

**Infineon**

# IGBT模块的损耗、温度和安全运行



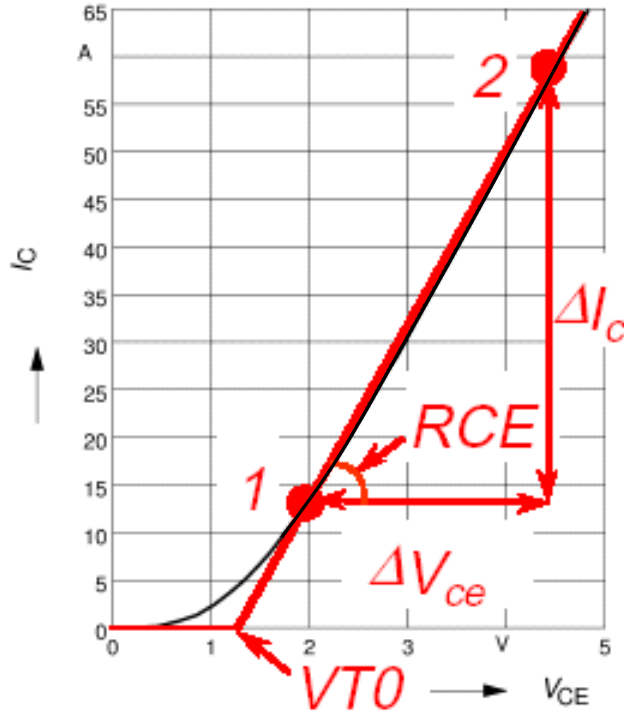
Never stop thinking

# IGBT模块的损耗

- IGBT模块的损耗源于内部IGBT和二极管（续流FWD、整流）芯片的损耗，主要是IGBT和FWD产生的损耗。
- IGBT不是一个理想开关，体现在：
  - 1) IGBT在导通时有饱和电压 -  $V_{cesat}$
  - 2) IGBT在开关时有开关能耗 -  $E_{on}$ 和 $E_{off}$这是IGBT产生损耗的根源。 $V_{cesat}$ 造成导通损耗， $E_{on}$ 和 $E_{off}$ 造成开关损耗。导通损耗 + 开关损耗 = IGBT总损耗。
- FWD也存在两方面的损耗，因为：
  - 1) 在正向导通（即续流）时有正向导通电压： $V_f$
  - 2) 在反向恢复的过程中有反向恢复能耗： $E_{rec}$ 。 $V_f$ 造成导通损耗， $E_{rec}$ 造成开关损耗。导通损耗 + 开关损耗 = FWD总损耗。
- $V_{cesat}$ ,  $E_{on}$ ,  $E_{off}$ ,  $V_f$ 和 $E_{rec}$ 体现了IGBT/FWD芯片的技术特征。因此IGBT/FWD芯片技术不同， $V_{cesat}$ ,  $E_{on}$ ,  $E_{off}$ ,  $V_f$ 和 $E_{rec}$ 也不同。

# IGBT模块的损耗-IGBT导通损耗

IGBT的 $V_{cesat}$ - $I_c$ 特性曲线



- $V_{cesat}$ 和 $I_c$ 的关系可以用左图的近似线性法来表示:

$$V_{cesat} = V_{t0} + R_{ce} \times I_c$$

- IGBT的导通损耗:

$$P_{cond} = d * V_{cesat} \times I_c, \text{ 其中 } d \text{ 为IGBT的导通占空比}$$

- IGBT饱和电压的大小，与通过的电流 ( $I_c$ )，芯片的结温 ( $T_j$ ) 和门极电压 ( $V_{ge}$ ) 有关。

- 模块规格书里给出了IGBT饱和电压的特征值:  $V_{CE, Sat}$ ，及测试条件。

- 英飞凌的IGBT模块规格书里给出了两个测试条件下的饱和电压特征值:

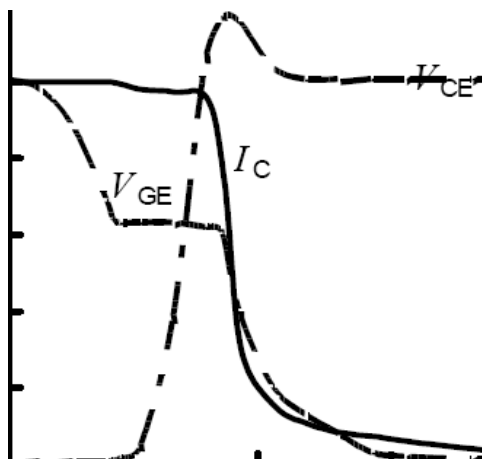
1)  $T_j=25^\circ\text{C}$ ; 2)  $T_j=125^\circ\text{C}$ 。电流均为  $I_{c, NOM}$  (模块的标称电流)， $V_{GE}=+15\text{V}$

# IGBT模块的损耗-IGBT开关损耗

IGBT开通瞬间



IGBT关断瞬间



- IGBT之所以存在开关能耗，是因为在开通和关断的瞬间，电流和电压有重叠期。

- 在Vce与测试条件接近的情况，Eon和Eoff可近似地看作与Ic和Vce成正比：

$$E_{on} = E_{ON} \times I_c / I_{c,NOM} \times V_{ce} / \text{测试条件}$$

$$E_{off} = E_{OFF} \times I_c / I_{c,NOM} \times V_{ce} / \text{测试条件}$$

- IGBT的开关损耗：

$$P_{sw} = f_{sw} \times (E_{on} + E_{off}) , f_{sw} \text{为开关频率。}$$

- IGBT开关能耗的大小与开关时的电流（Ic）、电压（Vce）和芯片的结温（Tj）有关。

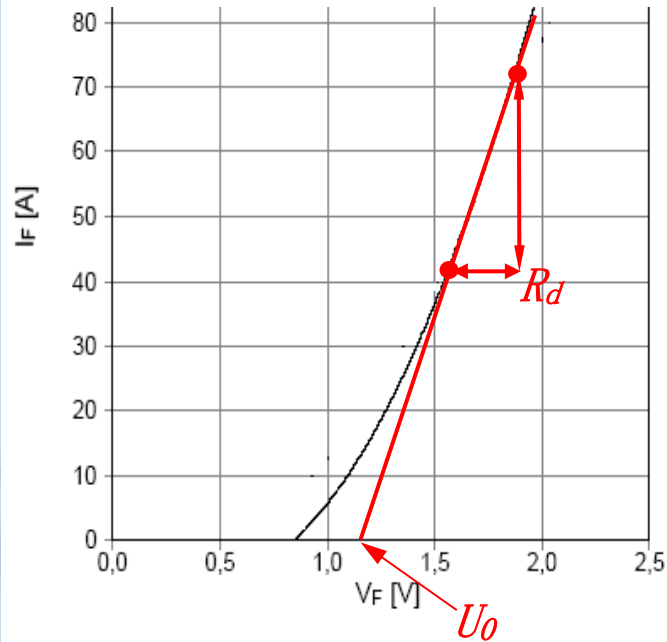
- 模块规格书里给出了IGBT开关能耗的特征值：EON, EOFF, 及测试条件。

