

异步电机矢量控制系统动态仿真方法

张长军 孟朔 刘建政 赵争鸣

清华大学电机系, 北京 100084

摘要 介绍了应用高级语言结合图形化工具仿真动态研究异步电机矢量控制系统的方法。异步电机模型、采用矢量控制策略的变频器模型和通用机械负载模型在 Simulink 中建立并组合为完整的变频调速系统仿真模型。模型被转化嵌入到 C++ 的主程序而得到可以进行全面、动态、可视化仿真的异步电机变频调速系统软件。测试结果表明该方法得到的仿真模型正确, 软件功能多样, 使用方便。

关键词 异步电机; 矢量控制; 动态仿真; Simulink

分类号 TM 921.51; TP 391.9

随着电力电子器件和装置的快速发展, 应用变频调速控制的电机系统性能越来越优越, 在工业生产和人民生活中发挥着更加广泛而重要的作用。在进行复杂系统的设计时, 采用计算机仿真的方法来辅助分析和设计变频调速系统显得更加的重要而有效。传统仿真方法的研究大体有两个方向, 一种是使用以 C++ 为代表的高级语言直接编程进行^[1,2], 另一种是采用以 Matlab/Simulink 为代表的通用工具软件进行^[3]。前者需要对系统建模, 由于变频调速电机系统为高阶、非线性、多变量的复杂系统, 导致其编程工作量庞大, 费力费时, 而且难以产生可靠稳定的结果。因此采用高级语言进行的仿真研究往往要对系统作大量的简化, 并且难以从编程上实现对系统的动态仿真计算。后者因为采用了图形化的开发工具, 开发速度快而灵活便捷, 但是为此付出的代价就是仿真运行速度慢和仿真只能在其单一的工作环境中运行。传统仿真方法已经越来越难以适应复杂大系统的仿真研究。

本文采用将高级语言(C++)编程与图形化开发工具(Simulink)相结合的方法, 综合了两种模式的优势, 研制出一套独立的异步电机变频调速系统动态仿真软件, 不仅做到模型准确、仿真速度快, 而且做到完全的动态仿真。软件具备方便

快捷的用户界面, 并可独立运行在任意一台微机, 为广大的科研设计人员服务。仿真结果证明, 该方法是正确、有效的。

1 用图形化开发工具对系统建模

为了避免 C++ 带来的繁杂的编程工作, 系统模型核心采用 Matlab/Simulink 建立。整个变频调速系统模型分为异步电机、变频器(包含控制器)、可控负载三部分。其中异步电机既可以为绕线式电机也可以为鼠笼式电机, 变频器的控制策略采用了目前应用广泛的矢量控制。

1.1 异步电机模型

异步电机模型的建立基于 Park 方程。通过三相/二相变换, 可以得到异步电机在 dq 两相坐标系下的数学模型。这样才得以清晰地分别控制电机的转矩和磁通。最终控制电机的仍然是三相电的方式, 因此还需要进行二相/三相变换。以下方程分别为定子电压和电流的三相/二相变换^[4](转子方程类似, 从略)。

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2\cos\theta & \cos\theta + \sqrt{3}\sin\theta \\ 2\sin\theta & \sin\theta + \sqrt{3}\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{abs} \\ V_{bcs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\cos\theta + \sqrt{3}\sin\theta & -\sqrt{3}\cos\theta - \sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix}, \quad i_{cs} = -i_{qs} - i_{ds} \quad (2)$$

