

一种高可靠性IGBT驱动电路设计

孟昭鹤^{1,2},卢贝贝^{1,2},于志强^{1,2},段一超^{1,2},葛婷婷^{1,2}

(1.天津电气科学研究院有限公司,天津 300180;

2.天津天传电气传动有限公司,天津 300301)

摘要:针对大功率IGBT的应用,其驱动电路是整个功率模块的核心部分。驱动电路的可靠性一定程度上决定了整个电力电子装置的可靠性,设计高可靠的驱动电路具有现实意义。以智能驱动光耦ACPL-332J为例设计了高效率、高可靠的驱动电路和电源电路。通过驱动电压抬升电路解决了驱动芯片电源电压利用率低的问题。通过设计电源的短路限流电路,实现了门极短路保护。最后,将该驱动电路应用到富士2MBI600XNG170-50模块上,通过了门极短路测试和主回路短路测试。该驱动电路应用在公司的新产品中,通过现场使用验证了其稳定性和安全性。

关键词:驱动电路;绝缘栅双极型晶体管;短路限流电路

中图分类号:TM464 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd26692

Design of a High Reliability IGBT Driver Circuit

MENG Zhaohe^{1,2}, LU Beibei^{1,2}, YU Zhiqiang^{1,2}, DUAN Yichao^{1,2}, GE Tingting^{1,2}

(1.Tianjin Research Institute of Electric Science Co.,Ltd.,Tianjin 300180,China;

2.Tianjin Tianchuan Electric Drive Co.,Ltd.,Tianjin 300301,China)

Abstract: For the application of high-power IGBT, its driving circuit is the core part of the entire power module. The reliability of the driving circuit to a certain extent determines the reliability of the entire power electronic device, and designing highly reliable driving circuits has practical significance. The intelligent driving optocoupler ACPL-332J was taken as an example to design a high-efficiency and high reliability driving circuit and power supply circuit. The problem of low utilization of power supply voltage in the driving chip has been solved by driving the voltage boosting circuit. By designing a short-circuit current limiting circuit for the power supply, gate short-circuit protection has been achieved. Finally, the driver circuit was applied to the Fuji 2MBI600XNG170-50 module and passed the gate short-circuit test and main circuit short-circuit test. The driver circuit has been applied in the company's new products and its stability and safety have been verified through on-site use.

Key words: drive circuit; insulated gate bipolar transistor (IGBT); short circuit current limiting circuit

绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT),具有驱动功率小、开关速度快、饱和压降低、高耐压、大电流等特点。IGBT作为功率单元中的关键器件应用很多,广泛应用于电动车、交流电机、变频器、开关电源、照明电路、轨道交通、光伏发电、风电等领域。

要使IGBT工作在效率、电磁兼容性和可靠性之间的最佳平衡点^[1],驱动电路的设计尤为重要。目前通常使用驱动光耦设计驱动电路,这很大程度上简化了驱动电路的设计。其中,ACPL-

33XJ系列芯片最常用,但该系列芯片存在信号压降偏大的缺陷,传统的设计方案是通过提高驱动电源的电压来抵消芯片带来的压降,该方案设计简单,但降低了电源电压的利用率和工作效率。

除驱动光耦外,驱动电源也是驱动电路重要组成部分。设计具有短路保护或限流功能的驱动电源对提高系统的可靠性至关重要。传统的短路保护设计方案是利用电源芯片的短路保护功能设计驱动电源的短路保护^[2],如图1所示。该短路保护方案需要在电源主回路串联一电阻,这

基金项目:国机研究院青年科研基金(TD2024ZK005)

作者简介:孟昭鹤(1982—),男,硕士,工程师,Email:mengzhaohe@163.com

会降低电源效率。

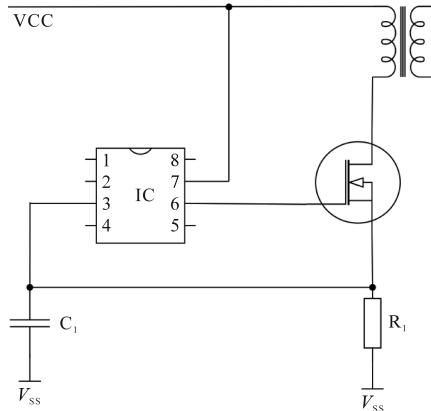


图1 传统的驱动电源短路保护电路

Fig.1 Traditional short-circuit protection circuit for driving power supply

文献[3]中提到的另一种驱动电源短路保护方案是通过短路引起驱动电源电压跌落,触发欠压保护来实现对IGBT的保护。该短路保护方案只能保证故障时刻IGBT处于关断状态,不能保护驱动电路自身不损坏。

