

基于 dSPACE 和三菱 IPM 的电机控制平台保护^{*}

梁力波¹, 王淑红¹, 王伟², 刘旭¹, 许二威¹

(1. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024;

2. 国网定州市供电公司, 河北 定州 073000)

摘要: 电机控制中常见的控制芯片有 DSP、ARM、单片机等。这些都需要根据设计的算法进行手工编程, 开发周期较长。半实物仿真系统 dSPACE 针对这类问题提出了很好的解决方案, 大大缩短了开发周期。从原理上介绍了电机控制的硬件保护和软件保护, 并分析了智能功率模块 IPM 死区保护和 dSPACE 死区模块具体实现时产生的冲突。提出一种协调电路解决此问题。理论分析与制作的控制板试验结果表明, 此方法可同时满足死区保护和硬件保护要求, 实现 IPM 的正常工作。

关键词: 电机控制; dSPACE; 半实物仿真; 死区保护; 硬件保护; 软件保护

中图分类号: TM 301 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)02-0077-05

Motor Control Platform Protection Based on dSPACE and Mitsubishi IPM^{*}

LIANG Libo¹, WANG Shuhong¹, WANG Wei², LIU Xu¹, XU Erwei¹

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Dingzhou Power Supply Company of State Grid, Dingzhou 073000, China)

Abstract: The common control chips in motor control were DSP, ARM, microcontroller unit (MCU), etc. These chips needed to be manually programmed for motor control applications according to the designed algorithm, and the development cycle was long. The semi-physical simulation system dSPACE offered a good solution for this problem, and on this basis, the controller development cycle was greatly shortened. We introduced the hardware protection and software protection of motor control in principle and analyzed the conflicts caused by IPM dead zone protection and dSPACE dead zone module implementation. The conflict problem was solved by using a coordination circuit. Theoretical analysis and test results of the fabricated control panel showed that this method could meet the requirements of dead zone protection and hardware protection as well as the normal operation of IPM.

Key words: motor control; dSPACE; hardware-in-the-loop simulation; dead zone protection; hardware protection; software protection

0 引言

随着电力电子器件和微处理器的发展, 使用固态电子开关的变频器让交流电机驱动不再像直流电机那样受到机械换流器的限制, 从而使得电力传动的应用领域快速扩张。传统的电机控制当中较为常见的控制芯片有 DSP、ARM、单片机等^[1]。使用这些芯片进行电机控制前需要手动编

程, 因此开发时间较长。控制器可由传统常用的 DSP 改为半实物仿真系统 dSPACE。dSPACE 软件使用 MATLAB/Simulink 作为其工具前端。使用实时接口 (RTI) 工具, dSPACE 可以直接继承开发人员在 MATLAB 软件环境中获得的 Simulink 算法模型, 并自动将此模型转换为实时运行的程序代码, 下载代码在其专用硬件平台上运行以缩短开发周期^[2]。

^{*} 基金项目: 山西省自然科学基金项目 (2013011035-1)

作者简介: 梁力波 (1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机与电器。

王淑红 (1965—), 女, 教授, 硕士生导师, 研究方向为新型电机理论与控制技术。

IPM 是三菱电机生产的智能功率模块。在应用于电机控制时,采用空间矢量脉宽调制(SVPWM)控制技术的 IPM 同一个上下桥臂 2 个开关管工作为互补状态。因此在上下管控制信号之间必须采用固定的延时时间使 IPM 同一上下桥臂的 2 个开关管无法发生直通现象。此保护称为死区保护^[3]。

电压型交直交变频调速主电路由三相不可控整流电路、直流滤波电路、逆变电路,以及吸收电容和均压电阻等组成。本文研究的控制系统中逆变器使用的是三菱公司的智能功率模块 PM25RL1A120。PM25RL1A120 的控制信号输入端口 UP、VP、WP、UN、VN、WN 以及错误信号输出端口 UFO、VFO、WFO、FO 都是 0 V 低电平有效。

