Chaîne motorisée

Fiche 1

1. Notion de système

- Pour exécuter un certain nombre de tâches (perçage, positionnement, levage, pompage...) il est nécessaire d'entraîner une charge mécanique en rotation ou en translation.

La démarche de conception de la chaîne doit être ascendante. Le point de départ est le « travail mécanique » à réaliser qui se traduit sous forme de **point(s) de fonctionnement (statiques et/ou dynamiques)** dans le plan couple/vitesse.

De ces contraintes on déduit la motorisation nécessaire, puis les points de fonctionnement associés dans le plan tension/courant. Ces derniers permettent de déterminer l'alimentation électrique appropriée.

On aboutit ainsi à la définition d'un **système** comportant généralement :

– une source d'énergie électrique ;

– un convertisseur permettant d'adapter et/ou de moduler l'énergie absorbée ;

– un moteur électrique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique ;

– la charge mécanique, comportant ou non un transmetteur mécanique (réducteur, convertisseur rotation-translation...), qui peut être entraînante ou entraînée.

La solution est rarement unique, le choix entre les différentes possibilités devra tenir compte d'arguments techniques mais aussi économiques. Il est indispensable d'affiner le cahier des charges afin d'avoir la connaissance la plus précise possible de la tache à réaliser et des contraintes associées (variation de vitesse, réversibilité).

2. Point de fonctionnement

Recherche d'un point de fonctionnement mécanique

La loi d'évolution de la vitesse de rotation d'un groupe machine-charge est régie par le **principe fondamental de la dynamique** (PFD). Les couples sont algébriques.

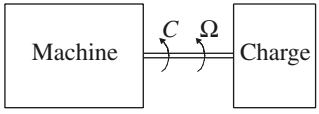
$$J\frac{d\Omega}{dt} = C_u + C'$$

J : moment d'inertie de l'ensemble machine-charge entraînée, en kg m^2,

C_u : couple utile disponible sur l'arbre en Nm,

C' : couple de charge en Nm.

Cette équation est différentielle. Elle traduit le fait que la vitesse de la machine ne peut pas varier instantanément en raison de l'inertie du système.



Conventions de signes

Quelques exemples de charges

Loi de couple	$C' = k$ = cte	$C' = k\Omega$	$C' = k\Omega^2$	$C' = k/\Omega$
Puissance $P' = C'\Omega$	$P' = k\Omega$	$P' = k\Omega^2$	$P' = k\Omega^3$	$P' = k$
Exemples d'applications	Levage, broyeur, pompe à piston ou volumétrique…	Agitateurs, mixeurs.	Pompes et ventilateurs centrifuges, certains compresseurs	Enrouleurs, dérouleurs, machines outils, broches...

Régime permanent

Le point de fonctionnement en régime permanent est caractérisé par le fait :

– que la vitesse est constante ;

– que si elle varie à la suite d'un événement extérieur, elle revient à sa valeur initiale (stabilité).

Algébriquement : $C_u = -C'$
Graphiquement : le point est à l'intersection des courbes $C_u(\Omega)$ et $-C'(\Omega)$

La connaissance du couple C_u et de la vitesse Ω permet ensuite de trouver la valeur des différents paramètres (tension, courant...) d'alimentation de la machine.

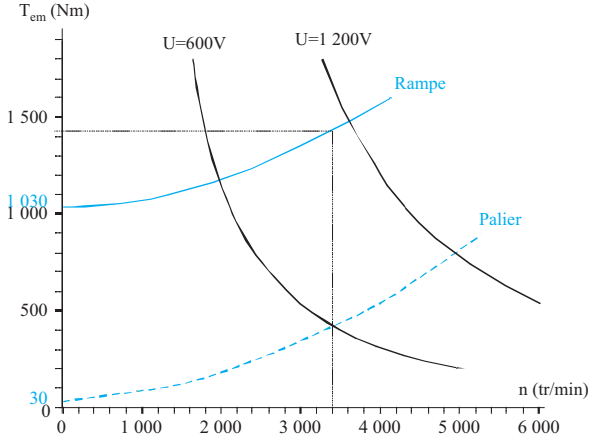
EXEMPLE. TGV SUD-EST

Ce TGV comporte 12 moteurs à courant continu série par rame, un par boggie-moteur. Pour une vitesse v de 240 km/h du TGV, la vitesse de rotation des moteurs est de 3 000 tr/min. Elle est contrôlée par la tension U.

