

绝缘栅双极型晶体管驱动单元建模与仿真分析

李敏 刘志强 潘彦全

(中国第一汽车股份有限公司研发总院, 长春 130013)

【摘要】为解决新型功率模块驱动芯片无仿真模型,无法进行驱动单元电路原理仿真验证的问题,以英飞凌 1ED020I12FA2 芯片为例,从驱动单元的核心器件及其外围电路建模方面开展研究,并提出一种适用于驱动芯片的建模仿真方法,通过与芯片数据手册对比验证了模型的正确性,并基于该模型采用 Saber 软件对驱动单元的电源变换功能、隔离与功率放大功能和绝缘栅双极型晶体管(IGBT)模块保护功能进行电路原理建模,对部分重要功能逻辑进行测试验证,结果表明,相应功能逻辑符合设计预期。

关键词: 功率单元 驱动芯片 状态机 逻辑与时序

中图分类号: TM464

文献标志码: A

DOI: 10.20104/j.cnki.1674-6546.20230125

IGBT Driver Modeling and Simulation

Li Min, Liu Zhiqiang, Pan Yanquan

(Global R&D Center, China FAW Corporation Limited, Changchun 130013)

【Abstract】New power module driver chip has no simulation model, unable to simulate and verify the principle of drive unit circuit. To solve this problem, the paper, taking Infineon 1ED020I12FA2 chip as an example, studied the modeling of core devices and peripheral circuits of drive unit, and proposed a modeling and simulation method suitable for driver chip, and verified the correctness of the model through comparison with the chip data manual. And based on this model, software Saber was used to model the circuit principle for power conversion function, insulation and power amplification function and model protection function of Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT), some of the important function logics were tested and verified. The results show that the corresponding function logics meet design expectation.

Keywords: Power unit, Driver chip, State machine, Logic and timing

【引用格式】李敏, 刘志强, 潘彦全. 绝缘栅双极型晶体管驱动单元建模与仿真分析[J]. 汽车工程师, 2023(7): 1-5.

LI M, LIU Z Q, PAN Y Q. IGBT Driver Modeling and Simulation[J]. Automotive Engineer, 2023(7): 1-5.

1 前言

功率单元将电池的直流电转换为驱动电机运转所需的交流电,是电动汽车功率调节的核心部件,其工作由驱动单元控制,驱动单元功能的准确性将直接影响整车性能和行驶安全性。

驱动芯片是驱动单元电路的核心器件,为在驱动单元设计初期进行仿真,需要针对驱动芯片进行芯片逻辑与时序及功能的建模。目前,国内外整车制造商在驱动单元建模时,普遍采用驱动芯片制造商提供的芯片简化模型,简化模型通常存在功能不完整或无法反映芯片瞬态特性的问

题。芯片制造商为保护知识产权也可能不提供芯片模型,如电动汽车电驱动系统用驱动芯片^[1]。

本文以英飞凌 1ED020I12FA2^[2]芯片为例,从驱动芯片及其外围电路建模方面研究适用于驱动芯片的建模仿真方法,并进行测试验证。

2 驱动芯片建模

2.1 驱动芯片的主要功能

1ED020I12FA2 是一款增强型栅极驱动器,既可用于驱动绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT),也可用于驱动金属氧化物半导体场效应晶体管(Metal Oxide Semiconductor

真值表和保护功能逻辑真值表,如表1和表2所示。

表1 1ED020I12FA2芯片基本功能逻辑真值表

输入			输出
/RST	IN-	IN+	OUT
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	0
1	1	1	0

表2 1ED020I12FA2芯片保护功能逻辑真值表

输入				输出		
IN+	VCC1	VCC2	DESAT	OUT	RDY	/FLT
0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0
1	1	0	1	0	0	1
1	1	1	0	0	1	0
1	1	1	1	1	1	1

