性的直线感应电机参数辨识方法

何晋伟^{1,2}, 史黎明¹

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100190)

摘要: 直线感应电机(LIM)具有机械间隙大、定转子漏感差别明显、边缘效应影响等特点, 准确测量电机参数难度较大。通常的电机空载试验参数测量方法在直线轨道上难于实施, 特别是用于地铁和磁浮列车牵引的直线电机, 由于运动位置重复性差, 在线辨识实现困难。本文提出一种新的基于变频器驱动的直线感应电机等效电路参数辨识方法, 利用不同频率时的电机推力、变频器输出电压和电流等静态堵转特性, 结合最小二乘法推算出适合控制用的直线感应电机等效电路中的初级电阻、漏感、次级等效电阻和漏感参数。测量设备即为实际驱动电机的变频器。对一台基于直线感应电机牵引系统的测试结果表明了该方法的有效性。

关键词: 直线感应电机; 等效电路; 堵转试验; 参数辨识

中图分类号: TM359

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2009)04-0050-04

1 引言

准确的电机参数对电机控制和建模意义重大^[1]。与旋转感应电机相比, 直线感应电机的机械气隙较大, 通常情况下励磁电感相比于等容量的旋转感应电机小很多。直线感应电机的初级绕组嵌于槽内, 次级常采用无槽的铝铁复合次级, 使得直线感应电机的初级和次级漏感差别较大。另外, 由于直线感应电机存在边缘效应和通常条件下直线感应电机的轨道长度有限, 运动位置不具重复性, 致使利用旋转电机空载离线参数测量以及在线计算辨识对直线感应电机来讲实施困难。

参考文献[2]从空载和堵转实验出发, 获得了电机参数, 但是空载时需要移去次级铝板或次级绕组, 实际情况实施困难。文献[3]采用与文献[2]近似的方法, 对象是旋转类型的直线电机。文献[4]提出从旋转电机的铭牌出发, 利用稳态模型得到电机稳态和启动时的参数。文献[5]和[6]基于变频器供电的直线感应电机特性并结合有限元方法获得电机参数。文献[7]利用[2]的方法获得的电机参数, 电机稳态运行中, 在线辨识由于边缘效应造成的电机参

数变化。文献[8]采用模型参考自适应方法对励磁电感进行在线辨识。对于轨道交通牵引的直线感应电机, 如基于直线感应电机的日本高速地面运输系统(HSST)、直线电机地铁系统, 上述方法均难以实现。

本文针对目前直线感应电机驱动通常采用变频器控制的现状, 结合电压型变频器供电的特点, 提出了一种基于PWM变频器输出量的直线感应电机等效电路参数离线计算方法。在堵转情况下, 对电机初级通以不同频率的电压和电流, 测量电机的堵转电流和力特性等, 通过最小二乘法间接计算获得电机初级和次级电阻、初级和次级漏感等参数, 避免了难于实施的空载运行参数测量。控制试验结果表明, 该方法简单、有效, 具有较高实用价值。

2 参数辨识方法分析

(1) 变频恒流堵转参数

直线感应电机运行速度较低时纵向边缘效应对参数影响不大, 横向边缘效应体现在次级电阻中, 其T型等效电路模型可用图1表示^[9]。

图中 I_1 和 \dot{U}_1 分别为初级相电流和相电压,

收稿日期: 2009-03-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目册(50577062)

作者简介: 何晋伟(1983-), 男, 江苏籍, 硕士, 主要从事轨道交通直线电机和驱动控制, 有源电力滤波器研究;

史黎明(1964-), 男, 河南籍, 研究员, 博士, 主要从事直线电机和驱动控制, 磁浮交通牵引和悬浮技术研究。

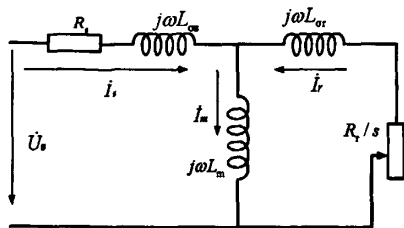


图 1 直线电机 T 型等效电路

Fig.1 LIM T type equivalent circuit

R_p 、 R_s 分别为初级和次级电阻, $L_{\sigma p}$ 、 $L_{\sigma s}$ 分别为初级和次级漏感, L_m 为励磁电感。

通常采用有限元计算分析^[6]或式(1)的解析法^[2]计算直线感应电机励磁电感

$$L_m = 6\mu_0 (K_w N)^2 \tau L / (\pi^2 p g_s) \quad (1)$$

这里: μ_0 为真空中的磁导率, K_w 绕组系数, N 每相串联匝数, g 电磁气隙, L 初级铁芯宽度, τ 电机极距, $2p$ 极数。

直线感应电机推力可表示为^[10,11]:

$$F = \frac{3\pi}{\tau} \cdot \frac{\omega_s L_m^2(R/S) I_s^2}{(R/S)^2 + [\omega_s (L_+ + L_-)]^2} \quad (2)$$

其中: $\omega_s = 2\pi f_s$, f_s 为初级电流频率。当电机堵转 (转差率 $s=1$) 时, 推力 F 可表示为

$$F = \frac{3\pi}{\tau} \cdot \frac{L_m^2 R_r I_s^2}{R_r^2/\omega_s + (L_m + L_{\pi})^2 \cdot \omega_s} \quad (3)$$

若给定一个初级电流, 改变电流角频率 ω_{ik} ($k = 1 \cdots N$), 测量出电机的推力 F_k , 并令 $R_r = P_1$ 、 $(L_m + L_\sigma)^2/R_r = P_2$ 、 $\tau F_k/(3\pi\omega_{ik}^2 L_m^2) = X_k$ 、 $\tau F_k\omega_{ik}/(3\pi I^2 L_m) = Y_k$, 可将数据线性化得到:

$$X_k \cdot P_1 + Y_k \cdot P_2 - 1 = 0 \quad (4)$$

式(4)是一个以 X_k 、 Y_k 为变量, P_1 、 P_2 为未知函数的线性方程组。为了求得对应不同角频率与推力的关系,进而得到各个参数,这里由最小二乘法估计出参数 P_1 和 P_2 ,得到均方根差满足统计意义下的最小值。

$$f(x) = \sum_{k=1}^N (X_k \cdot P_1 + Y_k \cdot P_2 - 1)^2 \quad (6)$$

$$\partial f(x)/\partial P_1 = 0 \quad (7)$$

$$\partial f(x)/\partial P_i = 0 \quad (8)$$

确定出参数 P_1 和 P_2 后,进而可得到

$$R_{\perp} = P_{\perp} \quad (9)$$

$$L_m = \sqrt{P_1 \cdot P_2} - L_m \quad (10)$$

取启动、额定、空载等不同电流值,按上述方法

重复计算,取平均值,即可得出满足控制要求的参数 R_L 和 L_m 。

(2) 恒流供电辨识初级电阻

控制逆变器输出为直流电压,此时电机牵引力为零。当达到电气稳定时,电机初级电枢中电流为恒流。逆变器接线如图 2 所示。如取电压矢量 $(1, 0, 0)$,电流稳定时等效电路可表示如图 3 所示。此时,可确定电机的初级相电阻为

$$R_s = 2U_d/3I_{sa}^\infty \quad (11)$$

这里: U_d 为直流母线电压。为去掉变频器功率器件 IGBT 管压降, 可测量电机 a 、 c 相间的线电压来代替直流母线电压。 $I_{a\infty}$ 为 a 相趋于稳定时的 a 相电流, 调节 U_d 的大小, 使稳定的电流接近电机的额定值。通过控制开通 IGBT 器件的不同组合, 将得到的结果取平均值, 即为初级电阻。

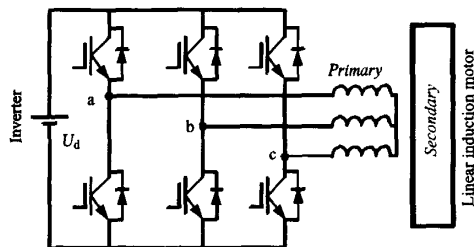


图 2 逆变器与直线感应电机接线图

Fig.2 Linear induction motor linked to inverter

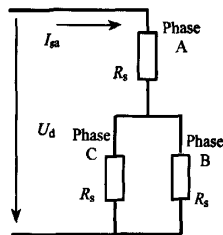


图3 直流电压激励下电机等效电路

Fig.3 Motor equivalent circuit with DC voltage

(3) 交流堵转辨识初级漏感

将电机堵转,通以幅值恒定,频率可变的电压,由图 1 可得到电机端部电压方程为

$$\begin{aligned} \dot{U}_s = \dot{I}_s \cdot \left[R_s + j\omega_s L_{ss} \right. \\ \left. + \frac{j\omega_s L_m (R_r + j\omega_s L_{rr})}{R_r + j(\omega_s L_{rs} + \omega_r L_{rr})} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

