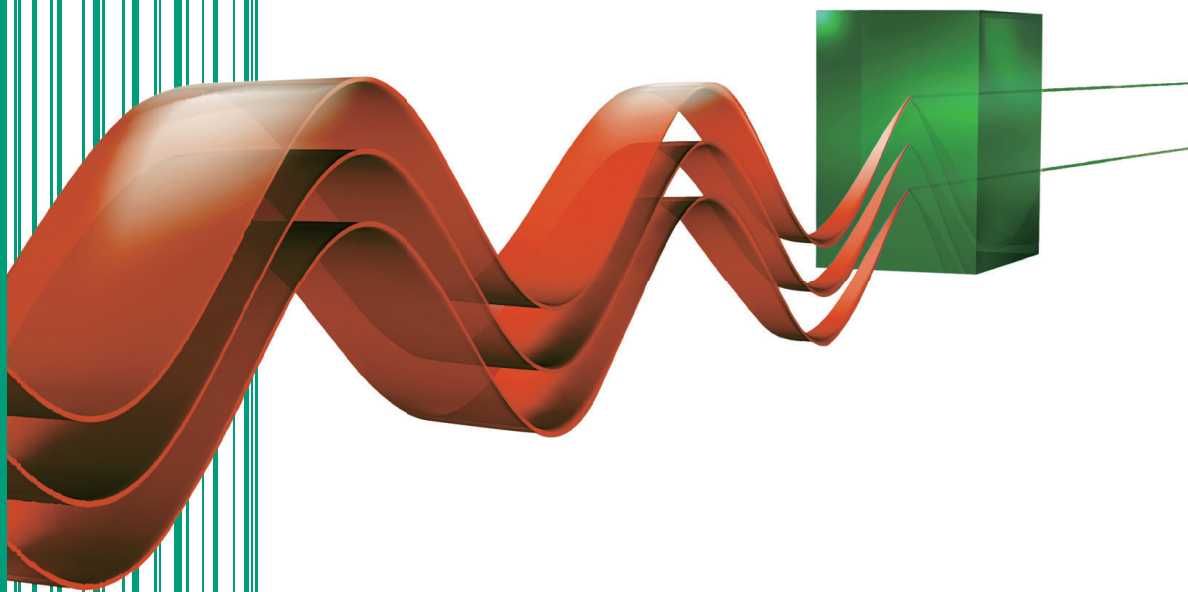
PCIM
ASIA

International Exhibition and Conference
for Power Electronics, Intelligent Motion,
Renewable Energy and Energy Management

PCIM ASIA 2013
电力电子 智能运动
可再生能源与能源管理
国际展览会与研讨会



PROCEEDINGS
论文集



上海世博展览馆
Shanghai World Expo Exhibition
And Convention Center
18–20 June, 2013

Mesago PCIM

i2i GROUP

采用先进的 IGBT 门极驱动器技术为多电平变换器提供安全驱动

Olivier Garcia、Jan Thalheim 与 Nils Meili
CT-Concept Technologie GmbH, 2504 Biel, Switzerland（瑞士）
www.IGBT-Driver.com

摘要

CONCEPT 的 SCALE-2 技术具有高级有源钳位(AAC)功能，为多电平变换器设计提供简单、安全的 IGBT 驱动器。IGBT 出现短路故障时，所有 IGBT 无需以特定的关断时序来避免 IGBT 集电极过电压。而是在检测到故障时立即关断 IGBT，AAC 功能可以将 IGBT 的集电极电压限定在安全工作区内。

1. 介绍

中性点钳位(NPC)的多电平特别是三电平拓扑结构的变换器（图 1 右侧）可以在太阳能、风力发电或牵引变流器等众多应用中替代两电平变换器（图 1 左侧）[1]。三电平 NPC 与两电平拓扑变换器的简单比较如下：