为使芯片工作逻辑更为简化,在一般应用中采用将IN-信号直接接入低电平的电路连接方式,由电源VCC1电压幅值决定芯片输入IN+的电平。

2.3 驱动芯片建模与仿真

基于以上针对1ED020I12FA2芯片的功能分析,利用Saber软件的StateAMS工具,搭建1ED020I12FA2芯片的行为级仿真模型^[3-4],如图3所示。在不清楚芯片内部电路结构的情况下,根据芯片的输入、输出关系,对芯片的动作进行行为级^[2,5-6]描述,使其能够用于驱动单元的建模仿真,为驱动单元的各项功能仿真验证提供基础。

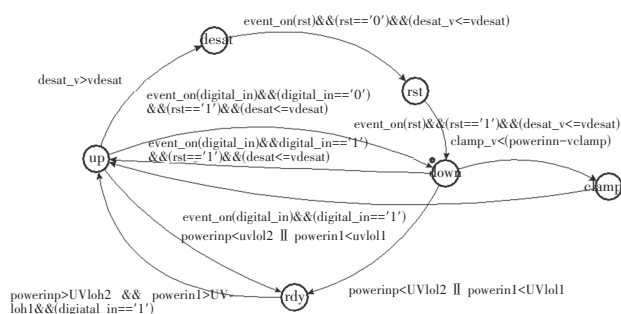


图3 1ED020I12FA2芯片行为级模型

根据数据手册中提供的典型应用电路,搭建芯片的应用电路模型并仿真,输出波形如图4所示。由图4可以看出,前15 μs模拟1ED020I12FA2芯片

原边5 V电源欠压,前35 μs模拟1ED020I12FA2芯片副边15 V电源欠压,在第54.5 μs时触发1ED020I12FA2芯片退饱和保护功能,第100~105 μs芯片复位后,1ED020I12FA2芯片输出恢复正常,直到第122 μs时1ED020I12FA2芯片原边5 V电源再次欠压,芯片输出保持低电平。模型输出波形与数据手册中描述的时序逻辑相符。

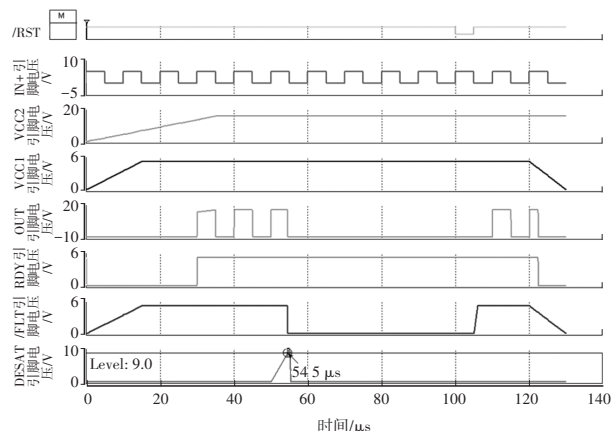


图4 1ED020I12FA2芯片仿真波形

3 驱动单元建模

3.1 驱动单元的主要功能

驱动单元控制IGBT按照要求进行动作的同时,需对IGBT进行必要的保护,其主要功能包括^[7]:

a. 电源变换功能。提供驱动IGBT开关动作所需的电压及功率,同时具有信号处理所需的模拟电源与数字电源。主电源变换电路将12 V电源变换为6路+15 V/-8 V电源用作驱动芯片的副边电源。

