

1140Vac 中压三电平逆变 IGBT 驱动新方案

杭州飞仕得科技有限公司 洪磊

摘要

1140Vac 逆变器/变频器广泛应用于轨道交通牵引，地铁馈能^[1]，中压变频等行业，近年来随着“更高功率密度，更低系统成本”的发展需求，基于 1700V EconoDUAL™封装模的 NPC I 型三电平方案开始广泛应用起来。相比较传统的两电平拓扑，NPC I 型三电平系统更为复杂，主要存在 IGBT 内外管关断错误时序和内管关断尖峰过高的问题，给 IGBT 的驱动技术带来巨大的挑战。

本文重点阐述 NPC I 型三电平拓扑上述问题的机理，并基于 Firstack 新一代数字 IGBT 驱动器，给出了智能的解决方案：三电平模式、分级关断，大大提高基于 1700V EconoDUAL™封装模 NPC I 型三电平中压逆变系统的可靠性。

1、引言

传统轨道交通牵引变流器，地铁馈能变流器，中压变频器，广泛采用 3300V 的 IHM 封装模块的两电平拓扑方案，如图 1(a)所示，该方案在技术层面应用已经相当成熟。但是随着近年来市场不断发展，对体积，成本要求越来越高，基于 1700V/EconoDUAL™封装模块的 NPC I 型三电平拓扑方案开始广泛应用起来，参考示意拓扑如图 1(b)：

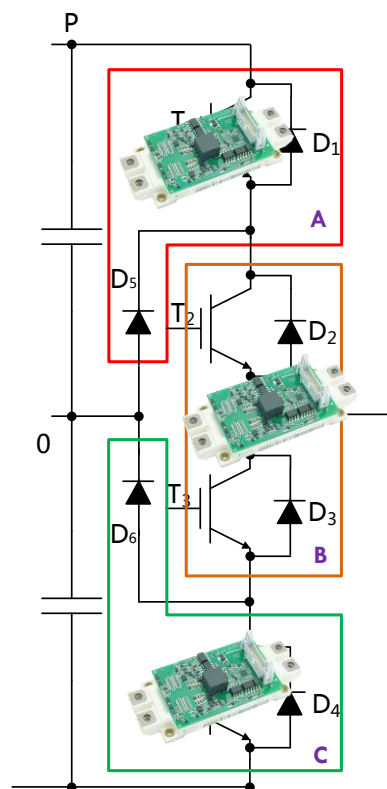
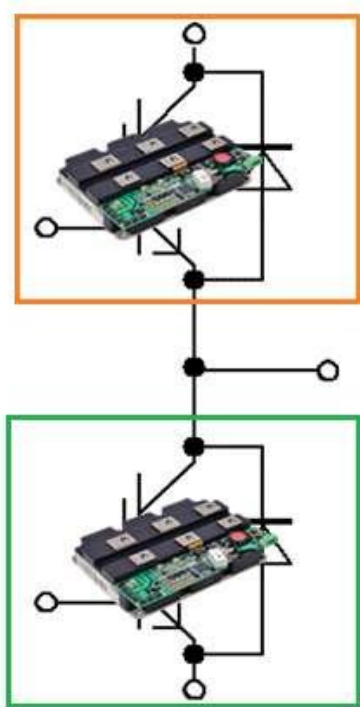


图 1(a) 基于 3300V IHM 封装模块的两电平拓扑图 1(b) 基于 1700V EconoDUAL™ 封装模块的 NPC I 型三电平拓扑

该方案由 3 个 EconoDUAL™ 封装模块构成一相 NPC I 型桥臂，其中模块 A 构成外管 T1 和钳位二极管 D5；B 模块构成内管 T2 和 T3；C 模块构成外管 T4 和钳位二极管 D6。具有以下优势：

- 低成本：相比较 IHM 封装模块，EconoDUAL™ 模块价格低廉，可以大幅降低模块成本
- 高频化：EconoDUAL™ 适合高频应用，采用 NPC I 型拓扑进一步提高等效开关频率
- 体积小：该方案可以简化母排设计，结构更小，更紧凑；通过提高开关频率，大幅降低输出滤波器的体积