将(1)封装在以方框表示的函数模块中, 就在 Simulink 中实现三相/二相变换模型如图 1 所示。

电机的电气系统在dq坐标系下的等值电路如图2所示,其中忽略了定子和转子的铁损。

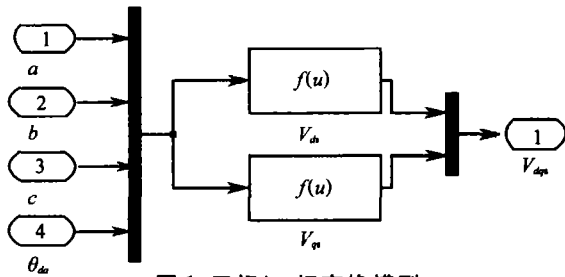


图1 三相/二相变换模型

Fig.1 Model of 3/2 Transform

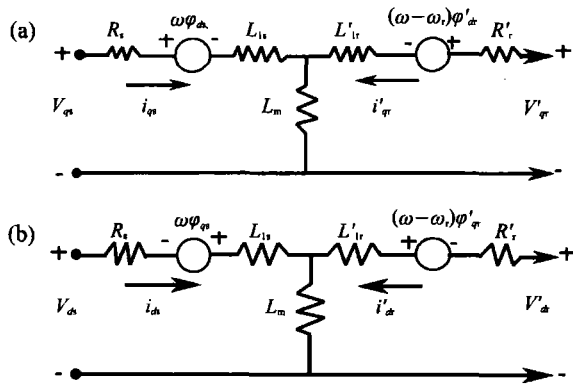


图2 q轴(a)和d轴(b)等值电路

Fig.2 The q axis (a) and the d axis (b) equivalent circuit

由此得到完整的dq坐标系下的异步电机电气系统方程^[3]。

电压方程:

$$\begin{cases} V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega \varphi_{ds} \\ V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega \varphi_{qs} \\ V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{ds} \\ V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qs} \end{cases} \quad (3)$$

dq坐标系下的磁链方程:

$$\begin{cases} \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr} \\ \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr} \\ \varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs} \\ \varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds} \end{cases} \quad (4)$$

其中, $L_s = L_{ls} + L_m, L'_r = L'_{lr} + L_m$ 。

dq坐标系下的电磁转矩方程^[3]:

$$T_e = \frac{3}{2} p (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (5)$$

机械系统方程^[3]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dx} \omega_m = \frac{1}{2H} (T_e - F \omega_m - T_m) \\ \frac{d}{dx} \theta_m = \omega_m \end{cases} \quad (6)$$

式中, V 为电压, i 为电流, φ 为磁通, T 为转矩, ω 为转速, R 为电阻, L 为电感, F 为摩擦系数, θ 为转子角度。下标dq表示dq坐标量, r/s表示转子/定子量, e表示电气量, m表示机械量, 转子量带撇号(')表示其为折合至定子后的量。

将上面的电气方程变形, 以电压为输入量, 以不能突变的磁通作为状态变量, 电流变量便可以用状态变量表示, 再结合电磁转矩方程和机械系统方程, 就可以在Simulink中得到异步电机的仿真模型, 如图3所示。其中abc→dq和dq→abc两个模块就是上面的三相/二相, 二相/三相变换模型封装成的子系统。Stator flux linkage, Rotor flux linkage等子系统封装了方程(3)和(4)。Torque子系统封装了机械运动方程(6)。

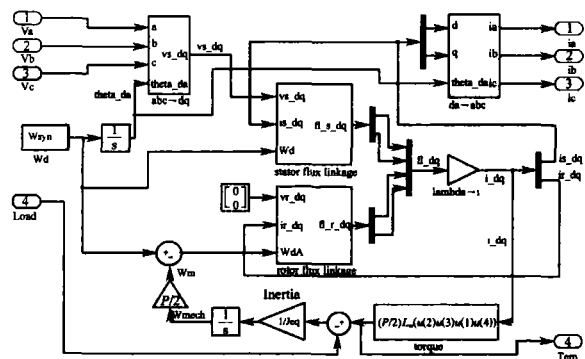


图3 异步电机模型

Fig.3 Induction motor model

1.2 变频器模型

这里的变频器包含了逆变器和控制器两个部分。其中控制器采用了目前应用广泛的矢量控制策略, 采用电流和转速的双闭环控制方式。

图4是变频器在Simulink中的模型框图。框图对主要计算单元进行了封装, 可以看到主要的模块包括三相/二相, 二相/三相变换单元, 速度PI调节器, 电流计算单元, 电流积分比较器等组成。其中的逆变器使用了Simulink提供的通用整流

