

基于 1SC0450V 的 6 500 V 等级 IGBT 驱动保护电路设计及应用

王 雷, 杨 璐, 李守蓉, 高 升

(中车永济电机有限公司, 陕西 西安 710016)

摘 要: 详细介绍了 1SC0450V 的驱动特性, 分析了驱动电源电路、电源欠压保护、有源钳位及短路保护的工作原理, 设计了基于 1SC0450V 驱动核的 6 500 V 等级驱动保护电路。最后以功率单元为载体对双管并联和单管的 6 500 V 等级 IGBT 进行了换流试验及短路试验验证, 试验波形和数据证明了该驱动电路适合高可靠性的工业和牵引应用领域。

关键词: IGBT; 1SC0450V; 驱动电路; 短路保护

中图分类号: TN303

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.01.002

Design and Application of Drive and Protection Circuit of 6 500 V IGBT Based on 1SC0450V

WANG Lei, YANG Lu, LI Shourong, GAO Sheng

(CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710016, China)

Abstract: The drive characteristics of 1SC0450V was introduced in detail, and the implementation principle of drive supply circuit, supply under-voltage protection, advanced active clamp and short-circuit protection were analyzed. 6 500 V IGBT drive and protection circuit was given as well, which was based on 1SC0450V. The power units of single 6 500 V IGBT and two parallel 6 500 V IGBT were designed, which were successfully tested on converter test and short-circuit test at last. The experimental waveforms and testing data of the power units was provided. This good protection performance of the drive was verified for applications requiring high reliability in industry and traction.

Keywords: IGBT; 1SC0450V; driver circuit; short-circuit protection

0 引言

随着电力电子技术的飞速发展, 大功率 IGBT 在工业和铁路牵引等领域得到广泛应用。高可靠性的驱动保护技术是系统能否稳定工作的决定性因素, 因此如何安全可靠地驱动大功率 IGBT, 也成为越来越多的设计师需要解决的课题。

本文针对 6 500 V 大功率 IGBT 驱动保护技术, 介绍了基于 Power Intergrations(PI) 公司 1SC0450V 驱动

核的 6 500 V 等级 IGBT 驱动及保护电路, 并通过试验验证本驱动保护电路具有良好的驱动和保护功能, 满足高可靠性工业和铁路牵引应用领域的要求。

1 1SC0450V 功能简介

1SC0450V 是一款装备了 PI 公司最新 SCALE-2 芯片组的驱动器^[1]。SCALE-2 芯片组是一套专用集成电路(ASIC), 1SC0450V 包含完整的单通道 IGBT 驱动核, 适用于 6 500 V 及 6 500 V 以下中大功率 IGBT 的驱动控制, 具备隔离的 DC/DC 电源、电源欠压保护、高级有源钳位和短路保护等功能。

图 1 为 SC0450V 驱动核功能框图, DC/DC 隔离变压器将高低压电路隔离, 变压器一次侧输入部分由 LDI 及其外围电路组成。驱动输出部分及其逻辑保护电路的核心芯片是 IGD, 它的主要功能是对 IGBT 短路及电源欠压进行监测, 向 LDI 反馈二次侧状态, 一旦有故障发生, 驱动器及时进行故障模式响应, 促使驱动器及时关断 IGBT, 确保系统的安全可靠。

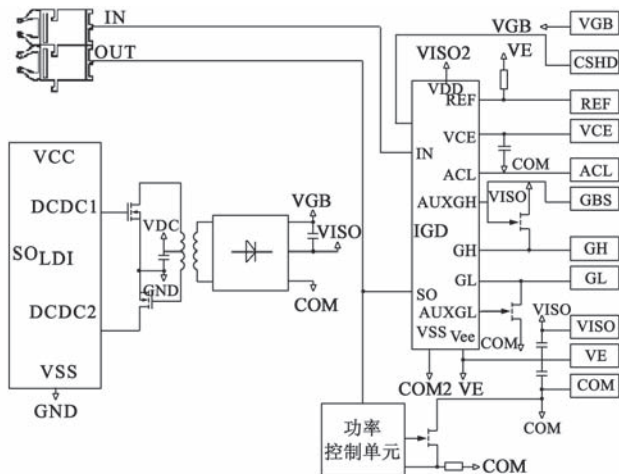


图 1 1SC0450V 功能框图

2 驱动电路设计

2.1 驱动电源电路设计

驱动电源品质关系到驱动及保护电路的稳定性及可靠性, 因此驱动电源隔离、门级驱动电压的控制是极其重要的。

如图 2 所示, 通过控制单元为基于 1SC0450V 的驱动板提供 +15 V 输入电源信号, 经过内部 DC/DC 电路处理后得到 +25 V, 通过电路将 +25 V 分割成 +15 V 和 -10 V。

