

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.04.007

PMSM 驱动系统建模及其实时仿真平台设计

尤浩哲, 苏建徽, 施永, 解宝, 赖纪东

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:硬件在环实时仿真系统可以方便电机控制策略测试,显著缩短电机控制策略的研发周期,文章针对永磁同步电机(permanent magnet synchronous machine, PMSM)驱动系统,建立 PMSM 三相逆变器主电路数学模型,并运用改进的 CORDIC 算法,利用 System Generator(SG)搭建系统被控对象仿真模型,基于 Xilinx 公司 ZYNQ 开发板,设计一套基于现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)和 LabVIEW 虚拟示波的实时仿真平台,在该平台上对 SG 建立的逆变器主电路及电机系统模型进行硬件在环仿真。测试结果与 Simulink 中仿真结果对比表明,该文建立的基于 FPGA 的电机驱动系统硬件在环仿真模型能够准确模拟电机变频系统的运行特性。

关键词:永磁同步电机(PMSM);现场可编程门阵列(FPGA);实时仿真;改进 CORDIC 算法;建模

中图分类号:TM341 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)04-0468-05

Modeling of PMSM drive system and design of real-time simulation platform

YOU Haozhe, SU Jianhui, SHI Yong, XIE Bao, LAI Jidong

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The hardware-in-the-loop real-time simulation system can facilitate the testing of motor control strategies and significantly shorten the development cycle of motor control strategies. Focusing on the permanent magnet synchronous machine(PMSM) drive system, this paper establishes the mathematical models of the PMSM and the three-phase inverter respectively. An improved CORDIC algorithm is proposed, and the simulation model of controlled object is built using System Generator(SG). Based on the Xilinx ZYNQ development board, a real-time simulation platform based on field programmable gate array(FPGA) and LabVIEW virtual oscilloscope is designed. The hardware-in-the-loop simulation on the inverter and the motor system models built by SG is carried out on the platform. The comparison between the test results and the simulation results in Simulink shows that the FPGA-based hardware-in-the-loop simulation model of the motor drive system established can accurately simulate the operation characteristic of the motor variable frequency system.

Key words: permanent magnet synchronous motor(PMSM); field programmable gate array(FPGA); real-time simulation; improved CORDIC algorithm; modeling

仿真技术是电气工程领域各学科研究和教学中使用的一项重要技术。在以往的科研活动中,仿真技术经历了由动态模拟仿真到数字离线仿真的发展。动态模拟仿真技术可以对研究对象进行

定性定量分析,现象比较直观丰富,利于研究人员观察实验结果,但模型的制作周期过长,成本过高,扩展性较差,且具有一定的危险性。而纯数字离线仿真可以很好地避免动态模拟仿真中出现的

收稿日期:2021-03-09; **修回日期:**2021-04-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51907045);安徽省自然科学基金资助项目(1908085QE238)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(PA2020GDGP0053)

作者简介:尤浩哲(1995—),男,安徽宿州人,合肥工业大学硕士生;

苏建徽(1963—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师,通信作者, E-mail:su_chen@126.com.

一些问题,实验较为方便,可以使实验场所不再拘泥于实验室内,但该仿真方式对于参数不确定的设备或系统仿真效果较差,与实际运行工况存在误差。实时仿真技术^[1]将数字系统与实际功率装置或控制器联合起来实时精准地模拟实际系统。在以往的电机控制策略的研究中,需要将真实的电机控制器与真实的电机样机联系在一起,这样虽然实验结果接近实际工况,但却加大了开发的成本,加长了整个开发周期,如若操作不慎易造成实验设备的损坏甚至人员的伤亡。在进行控制算法的研究时,需要一种即快捷又方便的仿真方法进行验证。近年来,半实物实时仿真技术^[2-4]的兴起,尤其是硬件在环技术(hardware-in-the-loop, HIL)^[5-6]方便了电机驱动控制系统的开发,使用数字电机系统代替真实的电机系统,不仅安全可靠,还可以在线更改电机的相关参数,并观测电机内部运行状态,检验控制算法的实验效果。

