

异步电机直接转矩控制的仿真研究

周 伟, 陈 浩, 庄圣贤*

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:在异步电动机 $\alpha-\beta$ 坐标系下介绍了异步电动机的数学模型、直接转矩控制(DTC)系统的工作原理和基本组成。针对直接转矩控制系统存在的转矩脉动问题,给出了一种新型的定子磁链控制器和转矩控制器,采用新型的电压矢量选择表代替传统的电压矢量选择表。并在 Matlab/Simulink 平台上搭建了异步电动机直接转矩控制调速系统的仿真模型,并对仿真模型中的主要模块进行了描述,简要说明了空间电压矢量的选择对转矩和磁链的作用和影响。仿真结果验证了该模型的正确性和整个系统的快速动态响应特性。

关键词:异步电动机;直接转矩控制;Matlab/Simulink

中图分类号:TH13;TP273

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)07-0014-05

Simulation research of asynchronous motor direct torque control

ZHOU Wei, CHEN Hao, ZHUANG Sheng-xian

(College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The mathematics model of asynchronous motor, the basic components and principle of direct torque control(DTC) were introduced based on asynchronous motor $\alpha-\beta$ coordinate system. Aiming at the electromagnetic torque ripple of DTC, a novel stator flux and electromagnetic torque controller was presented and the traditional stator voltage vector choice form was taken place by a new one. The main modules of the simulation system were described and how the choice of space voltage vector affects the motor's flux and electromagnetic torque was illustrated. The simulation model of asynchronous motor DTC speed regulation system was established on Matlab/Simulink. The results indicate the correctness of the model and rapid dynamical response of the whole system.

Key words: asynchronous motor; direct torque control(DTC); Matlab/Simulink

0 引 言

直接转矩控制(DTC)技术是上世纪 80 年代中期发展起来的新技术。它是继矢量控制技术之后发展起来的一种新型的高性能交流调速传动控制技术。直接转矩控制技术采用空间矢量的分析方法,直接在定子坐标系下计算和控制交流电机的转矩,采用定子磁场定向,借助两点式(Band-Band)调节产生 PWM 信号,直接对逆变器的开关状态进行控制,以获得转矩的高动态性能。该控制系统的转矩响应迅速,是一种具有高静态性能的交流调速方法^[1-2]。

随着经济的发展,在诸多领域里利用高性能的交流调速逐步替代价格较高的直流调速是一个趋势。而直接转矩控制是高性能交流调速技术中潜力最大的一种,而且其控制方法本身非常适合全数字化实现,这一点正和现在飞速发展的电子技术相适应,所以对其进行深入的研究具有良好的现实意义^[3]。本研究着重分析如何根据磁链滞环调节和转矩滞环调节结果,以及磁链所在扇区进行最优的逆变器开关选择,通过灵活运用 Matlab 的强大仿真功能建立直接转矩控制仿真系统,对直接转矩控制方法的特点及其存在的问题进行仿真分析研究。

收稿日期:2010-03-19

作者简介:周 伟(1985-),男,四川绵阳人,硕士研究生,主要从事电机控制与电源变换方面的研究. E-mail:zhouxpo1003@163.com

通信联系人:庄圣贤,男,教授,博士生导师. E-mail: zhangsx@sina.com

1 异步电动机的数学模型

异步电动机是一个高阶、非线性、强耦合的多变量系统,为了便于分析,在建立其数学模型时,将做些允

$$P \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\delta} \begin{bmatrix} -R_s L_r & 0 & R_r L_m & 0 \\ 0 & -R_s L_r & 0 & R_r L_m \\ R_s L_m & 0 & -R_r L_s & 0 \\ 0 & R_s L_m & 0 & -R_r L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \frac{1}{\delta} \omega_r \begin{bmatrix} 0 & L_m^2 & 0 & L_m L_r \\ -L_m^2 & 0 & -L_m L_r & 0 \\ 0 & -L_m L_r & 0 & L_r L_s \\ L_m L_s & 0 & -L_r L_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \\ -L_m & 0 \\ 0 & -L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $\delta = L_s L_r - L_m^2$ 。

