

逆变器供电双三相异步电机系统的 MATLAB 仿真

谢芳芳¹, 郑剑²

(1. 湖南工业职业技术学院 电气工程系, 湖南 长沙 410208; 2. 湖南机电职业技术学院 电气工程系, 湖南 长沙 410151)

摘要: 为了深入研究多相变频调速系统, 需要建立逆变器供电双三相异步电机系统的仿真模型。在双三相异步电机的动态数学模型基础上, 利用 MATLAB 中的 Simulink 模块库和 SimPowerSystems 模块库构造逆变器与电机系统的仿真模型, 属于信号流与电气流混合仿真, 能够较好反映逆变器的电气特性。对模型分别施加正弦电压激励、SPWM 电压激励, 进行空载起动和突加负载等实验, 仿真结果表明了模型的正确性和有效性。

关键词: 多相变频调速; 逆变器; 双三相异步电机; 正弦脉宽调制; 动态仿真

DOI:10.3969/j.issn.1000-3886.2014.02.006

[中图分类号] TM343 [文献标志码] A [文章编号] 1000-3886(2014)02-0018-05

MATLAB Simulation on Dual 3-phase Asynchronous Motor System Driven by an Inverter

XIE Fang-fang¹, ZHENG Jian²

(1. Electrical Engineering Department, Hunan Industrial Polytechnic College, Changsha Hunan 410208, China;

2. Electrical Engineering Department, Hunan Electro-mechanical Vocational College, Changsha Hunan 410151, China)

Abstract: To study in depth the multiphase frequency speed regulation system, it is necessary to establish a simulation model for the dual 3-phase asynchronous motor system driven by an inverter. On the basis of the dynamic mathematical model of the dual 3-phase asynchronous motor, MATLAB Simulink and SimPowerSystem are used to construct a simulation model of the inverter and motor system (mixed simulation of signal stream and electrical stream) for a good reflection of the electrical characteristics of the converter. Sine voltage excitation and SPWM voltage excitation are separately imposed on the model for tests on zero-load start and abrupt load. The results of the test verify the correctness and effectiveness of the model.

Keywords: multiphase variable frequency speed regulation; inverter; dual 3-phase asynchronous motor; sinusoidal pulse width modulation (SPWM); dynamic simulation

0 引言

由电压型逆变器供电的双三相异步电机系统是一种典型的多相变频调速系统, 定子有两套三相星形绕组, 位置互差 30° 电气角; 转子为鼠笼型, 可等效成与定子绕组相同的结构, 如图 1 所示。研究表明, 与三相变频调速系统比较, 双三相变频调速系统具有更多的控制资源和潜能, 能实现高可靠性和更好的转速与转矩动态性能^[1]。为了深入研究双三相变频调速系统, 需要建立逆变器供电双三相异步电机系统的仿真模型。

文献[2]在 MATLAB 环境下利用 ODE SOLVER 工具将双三相异步电机的动态数学模型编成 M 文件, 通过调用绘图命令, 得到电机的特性曲线, 属于信号流仿真。但完全的信号流仿真不能很好地反映实际电气特性, 且信号流模型不能与变压器、逆变桥等电气模块直接相连。因此本文在此基础上, 利用 Simulink 模块库和 SimPowerSystems 模块库来搭建逆变器与电机系统的仿真模型, 属于信号流与电气流混合仿真。为验证模型的正确性和有效性, 分别施加正弦电压激励、SPWM 电压激励, 进行空载起动和突

