

数字 IGBT 驱动技术在高可靠性 APF/SVG 产品中的应用

杭州飞仕得科技有限公司 洪磊

摘要

APF(有源电力滤波器)/SVG(静止无功发生器)作为新一代有源谐波/无功补偿设备,应用越来越广泛。作为基于 IGBT 半导体器件的电力电子产品,随着“高功率密度以及低系统成本”的发展需求,NPC I 型三电平逐渐成为业内主流的拓扑结构。相比较传统的两电平拓扑,NPC I 型三电平系统更为复杂,存在 IGBT 内外管关断错误时序、内管关断尖峰过高、模组故障难以定位等问题,导致实际应用中 IGBT 的失效率较高,如何提高其可靠性是当下亟待解决的问题。本文重点阐述了 NPC I 型三电平拓扑上述问题的机理,并基于新一代数字 IGBT 驱动技术,给出了智能的解决方案:智能时序管理 OS、分级关断、智能故障分类等技术,可以大大提高 NPC I 型拓扑中 IGBT 的可靠性,进而提高 APF/SVG 产品的可靠性。

1、引言

近年来随着新能源发电,智能电网,轨道交通,新能源汽车等产业的迅速发展,接入电网的相关电力电子设备越来越多,非线性负荷的大量应用造成的电网内电压电流谐波畸变问题日趋严重。于此同时,随着城乡经济发展,家庭电力负荷急剧增加,末端电压低,负荷不平衡等无功问题突出。APF(有源电力滤波器)/SVG(静止无功发生器)作为新一代有源谐波/无功补偿设备,得到大量应用。

APF/SVG 是基于 IGBT 半导体器件的电力电子设备,从如下图电力电子设备失效统计分析^[1],我们可以看出,IGBT 及其驱动器的失效率占整个电力电子设备的失效的 50%以上。

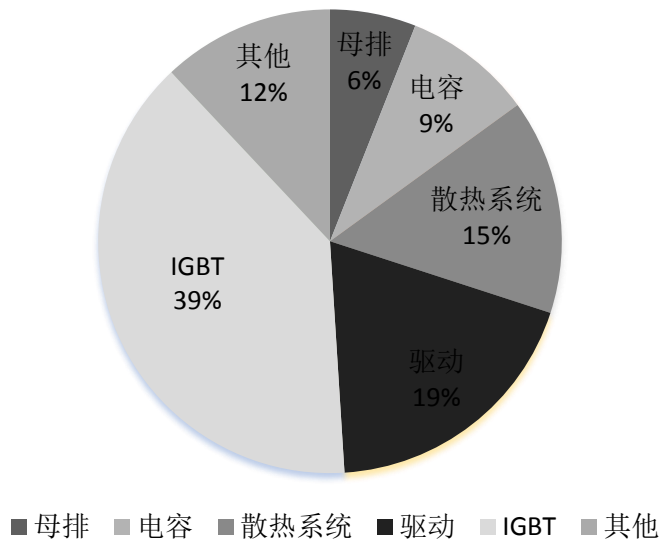


图 1 电力电子设备失效分析

所以，在 APF/SVG 产品中，IGBT 及其驱动的可靠性显得尤为重要。随着“高功率密度以及低系统成本”的发展需求，APF/SVG 的拓扑结构也由最开始的两电平发展成为 NPC I 型三电平，系统更为复杂，存在 IGBT 内外管关断错误时序、内管关断尖峰过大、模组故障难以定位等问题，导致实际应用中 IGBT 的失效率较高，如何提高其可靠性是当下亟待解决的问题。

传统的光耦驱动^[2]或者驱动核^[3]，在解决上述问题时都存在一定局限性：比如时序保护都需要依赖上位机配合，在出现发波异常或者接插件脱落时无法有效保护；基于有源钳位的尖峰抑制技术，实际应用钳位效果受到母线波动，温度等多种因素的影响，且在频繁动作时 TVS 管存在失效风险；出现 IGBT 故障时很难快速定位故障。

本文针对 NPC I 型三电平中存在的问题，基于数字驱动技术，提出了智能的解决方案：智能时序管理 OS、分级关断技术、智能故障分类技术。

2、NPC I 型三电平拓 IGBT 驱动挑战

2.1 内外管的关断时序

如图 2 所示，在 NPC I 型三电平拓扑结构中，每相的功率器件一共有 6 个：4 个 IGBT(S1 ,

S_2, S_3, S_4), 2 个二极管 (D_5, D_6)。4 个 IGBT 不同的开关组合, 可以组成不同换流模式, 将 $S_1 \sim S_4$ 状态分别用 0 和 1 表示, 0 表示关断, 1 表示开通; 同时母线正电位为 “+1”, 母线负的电位为 “-1”, 一共有以下几种组合模式 (假设电流流向向内), 如表 1。