NPCI 型三电平拓扑方案虽然有上述优势，但是在驱动技术层面存在两大技术难点：

1，内外管关断时序问题：任何情况下，外管优先于内管关断，尤其是在短路故障或者欠压故障情况下。

2，内管关断电压尖峰过高：由于拓扑结构比传统两电平复杂，内管存在大换流回路，实际模组设计母排杂散电感很大，很容易导致模块过压损坏。

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(S_1 , 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态 ,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态 (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

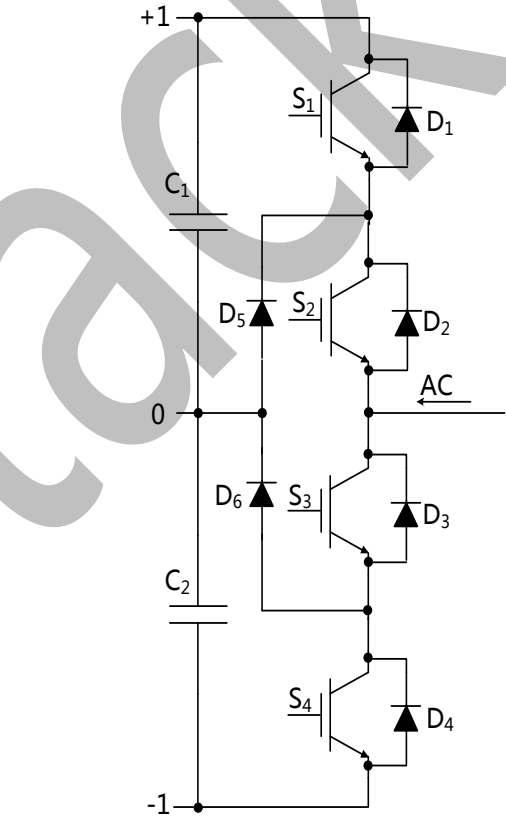


图 2 NPC I 型三电平拓扑结构

上述表中可以看出 ,NPC I 型三电平有 5 种模态 ,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 ,我们取模态 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。

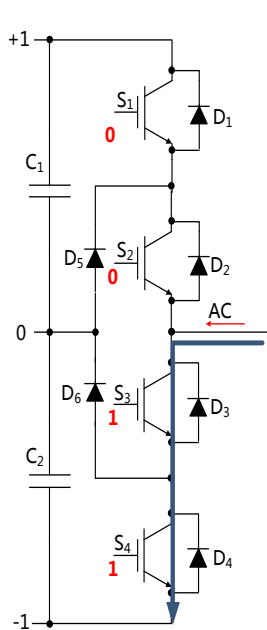


图 3 a

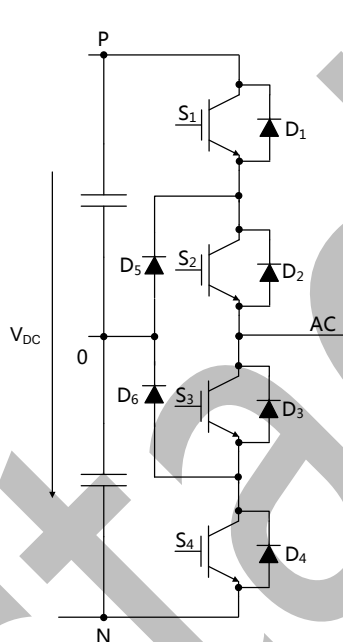


图 3 b

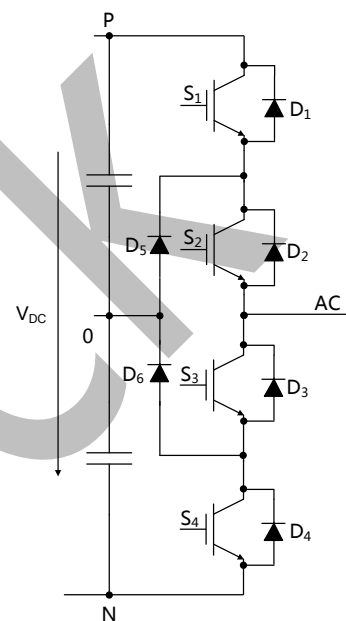


图 3 c

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。而基于 1700V EconoDUAL™ 封装模的 NPC I 型三电平方案采用 3 个 EconoDUAL™ 封装模构成一相桥臂，模块之间采用

