

基于三相异步感应电机数学模型的 在线参数辨识技术研究

王雪迪, 戴碧君, 杨 扬

(中车大连电力牵引研发中心有限公司, 辽宁 大连 116052)

摘 要: 三相异步感应电机矢量控制的关键在于磁场定向, 而影响磁场定向的重要因素之一是电机参数转子电阻。为解决矢量控制动态性能对转子电阻的依赖问题, 对三相异步感应电机转子电阻在线辨识技术进行了研究。建立感应电机数学模型, 根据电机模型的数学表达式, 提出了转子电阻的在线辨识方法, 根据电机模型的等效电路图, 推导了迭代求解转子电阻的数学表达式, 在迭代求解过程中, 以电机变量空间矢量图中的转子电阻电压和电流的平行关系作为判定计算结束的标志, 得以准确求解转子电阻值。试验结果表明, 该方法可有效地在线辨识转子电阻, 计算简单, 辨识精度高, 符合工程应用需要。

关键词: 三相异步感应电机; 数学模型; 转子电阻; 在线辨识

中图分类号: U264.1⁺3

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2019.04.012

Study of Online Parameter Identification Technology Based on Mathematical Model of Three-phase Asynchronous Induction Motor

WANG Xuedi, DAI Bijun, YANG Yang

(CRRC Dalian R & D Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116052, China)

Abstract: The key of vector control of three-phase asynchronous induction motor is magnetic field orientation and one of the important factors affecting field orientation is the rotor resistance of motor parameters. In order to solve the problem that the dynamic performance of vector control depends on rotor resistance, the on-line identification technology of rotor resistance of three-phase asynchronous induction motor was studied. The mathematical model of induction motor was established. According to the mathematical expression of the motor model, an on-line identification method of rotor resistance was proposed. According to the equivalent circuit diagram of the motor model, the mathematical expression for solving the rotor resistance iteratively was derived. In the process of iteration, the parallel relationship between the voltage and current of the rotor resistance in the space vector diagram of the motor variable was used as the sign to judge the end of calculation. The rotor resistance could be calculated accurately. The experimental results showed that this method could effectively identify the rotor resistance on-line. It is simple to calculate and has high identification accuracy, which meets the needs of engineering applications.

Keywords: three-phase asynchronous induction motor; mathematical model; rotor resistance; online identification

0 引言

我国轨道交通矢量控制技术成功应用解决了异步电机控制的诸多难题, 使得牵引电传动技术的发展步入了新纪元, 然而制约矢量控制动态性能发挥的诸

多基础性研究却发展缓慢, 在线参数辨识技术就是其中重要一项。感应电机在整个工作运行期间, 相关参数并非恒定不变, 而是随着工况的不断变化在一定范围内变动, 如温度、集肤效应、磁饱和程度等的变化均会引起参数的变化, 但这些参数的改变规律又是难以实时预测的, 特别是在列车运行区间较长、工作期

收稿日期: 2018-04-27; 修回日期: 2018-12-27

间温度变化剧烈的条件下, 参数实际值与控制器使用值的偏差会使系统动态性能恶化, 严重制约电机性能的发挥^[1]。在线参数辨识已成为异步电机调速系统研究和开发中的一个重要方面。

感应电机的参数包括定子电阻、定子电感、转子电阻、转子电感以及定转子互感等, 对矢量控制动态性能影响显著的是转子时间常数, 即与转子电阻强相关的参数, 国内国外的不少学者对此进行了大量的卓有成效的研究, 其中, 研究最多、应用最广的是模型参考自适应法(MRAS)^[2], 其优点是辨识准确、可靠性高, 但适应范围仅限于电机的中高速区间, 通用变频器往往采用该方法。在轨道交通牵引系统低开关频率、宽速度范围内难以实现准确辨识。近些年将现代控制理论、系统辨识理论等应用于在线参数辨识中, 但最终结果不尽人意。

一套简单、实用、准确的异步电机参数辨识算法对提高轨道交通交流传动系统控制性能意义重大。本文首先阐述基于三相异步感应电机数学模型的在线参数辨识技术理论基础, 进而推导转子电阻在线辨识的迭代求解过程, 最后试验验证了该理论的正确性。