S_1	S_2	S_3	S_4	H 进制	输出
1	1	0	0	C	+1
0	1	0	0	4	+1
0	1	1	0	6	0
0	0	1	0	2	0
0	0	1	1	3	-1
0	0	1	0	2	0
0	1	1	0	6	0
0	1	0	0	4	+1
1	1	0	0	C	+1

表 1

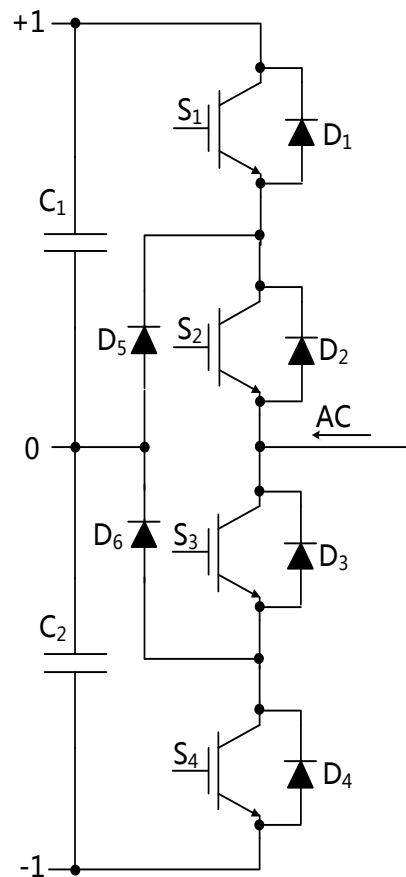


图 2 NPC I 型三电平拓扑结构

上述表中可以看出, NPC I 型三电平有 5 种模式, 其中包括稳态 C, 6, 3 和过渡态 4, 2, 其中 C, 6, 3 稳态遵循 S_1 和 S_3 互补, S_2 和 S_4 互补原则。为了分析时序问题, 我们取模式 3, 此时的 $S_1 \sim S_4$ 的状态为: 0011, 如图 3a 所示, S_3 和 S_4 开通, 电流由 AC 流向母线负, 此时的 AC 点电位为 “-1”。如果现在出现正常停机或者异常过流, 先关内管 S_3 还是先关外管 S_4 ?

图 3b 给出了先关外管 ($S_4=0$), 此后电流通过 D_6 流回到 O 点, AC 电位为 “0”, 再关内管 ($S_3=0$), 内管 S_3 两端承受的为 $1/2V_{DC}$ 。