(2) 磁链方程:

$$\begin{bmatrix} \psi_{s\alpha} \\ \psi_{s\beta} \\ \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} \quad (2)$$

(3) 转子运动方程:

$$\frac{J d\omega_r}{P_n dt} = T_e - T_L \quad (3)$$

式中 J —电动机的转动惯量; P_n —电动机的极对数; T_L —电动机外加的负载转矩。

(4) 电磁转矩方程:

$$T_e = \frac{3}{2} P_n (\psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (4)$$

异步电动机的电磁转矩方程有多种表达形式,本研究建模所使用的数学模型如上式所示。

2 直接转矩控制系统原理与建模

直接转矩控制系统结构如图1所示,主要包括转矩计算、磁链计算、转矩、磁链滞环调节器及转速PI调节等,通过转矩和磁链环选择合适的电压矢量,调节电机转矩和定子磁链快速跟踪给定值,以达到通过电机定子磁链控制电磁转矩的目的^[6-7]。

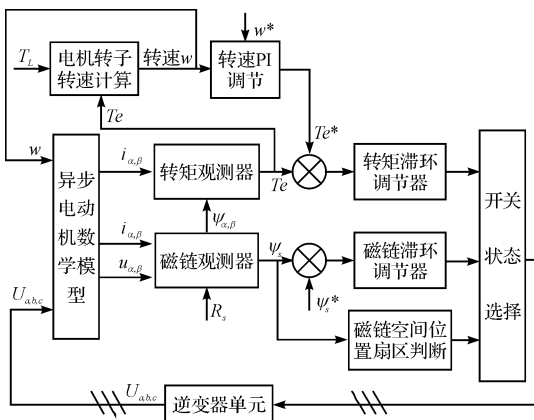


图1 直接转矩控制系统结构图

许范围内的假设^[4-5]。在 $\alpha - \beta$ 静止坐标系下,异步电动机的磁链方程、标准状态方程、转子运动方程及转矩方程如下:

(1) 标准状态方程:

2.1 异步电动机建模

Simulink 是一个开放的编程环境,并带有大量的功能模块,用户可以通过简单的操作建立自己的模型,然后直接进行仿真。

由式(1)可知,异步电机电压电流模型是4阶时变的状态空间模型,本研究通过编写S函数生成了电机模型,如图2所示。根据式(3)可得到电机转子转速模型,如图3所示。

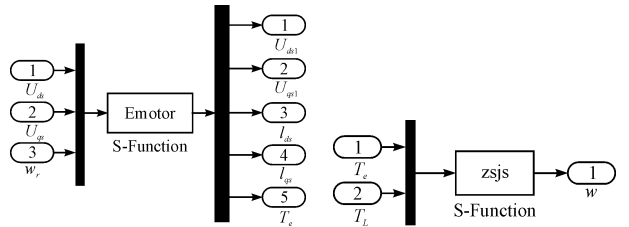


图2 电机仿真模型 图3 电机转子转速仿真模型

2.2 磁链和转矩观测器模型

异步电动机的定子磁链模型有多种,如电压-电流型、电流-转速型和电压-转速型等,本研究采用电压-电流定子磁链观测器模型,其数学表达式为:

