

# 三相异步电机直接转矩控制的圆形磁链研究

Simulation Study of Circular Flux of Three-phase Asynchronous Motor Direct Torque Control System

周道龙,田文革,王晓飞(山东科技大学电气与自动化工程学院,山东青岛 266590)

Zhou Dao-long, Tian Wen-ge, Wang Xiao-fei (College of Electrical Engineering and Automation of Shandong University of Science and Technology, Shandong Qingdao 266590)

**摘要:**该文以异步电动机直接转矩控制基本原理为基础,利用 Matlab/Simulink 完成直接转矩控制系统近似圆形磁链控制方法的仿真。采用全速范围内的电机模型,利用 S 函数判断扇区位置,以离散型开关变量产生 PWM 波,并通过改变转速给定值,得出在不同给定条件下的仿真结果,并用滤波器对定子电流进行滤波,最后对仿真结果进行了具体分析。这对中小功率电机控制系统实际开发应用等方面有一定的实用价值。

**关键词:**直接转矩控制;圆形磁链;S 函数;定子电流滤波

中图分类号:TM464

文献标识码:A

文章编号:1003-0107(2015)02-0004-05

**Abstract:** Based on the basic principle of asynchronous motor direct torque control, this paper simulates the circular flux of three-phase asynchronous motor by direct torque control system. Using the  $u-n$  motor model and S function to judge the sector location, producing PWM wave with discrete switch, changing the speed of a given value, it gets the simulation results obtained under different given conditions, and then smoothing the stator current by filter. Finally, the simulation result has carried on the concrete analysis. It will benefit the actual development and application of the control system of medium and small power motor, and have certain practical value.

**Key words:** direct torque control(DTC); circular flux; S function; stator current filterin

CLC number: TM464

Document code: A

Article ID: 1003-0107(2015)02-0004-05

## 0 引言

在上世纪 80 年代中期以后,在矢量控制的基础上发展起来了一种新型异步电机变频调速技术即直接转矩控制技术(DTC)。自从它诞生以来,许多工程师从不同的角度对它进行了改进,使其控制性能有了很大的改善。日本的 I.Takahashi 教授于 1986 年提出让磁链矢量沿圆形轨迹运动的控制策略<sup>[1]</sup>。它能够根据给定的电磁转矩与交流电机的实际电磁转矩相比得到的转矩误差来确定转矩的调节方向,然后根据定子磁链的大小与相位角确定相电压源逆变器的开关状态,这样就能使交流电机的电磁转矩能够快速的与所给定的外部电磁转矩保持同步。因此圆形磁链在中小功率场合获得广泛应用。

## 1 直接转矩控制系统的原理

图 1 所示是直接转矩控制感应电机驱动系统的简

化框图。通过矢量的旋转坐标变换,可以直接在定子坐标系上利用交流量来计算转矩的控制量<sup>[2]</sup>。我们可以直接检测到定子电流矢量  $i_s$  的模值,并且可以从电机的磁链模型中得到磁链矢量  $\psi_s$  的模值,在异步电机定子坐标系中求得转矩的控制量后,分别设计了转矩调节环节和磁链调节环节,根据两个滞环比较器的输出,通过查询电压矢量表,选择开关状态,这样就构成了闭环控制系统。

## 2 直接转矩控制系统的 Matlab\Simulink 建模和仿真

根据直接转矩控制系统原理图,建立起系统的 Matlab 仿真模型,如图 2 所示。由图 2 可以看到,仿真系统包括了异步电动机、逆变器、电压和电流的三相/两相变换、定子磁链测量、转矩测量、转速调节、幅值与扇区判断、磁链调节器、转矩调节器和 PWM 控制信号生成等模块<sup>[2-13]</sup>。