图 3c 给出了先关内管 ($S_3=0$), 此后电流通过 D_1, D_2 流回到母线正, AC 电位为 “+1”,

再关外管 ($S_4=0$) , 内管 S_3 两端承受的为 V_{DC} , 模块会过压损坏。

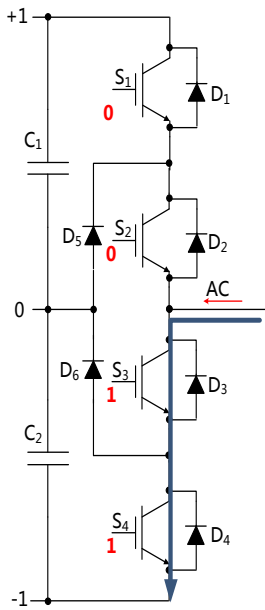


图 3 a

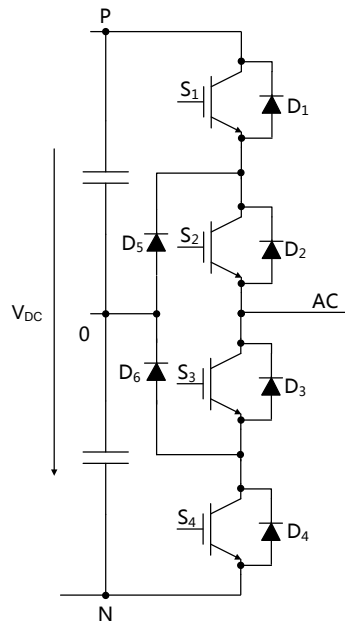


图 3 b

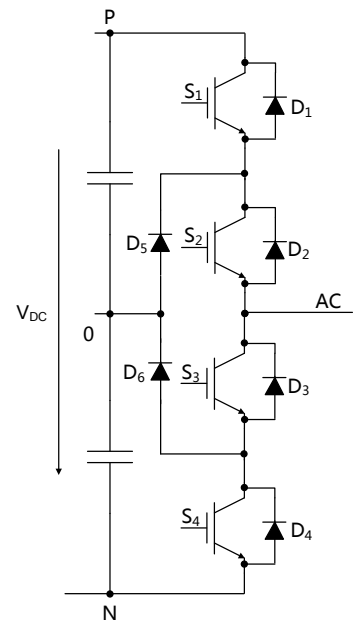


图 3 c

基于上述分析，NPC I 型三电平必须先关外管再关内管，无论是正常停机工况，还是异常工况，如欠压保护，短路保护等。

2.2 内管关断尖峰过高

如图 4a 所示，NPC I 型半桥工作在模态 6， $S_1\sim S_4$ 的开关状态：0110，电流由 AC 点通过 S_3 ， D_6 流到“O”点。此时切换到模态 4，即 $S_1\sim S_4$ 的开关状态：0100，则电流会由 AC 点通过 S_2 ， D_1 流到母线正，在 S_3 关断的过程中，如图 4b 所示，整个换流路径经过 C_1 ， D_1 ， S_2 ， S_3 ， D_6 器件，形成一个大换流回路，存在较大的杂散电感，最高可达 80nH 左右，尤其对于 APF 应用场合，波峰系数（电流峰值/电流有效值）一般在 2~2.5，IGBT 关断的峰值电流更大，关断尖峰更高。

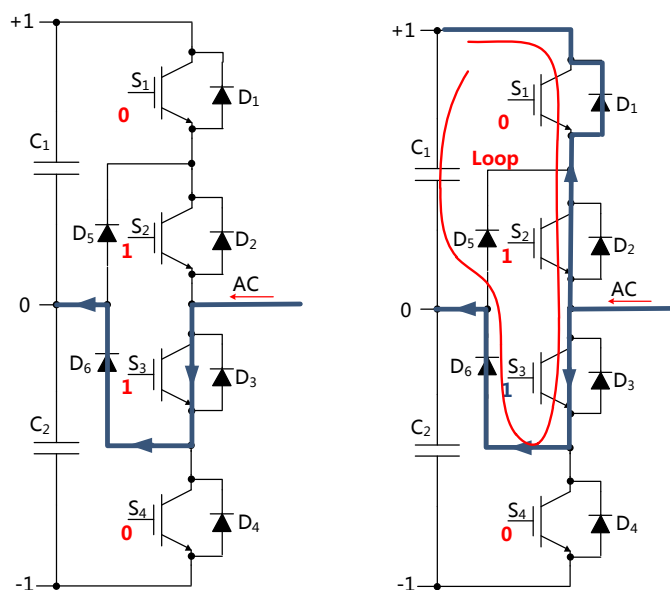


图 4a

图 4b

2.3 模组故障难以定位

相比较传统两电平，三电平逆变器中的 IGBT 一共有 12 个，是两电平的 2 倍，每个 IGBT 至少有欠压和短路两种以上的故障，这样一共有 24 种故障。传统的驱动芯片或者驱动核不能区分欠压或者短路故障，且现在比较多的控制系统常见的是三相采用 1 个或者 3 个故障口返回。导致在实际研发调试或者现场出现问题时，只知道报 IGBT 故障，不知道是哪个 IGBT 故障，以及故障类型，给分析整机问题带来较大挑战。

3、NPC I 型三电平数字 IGBT 驱动技术

3.1 智能时序管理 OS

数字驱动器，是基于数字 MCU 进行 PWM 信号传输以及 IGBT 故障保护。针对 NPC I 型的智能时序管理 OS 时序原理示意图如图 5 所示。

驱动器上原边的 MCU 接收 2 路 PWM 信号传输，一个为内管，一个为外管，并通过隔离

器件传输到副边的驱动模块，副边的驱动模块对相应的 IGBT 进行驱动以及保护，并将故障信息及时的通过隔离器件传输到原边的 MCU。MCU 根据上位机发过来的内外管关断信号以及 IGBT 反馈的故障信息，协调相应的关断时序，实现智能时序管理。