进而可得,

$$L_{\text{ca}} = M - N \quad (13)$$

$$M = \frac{1}{\omega_s} \sqrt{(U_s/I_s)^2 - \left[R_s + \frac{\omega_s^2 R_r L_m^2}{R_r^2 + \omega_s^2 (L_{\sigma r} + L_m)} \right]}$$

(14)

$$N = \frac{L_m [R_r^2 + \omega_s^2 (L_{\sigma r} + L_m) L_{\sigma r}]}{R_r^2 + \omega_s^2 (L_{\sigma r} + L_m)}$$

(15)

这里： U_s 和 I_s 分别为相电压和相电流的有效值。

3 结果分析

针对一直线感应电机实验平台系统进行了计算和测量。系统由前后两台结构完全相同的直线感应电机 A 和电机 B 构成,电机初级位于运动模型车下方,初始状态机械气隙为 6.0mm。主功率模块采用三菱 IPM 模块 PM75CSD/E060。电机主要参数如表 1 所示。本文以电机 A 为例分析。

表 1 直线电机主要结构参数
Tab.1 Main parameters of a SLIM

槽数 Z	24
极距 τ	51mm/3 槽
初级铁心长 l	410mm
初级铁心宽 w	70mm
次级铝板厚	2mm
极数 $2p$	7
槽深	50mm
槽宽	11.5mm

(1) 次级电阻和漏感

通过电枢电流反馈 PI 调节控制初级电枢电压,在初级中通以有效值为 6A、频率可变(这里取 20 次)的电流,测量得到推力和频率的关系如图 4 所示。

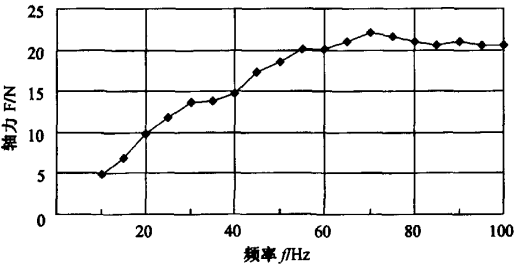


图 4 推力和频率的关系(初级电流 6A)
Fig.4 Thrust vs. frequency (primary current 6A)

重复上述步骤,将初级中分别通以有效值为 7A、8A、19A 的频率可变的电流,记录推力和角频率的关系,由式(5)-式(10)计算出结果平均后得到, $L_{\sigma r}$

$$= 0.74\text{mH}, R_r = 3.27\Omega.$$

(2) 初级电阻

控制逆变器输出为单一矢量的直流电压 $U_d = 24\text{V}$ 时,电机 a 相、b 相电流如图 5 所示。a 相电流稳定时幅度为 19.1A。

改变电压向量的角度到 b、c 相,重复上述步骤,利用式(11)计算出初级电阻的平均值为 $R_s = 0.84(\Omega)$ 。

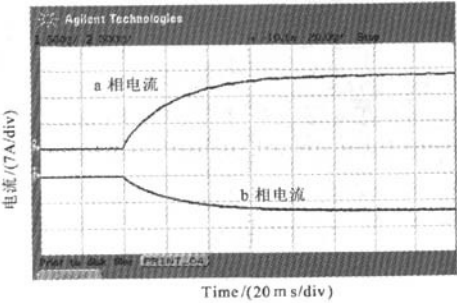


图 5 相电流响应
Fig.5 Current response under direct voltage

用电桥法测量时,每相电阻平均值约为 0.82Ω。本方法与电桥法测量结果基本一样,相差约 2.4%。

(3) 初级漏感

将电机堵转,通过 SVPWM 空间电压调制,使得电机初级中通以有效值恒定、角频率可变的三相对称电枢电压,当相电压有效值为 $35/\sqrt{2}\text{V}$ 时,a 相电枢电流有效值和频率关系如图 6 所示。