Caractéristiques mécaniques :

– de la machine pour $U_1 = 600$ V (C_1) et $U_2 = 1\,200$ V (C_2) ;

– de la charge pour un palier (sol plat) et une rampe (côte).



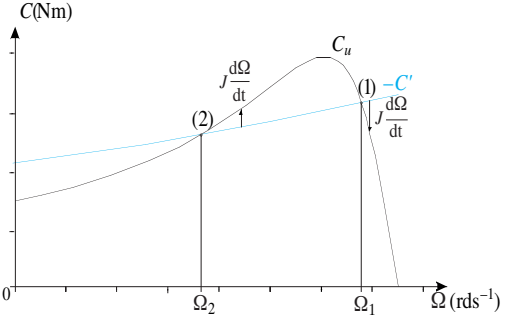
On règle la valeur moyenne de la tension d'alimentation du moteur à 600 V.

Sur un sol plat le point de fonctionnement est à l'intersection de la caractéristique (C_1) et de celle correspondant à un palier : la vitesse de rotation s'établit à $n_1 = 3400$ tr/min, celle du TGV à $v_1 = 272$ km/h.

S'il aborde une côte, le point de fonctionnement est à l'intersection de (C_2) et de celle correspondant à une rampe : la vitesse de rotation s'établit à $n_2 = 2\,000$ tr/min, soit $v_2 = 160$ km/h.

Pour maintenir sa vitesse à la valeur v_1 il faut augmenter U. Avec 1 200 V on obtient $v_2 = 304$ km/h, c'est trop, il faudra adopter un réglage intermédiaire.

Stabilité d'un point de fonctionnement



Supposons qu'à la suite d'un évènement extérieur la machine s'écarte de son point de fonctionnement :

– si elle y revient à l'issue d'un régime transitoire, le point de fonctionnement est stable (1) ;

– dans le cas contraire, il est instable (2).

De manière générale, un point de fonctionnement correspondant à la vitesse Ω_0 sera stable si, en ce point, la pente de la caractéristique de la charge entraînée est supérieure à celle de la machine (cas 1).

Graphiquement cette règle se traduit par le fait que la caractéristique du moteur est au-dessus de $-C'(\Omega)$ pour des valeurs de vitesse inférieures à Ω_0 et au-dessous pour des valeurs supérieures à Ω_0.

Démarrage

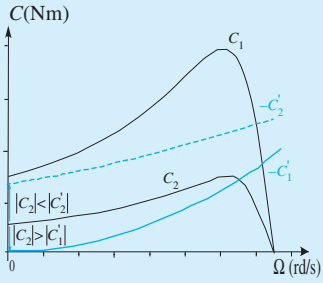
Quand on démarre une machine, sa vitesse est nulle mais pas son accélération. Il faut donc que $|C_u| \geqslant |C'|$ pour que le démarrage en charge soit possible.

Dans le cas d'une vitesse positive, la caractéristique du moteur doit être « au-dessus » de celle de la charge pour $\Omega = 0$ rds^{-1}.

DÉMARRAGE AVEC DIFFÉRENTS TYPES DE CHARGES

La machine dont la caractéristique est C_1 permet de démarrer et d'entraîner les deux charges.

Celle dont la caractéristique est C_2 ne peut démarrer et entraîner que C_1'.



Pour trouver les conditions électriques (tension et courant de démarrage), on utilise l'hypothèse $\Omega = 0$ rds^{-1} et on en tire les conséquences pour la machine étudiée : pour un moteur à courant continu $E = 0$, pour un moteur asynchrone $g = 1$.

Variation de vitesse (hors asservissement)

Le système travaille en régime dynamique mais les variations imposées sont suffisamment lentes pour que l'on puisse considérer qu'elles constituent une **succession de régimes permanents** (succession d'états quasi-stationnaires).

On raisonne sur les caractéristiques établies en régime permanent.

Les variables électriques varient beaucoup plus vite que les variables mécaniques ce qui permet de dissocier leurs évolutions lors de l'analyse (découplage des variables).

Schématiquement on peut dire que **lorsque le courant varie, la vitesse est constante et inversement** quand la vitesse commence à varier, le courant a atteint son régime permanent.