系统中,控制单元使用的是 dSPACE 公司 2015 年推出的产品 MicroLabBox。RTI 是连接 dSPACE 与 MATLAB/Simulink 的纽带。RTI 针对不同的系统提供了额外的 Simulink 库,利用库中的这些模块就能完成 I/O 口的设置^[4-5]。RTI 库里 EMC Multi Channel PWM 模块就是用于多通道脉宽调制(PWM)模块进行开关信号的生成,该模块的输入是各通道的占空比和 PWM 的周期,该模块 PWM 死区时间默认为 PWM 波上升沿延时,因此同一桥臂上下管在死区时间内控制信号均为低电平,会导致 IPM 上下桥臂发生直通现象。目前没有文献针对此问题提出解决方案。为此,本文详细介绍了电机控制的硬件保护和软件保护,重点提出了与非门组合电路,解决 IPM 死区保护和 dSPACE 死区模块具体实现时产生的冲突。

1 硬件保护和软件保护的原理

1.1 IPM 保护电路

IPM 内部包含短路、过温、欠压、过流保护电路。

欠压保护。IPM 模块的供电电压为 15 V 的直流电源。当供电电压小于设定的电压阈值时,IPM 被强制关断且对外输出错误信号。

过热保护。IPM 模块内部安装温度传感器。当温度大于过温跳闸等级时,IPM 被强制关断且输出错误信号,直到 IPM 温度恢复正常。

过流保护。当流过 IPM 的电流超过过电流

阈值且持续时间大于规定值 10 μs 时,IPM 被强制关断且对外输出错误信号。

短路保护。PM25RL1A120 具有实时电流控制技术,响应时间在 100 ns 以内。当负载短路时,为防止 IGBT 损坏,功率模块的短路保护将动作,同时产生错误信号。

当功率模块发生上述任意故障时,FO 信号由高电平变为低电平,驱动后级电路封锁 dSPACE 发出的 PWM 脉冲以保护系统。

这些保护都不是保持性的,保护一段时间 t_{on} 后,如果错误消除 IPM 将退出保护。如果错误没有消除,IPM 将重新进入内部保护,如此循环。为保证 IPM 的持续保护,需增加额外的硬件保护。

1.2 过压保护电路

过压保护电路原理如图 1 所示。

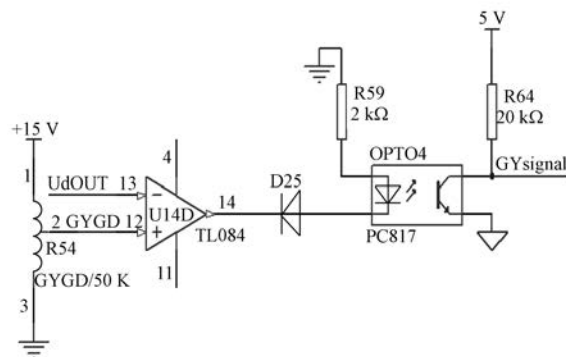


图 1 过压保护电路原理

将直流母线电压霍尔输出信号与设定的阈值信号实时比较。系统正常运行时,运算放大器输出高电平电压,过电压保护信号 (GYsignal) 为 5 V 高电平;故障发生时,过压保护信号变为 0 V 低电平。

1.3 过流保护电路

过流保护电路原理如图 2 所示。

由于电流霍尔输出为交流量,所以先对其每相信号进行翻转,然后将翻转后的三路电流信号进行逻辑或运算,再与设定的阈值实时比较。有一相出现过电流现象,过流保护信号就变为 0 V 低电平。