重复上述步骤,在初级侧分别通以每相有效值为 $25/\sqrt{2}$ 、 $45/\sqrt{2}\text{V}$, 频率可变的电压,通过式(13)至式(15)计算出初级漏感,取平均值计算后得到 $L_{\sigma s} = 12.9\text{mH}$ 。

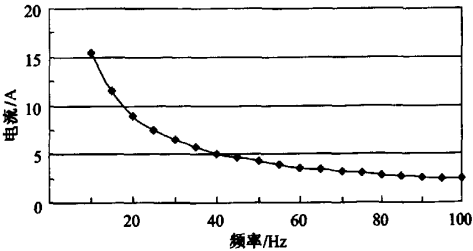


图 6 电流频率关系(初级相电压有效值为 $35/\sqrt{2}\text{V}$)
Fig.6 Current ver. frequency with voltage $35/\sqrt{2}\text{V}$

(4) 结果分析

根据 LIM 的结构和材料参数,采用参考文献[2]

的典型方法计算电机参数和本文提出的参数辨识方法获得的电机参数比较结果如表2所示。两者的误差均小于6.5%。

利用本文方法计算的参数可计算出初级相电流有效值为6A、不同转差频率时的静态推力。计算值和实际测量值如图7所示。除 $f = 35, 40\text{Hz}$ 这两点外,计算出的启动推力和实测值误差小于7%。由于测量设备即是实际控制设备,所以次级导体板的实际影响、边缘效应的影响等包括在被测参数中^[12]。

表2 测量和计算的等效电路参数

Tab.2 Measured and calculated parameters in equivalent circuit

电机参数	辨识值	理论计算值
初级电阻 R_1/Ω	0.84	0.82
初级漏感 L_{σ}/mH	12.90	13.45
励磁电感 L_m/mH	7.52	7.52
次级电阻 R_2/Ω	3.27	3.14
次级漏感 L_{σ}/mH	0.74	0.81

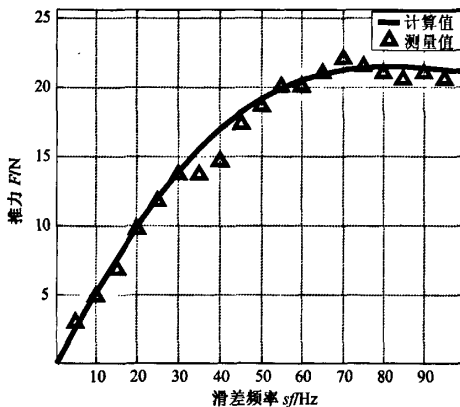


图7 计算和测量的推力比较

Fig.7 Calculated and measured thrusts

4 结论

提出了一种根据驱动变频器的输出电压、电流,测量直线感应电机堵转特性,离线辨识电机等效电路参数的有效方法。辨识的电机参数与计算出的参数基本一致。由辨识所得参数计算出的推力与实测推力一致。该方法具有以下特点:

(1) 测量过程仅需利用牵引该电机运行的变频器,避免了附加测量设备和对其他物理量的求解,简单、可行;

(2) 仅需要测量电机堵转时的静态特性,不需要原动机将直线感应电机拖入同步速,避免直线牵引时同步速度长距离运行测量难等问题。

参考文献 (References):