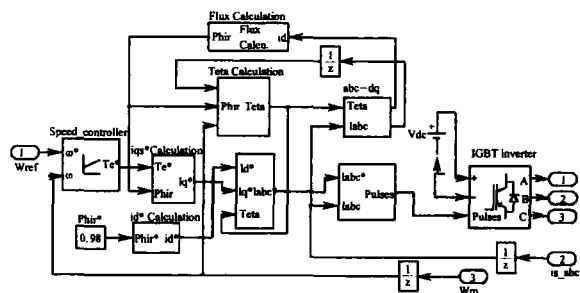


图4 矢量控制器、逆变器模型

Fig.4 Vector-controller model and inverter model

桥,由理想直流电源供电. 矢量控制的思想是将异步电机等效为直流电机进行控制. 首先通过坐标变换将反馈量变换为等效于直流电机的两相量,然后通过类似于直流电机调速系统的控制器计算出励磁电流和电枢电流的给定量,最后再经过反变换得到三相的参考电流,从而经过电流滞环比较器给出逆变器的触发信号,驱动逆变器带动电机. 图形化的建模工具使建模过程原理清晰,在图4中,矢量控制的计算流程非常清晰.

1.3 可控负载模型

变频调速系统带负载能力是调速系统一个很重要的研究内容. 为了能仿真出各种负载类型,这里的机械负载模型采用了通用化的设计方法.

$$T_m = a_0 + a_1 n + a_2 n^2 + a_3 n^3 \quad (7)$$

式中, n 为转速, 给定 a_0, a_1, a_2, a_3 不同的取值组合, T_m 可以仿真出恒转矩负载、风机泵类负载、恒功率负载等各种复杂的负载类型. 图5是可控动态负载模型在 Simulink 中的框图.

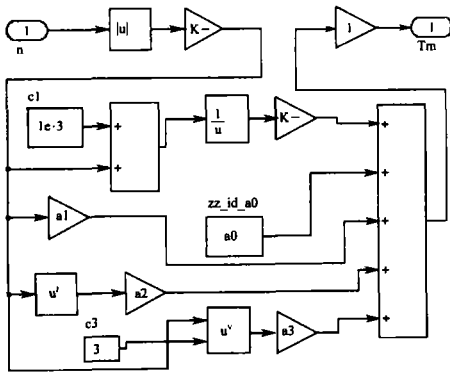


图5 可控通用动态负载模型
Fig.5 Controllable dynamic universal load model

1.4 系统模型整合

将上述各个模块整合连接后,就得到如图6所示的完整的变频调速系统模型. 变频器、异步电机、负载等模块都被封装成为子系统. 子系统

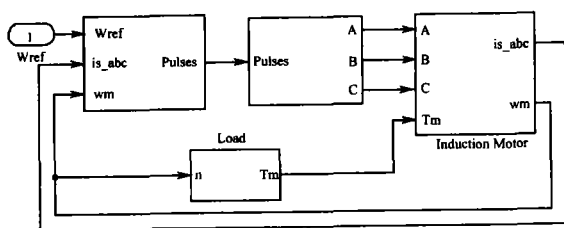


图6 完整系统模型
Fig.6 Complete system model

的运用使建模工作层次清晰,逻辑明了,而且便于模型的重用. 例如二相/三相,三相/二相变换模块,就被封装成子系统后被多次利用,从而减少了工作量.

2 仿真模型核心的嵌入和主程序设计

2.1 仿真模型核心的嵌入

仿真模型在 Simulink 中完成后,并不能直接在程序中利用,更不能离开 Simulink 环境运行. 因此首先使用 Matlab 的 RTW(Realtime-Workshop) 工具将其转换成以 C/C++ 描述的仿真内核,之后嵌入主程序.

主程序由 C++Builder 开发,专门设计了输入输出接口以容纳仿真模型内核. 数据接口以面向对象的类实现,输入接口读取仿真内核的参数和仿真数据,并进行必要的数据格式转换和封装. 输出接口将主程序的参数和数据进行必要的的数据格式转换并按照仿真内核需要的格式传给仿真内核. 从对仿真内核的所有操作都通过数据接口完成,仿真内核被封装在接口类中,如图7所示,从主程序这边看过去,操作仿真内核就和操作常规的 C/C++ 对象没有区别了,从而使整个程序符合面向对象的开发思想,风格一致而标准. 并且仿真模型的修改将不会影响主程序,仿真内核也不需要因为主程序的修改而修改,这将令软件的升级和重用十分方便.