- 英飞凌的IGBT模块规格书里给出了两个测试条件下的开关能耗特征值：

1) Tj=25°C; 2) Tj=125°C。电流均为Ic,NOM（模块的标称电流）。

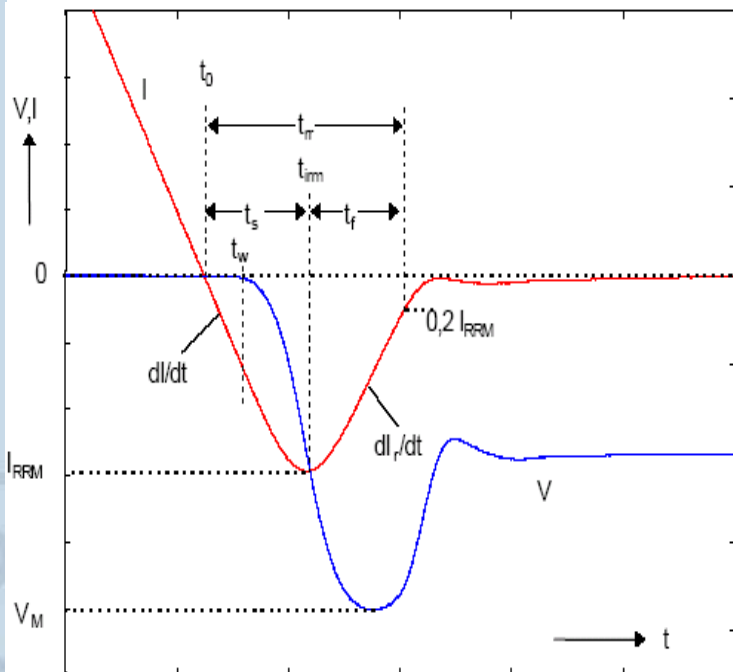
# IGBT模块的损耗-FWD导通损耗

FWD的 $V_f$ - $I_f$ 特性曲线



- $V_f$ 和 $I_f$ 的关系可以用左图的近似线性法来表示：  
 $V_f = U_0 + R_d \times I_f$
- FWD的导通损耗：  
 $P_f = d * V_f \times I_f$ , 其中 $d$ 为FWD的导通占空比
- 模块规格书里给出了FWD的正向导通电压的特征值： $V_F$ , 及测试条件。
- FWD正向导通电压的大小, 与通过的电流 ( $I_f$ ) 和芯片的结温 ( $T_j$ ) 有关。
- 英飞凌的IGBT模块规格书里给出了两个测试条件下的正向导通电压特征值：  
1)  $T_j=25^\circ\text{C}$ ; 2)  $T_j=125^\circ\text{C}$ 。电流均为 $I_{F,NOM}$  (模块的标称电流)。

## FWD的反向恢复



- 反向恢复是FWD的固有特性，发生在由正向导通转为反向阻断的瞬间，表现为通过反向电流后再恢复为反向阻断状态。
- 在 $V_r$ 与测试条件接近的情况， $E_{rec}$ 可近似地看作与 $I_f$ 和 $V_r$ 成正比：
 
$$E_{rec} = E_{REC} \times I_f / I_{F, NOM} \times V_r / \text{测试条件}$$
- FWD的开关损耗：
 
$$P_{rec} = f_{sw} \times E_{rec}$$
 $f_{sw}$ 为开关频率。
- FWD反向恢复能耗的大小与正向导通时的电流（ $I_f$ ）、电流变化率 $di/dt$ 、反向电压（ $V_r$ ）和芯片的结温（ $T_j$ ）有关。
- 模块规格书里给出了IGBT反向恢复能耗的特征值： $E_{REC}$ ，及测试条件。
- 英飞凌的IGBT模块规格书里给出了两个测试条件下的反向恢复能耗特征值：
  - 1)  $T_j=25^\circ\text{C}$ ；
  - 2)  $T_j=125^\circ\text{C}$ 。电流均为 $I_{F, NOM}$ （模块的标称电流）。

# IGBT模块的损耗-小结

## IGBT

### ■ 导通损耗:

- 1) 与IGBT芯片技术有关
- 2) 与运行条件有关: 与电流成正比, 与IGBT占空比成正比, 随 $T_j$ 升高而增加。
- 3) 与驱动条件有关: 随 $V_{ge}$ 的增加而减小

### ■ 开关损耗

- 1) 与IGBT芯片技术有关
- 2) 与工作条件有关: 与开关频率、电流、电压成正比, 随 $T_j$ 升高而增加。
- 3) 与驱动条件有关: 随 $R_g$ 的增大而增大, 随门极关断电压的增加而减小。