$$\vec{\psi}_s = \int (\vec{U}_s - \dot{I}_s R_s) dt \quad (5)$$

根据式(4)、式(5)可以得到异步电动机的磁链和转矩观测器的仿真模型,如图4所示。

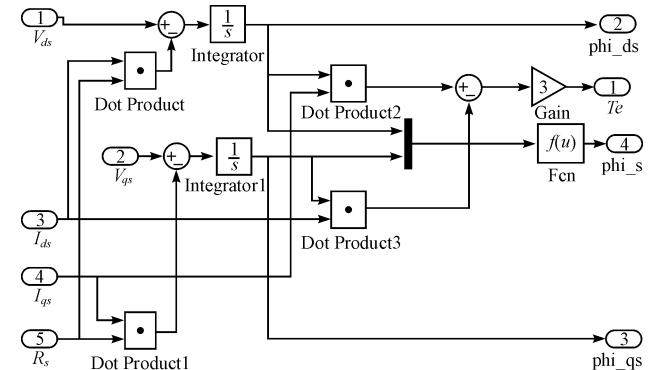


图4 磁链和转矩观测器仿真模型

2.3 磁链和转矩调节器模型

磁链调节是使定子磁链幅值在给定值所允许范围内波动,而此波动范围就是给定的容差 $\pm \epsilon_{\psi}$ 。磁链调

节器的结构实际上是施密特触发器,对磁链幅值进行两点式调节。

为了控制转矩,转矩控制必须具备两个功能:一个功能是转矩控制器直接调节转矩;另外一个功能是在调节转矩的同时,控制定子磁链的旋转方向,以加强转矩的调节。这里转矩调节器采用双滞环控制器,对转矩进行三点式调节,其输入为 ΔT_e ,输出值为转矩控制信号 0、1、2,其仿真模型需要两个施密特触发器。

2.4 磁链所在扇区判断模型

判断定子磁链所在扇区的方法很多,本研究采用一种很简单的判定方法。为便于判断定子磁链当前的空间位置,可将三相轴线旋转成如图 5 所示,变为

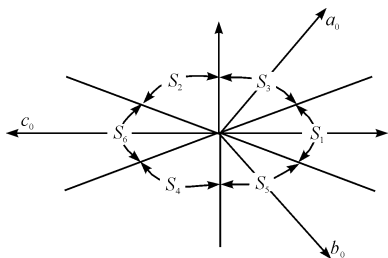


图 5 磁链空间位置

a_0 、 b_0 、 c_0 ,那么磁链在这 3 个坐标上的投影为:

$$\begin{aligned} \psi_{a_0} &= \frac{\psi_{s\alpha}}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}\psi_{s\beta} \\ \psi_{b_0} &= \frac{\psi_{s\alpha}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}\psi_{s\beta} \\ \psi_{c_0} &= -\psi_{s\alpha} \end{aligned} \quad (6)$$

定义开关函数如下:

$$S_k = \begin{cases} 0 & \psi_k \geq 0 \\ 1 & \psi_k < 0 \end{cases} \quad (k = a_0, b_0, c_0) \quad (7)$$

通过 S_k 就可以很容易判断定子磁链所在的扇区,设 $4S_{a_0} + 2S_{b_0} + S_{c_0} = N$,则定子磁链在 SN 扇区 ($N = 1, 2, 3, 4, 5, 6$)。据此可以得到磁链所在扇区判断的仿真模型,该模型主要用 m 文件编写的程序。

2.5 转速 PI 调节器模型

转速比例积分调节器将反馈回来的转速当前值和转速给定值进行比较,通过比例-积分调节器的调节得到转矩给定值,恰当的选择比例和积分部分的系数可控制输出的超调量^[8],较快地调节最大转矩,其仿真模型如图 6 所示。

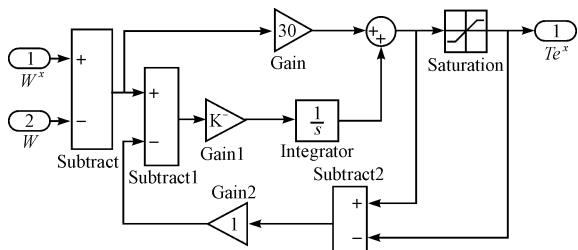


图 6 转速 PI 调节器仿真模型

2.6 逆变器开关状态选择模型

逆变器 6 个可能的工作电压状态输出 6 个工作电压空间矢量,即 $U_1(001)$ 、 $U_2(010)$ 、 $U_3(011)$ 、 $U_4(100)$ 、 $U_5(101)$ 、 $U_6(110)$ 。而定子磁链空间矢量的运动方向由电压空间矢量的方向确定,因此磁链只能在这 6 个方向上运行。用 6 个电压空间矢量组合的方法,就可以实现近似圆形磁链轨迹的运行方式。只要每个区间中电压状态数目足够多,磁链轨迹就能足够逼近圆形。这就要求根据转矩调节器、磁链调节器和磁链空间矢量所在扇区等控制单元综合考虑,选择相应的电压空间矢量。最优的电压空间矢量的选择不但可以得到最好的磁链轨迹,减小转矩脉动,而且能减小开关器件的动作频率^[9-10]。所以正确合理的开关状态选择在直接转矩控制系统中至关重要。