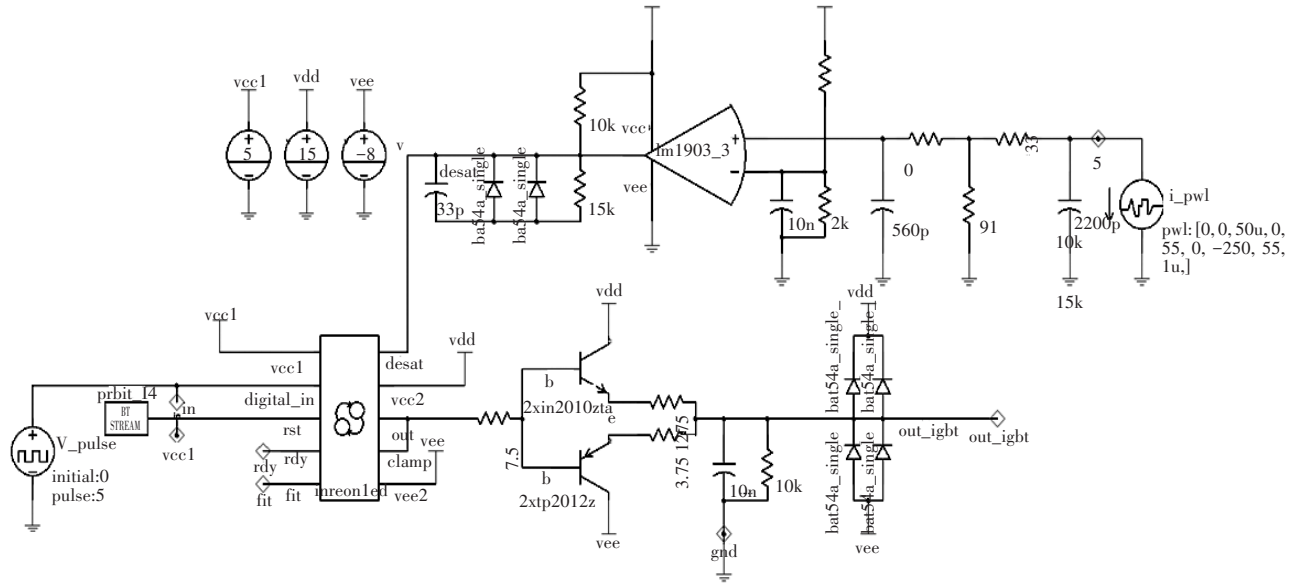
b. 隔离及功率放大功能。通过1ED020I12FA2芯片对驱动信号的高低电压实现隔离及功率放大。

c. 模拟量采样及信号处理功能。采集功率模块温度、直流母线电压等模拟量信号并处理。

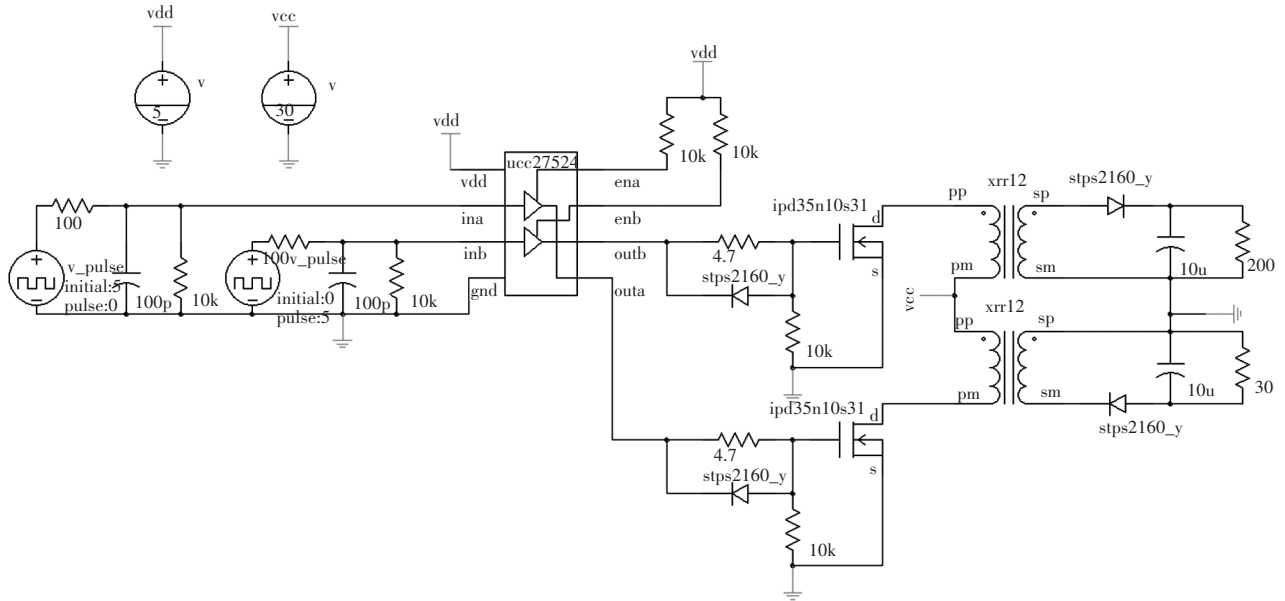
d. IGBT模块保护功能。为IGBT模块提供过压、过流、短路及过热等保护功能。利用1ED020I12FA2芯片的DESAT功能匹配适当的外围电路实现IGBT模块的短路保护,短路保护响应时间不超过5 μs。