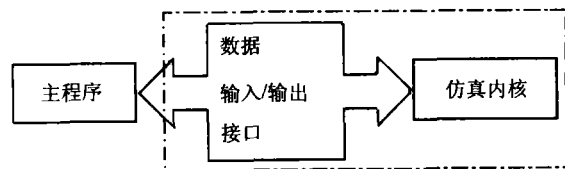


图7 仿真模型内核的嵌入
Fig.7 Embedding the simulation kernel

2.2 仿真主程序设计

电机变频调速仿真软件的设计目的是帮助科研设计人员进行电机产品、电机拖动系统设计、电机控制系统的设计工作. 因此软件在功能设置和用户界面设计的指导思想是设计成为一个仿真的实验平台,让用户可以以熟悉的方式在计算机上完成一些实验研究工作,从而帮助设计人员更加快速有效的展开工作. 整个软件的工作流程

可以简单的概括为设定参数→开始仿真→观察结果三个部分。

图8显示了软件的主要界面,包括图形化的参数设定页面、动态多路示波器页面和极坐标示波器。这里的变频调速仿真系统,在人机界面上最重要的功能是展示各种仿真数据。专门设计的动态多路示波器可以以不同颜色同时显示多路信号。在软件实际运行中,这一过程将和实际的示波器一样是动态地展示出来的。用户可以任意选择同时显示所关心的信号,随时放大观察任意局部的细节波形,还可以保存任何时刻的信号波形或读取曾经保存的波形,便于进行对比分析。

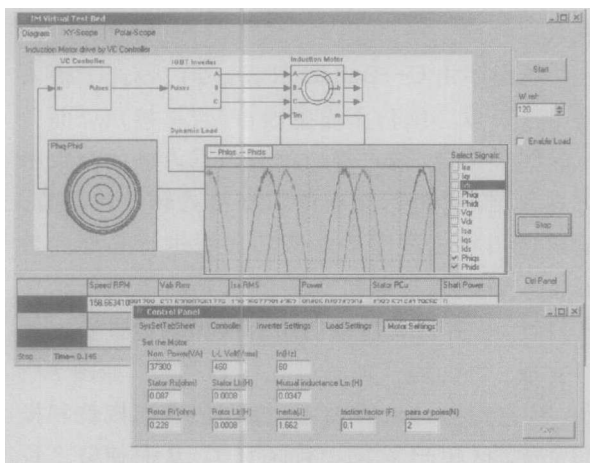


图8 程序主要界面

Fig.8 Program main interface

至此完成了此动态仿真软件的开发。高级语言与图形开发工具相结合的仿真方法,充分发挥了这两种不同开发模式的优势,将开发工作的不同阶段采用不同的模式进行,从而在保证功能的情况下得到了快速可靠开发的优势。

3 仿真实验

实验系统中异步电机主要参数: $P=4, R_s=0.087 \Omega, L_s=0.0008 \text{ H}, R_r=0.228 \Omega, L_r=0.0008 \text{ H}, L_m=0.0347 \text{ H}, J=1.662 \text{ kg}\cdot\text{m}^2, F=0.1$ 。变频器主要参数:速度PI控制器 $K_p=13, K_i=26$,转矩限制 $T_{lim}=200 \text{ N}\cdot\text{m}$,电流比较器滞环 $H=20 \text{ A}$ 。

实验 A:

(1)初始转速设定为 120 rad/s ,空载启动,稳定后增速至 140 rad/s ,之后减速至 90 rad/s 。

(2)电机稳定后突然加挂 $100 \text{ N}\cdot\text{m}$ 的恒转矩负载,再次稳定后撤去负载。

实验 B:

(1)改变变频器参数为 $K_p=30, K_i=60, T_{lim}=400 \text{ N}\cdot\text{m}$,重复实验 A(1)。

(2)改变变频器参数为 $K_p=30, K_i=60, T_{lim}=400 \text{ N}\cdot\text{m}$,重复实验 A(2)。

实验 A 结果见图 9(a)图 10(a),实验 B 结果见图 9(b)图 10(b)。

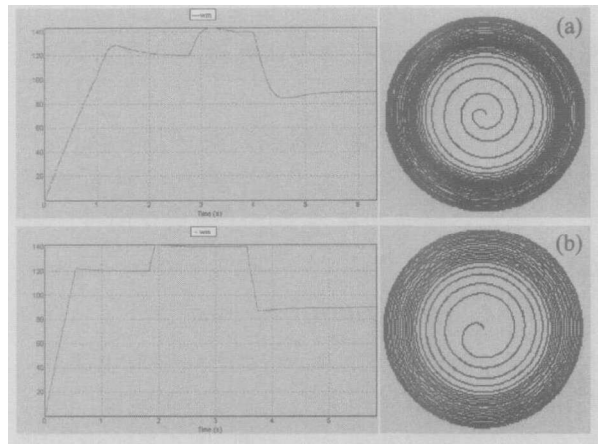


图9 电机转速和磁通轨迹图。(a)实验 A(1); (b)实验 B(1)
Fig.9 Motor speed and track of flux. (a) Experiment A(1); (b) Experiment B(1)

