

Aucun document n'est autorisé – Calculatrice autorisée – Durée : 1h
Auteur : Arnaud Gaillard

Cette partie concerne l'étude thermique des modules PALIX utilisés pour la réalisation des convertisseurs (onduleurs) de la chaîne de traction du TGV POS.

Les modules de puissance font partie de la gamme « PALIX » et sont identiques à ceux qui équipent certaines locomotives électriques et Diesel récentes construites par ALSTOM. Leur technologie est largement répandue et éprouvée. Ces modules sont constitués à partir d'une plaque métallique sur laquelle sont disposés les IGBT de calibre 3300V / 1200 A en boîtier standard européen type E2 (Voir Figure 1).

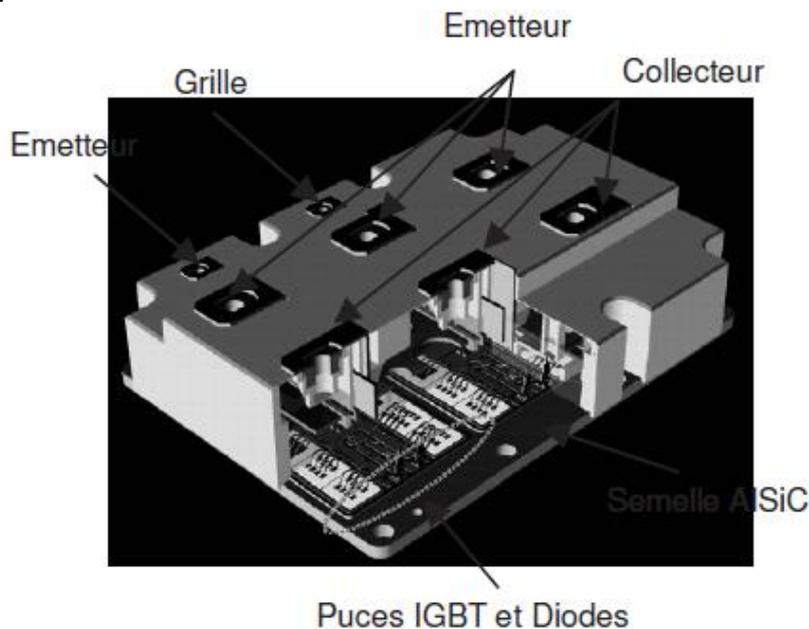


Figure 1 : IGBT 3300V / 1200 A en boîtier E2

Dans un module PALIX, la connexion entre chaque composant et les condensateurs de filtrage est assurée par des « bus-bars » faiblement inductifs qui limitent la surtension à chaque commutation. Ce type de module est configurable en une fonction onduleur, ou hacheur par exemple en jouant simplement sur le nombre d'IGBT et sur le choix du « bus-bar » pour réaliser les connexions utiles. Le module présenté à la Figure 2 est l'onduleur triphasé complet, associé à un essieu, capable d'alimenter le moteur de traction de 1200kW.



Figure 2 : Vues d'un module de type « PALIX », à gauche, vue côté connexions au circuit d'eau, à droite, vue côté « bus bar » (Document Alstom).

Chaque plaque métallique peut recevoir jusqu'à six modules IGBT et est constituée d'un serpentin parcouru par un liquide caloporteur à base d'eau glycolée qui assure le refroidissement des composants de puissance (Figure 3).

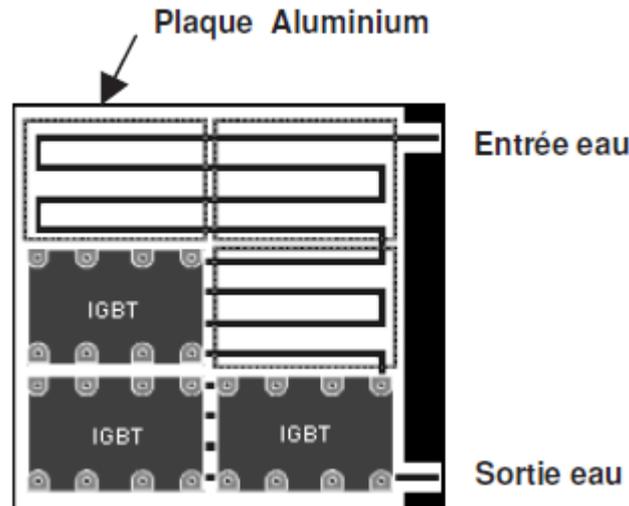


Figure 3 : principe de refroidissement des modules IGBT. Détail de la plaque froide. (Document Alstom)

Le circuit de refroidissement spécifique à chaque bloc moteur comprend un vase d'expansion, une pompe qui assure la circulation de l'eau avec un débit de l'ordre de $5\text{m}^3/\text{h}$, un échangeur air-eau ventilé, et enfin les modules de puissance à refroidir.