本文将以ACPL-332J驱动芯片为例设计驱动电路^[4]。在充分利用驱动芯片的各种功能基础上,设计了驱动信号升压电路,弥补了驱动芯片输出信号偏低的缺陷。同时设计了具备门极短路限流功能的驱动电源,保证在门极短路时,驱动电路不失效。

1 ACPL-33XJ系列芯片的缺陷

ACPL-33XJ系列芯片是美国博通公司的门极驱动光耦芯片。该系列驱动芯片具有驱动电流能力强,工作电压范围宽,并集成了 V_{CE} 检测、欠压锁定、IGBT软关断、故障反馈、有源米勒钳位、自动故障复位等功能^[5]。

但该系列驱动芯片中的ACPL-330J,ACPL-331J,ACPL-332J和ACPL-333J存在缺陷——驱动信号输出的高电平比芯片供电电源低2 V。这就导致驱动电源的效率和电压利用率都较低。当使用该芯片驱动大功率IGBT时,驱动信号输出还要再加一级推挽电路^[6],会进一步降低到IGBT门极的电压。

造成该系列驱动芯片输出驱动电压低的原因是:这些芯片驱动信号输出采用了达林顿管的输出形式。ACPL-332J芯片的内部电路框图如图2所示。

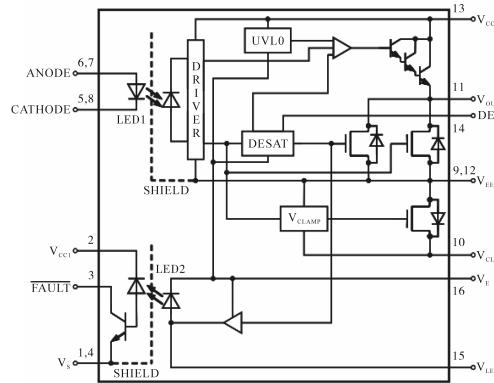


图2 ACPL-332J芯片内部框图

Fig.2 The block diagram of ACPL-332J

2 高可靠性驱动电路设计

2.1 驱动电路总体框图

基于ACPL-332J芯片设计的驱动电路框图如图3所示。电路由驱动电源、PWM输入、故障反馈输出、高电平抬升、软关断、推挽放大等电路组成。该驱动电路与传统的驱动电路(文献[5])相比,有如下改进:

1)设计了驱动电压抬升电路以及MOSFET和三极管相结合的推挽放大电路,实现了驱动电源电压的高利用率。

2)设计了驱动电源短路限流电路,保证在门极发生短路时,驱动电路不会失效。

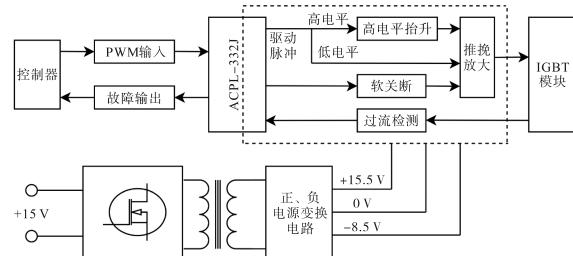


图3 驱动电路框图

Fig.3 The block diagram of drive circuit

2.2 高电平抬升功率放大电路

驱动高压侧电路简图如图4所示。电路主要分为三部分:具备高电平抬升功能的驱动功率放大电路、退饱和检测电路和米勒钳位电路。

由于ACPL-332J驱动信号输出高电平为达林顿管输出形式。当达林顿管导通时,芯片输出高电平,而达林顿管PN结有2 V的压降,进而导致输出的高电平电压比电源电压低2 V。并且,在驱动大功率IGBT时,传统的设计还要在芯片输出加一级推挽电路,以提高驱动功率。但这又进一步降低了IGBT门极的驱动电压。这样门极与

