

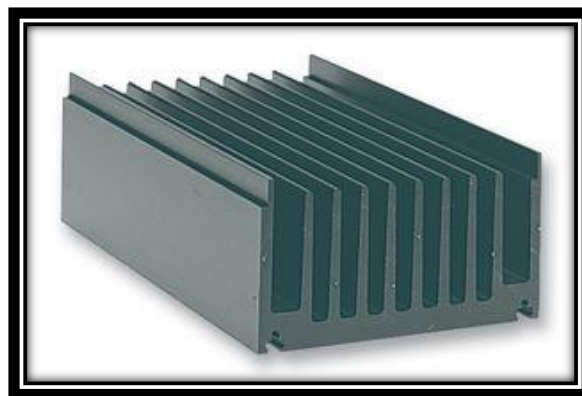
Dimensionnement des dispositifs de refroidissement des composants de puissance

Note d'application

23/01/2014



Projet P13A02 : Conception d'une interface de puissance



Client : **M. WALGER** – Ingénieur chez Renesas Electronics

Responsable projet : **M. JAMES**

Tuteur industriel : **M. FICKINGER**

Table des matières

1. Introduction.....	2
2. La transmission de chaleur.....	2
a. La conduction	2
b. La convection.....	3
c. Le rayonnement	3
3. Évaluation de la puissance dissipée par les IGBT	3
a. Calcul des pertes par conduction (transistor)	4
b. Calcul des pertes par conduction (diode).....	4
c. Calcul des pertes par commutation (transistor)	5
d. Calcul des pertes par commutation (diode).....	5
e. Puissance dissipée totale.....	5
4. Évaluation de la résistance thermique du dissipateur	6
5. Choix du dissipateur thermique	6
6. Conclusion	8

1. Introduction

L'un des éléments à déterminer lors de la conception d'un convertisseur de puissance, est le choix du dissipateur thermique. Un semi-conducteur parcouru par un courant sous une tension donnée, est amené à s'échauffer et à dissiper de la chaleur par effet Joule. Le but d'un dissipateur est de préserver l'intégrité thermique du semi-conducteur en augmentant la surface de contact avec l'air ambiant. Ainsi, l'évacuation de la chaleur est améliorée en facilitant les échanges thermiques, et l'on peut rendre encore plus efficace l'échange thermique en mettant en place des systèmes de refroidissement supplémentaire sur le dissipateur.

Le dissipateur doit être mécaniquement et thermiquement en contact avec le boîtier du composant. Si la température du semi-conducteur dépasse sa valeur critique, son intégrité thermique n'est plus assurée, il risque alors d'être détruit.

Nous verrons dans cette note d'application le dimensionnement du dissipateur thermique d'un onduleur composés de six transistors IGBT (*RJH60D7BDPQ-E0* Renesas) parcouru par un courant de 50A et une tension de 50V.

2. La transmission de chaleur

La chaleur se déplace toujours du corps le plus chaud vers un corps plus froid. Elle peut s'échanger avec le milieu ambiant de plusieurs manière : par conduction, par convection ou par rayonnement.

a. La conduction

La transmission de chaleur par conduction se fait par contact direct entre deux éléments ou par propagation à l'intérieur d'un même matériau. Par exemple entre le dissipateur et le boîtier du composant ou à l'intérieur du dissipateur, la transmission se fait par conduction.

Dans notre cas, le composant est doté d'une plaque en métal sur une de ses faces pour conduire la chaleur vers l'extérieur et faciliter l'échange thermique avec un dissipateur. Cette plaque en métal est reliée au collecteur de l'IGBT. Il faudra prévoir une isolation électrique, pour ne pas



Figure 1 - La semelle métallique de l'IGBT connectée au collecteur



Figure 2 - Schéma contact entre deux pièces de métal

créer de court-circuit entre les transistors fixés sur le dissipateur. En effet, le dissipateur est, le plus souvent, en aluminium, un matériau thermiquement et électriquement conducteur. Cette isolation doit garantir une bonne conductivité thermique entre le composant et le dissipateur métallique. Elle prend la forme d'une mince feuille en silicone ou en polymère. Elle permet d'améliorer le contact thermique entre les deux pièces de métal, car

le métal n'est pas parfaitement plat ([Figure 2](#)). Pour améliorer la conduction thermique on peut utiliser de la pâte thermique, mais elle n'a pas de propriété d'isolation électrique.

b. La convection

La transmission de chaleur par convection se produit entre un gaz (ou un liquide) et un solide. Par exemple entre un radiateur et l'air ambiant. La convection est dans ce cas naturelle. L'air s'échauffe au contact des parois du radiateur (ou du dissipateur) mais plus l'air monte en température, moins l'échange de chaleur est efficace. Il est possible d'améliorer la transmission thermique en accélérant la vitesse de passage de l'air au contact des parois du radiateur, à l'aide d'un ventilateur. On parle de convection forcée.