3. Analyse énergétique

Fonctionnement dans les 4 quadrants

En multipliant par Ω chaque membre du PFD il vient :

$\Omega J \dfrac{d\Omega}{dt} = \Omega C_u + \Omega C'$;

$P_u = C_u\Omega$, puissance mécanique **fournie** par la machine ;

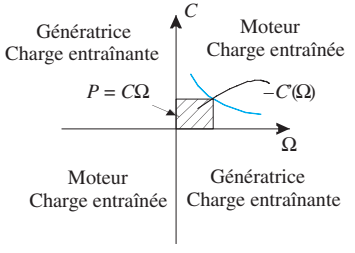
$P' = C'\Omega$, puissance mécanique **fournie** par la charge ;

$P_c = \Omega J \dfrac{d\Omega}{dt} = \dfrac{d}{dt}\left(\dfrac{1}{2} J\Omega^2\right)$, puissance cinétique.

Dans le cadre de l'étude d'un système motorisé, la machine électrique sera considérée *a priori* comme fonctionnant en moteur, donc fournissant de la puissance mécanique ($P_u \geqslant 0$).

Comme le système peut fonctionner dans les 4 quadrants, il faudra examiner le signe de la vitesse si l'on souhaite raisonner à partir des couples.

	< 0	> 0
P_u	Génératrice	Moteur
P'	Charge entrainée	Charge entrainante

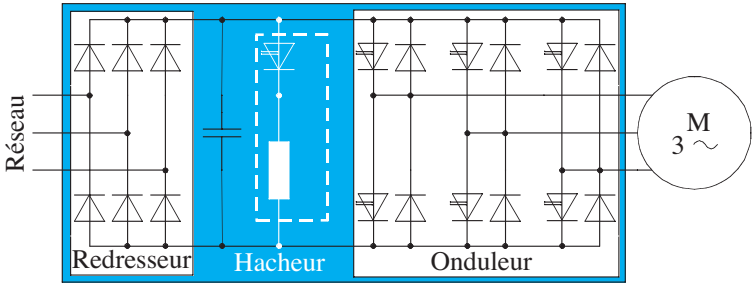


Dans le plan couple vitesse, la puissance mécanique est représentée par une surface.

Réversibilité

Quand la charge est entraînante (système de levage en descente par exemple) la machine peut fonctionner en génératrice. Il est alors possible de récupérer l'énergie de freinage : on parle alors de réversibilité. Cependant **pour qu'un système soit réellement réversible il est indispensable que tous les éléments de la chaine qui le compose le soient**.

EXEMPLE. VARIATEUR DE VITESSE



Variateur

Quand la machine passe en fonctionnement génératrice, l'onduleur (réversible) transfère l'énergie qu'elle restitue mais le redresseur à diodes (non réversible) rend impossible le renvoi sur le réseau. Le hacheur intercalé entre l'étage d'entrée et l'ondulateur dissipe cette énergie en chaleur dans la résistance qu'il alimente.

Fiche 2

Électronique de puissance

1. Composants

Les convertisseurs statiques permettent grâce à une commande appropriée de transférer de l'énergie d'une source vers un récepteur. Ils nécessitent l'utilisation d'interrupteurs à semi-conducteurs, commandés ou non, comme les transistors, les thyristors, les diodes...

Les **composants évoqués** dans ce livre **seront considérés comme parfaits** :

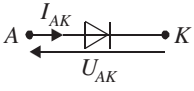
– passage instantané de l'état passant à l'état bloqué et réciproquement ;

– comportement équivalent à un interrupteur fermé pour l'état passant ;

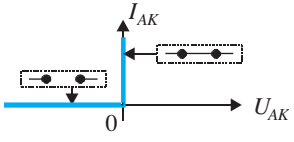
– comportement équivalent à un interrupteur ouvert pour l'état bloqué.

Aucune perte de puissance ne leur sera imputable.

Diode



A : anode
K : cathode

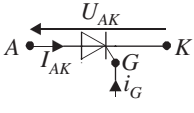


Modèle de la diode idéale :

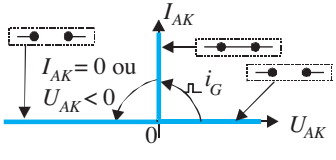
– sens direct $I_{AK} > 0$ et $U_{AK} = 0$, la diode est modélisée par un interrupteur fermé ;

– sens inverse $U_{AK} < 0$ et $I_{AK} = 0$, la diode est modélisée par un interrupteur ouvert

Thyristor



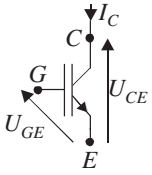
A : anode
K : cathode
G : gâchette



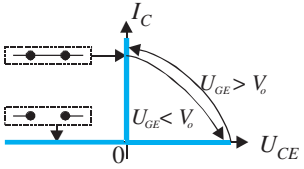
Pour amorcer un thyristor, c'est-à-dire le faire passer de l'état bloqué à l'état passant, on doit lui appliquer une impulsion positive de courant de gâchette i_G et respecter la condition $U_{AK} > 0$.