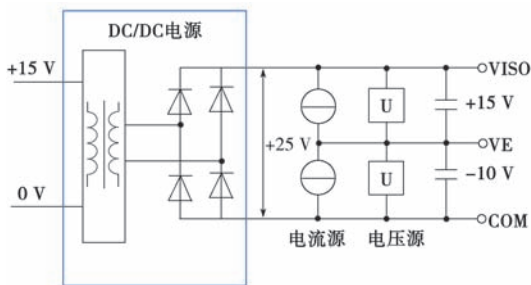


图 2 驱动电源电路

2.2 电源欠压保护

如图 3 所示, 当 1SC0450V 驱动核一次侧电压下降时, 由于 DC/DC 电源是开环的, 所以二次侧的 +25 V 会跟着下降。当 VISO 与 VE 之间的 +15 V 电压开始下降到低于 +12 V 时, 芯片报欠压保护, 一旦电源二次侧处于欠压状态, 状态反馈信号灯熄灭, IGBT 被关断, 且门极关断电压被维持在 -10 V。因为大功率的 IGBT 都有较强的米勒效应, 必须要有负压保证其可靠关断, 直到电源恢复正常工作状态。

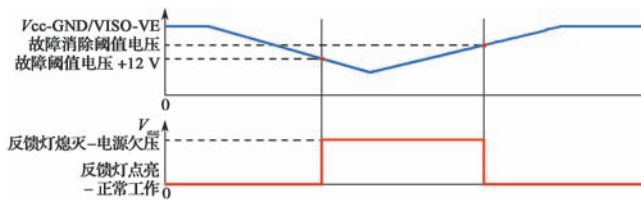


图 3 欠压保护工作状态

2.3 输入、反馈脉冲信号

当驱动电路处于正常工作状态时, 通过控制单元输入 PWM 信号来开通或者关断 IGBT, 光纤输出反馈信号来反馈门极驱动状态, 当驱动控制系统处于电源欠压、短路状态时, 反馈故障指示灯熄灭。如图 4 所示。正常工况下, IGBT 的每次开通或关断均会产生 1 个 700 ns 左右的反馈信号, 作为 IGBT 开通或关断信号的响应信号。

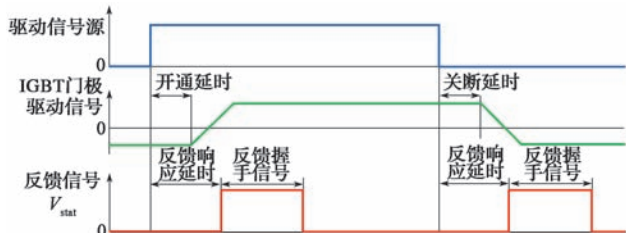


图 4 输入和反馈脉冲信号状态

2.4 有源钳位保护

IGBT 在关断时, 由于主电路杂散电感中所储存的能量需要有释放的途径, IGBT 关断过程中会产生一定的电压尖峰, 如果关断时产生的电压尖峰过高或者过陡, 都会使 IGBT 受到威胁, 因此有源钳位功能在大功率的 IGBT 应用中是非常必要的。有源钳位电路的目标就是将能量由高而窄的脉冲转变成矮而宽的脉冲, 钳住 IGBT 的集电极电位, 将其限制在设定范围。

1SC0450V 具有动态有源钳位功能。如图 5 所示, 一旦 ACL 管脚处电压超过设定阈值, 为了提高动态有源钳位的效率并且减小 TVS 损耗, 下管 MOSFET 开始被线性关断。当检测到 ACL 管脚电压超过 20 V 上限阈值时, 下管 MOSFET 完全关断。

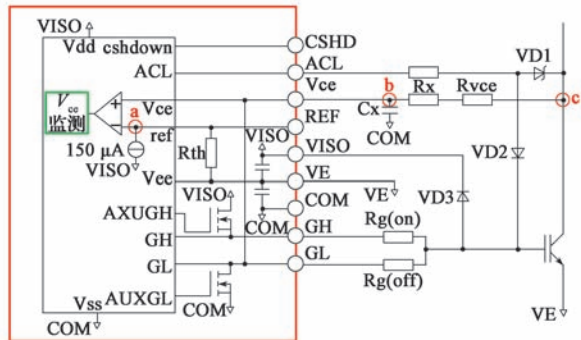


图 5 动态有源钳位和短路保护电路

本文在 6 500 V/750 A IGBT 等级的驱动电路设计中, 考虑到中间直流环节电压会达到 4 400 V 左右, 因此采用 10 个单向 440 V 的 TVS, 1 个双向 440 V 的 TVS 串联使用。