叠层铜排连接，实际大换流回路需要经过模块以及相应的连接铜排，进一步增大杂散电感，根据系统实测，一般会到 120nH，远远大于模块推荐的 30nH 要求，使得关断尖峰异常高，模块很容易过压失效。

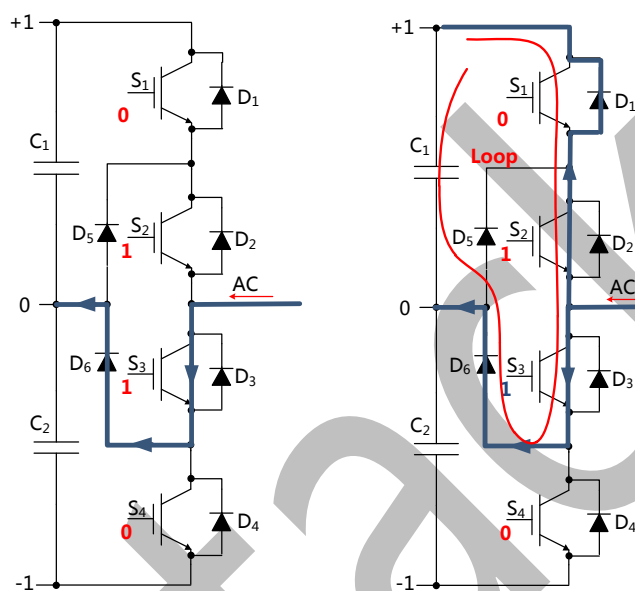


图 4a

图 4b

3、NPC I 型三电平数字 IGBT 驱动器

针对 EconoDUAL™ 封装模块的 NPC 三电平应用的上述问题，Firstack 开发了新一代即插即用数字 IGBT 驱动器：2FSD0115+B17-3L。该驱动器相对于传统的两电平主要具有以下功能：三电平模式和分级关断。可以有效解决内外管关断错误时序和内管关断尖峰过高的问题。

3.1 三电平模式

2FSD0115+B17-3L 具有三电平模式。传统的两电平驱动模式，驱动板在检测到故障（短路或者欠压），会立即封锁 PWM 信号。三电平模式下，驱动板检测到故障（短路或者欠压），自己不立即封锁 PWM，而是将故障信息上传到控制板，让控制板协调内外管的关断时序，控制板下发关断指令，驱动接收到关断指令再封锁 PWM。三电平模式故障保护时序图如下：

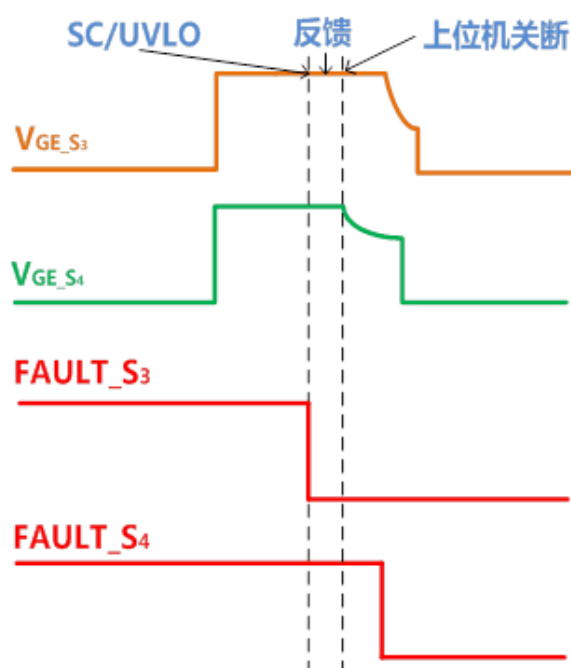


图 5 三电平模式保护时序图

在 EconoDUAL™ 封装模块的 NPC 三电平方案中，2FSD0115+B17-3L 驱动应用内管模块，可以确保短路或者欠压故障发生时，控制系统能优先关断外管。

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，关断尖峰也越小，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。