电机驱动系统主要包括电机和驱动逆变器主电路2个部分。本文运用传统 $d-q$ 轴模型^[7-8]对电机进行数学建模,采用开关函数建模方法^[9]对驱动逆变器进行数学建模。为了在基于现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)实现电机和逆变器驱动的硬件在环仿真,本文利用Simulink中的System Generator(SG),使硬件电路模型的建立简单化、便利化,避免了Verilog编程的烦琐性。在用SG实现电机的硬件电路建模时,由于模型库中正余弦模块CORDIC SINCOS在对角度进行正余弦计算时只对 $[-\pi/2, \pi/2]$ 区间内的角度具有收敛性,文献^[10-11]提出了一种改进CORDIC算法,本文采用该算法代替SG中的正余弦模块,建立永磁同步电机(permanent magnet synchronous machine, PMSM)+三相逆变器的硬件电路模型,并在实时仿真平台上进行测试验证。

1 实时仿真平台系统设计

本文以Xilinx公司的ZYNQ AX7020开发板及LabVIEW软件为基础,研发了一套实时仿真平台。该系统以ZYNQ开发板作为模型计算的主要架构,通过以太网为通讯方式与上位机PC端的LabVIEW人机交互界面连接。ZYNQ AX7020采用了ARM+FPGASOC技术将双核ARM Cortex-A9和FPGA可编程逻辑集成在一块芯片上。该芯片可分成处理器系统部分Processor System(PS)和可编程逻辑部分Program-

mable Logic(PL),其中:PS部分用于运行平台的以太网通讯等模块;PL部分用于运算仿真的模型。开发板上,PS、PL部分都搭载了丰富的外部接口和设备,方便开发和使用。

实时仿真平台系统结构如图1所示,在使用仿真系统时,用户在LabVIEW人机交互界面通过以太网通讯将配置好的模型位流文件下载至仿真系统中的PL部分,通过LabVIEW下发“开始仿真”指令,实际控制系统通过DA模块采集仿真模型的反馈量,同时通过控制系统I/O接口发出脉冲宽度调制信号(pulse width modulation, PWM)波与实时仿真系统形成闭环,在LabVIEW界面选择需要观测的数据,PS部分的通讯模块会将数据返还到LabVIEW示波界面。系统运行的主要步骤如下:

- (1) 列写模型的数学公式,通过System Generator建立硬件仿真模型。
- (2) 通过System Generator将硬件仿真模型转换成Verilog语言文件,在VIDADO环境下添加到工程文件中与通讯模块等连接,再生成Bit格式文件。
- (3) 将生成的Bit文件及参数配置文件等打包,通过LabVIEW上位机的以太网远程更新模块下载到FPGA开发板中。
- (4) 点击“开始仿真”按钮运行仿真,选择需观测的数据,并通过LabVIEW的虚拟示波界面观测模型仿真结果。

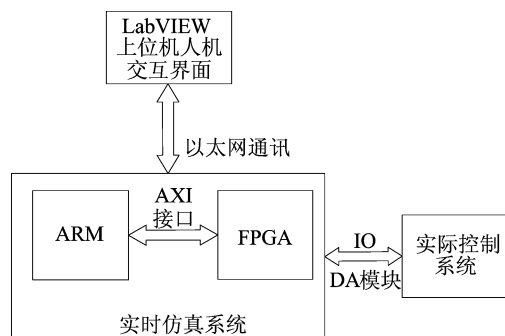


图1 系统结构

2 仿真数学模型

电机驱动系统硬件在环仿真示意图如图2所示,仿真模型主要包括电机模型和逆变器主电路模型2个部分,实时仿真系统的仿真模型见图2虚线框。电机模型采用PMSM传统的 $d-q$ 轴模型,逆变器采用理想开关建模方法,下文将分别介绍模型的建模方法。