## FWD

### ■ 导通损耗:

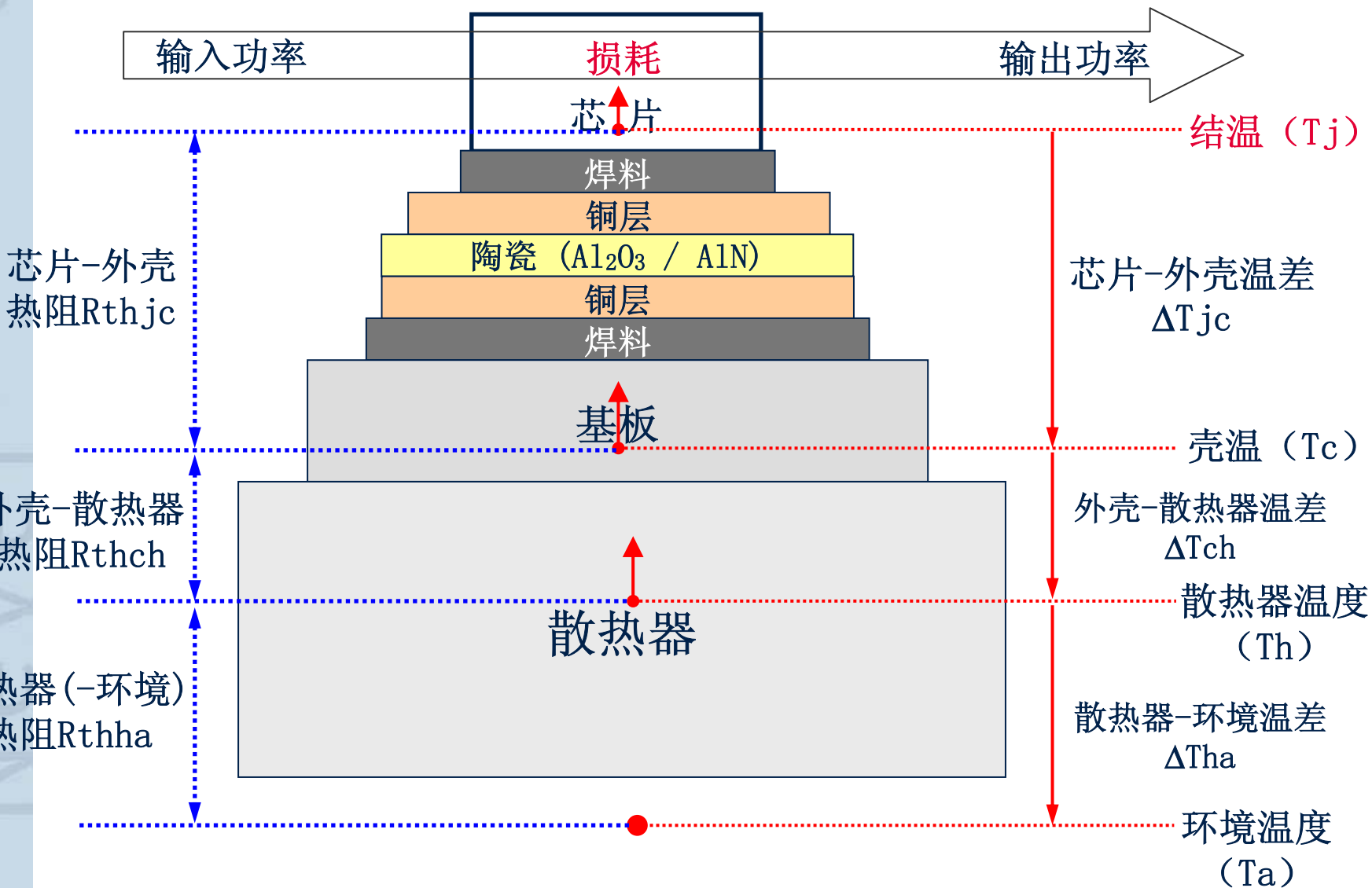
- 1) 与FWD芯片技术有关
- 2) 与工作条件有关: 与电流成正比, 与FWD占空比成正比。