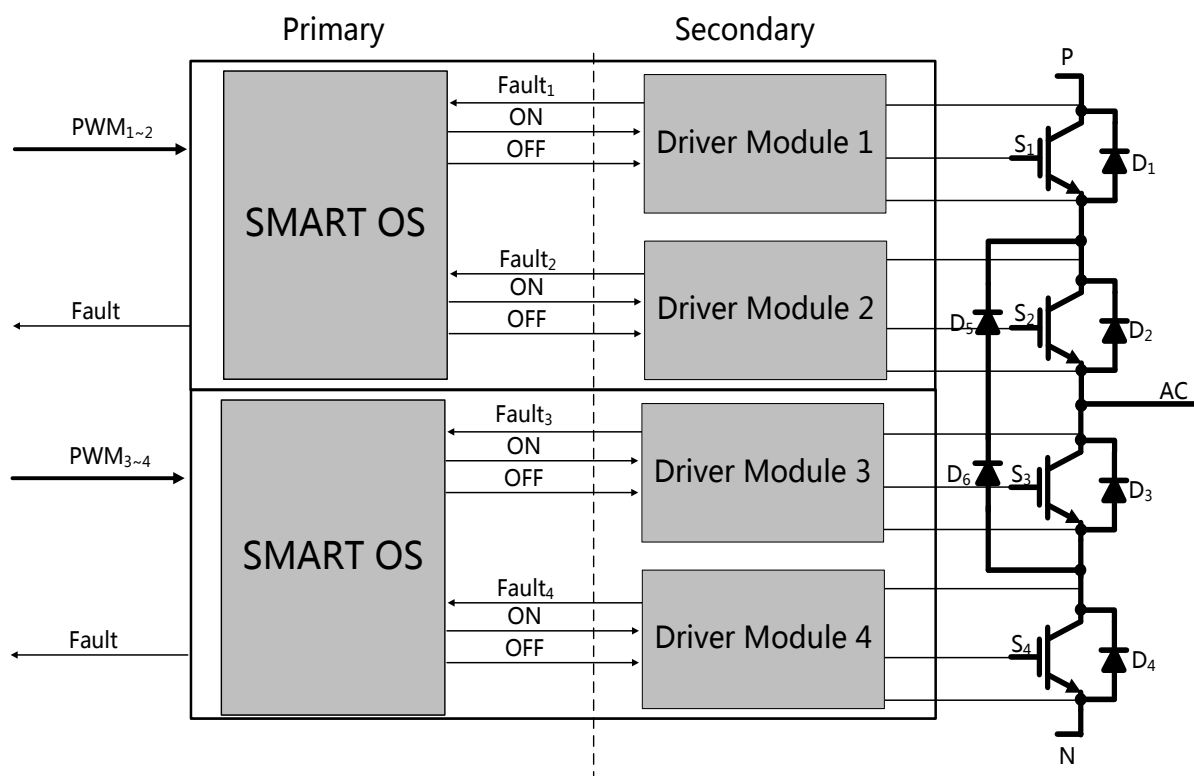


图 5 智能时序管理 OS 示意图

智能时序管理 OS，能对正常的关断时序进行监测，即使上位机异常或者有错误的时序指令，会自动调整为正确的时序；出现异常工况，如欠压或者短路，都能按正确时序关断。

时序处理不依赖于上位机，可以省去传统方案主控系统中的 CPLD，大大简化系统设计；更靠近 IGBT，响应更快，且不会存在因为传输线受干扰或者接插件脱落引发系统故障的问题，可靠性更高。

3.2 分级关断技术

门极电阻对于 IGBT 的关断特性的影响是 R_g 越大，关尖峰也越小，为了解决内管关断尖峰的问题，比较好思路就是加大关断电阻。但是 R_g 增大同时会带来关断延时增加，关断损耗增加，会影响到整机的死区设置以及热设计。

分级关断技术利用了关断电阻对于 IGBT 关断特性的影响机理，基本的原理是将 IGBT 的关断过程分为三级，与传统的单个关断电阻值不同，在关断过程中不同时段会有三种不同阻值的关断电阻，如图 6 所示， R_1 ， R_2 ， R_3 由数字驱动器中的 MCU 控制具体在什么时刻投入到门极回路。

