

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.04.010

基于全阶磁链观测器的间接定子量控制系统

李文锋, 黄 钦, 李祥飞

(湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 分析了基于定子磁链定向的异步电机间接定子量控制的原理, 通过磁链的幅值和位角增量来计算空间电压矢量。以定子磁链和转子磁链为状态变量, 构造了感应电机全阶磁链观测器。并采用 Matlab 对该控制方案进行仿真, 结果表明, 基于全阶磁链观测器的间接定子量控制系统有很强的鲁棒性, 且具有较好的动态和稳态性能。

关键词: 异步电机; 间接定子量控制; 全阶磁链观测器

中图分类号: TM301.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2012)04-0042-04

The Indirect Stator-Quantities Control System Based on the Full Order Flux Observer

Li Wenfeng, Huang Qin, Li Xiangfei

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The principle of stator-flux-oriented indirect stator-quantities control of asynchronous motor is analyzed, and the space voltage vector is calculated according to the phase increment and range increment of stator flux. A full order flux observer of induction motor is constructed with stator flux and rotor flux as state variables. The control method is simulated with Matlab, the result shows that the indirect stator-quantities control system based on the full order flux state observer has strong robustness, and also has good dynamic and steady response performance.

Keywords: asynchronous motor; indirect stator-quantities control ; full order flux observer

0 引言

直接转矩控制^[1] (direct torque control, DTC) 是继矢量控制后发展起来的一种高性能的交流变频调速控制方法, 它不需要经过复杂的坐标变换, 可以直接在定子坐标系中对磁链和转矩进行控制, 因而很大程度上解决了矢量控制计算复杂, 易受电机参数变化的影响等问题。六边形磁链轨迹的 DTC 具有结构简单、转矩响应速度快等优点, 因而得到了广泛的应用。但是由于它采用的是磁链和转矩的 bang-

bang 控制, 不可避免地造成了转矩脉动大, 开关频率不固定, 特别是低速性能差等缺点。德国鲁尔大学的 Dependbrock 和 Steimel 教授针对这些问题提出了 DTC 的改进方案——间接定子量控制^[2]。间接定子量控制通过计算磁链矢量的增量 (包括幅值和相位) 来实现对逆变器的控制, 该方法在保证磁链轨迹为圆形的基础上, 对转矩进行调节, 具有很好的稳态和动态性能, 转矩脉动小, 开关频率恒定, 具有很好的应用前景^[3-6]。

状态观测器在控制系统中具有很重要的作用,

收稿日期: 2012-06-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61273157), 湖南省教育厅青年科研基金资助项目 (09B25)

作者简介: 李文锋 (1988-), 男, 河南许昌人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为变频调速系统, E-mail: lwf912@163.com

通过引入适当的状态反馈,可以实现系统的极点配置,高性能的交流传动都需要通过状态观测器来保证系统的控制性能。为了验证间接定子量控制和状态观测器的有效性,本文介绍了间接定子量控制的基本原理,由于定子磁链和转子磁链的精确性对电机调速有至关重要的作用,因此采用全阶磁链观测器对定子磁链和转子磁链进行在线辨识,最后利用 Matlab 进行了仿真。仿真结果验证了基于磁链观测器的间接定子量控制方法具有很强的鲁棒性。

1 间接定子量控制的原理

间接定子量控制是由当前转矩给定值、定子磁链给定值、定子电流的检测值以及实际磁链和转矩的计算值来确定当前控制周期与上一控制周期的定子磁链空间矢量的增量,然后根据此增量计算当前控制周期的定子电压矢量,从而实现异步电动机的控制。

定子磁链矢量增量的轨迹如图 1 所示,用 $\psi_\mu(k)$ 和 $\psi_\mu(k-1)$ 分别表示第 k 和第 $k-1$ 时刻的定子磁链空间矢量, $\Delta\psi_\mu(k)$ 表示定子磁链空间矢量 $\psi_\mu(k)$ 和 $\psi_\mu(k-1)$ 在一个控制周期内的差值,则 $\Delta\psi_\mu(k)$ 可表示为

$$\Delta\psi_\mu(k) = \psi_\mu(k) - \psi_\mu(k-1) = \left\{ (1+k_p(k)) \cdot e^{j\Delta X_\mu(k)} - 1 \right\} \cdot \psi_\mu(k-1), \quad (1)$$