### ■ 开关损耗

- 1) 与FWD芯片技术有关
- 2) 与工作条件有关: 与开关频率、电流、电压成正比, 随 $T_j$ 升高而增加。

# IGBT模块的温度

$$T_j = \Delta T_{jc} + \Delta T_{ch} + \Delta T_{ha} + T_a$$





# IGBT模块的温度

## 温差 (平均值) 和热阻

$$R_{thjc} = \Delta T_{jc} \div \text{损耗}$$

$$R_{thch} = \Delta T_{ch} \div \text{损耗}$$

$$R_{thha} = \Delta T_{ha} \div \text{损耗总和}$$

$$\text{或 } R_{thha1,2} = \Delta T_{ha} \div \text{损耗}_{1,2}$$

## 模块规格书给出:

$R_{thjc}$  per IGBT (每个IGBT开关)

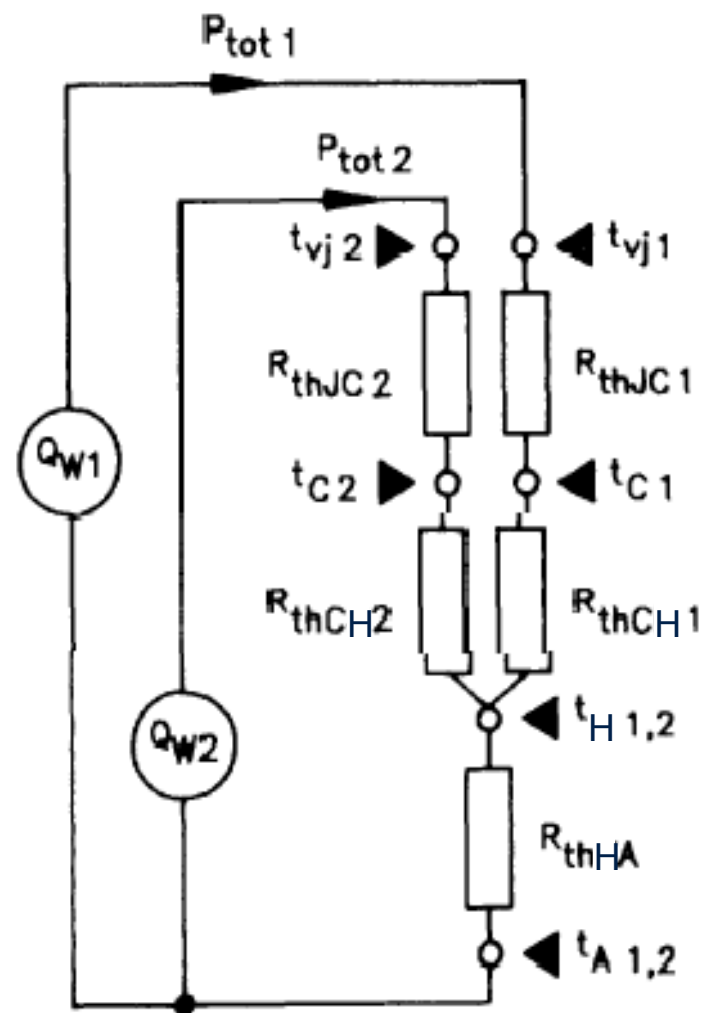
$R_{thjc}$  per FWD (每个FWD开关)

$R_{thch}$  per IGBT (每个IGBT开关)

$R_{thch}$  per FWD (每个FWD开关)

或  $R_{thch}$  per module (每个模块)

IGBT/FWD芯片尺寸越大,  $R_{thjc}$ 值越小; 模块尺寸越大,  $R_{thch}$ 值越小; 散热器越大,  $R_{thha}$ 值越小。



热阻模型 (稳态)