1.4 硬件保护

dSPACE 的 PWM 控制信号经过上拉电阻和与非门之后可以保证在程序未运行时 IPM 的控制信号全为高电平,使所有上下桥臂开关管均保持关断,如图 3 所示。

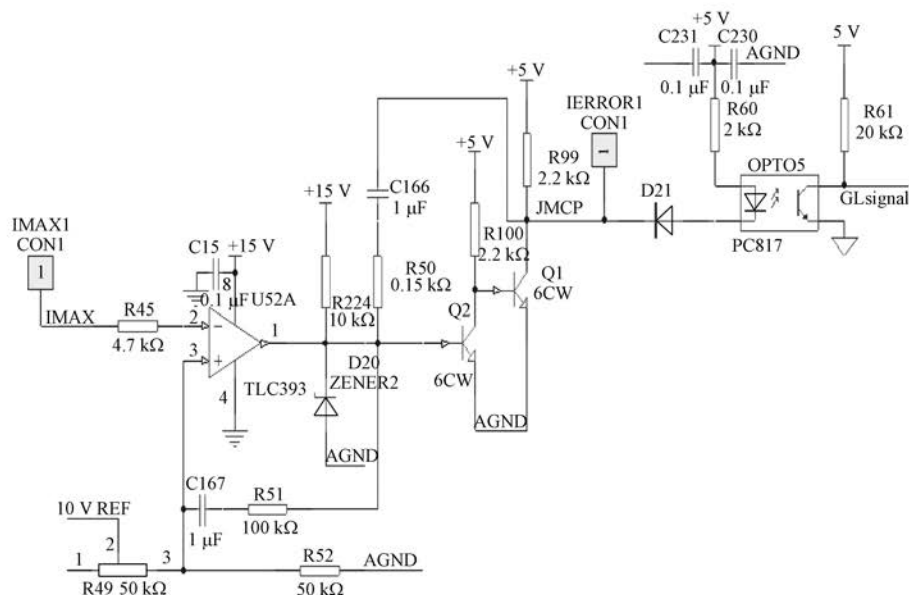


图 2 过流保护电路原理

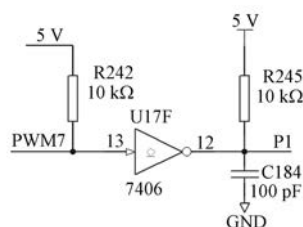


图3 dSPACE 的 PWM 波原理图

外部的保护电路可以将 IPM 的错误信号 FO (IGBT P1)、电机的过流保护错误信号 (GLsignal) 和直流母线电压的过压保护错误信号 (GYsignal) 输入锁存器(见图 4), 然后进行与运算, 产生总的错误信号 AERROR, 如图 5 所示。AERROR 与六路 PWM 波信号进行与非, 如图 6 所示, 实现硬件保护。

