

## IGBT 在系统中的短路及其保护

何晓东

### 概述

本文主要简单探讨 IGBT 在低压中小功率系统使用中几种常用的短路保护，着重介绍采用检测  $V_{ce}$  的方式。简单阐述了短路保护的工作原理以及保护线路设计的合理性。

### 短路保护方案介绍

常用短路保护设计中，电流采样主要有三种方式，分别是：N-BUS（零线）分流电阻检测，输出霍尔检测， $V_{ce}$  电压检测。

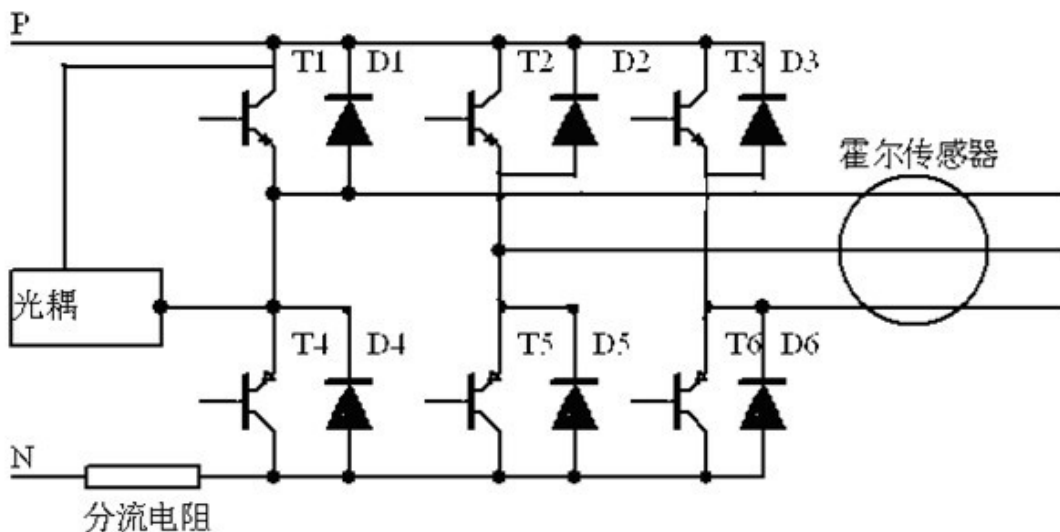


图 1

通过在母线回路中串联一个阻值很小电阻，根据欧姆定律将电压信号作为判别短路的依据。这种方式具有较高的精度和灵敏度，而且能够保护对地短路，缺点是只适合小功率机器，大电流对电阻的功率要求太高。

随着霍尔的响应时间不断提升，使其不单具有换算电流大小的功能，还可以通过硬件电路实现对短路电流的保护。由于霍尔检测的响应时间问题，可靠性相对低于其他两种方式。由于霍尔传感器安装在输出端，所以没有办



法保护上下管直通。

光耦保护 IGBT 是通过检测 C-E 电压来实现的，根据  $V_{ce}$  与  $I_c$  之间关系，当  $I_c$  迅速上升， $V_{ce}$  跟着上升。当  $V_{ce}$  值上升到达保护点电压，那么光耦就会自身实现软关断，同时将错误信号送给 DSP，整个过程一般在 5-10us 之间。由于此类保护灵敏度非常高，精度比较差，所以只适合短路保护。图 2 为 GD200HFL120C2S 的  $V_{ce}$  与  $I_c$  的关系图，随着  $V_{ce}$  的上升， $I_c$  上升的幅度在变大，+7V 时的  $I_c$ ，其实远远超出了模块的短路电流。在做动态短路测试时， $L$ ， $V_g$ ， $t_r$ ， $t_f$  等参数有严格且稳定的控制，电流一般会被控制在 8-10 倍的  $I_c$ ，如图 3 所示，但在系统上测试短路，由于开关特性、回路负载和干扰，电流往往会上升的比较高。