式中: $k_p(k)$ 表示定子磁链空间矢量从第 $k-1$ 到第 k 时刻的幅值增量, $\Delta X_\mu(k)$ 表示定子磁链空间矢量从第 $k-1$ 到第 k 时刻的位角增量。

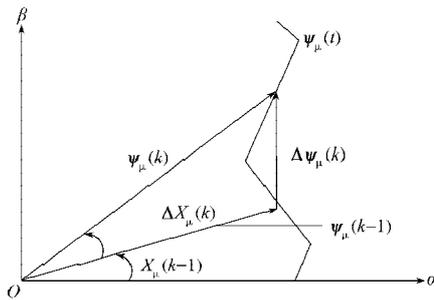


图1 定子磁链矢量增量轨迹

Fig. 1 Incremental track of the stator flux vector

由于高频开关器件的脉冲周期小,定子磁链的位角增量 $\Delta X_\mu(k)$ 和定子磁链幅值增量 $k_p(k)$ 总是较小,因此,可将式(1)近似表示为

$$\Delta\psi_\mu(k) \approx [k_p(k) + j\Delta X_\mu(k)] \cdot \psi_\mu(k-1). \quad (2)$$

定子磁链的幅值增量 $k_p(k)$ 由定子磁链给定值 $\psi_\mu^*(k)$ 和定子磁链的实际值 $|\psi_\mu(k)|$ 的偏差经比例调节

器得到;定子磁链的位角增量 $\Delta X_\mu(k)$ 由动态位角增量 $\Delta X_{\mu d}(k)$ 和稳态位角增量 $\Delta X_{\mu o}(k)$ 两部分组成,而动态位角增量 $\Delta X_{\mu d}(k)$ 由转差频率给定值 $\omega^*(k)$ 和实际转差频率 $\omega(k)$ 经过比例调节器得到,稳态位角增量 $\Delta X_{\mu o}(k)$, 将 $\omega^*(k)$ 和 $\omega_r(k)$ 之和在一个采样周期内进行积分即可计算得出。

由于脉冲周期非常小,可近似认为在某个脉冲周期结束时刻,输出的电压矢量等于这个脉冲周期的电压平均值,由此可得空间电压矢量的表达式为

$$u_s(k) = R_s i_s(k) + \Delta\psi_\mu(k)/T_s. \quad (3)$$

2 全阶磁链观测器

为了提高磁链在低速时的观测精度,必须克服传统的电压、电流等模型的缺点。而采用全阶磁链观测器能够实现对定子磁链的准确观测,且其对电机参数的变化具有很强的鲁棒性。故本研究中以定、转子磁链为状态变量,定子电压为输入量,定子电流为输出量。在两相 α, β 静止坐标系中,异步电动机的全阶状态方程为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{pmatrix} + B u_s = A X + B u_s, \\ i_s = C X. \end{cases} \quad (4)$$

式中: $A_{11} = -R_s L_r \sigma I$, 其中, R_s 为定子电阻, L_r 为转子电感, $\sigma = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2}$, $I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$;

$A_{12} = R_s L_m \sigma I$, 其中 L_m 为互感;

$A_{21} = R_r L_m \sigma I$, 其中 R_r 为转子电阻;

$A_{22} = -R_r L_s \sigma I + \omega J$, 其中, L_s 为定子电感, ω 为转

差频率, $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$;

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, u_s = \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \text{ 其中 } u_{s\alpha}, u_{s\beta} \text{ 分别为定}$$

子电压的 α, β 分量;

$$C = \sigma \begin{bmatrix} L_r & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & L_r & 0 & -L_m \end{bmatrix}.$$

由式(4)可以构造一个全阶磁链观测器,即

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \hat{X} = A \hat{X} + B u_s + H (\hat{i}_s - i_s), \\ \hat{i}_s = C \hat{X}, \end{cases} \quad (5)$$