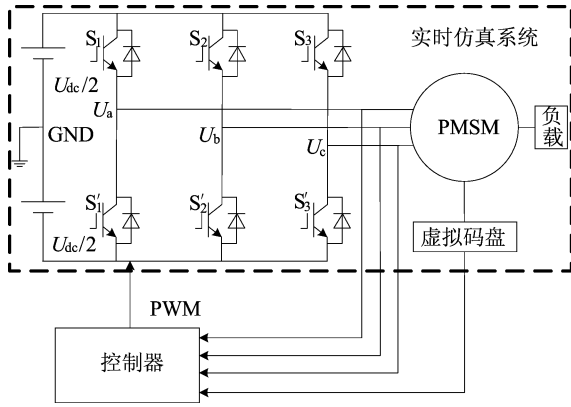


图 2 电机驱动系统硬件在环仿真示意图

图 2 中: U_{dc} 为直流输入电压; U_a 、 U_b 、 U_c 为逆变器的三相对称输出电压。

2.1 永磁同步电机 PMSM 数学模型

在建立数学模型时,首先对电机模型进行如下理想化处理:① 不考虑定、转子铁芯磁阻,不计涡流和磁滞损耗;② 永磁材料的电导率为 0,永磁体内部磁导率与空气相同;③ 转子上没有阻尼绕组;④ 永磁体产生的励磁磁场和三相绕组产生的电枢反应磁场在气隙中呈正弦分布;⑤ 稳态运行时,相绕组中感应电动势呈正弦波。

在 d - q 旋转坐标系下,定子电压方程为:

$$U_d = i_d R_s + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \quad (1)$$

$$U_q = i_q R_s + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d \quad (2)$$

其中: U_d 为定子电压 d 轴分量; U_q 为定子电压 q 轴分量; i_d 为定子电流 d 轴分量; i_q 为定子电流 q 轴分量; ψ_d 为定子磁链 d 轴分量; ψ_q 为定子磁链 q 轴分量; ω_e 为电角速度; R_s 为定子电阻。

d - q 坐标轴下的定子磁链方程为:

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_f \quad (3)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (4)$$

其中: L_d 为 d 轴自感; L_q 为 q 轴自感; ψ_f 为永磁体磁链。

联立可得定子电压方程为:

$$U_d = i_d R_s + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \quad (5)$$

$$U_q = i_q R_s + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \quad (6)$$

电磁转矩方程为:

$$T_e = 1.5 p i_q [i_d (L_d - L_q) + \psi_f] \quad (7)$$

其中, p 为电机的磁极对数。

当电机为隐级 PMSM 时,即 $L_d = L_q$,则电磁转矩方程为:

$$T_e = 1.5 p i_q \psi_f \quad (8)$$

电机的机械运动方程为:

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_e}{dt} + B \frac{\omega_e}{p} \quad (9)$$

其中: T_L 为负载转矩; J 为转动惯量; B 为阻尼系数。

2.2 逆变器数学模型

对于三相电压型桥式逆变电路来说,基本的工作方式为 180° 导电方式,即每个桥臂的导电角度为 180° ,同一相(即同一半桥)上下 2 个桥臂交替导电。

采用理想建模方法,当开关管导通时等效为短路,开关管关断时等效为断路。设逆变器各输出端到直流电源中性点的电压为 U_{ag} 、 U_{bg} 、 U_{cg} ,则有:

$$U_{ag} = S_1 U_{dc}/2 \quad (10)$$

$$U_{bg} = S_2 U_{dc}/2 \quad (11)$$

$$U_{cg} = S_3 U_{dc}/2 \quad (12)$$

$$S_j = \begin{cases} 1, & \text{上晶闸管导通 / 下晶闸管关断;} \\ -1, & \text{上晶闸管关断 / 下晶闸管导通。} \end{cases}$$