作者简介:周道龙(1989-),男,硕士研究生,主要从事电力电子与电力传动方向研究。

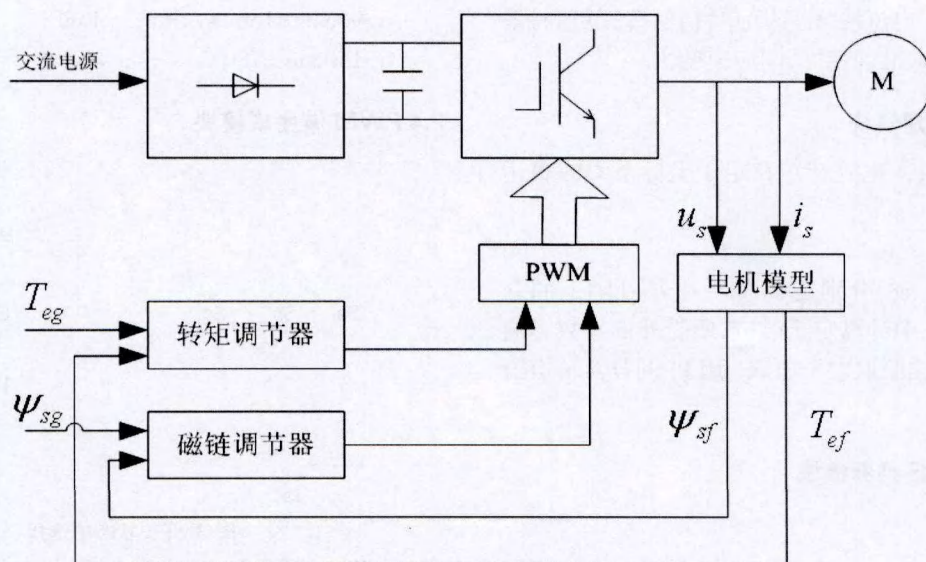


图 1 系统控制原理图

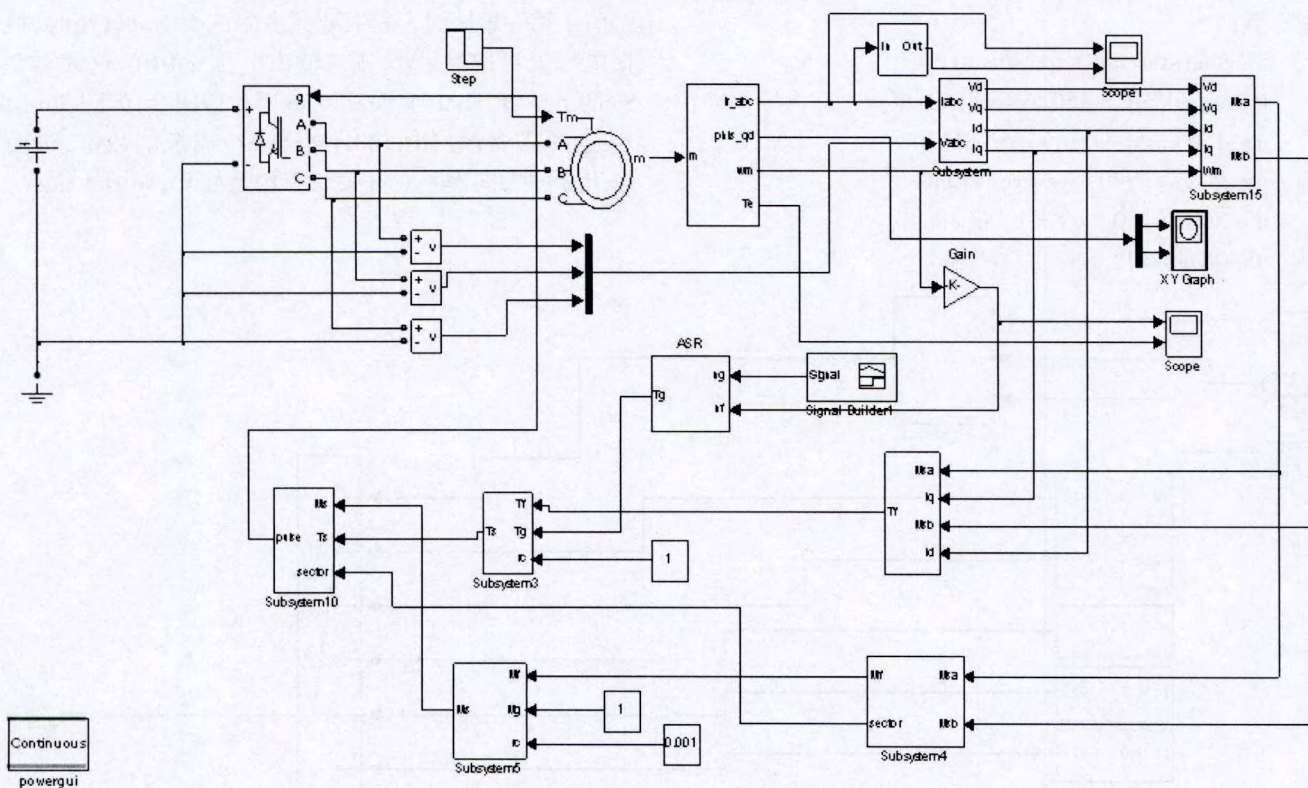


图 2 DTC 的 simulink 仿真图

## 2.1 电压电流变换和定子磁链观测模块

电机  $u-n$  模型的定子磁链由定子电压和电机转速计算来获得。其公式如下：

$$\begin{cases} T_r \frac{d\psi_{\alpha}}{dt} + \psi_{\alpha} = L_m i_{s\alpha} + T_r \omega \psi_{\beta} \\ T_r \frac{d\psi_{\beta}}{dt} + \psi_{\beta} = L_m i_{s\beta} + T_r \omega \psi_{\alpha} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_s = \int (u_s - i_s R_s) dt \\ \psi_{s\alpha} = \int (u_{s\alpha} - i_{s\alpha} R_s) dt \\ \psi_{s\beta} = \int (u_{s\beta} - i_{s\beta} R_s) dt \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} \approx \psi_{r\alpha} + L_{\sigma} i_{s\alpha} \\ \psi_{s\beta} \approx \psi_{r\beta} + L_{\sigma} i_{s\beta} \end{cases} \quad (3)$$