其中: “ $\hat{\cdot}$ ” 表示估计值, H 表示误差反馈增益矩阵。

设磁链估计误差 $e = X - \hat{X}$ ，则系统的动态误差矩阵方程为

$$\frac{de}{dt} = [A + HC] \cdot e \quad (6)$$

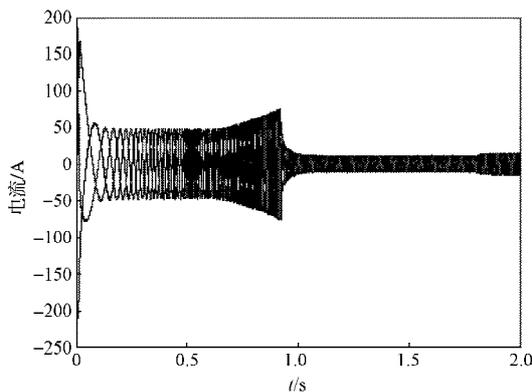
由于该系统是完全能观测的，因而可以通过合理地设计矩阵 H ，以使得 $[A + HC]$ 有期望的极点轨迹。估计误差 e 的收敛速度取决于矩阵 $[A + HC]$ 的极点配置，而通过合理设计增益矩阵 H ，可以合理地配置状态观测器的极点位置，使误差 e 以较快的速度达到稳定。如果 $[A + HC]$ 是稳定的，则无论初始误差为何值，误差 e 最终都趋于零，也就是说，不管磁链的初始值为何值，观测值最终都会趋于该初始值。本研究中采用科研工作者构造出的一种反馈矩阵，其中有多元素为零，该矩阵 H 既能够减少运算量，又能够满足相应的设计要求，其形式如下：

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & -h_2 & 0 \\ 0 & h_1 & 0 & -h_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

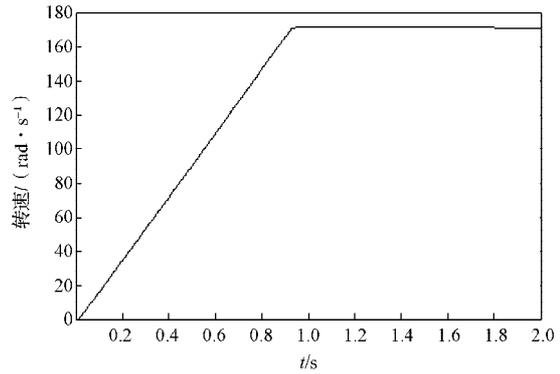
3 仿真分析

为了验证本文所述控制方案的可行性，现拟利用Matlab/Simulink对一台功率为29 kW的异步电机进行仿真。仿真过程中，具体的参数设置如下：定子电阻 $R_s = 0.1165 \Omega$ ，转子电阻 $R_r = 0.14958 \Omega$ ，漏电感 $L_{\sigma} = 0.00217 \text{ H}$ ，互感 $L_m = 0.65540 \text{ H}$ ，极对数 $P_n = 2$ ，额定频率 $f = 28 \text{ Hz}$ 。

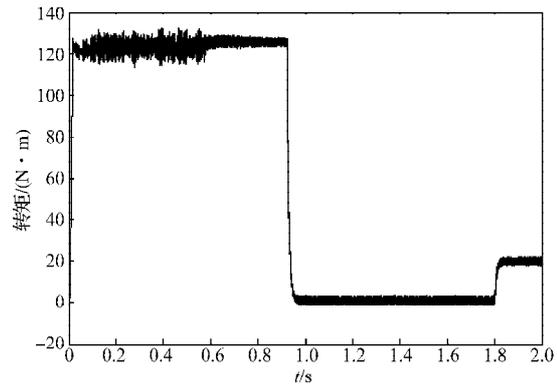
图2是采用间接定子量控制的异步电机的仿真结果，分别为定子电流、转子转速、电磁转矩、定子磁链的波形。从图2中可以看出，定子磁链的轨迹呈圆形，定子电流为正弦波，在0.6 s后开始出现弱磁现象，转速上升，定子电流变大；在1.8 s时突加负载转矩，电磁转矩迅速跟着上升，且响应速度较快，转矩脉动较小。从图b中可以看出，在突加负载时，转速基本上没有出现脉动现象，系统具有较好的动态和稳态特性。