下面本研究以定子磁链逆时针旋转为例说明如何综合考虑定子磁链和转矩状态来选取电压空间矢量,假设定子磁链位于 S_1 扇区,如图 7 所示。

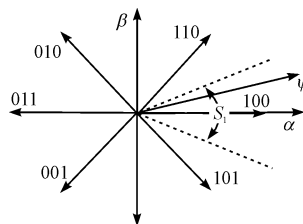


图 7 电压空间矢量的选取

当转矩达到下限值时,需要用非零电压矢量来增加转矩,此时分两种情况:①定子磁链幅值也达到下限值则用电压矢量 U_6 ,以获得同时增加转矩和磁链的效果;②定子磁链幅值达到上限则用电压矢量 U_2 ,以获得增加转矩和减小磁链的效果。当转矩达到上限时,则采用零电压矢量 U_0 或 U_7 ,获得最慢速度减小转矩和维持定子磁链基本不变的目的。总之,在扇区 S_1 ,通过 U_0 、 U_7 和工作电压矢量 U_1 、 U_2 、 U_5 、 U_6 间的不断切换,就能实现以转矩控制为中心的转矩和磁链的协调控制,其他扇区分析方法类似^[11-12]。此时的开关状态表如表 1 所示。

表 1 开关状态选择表

$S\psi, ST, SN$	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
$ST=0$	U_1	U_4	U_5	U_2	U_3	U_6
$S\psi=0$	$ST=1$	U_0	U_0	U_7	U_0	U_7
	$ST=2$	U_2	U_1	U_3	U_4	U_5
	$ST=0$	U_5	U_6	U_4	U_3	U_1
$S\psi=1$	$ST=1$	U_7	U_7	U_0	U_7	U_0
	$ST=2$	U_6	U_3	U_2	U_5	U_4

据此通过查表的方式,本研究编写了逆变器开关

状态选择的仿真模型,其输入为磁链滞环比较器、转矩比较器及扇区判断的模块的输出值,输出为定子两相坐标系下的电压,该模块主要功能用 m 文件编程实现。

将以上介绍的各个模块封装成简洁的子模块,便可以搭建结构简单明了的异步电动机直接转矩控制系统的仿真模型,如图8所示。

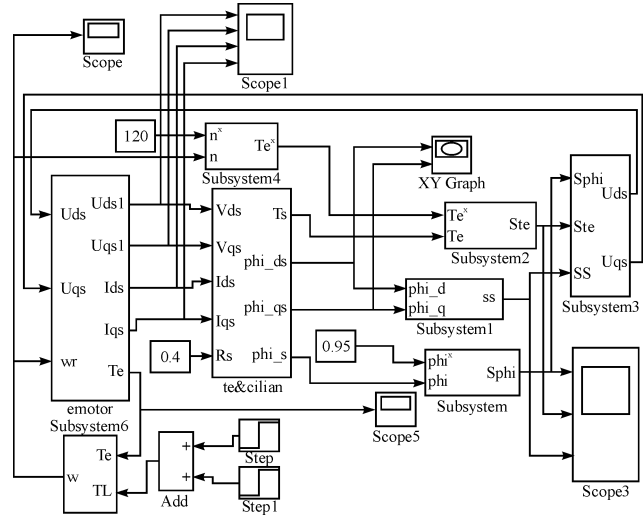


图8 直接转矩控制系统仿真模型

3 仿真结果及分析

仿真中的主要参数如下: $R_s = 0.4 \Omega$; $R_r = 0.5 \Omega$; $L_s = 0.086 \text{ mH}$; $L_m = 0.089 \text{ mH}$; $P_n = 2$; $J = 0.088 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