电动机的  $u-n$  模型综合了  $u-i$  和  $i-n$  模型的优点，

高速时采用电压-电流法,模型简单,精度高。低速时采用电流速度模型法,准确性好,响应速度快。

## 2.2 转矩反馈和给定模块

三相异步电机的电磁转矩在定子坐标系中的表达式为:

$$T_{ei} = K_m (\psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (4)$$

式中  $i_{s\alpha}$ 、 $i_{s\beta}$ 、 $\psi_{s\alpha}$ 、 $\psi_{s\beta}$  分别是  $\psi_s$  和  $i_s$  在  $\alpha$ - $\beta$  轴上的分量。在定子坐标系中计算定子磁链,所受外部参数影响很小,而又可以直接测取定子电流。用 PI 调节器转矩给定模块<sup>[4]</sup>。

## 2.3 磁链幅值与扇区判断模块

磁链幅值为:

$$|\psi_s| = \sqrt{(\psi_{s\alpha})^2 + (\psi_{s\beta})^2} \quad (5)$$

矢量角与扇区判断模块采用 S 函数编写<sup>[6]</sup>,其主程序如下:

```
function sys=mdlOutputs(t,x,u)
if u>-180&u<=-150 sys=4; elseif
u>-150&u<=-90 sys=5; elseif
u>-90&u<=-30 sys=6; elseif
u>-30&u<=30 sys=1; elseif
u>30&u<=90 sys=2; elseif
```

