

[驱动器]

基于dSPACE仿真系统的永磁同步直线电机驱动器的研制

文/李旭¹ 刘金华² 潘敏³

1. 广东产品质量监督检验研究院; 2. 电子科技大学中山学院; 3. 广安电气检测中心(广东)有限公司

基于dSPACE仿真平台设计和制作永磁同步直线电机(PMLSM)驱动器, 详细阐述驱动器的硬件设计过程, 包括主电路设计、驱动电路设计、采集电路设计、保护电路设计和PCB设计, 通过MATLAB/Simulink软件仿真平台对所设计的电路进行仿真验证。最后, 通过dSPACE实时仿真系统发出6路SVPWM信号驱动PMLSM运行, 并对PMLSM运行时的电压、电流等信号进行dSPACE闭环控制。

永磁同步直线电机具备高转矩输出、高准确度、高稳定性和低噪声等特点, 在高准确度控制系统中发挥着决定性作用。应用领域有高精度数控机床、机械臂、新能源电驱动汽车、平衡车等^[1-4]。由于直线电机没有中间转换的传动装置, 在实际运动过程中难以避免会受到外界扰动因素(如摩擦力、推动波力等)的影响, 降低了系统的动态准确度, 限制了直线电机的发展应用, 所以有必要采用相对应的控制算法对干扰进行抑制, 进一步提升系统的动态精度。

现有的PMLSM自带的驱动器大多采用矢量控制算法, 不开放电流数据, 无法形成电流闭环, 很难进行复杂的智能控制算法, 如神经网络控制、模糊控制和迭代学习ILC控制等。本文的智能控制控制算法基于dSPACE平台去完成, 相比于ARM、DSP等控制芯片, 免去了大量的编程, 非常适合于实验研究, 提高工作效率, 还可以实时修改电机控制参数, 自制PMLSM全开放驱动器就成了研究的

重点。

本文基于DSpace半实物仿真平台, 设计和制作PMLSM全开放的驱动器, 包括主电路、驱动电路、采样电路、保护电路和电源电路。然后进行PMLSM驱动器主电路仿真设计, PCB设计, 最后软硬件联合调试, 驱动PMLSM。

PMLSM的结构和工作原理

PMLSM是一种将永磁同步电机的旋转运动转化为直线运动的电机^[5-6], 其结构与永磁同步电机相似, 只有转子转换成直线运动。PMLSM的结构可以想象成永磁同步电机沿径向剖开成直线状, 定子为永磁体, 动子为铁心和电枢绕组。

永磁同步直线电机由直线定子上布置一组三相绕组, 与永磁体组成了电磁系统。永磁体通常采用NdFeB材料。直线定子采用铁心和绕组, 绕组通过电流产生磁场, 与永磁体的磁场发生作用, 形成电磁力驱动直线运动。工作原理如图1所示。

基金项目: 广东省高等教育教学改革项目——基于PBL的专业综合创新实践课程群双碳理念的教学设计(SJY202307)

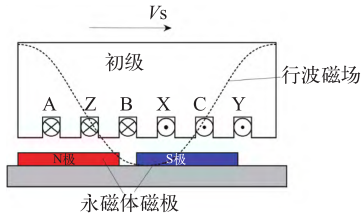


图1 PMLSM工作原理图

PMLSM驱动器电路设计

1. dSPACE介绍与控制系统框图设计

(1) dSPACE介绍^[7-8]

dSPACE半物理仿真系统是一个基于MATLAB/Simulink控制系统的软硬件开发平台，由德国dSPACE公司开发，可与MATLAB无缝连接。在使用MATLAB/Simulink建立了一个PMLSM的智能控制算法后，将算法部分完全保留，只需要将逻辑运