其中, $j=1,2,3$ 。

从逆变器输出端到直流电源中性点的电压值可表示为:

$$U_{ag} = U_{ao} + U_{og} \quad (13)$$

$$U_{bg} = U_{bo} + U_{og} \quad (14)$$

$$U_{cg} = U_{co} + U_{og} \quad (15)$$

其中, U_{ao} 、 U_{bo} 、 U_{co} 为加在每项负载上的电压。当负载三相对称时, $U_{ao} + U_{bo} + U_{co} = 0$,则 $U_{og} = (U_{ag} + U_{bg} + U_{cg})/3$,代入(13)~(15)式,可得:

$$U_{ao} = (2U_{ag} - U_{bg} - U_{cg})/3 \quad (16)$$

$$U_{bo} = (-U_{ag} + 2U_{bg} - U_{cg})/3 \quad (17)$$

$$U_{co} = (-U_{ag} - U_{bg} + 2U_{cg})/3 \quad (18)$$

将(10)~(18)式进行联立可以求得:

$$U_{ao} = (2S_1 - S_2 - S_3)/3 \quad (19)$$

$$U_{bo} = (-S_1 + 2S_2 - S_3)/3 \quad (20)$$

$$U_{co} = (-S_1 - S_2 + 2S_3)/3 \quad (21)$$

3 基于 SG 的模型设计及仿真

若要在 FPGA 实现模型的运算,需要使用 Verilog 或者 VHDL 语言对数学模型进行编程,为了避免编写 Verilog 或者 VHDL 语言代码的烦琐性,借助 Simulink 集成工具箱中的 Xilinx 系列独有的 System Generator 模块,对上述电机和逆变器的数学公式进行建模。System Generator 是基于 MATLAB-Simulink 的设计工具,用于

Xilinx 的 FPGA 系列,该软件不仅可以实现对硬件电路的真实情况进行仿真,还能够自动生成 Verilog 或者 VHDL 代码的工程文件,简单易用,可以为不熟悉硬件编程语言的研发人员更快地编写出模型的工程文件,大大缩短了模型设计的开发周期。

3.1 SG 搭建电机模型

根据前述的电机数学公式,在 System Generator 建立硬件仿真模型,电机的仿真模块如图 3 所示,包括 park 变换模块、电压电流关系模块、反 park 变换模块、转矩方程模块、运动方程模块。

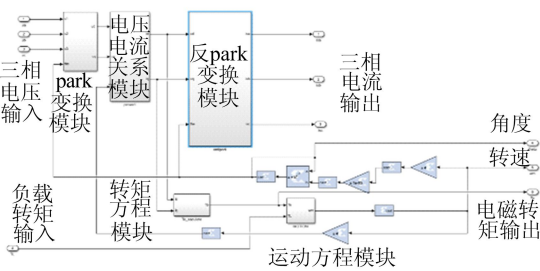


图 3 SG 建立的电机硬件仿真模型

3.2 SG 搭建改进 CORDIC 算法模型

因为 System Generator 模块库中的正余弦模块 CORDIC SINCOS 在对角度进行正余弦计算时,只对 $[-\pi/2, \pi/2]$ 区间内的角度具有收敛性,所以本文采用一种改进的 CORDIC 算法对角度度的正余弦值进行计算。CORDIC 算法可以在硬件平台上通过移位和加法运算,实现较为复杂的正余弦计算。改进的 CORDIC 算法系统如图 4 所示,包括求余模块、角度旋转映射模块、迭代模块和余弦符号修正模块。

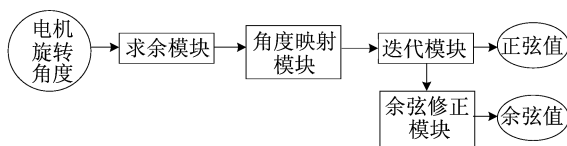


图 4 改进的 CORDIC 算法系统

首先将电机旋转角度 θ 通过求余的方式转换到 $[0, 2\pi]$ 区间内得到 θ' ,再通过角度映射模块将 θ' 映射到 $[-\pi/2, \pi/2]$ 区间内,按照传统的 CORDIC 算法进行迭代得到正余弦的值。若 θ' 的角度值在 $[\pi/2, 3/2\pi]$ 内,则余弦符号修正模块输出值为 1,输出余弦值为负;否则余弦符号修正模块输出值为 0,输出余弦值为正。SG 建立