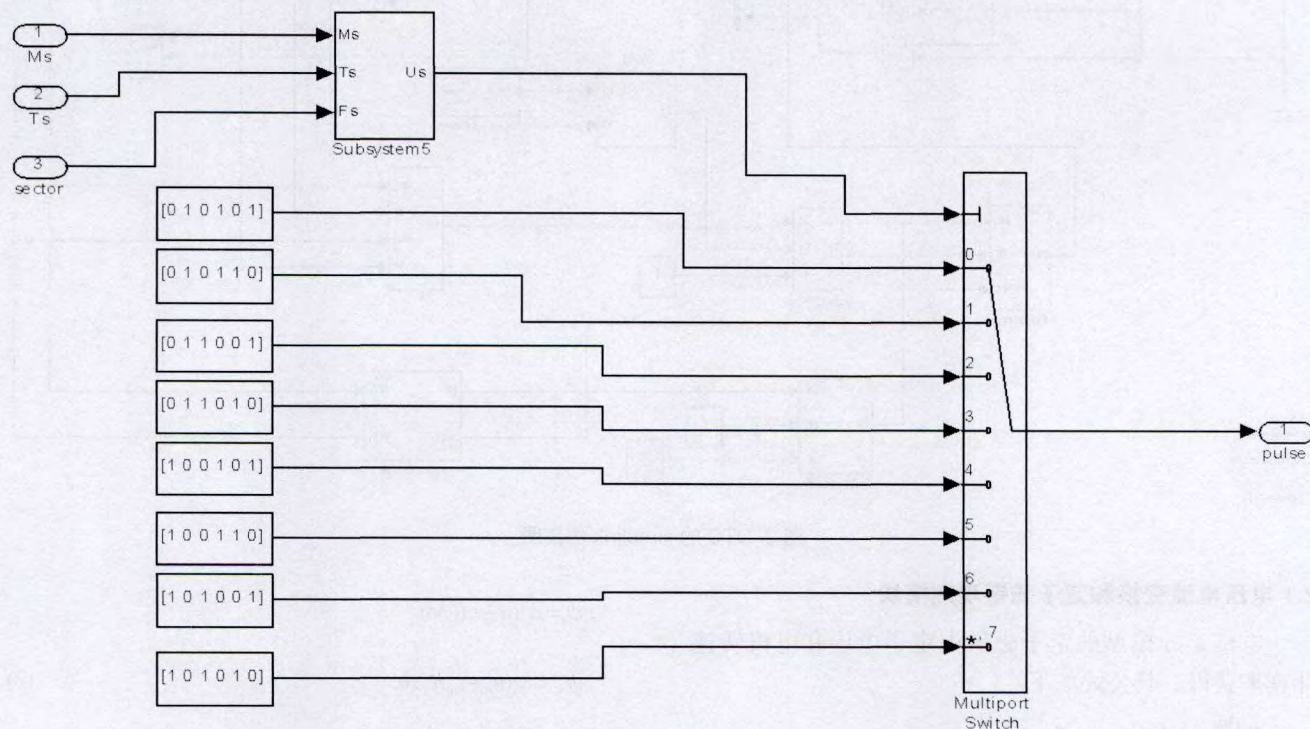


图 4 PWM 波生成模块

## 2.4 PWM 波生成模块

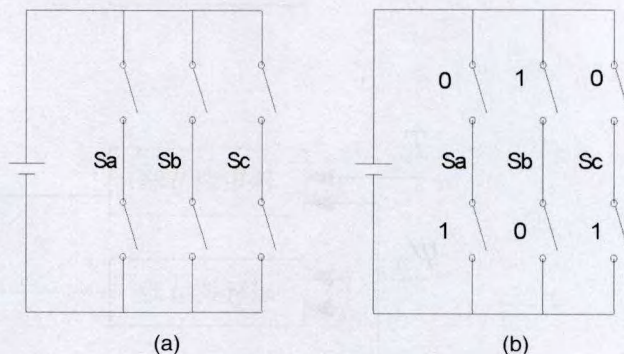


图 3 开关状态的选择

如图 3(a)所示记  $S_a=1$  为  $S_a$  开关支路上方开关闭合,  $S_a=0$  为  $S_a$  支路下方开关闭合,同理  $S_b$ 、 $S_c$ 。例如,当磁链位于第一扇区时,若需要减少磁链而增加转矩时,根据电压矢量选择表<sup>[7,8]</sup>,则应输出电压  $u_s(010)$ ,这就需要  $S_a$  的下桥臂,  $S_b$  的上桥臂和  $S_c$  下桥臂闭合,如图 3(b)所示,这时需要输出(011001)这样一组离散的数字,进而产生脉冲<sup>[9]</sup>,同理其它开关状态也是如此,如图 4 所示。