算用RTI模块中的I/O口替换掉，对模块参数进行相应的设置下载到硬件中即可，然后用ControlDesk软件实现实时在线调试。

(2) 控制系统框图设计

本次PMLSM驱动器电路设计包括了主电路设计、驱动电路设计、采集电路设计和保护电路设计。主电路设计主要采用型号为FP50R06KE3的PIM模块，220 V的单相交流输入电压，经过整流和滤波后，输出约310 V的直流母线电压，直流母线电压可作为三相逆变电路的输入电压；驱动电路由dSPACE发出六路SVPWM驱动信号，经过光耦隔离后输出15 V的驱动电压驱动PIM模块上的三相逆变电路，从而使三相逆变电路的上下桥臂IGBT管交替导通，经过逆变之后输入交流电机之中，驱动电机运行。控制系统框图如图2所示。

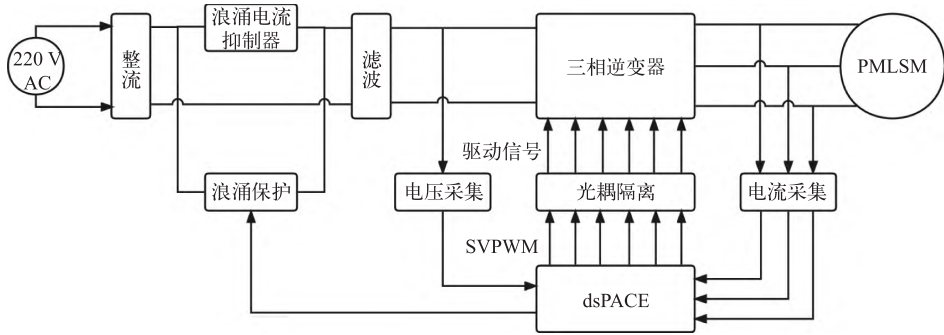


图2 控制系统框图

2. 主电路设计

主电路采用交-直-交的电压转换方式原理图如图3所示，采用英飞凌IPM模块系列型号为FP50R06KE3的IGBT模块作为主控核心，该模块最

大输入电压为600 V、50 A，可以满足所需的电压电流输入范围，IPM模块主要包括一个降压电路、一个滤波电路和一个三相逆变电路。

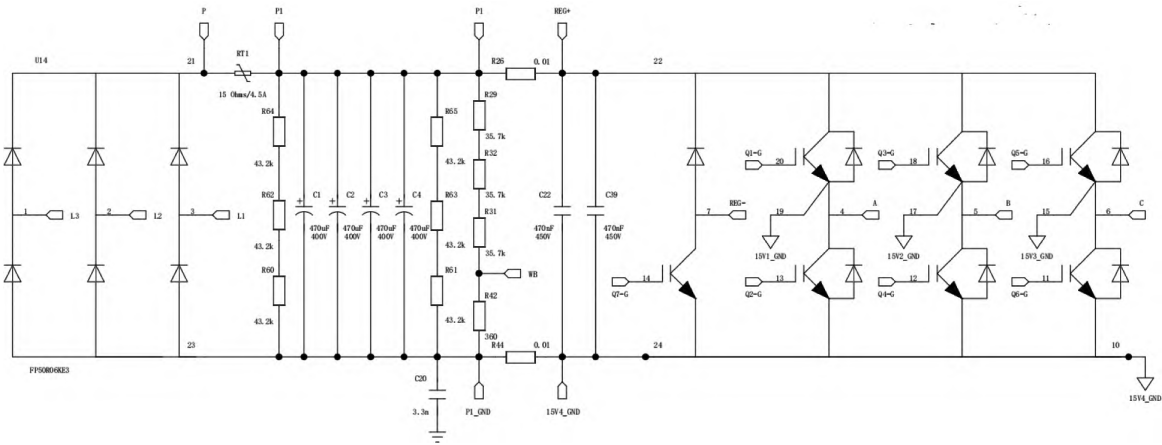


图3 主电路原理图

3. 驱动电路设计

驱动电路原理图如图4所示,采用P314驱动光耦作为驱动芯片,P314芯片由一个GaAsP LED光学

耦合到一个集成电流输出级电路组成。这种光耦合器非常适用于电机控制变频器应用中IGBT的功率控制。