# IGBT模块的温度

Rthch值的换算:  $R_{thch} \text{ per arm} = R_{thch} \text{ per module} \times n$

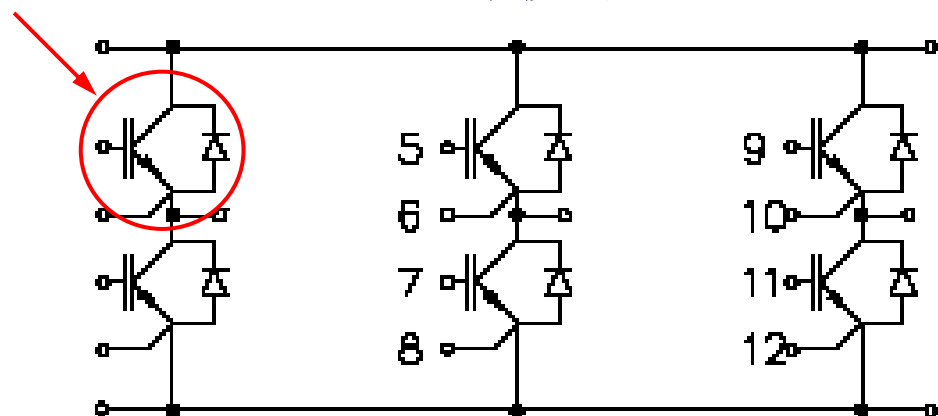
$$R_{thch} \text{ per arm} = R_{thch\_IGBT} // R_{thch\_FWD}$$

Rthha值的换算:  $R_{thha} \text{ per arm} = R_{thha} \times n$

其中arm是一个桥臂单元 (IGBT+FWD), n是模块内的桥臂单元数

一个桥臂单元

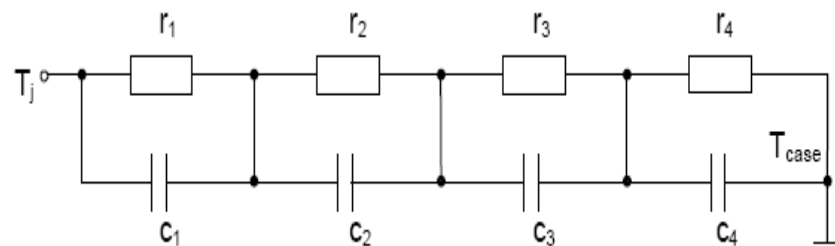
一个模块



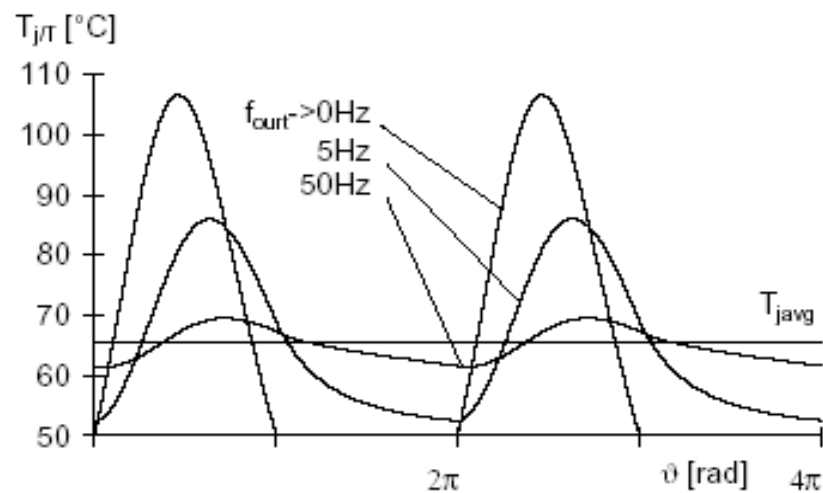
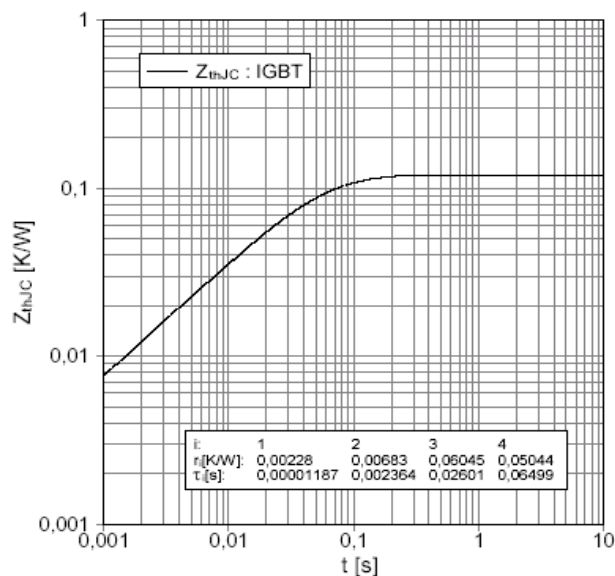
对于含整流桥的PIM, Rthch的换算可以按Rthjc之间的比例来算。