- 在使用同一电压水平的IGBT的情况下，与两电平拓扑比较而言，三电平变换器可以使输出电压（及功率）增大一倍。
- 在不需要较高电压的应用中，三电平变换器允许使用较低压的IGBT模块，以获得相同的输出电压和功率。三电平变换器设计能够提高IGBT的开关频率，从而减小输出电感或直流母线电容等无源元件的尺寸，整个系统的效率也可得以提高。
- 三电平变换器设计不要求集电极电压达到静态和动态对称，这样可以简化IGBT驱动器的设计，并避免使用外部缓冲电路。此外，当使用相同的IGBT开关频率时，最终的输出频率可以提高一倍。这显然有助于减小无源元件（见上）的尺寸和降低开关损耗。

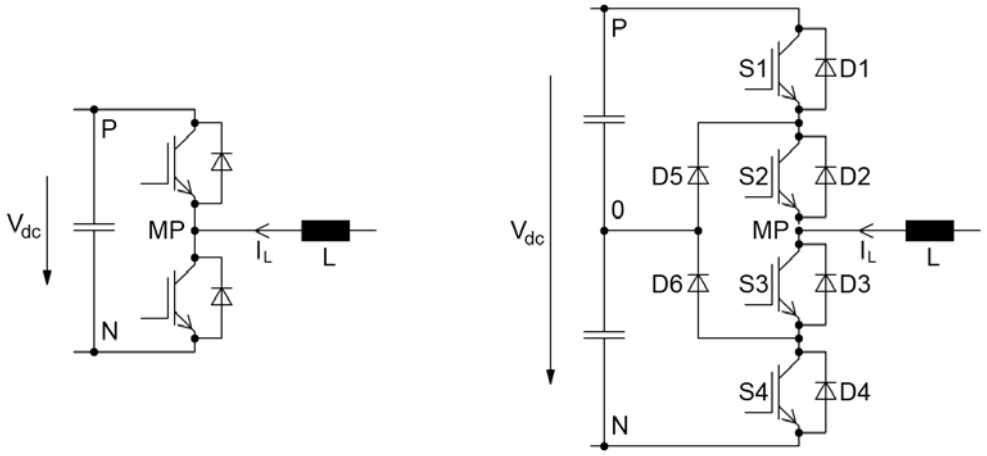


图1. 半桥三电平 NPC 拓扑（右）与半桥两电平拓扑（左）之比较

另一方面，三电平变换器的控制会带来一些其它的问题：

- 必须在正常工况和不对称负载工况下对中性点电位进行稳压。做到这一点的方法是：在采用空间矢量调制时，选择适当的冗余矢量状态。
- 关断IGBT所产生的电压尖峰通常（至少对于IGBT S2和S3而言）高于两电平变换器[1]，因为相应的换流回路的路径将会增大，杂散电感相应增大。因此，在抑制关断过

压方面，需要进行更多的考虑。

- 通常，必须将特定的换流时序考虑进来。在正常工作情况下，在处于关断状态时，只有全直流母线电压的一半静态施加到单个IGBT上。忽略上述要求可导致全部直流母线电压被施加到单个开关，除非采取特别的对策。这种情况在IGBT短路时需要特别注意。

采用 SCALE-2 技术的高级有源钳位功能可以有效地解决后两点所产生的问题。

2. 高级有源钳位功能(AAC)

有源钳位功能已被广泛使用多年，用来限制 IGBT 关断过程中产生的集电极电压尖峰[2]。IGBT 会在集电极-发射极电压超过预设的阈值时立即部分导通，然后维持在线性区内工作，因此可降低集电极电流的下降速率，进而限定集电极-发射极过压。

基本有源箝位(BAC)电路是将 IGBT 的集电极电位通过瞬态电压抑制二极管(TVS)反馈到 IGBT 门极的单反馈电路（参见图 2 左侧）。在 SCALE-2 的高级有源钳位(AAC)电路中，通过此功能还可将反馈信号送进驱动器副边的引脚 ACL（参见图 2 右侧）：只要电阻 R_1 右侧的电位因有源钳位动作而升高，与 GL 相连的驱动器的关断 MOSFET 就会逐步关断[3,4]。这样会降低从 IGBT 门极流出并流入 COM 的电荷，该电流经过关断门极电阻 $R_{g,off}$。其结果是减小 IGBT 关断过压ΔV_{ce}并降低 TVS 损耗。

