

模块并联分析

编写：陈浩 审阅：Norman Day

前言

IGBT 模块作为现行半导体行业中最主要的开关器件之一，广泛应用于变频器、电焊机、UPS、感应加热、电镀电源及风能太阳能等领域。因此 IGBT 模块的电流应用等级范围很广，从几安培到几千安培甚至几万安培都有。但是由于 IGBT 模块受封装工艺的限制，一般市场上使用 400A 及其以下的封装较为常见，400A 以上的封装市场上用量比较少，所以价格相对比较昂贵。以要求 1200A1200V 半桥结构为例，如果采用 3 个 400A1200V 半桥模块并联的方式相对于采用使用单一半桥模块的成本只是其 1/2 至 2/3 左右，故在这个成本竞争的时代，并联模块的应用成为一个重要的课题。但模块并联并不是一个简单的过程，有很多因素影响模块是否能够并联及并联后的特性，在此主要针对饱和压降 $V_{CE(sat)}$ 和开启电压 V_{th} 的影响做探讨。

模块并联的影响因素

主要影响模块并联的因素如下表所示：

影响因数	静态均流	动态均流
饱和压降 $V_{CE(sat)}$	✓	
开启电压 V_{th}		✓
并联功率回路对称性	✓	
门极驱动电压 V_{GE}	✓	
二极管压降 V_f	✓	
工作温度	✓	✓
驱动电阻 R_g	✓	
驱动回路杂散电感		✓
功率回路杂散电感		✓
驱动对称		✓
.....

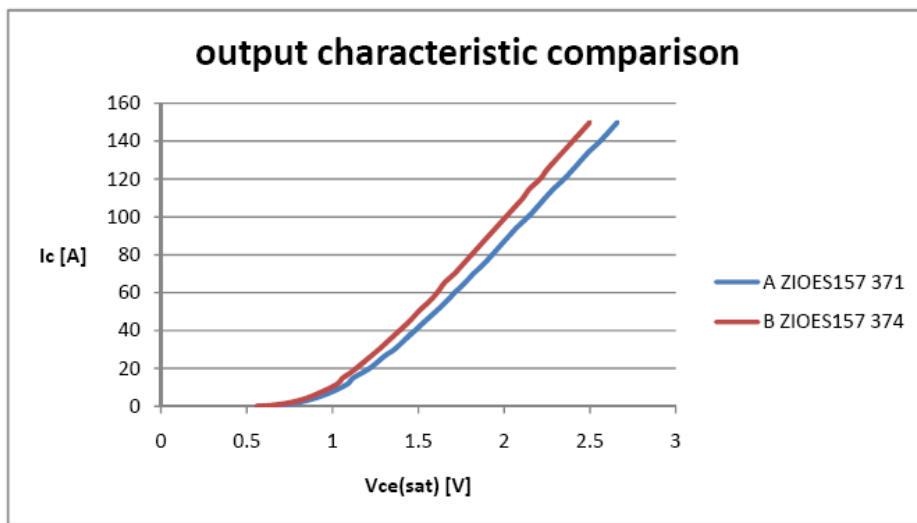


表中任何一项的过大失衡都有可能对模块造成致命的损伤。

下文主要以我司 GD300HFL120C2S 模块采用两并方式应用于 185kW 的变频器上为例，分析在变频器的某一工作状态下，饱和压降 $V_{CE(sat)}$ 和开启电压 V_{th} 对模块均流的影响。因为 GD300HFL120C2S 模块内部主要是以 75A 芯片四个并联而成，一般并联用的芯片会经过筛选，保证每一个模块内部的四个并联芯片的特性是基本相同的。所以为了简化分析的复杂性，我们假设同一模块内的四个芯片是完全相同的。因此讨论 300A 模块的并联等同于讨论 75A 模块的并联。

静态均流：饱和压降 $V_{CE(sat)}$ 的影响

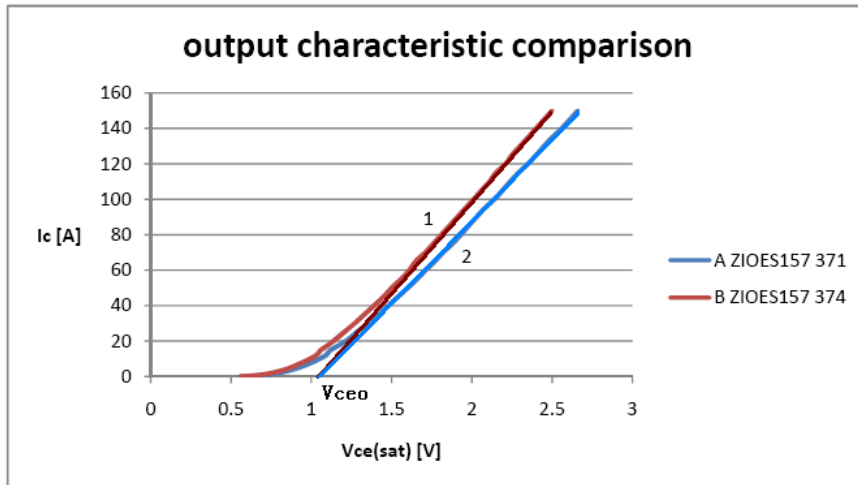
相同型号的各个模块在处于同一测试条件下，模块之间也具有不同的 $V_{CE(sat)}$ 值。在不考虑实际应用中其他因素的差异对模块输出特性曲线的影响进行分析如下：