# IGBT模块的温度

- 当损耗以周期性脉冲形式（方波/正弦半波）存在时，模块表现出热容性，可用瞬态热阻抗 $Z_{thjc}$ 来表示。
- $Z_{thjc}$ 是一个时间变量（瞬态损耗持续的时间）。时间越长， $Z_{thjc}$ 值越大。 $Z_{thjc}$ 的最大值就是 $R_{thjc}$ 。
- 结温 $T_j$ 的波动幅度与 $Z_{thjc}$ 有关， $Z_{thjc}$ 值越大， $T_j$ 的波动幅度就越大。



瞬态热阻抗模型



仿真结果：变频器输出频率不同时，对应的IGBT结温。

## IGBT模块的温度-小结

- IGBT模块各个部分的温差 $\Delta T$ 取决于
  - 1) 损耗（芯片技术、运行条件、驱动条件）；
  - 2) 热阻（模块规格、尺寸）
- 模块芯片的结温是各部分的温差和环境温度之和：
$$T_j = \Delta T_{jc} + \Delta T_{ch} + \Delta T_{ha} + T_a$$
如果假设壳温 $T_c$ 恒定，则 $T_j = \Delta T_{jc} + T_c$ ；  
如果假设散热器温度 $T_h$ 恒定，则 $T_j = \Delta T_{jh} + T_h$ 。
- IGBT的平均结温取决于平均损耗、 $R_{thjc}$ 和壳温 $T_c$ 。
- 在实际运行时，IGBT的结温是波动的，其波动幅度取决于瞬态损耗和 $Z_{thjc}$ ，而 $Z_{thjc}$ 又和运行条件（如变频器输出频率）有关。
- IGBT的峰值结温为平均结温+波动幅值。