1 基于三相异步感应电机数学模型的在线参数辨识

鼠笼型三相异步感应电机在 dq 坐标系下标量数学表达式^[1]:

$$\left. \begin{aligned} u_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_m \psi_{sq} \\ u_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_m \psi_{sd} \\ u_{rd} &= R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_m - \omega_s) \psi_{rq} = 0 \\ u_{rq} &= R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + (\omega_m - \omega_s) \psi_{rd} = 0 \\ \psi_{sd} &= L_s i_{sd} - L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} &= L_s i_{sq} - L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} &= L_r i_{rd} - L_m i_{sd} \\ \psi_{rq} &= L_r i_{rq} - L_m i_{sq} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

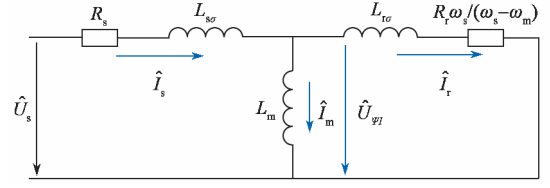
式中: u_{sd} 和 u_{sq} 为定子电压; i_{sd} , i_{sq} 和 i_{rd} , i_{rq} 分别为定子、转子电流; ψ_{sd} 和 ψ_{sq} 为定子磁链; ψ_{rd} 和 ψ_{rq} 分别为转子磁链; R_s 和 R_r 分别为定子、转子电阻; L_s 和 L_r 分别为定子、转子电感; L_m 为定转子互感; ω_m 为同步转速; ω_s 为机械转速。

将上述 8 个标量表达式写成 4 个矢量表达式^[2]:

$$\left. \begin{aligned} \hat{U}_s &= R_s \hat{I}_s + \frac{d\hat{\psi}_s}{dt} + j\omega_m \hat{\psi}_s \\ \hat{U}_r &= R_r \hat{I}_r + \frac{d\hat{\psi}_r}{dt} + j(\omega_m - \omega_s) \hat{\psi}_r = 0 \\ \hat{\psi}_s &= L_s \hat{I}_s - L_m \hat{I}_r \\ \hat{\psi}_r &= L_r \hat{I}_r - L_m \hat{I}_s \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: U_s 和 U_r 分别为定子、转子电压; I_s 和 I_r 分别为定子、转子电流; ψ_s 和 ψ_r 分别为定子、转子磁链。

由三相异步感应电机矢量数学表达式, 可得其等效电路图如图 1 所示。

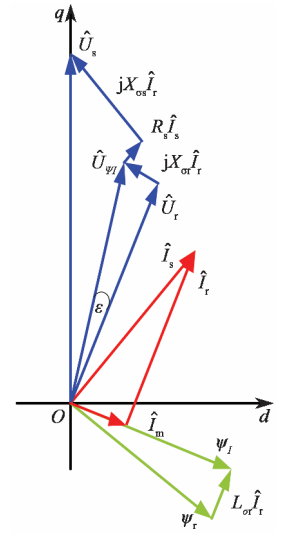


$L_{s\sigma}$ 和 $L_{r\sigma}$ 为定子、转子漏感; $U_{\psi l}$ 为定转子激磁电压; I_m 为励磁电流。

图 1 三相异步感应电机等效电路图

由三相异步感应电机的矢量数学表达式, 可得其空间矢量图如图 2 所示。

式(1)共有 8 个变量, 将电机参数 R_s , R_r , L_s , L_r 和 L_m 看作已知量, 需要有 4 个自变量, 该等式有唯一解。 u_{sd} , u_{sq} , ω_m 由控制程序计算给定, 也可看成已知量, 而 ω_s 可通过转速传感器测得。为了辨识计算电机参数(如 R_s , R_r), 需进一步确定 2 个自变量作为已知量, 而在实际工程应用中, i_{sd} , i_{sq} 通常由逆变器输出电流传感器检测。所以, 理论上, 假设已知 L_s , L_r , L_m , u_{sd} , u_{sq} , ω_m , i_{sd} , i_{sq} 和 ω_s , 可实时计算 R_s 和 R_r 。