2.5 短路保护

短路故障工况分为一类短路和二类短路2种,其中,一类短路为 IGBT 从阻断状态直接进入短路状态;二类短路为 IGBT 从阻断状态首先进入导通状态,然后进入短路状态。2种短路状态的共同点是 IGBT 均出现“退饱和现象”。但二类短路与过流之间没有明显的界限,学术上也没有定义,若短路回路中的杂散电感量很大,那么电流变化率就变得很低,此时故障演变为过流故障,需驱动电路与控制系统联合保护 IGBT^[2]。

IGBT 短路保护的基本工作原理如图 5 所示, a 点处为一个 150 μA 恒流源,用来计算比较器反向输入端参考电压:

①当 IGBT 处于关断状态时,内部 MOSFET 导通, Cx 上电压被钳在 COM, 比较器不翻转;

②当 IGBT 进入导通的过程中,内部 MOSFET 关断,图 5 中 c 点电位向 b 点充电, b 点电位最终接近 IGBT 集电极电位;

③当 IGBT 发生短路时,其退出饱和区, c 点电位为母线电压, b 点被充电,经过定时后比较器翻转。

当 IGBT 短路退出饱和区时,它的损耗会成百倍地往上升,结温会迅速上升,从而导致 IGBT 失效。因此驱动器必须及时发现这一故障模式并在 10 μs 内关断 IGBT 来完成保护。如图 6 所示,当发生 IGBT 短路故障时,驱动器关断 IGBT,且反馈信号指示灯在这一故障时间内 (8 $\mu\text{s} + T_{\text{csd}}$) 熄灭,对整个系统进行保护。

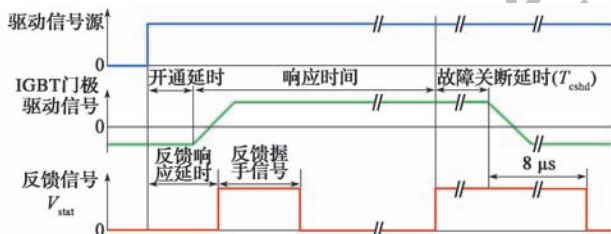


图6 短路保护脉冲信号状态

2.6 门极钳位保护

门极钳位电路的作用是为了保证在 IGBT 发生短路时,短路电流不至于超过规定的范围。因为在 IGBT 发生短路时, IGBT 会进入线性工作区,集电极电流瞬间增大,由于米勒效应的存在,在这个过程中,门极电位被抬升,如果门极电压高于 15 V 时,不对门极电位进行钳位,则短路电流会升高, IGBT 也会超出短路安全工作区,甚至损坏。

因此在设计驱动电路时必须要考虑门极钳位电路的设计,原理图如图 5 所示, IGBT 一旦发生短路,二极管 VD3 会将门极钳位在 15 V,不会因为集电极电流过大,门极电位上升,损坏 IGBT。

3 试验验证

3.1 双脉冲试验

以配备 6 500 V/750 A IGBT 的功率单元为载体进行

高压双脉冲试验,双脉冲测试的原理图如图 7 所示。试验过程中,上管 IGBT 处于截止状态,通过对下管 IGBT 发双脉冲测试 IGBT 开关特性及上管二极管的导通特性。

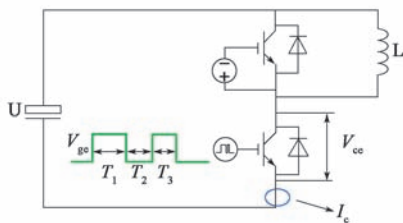


图7 双脉冲测试原理图

图 8 为当母线电压上升到 4 400 V 时的一个单管 IGBT 双脉冲测试完整波形。其中图 8~图 11 中 CH1 通道表示门极电压 V_{ge} , CH2 通道表示 IGBT 集电极与发射极之间的电压 V_{ce} , CH3 通道表示 IGBT 集电极电流 I_c (500 mV 等效为 250 A)。