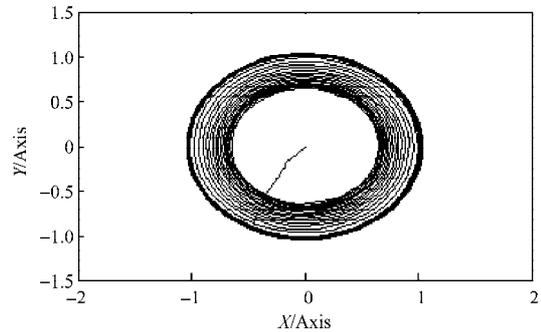
a) 定子电流波形



b) 转子转速曲线



c) 电磁转矩响应曲线

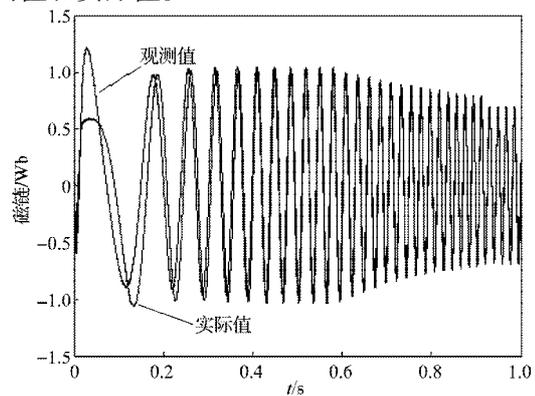


d) 定子磁链

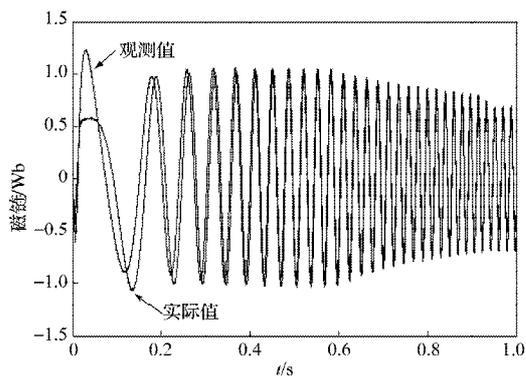
图2 间接定子量控制系统仿真结果

Fig. 2 The simulation results of indirect stator-quantities control system

图3显示了定子电阻变化时，定子磁链 α 分量的观测值和实际值。



a) 定子电阻为 R_s

b) 定子电阻为 $1.3R_s$ 图3 定子磁链 α 分量的观测值和实际值Fig. 3 The observed value and the actual value of α component of stator flux

从图 a 中可以看出, 定子电阻为 R_s 时, 定子磁链 α 分量的观察值跟实际值非常接近, 也就是说, 采用全阶磁链观测器能够较好地观测磁链, 使该控制系统具有较高的精度。图 b 为定子电阻 R_s 变为原来的 1.3 倍时实际磁链和观测到的磁链曲线, 从图中可以发现, 观测值跟实际值之间仍然非常接近, 这进一步说明全阶磁链观测器对定子电阻的变化具有很强的鲁棒性。

4 结语

为了探讨直接转矩控制低速区的控制问题, 本文采用间接定子量控制方案, 同时采用全阶磁链观测器对磁链进行观测, 仿真结果表明, 基于全阶磁链观测器的磁链观测方法, 对电机参数变化具有很强的鲁棒性, 因此该方法具有较强的现实意义和良好的应用前景。

参考文献:

- [1] M·德潘布洛克. 逆变器供电感应电动机的直接自动控制 (DTC)[J]. 电力电子, 2004, 2(3): 58-59.
Dependbrock M. Direct Self Control (DTC) of Inverter-Fed Induction Machine[J]. Power Electronics, 2004, 2(3): 58-59.
- [2] 胡崇岳. 现代交流调速技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 166-200.
Hu Chongyue. Modern AC Speed Regulation Technology [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2001: 166-200.
- [3] 冯江华, 陈高华, 黄松涛. 异步电动机的直接转矩控制[J]. 电工技术学报, 1999, 14(3): 29-33.
Feng Jianghua, Chen Gaohua, Huang Songtao. Direct Self-Control (DSC) of Asynchronous Motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1999, 14(3): 29-33.
- [4] 李祥飞, 邹莉华. 基于全阶磁链观测器的间接转矩控制研究[J]. 电力电子技术, 2007, 41(9): 33-35.
Li Xiangfei, Zou Lihua. Research on Indirect Torque Control Based on Full Order Flux Observer[J]. Power Electronics, 2007, 41(9): 33-35.
- [5] 王 坚, 桂卫华, 李祥飞, 等. 基于恒定开关频率空间矢量调制的异步电机间接转矩控制[J]. 电工技术学报, 2007, 22(6): 35-40.
Wang Jian, Gui Weihua, Li Xiangfei, et al. Space Vector Modulated Based on Constant Switching Frequency Indirect Torque Control for Induction Motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(6): 35-40.
- [6] Hinkkanen M. Analysis and Design of Full-Order Flux Observers for Sensorless Induction Motors[J]. IEEE Trans. Ind. Applicat., 2004, 51(5): 1033-1040.

(责任编辑: 廖友媛)