### 3 仿真结果及分析

异步电机的仿真参数如下:  $P_n=4.7\text{Kw}$ ,  $U_n=380\text{V}$ ,  $f=50\text{Hz}$ , 定子电阻  $R_s=0.435\Omega$ , 转子电阻  $R_r=0.816\Omega$ , 定子漏感  $L_s=0.002\text{H}$ , 转子漏感  $L_r=0.002\text{H}$ , 互感  $L_m=0.0690\text{H}$ , 转动惯量  $J=0.189\text{kg}\cdot\text{m}^2$ , 极对数  $P_n=2$ , 转速设定值为  $[1400-200-800]\text{r/min}$ , 给定负载为  $20\text{N}\cdot\text{m}$ 。

从图 5 所示可以看出, 系统开始运行以后, 定子磁链的幅值从 0 快速增长到 1 左右, 然后根据 DTC 控制方法, 对电机定子施加不同电压矢量来进行控制, 磁链幅值被限制在一个很小的容差范围之内, 从而形成了近似为圆形的定子磁链。

图 6 和 8 所示是转速图形, 从中可以看出, 无论是空载还是负载时, 系统的动态响应都非常快, 在给定转速突变时, 系统均能够快速跟定, 并重新达到平衡。图 7 和 9 所示是转矩波形, 由此可以看出它的启动和制动转矩都非常大, 且能快速响应。图 10 所示是定子电流经过滤波器后得到的波形, 由此可以看出, 定子电流已经非常接近三相交流正弦波, 这正是圆形磁链的优点, 电流谐波分量较小, 使控制更为平滑。