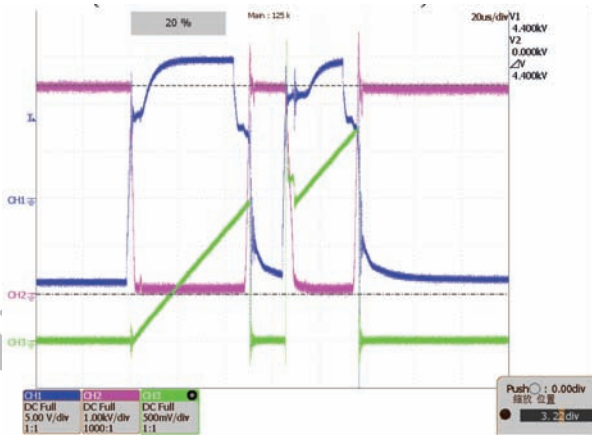


图8 双脉冲测试波形

图 9 为第 1 次 IGBT 关断时的波形,从图中可以看出,当门极从 +15 V 开通到 -10 V 关断时, IGBT 集电极与发射极间 V_{ce} 电压立即上升至预定的 4 400 V 电压,集电极电流 I_c 从 750 A 下降到 0。

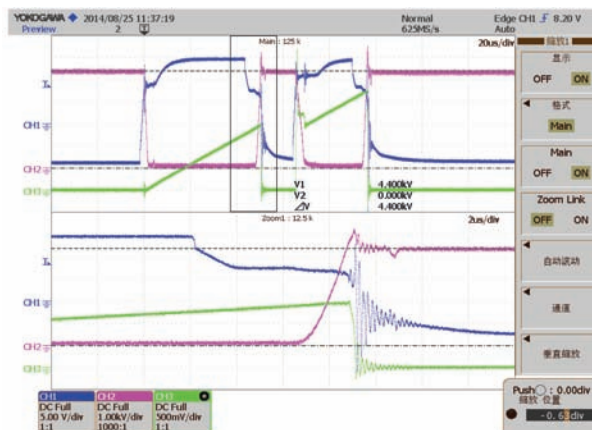


图9 第1次关断波形

图 10 为 IGBT 第 2 次开通波形,当门极从 -10 V 关断到 +15 V 开通时, IGBT 集电极与发射极间 V_{ce} 电压由 4 400 V 下降至 V_{cesat} , IGBT 集电极电流 I_c 从 0 升至 850 A,其中二极管反向恢复电流清晰可见。

图 11 为 IGBT 第 2 次关断波形,当门极再次从开通到关断时, IGBT 集电极与发射极间 V_{ce} 电压又再次上升至 4 400 V,集电极电流 I_c 从 750 A 上升至 1 200 A 左右。

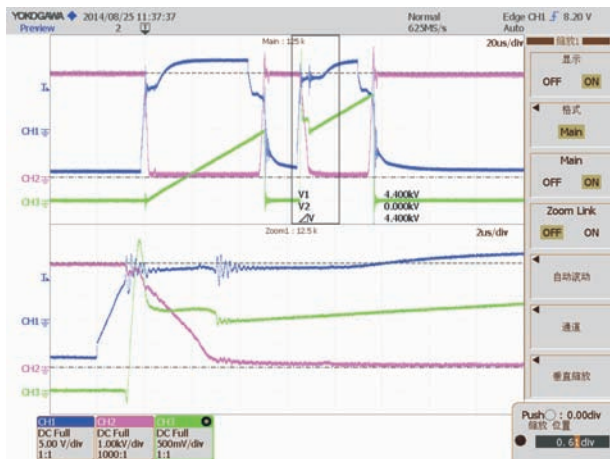


图 10 第 2 次开通波形

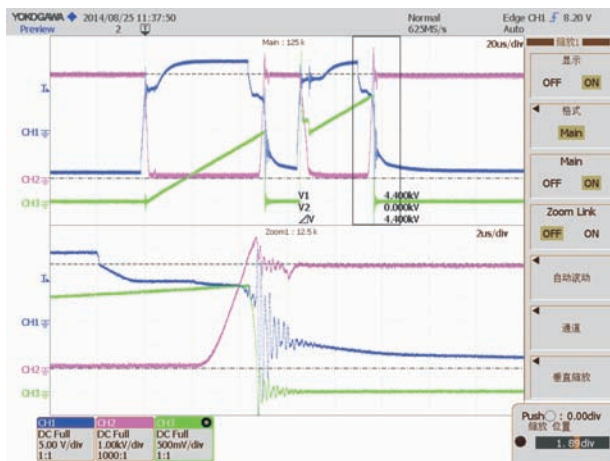


图 11 第 2 次关断波形

图 12 为一组双管并联 IGBT 双脉冲测试的完整波形, 其中 CH1 通道表示门极脉冲电压 V_{ge} , CH2 通道表示 IGBT 集电极与发射极之间的电压 V_{ce} , CH3 通道表示并联 IGBT 集电极电流 I_{c1} (500 mV 等效为 250 A), CH4 通道表示并联 IGBT 集电极电流 I_{c2} (500 mV 等效为 250 A)。图 12 中并联 2 支 IGBT 电流上升斜率及峰值接近, 验证了双管并联 2 支 IGBT 的均流性较好。