Pour calculer le flux thermique transmis par convection Q (en Watt) sur une paroi avec une surface S et une différence de température (t_2-t_1) on a : **$Q = S.\alpha.(t_2-t_1)$** Avec α le coefficient de convection et il a comme unité ($W.K^{-1}.m^{-2}$). Ce coefficient varie avec la nature de la surface et la vitesse du fluide.

c. Le rayonnement

La transmission de chaleur par rayonnement, c'est l'échange de chaleur émise par la radiation d'un corps chaud sur un corps froid. Le cas le plus simple est la chaleur transmise par le soleil. L'échange de chaleur se fait par émission d'onde électromagnétique, il ne nécessite pas d'un milieu matériel. Le flux thermique est proportionnel à la température du corps rayonnant et à son émissivité (d'après la loi Stefan-Boltzmann). L'émissivité est une valeur sans unité, comprise entre 0 et 1, qui indique la capacité d'un matériau à émettre de l'énergie par rayonnement. Un corps noir idéal a une valeur de 1. C'est pour cela que dans le cas des dissipateurs on choisit très souvent l'aluminium anodisé noir qui a une très bonne émissivité ($\epsilon \approx 0,98$) et donc, un bon matériau pour capter la chaleur rayonnée.

3. Évaluation de la puissance dissipée par les IGBT

Les pertes par effet Joule sont données par le produit de la chute de tension v aux bornes du composant et le courant i qui le parcourt sur une période T du cycle de fonctionnement.

$$P(t) = \frac{1}{T} \int_0^T v(t).i(t).dt$$

Pour faciliter les calculs, on découpe ces pertes par les pertes par conduction (fonctionnement statique du composant) et les pertes par commutation (lors des changements d'état). Ces IGBT intègrent une diode en antiparallèle (dit aussi de « roue-libre ») que l'on devra prendre en compte dans nos calculs de puissance dissipée. Lors de

l'évaluation on calculera les pertes dans la diode et dans le transistor. Nous allons évaluer la puissance dissipée dans un seul IGBT.

a. Calcul des pertes par conduction (transistor)

Les pertes par effet Joule par conduction dans le transistor, sont données par le produit de la tension saturée V_{CEsat} et du courant moyen I_{Cmoy} .

$$P_{conT} = V_{CEsat} \cdot I_{Cmoy}$$

D'après la feuille de donnée de l'IGBT ([Tableau 1](#)), nous avons un V_{CEsat} le plus contraignant de 2,2V. Le courant moyen parcouru par le transistor I_{Cmoy} est évalué aux alentours de 20A.

D'où $P_{conT} = 44W$

Collector to emitter saturation voltage	$V_{CE(sat)}$	—	1.6	2.2	V	$I_C = 50 \text{ A}, V_{GE} = 15 \text{ V}$ ^{Note3}
Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	—	60	—	ns	$V_{CC} = 300 \text{ V}$
Rise time	t_r	—	50	—	ns	$V_{GE} = 15 \text{ V}$
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$	—	180	—	ns	$I_C = 50 \text{ A}$
Fall time	t_f	—	50	—	ns	$R_g = 5 \Omega$ (Inductive load)

Notes: 3. Pulse test

Tableau 1 - Extrait de la feuille de donnée de l'IGBT

b. Calcul des pertes par conduction (diode)

Les pertes par effet Joule dans la diode de l'IGBT sont données par cette équation :

$$P_{conD} = V_F \cdot I_{Fmoy} + R_d \cdot I_{Feff}^2$$

La tension de la diode V_F est indiquée dans la feuille de donnée de l'IGBT ([Tableau 2](#)). Le courant moyen dans la diode I_{Fmoy} est évalué à 5A et le courant efficace I_{Feff} à 9A. Le R_d est par déduction des caractéristiques de $0,1\Omega$; $R_d = V_F / I_F$.