加负载等仿真研究。

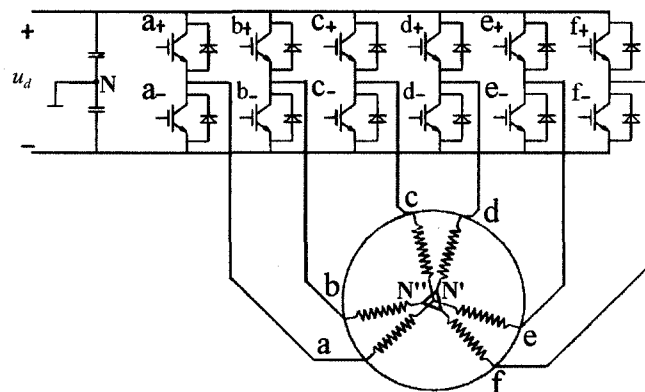


图1 电压型逆变器驱动的双三相异步电机系统

1 双三相异步电机的动态数学模型

在满足理想电机假定的条件下, 在以单位阵 E 为基的六维空间中, 双三相异步电机的动态数学模型是一组非线性微分方程。利用坐标变换阵 T , 可将其变换成以 T 为基的六维空间中的一组线性微分方程^[3]。若变换遵循功率不变原则, 则:

定稿日期: 2013-06-22

基金项目: 湖南工业职业技术学院自然科学基金(GYKYZ2011006); 湖南省科技厅科研项目(2011FJ4152); 湖南省教育厅科研项目(11C0482)

$$T = \sqrt{\frac{1}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \\ 1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d^T \\ q^T \\ z_1^T \\ z_2^T \\ o_1^T \\ o_2^T \end{bmatrix} \quad (1)$$

以 T 为基的六维空间由三个正交子空间构成,基 $\begin{bmatrix} d^T \\ q^T \end{bmatrix}$ 、 $\begin{bmatrix} z_1^T \\ z_2^T \end{bmatrix}$ 、

$\begin{bmatrix} o_1^T \\ o_2^T \end{bmatrix}$ 生成的空间分别称为 dq 平面、 $z_1 z_2$ 平面、 $o_1 o_2$ 平面,分别包含电机各物理量的 $12k \pm 1$ 、 $12k \pm 5$ 、 $12k \pm 3$ ($k=0,1,2,\dots$) 次谐波。

dq 平面 $\alpha\beta$ 静止坐标系上的伏安方程为:

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

式中 $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 是 dq 平面定子等效绕组相电压的 α 轴、 β 轴分量。

$u_{r\alpha}$ 、 $u_{r\beta}$ 则为转子等效绕组相电压的 α 轴、 β 轴分量,这里 $\begin{bmatrix} u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix} =$

$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ 是因为鼠笼型转子是短路的,同理有 $\begin{bmatrix} u_{z1\alpha} \\ u_{z2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} u_{o1\alpha} \\ u_{o2\beta} \end{bmatrix} =$

$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ 。 R_s 、 R_r 和 L_s 、 L_r 为对应的电阻和自感, L_m 是定转子同轴等

效绕组间的互感。 ω_r 是转子转速。 p 是微分算子。 $i_{s\alpha}$ 、 $i_{s\beta}$ 、 $i_{r\alpha}$ 、 $i_{r\beta}$ 表示对应的电流。该式说明双三相异步电机与三相异步电机在 $\alpha\beta$ 静止坐标系上的伏安方程在形式上是一致的。

$z_1 z_2$ 和 $o_1 o_2$ 平面的伏安方程分别为:

$$\begin{bmatrix} u_{z1s} \\ u_{z2s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_{ls} p & 0 \\ 0 & R_s + L_{ls} p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{z1s} \\ i_{z2s} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} u_{o1s} \\ u_{o2s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_{ls} p & 0 \\ 0 & R_s + L_{ls} p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{o1s} \\ i_{o2s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

这里 $\begin{bmatrix} i_{o1s} \\ i_{o2s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ 是因为两套三相星形绕组的中点不连接,以消除

$12k \pm 3$ ($k=0,1,2,\dots$) 次谐波。

由式(2)~(4)可知, dq 平面的定子侧变量与转子侧变量存在耦合关系;而 $z_1 z_2$ 和 $o_1 o_2$ 平面的定子侧变量与转子侧变量没有耦合关系。因此,机电能量转换只发生在 dq 平面, $z_1 z_2$ 和 $o_1 o_2$ 平面不产生机电能量转换。