Partie 1 : Détermination des pertes dans une cellule de commutation de type onduleur de tension MLI.

Dans cette partie, pour la commande en Modulation de Largeur d'Impulsion à fréquence fixe, les notations sont les suivantes :

- f_c : fréquence de commutation des interrupteurs.
- ω_c : pulsation de commutation des interrupteurs. ($\omega_c = 2.\pi.f_c$).
- T_c : période de commutation des interrupteurs. ($T_c = 1/f_c$).
- f : fréquence du signal modulant.
- ω : pulsation du signal modulant. ($\omega = 2.\pi.f$).
- T : période du signal modulant. ($T = 1/f$).

La Figure 4 présente une cellule de commutation où les interrupteurs K1 et K2 sont constitués par des modules IGBT de puissance (Transistor et Diode).

Les transistors T1 et T2 sont commandés de manière complémentaire, on note α , le rapport cyclique de la commande du transistor T1.

Le rapport cyclique est modulé sinusoidalement en basse fréquence : $\alpha = \frac{1}{2}(1 + m_a.\sin(\omega t))$.

m_a est la profondeur de modulation du rapport cyclique ($0 < m_a < 1$).

La tension d'entrée de la cellule E est supposée constante. ($E = 1800\text{ V}$).

Le courant de sortie de la cellule est supposé sinusoidal et déphasé par rapport au signal modulant :

$$i_s(t) = \hat{I}_s.\sin(\omega t - \varphi)$$

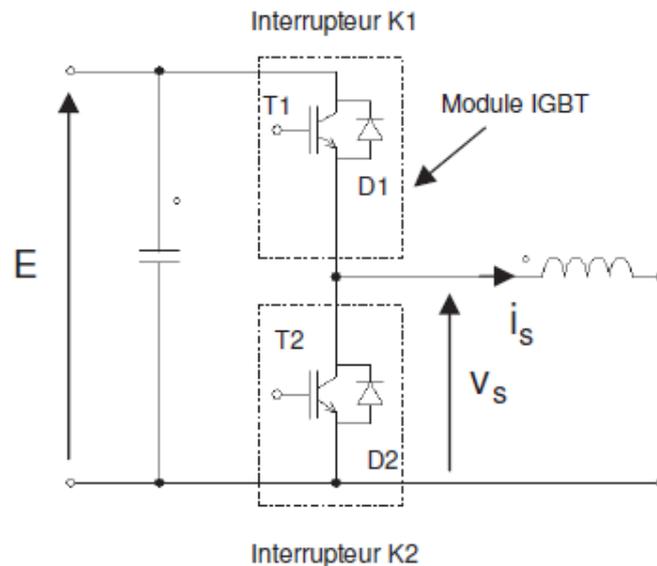


Figure 4 : Cellule de commutation constituée de 2 modules IGBT.

Pour établir l'expression des pertes dans les diodes et les transistors, on considère que la fréquence de commutation des interrupteurs est très grande devant la fréquence du signal modulant ($f_c \gg f$). Ainsi, à l'échelle d'une période de commutation, on peut considérer α et i_s comme constant.

Pour permettre le calcul des pertes en conduction et en commutation dans les interrupteurs, le fabricant des modules IGBT 3300 V / 1200 A donne les paramètres suivants :

Transistor :

Caractéristique statique à l'état passant : $V_{T0} = 1,4 \text{ V}$; $r_T = 2,2 \text{ m}\Omega$.

Energie en commutation (amorçage + blocage), pour $E = 1800 \text{ V}$, exprimée en Joules et en fonction du courant commuté i exprimé en Ampères :

$$E_{sw} = a_{sw} \cdot i^2 + b_{sw} \cdot i + c_{sw} \text{ avec } a_{sw} = 357 \cdot 10^{-9}, b_{sw} = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ et } c_{sw} = 457 \cdot 10^{-3}.$$

Diode :

Caractéristique statique à l'état passant : $V_{D0} = 0,83 \text{ V}$; $r_D = 1,46 \text{ m}\Omega$.