Le blocage est assuré par l'annulation du courant principal I_{AK} (blocage dit « naturel ») ou par application d'une tension $U_{AK} < 0$ pendant une durée « suffisante » (blocage dit « forcé »).

Transistor IGBT



C : collecteur
E : émetteur
G : grille



Le transistor IGBT est passant si les conditions suivantes sont satisfaites :

– tension principale $U_{CE} > 0$;

– tension de commande $U_{GE} > V_o$ tension de seuil de quelques volts.

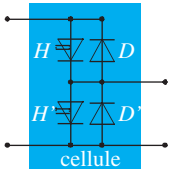
Interrupteur commandé

Quelle que soit la technologie utilisée, on utilisera le symbole ci-contre pour représenter un interrupteur à semi-conducteur commandé à l'ouverture et à la fermeture.

2. Cellule de commutation

Définition

Une cellule de commutation est un ensemble formé de deux interrupteurs unidirectionnels commandés et des deux diodes montées en antiparallèle. On utilise ces cellules dans les hacheurs, les onduleurs et les redresseurs à absorption sinusoïdale.



Réversibilité

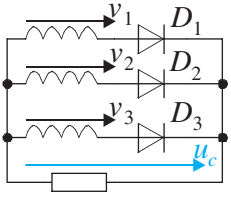
L'orientation des interrupteurs commandés et des diodes en antiparallèle donne à la cellule de commutation la propriété de réversibilité. Cette réversibilité n'est effective que si les sources reliées sont réversibles.

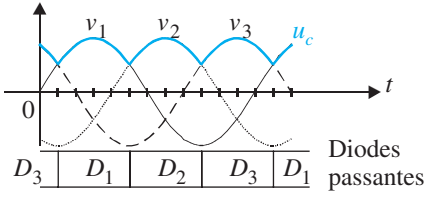
Commande

Pour ne pas court-circuiter la source de tension, présente en amont d'une cellule, on **interdit la commande à la fermeture simultanée des interrupteurs H et H′**.

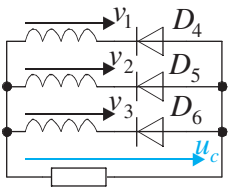
Cellules des ponts redresseurs

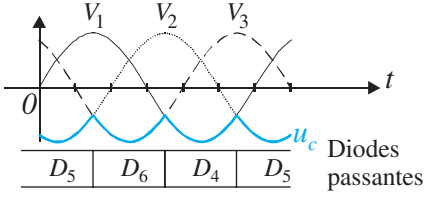
Cathodes communes : seule la diode dont l'anode est au potentiel le plus élevé est passante.





Anodes communes : seule la diode dont la cathode est au potentiel le plus bas est passante.

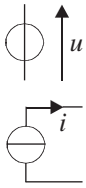




3. Sources

Le terme de source est indifféremment utilisé pour les générateurs et les récepteurs d'énergie.

– Source de tension : elle impose à ses bornes une tension quel que soit le courant qui la traverse.
– Source de courant : elle impose l'intensité du courant la traversant quelle que soit la tension à ses bornes.



Nature d'une source

Les grandeurs imposées par les sources sont rarement constantes et peuvent présenter des fluctuations. On utilisera les définitions suivantes :
– une source de tension ne peut subir de discontinuité de tension à ses bornes du fait de la charge ;
– une source de courant ne peut subir de discontinuité de l'intensité du courant la traversant du fait de la charge.

Les propriétés des condensateurs et des bobines (cf. fiche 3) permettent de changer la nature d'une source.

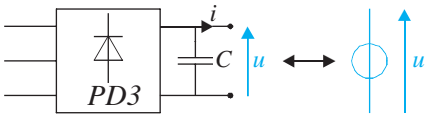
Réversibilité d'une source

Une source réversible peut passer d'un fonctionnement générateur à un fonctionnement récepteur et réciproquement.