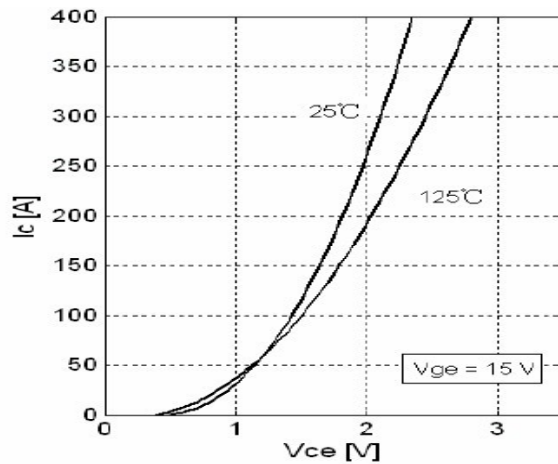


图 2

## 常见的短路保护驱动光耦

### (一) PC929

PC929 是变频器行业常见的驱动光耦，自带短路保护功能（PC923 无保护），由于其输出峰值电流只有 0.4A，在驱动较大功率 IGBT 时，需要在后端经过对管放大才能驱动 IGBT。具体 PC929 能驱动多大电流的模块，要看对管的选择，只要 PC929 能够推动对管，而对管又可以推动 IGBT，那么就可以实现。

图 3 为 PC929 内部保护电路：



- 1, 当 IGBT 关断时, 9 脚 C 电压被拉为零。
- 2, 当 IGBT 开启时,  $V_{cc}$  通过  $R_c$  对  $C_p$  充电, 充电电压超过 +7V, O2 输出实现软关断, FS 同时送错误信号 CPU, FS 为低电平有效, 对  $C_p$  充电速度由  $R_c$  和  $C_p$  决定。
- 3, 再当 IGBT 关断, C 迅速又被拉低, 拉低速度远大于 IGBT 关断速度。

Operations of Shortcircuit Protector Circuit

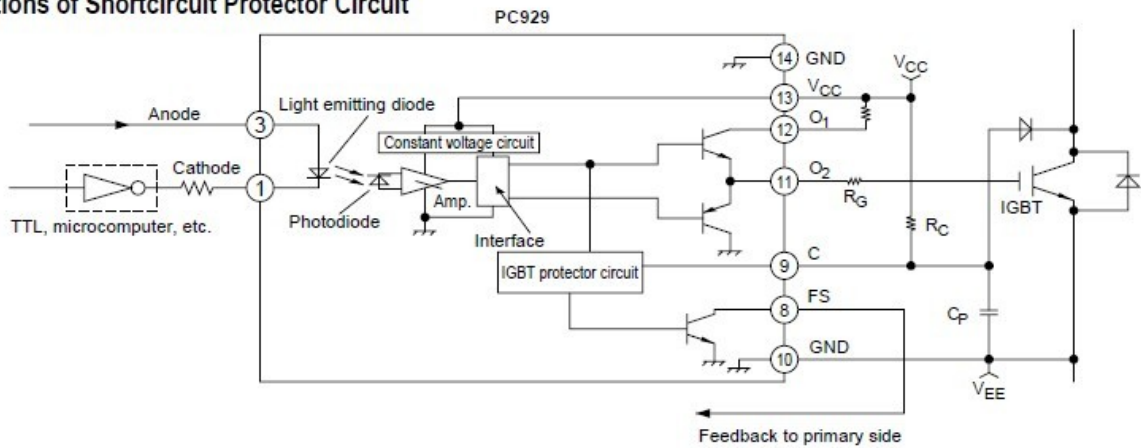


图 3

很多人反映 PC929 容易误动作, 但对误动作的机理并不是很清楚, 有人认为是保护时间太短了, 也有人认为 IGBT 的压降太大。那下面我们讨论下 PC929 会误动作的原因, 这对 IGBT 的保护电路设计很重要。