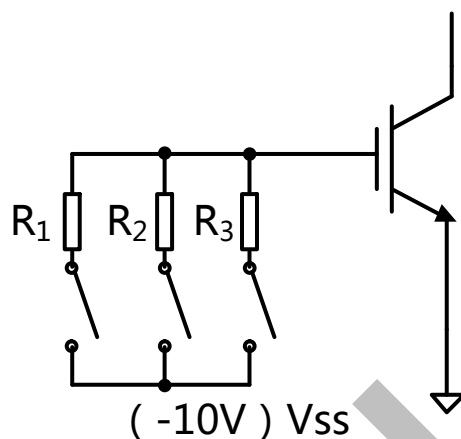


图 6 分级关断电阻示意图

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。

4、测试验证

为了验证相应的数字驱动技术，基于 EconoDUAL™ 封装模块的 NPC 三电平方案的测试平台。模块型号：FF600R17ME4；驱动：2FSD0115+系列即插即用驱动器。具体构建的示意图如下所示，其中外管采用两电平版本：2FSD0115+B17，内管采用三电平版本：2FSD0115+B17-3L。

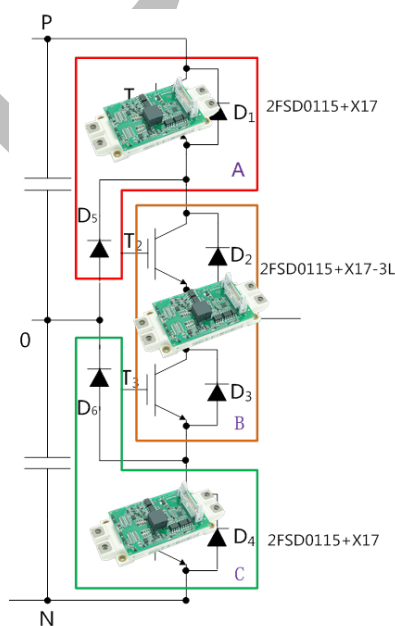


图 7 基于 EconoDUAL™ 封装模块的 NPC 三电平方案示意图

4.1 时序管理测试波形

为了验证短路工况下的时序管理，基于该三电平方案进行相应的短路测试，主回路如图 8 所示，做 S_3 和 S_4 的短路实验。实际测试波形如图 9 所示：

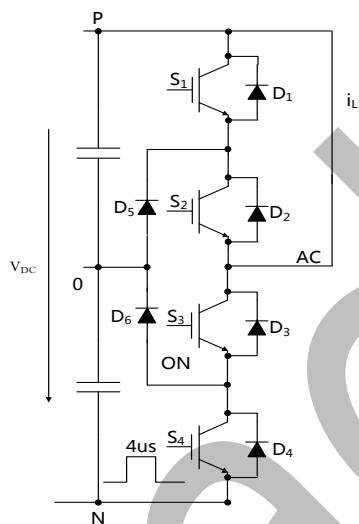


图 8 短路测试主回路图

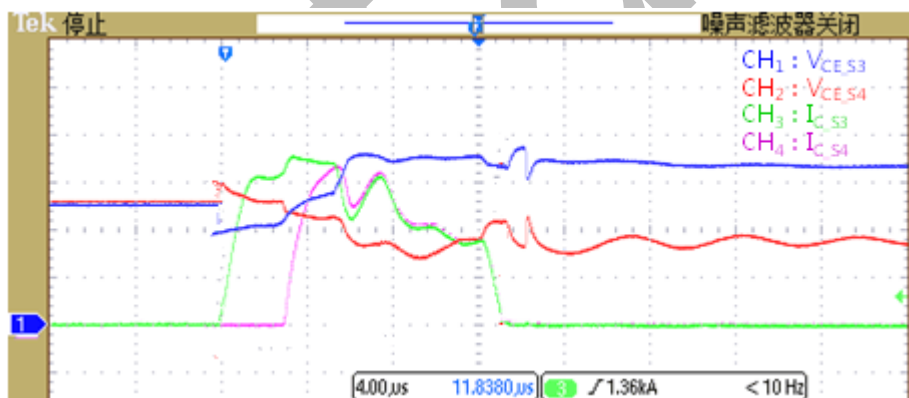


图 9 短路测试波形

从测试波形上可以看出，内管 (S_3) 先检测到短路，反馈给上位机后，上位机协调先关外管 (S_4) 后关内管 (S_3)。

4.2 分级关断测试波形

实验条件：采用英飞凌 FF600R17ME4，测试内管 S_3 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