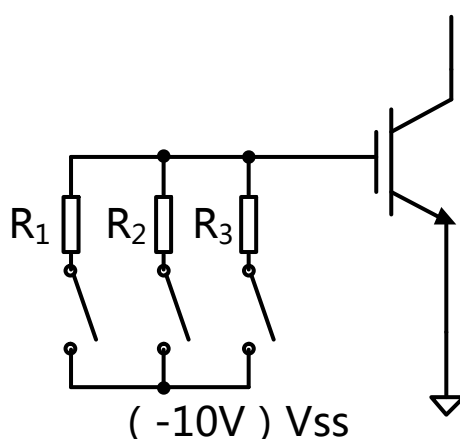


图 6 分级关断电阻示意图

基于三级的关断过程，可以实现有效抑制电压尖峰的同时，兼顾关断延时和关断损耗，使得关断特性达到最优状态。

3.3 智能故障分类

传统的驱动芯片或者驱动核，将电压欠压故障和短路故障汇总到 Fault 口，Fault 为低电平时，上位机认为出现了驱动故障，但无法区分是欠压故障还是短路故障。

智能故障分类，是基于数字驱动器中的 MCU，控制 Fault 口反馈低电平的宽度，进而区分是欠压故障还是短路故障，示意图如图 7 所示。比如，低电平保持时间 10ms，为 SC(短路)故障；低电平保持时间 25ms，为 UVLO(欠压)故障。

通过故障类型的区分，可以进行协助整机快速定位故障。

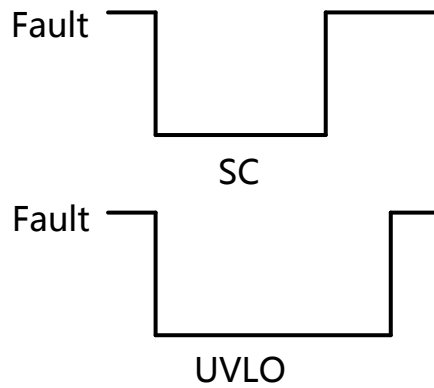


图 7 故障分类示意图

4、测试验证

D-CORE^[4]是 Firststack 针对 380V_{AC} 系统开发的 NPC I 型三电平专用数字驱动核，如图 8 所示，其具有智能时序管理 OS，分级关断，故障分类等功能。为了验证相应的数字驱动技术，采用 D-CORE 的开发了 100kW 功率模组平台进行相应的实验测试。模组平台如图 9 所示，采用英飞凌 EasyPACK 封装的 F3L150R07W2E3_B11 模块两并联，不均流度 < 3%。



图 8 D-CORE 驱动核



图 9 基于 D-CORE 驱动核的 100kW/380VAC 模组

4.1 时序管理测试波形

4.1.1 欠压状态下的时序

实验方法：在驱动器电源掉的过程中，观察 S3 和 S4 门极信号的关断情况，具体测试波形

如下。

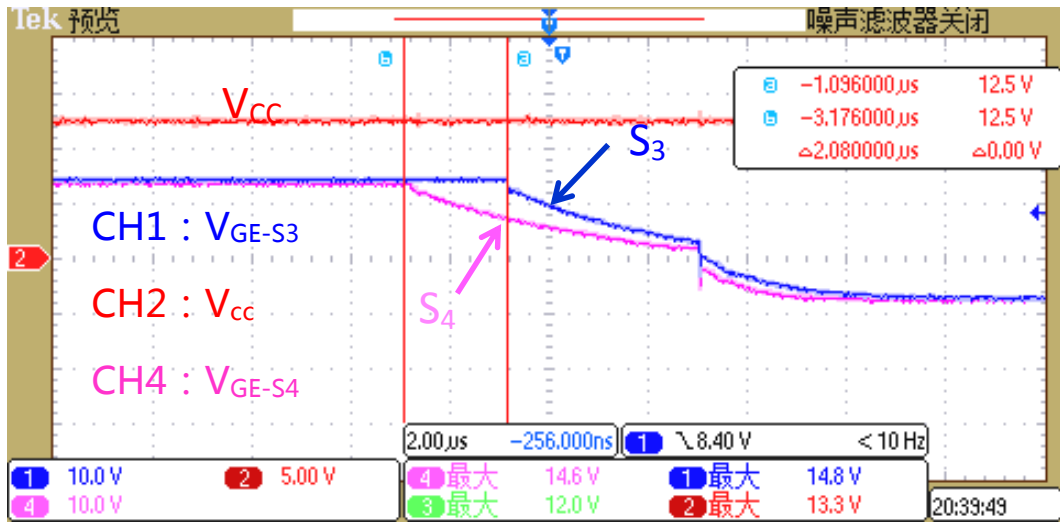


图 10 欠压状态下时序管理测试波形

4.1.2 短路状态下的时序

实验条件：采用英飞凌 F3L150R07W2E3_B11 两并联， $V_{DC}=900\text{V}$ 下，做 S_3 和 S_4 的短路实验，短路测试主回路如图 11a 所示， S_3 和 S_4 的控制时序图如 11b 所示。