转矩方程为:

$$T_e = n_p L_m (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}) \quad (5)$$

运动方程为:

$$T_e - T_L = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (6)$$

2 逆变器供电双三相异步电机系统的 MATLAB 模型

在 MATLAB/Simulink 环境下,利用式(1)~(6)来建立电机仿真模块^[4]。首先利用式(1)将双三相电压激励变换成三个平面的电压激励。然后分别利用式(2)~(4)实现三个平面的伏安关系运算,得到三个平面的电流响应;有了电流响应,利用式(5)可得到转矩响应;有了转矩响应,利用式(6)可得到转速响应。最后利用式(1)的逆阵将三个平面的电流响应转换成双三相电流响应。

在 Simulink 中直接利用式(2)来实现 dq 平面的伏安关系比较困难,可将式(2)化为下面两个式子:

$$\begin{cases} \int (u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt = \psi_{s\alpha} \\ \int (u_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt = \psi_{s\beta} \\ \int (u_{r\alpha} - R_r i_{r\alpha} - \omega_r \psi_{r\beta}) dt = \psi_{r\alpha} \\ \int (u_{r\beta} - R_r i_{r\beta} - \omega_r \psi_{r\alpha}) dt = \psi_{r\beta} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \frac{\psi_{s\alpha} - L_s i_{s\alpha}}{L_m} = i_{r\alpha} \\ \frac{\psi_{s\beta} - L_s i_{s\beta}}{L_m} = i_{r\beta} \\ \frac{\psi_{r\alpha} - L_r i_{r\alpha}}{L_m} = i_{s\alpha} \\ \frac{\psi_{r\beta} - L_r i_{r\beta}}{L_m} = i_{s\beta} \end{cases} \quad (8)$$

式(7)和(8)的实现,如图2所示,图2还实现了式(5)和(6)。为方便起见,将图2封装成一个子系统,命名为 two phase motor。

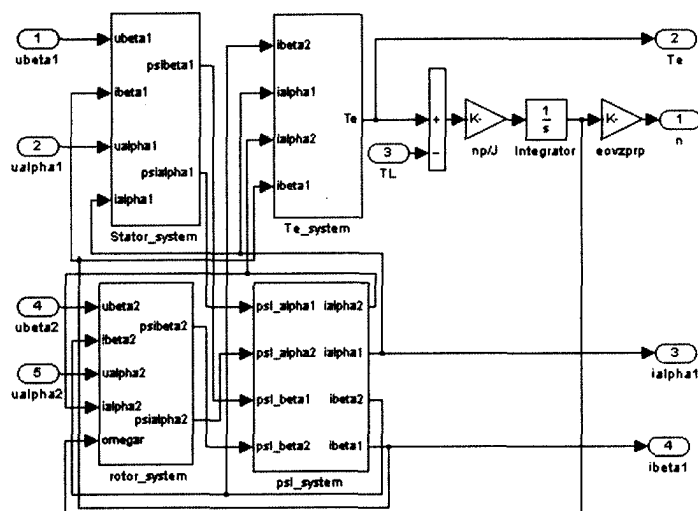


图2 dq 平面伏安方程的 Simulink 实现

在 Simulink 中可直接利用式(3)来实现 $z_1 z_2$ 平面的伏安关系,只须将式(3)化为下式:

$$\begin{cases} i_{z1s} = \frac{1}{R_s + L_s s} u_{z1s} \\ i_{z2s} = \frac{1}{R_s + L_s s} u_{z2s} \end{cases}$$

(9) (4)化为下式:

$$\begin{cases} i_{o1s} = 0 \cdot u_{o1s} \\ i_{o2s} = 0 \cdot u_{o2s} \end{cases} \quad (10)$$