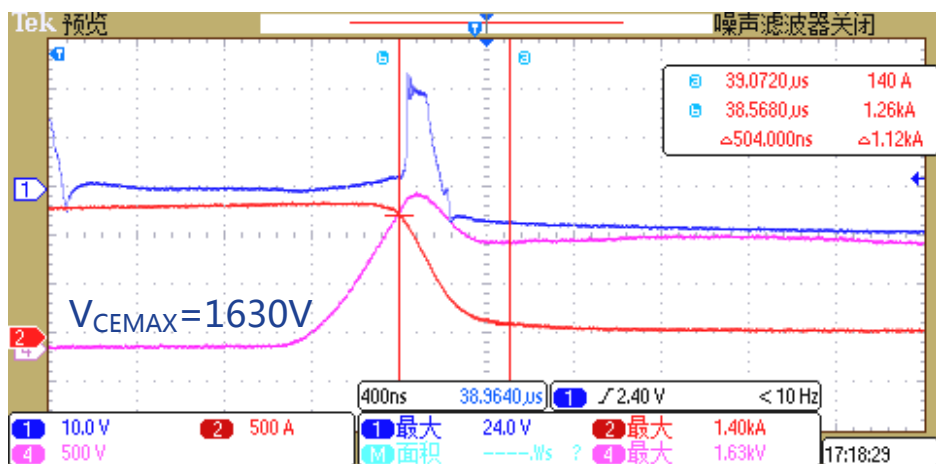


图 10a 不带分级关断的测试波形

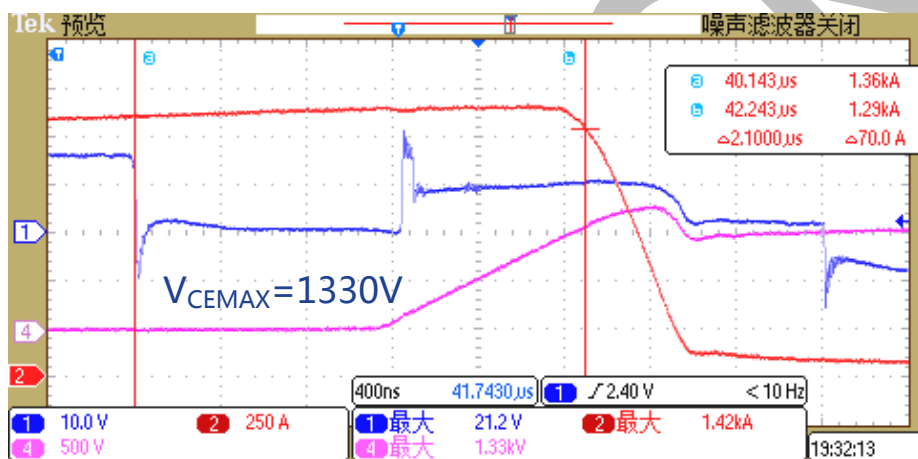


图 10b 带分级关断的测试波形

从对比测试结果来看，在同等实验条件下，不带分级关断的 $V_{CE_MAX}=1630V$ ，带分级关断的 $V_{CE_MAX}=1330V$ ，电压尖峰下降了近 20%。

5、结论

Firstack 的 2FSD0115+B17-3L 智能驱动器，具有三电平模式以及分级关断功能，可以有效解决基于 EconoDUAL™ 封装模块的 NPC 三电平方案中关断时序问题和内管关断尖峰过大的问题，大大提高 1140Vac 三电平中压逆变系统的可靠性，具有广泛的应用前景。

参考文献：

[1]，湖南恒信电气有限公司，中铁电气化勘测设计研究院等.电阻-逆变混合型再生制动能量吸收装置挂网试验报告[R].广州，重庆 2010.2~2010.8

[2]，Firstack Technical documentation：2FSD0115+B17.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，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