Energie en commutation (recouvrement), pour $E = 1800 \text{ V}$, exprimée en Joules et en fonction du courant commuté i exprimé en Ampères :

$$E_{rec} = a_{rec} \cdot i^2 + b_{rec} \cdot i + c_{rec} \text{ avec } a_{rec} = -3,45 \cdot 10^{-7}, b_{rec} = 1,45 \cdot 10^{-3} \text{ et } c_{rec} = 285 \cdot 10^{-3}.$$

Expression des pertes dans les composants à l'échelle d'une période de commutation.

On suppose que $i_s(t) > 0$ et constant à l'échelle d'une période de commutation ; $i_s = +i$.

- 1) Etablir pour T1 et D2, en fonction de α et i , l'expression du courant moyen et efficace à l'échelle d'une période de commutation.
- 2) A partir des paramètres correspondant aux caractéristiques à l'état passant, établir pour T1 et D2, l'expression des pertes en conduction à l'échelle d'une période de commutation.
- 3) Donner pour T1 et D2, en fonction de i , l'expression des pertes en commutation à l'échelle d'une période de commutation.

Expression des pertes dans les composants à l'échelle d'une période du signal modulant.

Sur une période basse fréquence, le rapport cyclique est modulé et le courant i_s évolue sinusoidalement. Lorsque i_s est positif, T1 et D2 dissipent de l'énergie, lorsque i_s est négatif D1 et T2 dissipent de l'énergie. Pour effectuer les calculs des questions 4 à 7, on posera $\theta = \omega.t$ et on justifiera le choix de l'intervalle d'intégration.

On rappelle les résultats mathématiques suivants :

$$\int_{\varphi}^{\pi+\varphi} \sin\theta \cdot \sin(\theta - \varphi) d\theta = \frac{\pi}{2} \cdot \cos\varphi ; \int_{\varphi}^{\pi+\varphi} \sin^2(\theta - \varphi) d\theta = \frac{\pi}{2}$$

$$\int_{\varphi}^{\pi+\varphi} \sin\theta \cdot \sin^2(\theta - \varphi) d\theta = \frac{4}{3} \cdot \cos\varphi ; \int_{\varphi}^{\pi+\varphi} \sin(\theta - \varphi) d\theta = 2$$

- 4) Etablir pour T1, en fonction de m_a , \hat{I}_s , φ et des paramètres des caractéristiques à l'état passant, l'expression des pertes en conduction à l'échelle d'une période basse fréquence.
- 5) Etablir pour D2, en fonction de m_a , \hat{I}_s , φ et des paramètres des caractéristiques à l'état passant, l'expression des pertes en conduction à l'échelle d'une période basse fréquence.
- 6) Etablir pour T1, en fonction de \hat{I}_s et des paramètres de l'énergie dissipée en commutation, l'expression des pertes en commutation à l'échelle d'une période basse fréquence.
- 7) Etablir pour D2, en fonction de \hat{I}_s et des paramètres de l'énergie dissipée au recouvrement, l'expression des pertes en commutation à l'échelle d'une période basse fréquence.

Partie 2 : Étude thermique d'un module PALIX onduleur de traction.

Le schéma thermique nodal d'un module IGBT et d'une plaque de refroidissement d'un module PALIX est donné à la figure ci-après. La température de l'eau de refroidissement est de 70°C.