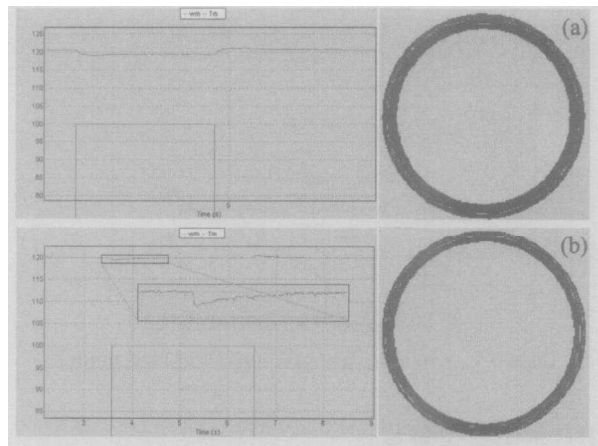


图10 电机转速、负载和磁通轨迹图。(a)实验 A(2); (b)实验 B(2)
Fig.10 Motor speed, load and track of flux. (a) Experiment A(2); (b) Experiment B(2)

4 结果分析与结论

从仿真结果图 9 和图 10 可以看到,不同的给定操作和不同的参数设定,仿真软件给出了不同的仿真结果。对比图 9(a)和 (b),由于控制器转矩限制 T_{lim} 的增加,实验 B 中电机启动后更快的达到设定转速,对每次控制信号的响应也更快。也

因此B的磁通轨迹螺旋比A要少.而速度控制器 K_p, K_i 的增加使实验B中每次转速变化的超调量减小,这在图中也可以明显看到.同理,图10中实验B中的电机转速因负载变化带来的扰动也小于实验A,因此这一过程的磁通轨迹B窄于A.改变系统中其他部分的参数,将同样的得到对应的结果.模型的动态仿真过程与实际的矢量控制变频调速系统基本吻合,充分验证了仿真模型的正确性和有效性.

此异步电机变频调速系统动态仿真软件模型准确,做到了对变频调速系统动态的、全面的、可视化的仿真,得到了优于以往仿真软件的性能.这三者的结合使用户能够方便快捷地在动态中调整系统的各个参数,直观地观察对比各种仿真结果,这将给实际的变频调速系统的设计和研究带来帮助.此外 Simulink 结合 C++ 的新方法使

开发过程效率提高,程序稳定可靠.

参 考 文 献

- 1 陈伯时. 电力拖动自动控制系统 [M]. 第二版. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- 2 贺益康. 交流调速系统计算机仿真 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- 3 Mohan N. Electric Drives—An Integrative Approach [M]. Published by MNPERE, 2001.
- 4 Orille A L, Sowilam G M A, Valencia J A. A new simulation of symmetrical three phase induction motor under transformations of park [J]. Comput Ind Eng, 1999, 37 (10): 359
- 5 Balanathan Ragu, Pahalawaththa Nalin C, Annakkage Udaya D. Modelling induction motor loads for voltage stability analysis [J]. Int J Electr Power Energy Syst, 2002, 24(8): 469

Dynamic Simulation for Induction Motor Vector-Control System

ZHANG Changjun, MENG Shuo, LIU Jianzheng, ZHAO Zhengming

Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

ABSTRACT A method to implement the dynamic simulation for an induction motor vector-control system was investigated. The complete simulation model was created with the help of the graphical toolbox of Simulink, being embedded into C++ program, and was transferred to stand-alone software that can generally, dynamically and visually do kinds of simulations for the induction motor control system. The results show that the model derived by the method is accurate and the software is functional well and easy to use.

KEY WORDS induction motor; vector control; dynamic simulation; Simulink