在仿真过程中,定子磁链幅值给定值为 0.8 Wb ,磁链滞环比较器容差为 0.01 Wb ;转矩滞环比较器容差为 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$;在 $0 \leq t \leq 0.4 \text{ s}$ 范围内,速度给定值 $\omega^* = 100 \text{ rad/s}$; $t > 0.4 \text{ s}$ 时, $\omega^* = 150 \text{ rad/s}$ 。在 $0 \leq t \leq 0.2 \text{ s}$ 范围内时,负载转矩给定值 $T_L = 0 \text{ N} \cdot \text{m}$;在 $t > 0.2 \text{ s}$ 时,负载转矩给定值 $T_L = 40 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。在以上参数下,得到的仿真结果如图9所示。保持其他参数不变,改变磁链滞环比较器的容差,得到的定子磁链轨迹如图10所示。

从速度和转矩变化波形可以看出,直接转矩控制对转速和负载的突变均有较快的响应速度,且超调量很小,既保证了动态响应的快速性,又保证了静态时的稳定性。同时从波形的初始阶段可见,PI调节器设置积分饱和输出及较大的比例系数能够较快调节转矩为最大值,实现时间最短调节。定子电流波形表明稳态时电流基本上为正弦波,且突加负载时电流无过载情况。图10表明磁链幅值在动静调节中始终保持在容差之内,且磁链滞环容差越小,定子磁链轨迹越接近圆形。

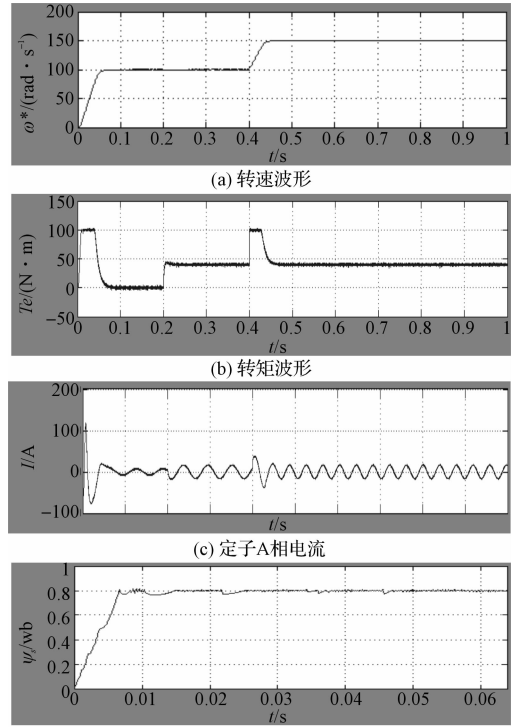


图9 仿真波形

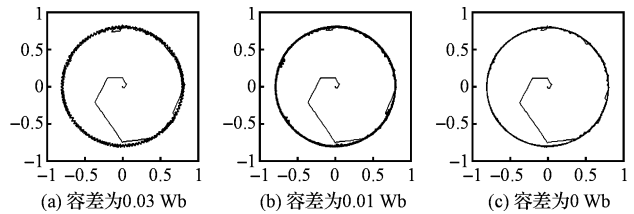


图10 定子磁链轨迹

4 结束语

仿真结果证明了本研究所采用的建模方法的正确性。异步电动机采用直接转矩控制具有响应速度快,暂态时间短,负载给定及转速给定突变时变化波动小,磁链幅值保持恒定等优点,并且其控制思想清晰明确,控制结构简单,充分证明了直接转矩控制的优越性和有效性。且随着电力电子开关器件和DSP等控制芯片的不断发展,直接转矩控制将具有越来越广阔的实际应用空间,而本研究的仿真研究正是为其进一步的实验研究打下了良好的基础。但该控制方法也有其不足之处,如稳态时存在较大的转矩脉动,启动时磁链轨迹较差等问题,需要进行大量的进一步研究。

参考文献 (References):

[1] [美]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,2005: 24-56. (下转第52页)