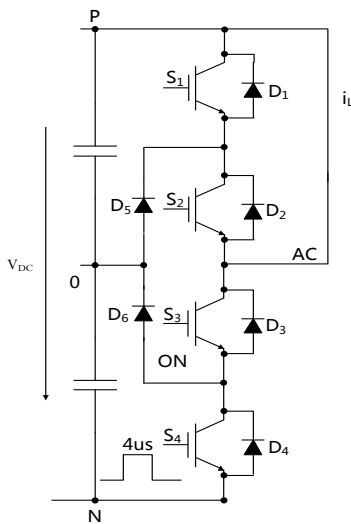


图 11a 短路测试主回路图

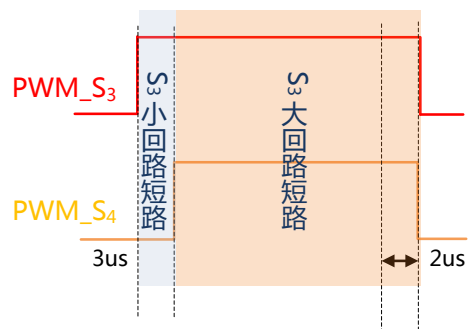


图 11b S_3 和 S_4 的控制时序图

测试波形如图 12 所示：

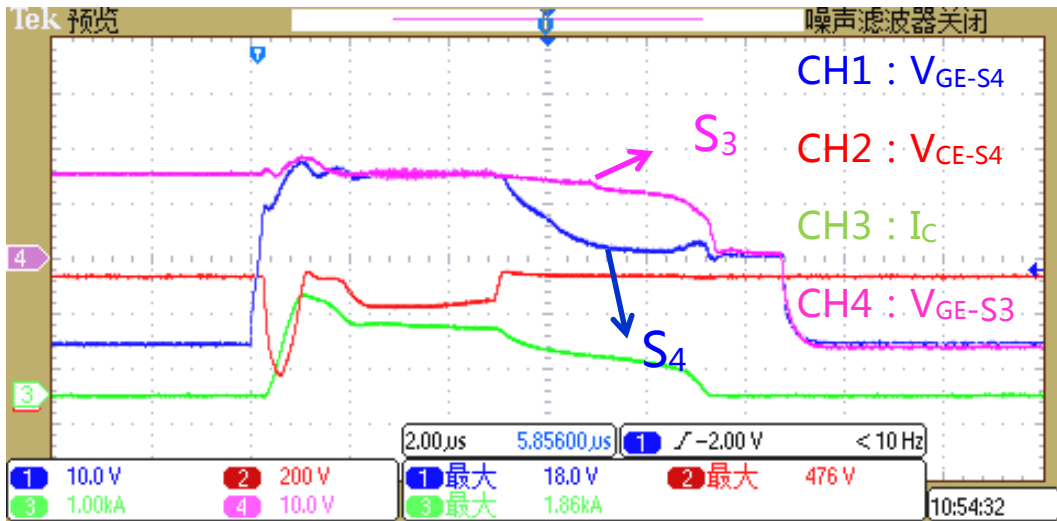


图 12 短路状态下时序管理测试波形

4.2 分级关断测试波形

实验条件：采用英飞凌 F3L150R07W2E3_B11 两并联， $V_{DC}=900V$ ， $I_c=150A$ ，测试内

管 S3 带分级关断以及不带分级关断的电压尖峰 V_{CE_MAX} ，波形如下所示