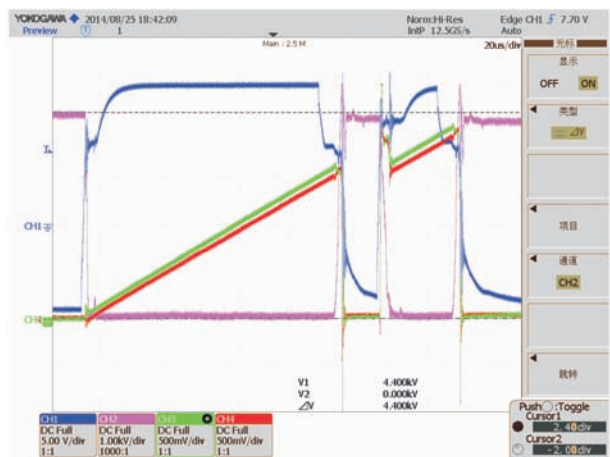


图 12 双管并联双脉冲波形

3.2 短路试验

上管 IGBT 通过控制信号设置保持常开状态, 母线电容电压充到额定值后断开接触器, 对下管 IGBT 释放

一个大于 $10 \mu\text{s}$ 单脉冲信号, 即形成短路工况。测试原理图如图 13 所示^[2]。

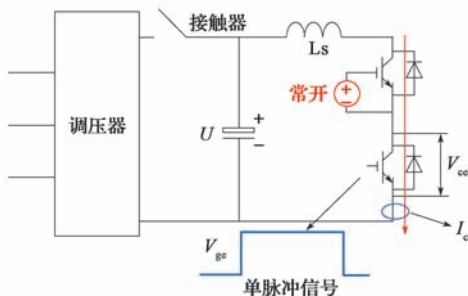


图 13 基于常开控制信号的短路测试原理图

图 14 为 IGBT 短路试验波形, 其中 CH1 通道表示门极脉冲电压 V_{ge} , CH2 通道表示 IGBT 集电极与发射极之间的电压 V_{ce} , CH3 通道表示 IGBT 短路电流 I_c (500 mV 等效为 2 500 A), CH4 通道表示反馈信号。

当系统电路发生短路时, 基于 1SC0450V 开发的驱动板发现这一故障, 立即作出响应。从 IGBT 退饱和到被关断大约 $8 \mu\text{s}$, 关断 IGBT 时电流达到约 5 000 A, 电压尖峰被钳位至 4 800 V 左右, 有源钳位动作明显, 进一步验证了驱动短路保护电路的可靠性。

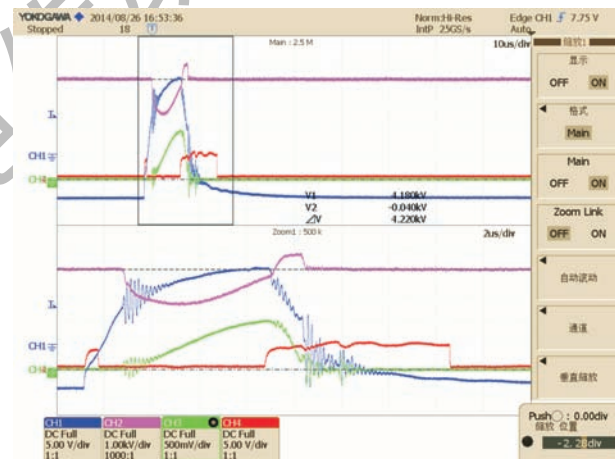


图 14 短路试验波形

4 结语

根据 6 500 V 等级 IGBT 特性设计了基于 1SC0450V 驱动保护电路, 通过对配备 1SC0450V 驱动板的功率单元进行高压双脉冲测试和短路试验, 证明设计的驱动保护电路性能良好, 适应于高可靠性要求的工业和铁路牵引等应用领域。

参考文献:

- [1] SCALETM-2 1SC0450V 描述及应用手册 [Z]. 2015-06-12. [2016-10-02]. 1.0 版. https://igbt-driver.power.com/zh-hans/products/application_manuals/1sc0450v-manual/1SC0450V_ManualCN.pdf.
- [2] 王雷, 李锦, 李艳伟, 等. IGBT 模块短路测试方法研究 [J]. 铁道机车与动车, 2015(8): 27-29.

作者简介: 王 雷 (1984-), 男, 工程师, 主要研究方向为电传动系统及功率器件应用研究。