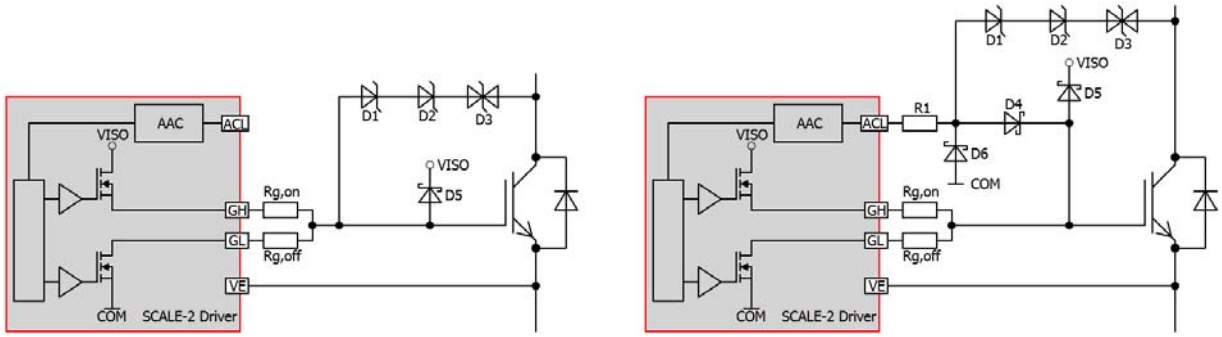


图2. *基本有源箝位的外部电路（左）；采用 SCALE-2 技术的高级有源箝位(AAC)（右）*

通过使用 CONCEPT 的 1SP0635 驱动器和 Infineon 的 FZ1500R33HE3 IGBT 模块进行测量，来比较 BAC 和 AAC 在同一工作条件下的性能。图 3 显示的是使用基本有源钳位（左）和高级有源钳位（右）在 2200V 高直流母线电压和 1500A 额定电流下的 IGBT 模块的关断行为。可以从中清楚看出 AAC 对门极电压的积极影响以及最终的 $V_{ce,peak}$ 电压的幅值。

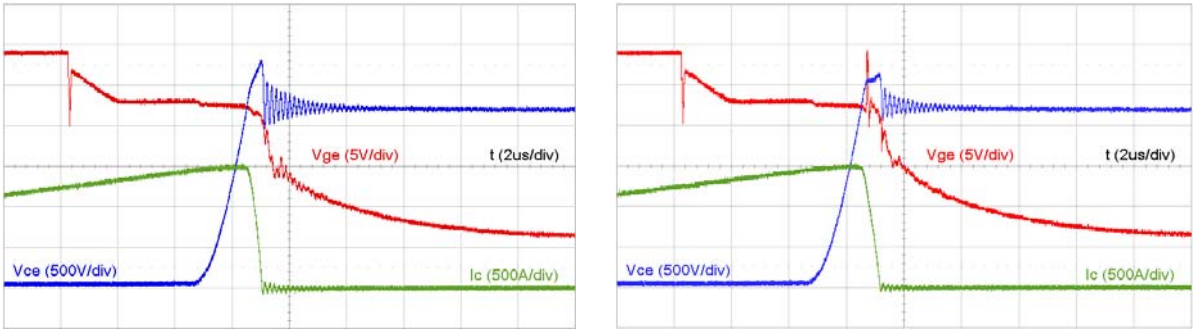


图3. *使用 1SP0635 驱动 FZ1500R33HE3，在使用 BAC 功能（左）和 AAC 功能（右）的关断行为，V_{dc}=2200V 且集电极电流为额定 I_c=1500A，$R_{g,off}$=4.5Ω，L_σ=110nH，25°C*

图 4 比较了 TVS 的能量 E_{TVS} 以及两种有源钳位方法的关断过压ΔV_{ce}。这种比较是在不同直流母线电压 V_{dc} 和集电极电流 I_c 下进行的。下表右侧两列显示了在同时使用 BAC 和 AAC 的情况下 TVS 能量 E_{TVS} 与ΔV_{ce} 过压之间的关系。使用 BAC 时的最大 TVS 能量是 AAC 的将近三倍，ΔV_{ce} 过压减小了 1.4 倍以上。

