

姚 玮, 施文济

(浙江水利水电专科学校电气工程系, 杭州 310018)

摘 要: 通过对异步电机的三种动态等效模型的数学推导, 分析了用于矢量控制的异步电机 T- 动态等效电路和用于直接转矩控制的异步电机 T- 动态等效电路及其特定的物理意义。

关键词: 异步电机; 动态等效电路; 矢量控制; 直接转矩控制

中图分类号: TM301.3; TM343 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-6540(2006)07-0021-04

Analysis of Three Type of Dynamic Equivalent Circuit of A Synchronous Motor

YAO Wei SHI Wen-ji

(Electrical Engineering Department, Zhejiang Water Conservancy and Hydropower College Hangzhou 310018, China)

Abstract Three type of dynamic equivalent circuit of asynchronous motor was figured out in this paper. T- type dynamic equivalent circuit for vector control and T- type dynamic equivalent circuit for direct torque control was analyzed and physical meaning was presented detailedly.

Key words asynchronous motor; dynamic equivalent circuit; vector control; direct torque control

0 引 言

目前, 变频器已经获得了广泛的应用, 各种变频控制技术不断发展。但是, 作为变频器控制对象的异步电机的数学模型在各种应用文章中较少有详细的讲述, 经常有忽略定子漏感或者转子漏感的讲法。其实在异步电机动态分析中(特别是在矢量控制和直接转矩中), 异步电机的等效模型中不出现定子漏感或转子漏感, 并不是忽略定子漏感的模型得到的, 而是通过恒功率变换得到的精确模型。本文就对异步电机 3 种动态等效电路进行分析推导, 并指出在 3 种等效电路中的励磁磁链的具体物理含义。

1 前提条件

异步电机是一个高阶、非线性、强耦合的多变量系统。对所讨论的三相异步电机作以下几点假设: 忽略空间谐波, 设三相绕组对称, 所产生的磁势沿气隙圆周按正弦分布(只有是正弦分布才

可以有矢量投影的关系); 忽略磁路饱和; 忽略铁心损耗; 不考虑频率和温度变化对绕组的影响。

三相电机的电压、电流、磁动势、磁链等均是三相电流量。因为磁势沿气隙圆周按正弦分布, 并且没有磁路饱和, 满足矢量空间的投影关系, 所以在复平面中, 可以用一个磁势矢量来表示三相磁势的合成作用。磁链同样可以由一个磁链矢量来表示。磁链由三相电流产生, 电压由电机电压产生, 由此可以虚拟认为有一个复平面的空间电压矢量和电流矢量, 从而将三维物理量变为二维物理量, 为分析和计算带来很多方便。这也就是 Park 矢量变换。

若用 $v_a(t)$ 、 $v_b(t)$ 、 $v_c(t)$ 分别表示三相电流量在三相坐标系中的瞬时幅值函数, 用 $v(t)$ 表示合成作用矢量, 则 Park 矢量变换关系为

$$v(t) = \frac{2}{3} [v_a(t) + v_b(t)e^{j2\pi/3} + v_c(t)e^{j4\pi/3}] \quad (1)$$

* 浙江省教育厅资助项目 (20040739)

矢量 $v(t)$ 称为 Park 矢量, 它在某一时刻值代表三相电磁量合成作用在坐标系中的空间位置, 所以也称为空间矢量。

2 异步电机定转子磁链方程

$$\text{定子磁链 } \Psi_s = L_s i_s + L_m i_r \quad (2)$$

$$\text{转子磁链 } \Psi_r = L_r i_r + L_m i_s \quad (3)$$

$$\text{励磁磁链 } \Psi_m = L_m (i_s + i_r) \quad (4)$$

式中: i_s, i_r ——定、转子电流矢量;

L_m ——定、转子绕组之间的互感;