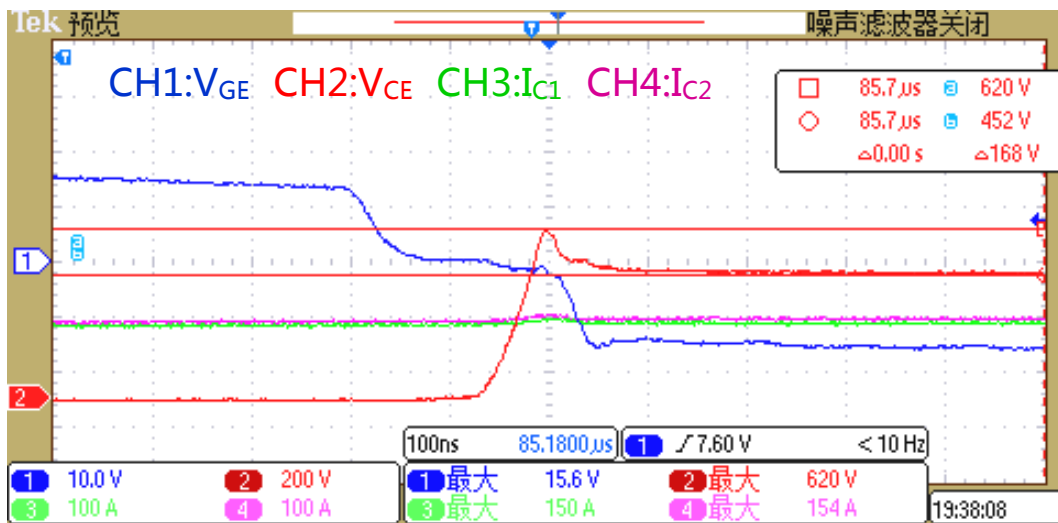


图 13 不带分级关断的测试波形

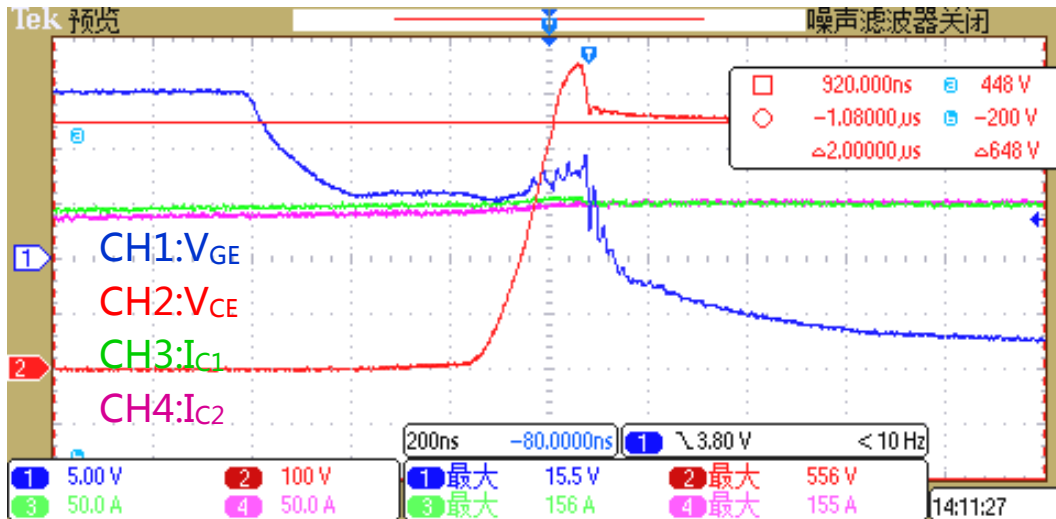


图 14 带分级关断的测试波形

从对比测试结果来看，在同等实验条件下，不带分级关断的 $V_{CE_MAX}=620V$ ，带分级关断的 $V_{CE_MAX}=556V$ ，电压尖峰下降了 10%。

通过尖峰的有效抑制，可以使 F3L150R07W2E3_B11 两并联模块不仅可以做 150A 的 SVG 产品（波峰系数：1.4），也可以做 150A 的 APF 产品（波峰系数：2.5）。