在直流母线升高、直流母线杂散电感增大或使用开关速度更快的 IGBT 时，有源钳位的动作会更加剧烈，下表右侧两列中的比值也会变得更大。

		BAC		AAC		$\frac{E_{TVS,BAC}}{E_{TVS,AAC}}$	$\frac{\Delta V_{ce,BAC}}{\Delta V_{ce,AAC}}$
V_{dc} [V]	I_c [A]	E_{TVS} [µJ]	$V_{ce,peak}$ [V]	E_{TVS} [µJ]	$V_{ce,peak}$ [V]		
2000	750	20	2559	16	2565	1.25	0.99
2000	1500	40	2682	26	2581	1.54	1.17
2000	2250	146	2725	46	2552	3.17	1.31
2000	3000	216	2736	76	2563	2.84	1.31
2200	750	64	2746	46	2612	1.39	1.33
2200	1500	184	2808	90	2654	2.04	1.34
2200	2250	334	2822	134	2640	2.49	1.41
2200	3000	492	2810	172	2623	2.86	1.44

图4. *使用 BAC 和 AAC 以及 IGBT 模块 FZ1500R33HE3 和驱动器 1SP0635 时每个 TVS 的能耗及 $V_{ce,peak}$；$R_{g,off}$=4.5Ω，L_σ=110nH，25°C*

由于 AAC 性能较高，因此可提高 IGBT 模块的利用率：在不超过 IGBT 的反向偏置安全工作区(RBSOA)或驱动器的 TVS 不会发生热过载的情况下，可以提高直流母线电压、增大集电极电流和/或提高开关频率。

3. AAC 在三电平拓扑中的有效性

由于 AAC 具有强大的 $V_{ce,peak}$ 电压限制作用，因此在三电平或多电平拓扑中出现 IGBT 短路时无需采用特定的关断时序。只要 IGBT 驱动器检测到故障状况（如 IGBT 短路），它就会立即关断相应的 IGBT 模块（不管该 IGBT 模块在变换器拓扑中处于何种位置），并且故障信号会在 450ns 内传送到用户接口。如果随后采用错误的关断时序，AAC 即可安全地限定相应 IGBT 的最大 V_{ce} 电压。主控制器只需要对所有 IGBT 施加统一的关断脉冲，即可避免 IGBT 驱动器出现热过载。

下面的研究采用 Infineon F3L200R07PE4 650V/200A 三电平 NPC1 IGBT 模块和 2SC0108T2D0-07 SCALE-2 驱动器。TVS 的击穿电压的典型值设为 479V (1mA/25°C)，以支持 870V 的最大直流母线电压 V_{dc}（每个半直流母线电压均设为相同值以便于测量）。以下将考虑三种不同的情况：两种短路情况和一种常规开关事件，每种情况都存在不正确的关断时序。

3.1. 桥臂中点(MP)与中性点(0)之间的短路

在图 1 右侧的拓扑中，在桥臂中点 MP 与中性点 0 之间设置一短路路径。图 5 的测量中所采用的最大直流母线电压 V_{dc} 为 870V。最初，所有的开关都处于关断状态(a)。然后导通 IGBT S3(b)，则半直流母线电压 435V 会施加于 V_{ce4}，此时无短路电流流过。当 IGBT S4 导通时(c)，短路电流 I_{c4} 流经 S3 和 S4，一直增大，直到 IGBT S3 先退饱和，稍后是 S4 退饱和。特定的关断时序将要求先关断 S4，再关断 S3。但在这里 S3 会先关断(d)。如果不采取保护措施，短路电流会换流到图 1 右侧中的 D1 和 D2，从而导致约 870V 的全直流母线电压施加到 V_{ce3}，

而这远远超出了 IGBT 最大耐压能力。图 5 清楚表明，在关断 S3 的整个关断过程中(d)，电压 V_{ce3} 被钳在最大值 500V。当短路电流完全关断时，半直流母线电压 435V 施加到 V_{ce3} (e)。