L_s, L_r ——定、转子绕组全电感。

根据上述公式可画出电机定转子以及气隙磁链矢量图, 如图 1 所示。定子磁链由定子和转子电流共同决定, 转子磁链也如此。

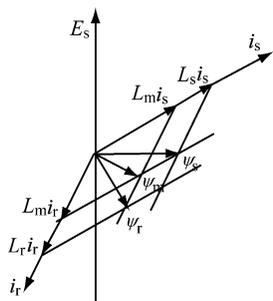


图 1 电机磁链矢量图

3 电压电流状态方程和等效电路

在静止 α - β 坐标下, 二相异步电动机定、转子绕组电压平衡方程式为:

$$\begin{cases} u_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + p\Psi_{s\alpha} \\ u_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + p\Psi_{s\beta} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} u_{r\alpha} = R_r i_{r\alpha} + p\Psi_{r\alpha} + e_{\omega_r\alpha} \\ u_{r\beta} = R_r i_{r\beta} + p\Psi_{r\beta} + e_{\omega_r\beta} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ ——定子电流矢量 i_s 的 α, β 分量, 即

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

$\Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}$ ——定子磁链矢量 Ψ_s 的 α, β 分量, 即 $\Psi_s = [\Psi_{s\alpha} \quad \Psi_{s\beta}]^T$;

$i_{r\alpha}, i_{r\beta}$ ——转子电流矢量 i_r 的 α, β 分量, 即

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

$\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}$ ——转子磁链矢量 Ψ_r 的 α, β 分量, 即 $\Psi_r = [\Psi_{r\alpha} \quad \Psi_{r\beta}]^T$;

$u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ ——定子电压矢量 u_s 的 α, β 分量, 即

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

$u_{r\alpha}, u_{r\beta}$ ——转子电压矢量 u_r 的 α, β 分量, 即

$$u_r = [u_{r\alpha} \quad u_{r\beta}]^T;$$

$e_{\omega_r\alpha}, e_{\omega_r\beta}$ ——转子速度电动势矢量的 α, β 分量, 即 $e_{\omega_r} = [e_{\omega_r\alpha} \quad e_{\omega_r\beta}]^T$;

R_s, R_r ——定、转子绕组电阻;

ω_r ——转子角速度;

p ——微分算子。

其中速度电动势:

$$\begin{cases} e_{\omega_r\alpha} = \omega_r \Psi_{r\beta} \\ e_{\omega_r\beta} = -\omega_r \Psi_{r\alpha} \end{cases} \quad (7)$$

磁链的电流和电感表示式:

$$\begin{cases} \Psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha} \\ \Psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_m i_{r\beta} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \Psi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha} \\ \Psi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta} \end{cases} \quad (9)$$

将式 (3)、式 (4)、式 (7~9), 代入式 (5) 和式 (6), 经整理可得到下列电压电流关系矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \\ u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} (R_s + L_s p) & 0 & L_m p & 0 \\ 0 & (R_s + L_s p) & 0 & L_m p \\ L_m p & \omega_r L_m & (R_r + L_r p) & \omega_r L_r \\ -\omega_r L_m & L_m p & -\omega_r L_r & (R_r + L_r p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据式 (10), 可得异步电动机定转子电压及电流矢量的关系:

$$\begin{bmatrix} u_s \\ u_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & L_m p \\ L_m (p - j\omega_r) & R_r + L_r (p - j\omega_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (11)$$

式 (11) 中的矢量与式 (10) 标量的关系, 以定子电压为例, 写成 $u_s = u_{s\alpha} + j u_{s\beta}$ 形式, 则可证明式 (10) 与式 (11) 是等价的。观察上式, 定、转子电压平衡方程式中都包括 $L_m p (i_s + i_r)$, 可得到 T 型动态等效电路如图 2 所示。这是一种场路结合的分析方法, 定、转子相互之间通过励磁磁链耦合起来, 励磁磁链 $\Psi_m = L_m i_s + L_m i_r$; 定子磁链为励磁磁链与定子漏磁链之和; 转子磁链为励磁磁链与转子漏磁链之和; 磁场问题最后通过电路拓扑的形式