3.2 驱动单元建模与仿真

通过以上对驱动单元功能的分析,本文基于Saber软件对驱动单元的电源变换功能^[8]、隔离与功率放大功能^[6]和IGBT模块保护功能^[9]进行电路原理建模,如图5所示。驱动单元中的核心驱动芯片采用1ED020I12FA2芯片模型。



(a) 功率放大电路



(b) 电源电路

图5 驱动单元电路原理模型

在驱动单元的仿真中,将仿真时间延长至6 ms,仿真结果如图6所示。其中前1 ms模拟了芯片副边15 V电源的建立过程,由于此时电源电压幅值没有达到 V_{UVLOH2} 的限值,芯片输出RDY信号,即使芯片原边IN+引脚有脉冲输入,其输出仍为低电平;第1 ms后芯片副边电源幅值达到15 V,芯片输出逻辑电平与IN+输入一致;第3 ms时触发退饱和保护功能,此时距短路故障发生的时间为4 μ s,芯片报/FLT的同时,输出关闭,即持续输出低电平;直到第5 ms时发出复位信号,/FLT清除,芯片输出逻辑电平与IN+输入一致。该仿真结果与驱动单元电路的设计意图相符。

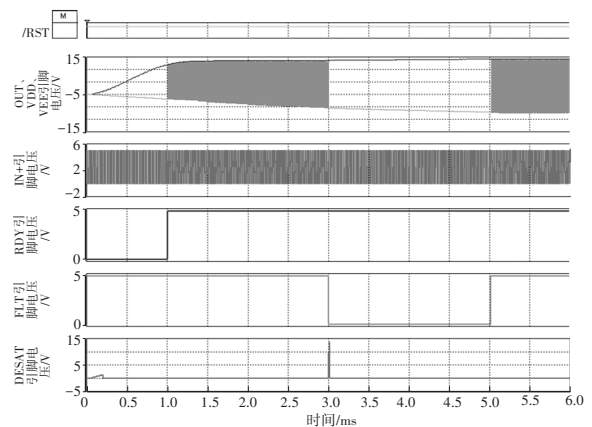


图6 驱动单元仿真波形

3.3 测试验证

为验证模型的正确性与有效性,对1ED020I12FA2型驱动芯片的驱动单元进行了功能测试^[10],测试结果如图7所示,其中, V_{ge} 为IGBT栅极驱动信号, I_c 为IGBT集电极电流信号, V_{ce} 为IGBT集电极与发射极间电压信号。受限于测试环境,仅对部分重要功能逻辑进行测试,测试结果符合设计预期。由图7a可知,当输入信号只有正输入IN+时,IN-为低电平,芯片的输出信号与输入信号IN+保持一致;由图7b可知,实际电路中短路故障发生后 $6\mu\text{s}$ 触发退饱和和保护功能,不论芯片输入IN+为何状态,芯片输出驱动信号均为低电平。