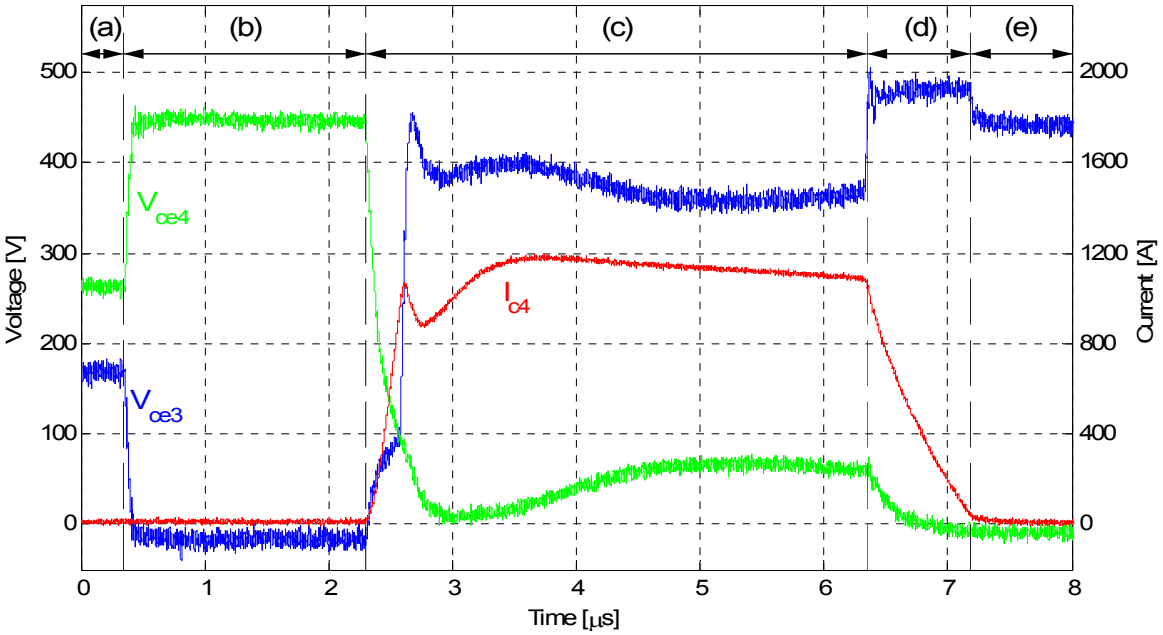


图5. 在 MP 与 0 之间出现短路时的错误关断时序

3.2. 桥臂中点(MP)与直流母线正端(P)之间的短路

在图 1 右侧的拓扑中，在桥臂中点 MP 与直流母线正端(P)之间设置短路路径。图 6 所显示的测量结果是采用 550V 直流母线电压 V_{dc} 得出的。最初，所有的开关都处于关断状态(a)。然后导通 IGBT S3(b)。短路电流 I_L 开始从 P 流到 MP、S3 和 D6。一半的直流母线电压 V_{dc} 被施加到 V_{ce4}。在约 1µs 后，S4 导通(c)。短路电流快速从 D6 换流到 S4（I_{c4} 增大）。当 IGBT S3 退饱和时，它的电流会大幅减小（图 6 中未显示），从而产生 V_{ce3} 电压尖峰。因为短路电流 I_L 为电感性，其将保持相对稳定，在整个(d)、(e)和(f)阶段，流经二极管 D1 和 D2 的电流在数值上等于 I_L–I_{c4}。因此，全直流母线电压 V_{dc} 被施加到 MP 与 N 之间。在此期间，AAC 可将电压 V_{ce3} 安全地钳在 500V 左右（V_{ce3} 会在 S3 退饱和后立即升高，但不会超过 IGBT RBSOA）。直流母线电压 V_{dc} 与 V_{ce3} 之间的差值（约等于 550V-500V=50V）施加到 MP、S3、S4 和 N 之间的杂散电感上，因为 S4 仍处于饱和状态，这会导致 $I_{c4,}$ 进一步增大，但增大速率较低(d)。