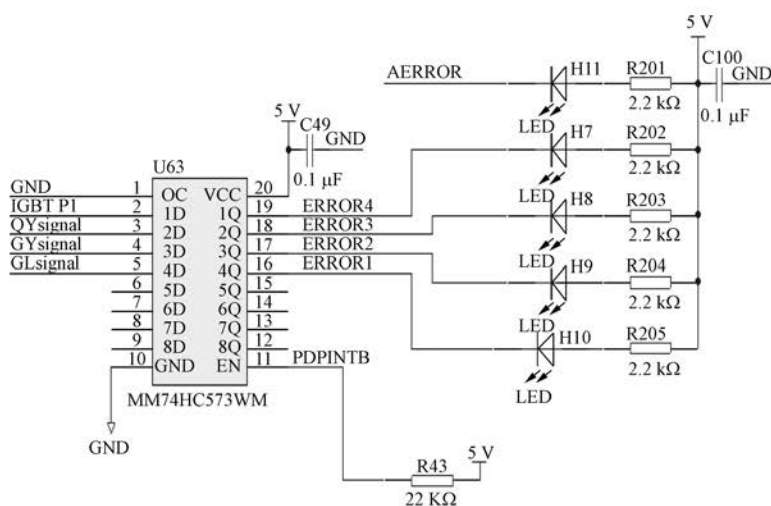


图 4 锁存器原理图

硬件保护的基本原理:当系统正常运行时,IPM 的错误信号、电机的过流保护错误信号和直流母线电压的过压保护错误信号均保持着高电

平,总的错误信号 AERROR 保持为高电平,使得 PWM 波输出信号正常输出。当有一个错误发生时,总的错误信号 AERROR 变成低电平,使得六

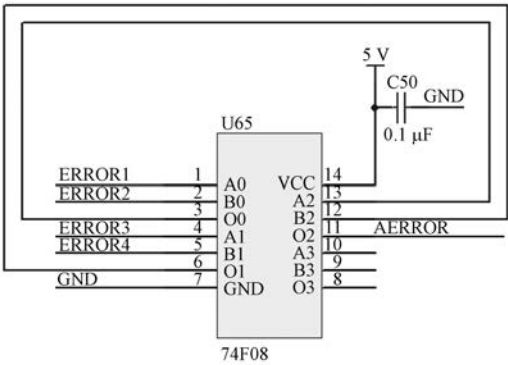


图5 总的错误信号 AERROR

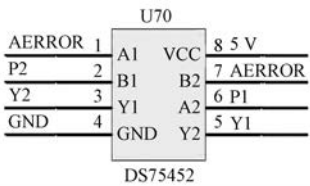


图6 硬件保护原理图

路 PWM 波输出信号都保持为高电平,IPM 所有上下桥臂均保持关断,直到人为重启复位系统。

1.5 软件保护

软件保护即将总的错误信号 AERROR 通过 dSPACE 数字 I/O 口接到 Simulink 模型中 STOP 模块上。当输入非 1 时,Simulink 程序就停止^[6],实现了软件保护,如图 7 所示。

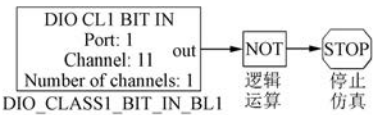


图7 软件保护

MicroLabBox 上位机软件使用的版本是 ControlDesk6.1, RTI 库中 EMC Multi Channel PWM 模块死区时间默认为 PWM 波上升沿延时,即在死区时间内上下路 PWM 信号均为 0 V 低电平,如图 8 所示。

在无错误信号的情况下,dSPACE 的 PWM 输出信号经过非门 7406 和与非门 DS75452 后与 IPM 的 PWM 输入侧驱动信号同相,如图 9 所示,即死区时间内 IPM 上、下桥臂开关管对应的 PWM 驱动信号也都是低电平,因此使上下桥臂开关管发生直通造成短路,无法实现死区保护^[7]。

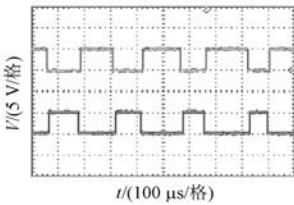


图8 dSPACE 上下路 PWM 输出信号

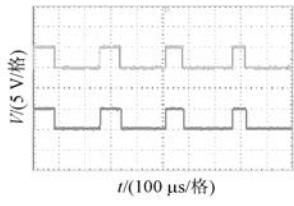


图9 dSPACE 与 DS75452 之后的信号

2 协调电路解决方法

在确保硬件保护满足的条件下,为了避免上下桥臂开关管发生直通现象,需确保系统在死区时间内 IPM 上、下桥臂开关管对应的输入驱动信号都保持为高电平。软件解决方案中,死区的设置受到计算步长的影响,即死区时间必须为计算步长的整数倍,当程序很大时计算步长大大超过了 15 μs,故该方案不可行。因此,本文从硬件上解决问题:在 DS75452 的 PWM 输出信号后设计一协调电路,使得此电路后的输出信号在死区时间内上下桥臂均为 0 V 低电平。该电路必须满足如表 1 所示的逻辑状态。

表 1 硬件保护与死区保护协调电路逻辑状态表

Y1	Y2	pd1	pd2	备注
1	0	1	0	上桥臂关断,下桥臂导通
0	1	0	1	上桥臂导通,下桥臂关断
1	1	1	1	硬件保护
0	0	1	1	死区保护

令 $Y1 = A, Y2 = B$, 则

$$pd1 = \overline{A}B + A\overline{B} + \overline{A}\overline{B} = A + \overline{A}B = \overline{A}B \quad (1)$$

$$pd2 = \overline{A}B + A\overline{B} + \overline{A}\overline{B} = B + \overline{A}B = \overline{B}A \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可得在 DS75452 的 PWM 输出信号后接入的协调电路,如图 10 所示。