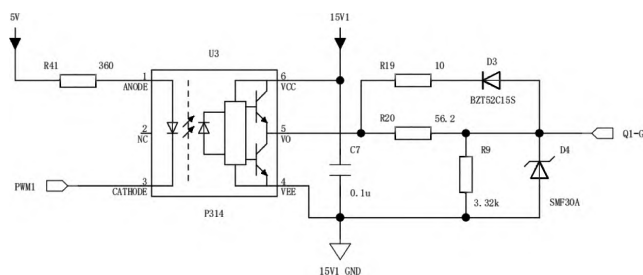


图4 驱动电路原理图

4. 采集电路设计

电流电压采集电路原理图如图5、图6所示，采用AMC1200隔离放大芯片作为采集芯片，AMC1200芯片的采集准确度高，通过磁场抗扰度较

高的SiO₂隔离层输入和输出,抗干扰能力强,通过差分信号输出,可以有效避免其他电路对采集电路产生的干扰。

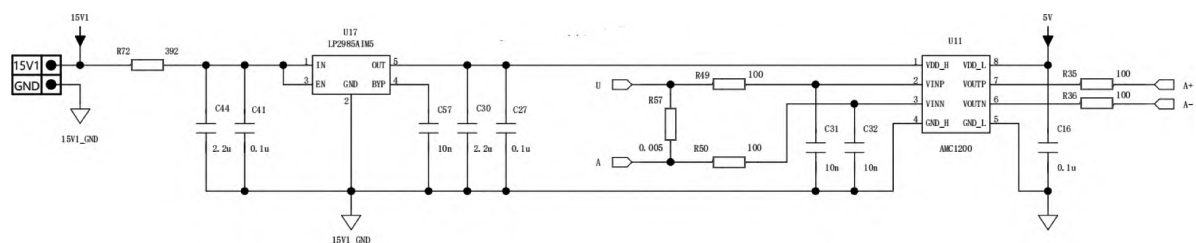


图5 电流采集电路原理图

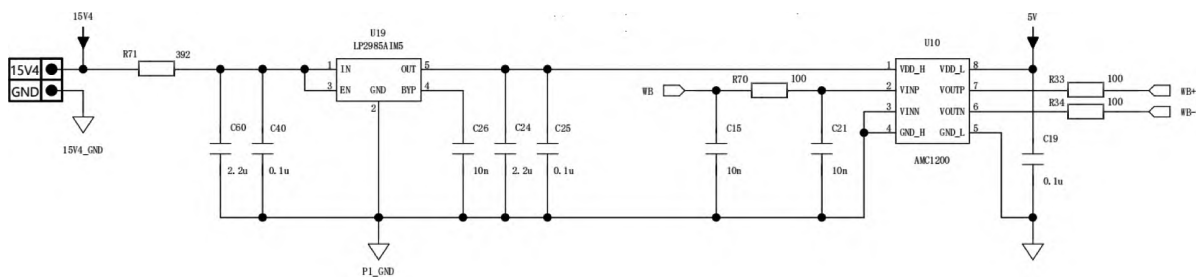


图6 电压采集电路原理图

温度采集电路原理图如图7所示,采用PIM模块中的NTC热敏电阻,可以将PMLSM运行时产生的温度通过NTC热敏电阻把数据传输给dSPACE读取,然后根据驱动器运行时的最高温度为限值进行判断,超过额定温度值时将停止PMLSM的运行,从而形成过温保护。

5. 保护电路设计

软启动保护电路原理图如图8所示，是在整流部分和滤波部分之间的浪涌电流抑制器（NTC）两边并联一个继电器，抑制刚启动的浪涌电流冲击造

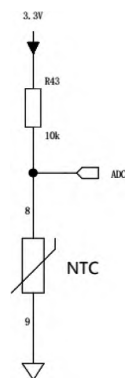


图7 温度采集电路原理图

成电路的损坏，上电瞬间，NTC电阻温度低，阻值大，抑制了浪涌电流。NTC电阻的温度随之上升，阻值下降，直到很低，不耗电。但如果NTC电阻在短时间内反复通断，来不及降温，电阻值总是