- SI in Sign. Proc.**, 1998(18):263 - 274.
- [5] TOURASSI G D, HARRAWOOD B, SINGH S, et al. Information-theoretic CAD system in mammography: entropy-based indexing for computational efficiency and robust performance[J]. **Med. Phys.**, 2007(34):3193 - 204.
- [6] TOURASSI G D, VARGAS-VORACEK R, CATARIOUS D, et al. Computer-assisted detection of mammographic masses: a template matching scheme based on mutual information [J]. **Med. Phys.**, 2003(30):2123 - 2130.
- [7] TOURASSI G D, HARRAWOOD B, SINGH S, et al. Information-theoretic CAD system in mammography: entropy-based indexing for computational efficiency and robust performance[J]. **Med. Phys.**, 2007(34):3193 - 3204.
- [8] ALTO H, RANGAYYAN R M, DESAUTELS J E. Content-based retrieval and analysis of mammographic masses[J]. **J. Electron. Imaging**, 2005(14):16 - 23.
- [9] KINOSHITA S K, DEAZEVEDO-MARQUES P M, PEERREIRA R R, et al. Content-based retrieval of mammograms using visual features related to breast density patterns[J]. **J. Digit Imaging**, 2007(20):172 - 190.
- [10] MAZUROWSKI M A, HABAS P A, ZURADA J M, et al. Decision optimization of case based computer-aided decision systems using genetic algorithm with application to mammography[J]. **Phys. Med. Biol.**, 2008(53):895 - 908.
- [11] ROSA N A, FELIPE J C, TRAINA A J, et al. Using Relevance Feedback to Reduce the Semantic Gap in Content-based Image Retrieval of Mammographic Masses [C]//Conf. Proc. IEEE Med. Biol. Soc. Vancouver: [s. n.], 2008:406 - 409.
- [12] 边肇祺, 张学工. 模式识别[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [13] University of South Florida. DDSM [EB/OL]. [日期不详]. <http://marathon.csee.usf.edu/Mammography/Database.html>.
- [14] ZHENG B, LU A, HARDESTY L A, et al. A method to improve visual similarity of breast masses for an interactive computer-aided diagnosis environment[J]. **Med. Phys.**, 2006(33):111 - 117.
- [15] SMITH J R, CHANGE S F. Tools and Techniques for Color Image Retrieval [C]//Proc of SPIE: Storage and Retrieval for Image and Video Database. San Diego: [s. n.], 1996:426 - 437.
- [16] PARK S C, SUKTHANKAR R, MUMMERT L, et al. Optimization of reference library used in content-based medical image retrieval scheme[J]. **Med. Phys.**, 2007(34):4331 - 4339. [编辑: 李 辉]

(上接第 17 页)

- [2] 杨 甫, 许伯强, 杨桂兰. 变频器供电下异步电动机转子断条故障仿真研究[J]. 机电工程技术, 2009, 38(1):67 - 69.
- [3] 李 夙. 异步电动机直接转矩控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994:1 - 110.
- [4] 曹承志, 曲红梅, 路战红, 等. Matlab 软件包中 simulink 环境下直接转矩控制系统的仿真[J]. 电机与控制学报, 2001, 5(2):112 - 114.
- [5] 孟庆春, 叶锦娇, 郭凤仪. 异步电动机直接转矩控制系统的改进方案[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13):118 - 122.
- [6] CASADEI D, SERRA G, TANI A. Performance analysis of a speed-sensorless induction motor drive based on a constant-switching-frequency DTC scheme [J]. **IEEE IA**, 2003, 39(2):476 - 483.
- [7] KLRIS N, YATIM A. An improved stator flux estimation in steady-state operation for direct torque control of induction machine[J]. **IEEE Trans. on Industry Applications**, 2002, 38(1):110 - 116.
- [8] WAHAB H F A, SANUSI H. Simulink model of direct torque control of induction machine[J]. **American Journal of Applied Sciences**, 2008, 5(8):1083 - 1090.
- [9] BUJA G S, KAZMIERKOWSKI M P. Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors-a survey[J]. **IEEE Trans. on Industrial Electronics**, 2004, 51(4):744 - 757.
- [10] 廖晓钟, 马克明, 周乐芳. 一种细分空间的 PWM 波形实时生成方法[J]. 电气传动, 2004, 34(3):13 - 15.
- [11] SHYU Kuo-kai, SHANG Li-jen, CHEN Hwang-zhi. Flux compensated direct torque control of induction motor drives for low speed operation[J]. **IEEE Trans. Ind. Electronics**, 2004, 19(6):545 - 553.
- [12] 孙笑辉, 张曾科, 韩曾晋. 基于直接转矩控制的感应电动机转矩脉动最小化方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8):109 - 112. [编辑: 张 翔]