4.3 智能故障分类测试波形

实验方法：模拟驱动器的欠压和短路故障，观察 D-CORE 驱动器的 Fault 口的反馈电平变化，测试波形如下：

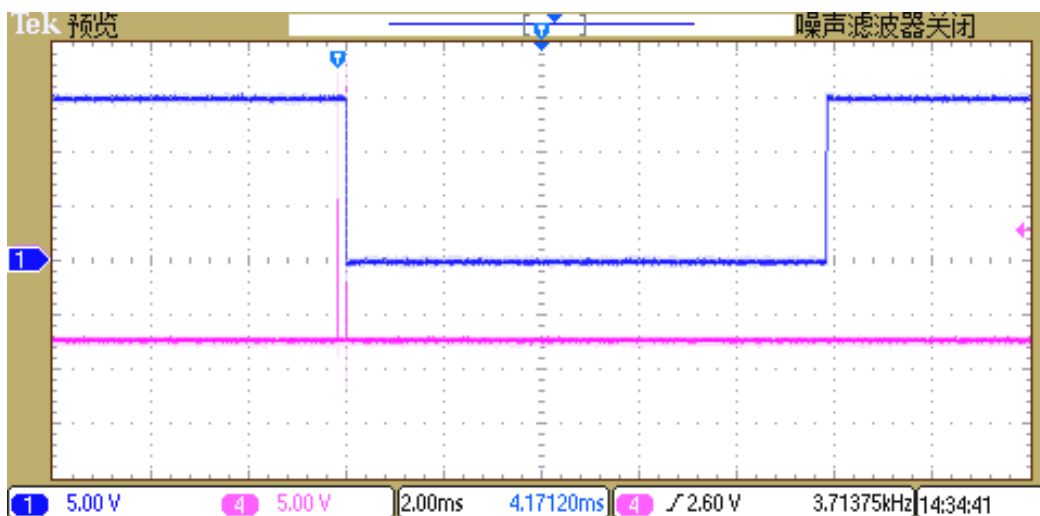


图 15 SC 故障时，故障返回保持时间：10ms

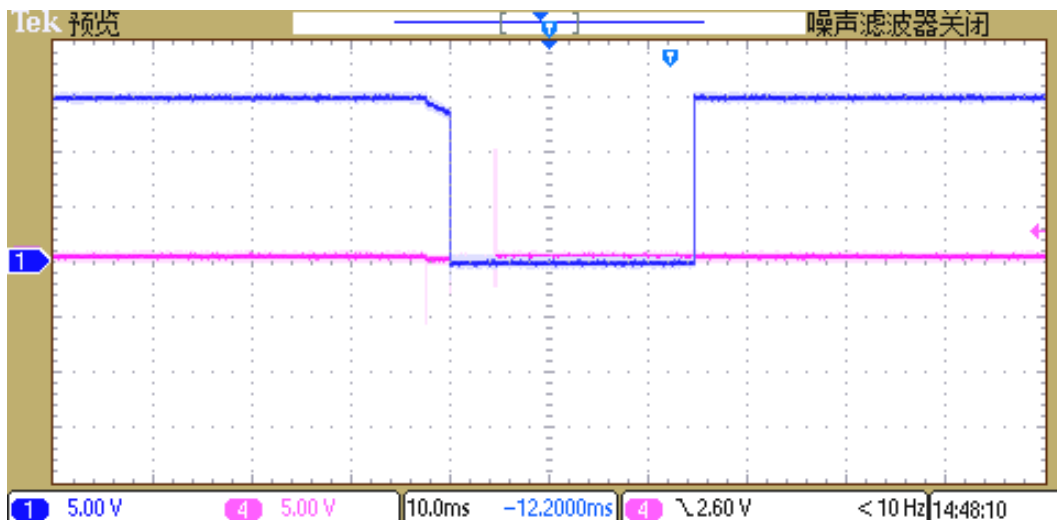


图 16 UVLO 故障时，故障返回保持时间：25ms

5、结论

随着 APF/SVG 产品在电网中应用越来越多，可靠性要求也越来越高。作为电力电子产品，IGBT 及其驱动的可靠性显得尤为重要。

针对目前 APF/SVG 产品主流 NPC I 型三电平拓扑应用中的内外管关断错误时序、内管关断尖峰过大、模组故障难以定位等挑战，Firststack 基于数字驱动，开发的智能时序管理 OS，分级关断，智能故障分类，可以有效解决上述问题，大幅提高 NPC I 型三电平 IGBT 模块的可靠性，进而实现 APF/SVG 产品的高可靠性。

参考文献：

[1] , U. Choi, F. Blaabjerg, K.Lee, "Study and Handling Methods of Power IGBT Module Failures in Power Electronic Converter System" IEEE Trans. Power Electron., vol. 30, no.5, pp.2517-2533, May. 2015.

[2] , AVAGO Technical documentation : HCPL-316J.pdf

[3] , PI Technical documentation : 2SC0108T Description & Application Manual.pdf

[4] , Firstack Technical documentation : D-CORE.pdf

作者简介

洪磊 (1987-) 男，硕士，杭州飞仕得科技有限公司产品总监。浙江大学电力电子专业毕业，研究方向电力电子电能质量控制，曾就职于汇川技术，有多年电力电子产品功率设计以及 IGBT 驱动应用经验，基于数字驱动技术，带领团队开发了针对 APF/SVG 产品的 I 型三电平专用数字驱动核，为业内首创，已获得广泛应用，并得到客户的高度认可。