

异步电机的 Γ 型电路分析和改进型U-N模型设计

杨大成, 尚 敬

(南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 文章分析了异步电机 Γ 型电路的数学模型、极点分布和反馈矩阵的设计, 采用了全阶磁链观测器模型观测定/转子磁链, 对比了全阶磁链观测器模型和U-N模型, 并结合两者优点得到了定/转子磁链同步补偿的改进型U-N模型。Matlab仿真结果表明, 改进型模型具有良好的精度和鲁棒性, 可适应于各种高性能的电机控制平台。

关键词: 电机模型; Γ 型等效电路; 极点; 全阶磁链观测器; U-N模型

中图分类号: TM301.2

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2014)01-0032-06

Analysis of Γ Circuit and Design of Improved U-N Model for Induction Motor

YANG Da-cheng, SHANG Jing

(CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The math model, poles distribution, and feedback matrix design of induction motor circuit are analyzed. The full order flux observer was applied to obtain stator/rotor flux, and then was compared to U-N model. An improved U-N model has been adopted, which has advantages of the referred two models and can compensate stator/rotor flux respectively. The simulation results indicate that the improved model is precise and robust, and can be applied to different motor control platforms with high performances.

Keywords: motor model; Γ circuit; poles; full order flux observer; U-N model

0 引言

电机控制平台主要包含3个方面: 电机模型、电机控制策略及脉冲调制。在一个高性能的控制平台上, 此三者作为不同的功能单元保持相对独立, 处理周期根据各单元的控制性能指标要求而定, 三者间要保持控制信息的高速交换。其中, 电机模型是电机控制的核心和基础, 其任务就是通过简化电机物理模型对电机进行建模, 并采样电机电流、速度信号、重构电压信号, 把不能直接观测到的定/转子磁链、转矩等尽可能准确地估算出来(如果无速度传感器, 则电机模型需完成转速

估算工作)。无论是直接转矩控制策略还是磁场定向矢量控制策略, 其控制都是建立在磁场、转矩等状态精确计算的基础上。如果模型不准, 导致各种状态量存在较大偏差, 想要实现磁场定向、转矩或者电流的高性能控制肯定是事倍功半。

目前, 常见的异步电机模型有U-I模型、I-N模型以及在U-I和I-N模型中切换的U-N模型。这些模型方法各有优缺点, 已经有很多论文进行了分析优化, 以改善某些性能指标的不足^[1-2]。本文根据笔者多年电机控制算法的实践, 兼顾直接转矩控制和转子磁场定向控制的要求, 选取了全阶磁链观测模型作为电机模型, 并进行了模型的理论分析; 同时, 在异步电机 Γ 模型下对目前的异步电机全阶U-N模型进行了优化。

收稿日期: 2013-06-13

作者简介: 杨大成(1981-), 男, 工程师, 从事电机控制和变流器系统设计。

1 异步电机一般等效电路和Γ型电路^[3-4]

异步电机一般形式等效电路和Γ型等效电路分别如图1、图2所示(当 $a=1$,模型为T型;当 $a=L_s/L_m$,模型转换为Γ型)。其中: u_s 为输入电压; R_s 为定子电阻; R_r 为转子电阻; L_m 为定转子互感; L_s 为定子自感; L_r 为转子自感; ψ_s (ψ_u)和 ψ_r 为定子和转子磁链; T 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; P_n 为极对数; J 为转动惯量; ω_r 为电机转速。

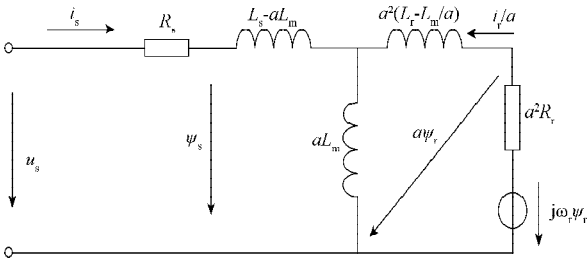


图1 异步电机一般型式等效电路

Fig. 1 General equivalent circuit of induction motor

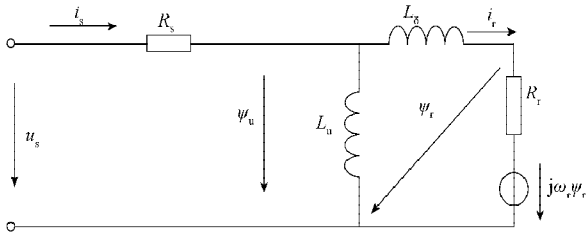


图2 异步电机Γ型等效电路

Fig. 2 Equivalent Γ circuit diagram of induction motor

图2中,将电机参数及磁场定义为:

$$\left. \begin{aligned} L_u &= L_s \\ L_\delta &= L_s (L_r L_s / L_m^2 - 1) \\ R_r &= R_r (L_r L_s / L_m^2) \\ \psi_r &= \psi_r (L_s / L_m) \\ \psi_u &= \psi_s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