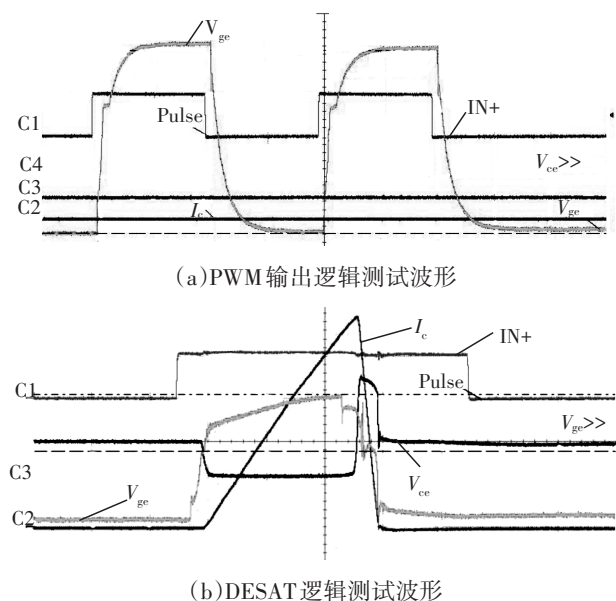


图7 基于1ED020I12FA2驱动单元双脉冲测试波形

4 结束语

本文基于Saber StateAMS工具建立了1ED020I12FA2型驱动芯片行为级模型,仿真结果表明,该模型能够准确反映芯片的工作时序与逻辑,将芯片模型应用于驱动单元的电路原理仿真,仿真结果与驱动单元电路的设计意图相符,验证了驱动单元电路设计的正确性。

参考文献

- [1] 于海芳,何芳. 新能源车用逆变器电特性行为级模型与试验验证[J]. 滨州学院学报, 2018, 34(6): 59-65.
YU H F, HE F. Electrical Characteristic Behavioral Modeling and Experimental Verification of Inverter for New Energy Vehicles[J]. Journal of Binzhou University, 2018, 34(6): 59-65.
- [2] Infineon. 1ED020I12FA2[EB/OL]. (2016-10-10) [2023-

- 05-06]. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-1ED020I12FA2-DS-v03_00-EN.pdf?fileId=db3a304333227b5e013344d078be4cdf.
- [3] 王家庆. 离散数学结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
WANG J Q. Structure of Discrete Mathematics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [4] 杨刚. 基于状态机的嵌入式系统开发[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
YANG G. Development of Embedded System Based on State Machine[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [5] 刘平,刘和平,郭军. 纯电动汽车异步电动机驱动系统的Saber建模与仿真[J]. 微特电机, 2011, 39(3): 69-72.
LIU P, LIU H P, GUO J. Saber Modeling and Simulation of Induction Motor Drive System for Electric Vehicles[J]. Small & Special Electrical Machines, 2011, 39(3): 69-72.
- [6] 张丹. 基于Saber的充电机功率模块电路仿真与分析[J]. 电子世界, 2020(23): 80-82.
ZHANG D. Simulation and Analysis of Charger Power Module Circuit Based on Saber[J]. Electronics World, 2020 (23): 80-82.
- [7] BALOGH L. MOSFET和IGBT栅极驱动器电路的基本原理[R/OL]. 上海: 德州仪器半导体技术(上海)有限公司 (2018-06-13) [2023-05-06]. <http://www.ti.com/cn/lit/ml/zhca770/zhca770.pdf>.
BALOGH L. Basic Principles of MOSFET and IGBT Gate Driver Circuits[R/OL]. Shanghai: Texas Instruments Semiconductor Technologies (Shanghai) Co., Ltd. (2018-06-13)[2023-05-06]. <http://www.ti.com/cn/lit/ml/zhca770/zhca770.pdf>.
- [8] 周润景. 常用驱动电路设计及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
ZHOU R J. Electronic Circuit Design Simulation and Production[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017.
- [9] 周志敏. IGBT驱动与保护电路设计及应用电路实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
ZHOU Z M. Design and Application Example of IGBT Drive and Protection Circuit[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [10] 暴杰,赵慧超,董秀辉,等. 电动车用永磁同步电机的三相短路稳态分析与应用[J]. 微特电机, 2014, 42(3): 17-20.
BAO J, ZHAO H C, DONG X H, et al. Steady-State Characteristics Analysis and Application of PMSM for Electric Vehicle with Symmetrical Three-Phase Short-Circuit[J]. Small & Special Electrical Machines, 2014, 42 (3): 17-20.

(责任编辑 王 一)

修改稿收到日期为2023年5月6日。