$X_{s\sigma}$ 和 $X_{r\sigma}$ 为定子、转子漏抗; ψ_l 为激磁磁链。

图 2 三相异步感应电机空间矢量图

2 三相异步感应电机参数变化对电磁转矩的影响

由电机理论可知, 电磁转矩为

$$T_e = \frac{3R_r}{\omega_r} \left[\frac{U_{\phi l}^2}{\omega_s^2} \frac{1}{(R_r/\omega_r)^2 + L_{r\sigma}^2} \right] \quad (3)$$

式中: $\omega_r = \omega_m - \omega_s$ 。

大功率感应电机额定转差很小, 假设 $(\omega_r L_r)/R_r$ 近似为零, 则电机电磁转矩可近似为

$$T_e = 3 \times \frac{U_{\phi l}^2}{\omega_s^2} \frac{\omega_r}{R_r} = 3 \psi_l^2 \frac{\omega_r}{R_r} \quad (4)$$

2.1 转子电阻变化对电磁转矩的影响

当感应电机工作在常磁链 ψ_l 时, 由式(4)可知, 转子电阻增加 $K_{\theta r}$ 倍, 则电磁转矩将相应降低到 $1/K_{\theta r}$ 倍。通常, 牵引电机绝缘等级为 200 级, 温升限值为 200 K。当环境温度为 40 °C 时, 可由式(5)计算得定子电阻的变化倍数 $K_{\theta s}$ 约为 1.73; 转子电阻温度通常高于定子电阻温度, 转子电阻的变化倍数 $K_{\theta r}$ 约为 2。所以, 当电机温度由 40 °C 升至 240 °C 过程中, 受转子电阻变化

影响,电磁转矩 T_e 将降低到 1/2 倍左右。

$$K_{\theta_s} = \frac{R_{r240}}{R_{r40}} = \frac{235+240}{235+40} \approx 1.73 \quad (5)$$

2.2 定子电阻变化对电磁转矩的影响

由式(4)可知,电磁转矩与定子电阻无关。另外,由等效电路图1可以看出,定子电阻 R_s 增加,将造成输入电压的压降,但实际情况是,当电机接近额定转速时,定子漏感导致的输入电压压降远远大于定子电阻产生的压降,因此,当电机转速超过额定转速的 30% 时,定子电阻随温度变化对电磁转矩的影响可以忽略不计。

2.3 定子漏感和转子漏感对电磁转矩的影响

定子漏感是定子磁通的一部分,不通过转子铁心,仅通过空气闭合。因此,定子漏感不受温度和磁饱和影响,在电机运行期间,基本维持不变。同样,转子漏感也基本维持不变。所以,定子漏感、转子漏感对电磁转矩几乎无影响。

2.4 定子转子互感对电磁转矩的影响

定子转子互感 L_m 通过定子铁心、气隙和转子铁心闭合,主磁路包含铁磁材料,容易受磁饱和影响。因此, L_m 随主磁链 ψ_r 的变化而改变。 L_m 典型的变化曲线如图3所示(图中横坐标值和纵坐标值均为标么值), L_m 标么值由最大的 2.60 变化至最小的 1.95 时,对电磁转矩的影响是不可忽略的,在实际应用中需要加以考虑。

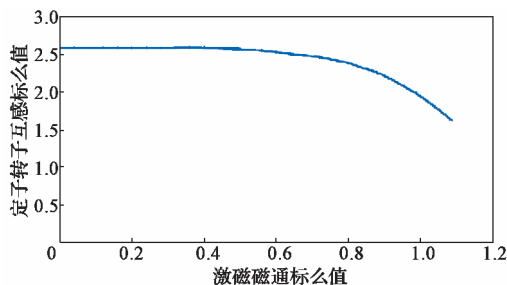


图3 定子转子互感与励磁磁链典型关系曲线

3 感应电机转子电阻的在线辨识

本节采用迭代求解方式在线计算转子电阻。由图2感应电机空间矢量图可知,当转子电阻电压与转子电阻电流相互平行时,矢量乘积为0,可以此为迭代求解结束的判断条件,进而辨识转子电阻。假设定子漏感 $L_{\sigma s}$ 和转子漏感 $L_{\sigma r}$ 已知且为常数, L_m 可通过查表确定。转子电阻计算流程如图4所示,定子电阻初始值设为0, i 为迭代次数。根据图中求解流程和公式,由定子电压 $\hat{U}_s$ 、定子电流 $\hat{I}_s$ 、同步角速度 ω_m 以及电机转速 ω_s ,可求得转子电阻电压 $\hat{U}_{rri}$ 和转子电阻电流 $\hat{I}_{ri}$ 。当二者乘积虚部 Q 小于最小允许误差 Q_0 ,则结束迭代计算,可进一步求得转子电阻 R_r ; 否则,进行下一次迭代计算,直至满足 Q 小于 Q_0 。