当 S4 退饱和时(e)，电流 I_{c4} 停止增大。特定的关断时序会要求先关断 S4。但在这里 S3 会先关断(f)。这种影响几乎察觉不到，如图 6 所示。原因非常简单：AAC 已经限定 V_{ce3} 电压，它无法进一步升高。驱动器会尝试降低 S3 的门极-发射极电压，但 AAC 功能阻止了这一行为。仔细看一下图 6，可以发现在(f)开始阶段 V_{ce3} 稍有升高。出现这一情况的另一可能原因是 TVS 温度有所提高，从而导致其击穿电压稍微升高。然后，关断 IGBT S4 (g)，I_{c4} 迅速降至零。对应的 V_{ce4} 电压由 S4 的 AAC 进行安全限定。一旦 S4 完全关断(I_{c4}=0A)，直流母线电压就均等地施加到 S3 和 S4。然后短路电流 I_L 完全流经 D1 和 D2，并逐渐降至零。

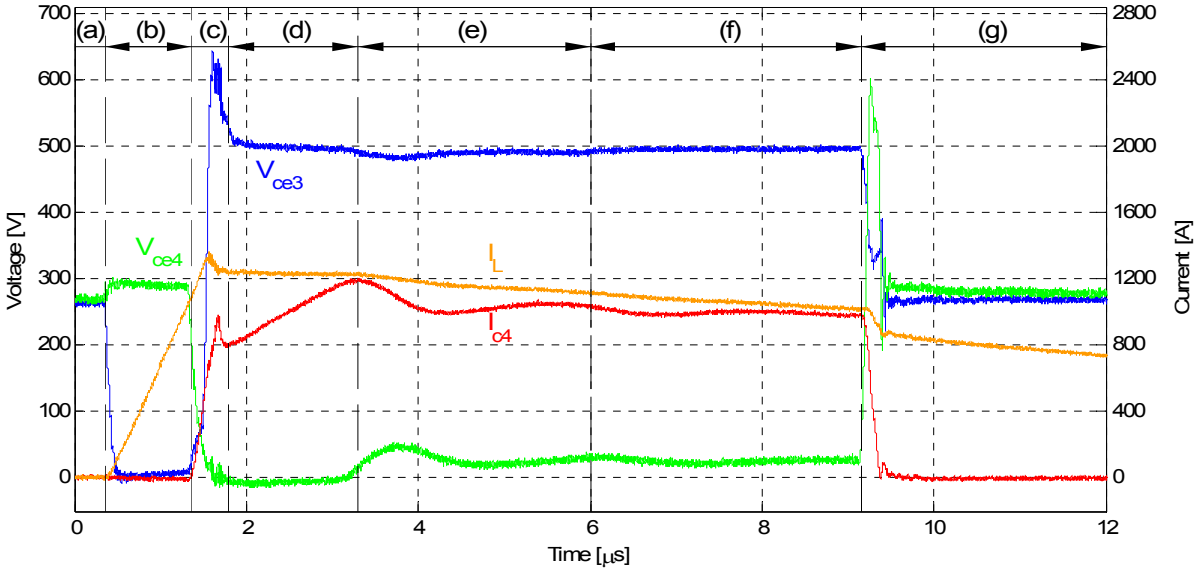


图6. 在 MP 与 P 之间出现短路时的错误关断时序

3.3. 正常开关工作时的错误换流时序

在正常开关工作时一旦出现错误的换流时序，AAC 也能发挥作用。在 P 和 MP 之间插入了一个 65µH 电感，用作负载。图 7 所显示的测量结果是采用 870V 直流母线电压 V_{dc} 得出的。最初，所有的开关都处于关断状态(a)。当 IGBT S3 导通时(b)，经过电感 L 的负载电流 I_L 开始增大（施加电压：435V）。然后，开通 IGBT S4(c)。电感 L 上的电压随之提高一倍至 V_{dc}=870V，负载电流 I_L 迅速从 D6 换流到 S4。正确的换流时序是先关断 S4，再关断 S3 ，使电流从 S4 换流到 D6，从而将 V_{ce4} 电压钳位在直流母线电压 V_{dc} 的一半。但在这里 S3 会先关断(d)。如果没有 AAC 功能，负载电流 I_L 会换流到 D1 和 D2，这样 870V 的全直流母线电压 V_{dc} 会被施加到 V_{ce3}。不过，AAC 功能可在整个阶段(d)将 V_{ce3} 电压安全地钳在约 520V。（在(d)阶段最开始，V_{ce3} 升高至 600V 并持续约 50ns 的时间。）然后，负载电流被强制流经 S3 和 S4，而避免流入 D1 和 D2。I_{c4} 的增大速率相应降低，这是因为施加到负载电感 L 的电压从 870V 降到了约 870V-520V=350V。然后，关断 IGBT S4(e)。负载电流立即换流到 D1 和 D2。电压 V_{ce3} 和 V_{ce4} 随之各自降至直流母线电压 V_{dc} 的一半左右。电压 V_{ce4} 还可以在 S4 关断时被安全地限定在约 600V。