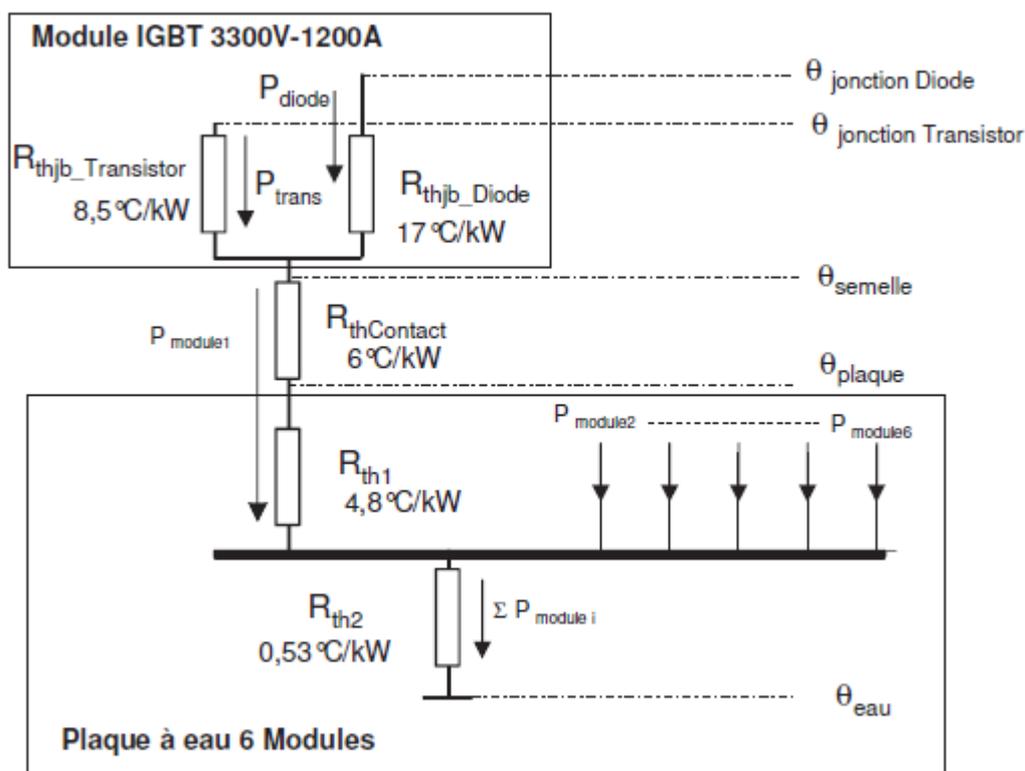


Figure 5 : Modèle Thermique d'un module IGBT 3300V / 1200 A et d'une plaque de refroidissement d'un module PALIX.

Conformément à la Figure 6, l'onduleur alimentant le moteur asynchrone triphasé de traction est constitué de trois cellules de commutation. Il utilise six modules IGBT qui sont montés sur la même plaque de refroidissement (voir Figure 3).

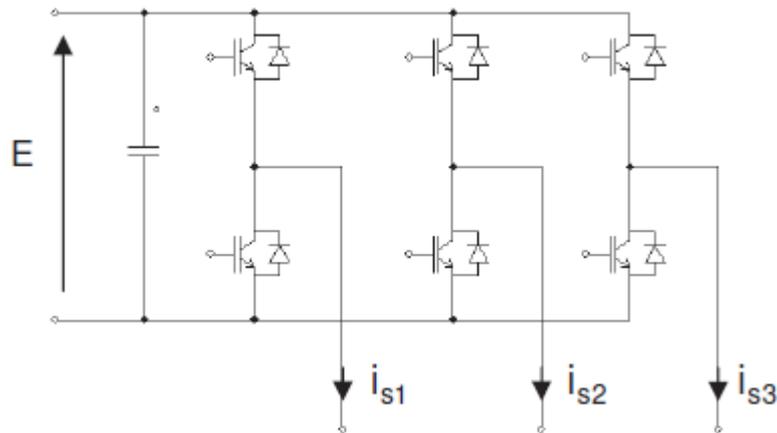


Figure 6 : Schéma structurel d'un onduleur de traction

Les calculs sont effectués pour le point de fonctionnement suivant :

- fréquence de commutation : $f_c = 550$ Hz.
- courant crête en sortie de la cellule de commutation : $\hat{I}_s = 850$ A.
- déphasage du courant : $\varphi = 28,3^\circ$; $\cos \varphi = 0,88$.
- profondeur de modulation : $m_a = 0,9$.

- 8) Calculer, pour un module IGBT, les pertes en conduction, les pertes en commutation puis les pertes totales dans le transistor.
- 9) Calculer, pour un module IGBT, les pertes en conduction, les pertes en commutation puis les pertes totales dans la diode.
- 10) A partir du modèle thermique de la figure 4.5, calculer la température de la semelle d'un module IGBT. ($\theta_{\text{eau}} = 70^\circ\text{C}$)
- 11) Calculer les températures de jonction du transistor et de la diode.