D'où $P_{conD} = 23W$

FRD forward voltage	V_F	—	2.5	3.0	V	$I_F = 30 \text{ A}$ ^{Note3}
FRD reverse recovery time	t_{rr}	—	25	—	ns	$I_F = 30 \text{ A}$
FRD reverse recovery charge	Q_{rr}	—	32	—	μC	$di_F/dt = 100 \text{ A}/\mu s$
FRD peak reverse recovery current	I_{rr}	—	1.5	—	A	

Notes: 3. Pulse test

Tableau 2 - Extrait de la feuille de données de l'IGBT donnant les caractéristiques de la diode

c. Calcul des pertes par commutation (transistor)

Les pertes par commutation dans le transistor sont données par cette équation :

$$P_{comT} = \frac{1}{2} \cdot V_{CE} \cdot I_{Cmax} \cdot (t_r + t_f) \cdot F$$

La tension V_{CE} est de 50V, I_{Cmax} de 50A, et la fréquence de commutation F est de 20kHz dans notre cas.

Le temps de montée et de descente est d'après un test très défavorable de 120ns (Figure 3).

D'où $P_{comT} = 3W$

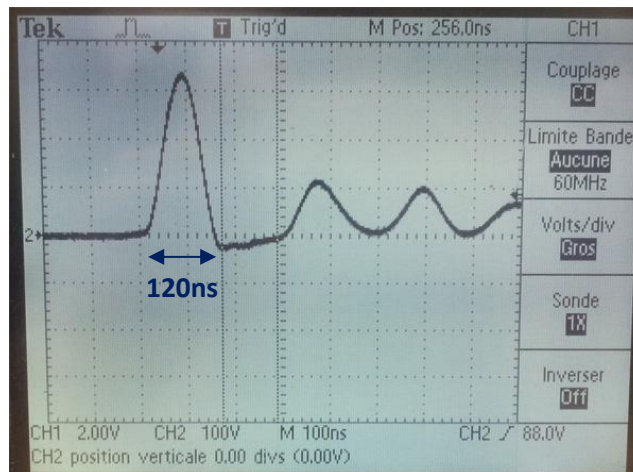


Figure 3 - Signal de la tension à l'ouverture de l'IGBT relevé par l'oscilloscope

d. Calcul des pertes par commutation (diode)

Les pertes par commutation dans la diode sont données par l'équation suivante :

$$P_{comD} = Q_{rr} \cdot V_F \cdot F$$

La charge électrique Q_{rr} et V_F sont données dans le [Tableau 2](#), et la fréquence F est toujours de 20kHz.

D'où $P_{comD} = 2W$

e. Puissance dissipée totale

Il ne reste plus qu'à évaluer les pertes totales :

$$P_T = P_{conT} + P_{comT} = 47W$$

$$P_D = P_{conD} + P_{comD} = 25W$$

$$P_c = P_T + P_D = 72W$$

Les pertes par effet Joule totales d'un IGBT est de **72W**.

4. Évaluation de la résistance thermique du dissipateur

La résistance thermique maximale est déterminée pour que la température de jonction du semi-conducteur ne soit pas destructrice. Cette température est de 150°C dans notre cas (**Tableau 3**). On la note T_j et on note T_{amb} la température ambiante maximale. La résistance thermique minimale est déterminée par la formule suivante :

$$T_j > (R_{Th} + R_{j-b} + R_{b-d}) \cdot P_c + T_{amb}$$

$$R_{Th} \leq \frac{T_j - T_{amb}}{P_c} - (R_{j-b} + R_{b-d})$$

Avec R_{j-b} la résistance thermique entre la jonction et le boîtier, et R_{b-d} la résistance thermique entre le boîtier et le dissipateur thermique.

$$R_{Th} \leq \frac{150 - 25}{72} - (0,42 + 0,2)$$

$$R_{Th} \leq 1,12 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

La résistance thermique calculée pour un transistor doit être inférieure à **1,12°C/W**.

Junction to case thermal resistance (IGBT)	θ_{j-c} ^{Note2}	0.42	°C/W
Junction to case thermal resistance (Diode)	θ_{j-cd} ^{Note2}	1.1	°C/W
Junction temperature	T_j	150	°C
Storage temperature	T_{stg}	-55 to +150	°C

Notes: 1. $PW \leq 10 \mu s$, duty cycle $\leq 1\%$

2. Value at $T_c = 25^\circ\text{C}$

Tableau 3 - Caractéristique thermique de l'IGBT

5. Choix du dissipateur thermique

La résistance thermique maximale permet de déterminer le dissipateur. Il y a d'autres facteurs à prendre en compte comme l'encombrement volumique et massique ainsi que le prix. On peut se fabriquer soit même son dissipateur, ou bien acheter chez un revendeur, des dissipateurs.