然而，在正常开关工作时必须避免错误的换流时序。时序不正确会导致 IGBT 模块以及驱动器的 TVS 出现热过载，因为相应阶段中的有源钳位动作的持续时间可能会长于 IGBT 短路的持续时间。

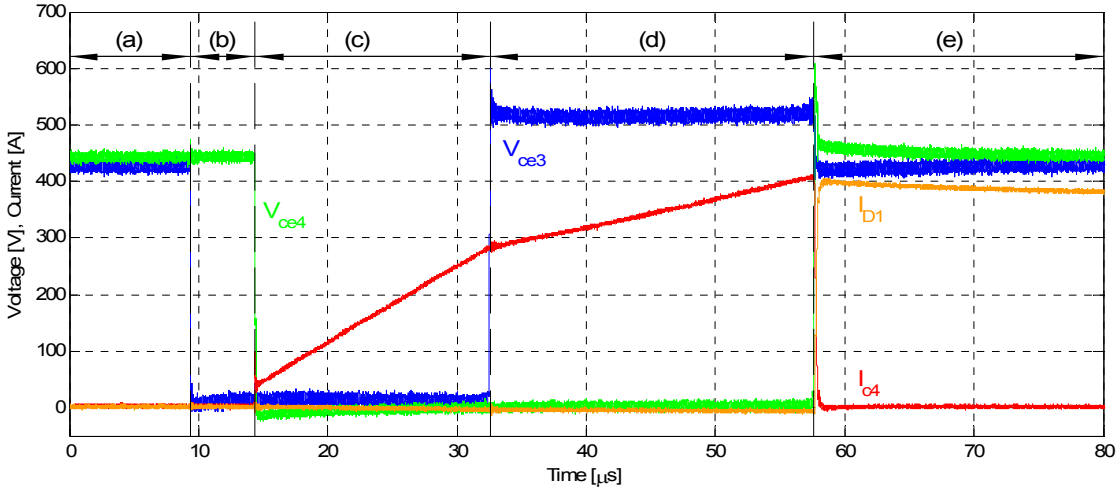


图7. 正常开关工作时的错误换流时序

4. 结论

在抑制三电平 NPC 拓扑中的 IGBT 集电极-发射极电压尖峰方面，SCALE-2 技术中的高级有源钳位技术的有效性已经被证实。因此，当出现 IGBT 短路故障时，已无需采用特定的关断时序。这样可以简化多电平变换器的短路管理，并且能够在不修改驱动器设计的情况下在多电平拓扑中使用两电平拓扑的 IGBT 门极驱动器。当检测到 IGBT 短路时，主控制器只需要对系统中的所有 IGBT 施加统一的关断脉冲。AAC 功能可以在任何时候对任何类型的 IGBT 集电极-发射极过压提供被动、有效的保护。

5. 参考文献

[1] Zhang Xi, Uwe Jansen, Holger Rüthing: “IGBT power modules utilizing new 650V IGBT^3 and Emitter Controlled Diode^3 chips for three level converter”, PCIM Europe, Conference Proceedings, Nuremberg, 2009.
[2] Heinz Rüedi, Peter Köhli: “SCALE Driver for High Voltage IGBTs”, PCIM Europe, Conference Proceedings, Nuremberg, 1999.
[3] Olivier Garcia, Jan Thalheim, Markus Rätz: “New 3.3kV Dual-Channel IGBT Driver Core”, PSDE, June 2011.
[4] Description and Application Manual for 2SC0435T, CONCEPT.