图一

如图一所示为 GD75HFL120C1S 同一批次的两只不同模块的实测输出特性曲线。下面我们假设分别各有四片与这两只模块特性相同的芯片封装成的 GD300HFL120C2S 模块使用于 185kW 的变频器上的一侧，那么根据变频器相关标注的满载电流为 340A，经换算每个 75A 芯片承受的峰值电流平均值约为 60A。

将图一简单处理后如图二。



图二

从图二中可以看出，当电流达到一定值后，我们可以把两个模块的输出特性曲线看成两条同一点出发，斜率不同的直线。分别假设两条直线为 1 和 2，那么根据公式

$$V_{ce} = V_{ce0} + r_{ce} \times I_C \quad (1)$$

V_{ce} 表示 $V_{ce(sat)}$ 的值； V_{ce0} 表示直线与 $I_C = 0$ 时的交点； r_{ce} 表示直线的斜率。可得：

$$V_{ce1} = V_{ce01} + r_{ce1} \times I_{C1} \quad (2)$$

$$V_{ce2} = V_{ce02} + r_{ce2} \times I_{C2} \quad (3)$$

结合图二和并联信息：

$$V_{ce01} = V_{ce02} \quad (4)$$

$$I_{C1} + I_{C2} = 120A \quad (5)$$

可得：

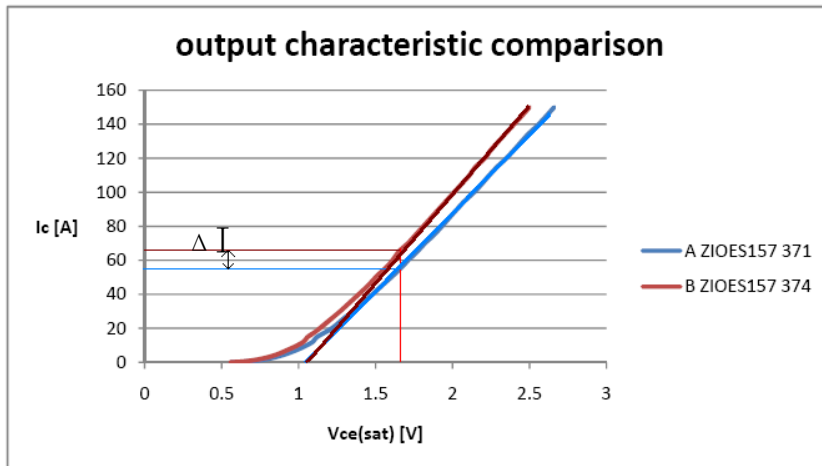
$$I_{C1} = \frac{r_{ce2}}{r_{ce1}} I_{C2} \quad (6)$$

$$I_{C1} + I_{C2} = 120A \quad (7)$$

根据图二，简单换算两条直线的斜率后，其最终结果大致约为：

$$I_{C1} = 65A, I_{C2} = 55A$$

在图二中标识后如图三所示。

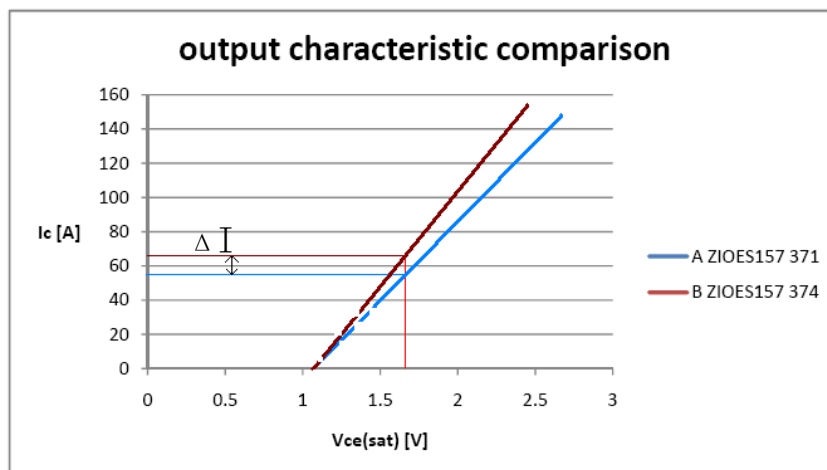


图三

如图三所示为 185kW 的变频器在满载工作时的 75A 芯片电流分布，变频器的满载峰值电流为两个模块的电流之和。ΔI 表示在满载状态下，两个模块内部 75A 芯片之间的电流差值，所以在满载状态下两个模块内部 75A 芯片的 ΔI 值在 10A 左右。其电流不平衡率为：

$$\alpha = \frac{I_{C1} - I_{C2}}{I_{C1} + I_{C2}} = \frac{65 - 55}{65 + 55} = 8.3\%$$