从理论上讲,  $V_{ce(sat)}$  越大的 IGBT 在线性区越快到达保护电压 +7V, 这是正确的, 但不是造成误动作的原因。+7V 的饱和压降所对应的  $I_c$  的值, 远远大于最大过载电流时的饱和压降, 而一般芯片的压降只有 1V 以下的差距, 这个差距不会造成非短路状态下误动作。

IGBT 正常开通时, 造成保护误动作的主要原因是 IGBT 开通时  $V_{ce}$  掉下来的时间, 还有就是对  $C_p$  的充电时间, 见图 4。

电源  $V_{cc}$  通过  $R_c$  对  $C_p$  充电, 充电电压为  $U_{cp}$ 。

如果  $V_{ce}$  沿 a 路径下降, 那么  $V_{ce}$  在  $U_{cp}$  到达 +7V 之前已经降到 +7V 以下, 那么 9 脚电压不会出现高于 +7V。

如果  $V_{ce}$  沿 c 路径下降, 那么  $V_{ce}$  在  $U_{cp}$  到达 +7V 时还高于 +7V, 那么 9 脚电压检测会出现高于 +7V, 跳短路保护。

结论: 要想避免开通误动作, 可以延长充电时间或开通速度更快一点。



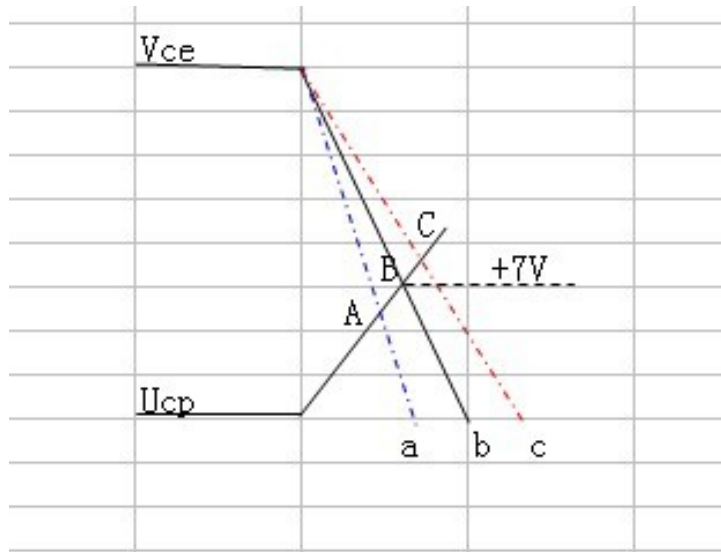


图 4

## (二) 316J

316J也是广泛使用于IGBT驱动的并且带Vce检测的光耦,他与PC929最大的区别是316J能够直接驱动150A的模块,不需要对管。在保护机制上,与PC929也是非常类似,具体见图5:当IGBT关断时,DESAT(14)通过一颗高速MOSFET拉到地,当IGBT开通后MOSFET关断,同时通过内部电流源和电容对14脚充电,电压上升超过+7V,316J保护。PC929是用Vcc通过电阻对电容充电;316J是直接通过内部电流源对电容充电,由于是用恒流源对电容充电,充电时间也可以计算得比较精确:

$$t=CV/I, \text{ 选 } C=100\text{p}$$

$$t=100\text{p} \cdot 7\text{V} / 250\text{uA} = 2.8\text{us}$$

意思是开通时Vce必须在2.8us内下降到+7V以下,否则会误动作。

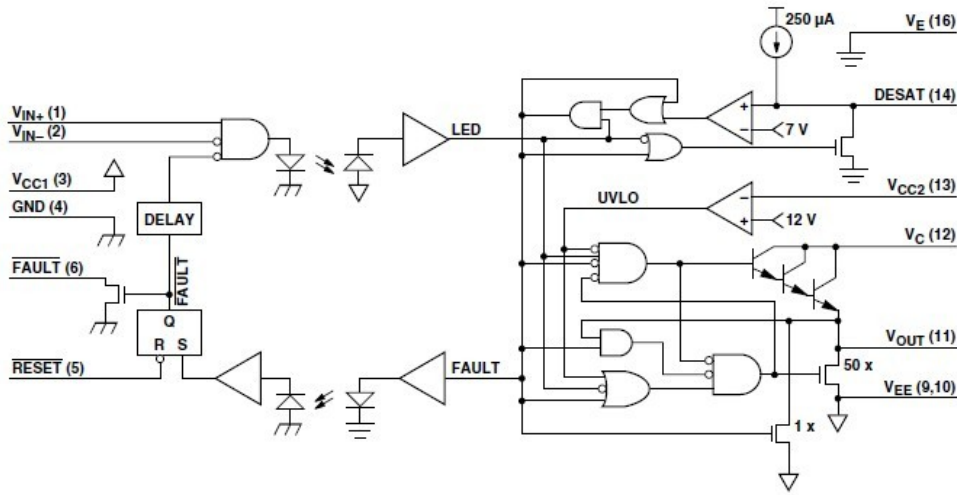


图 5

### (三) M57959/M57962

三菱公司的 M57959 和 M57962 也是具有短路保护功能的驱动集成块，与 PC929 和 316J 不同的是，三菱把光耦和外围元器件封装在一起，只需安装即可。优点是集成度高，安装简便，缺点是无法改变内部器件参数。

| Gate Drive Circuit | Peak Output Current | Short Circuit Protection | Optimum Application Range* |                              |
|--------------------|---------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|
|                    |                     |                          | For 600V IGBT Modules      | For 1200V/1400V IGBT Modules |
| M57957L            | 2 Amps              | No                       | Up to 100A                 | Up to 50A                    |
| M57958L            | 5 Amps              | No                       | Up to 400A                 | Up to 200A                   |
| <b>M57959L</b>     | <b>2 Amps</b>       | <b>Yes</b>               | <b>Up to 100A</b>          | <b>Up to 50A</b>             |
| <b>M57962L</b>     | <b>5 Amps</b>       | <b>Yes</b>               | <b>Up to 400A</b>          | <b>Up to 200A</b>            |

通过 M57962 相关资料可以得出，在 IGBT 开通时，也是通过 Vcc 对电容充电，然后跟基准电压 Vtrip 比较，来判断短路与否，跟 PC929 类似。