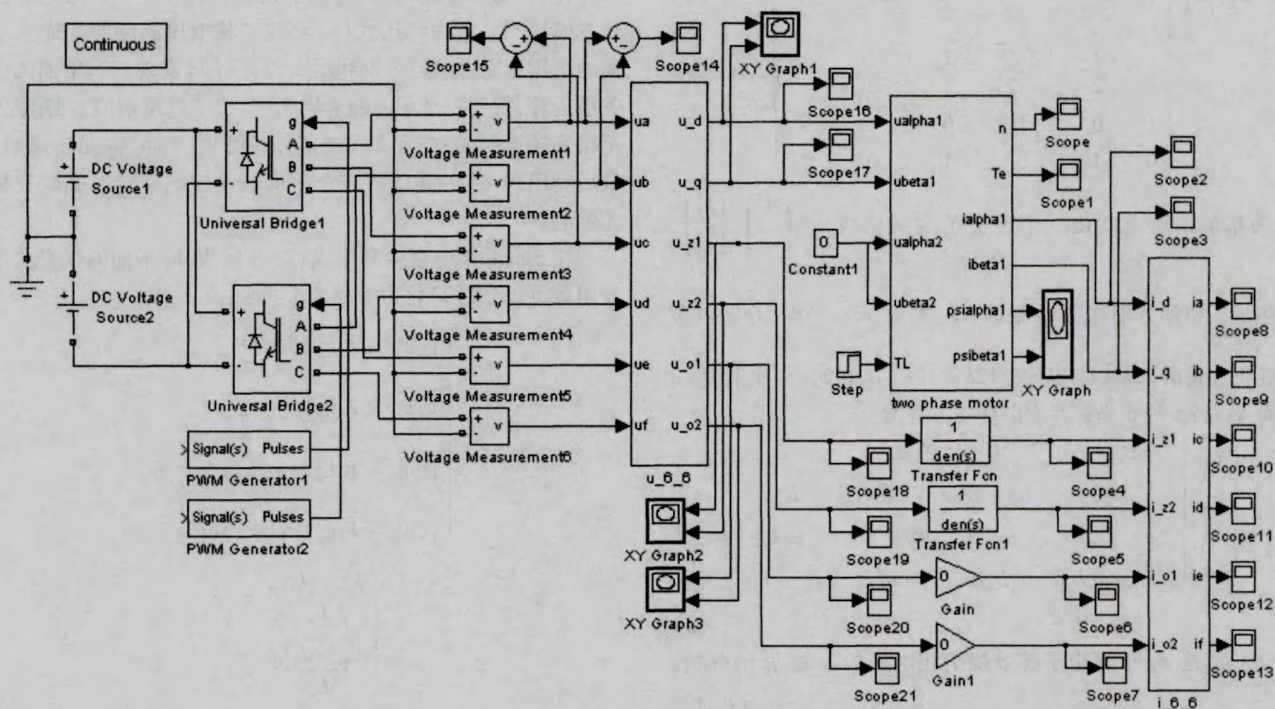


图3 逆变器供电三相异步电机系统的 MATLAB/Simulink 模型

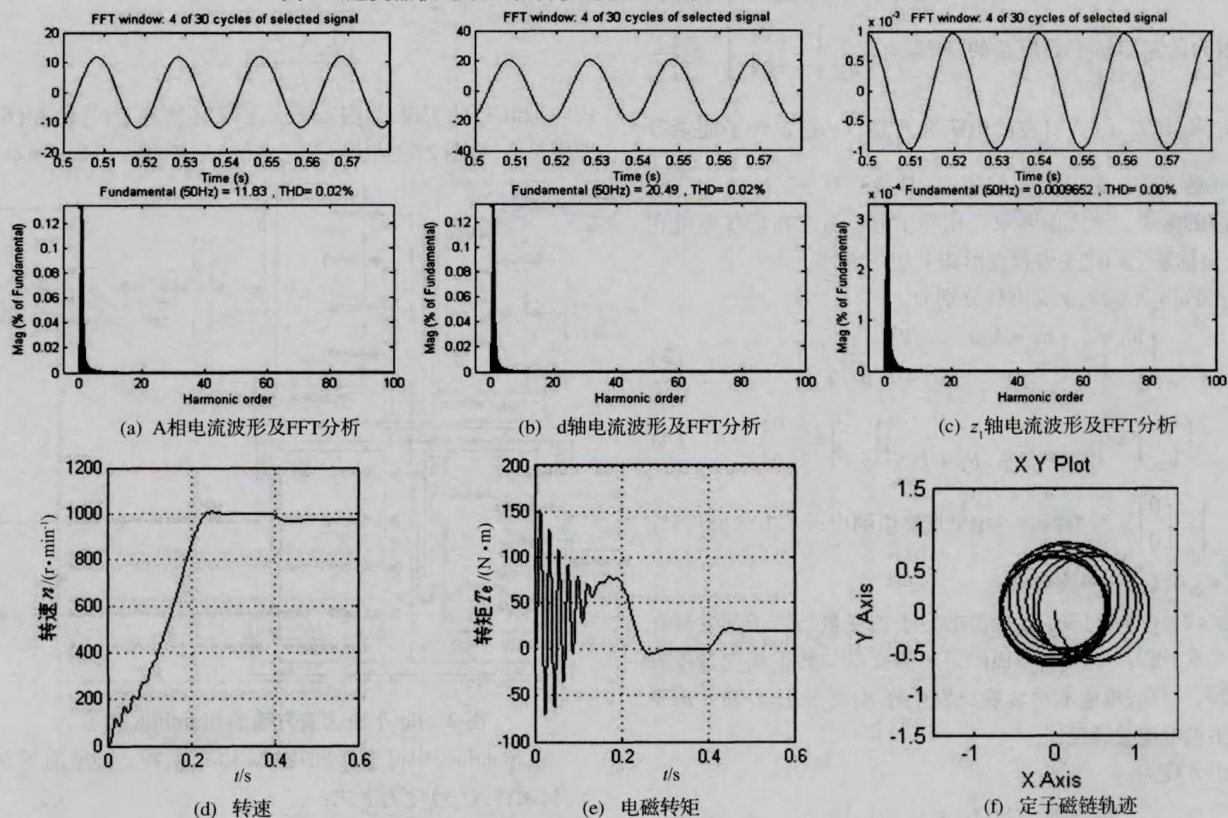


图4 三相平衡正弦电压激励下仿真结果

双三相逆变器的仿真方案有多种,如利用开关函数、电压重构表等来构造。这里采用 SimPowerSystem Block Library(电力系统模块库)的 Universal Bridge(通用桥)来构造。通用桥的桥臂数目选择3,器件选择 IGBT/Diodes。由于通用桥是电气模块,因此其输出信号必须经过电压测量模块才能连接至电机模块。SPWM激励采用 PWM Generator(PWM 发生器),调制信号选择模块内部生成方式,将 PWM 发生器模块的 pulse 输出端与通用桥模块的 pulse 输入端连接即可^[5]。系统的总体仿真模型如图3所示。

3 仿真结果与分析

为了验证仿真模型的正确性,给电机施加双三相平衡正弦电压激励。仿真参数为^[6]:相电压幅值 $U_{Nm} = 121.6 \text{ V}$, 频率 $f = 50 \text{ Hz}$, 电机磁极对数 $n_p = 3$, 转动惯量 $J = 0.116 \text{ kgm}^2$, 定子等效电阻

$R_s = 0.22 \Omega$, 转子等效电阻 $R_r = 0.47 \Omega$, 定子等效电感 $L_s = 0.0395 \text{ H}$, 转子等效电感 $L_r = 0.0395 \text{ H}$, 定转子等效互感 $L_m = 0.0364 \text{ H}$ 。空载起动,在 0.4 s 时突加负载 $20 \text{ N} \cdot \text{m}$, 0.6 s 结束实验。相关的仿真结果如图4所示。