很低，无法抑制电流，无法起到保护作用。所以这时候需要并联一个继电器，启动后继电器会被电吸引，从而短路NTC电阻，给NTC电阻时间降温，从而保护电路可以正常的运行。

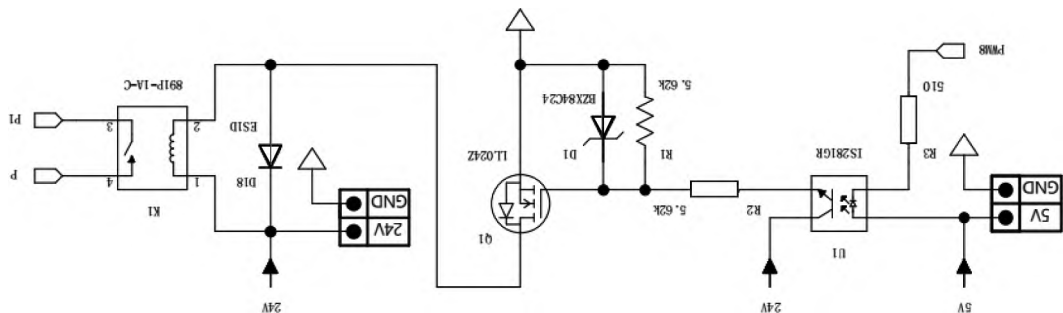


图8 软启动保护电路原理图

主电路仿真

在MATLAB/Simulink软件上搭建出主电路的仿真模型^[9-10]，采用SVPWM信号输入的方式，查看其输出的波形，以验证所设计的主电路有可靠性。

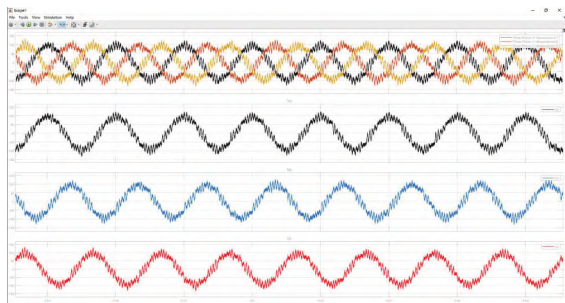


图9 三相输出电压波形图

由图9可得三相输出电压的仿真波形。由图可知，本文设计的主电路是可行的。

PMLSM驱动器PCB设计

1. PCB设计思路

在所有电路设计完成后，使用PADS Layout进行PCB绘制。由于所设计的电路中有多个15 V独立电源给IGBT管供电，且还有交流电源与直流电源的输入，故采用PCB四层板的绘制方式，把不同的电源隔离开，避免造成电路中信号的干扰。

2. PCB布局

首先以PIM模块为核心，驱动电路和采集电路靠近PIM模块；左下角为单相交流220 V输入，经过主电路的整流逆变，输出三相交流220 V电源驱动

PMLSM运行；右上角为四个15 V独立开关电源的接口，由这四路15 V独立电源给驱动光耦供电从而控制IGBT管的导通与关断；右下角为直流5 V和直流24 V的开关电源接口，主要为一些芯片和继电器供电；右边则是输入和输出的信号接口，采用IDC连接器连接转接板，实现输入信号何输出信号的传输，保证整个系统可以正常运行。

3. PCB走线^[11-12]

在PCB走线前，需要设置好走线设计规则，不同的信号线或者电源线所对应的线宽也是不同的。本设计采用四层板布线，第一层和第四层主要走一些信号线，第二层主要走地线，形成一个地平面，从而可以起到抗干扰的作用，第三层主要走电源线，作为电源层把主要电源都集中在一起，以免对其他信号传输造成电磁干扰。

4. 丝印整理

丝印整理是一块PCB板设计的外观体现，做到工整有序可以让PCB板看上去更加规范，同时方便后续的焊接和元件及信号等的查找。

系统调试与结果分析

1. 电源调试

首先对主电路电源上电，输入单相交流220电压，用万用表检测是否有直流电压输出，保证整流电路正确性，进而可以保证三相逆变电路的母线电压正常；再用万用表测量24电源、15电源、5电源和3.3电源是否正常输入，保证整个电路的电源