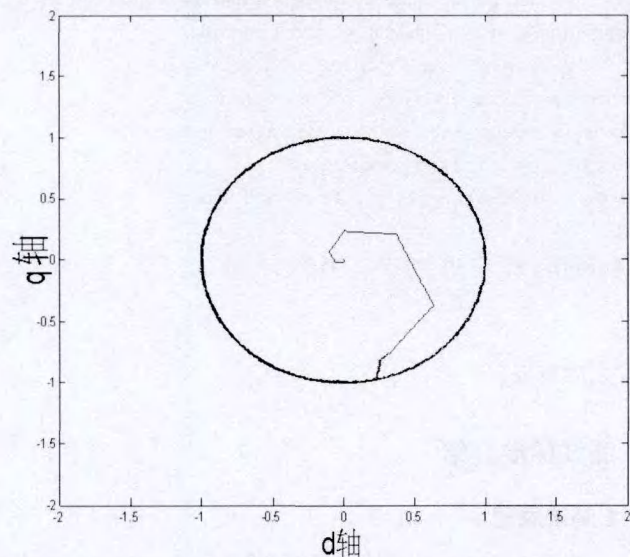


图 5 定子磁链轨迹

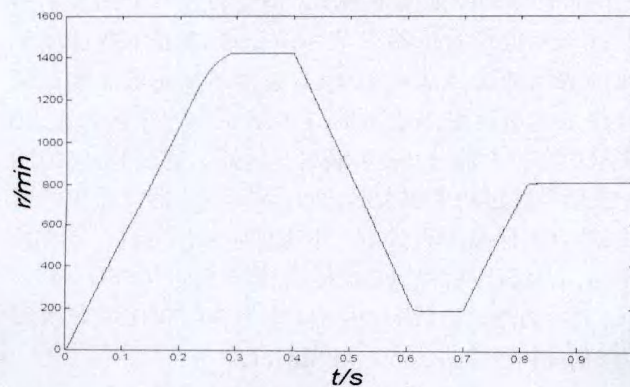


图 6 空载时电机的转速变化曲线

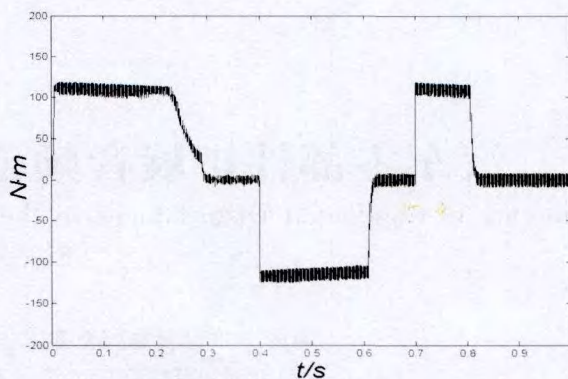


图 7 空载时电机的转矩响应曲线

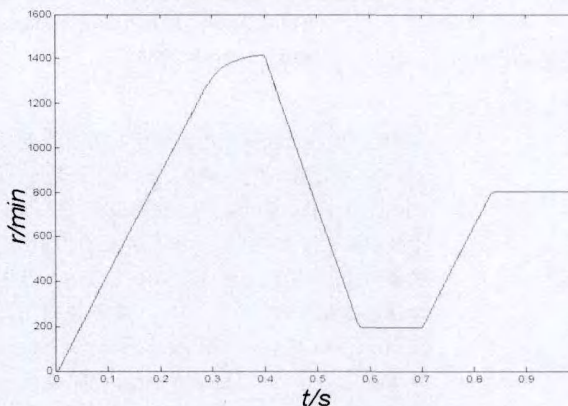


图 8 20 N·m 时电机的转速变化曲线

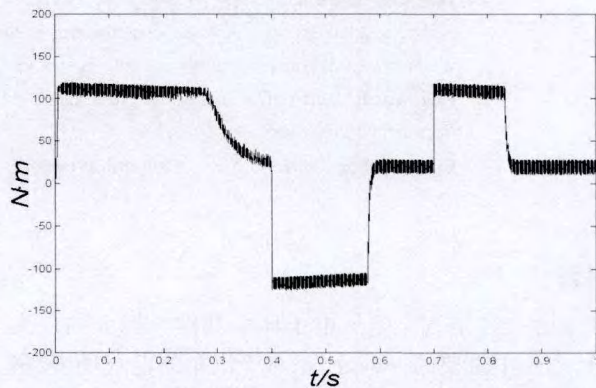


图 9 20 N·m 时电机的转矩响应曲线

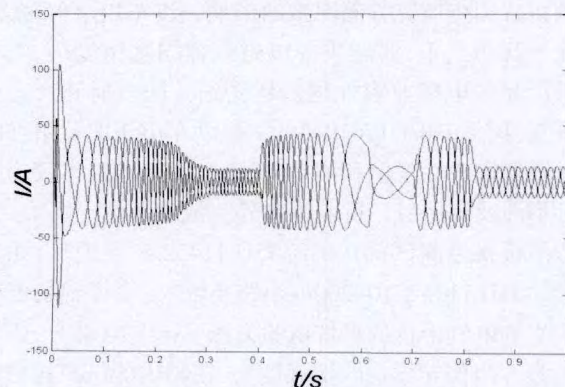


图 10 电机的定子电流波形

下转 12 页

## 1.4 测试注意事项

测试时,需要注意的内容有,源阻抗的验证,须确保在频率 15Hz-50kHz 范围内,源阻抗小于或等于  $0.5\Omega$ ,频率 50kHz-250kHz 范围内,源阻抗小于或等于  $2\Omega$ ;标准提到的  $100\mu\text{F}$  的电容,建议在无论在闭环法或替代法中都使用,从而保证获得充分的测试电压;功放 AMP200N,在软件界面进行功率频率设置时,尽量选择大一些如 800 W;安捷伦 N2783A 电流传感器探头,在监控线束电流时,必须使牢牢锁住,否则造成试验时无法反馈电流信号,造成功放 AMP200N 一直不断抬升功率,造成设备损坏。