通过改变外接电容 Ctrip 来调节 DELAY 时间时间，从而可以调节保护时间，可以借此来避开开启误动作。

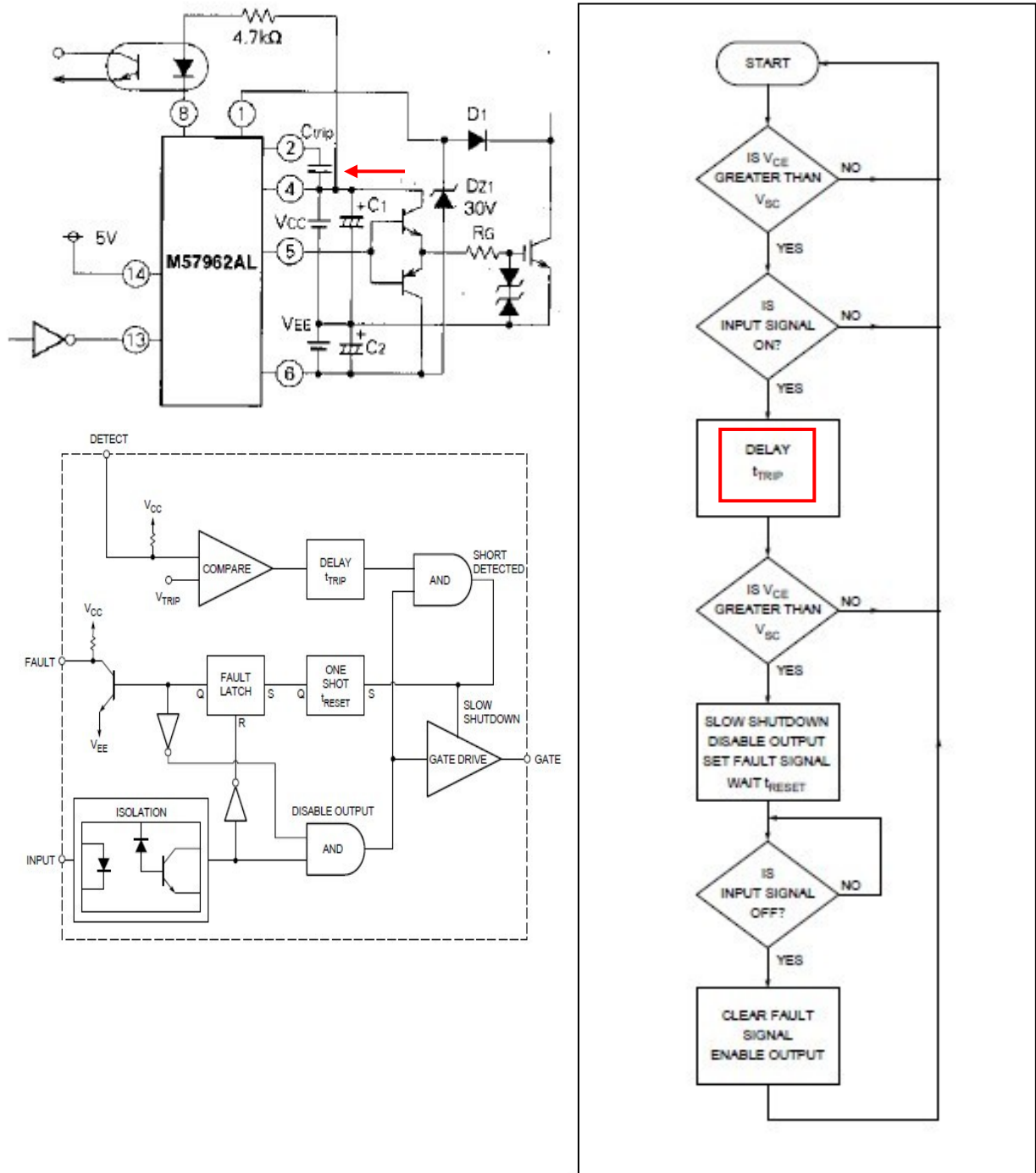


图 6

## 短路保护实验介绍

短路保护根据短路形式可以分为相间短路，相对地短路。但是无论哪种短路，要想有电流流过，就得构成回路，所以在设计短路保护的时候可以在回路的任何位置进行检测，当然效果也是不一样的。我们一般选择检测 Vce



电压，因为相对比较有效、可靠。

在变频器行业相间短路保护测试中，有分先短路后运行和先运行后短路。前者的短路状况比较单一，输出已经短路，待开通信号到来时，电流开始上升；后者状况则比较复杂，当系统已经运行的时候，短路的位置可以在工作周期的任意点，所以每一次短路出来的波形也相差很大。那么，哪种保护的电流会更大？经过在系统上测试，我们发现运行过程中的短路，电流可以冲得更高，原因是 IGBT 开通时短路，Vg 会被抬升得更大，而线性区的 Ic 主要受 Vg 影响。