- [1] 陆海峰, 瞿文龙, 张磊 (Lu Hiafeng, Qu Wenlong, Zhang Lei). 异步电机的非线性建模与仿真 (Non-linear modeling and simulation of induction motor) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2005, 24 (3): 31-34.
- [2] Gieras J F. Linear induction drives [M]. Oxford: Clarendon Press, 1994.
- [3] 徐伟, 孙广生, 李耀华, 等 (Xu Wei, Sun Guangsheng, Li Yaohua, et al.). 一种新型的直线异步电机参数测量方案 (A new parameter measurement scheme for single linear induction motors) [J]. 电工技术学报 (Trans. China Electro technical Society), 2007, 22(6): 54-58.
- [4] Lindenmeyer D, Dommel H W. An induction motor parameter estimation method [J]. International J Elec. Power and Energy System, 2001, 23(5): 251-262.
- [5] Gubae Kang, Junha Kim, Kwanghee Nam. Parameter estimation scheme for low-speed linear induction motors having different leakage inductances [J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2003, 50(4): 708-716.
- [6] Liming Shi, Jinwei He. Parameters calculation and normal-and-thrust forces control in SLIM [A]. Proc. 33rd Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society [C]. 2007. 1204-1207.
- [7] Zuerong Zhang, Tony R Eastham, Graham E Dawson. LIM dynamic performance assessment from parameter identification [A]. Industry Applications Society Annual Meeting [C]. 1993. 295-300.
- [8] 任晋旗, 李耀华, 徐伟, 等 (Ren Jinqi, Li Yaohua, Xu Wei, et al.). 直线感应电机在线参数辨识 (Online parameter estimation of linear induction motor) [J]. 中国电机工程学报 (Proc. CSEE), 2008, 28(24): 113-117.
- [9] J Duncan, C Eng. Linear induction motor equivalent circuit mode [J]. Proc. IEE, 1983, 130(1): 51-57.
- [10] Kent R Davey. Equivalent T circuit of the induction motor: its nonuniqueness and use to the magnetic field analyst [J]. IEEE Trans. on Mag., 2007, 43(4): 1745-1748.
- [11] A Gastli. Identification of induction motor equivalent circuit parameters using the single-phase test [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1999, 14(1): 51-56.
- [12] Kent Davey. Predicting induction motor circuit parameters [J]. IEEE Trans. on Mag., 2002, 38(4): 1774-1779.

(下转第70页, cont. on p.70)

46-49.

- [7] 张宇, 段善旭, 康勇 (Zhang Yu, Duan Shanxu, Kang Yong). 基于瞬时对称分量的三相逆变器特性分析 (Analysis of three-phase inverter based on instantaneous symmetrical components) [J]. 中国电机工程学报 (Proc. CSEE), 2005, 25(17): 15-20.

- [8] 颜世超, 汤清泉, 刘正之 (Yan Shichao, Tang Qingquan, Liu Zhengzhi). 半桥三电平逆变器输出不对称交流时直流侧电容电压的分析 (Analysis of capacitor voltage of DC side on half-bridge three-level inverter with asymmetrical AC output) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 2007, 26(2): 49-53.

Research on output symmetrical control strategies for combinatorial high power three phase inverter

WU Sheng-hua, LAI Xiang-dong, ZHANG Xian-cai, QUAN Jian-zhou
(Air Force Radar Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: Seeing that the conventional inverter doesn't match any unbalanced loads, we proposed the circuit topology and control strategy of natural-decoupling in electrical and magnetic circuit. A sine pulse width and phase modulation was carried out by using an independent voltage-loop and phase-loop respectively in each phase, which ensures the symmetrical output voltage and the symmetrical output phase to the inverter. Simulation and experimental results of 30kW inverter show that the circuit design is feasible and of satisfactory outcome.

Key words: unbalance loads; three-phase symmetry; PLL; SPWPM

(上接第 53 页, cont. from p.53)

An identification method for linear induction motor parameter based on static characteristics

HE Jin-wei^{1,2}, SHI Li-ming¹

- (1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Linear induction motor (LIM) have some characteristics such as large gap length, different primary and secondary leakage inductance, and end effects. It is very difficult to measure the motor's parameters precisely. Meanwhile, it's not feasible to test using the rotary motor measuring method and get no-load characteristics along a line track. Because of the low position repeatability for the LIM used in linear drive subway and maglev train, it is not reasonable to carry on on-line parameter identification. This paper proposes a novel method to identify linear motor parameters including primary resistance, primary leakage inductance, secondary equivalent resistance and leakage inductance which are acquired by least-square method under different thrust and frequency. Basic parameters are obtained by using the output voltage and current of the converter with the locked-rotor standstill. Measuring equipment is only the practical drive inverter. Experimental results to a LIM based propulsion vehicle system verified the effectiveness of the proposed method.

Key words: linear induction motor; equivalent circuit; locked test; parameter identification