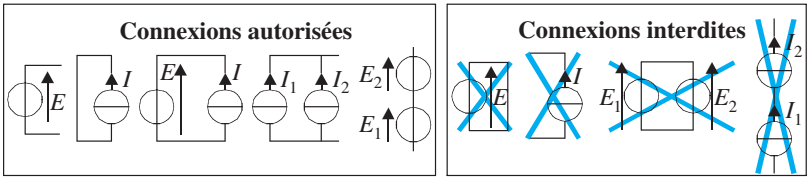
Si ce changement est fugitif cette réversibilité est dite « instantanée ».

Si ce changement est durable cette réversibilité est dite « permanente ».

EXEMPLE. L'association d'un pont de diodes et d'un condensateur constitue une source de tension. Le courant i ne peut être de valeur moyenne négative, mais peut, par la présence du condensateur, présenter des pointes négatives. Ce montage est équivalent à une source de tension à réversibilité instantanée de courant.



Connexions des sources



Les commandes et les structures des convertisseurs statiques doivent respecter ces règles de connexion.

Remarque :

Si un convertisseur statique est affecté au transfert d'énergie entre deux sources de même nature, deux sources de courant ou deux sources de tension, il doit comporter des éléments tampons comme des bobines ou des condensateurs.

4. Tracé des tensions en conduction continue

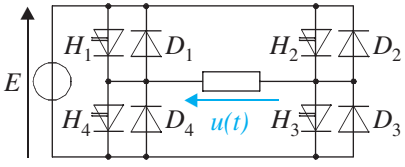
MÉTHODE

On remplace les blocs constitués d'un interrupteur commandé H et d'une diode D par :

Un interrupteur fermé si H est commandé à la fermeture

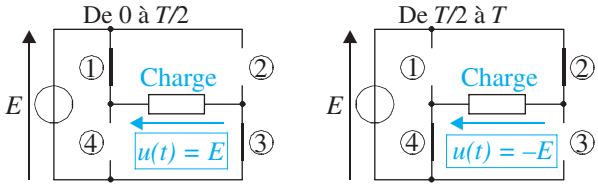
Un interrupteur ouvert si H est commandé à l'ouverture

EXEMPLE.



De 0 à T/2 : les interrupteurs H_1 et H_3 sont commandés à la fermeture et les interrupteurs H_2 et H_4 sont commandés à l'ouverture.

De T/2 à T : les interrupteurs H_1 et H_3 sont commandés à l'ouverture et les interrupteurs H_2 et H_4 sont commandés à la fermeture.



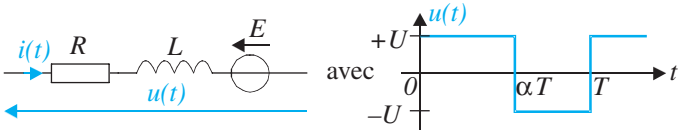
5. Étude des courants

Courant dans la charge

MÉTHODE

Nous déterminons la forme du courant dans une charge à partir de son équation différentielle et de la forme de la tension à ses bornes.

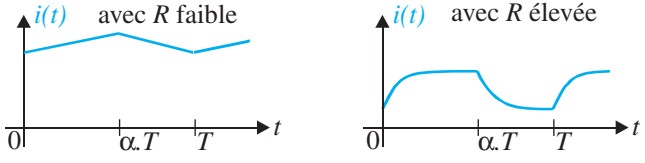
EXEMPLE 1.



De 0 à αT, on doit résoudre : $u(t) = U = R\,i(t) + L\dfrac{di(t)}{dt} + E.$

De αT à T, on doit résoudre : $u(t) = -U = R\,i(t) + L\dfrac{di(t)}{dt} + E.$

Influence de la valeur de la résistance sur la forme du courant :



La forme du courant dans une charge de type RLE est une succession d'évolutions exponentielles. Lorsque la résistance est suffisamment faible, cette forme s'apparente à une succession d'évolutions linéaires. La valeur de la résistance n'influe plus sur la forme du courant. Le terme $Ri(t)$ devient négligeable devant les autres tensions. L'équation de la charge devient : $u(t) = L\dfrac{di(t)}{dt} + E$.