从理论上说,在双三相平衡正弦电压激励下只有 dq 平面才有电压和电流, $z_1 z_2$ 和 $o_1 o_2$ 平面的电压、电流都为零,且定子磁链轨迹应为圆形,仿真结果验证了这一点。(b)图表明 dq 平面稳态电流为正弦波,且 $\text{THD} = 0.02\%$; (c)图表明 $z_1 z_2$ 平面电流基本为零; (d)图表明空载时稳态转速为 995 r/min 且无脉动,与同步转速 1000 r/min 很接近,负载后稳态转速为 960 r/min 且无脉动,由于是开环系统,因此突加负载到达稳态时,转速会有降落。(e)图表明空载时稳态电磁转矩为 $0 \text{ N} \cdot \text{m}$ 且脉动很小,负载后

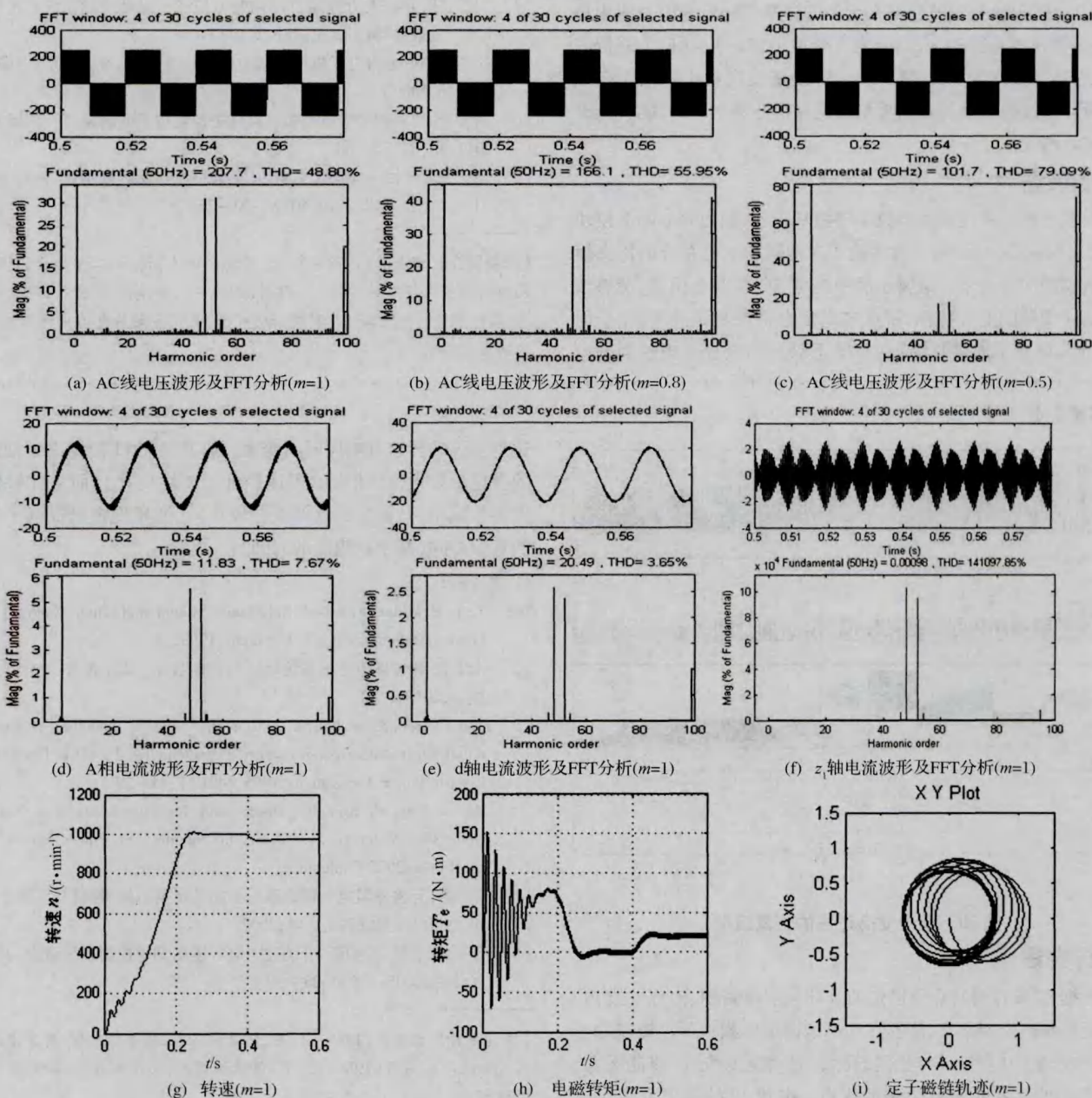


图5 双三相平衡 SPWM 电压激励下仿真结果

稳态电磁转矩为 $20 \text{ N} \cdot \text{m}$ 且脉动很小,与负载阻转矩相等。f) 图表明定子磁链轨迹为圆形。因此电机模型的仿真结果与理论分析基本一致,能够正确反映实际情况。

在此基础上,给电机施加双三相 SPWM 电压激励。在两个 PWM Generator 模块中,设置载波频率为 2.5 kHz ,调制度为 1,输出电压频率为 50 Hz ,第一个模块初相位为 0° ,第二个模块初相位为 30° 。