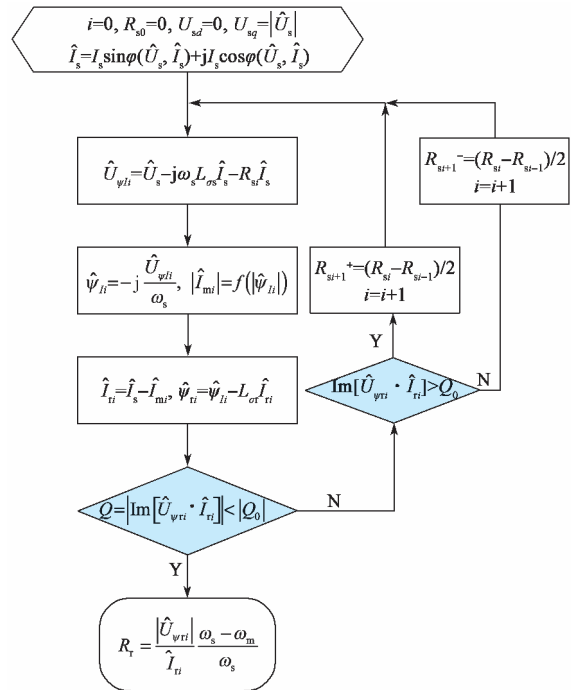


图4 三相异步感应电机转子电阻在线辨识流程图

4 试验验证

上述转子电阻在线辨识方法,在1 600 kW 交流传动互馈试验台上进行了试验验证。被试电机参数如下:

额定功率	1 640 kW
额定电压	2 942 V
额定电流	382 A
额定转速	1 911 r/min
额定转矩	8 170 N·m
极数	6
转子类型	鼠笼型

为充分验证控制算法对速度范围、控制方式和调制方式的适应性,对被试电机在冷态和热态下分别进行扫频试验。在扫频过程中,控制方式由基频以上的标量控制过渡到基频以下的矢量控制,调制方式则由高速的同步调制过渡到低速的异步调制。

4.1 冷态电机参数辨识试验

扭矩仪监测电机运行状态,温度巡检仪测量电机表面最高点温度(由红外热成像仪确定)。试验过程如下:陪试电机转速设定 2 000 r/min,被试电机功率为 370 kW 左右,从 2 000 r/min 向下开始扫频,2 000 r/min 维持 1 min 后;逐渐降低转速至 1 500 r/min,维持 1 min;继续降低转速至 1 000 r/min,维持 1 min;最后将转速降低至 500 r/min,维持 1 min,完成冷态试验,试验持续时间大概 6 min。冷态试验期间电机表面最高平均温度为 21.55 ℃。

转子电阻参数辨识程序每 10 s 执行 1 次数据计算,计算结果通过串口通信每 4 ms 执行 1 次数据上传,辨识结果如图5所示,测量期间转子电阻平均值为

31.835 m Ω 。

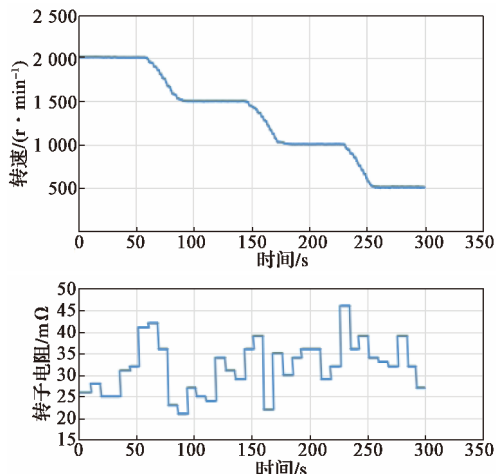


图5 冷态试验电机转速和转子电阻变化

4.2 热态电机参数辨识试验

陪试电机转速设定 2 000 r/min, 被测电机功率 600 kW 左右, 加热至 140 ℃开始电机热态试验。试验过程与冷态相同, 热态试验期间电机表面最高平均温度为 142.05 ℃。