Remarque :

Même si la résistance n'influe pas sur la forme du courant, elle reste prépondérante dans la détermination de sa valeur moyenne : $\overline{i(t)} = \dfrac{\overline{u(t)} - E}{R}$.

Généralement on considère le terme $Ri(t)$ comme négligeable si la constante de temps $\tau = \dfrac{L}{R}$ de la branche RLE est très supérieure à la demi période $\dfrac{T}{2}$ de la commande.

EXEMPLE 2. On reprend la branche RLE de l'exemple 1.

Si $Ri(t)$ est négligeable on résout :

de 0 à αT, $U = L\dfrac{di(t)}{dt} + E, \dfrac{di(t)}{dt} = \dfrac{U-E}{L} \Rightarrow i(t) = \dfrac{U-E}{L}t + \text{cste}$.

La constante est déterminée à partir de la valeur du courant à l'instant $t = 0$.

Si on note $i(0) = I_o$, on obtient : cste $= I_o$.

$$i(t) = \underbrace{\frac{U-E}{L}}_{\text{Pente } di(t)/dt}\, t + I_o \quad \text{Valeur initiale du courant}$$

de αT à T, $-U = L\dfrac{di(t)}{dt} + E \Rightarrow i(t) = \dfrac{-U-E}{L}t + \text{cste}$.

La constante est déterminée à partir de la valeur du courant à l'instant $t = \alpha T$.

Si on note $i(\alpha T) = I_1$, on obtient : $I_1 = \dfrac{-U-E}{L}\alpha T + \text{cste}$.

$$i(t) = \underbrace{\frac{-U-E}{L}}_{\text{Pente } di(t)/dt}\, (t - \underbrace{\alpha T}_{\text{Instant initial}}) + I_1 \quad \text{Valeur initiale du courant}$$

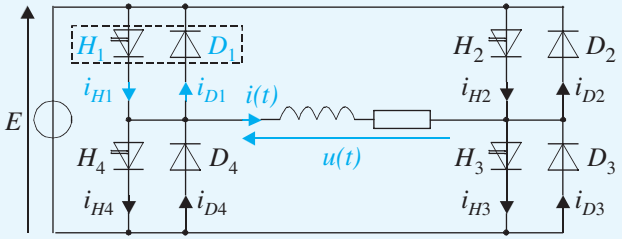
Courants dans les interrupteurs

Pour dimensionner un interrupteur à semi-conducteur, on doit connaître le courant qui le traverse. On travaille sur un bloc constitué d'un interrupteur H et d'une diode D.

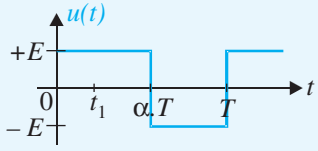
Si l'interrupteur H est commandé à l'ouverture, les deux composants sont bloqués.

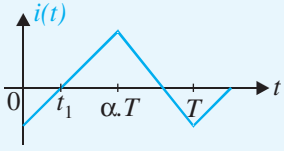
Si l'interrupteur H est commandé à la fermeture, le composant passant a l'orientation compatible avec le sens du courant dans la charge.

Exercice Étude d'un onduleur de tension monophasé



L'interrupteur H_1 est commandé à la fermeture de 0 à αT et à l'ouverture de αT à T. On donne les formes de la tension $u(t)$ et du courant $i(t)$.

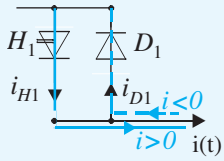
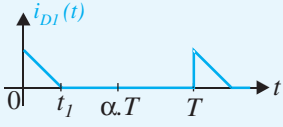
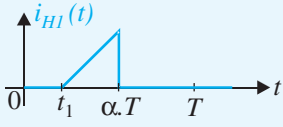




Déterminer la forme de l'intensité des courants dans les composants H_1 et D_1.

Solution

Les composants H_1 et D_1 sont bloqués entre αT à T, et H_1 est commandé à l'ouverture. Il reste à déterminer sur la phase de fonctionnement de 0 à αT, leurs intervalles de conduction. Or, $i(t) = i_{H_i}(t) - i_{D1}(t)$.

De 0 à t_1 : l'intensité de $i(t)$ est négative, la conduction ne peut être assurée que par la diode D_1, d'où $i_{D_1}(t) = -i(t)$.

De t_1 à αT : l'intensité de $i(t)$ est positive, l'interrupteur H_1 assure la conduction, d'où $i_{H_1}(t) = i(t)$.