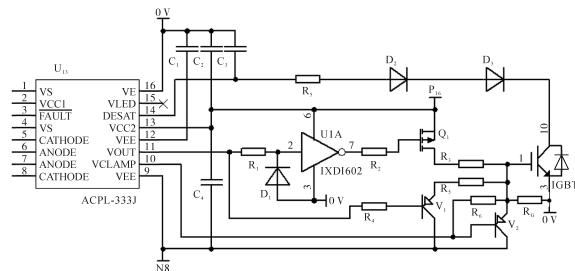


图4 ACPL-332J高压侧驱动电路简图

Fig.4 The high-voltage side drive circuit schematic diagram of ACPL-332J

正电源的压差将达到2.6 V。要保证IGBT门极驱动信号高电平达到15 V,驱动电路的正电源电压需要达到17.6 V,这就大大降低了驱动电源的效率和电压利用率。

为提高驱动电源的电压利用率,设计了驱动电平抬升电路,如图4所示。图中的U₁,Q₁,V₁,R₁,R₂,R₄,D₁组成了高电平电压抬升电路和功率放大电路。其中,U₁为高速MOSFET驱动芯片,Q₁为PMOS,V₁为PNP三极管。R₁和D₁为U₁输入电压钳位保护电路,其中D₁选用低压降的肖特基二极管。

电路工作原理如下:设驱动正电源电压为+15.5 V,负电源电压为-8.5 V。当驱动芯片原边接收到“导通”信号后,芯片11脚输出高电平。高电平的电压比电源电压低2 V,约为13.5 V。此时U₁输出低电平0 V,Q₁导通。由于PMOS管压降很小,故门极电平接近正电源电压,约15.5 V,IGBT导通。

当驱动芯片原边接收到“关断”信号后,驱动芯片11脚输出低电平,电压与负电源电压基本一致,约为8.5 V。此时U₁输出高电平15 V,Q₁关断。同时,PNP三极管V₁导通。由于三极管有0.6 V管压降,此时IGBT门极电压比负电源电压高0.6 V,为-7.9 V,IGBT关断。此处,V₁不使用低管压降的MOSFET的原因是:使用三极管可以充分利用ACPL-332J芯片的软关断功能,提高短路保护的可靠性。

总体来看,本文的驱动设计方案,在充分利用ACPL-332J软关断功能的基础上,将驱动信号高电平提升了2 V,这很大程度上降低了门极和正电源电压的压差,提高了驱动电源的利用率。

2.3 其他功能电路

2.3.1 米勒钳位电路

ACPL-332J芯片具有米勒钳位功能,该功能可以保证IGBT可靠关断,并大幅提高IGBT门极

信号的抗扰度。由于被驱动的IGBT所需驱动电流超过了驱动芯片能够提供的电流,米勒钳位信号端口需要加一级三极管功率放大,如图3中的V₁。

2.3.2 短路保护和软关断电路

ACPL-332J芯片集成了短路保护和软关断的功能。针对该功能的外围电路设计,包括短路检测电路和软关断的推挽放大电路。其中短路检测电路见图4中的R₅,D₂和D₃。软关断的推挽放大电路与驱动信号的推挽放大电路共用一个三极管,见图4中的V₁。需要注意的是,要利用驱动芯片的软关断功能,V₁必须使用三极管,不可以换成MOSFET。

2.4 具备限流功能的驱动电源电路

驱动电源采用推挽式脉冲控制器和脉冲变压器得到24 V电源^[8]。再通过8.5 V稳压管稳负压方案,得到+15.5 V和-8.5 V电源。在负电源电路中,通过电流采样和运放搭建负反馈电路,实现对门极短路工况的限流。电源原理简图如图5所示。