## 2 结束语

随着标准的更新,对汽车电子产品的 EMC 测试要求越来越高。汽车零部件产品的扩展音频范围内传导干扰的抗扰度测试,越来越引起汽车厂家的重视,加强对该测试项目、测试方法的研究,是积极服务汽车厂家走向国际化的重要途径。从而在进行汽车电气系统设计时需充分考虑电磁兼容方面的特殊要求,尽量采取电磁兼

容性设计的各个方法和原则,提高汽车电子产品的可靠性和竞争力。

## 参考文献:

- [1]全国无线电干扰标准化技术委员会.GB/T 17619-1998《机动车电子电器组件的电磁辐射抗扰性限值和测量方法》[S].北京:中国标准出版社,1998.
- [2]Technical Committee ISO/TC 22,Road vehicles,Subcommittee SC 3,Electrical and electronic equipment,ISO 11452-1-2005 Road vehicles - Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy-Part 1:General principles and terminology [S].Switzerland:ISO,2005.
- [3]Technical Committee ISO/TC 22,Road vehicles,Subcommittee SC 3,Electrical and electronic equipment,ISO 11452-10-2009 Road vehicles-Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy - Part 10:Immunity to conducted disturbances in the extended audio frequency range[S].Switzerland:ISO,2009.

上接 7 页



## 4 结论

仿真结果表明,本文所设计的直接转矩控制系统不但响应快,波形符合理论分析,而且系统能够平稳运行,具有较好的静、动态特性,同时也证明了系统方案的正确性与可行性,为交流电机的调速尝试了一种新方法。

## 参考文献:

- [1]I.Takahashi and T.Noguchi.A New Quick Response and High Efficiency Control Strategy of an Induction Motor[J].IEEE Transaction on Industry Application,1986,22(5).
- [2]李华德.交流调速控制系统[M].北京:电子工业出版社,2003:116-226.
- [3]洪乃刚.电力电子、电机控制系统的建模和仿真[M].北京:机械工业出版社,2012:178-202.
- [4]唐湘越,胡继胜.基于 Matlab/Simulink 的直接转矩控制仿真系统[J].仪器仪表用户,2009,16(5):39-40.
- [5]姜伟东.异步电动机直接转矩控制系统的 MATLAB 仿真[D].大连:大连交通大学,2003.
- [6]黄永安,马路,刘慧敏.MATLAB 7.0/Simulink 6.0 建模仿

真开发与高级工程应用[M].北京:清华大学出版社,2005:160-174.

- [7]D.CASADEI,G.SERRA,A.TANI,and L.ZARRI.Assessment of direct torque control for induction motor drives[J].Bull. Pol. Ac.:Tech,2006,54(3):237-252.
- [8]R.Toufouti,S.Meziane,H.Benalla.Direct torque control for induction motor using intelligent techniques[J].Journal of Theoretical and Applied Information Technology,2007,1:35-44.
- [9]Yong Liu,Z.Q.Zhu,David Howe.Direct torque control of brushless DC drives with reduced torque ripple [J].IEEE Transactions on Industry Application,2005,41(2):599-607.
- [10]苗敬利,刘增环,马文辉.MATLAB 直接转矩控制开关状态的选择实现[J].电气传动,2005,35(6):20-21+51.
- [11]高辉,李翔,江明,等.基于 MATLAB 的异步电机直接转矩控制系统仿真[J].机电工程,2007,24(3):16-18.
- [12]霍健鹏,张金萍,潘玉田.异步电机直接转矩全速范围控制策略[J].机械工程与自动化,2010,6:143-145.
- [13]唐斌.异步电机直接转矩控制中磁链估算的研究[D].大连:大连交通大学,2004.