Lorsque l'on achète un dissipateur thermique, le fabricant nous fournit une fiche technique avec des courbes pour évaluer la résistance thermique en fonction de la longueur du dissipateur (**Figure 5**). Dans notre cas, on peut remarquer que l'on aura une longueur du dissipateur aux alentours de 120mm s'il est anodisé de noir (**Figure 4**), ou de 160mm sinon, pour avoir une résistance thermique inférieure à 1 °C/W.



Figure 4 - Dissipateur thermique en aluminium anodisé noir

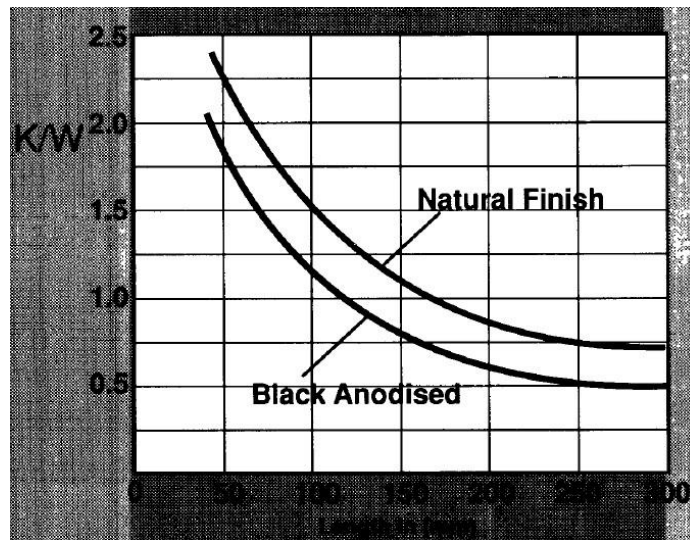


Figure 5 - Courbes de résistance thermique du dissipateur

Il existe de nombreux type de dissipateur qui varie en fonction de leur performance (dissipateur pour module, pour composant discret, pour composant pressé). Et il existe aussi de nombreux profils très diversifié suivant l'intégration à l'application.

On peut aussi associer au dissipateur une aide supplémentaire à l'échange thermique. Il rajoute un facteur de réduction de la résistance thermique du dissipateur passif. Il existe plusieurs systèmes. Notamment la ventilation forcée à l'aide d'un ventilateur qui ajoute un facteur correctif en fonction de la vitesse de l'air ambiant (Figure 6). Il existe plusieurs types de ventilateur suivant les performances désirées, la topologie de l'application, le coût. Les ventilateurs axiaux sont les plus connus. Les ventilateurs tangentiels sont les mieux adaptés aux dissipateurs de type « peigne ». Et les ventilateurs centrifuges généralement intégrés dans les montages mécaniques où le flux de l'air est guidé.

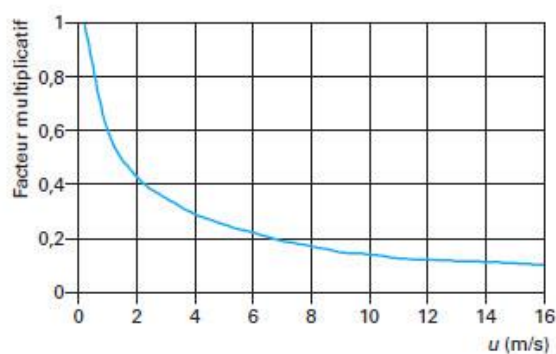


Figure 6 - Facteur correctif en fonction de la vitesse de l'air

Comme autre aide, nous avons les caloducs qui transportent la chaleur grâce au principe du transfert thermique par transition de phase d'un fluide. Nous avons aussi le refroidissement à l'eau, qui transporte la chaleur grâce au liquide caloporteur qui est un mélange d'eau, et d'additif qui ont pour but, par exemple, d'éviter la formation d'algue ou d'abaisser la température de l'eau (antigel). Ce dernier système est le plus performant, pouvant atteindre une résistance thermique de l'ordre de $0,005 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$, mais est encombrant à cause du stockage de l'eau.

6. Conclusion

La dissipation de chaleur des composants de puissance est un point important pour préserver leur intégrité thermique et que l'application continue d'être fonctionnelle. La forte puissance dissipée par nos transistors de puissance, oblige de mettre en place un important dissipateur thermique, dont le volume peut poser problème. Il est possible cependant d'opter pour un système d'aide à l'échange thermique pour augmenter la performance d'un dissipateur.