逆变器直流侧电压为 243 V 。仍然空载启动,在 0.4 s 时突加负载 $20 \text{ N} \cdot \text{m}$, 0.6 s 结束实验。为了全面验证模型有效性,调制度 m 分别设置为 $1, 0.8, 0.5$ 进行对比实验。相关的仿真结果如图 5 所示。

仿真结果表明,SPWM 电压、电流波形有谐波,谐波中幅值较高的是 $\omega_c \pm 2\omega$ 次和 $2\omega_c \pm \omega$ 次 (ω_c 是载波频率, ω 是调制波频率),但是载波频率整数倍谐波完全没有了。线电压的基波幅值与调制度成正比,与载波比基本无关。转速与转矩响应与图 4 相似,但电磁转矩有脉动,这是因为有谐波电流。转矩 FFT 分析表明,稳态脉动范围为 $18 \sim 22 \text{ N} \cdot \text{m}$,脉动谐波次数主要集中在载频附近。系统模型的仿真结果与理论分析亦基本一致,能够正确反映实际情况。

4 结束语

在双三相异步电机动态数学模型基础上,利用 Simulink 模块库和 SimPowerSystems 模块库构造了逆变器与电机系统的仿真模型。该模型的特点之一是属于信号流与电气流混合仿真,能够较好地反映逆变器的电气特性;特点之二是电机模型是基于 dq 平面 $\alpha\beta$ 静止坐标系上的,因此特别有助于双三相直接转矩控制的研究。

(上接第 7 页)