对于图三进行简单处理图四。

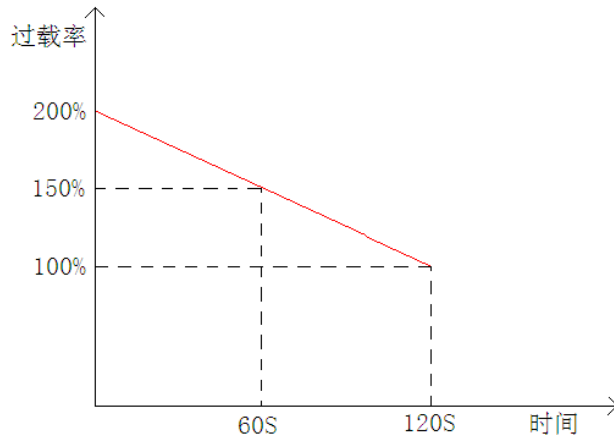


图四

如图四所示，当电流大于一定值时，两只模块的输出特性曲线大致可描述为两条同一点出发不同斜率的直线，结合算式（6）可以判定电流不平衡率是定值。但是随着电流 IC 的增大，ΔI 的值也会增大，凸显两只并联模块之间过电流大小的差异。



根据客户端对变频器等过载的要求，操作系统在段时间内必须在某一过载时间下承受特定的过载率，变过载率和时间的关系如图五所示。

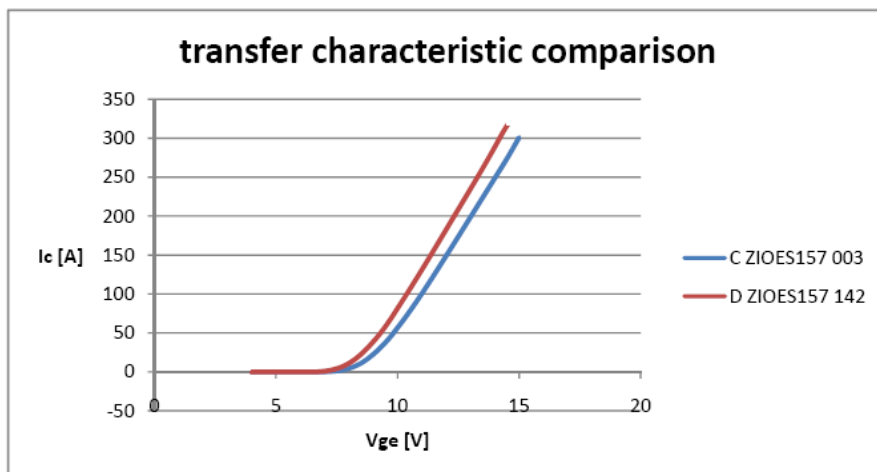


图五

如图五所示为客户端一般测试时过载率和过载时间的简单关系图，从上图我们可以看出模块每个芯片承受的实际最大峰值平均电流可能达到满载的两倍，即 120A，所以在电流不平衡率不变的情况下， ΔI 的值也是原来的两倍，即 20A 左右。