无误。

2. 驱动信号调试

由dSPACE发出六路SVPWM信号，其中两个互补的驱动信号如图10所示，可以看出黄蓝信号有死区时间，防止IGBT直通。驱动信号经过隔离板之后再进入驱动板的驱动光耦芯片，使芯片正常输出所对应的驱动信号给IGBT管，驱动三相逆变电路的运行。

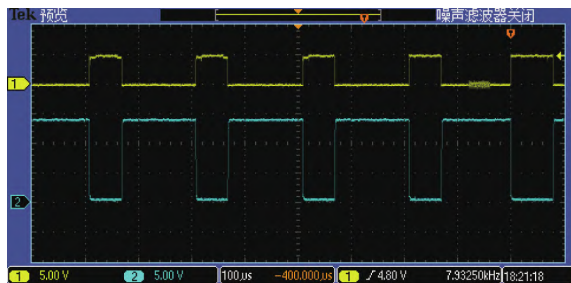


图10 两路互补的驱动信号波形图

3. 采集信号调试

对电流采样电路的BC两相进行调试，在保证输入电压无误的情况下且PMLSM正常运行时，用示波器探头夹住B相和C相，且B相和C相是共地的，在示波器上显示出BC两相的电流波形。再与仿真对比，可以验证采样电流波形基本正确。

4. 整机调试

在保证所有电路正确后对整个驱动系统进行上电测试，接上PMLSM负载，用示波器探头箝位UV相位，观察输出信号波形。再与仿真电路对比，可以验证整个电路的输出波形基本正确。

结束语

本文采用dSPACE研制的永磁同步直线电机全开放驱动器，主控芯片采用dSPACE半实物实时仿真系统，运算能力强，实时性好，软件开发效率高，且丰富的外设I/O口。因为直线电机位置、速度和电流信号的开放性，从而可以搭载各种复杂的控制算法，可以实现PMLSM的位置、速度和电流的精确闭环控制，并且实现了驱动器的多种保护功能，如软启动、过温、过电压、欠电压和过电流保护。EA

(收稿日期：2024-09-09)

参考文献

- [1] 吴红星，钱海荣，刘莹，等．永磁直线同步电机控制技术综述[J]．微电机，2011，44(7)：76-80+96.
- [2] 李泽声．永磁同步直线电机的高速高精度控制器研究[D]．广东工业大学，2022.
- [3] 夏加宽，王成元，李皞东，等．高精度数控机床用直线电机端部效应分析及神经网络补偿技术研究[J]．中国电机工程学报，2003，23(8)：100-104.
- [4] Jones B. Power Electronics and AC Drives[M]. Modern power electronics and AC drives, 2003：309-309.
- [5] 谢侠飞，张丽荣．直线电机的发展与应用概述[J]．科技视界，2013(15)：102+83.
- [6] Chang I, Kang D, Lee J, et al. Development of transverse flux linear motor with permanent-magnet excitation for direct drive applications [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005. 41(5): 1936-1939.
- [7] 张阳，尚姝钰，顾冬冬，等．基于dSPACE的电机控制系统实时仿真研究[J]．安徽师范大学学报(自然科学版)，2015，38(5)：445-449.
- [8] 魏才柱．基于dSPACE的PMSM无位置传感器矢量控制研究[D]．厦门理工学院，2019.
- [9] 袁雷，胡冰新，魏克银．现代永磁同步电机控制原理及MATLAB仿真[M]．北京航空航天大学，2015.
- [10] 李三东，薛花，纪志成．基于Matlab永磁同步电机控制系统的仿真建模[J]．江南大学学报(自然科学版)，2004(2)：116-126.
- [11] 黄杰勇，林超文，周家辉等．PADS电路板设计超级手册[M]．电子工业出版社．2016.
- [12] 黄杰勇，路月月，杜俊林，等．PADS电路原理图和PCB设计实战[M]．北京：清华大学出版社．2021.