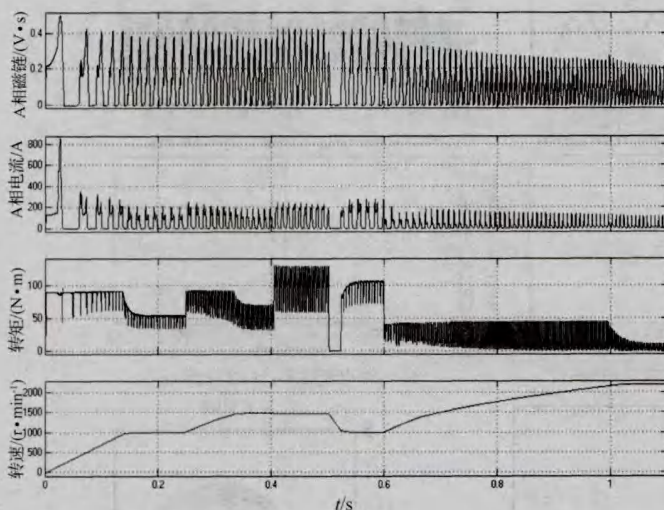


图 20 整个动态过程的仿真波形

3 结束语

根据 SRM 自身特点所制定的外环速度模糊 PI、内环电流 PI、变角度控制的控制策略,能够在动态地调节负载和预定转速的情况下,快速地响应,且具有稳定、高效、启动速度快、调速范围大、调速精确度高、抗负载能力强的优点。电流 PI 控制实现了对电流的稳定性控制,减小了电流斩波控制的幅度。速度 PI 控制使

达到预设的转速时响应时间变短。速度模糊 PI 控制不但使速度的提速阶段平稳(速度的提速趋近于线性变化),而且能够使速度误差减小(与设定速度的误差较小)。变角度控制提高了速度的响应时间(减小了提速的时间)。

参考文献:

- [1] Emil Levi. Multiphase electric machines for variable-speed applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 55(5): 1893-1909.
- [2] 黄西平, 刘军, 孔令枝. 基于 MATLAB 的双绕组异步电机仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2003, 20(8): 127-129, 136-137.
- [3] Davood Yazdani, S. Ali Khajehoddin, Alireza Bakhshai, et al. Full utilization of the inverter in split-phase drives by means of a dual three-phase space vector classification algorithm [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2009, 56(1): 120-129.
- [4] 阮毅, 陈伯时. 电力拖动自动控制系统——运动控制系统(第 4 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [5] 杜飞, 杜欣. 电力电子应用技术的 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [6] 谢芳芳. 双三相感应电动机直接转矩控制技术研究 [J]. 防爆电机, 2011, 46(3): 35-38.
- [7] 郑剑, 唐朝永, 谢芳芳. 六相感应电机 SVPWM 系统的设计与仿真 [J]. 大电机技术, 2010, 40(6): 20-25.

【作者简介】谢芳芳(1978-), 女, 湖南新田人, 讲师, 工学硕士, 研究方向为控制理论与控制工程。郑剑(1976-), 男, 湖南东安人, 讲师、工程师, 工学硕士, 电气工程学科博士研究生, 研究方向为电力电子与电机系统的容错控制。

达到预设的转速时响应时间变短。速度模糊 PI 控制不但使速度的提速阶段平稳(速度的提速趋近于线性变化),而且能够使速度误差减小(与设定速度的误差较小)。变角度控制提高了速度的响应时间(减小了提速的时间)。

参考文献:

- [1] T. J. E. Miller. Switched Reluctance Motors and Their Control [M]. London: Oxford Science Publications, 1993.
- [2] 吴红星. 开关磁阻电机系统理论与控制技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 1-2.
- [3] D. A. Torrey, X. M. Niu, E. J. Unkauf. Analytical modelling of variable-reluctance machine magnetisation characteristics [J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1995, 142(1): 14-22.
- [4] H. Le-Huy, P. Brunelle. Design and Implementation of a Switched Reluctance Motor Generic Model for Simulink SimPowerSystems [C]. Electrimacs2005 Conference.
- [5] 闫广涛. 开关磁阻电机调速系统智能控制策略的研究 [D]. 硕士学位论文. 山西, 太原理工大学, 2007.
- [6] 苗骞, 张承慧, 崔纳新. 开关磁阻电机模糊 PID 控制系统研究 [J]. 电气传动, 2005, 47(7): 28-30.

【作者简介】孟耀辉(1986-), 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 研究方向: 嵌入式系统。高岩(1984-), 男, 河南许昌人, 助理工程师, 研究方向: 无损检测。