CORDIC 算法硬件仿真模型如图 5 所示。

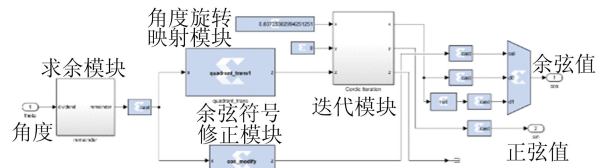
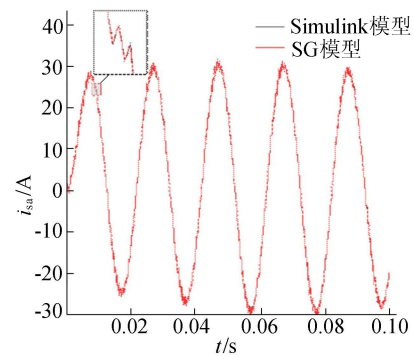


图 5 SG 建立改进 CORDIC 算法硬件仿真模型

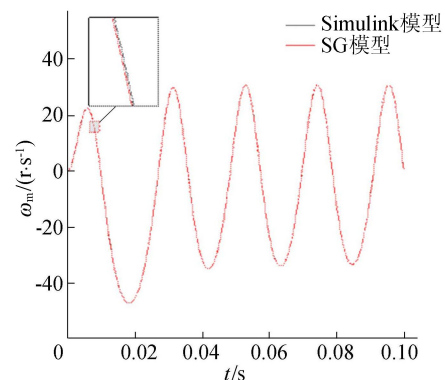
3.3 SG 搭建逆变器模型

据前述的三相逆变器数学公式,在 System Generator 中搭建硬件仿真模型。将 SG 建立的仿真模型与 Simulink 自带电气模型进行仿真对比,设置电机参数磁极对数 $n=4$,定子电阻 $R_s=2.875 \Omega$, $d-q$ 轴电感 $L_d=L_q=0.0085 \text{ H}$,永磁体磁链为 0.175 Wb ,转动惯量 $J=0.003 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,阻尼系数 $B=0.008$,直流侧电压为 311 V ,负载转矩 $T_L=0$ 。

对 2 种模型加上同一正弦 PWM 信号,观测电机定子 A 相电流 i_{sa} 与电机的转速 ω_m 运行情况,可以得到仿真结果对比如图 6 所示。



(a) 电机定子 A 相电流对比



(b) 电机转速对比

图 6 电机定子 A 相电流和转速对比

由仿真结果可知, System Generator 搭建的电机驱动系统模型与 Simulink 模型对比误差较

小,证明该建模方法可以较好地模拟电机运行的特性。

4 实验结果

实时仿真平台如图 7 所示,将上述建好的 System Generator 模型,转换成 Verilog 文件,将模型文件添加到工程文件中,与通讯模块等相连接形成完整的文件,并生成 Bit 文件后,通过 LabVIEW 上位机将工程文件下载到仿真平台,将仿真平台与实际控制器进行连接,由外部控制器发送载波频率为 40 kHz,三相调制波频率为 50 Hz 的正弦 PWM 波,观测 LabVIEW 虚拟示波界面结果如图 8 所示,示波界面选择观测 PMSM 机端 A 相电流,即拓扑图 8 中 I_1 的电流波形。