从定子端看进去,Γ型等效电路的总阻抗和定子电流不变,等同于电源,可以保持功率、转矩相同。通过模型对比可知,Γ型等效电路在不遗漏任何状态信息的情况下简明表述了异步电机模型,方便了电机模型的构建。因应用的需要,将电机参数按照式(1)进行转换,同时根据惯例将转子电流定义方向与一般等效电路方向相反^[3, 5-6],但不影响模型的分析。

2 Γ型电路的数学模型及基本分析

静止坐标系下异步电动机的Γ型等效电路数学模型如式(2)~式(5):

$$u_s = R_s i_s + d\psi_u / dt \quad (2)$$

$$0 = R_r i_r - d\psi_r / dt + j\omega_r \psi_r \quad (3)$$

$$\psi_u = L_u i_u \quad (4)$$

$$\psi_r = L_r i_r - L_\delta i_s = \psi_u - L_\delta i_s \quad (5)$$

电磁转矩和机电运动方程:

$$T = 3/2 \times P_n (\psi_{u\alpha} i_{s\beta} - \psi_{u\beta} i_{s\alpha}) \quad (6)$$

$$T - T_L = J / P_n \times \frac{d\omega_r}{dt} \quad (7)$$

运用式(2)~式(5)可以推导出以定转子磁链为状态变量的矩阵形式电机数学模型:

$$d\psi / dt = A\psi + Bu \quad (8)$$

$$i = C\psi \quad (9)$$

式中:

$$\psi = [\psi_{u\alpha} \quad \psi_{u\beta} \quad \psi_{r\alpha} \quad \psi_{r\beta}]^T;$$

$$u = [u_{s\alpha} \quad u_{s\beta} \quad 0 \quad 0]^T;$$

$$i = [i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} \quad i_{r\alpha} \quad i_{r\beta}]^T;$$

$$A = \begin{bmatrix} -k_1 R_s I & k_2 R_s I \\ k_2 R_r I & -k_2 R_r I + \omega_r J \end{bmatrix}, \text{其中 } I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix};$$

$$C = [k_1 I - k_2 I], k_1 = 1/L_u + 1/L_\delta, k_2 = 1/L_\delta.$$

通过简化坐标变换,使电机模型成为一个五阶、非线性、强耦合的多变量系统。由于电机的机械时间常数远远大于电磁时间常数,且定转子电阻 R_s 和 R_r 随温度改变而产生的变化十分缓慢,即假设矩阵 A 中的变量(如 ω_r 、 R_s 和 R_r)是缓慢变化的,则式(8)、式(9)所描述的电机模型是四阶线性缓变系统。在电机传动的工作条件下可以满足上述假设。一些研究论文也证明了T型电路数学模型的可控性和可观性^[7-8],同时求出电机系统极点方程式和极点随转速变化的轨迹^[7,9]。对于Γ型电路,可控性和可观性与T型电路分析方法和结论完全一致。通过电机的特征方程 $|\lambda I - A| = 0$,可以求得Γ型电路数学模型的特征根的方程:

$$\begin{aligned} & \lambda^4 + (2R_s k_1 + 2R_r k_2) \lambda^3 + (\omega_r^2 + R_s^2 k_1^2 - 2R_r R_s k_2^2 + \\ & 4R_r R_s k_1 k_2 + R_r^2 k_2^2) \lambda^2 + (2R_s k_1 \omega_r^2 + 2R_r R_s^2 k_1^2 k_2 - \\ & 2R_r R_s^2 k_1 k_2^2 + 2R_r^2 R_s k_1 k_2^2 - 2R_r^2 R_s k_2^3) \lambda + R_s^2 k_1^2 \omega_r^2 + \\ & R_r^2 k_2^2 \omega_r^2 - 2R_r^2 R_s^2 k_1 k_2^3 + R_r^2 R_s^2 k_2^4 = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

如果从式(10)求解,其解的形式非常复杂且不直观,对工程应用来说并无实际指导意义。对于一个指定的电机,将其定/转子电阻、互感、定/转子漏感参数代入式(1),可得数值矩阵 A ,并用Matlab软件中“eig”指令绘出全速度范围内其极点轨迹。本文以实际项目中所用的800 kW油田用电机为例,绘出极点轨迹,如图3所示。电机参数如表1所示。