加以描述。

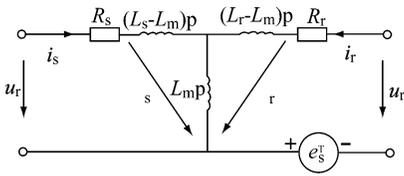


图 2 T型瞬态等效电路

图 2中, 转子运动电势

$$e_s^T = -j\omega_r L_m i_s - j\omega_r L_r i_r = -j\omega_r \Psi_r \quad (13)$$

图中电路同定子绕组匝数不变、转子绕组的匝数变化 α 倍的电路等效, 称为 T型变换。根据恒功率原则, 其方程为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_s \\ \alpha \mathbf{u}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & \alpha L_m p \\ \alpha L_m (p - j\omega_r) & \alpha^2 R_r + \alpha^2 L_r (p - j\omega_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r / \alpha \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中转子的电压乘以系数 α 转子电流除以 α 功率保持不变。

根据上面介绍的分析方法, 定、转子电压平衡方程式中都包括 $\alpha L_m p(i_s + i_r)$, 得到 T型动态等效电路一般形式如图 3所示。

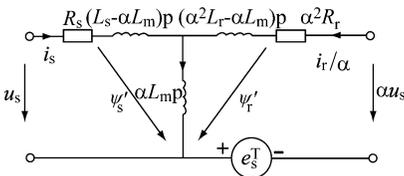


图 3 T型动态等效电路一般形式

定子磁链

$$\Psi'_s = (L_s - \alpha L_m) i_s + \alpha L_m (i_s + \frac{i_r}{\alpha}) = L_s i_s + L_m i_r = \Psi_s \quad (15)$$

转子磁链

$$\begin{aligned} \Psi'_r &= (\alpha^2 L_r - \alpha L_m) \frac{i_r}{\alpha} + \alpha L_m (\frac{i_r}{\alpha} + i_s) = \alpha(L_r i_r + L_m i_s) = \alpha \Psi_r \quad (16) \\ L'_r &= \alpha L_m + (\alpha^2 L_r - \alpha L_m) = \alpha^2 L_r \quad (17) \end{aligned}$$

图中 $e_s^T = -j\omega_r \alpha L_m i_s - j\omega_r \alpha^2 L_r \frac{i_r}{\alpha} = -j\omega_r \Psi'_r$ (18)

α 可取不同值, 取 $\alpha = 1$ $\alpha = L_m / L_r$ $\alpha = L_s / L_m$ 都有具体物理意义。即在等效电路中的励磁支路的磁链可以分别代表气隙磁链、转子磁链和定子磁链。

4 T-、T- 动态等效电路

当 $\alpha = 1$ 时, 即为 T型动态等效电路, 如图 3所示。

当 $\alpha = L_m / L_r$ 时, 即为 T- 型动态等效电路 (见图 4), 转子的漏感正好为 σ

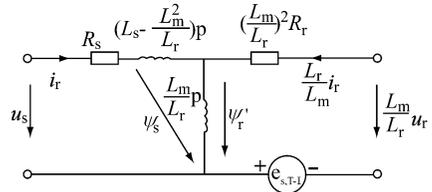


图 4 T- 型动态等效电路

图 4中:

$$e_{s,T-} = -j\omega_r \frac{L_m^2}{L_r} i_s - j\omega_r L_m i_r = -j\omega_r \Psi'_r \quad (19)$$

$$\text{励磁磁链为 } \frac{L_m^2}{L_r} (i_s + \frac{L_r}{L_m} i_r) = \frac{L_m}{L_r} (L_m i_s + L_r i_r) =$$

$\frac{L_m}{L_r} \Psi$, 励磁电感为 $\frac{L_m^2}{L_r}$ 、转子电流为 $\frac{L_r}{L_m} i$ 定子电流不变。该图中励磁磁链正好为实际的转子磁链乘以一个系数。该等效电路用于分析以转子磁场定向的矢量控制是非常方便的, 是一个精确的模型, 而不是近似的忽略了转子漏感的等效电路。