3 试验结果

基于上述理论和协调电路原理图,制作了协调

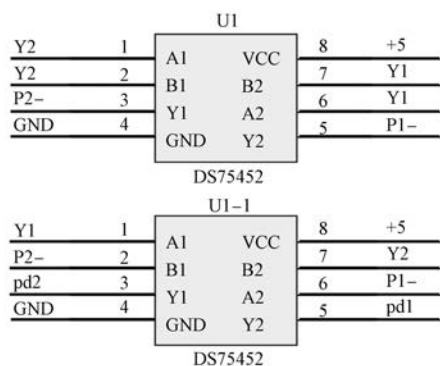


图 10 协调电路原理图

电路。如图 11 所示为接入协调电路后 Y1 和 pd1 的波形图。从图 11 可以看出,协调电路将 dSPACE 输出的死区时间中的低电平转换为高电平。

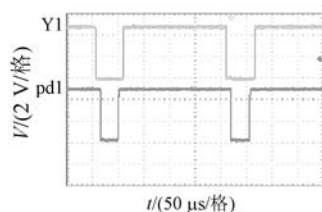


图 11 Y1 和 pd1 的波形图

图 12 所示为接入协调电路后 pd1 和 pd2 的波形图,即 IPM 上下桥臂的驱动信号波形。可以看出,死区保护时间内,IPM 的上下桥臂都同时关断。

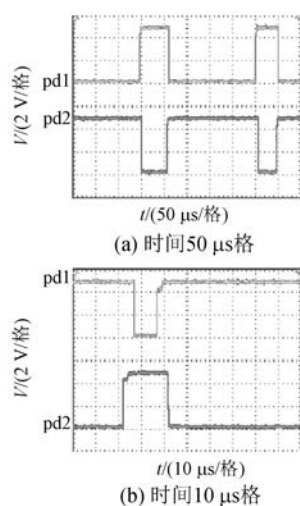


图 12 上下桥臂驱动信号

图 13 所示为接入协调电路后,硬件保护期间上、下桥臂的驱动波形。可以看出,硬件保护期间,IPM 的上下桥臂同时关断。

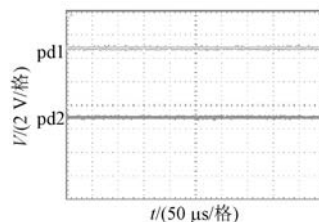


图 13 硬件保护期间上下桥臂的驱动信号

综上所述,接入协调电路后,在满足硬件保护的条件下,解决了 dSPACE RTI 库里 EMC Multi Channel PWM 模块死区保护造成的 IPM 上下桥臂开关管发生直通的问题,将死区保护时间内低电平转换为高电平。

4 结 语

本文针对基于 dSPACE 和三菱 IPM 的电机控制平台保护问题,详细地阐述了硬件保护与软件保护的原理,采用协调电路解决 IPM 死区保护和 dSPACE 死区时间的冲突问题。理论分析和试验结果表明,该方案简单实用,可同时保障电机控制时的死区保护、硬件保护、软件保护以及 IPM 的正常工作。

【参考文献】

- [1] 冬雷.DSP 原理及电机控制系统应用[M].2 版.北京:北京航空航天大学出版社,2007.
- [2] 宋国强.dSPACE 电机控制平台设计与 SVPWM 矢量控制实现[J].电机与控制应用,2015,42(9): 23.
- [3] 陈坚.电力电子学——电力电子变换和控制技术[M].2 版.北京:高等教育出版社,2004.
- [4] 呼明亮,邱建琪,史涔激.基于 dSPACE 的无刷直流电机控制系统[J].微电机,2011,44(4): 60.
- [5] 李玉东,葛敬涛,易庚.基于 dSPACE 的永磁同步电机控制系统研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2017,36(3): 96.
- [6] 恒润科技公司. dSPACE——基于 MATLAB/Simulink 平台实时快速原型及硬件在回路仿真的一体化解决途径[G].2004.
- [7] POHL L, VESELÝ L. PMSM control framework with dSPACE real-time control platform [C] // IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems, 2012: 179.

收稿日期: 2018-09-18