### 结论：

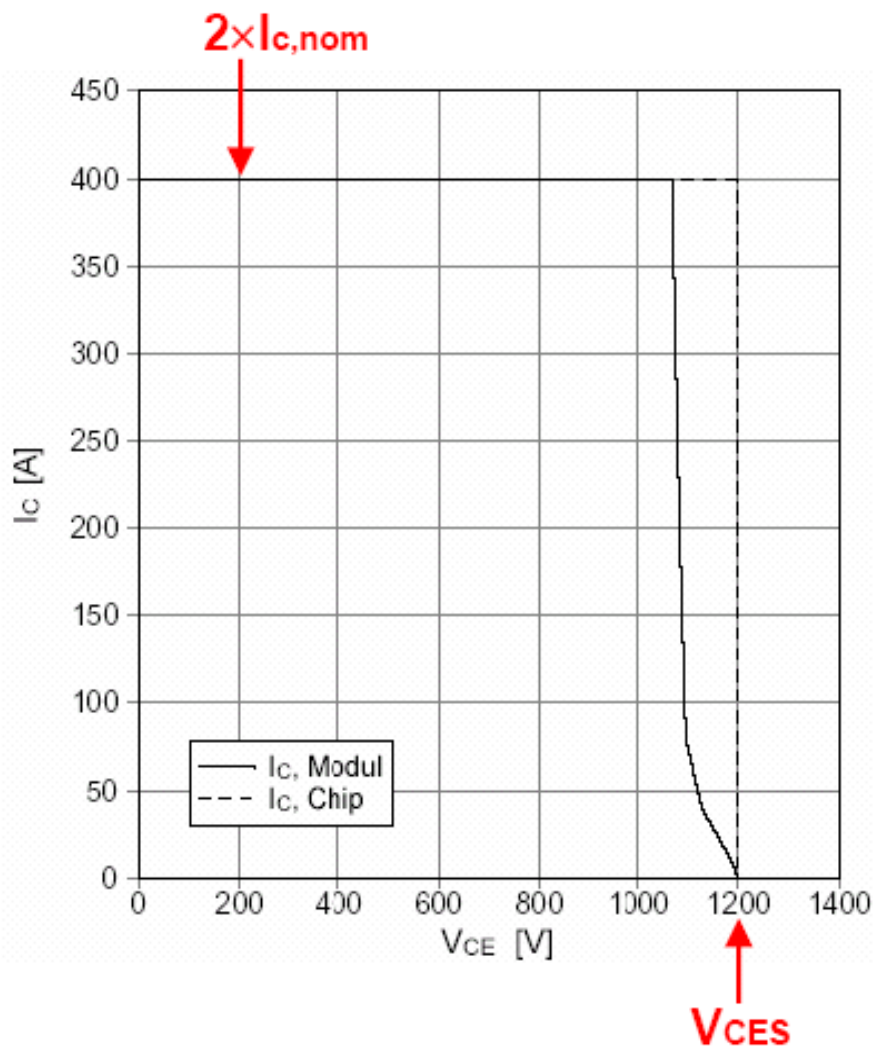
IGBT的结温（平均/峰值）和芯片技术、运行条件、驱动条件、IGBT规格、模块尺寸、散热器大小和环境温度有关。

# IGBT模块的安全运行

## 安全运行的基本条件:

- 温度: IGBT结温峰值  $T_{j\_peak} \leq 125^{\circ}\text{C}$  ( $150^{\circ}\text{C}^*$ )  
模块规格书给出了两个IGBT最高允许结温:  
 $T_{jmax} = 150^{\circ}\text{C}$  ( $175^{\circ}\text{C}^*$ ) - 指无开关运行的恒导通状态下;  
 $T_{vj(max)} = 125^{\circ}\text{C}$  ( $150^{\circ}\text{C}^*$ ) - 指在正常的开关运行状态下。  
 $T_{vj(max)}$ 规定了IGBT关断电流、短路、功率交变 (PC) 所允许的最高结温。  
\* 600V IGBT3; 1200V和1700V IGBT4; 3300V IGBT3
- 电压:  $V_{ce} \leq V_{CES}$  (即IGBT的电压规格)  
 $V_{ge} \leq V_{GES}$  ( $\pm 20\text{V}$ )
- 电流: 由RBSOA规定了在连续开关工作条件下, 不超过 $2 \times I_{C,NOM}$ 。  
规格书中的RBSOA定义了IGBT所允许关断的最大电流。

# IGBT模块的安全运行



RBSOA of A 200A/1200V IGBT Module

- **RBSOA** – **R**everse **B**iased **S**afe **O**peration **A**rea, is defined for IGBT turning-off.
- For continuous switching operation, IGBT is able to switch off current  $\leq 2 \times I_{c,nom}$ .
- Continuously switching current  $> 2 \times I_{c,nom}$  can lead to IGBT failure (latch-up).
- In any case, it must be guaranteed that  $V_{ce\_chip} \leq V_{ces}$  (dash line).
- Due to the stray inductance ( $L_s$ ) between the module terminals and chip, it must be guaranteed that  $V_{ce\_terminals} \leq V_{ces} - di_c/dt \times L_s$  (solid line).