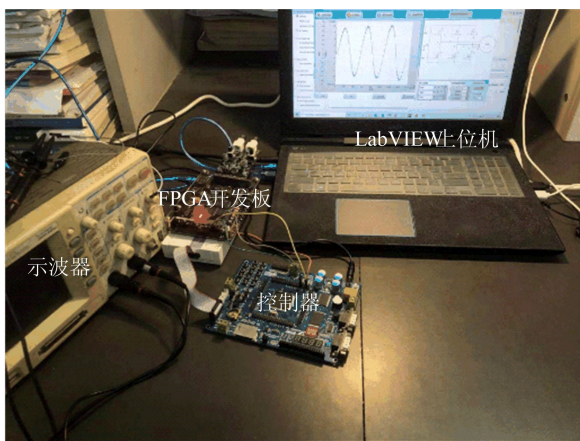


图 7 实时仿真平台

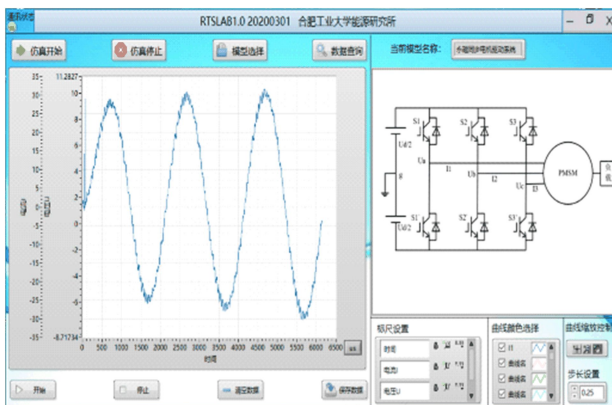


图 8 电机驱动系统实时仿真系统 LabVIEW 界面

5 结 论

本文介绍了一种 PMSM 驱动系统建模及其在硬件在环实时仿真平台的实现方法。运用传统

$d-q$ 轴模型对 PMSM 进行数学建模,采用理想开关建模方法对驱动逆变器进行数学建模。借助 Simulink 集成工具箱中的 Xilinx 系列独有的 System Generator 模块,实现硬件电路建模,并在以 Xilinx 公司的 ZYNQ AX7020 型号 FPGA 开发板及 LabVIEW 软件为基础的自研发实时仿真平台进行仿真验证,仿真步长为 250 ns,结果表明仿真精度较高,该方法可以满足实时仿真的需求。电机模型及其实时仿真平台在后续研究中还需要继续完善,进一步提高仿真模型的精度,使得仿真结果进一步贴近实际电机的运行工况。

[参 考 文 献]

- [1] KIFFE A,GENG S,SCHULTE T, et al. Real-time simulation of power electronic circuits based on discrete averaging method[C]//Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. [S. l.]:IEEE,2012;1542-1547.
- [2] 马龙华,黄子毅,张立炎. 基于 FPGA 的高速电力电子半实物仿真器[J]. 电气应用,2017,36(18):24-29.
- [3] 张栋宇. 基于 FPGA 的半实物仿真平台设计与应用[D]. 南京:南京大学,2016.
- [4] 郑国,杨锁昌,张宽桥. 半实物仿真技术的研究现状及发展趋势[J]. 舰船电子工程,2016,36(11):8-11.
- [5] 周治国,孙佳恩,于家宝,等. 一种可用于 ZYNQ 硬件在环仿真的永磁无刷直流电机测控系统[J]. 系统仿真学报,2020,32(11):53-60.
- [6] SILVA JUNIOR D C, OLIVEIRA J G, DE ALMEIDA P M, et al. Control of a multi-functional inverter in an AC microgrid-real-time simulation with control hardware in the loop [J]. Electric Power Systems Research, 2019, 172: 201-212.
- [7] 黄苏融,史奇元,刘畅,等. 基于现场可编程门阵列永磁同步电机模型的硬件在环实时仿真测试技术[J]. 电机与控制应用,2010,37(9):32-37.
- [8] 袁雷,胡冰新,魏克银,等. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2016.
- [9] 赵晨. 多电化机电系统电-机械负载的建模方法与仿真研究 [D]. 南京:南京航空航天大学,2016.
- [10] 胡天翔,陈科,赵志强. 一种基于 System Generator 的 CORDIC 算法实现 [J]. 科技创新与应用,2020 (19): 23-27,31.
- [11] 段文伟,于龙洋,李署坚. 一种改进的 CORDIC 算法及其 FPGA 实现 [J]. 微电子学与计算机,2012,29 (2): 95-98,102.

(责任编辑 张 镛)