转子电阻辨识结果如图 6 所示, 测量期间转子电阻平均值为 47.895 m Ω 。

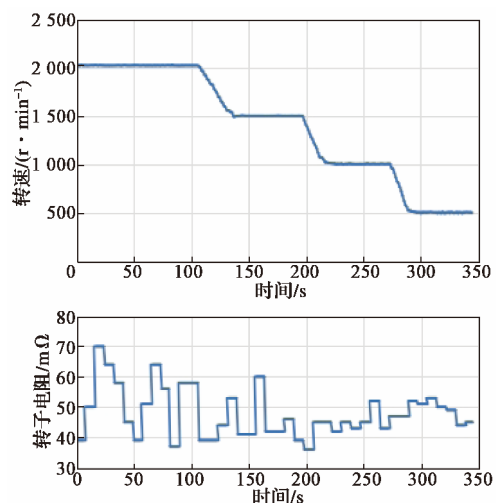


图6 热态试验电机转速和转子电阻变化

由电机冷态和热态试验结果比较可知, 转子电阻随温度的上升而增大, 符合转子电阻的变化规律。进一步定量分析, 电机冷态试验期间平均温度为 21.55 ℃, 辨识的转子平均电阻为 31.835 m Ω , 热态试验后辨识的转子平均电阻为 47.895 m Ω 。根据冷态、热态转子

电阻, 利用式 (5) 可计算热态温度为 150.97 ℃。考虑到电机冷态定子、转子起始温度相同, 热态试验结束后, 转子温度要高于电机表面温度 10 ℃左右。所以, 通过转子电阻计算的转子温度为 140.97 ℃, 这与通过温度巡检仪测量的电机热态试验过程平均温度 142.05 ℃基本一致。

5 结语

本文提出了基于感应电机数学模型的转子电阻在线辨识方法, 推导了迭代计算过程。试验结果表明, 该理论是正确、有效的, 可在电力机车牵引电机全速度范围内准确地辨识转子电阻, 可用于解决矢量控制转子时间常数不准确导致的动态响应等问题。本文所述方法在 HXD2D 型和 HXD2F 型电力机车上装车应用, 用于提高矢量控制的转矩控制精度和动态响应速度以及电机转子温度监测, 应用效果良好, 辨识精度符合工程应用需要。

参考文献:

- [1] BOSE B K. 现代电力电子学与交流传动[M]. 王聪, 赵金, 于庆广, 等, 译. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] 王成元, 夏加宽, 杨俊友, 等. 电机现代控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [3] 金海, 黄进. 基于模型参考方法的感应电机磁链的自适应观测及参数辨识[J]. 电工技术学报, 2006, 21(1): 65-69.
- [4] TELFORD D, DUNNIGAN M W, WILLIAMS B W. Online identification of induction machine electrical parameters for vector control loop tuning[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(2): 253-261.
- [5] KONING R F F, CHOU C T, VERHAEGEN M H G, et al. A novel approach on parameter identification for inverter driven induction machines[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2000, 8(6): 873-882.
- [6] BARRERA P M, BOSSIO G R, SOLSONA J A, et al. On-line iron loss resistance identification by a state observer for rotor-flux-oriented control of induction motor[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(10): 2742-2747.
- [7] WANG K, CHIASSON J, BODSON M, et al. A nonlinear least-squares approach for identification of the induction motor parameters[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(10): 1622-1628.

作者简介: 王雪迪(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力电子与电传动。

(上接第 51 页)

参考文献:

- [1] 栾鸿斌, 周睿, 刘映安, 等. 阿根廷经济现状及铁路货运装备开发建议[J]. 铁道经济研究, 2016(2): 23-26.
- [2] 朱兵, 伍华. CDD6A1 型米轨电传动内燃机车[J]. 铁道机车车辆, 2017, 37(5): 90-93.

- [3] 李廉枫, 李刚, 彭长福. 窄轨交流传动内燃机车技术平台搭建[J]. 铁道机车车辆, 2013, 33(5): 44-48.

作者简介: 朱 兵(1977—)男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事机车总体设计工作。