$$I_{res} = C_{res} * dv/dt$$

$$\Delta V_g = I_{res} * (R_g + R_{int})$$

$$I_c = K(V_g - V_{th})^2$$

图 7 为在动态测试仪上测得的短路波形，我们发现 Isc 稳定上升后，被芯片自身限住。整个过程中，门极电压 Vg 并没有受到太大干扰。

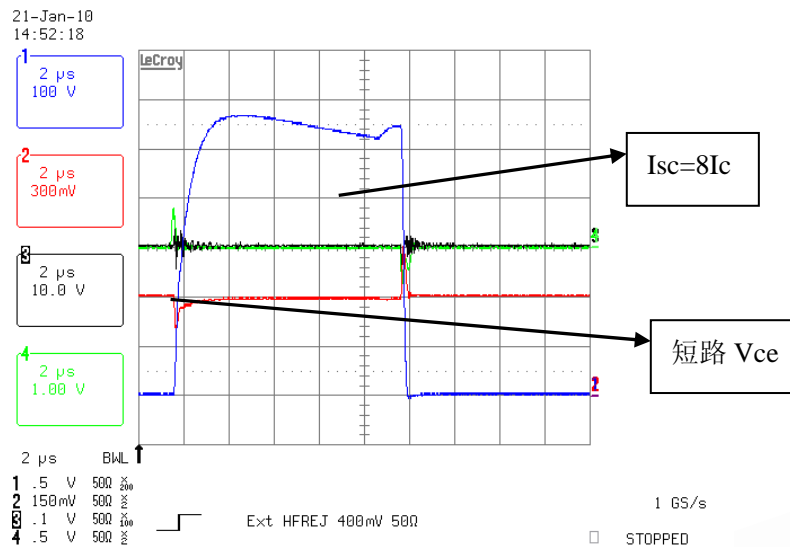


图 7

图 8 为 1200V/50A 模块在变频器上的短路波形。

- t1: dv/dt 持续影响 Vg; Isc 处于上升阶段，斜率受寄生负载电感 L 决定， $I_{sc} = K(V_g - V_{th})^2$
- t2: dv/dt 停止影响 Vg, Vg 下降，Isc 随 Vg 下降。
- t3: Vg 稳定，Isc 稳定。
- t4: IGBT 关断，Isc 减小， $V_{ce} = V_{dc} + di/dt * L_{bus}$ ，故有电压过冲。



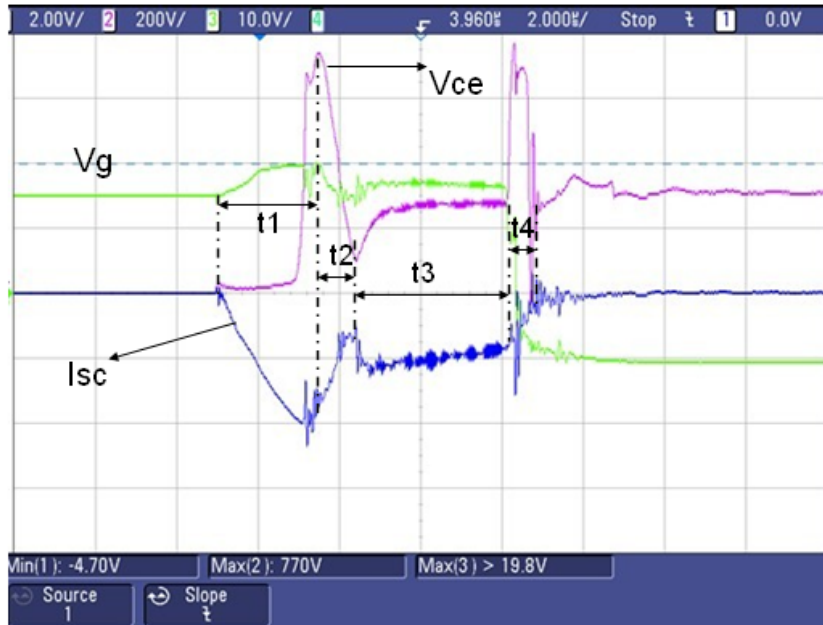


图 8

## 总结

总之，IGBT 作为功率回路的重要换流器件，一旦出现意外很有可能炸机，所以针对 IGBT 的保护尤其重要。IGBT 出现短路的几率并不是很大，但是如果出现短路却没有及时保护住，后果将是毁灭性的。理清 IGBT 短路保护原理及其工作模式，能够帮助你设计出合理的保护线路，既能够及时的保护住 IGBT，又不会影响系统正常工作。