动态均流：开启电压 V_{th} 的影响

相同型号的各个模块在处于同一测试条件下，模块之间也具有不同的 V_{th} 值。下面我们不考虑实际应用中其他因素的差异对模块传输特性曲线的影响进行分析如下：



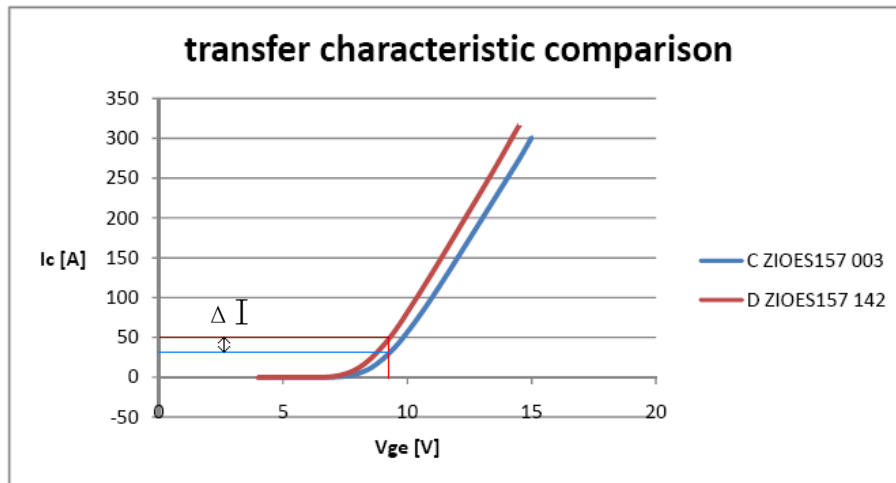
图六



如图六所示为 GD75HFL120C1S 同一批次的另两只不同模块的实测传输特性曲线。下面我们假设分别各有四片与这两只模块特性相同的芯片封装成的 GD300HFL120C2S 模块使用于 185kW 的变频器上的一侧，那么根据变频器相关标注的满载电流为 340A，经换算每个 75A 芯片承受的峰值电流平均值约为 42.5A。

根据公式 $I_C = K(V_{ge} - V_{th})^2$ ，由于已知 $I_{C1} + I_{C2} = 85$ ， $V_{ge1} = V_{ge2}$ ， $V_{th1} \approx V_{th2}$ ，所以决定 I_{C1} 和 I_{C2} 的主要因素是 K 值，但 K 值的计算较为复杂，故此处不展开分析，下文将采用图中做线的方法来大致确认 I_{C1} 和 I_{C2} 值。

对于图六进行简单处理图七。

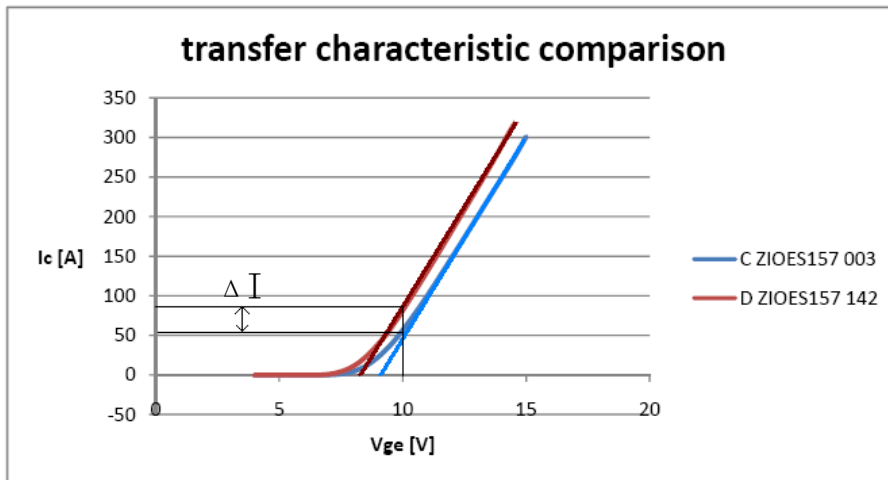


图七

如图七所示为假设该两只模块应用于 185kW 的变频器同一侧，在满载工作时两只模块内部 75A 芯片上的电流分布，变频器的满载峰值电流为两个模块的电流之和。从图中大致可以看出，在满载状态下两个模块开启时的米勒平台电压大致在 8.5V 左右， ΔI 值在 15A 左右，即可大致标示为 50A 和 35A。所以其电流不平衡率为：

$$\alpha = \frac{I_{C1} - I_{C2}}{I_{C1} + I_{C2}} = \frac{50 - 35}{50 + 35} = 17.65\%$$

对于图七的传输特性曲线我们进行简单处理如图八所示。



图八

从图八中可以看出，当变频器工作在额定电流大致在 580A 左右以后，即米勒平台电压约大于 10V 左右以后两只模块的传输特性曲线可简化为两条平行线，即 ΔI 恒定，值约为 35A，假设电流 580A 的 I_C 电流在两个模块的 75 芯片上的分布为 90A 和 55A，电流不平衡率为：

$$\alpha = \frac{I_{C1} - I_{C2}}{I_{C1} + I_{C2}} = \frac{90 - 55}{90 + 55} = 24.1\%$$

此后，由于 ΔI 恒定，而 I_C 值增大，电流不平衡率反而减小。

总结：

上文主要通过饱和压降 $V_{CE(sat)}$ 、开启电压 V_{th} 这两个参数对模块并联时均流的分析，可以看出两个参数中任何一个参数的差异都可能会严重影响模块并联时的均流造成不平衡。当然，这两个参数的探讨只是在假设其他众多影响因素都相同，而且是在模块内部芯片性能特性一致的前提下。在此前提下，一个真正模块并联设计者应该成熟的模块并联的各项特性和技术。