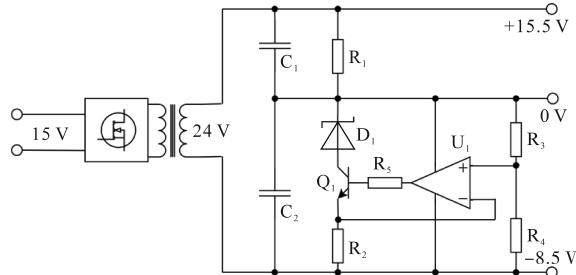


图5 具有短路限流功能的驱动电源

Fig.5 Drive power supply with short-circuit current limiting function

图5中,D₁为8.2 V稳压管;R₁为限流电阻,该电阻为稳压管提供稳定工作的静态电流;R₂为电流采样电阻;R₃和R₄为电压基准生成电路。R₂,R₃,R₄,R₅,三极管Q₁和运放U₁共同组成短路限流电路。下面分析计算不同工况下,该电路的工作原理。

2.4.1 驱动回路正常工作工况分析

当IGBT正常工作时,稳压管支路的电流较小,R₂上的电压也较小。通过合理选择R₂,R₃,R₄,R₅的值,可以保证在正常工况下运放工作在正偏状态。此工况下,三极管饱和导通,对稳压管支路的电流几乎没有限流作用,稳压管支路电流由负载决定。

下面以实际的电路参数说明该工况下电路的工作原理。

设 $R_1=2\text{ k}\Omega$, $R_2=10\text{ }\Omega$, $R_3=20\text{ k}\Omega$, $R_4=1\text{ k}\Omega$, $R_5=35\text{ k}\Omega$ 。三极管放大倍数为200。驱动电源稳压管支路的电流为10mA。

此时,运放正输入基准电压为

$$U_{\text{REF}} = 8.5\text{ V} \times \frac{R_3}{R_3 + R_4} = -8.095\text{ V} \quad (1)$$

电阻 R_2 与三极管射极连接处的电位为

$$U_{R2} = -8.5\text{ V} + R_2 \times 10\text{ mA} = -8.4\text{ V} \quad (2)$$

此时运放处在正偏状态,三极管基极电流约为

$$I_B = \frac{8.5\text{ V} - 0.7\text{ V} - R_2 \times 10\text{ mA}}{R_5} = 0.2\text{ mA} \quad (3)$$

根据三极管放大倍数可以看出,此时三极管工作在饱和区。对稳压管支路电流无限流作用。

2.4.2 IGBT门极短路工况分析

IGBT门极短路工况根据驱动电平的状态可细分为两个工况,下面分别进行分析。

1)工况1:门极在关断状态出现短路。当IGBT门极在关断状态出现短路时,相当于驱动电源的负电源被旁路。等效电路如图6所示。此时驱动电源负电源电压接近0V。正电源电压接近24V。驱动电源电流的路径如图6的 I_o 所示。此时,电阻 R_1 起限流作用。合理选择 R_1 的阻值和功率,可将 I_o 限制在安全范围内。 I_o 的值为

$$I_o = \frac{24\text{ V}}{R_1} = 12\text{ mA} \quad (4)$$

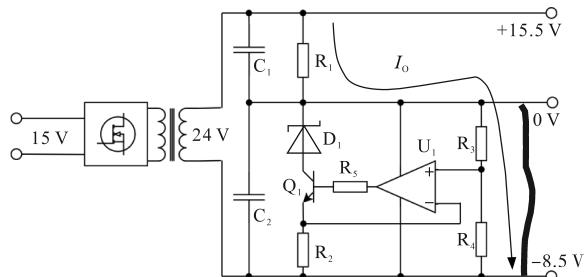


图6 门极关断状态出现短路时的电源电流通路

Fig.6 The power supply current path when a short circuit occurs in the gate pole off state

2)工况2:门极在开通电平时出现短路。当IGBT门极在开通电平时出现短路时,相当于驱动电源的正电源被旁路。等效电路如图7所示。该工况下,驱动正电源电压接近0V,负电源电压接近-24V。此时,运放正输入基准电压为

$$U_{\text{REF}} = 24\text{ V} \times \frac{R_3}{R_3 + R_4} = -22.86\text{ V} \quad (5)$$