知道定子电压电流就可计算出励磁磁链, 乘以系数 L_m / L_r 即实际的转子磁链。

取 $\alpha = L_s / L_m$ 即为 T- 型动态等效电路 (如图 5), 根据图 3 定子的漏感正好为 σ

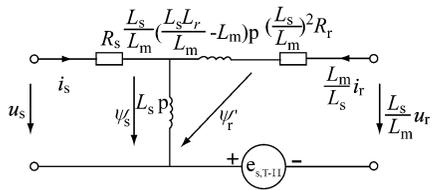


图 5 T- 型动态等效电路

图 5中:

$$e_{s,T-} = -j\omega_r L_s i_s - j\omega_r \frac{L_s L_r}{L_m} i_r = -j\omega_r \Psi'_r \quad (20)$$

励磁磁链为 $L_s (i_s + \frac{L_m}{L_s} i_r) = L_s i_s + L_m i_r = \Psi$,

正好为实际的定子磁链, 励磁电感为 L_s , 转子电流为 $L_m i_r / L_s$ 。该等效电路通常用于分析直接转矩控制。在直接转矩控制中要求直接控制定子磁链, 定子磁链是通过控制定子电压获得的。该电路也是精确的模型, 而不是忽略定子漏感获得的模型。

5 结 语

异步电机有静态的等效电路和动态等效电路, 静态等效电路是由采用和变压器分析类似的方式推导出来的, 适合分析异步电机的静态情况; 动态等效电路是由 Park 矢量变换和恒功率变换, 把异步电机的电路和磁场的问题归结为电路的问

(上接第 20 页)

题 (上接第 20 页); 或使转差率 s 与极对数 p 的 1.6 次方成正比。这 2 个条件也是相关的。由以上 2 个例子可见, C_8 / C_5 数值变化对 B_s 变极条件影响不很大。

4 结 语

上面从损耗最小效率最高出发, 得出风机电动机高效率变极设计的原则。风机电动机采用高效率变极原则设计, 可以保证电动机高速档时功率最大, 同时保证高、低速档效率最高, 这样就保证了风机电动机整机功率的提高。在具体设计时, 因变极时气隙磁密比是由变极接法和变极方

题推导出来的, 适用于分析电机的动态、静态运行情况。其中的 T- 动态等效电路和 T- 动态等效电路是分析设计异步电机的矢量控制和直接转矩控制的直观的对象, 有非常明显的物理意义, 它们拓扑结构中的励磁磁链分别代表了实际电机的转子磁链和定子磁链, 给设计异步电机的矢量控制和直接转矩控制提供了直观的数学对象。

参 考 文 献】

- [1] 陈坚. 交流电机数学模型及调速系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [2] 胡崇岳. 现代交流调速技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

收稿日期: 2005-11-21

案的绕组系数共同决定的, 所以给定极比后, 应选择最合适的变极接法、变极方案以及变极前后绕组系数比值, 使之符合风机电动机高效率变极的要求。

参 考 文 献】

- [1] 黄国治, 傅丰礼. Y2 系列三相异步电动机技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [2] 陈世坤. 电机设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [3] 吴大榕. 电机学 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1979.

收稿日期: 2006-03-13

中国首条永磁悬浮线路大连开建

大连永磁悬浮课题组近日对外宣布, 磁动机技术已经研发成功, 今年内计划在大连市开始修建一条 3 km 长的永磁悬浮线路, 这将是拥有自主知识产权的第一条永磁悬浮列车线路。

即将修建的永磁悬浮线路具体位置目前还没有最终确定。线路主要作为永磁悬浮技术在实际应用中的一个检测线, 并不排除同时用做旅游观光的可能。

课题组目前研制出了两类磁动机, 最高运行速度可达每小时 536 km, 已经在“中华 6 号”轻型吊轨磁悬浮技术验证车上试用成功。

目前世界上有 3 种类型的磁悬浮。一是以德国为代表的常导电式磁悬浮, 二是以日本为代表的超导电动磁悬浮, 这两种磁悬浮都需要用电力来产生磁悬浮动。而第三种就是中国的永磁悬浮, 它利用特殊的永磁材料, 不需要任何其他动力支持。

<http://www.ca800.com/06/6-20/n45475.asp>