根据运放虚短原理,运放负输入端电压也为-22.86V。 R_2 上的电流为

$$I_{R2} = \frac{U_{\text{REF}} + 24\text{ V}}{R_2} = 0.114\text{ A} \quad (6)$$

此工况下电源电流被限制在了0.114A。

通过以上分析和计算,可以看出该电路对门极发生的短路具有限流作用,可以保证驱动电源在门极短路工况下不损坏。

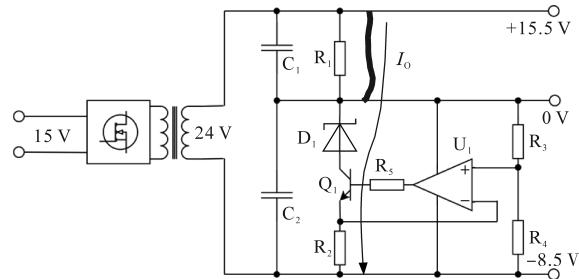


图7 门极开通状态出现短路时的电源电流通路

Fig.7 The power current path when a short circuit occurs in the open state of the gate pole

3 实验验证及结果分析

3.1 实验样机

基于ACPL-332J的IGBT多并联驱动板样机如图8所示。驱动板左侧为两路光纤信号接收器和一路光纤信号发生器。接收器用于接收上下管的驱动脉冲,发送器用于反馈驱动故障。该样机驱动电源电压为+15.5V和-8.5V。

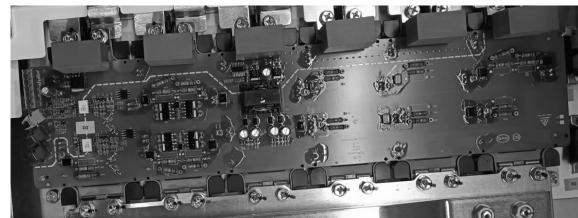


图8 实验样机

Fig.8 Experimental prototype

3.2 门极驱动信号高电平抬升功能测试

被测样机中,驱动板供电电压为15V,直流母线额定电压为1000V,由于该测试主要测试驱动板性能,故交流侧未带载。分别给驱动板和直流母线上电,然后给驱动板发送1.25kHz的驱动脉冲。测试IGBT门极电压波形如图9所示。可以看出,门极驱动信号高电平电压为14.89V,低电平电压为-7.74V。门极电平的幅值比理论值略小,主要原因是IGBT工作时,会拉低驱动电源总压。但总体来看,理论值与实测值比较接近,可以证明驱动电平抬升电路的可行性。

作为对比,在相同的驱动电源电压下,使用传统的驱动电路进行测试。门极高电平电压降

低到了12.86 V,相比正驱动电压15.5 V,降低了约2.6 V,性能差于本文的驱动方案。

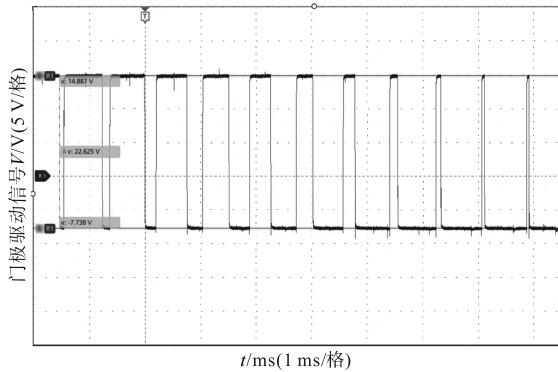


图9 门极驱动信号电平

Fig.9 Gate drive signal level

3.3 门极短路测试

由2.4.2节可知,门极短路工况可分为两种:1)门极在关断状态出现短路;2)门极在开通状态出现短路。其中,驱动电源对第一种工况的限流是通过电阻 R_i 来实现,原理较简单,在此不再赘述。下面对电路在第二种工况下的限流能力进行实验验证。

测试环境与3.2节相同。为保证人员和设备安全,需严格按以下步骤进行上电和测试:

- 1)先将其中一路IGBT门极短接;
- 2)给直流母线上电,上电过程中需控制直流母线电压从0 V逐渐升高到1 000 V;
- 3)最后给驱动板上控制电。

在IGBT门极为高电平时,将门极短路,测试驱动电源的电压和电流。对应的工况如图7所示,测试波形如图10所示。

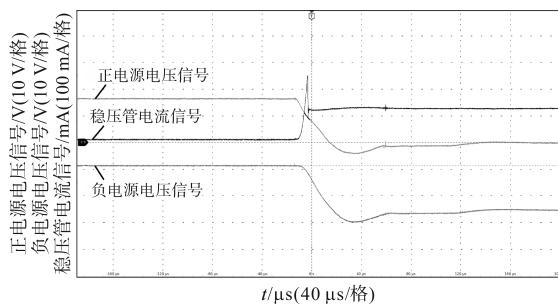


图10 带短路限流功能的驱动电源测试波形

Fig.10 Test waveforms of driving power supply with short-circuit current limiting function

图10中波形分别为正电源电压信号、负电源电压信号、稳压管支路的电流信号。门极未短路时,正电源电压为16.6 V,负电源电压为-8.3 V,稳压管支路的电流约10 mA。当门极短路时,正电源电压被拉到0 V附近,负电源电压变为-25 V。

稳压管 D_1 电流在短路瞬间瞬时过冲,峰值电流约250 mA,之后迅速下降到129 mA。

通过测试验证了门极短路限流电路可以有效限制门极短路工况的电源电流,保证了驱动电路的安全。

作为对比,将短路限流功能屏蔽掉(旁路三极管 Q_1 的CE极),在相同测试条件下测试各点的波形,如图11所示。图中通道1为正电源电压,通道2为负电源电压,通道4为稳压管支路的电路。在门极短路瞬间,稳压管支路电流迅速上升到1.84 A,之后电流回落到1.3 A,维持稳定。该电流已远远超过了稳压管 D_1 允许的最大稳态电流(215 mA),稳压管 D_1 在0.5 s内烧毁。

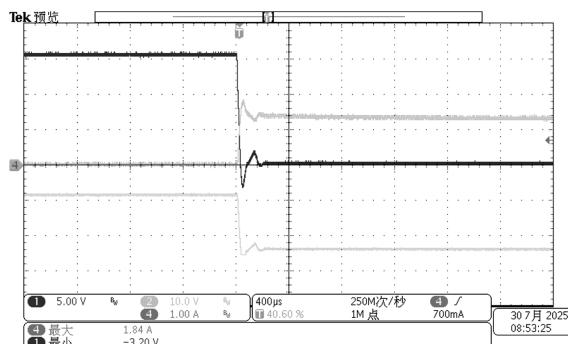


图11 无短路限流功能的驱动电源测试波形

Fig.11 Test waveforms of driving power supply without short-circuit current limiting function

3.4 IGBT主回路短路测试

在完成驱动板的门极短路限流功能测试和驱动信号调理功能测试后,将驱动板+IGBT模块(600 A/1 700 V)在双脉冲测试平台^[9]进行主回路的短路实验。短路实验的波形如图12所示。图中波形分别为上管门极电压信号、下管门极电压信号、下管IGBT管压降信号、短路电流信号。

母线电压1 220 V,向上管门极输入常高电平,下管门极再输入高电平时发生短路,此时电流急剧上升,当电流达到一定值时,ACPL-332J

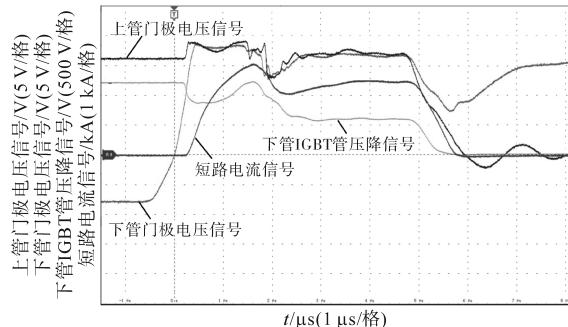


图12 短路测试波形

Fig.12 Short circuit test waveforms

启动保护机制,栅极下管软关断,下管IGBT管压降无过电压尖峰。电流缓慢下降,驱动电路要在5.5 s完成短路保护,避免IGBT模块损坏^[10]。

4 结论

本文使用ACPL-332J智能光耦驱动芯片设计了1 700 V/600 A IGBT模块的驱动电路。通过设计驱动信号高电平抬升的电路,弥补了该系列驱动光耦电源电压利用率低的缺陷。通过设计MOSFET和三极管相结合的推挽电路,在提高电源电压利用率的同时,充分利用了驱动芯片的软关断、米勒钳位等功能。为提高驱动电路的可靠性,设计了具备短路限流功能的驱动电源,可以保证在IGBT失效时,限制驱动电源的电流,避免驱动回路器件失效。具备短路限流功能的驱动电源,有效限制了IGBT和驱动板的故障扩散,可以为失效分析提供尽可能多的有效数据。本驱动电路具有结构简单、成本低廉、可靠性高的特点,可适用于不同规格的IGBT模块。使用本文设计的驱动器的变频器产品在多个应用现场中使用,运行稳定可靠。

参考文献

- [1] 焦明亮,李云,朱世武,等. IGBT门极驱动技术现状和发展趋势[J]. 大功率变流技术,2015(3):18-23.
JIAO Mingliang, LI Yun, ZHU Shiwu, et al. Status and trend of IGBT gate drive technology[J]. High Power Converter Technology, 2015(3):18-23.
- [2] 许丽,王晓明. 基于UC3842的开关电源短路或过载保护的研究[J]. 兰州交通大学学报(自然科学版),2005,24(4):114-116.
XU Li, WANG Xiaoming. Research on overload or short-circuit protection of switch power supply based on UC3842[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University (Natural Sciences), 2005, 24(4):114-116.
- [3] 郑利军,任天良,姜燕. IGBT驱动与电源可靠性[J]. 电力电子技术,1999,33(5):23-25.
ZHENG Lijun, REN Tianliang, QIANG Yan. IGBT driving circuit and the reliability of power source[J]. Power Electronics, 1999,33(5):23-25.
- [4] 吴士涛,徐嘉成,申传章,等. 基于ACPL-332J的IGBT驱动电路设计[J]. 煤矿安全,2023,54(3):239-244.
WU Shitao, XU Jiacheng, SHEN Chuanzhang, et al. Design of IGBT gate drive circuit based on ACPL-332J[J]. Safety in Coal Mines, 2023,54(3):239-244.
- [5] 韩松,于志强,王明玥,等. 一种灵活可靠的IGBT驱动电路设计[J]. 电气传动,2024,54(1):48-52.
HAN Song, YU Zhiqiang, WANG Mingyue, et al. A design of flexible and reliable IGBT driver circuit[J]. Electric Drive, 2024,54(1):48-52.
- [6] 王佳军,陈息坤,顾隽楠,等. 一种大功率IGBT模块驱动电路设计[J]. 微特电机,2021,49(11):43-46,52.
WANG Jiajun, CHEN Xikun, GU Junnan, et al. A high power IGBT module drive circuit design[J]. Small & Special Electrical Machines, 2021,49(11):43-46,52.
- [7] 朱世蔚,冯全源. 带软关断和欠压保护的IGBT去饱和过流检测电路[J]. 微电子学,2021,51(5):632-635.
ZHU Shiwei, FENG Quanyuan. An IGBT desaturation and over-current detection circuit with soft turn-off and under-voltage protection[J]. Microelectronics, 2021,51(5):632-635.
- [8] 吴伟亮,简优宗,于彬. 一种数字IGBT驱动器的设计[J]. 电气传动,2019,49(10):87-90.
WU Weiliang, JIAN Youzong, YU Bin. Design of a digital IGBT driver[J]. Electric Drive, 2019,49(10):87-90.
- [9] 桂存兵,陈果. 基于双脉冲输入的电压型IGBT驱动优化设计策略[J]. 电子器件,2020,43(5):1051-1055.
GUI Cunbing, CHEN Guo. Drive design optimization strategy of voltage-type IGBT based on double pulse input[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2020,43(5):1051-1055.
- [10] 刘甲俊,李飞,陈荣昕,等. 一种带短路保护的磁隔离IGBT驱动架构[J]. 电子技术应用,2025,51(3):44-48.
LIU Jiajun, LI Fei, CHEN Rongxin, et al. A magnetic isolation IGBT driver architecture with short circuit protection[J]. Application of Electronic Technique, 2025,51(3):44-48.

收稿日期:2025-06-29

修改稿日期:2025-09-04