

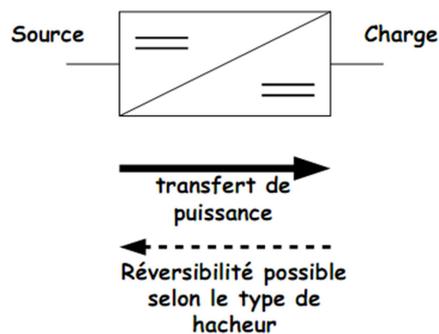
CHAP II : LES HACHEURS

Objectifs

| A l'issue de la leçon, l'étudiant doit : | |
|---|--|
| 01 | Connaître les structures des hacheurs série, parallèle, réversible en courant, réversible en tension et 4 quadrants. |
| 02 | Savoir déterminer la forme d'onde de la tension de sortie d'un hacheur série les intervalles de conduction étant connus |
| 03 | Savoir déterminer la forme d'onde de la tension d'entrée d'un hacheur parallèle les intervalles de conduction étant connus |
| 04 | Savoir calculer la valeur moyenne de la tension d'un hacheur en passant par un calcul d'aire |
| 05 | Connaître l'application du montage dans la motorisation des systèmes |
| 06 | Savoir calculer la puissance en entrée et en sortie du hacheur |

1. Qu'est-ce qu'un hacheur ?

Un hacheur est un convertisseur statique qui permet de régler le transfert d'énergie entre une source électrique continue et une charge électrique continue.
Son symbole normalisé est :



2. Quelles sont ses applications dans l'industrie ?

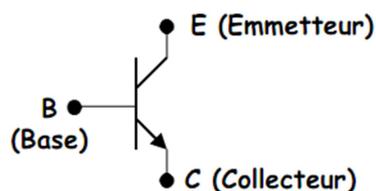
Le hacheur est principalement utilisé pour :

- La variation de vitesse d'un moteur à courant continu
- Le freinage par récupération
- Alimentation d'appareil électronique grand public (PC, ...)

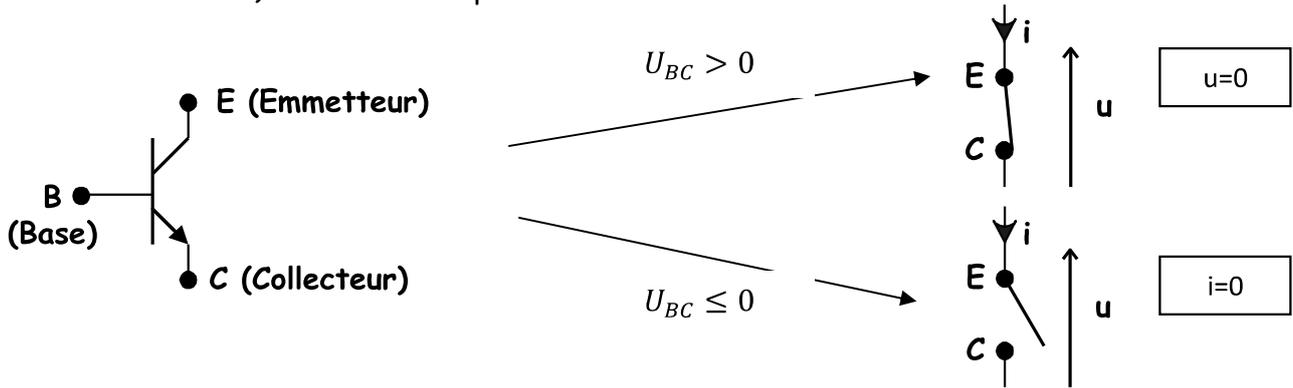
3. Comment est régulé le transfert de puissance dans un hacheur ?

A l'aide d'un composant qui permet régler, sur une période, la durée du transfert de puissance entre la source et la charge.

Ce composant est le transistor de symbole :



Les transistors d'électronique de puissance fonctionnent en tout ou rien : ils sont équivalents à un interrupteur fermé lorsqu'on applique une tension positive entre B et C suffisamment grande (voir données constructeur) et à un interrupteur ouvert dans le cas contraire.



La commande (ouverture et fermeture) du transistor s'effectue entre les bornes B et C.
Le transfert de puissance s'effectue entre les bornes E et C

4. Qu'est-ce que le rapport cyclique ?

C'est la fraction de période pendant lequel le transistor conduit. On le note α .

Exemple : si le transistor conduit pendant $\frac{1}{4}$ de la période, $\alpha = 0,25$.

Pour déterminer le rapport cyclique on utilise la relation :

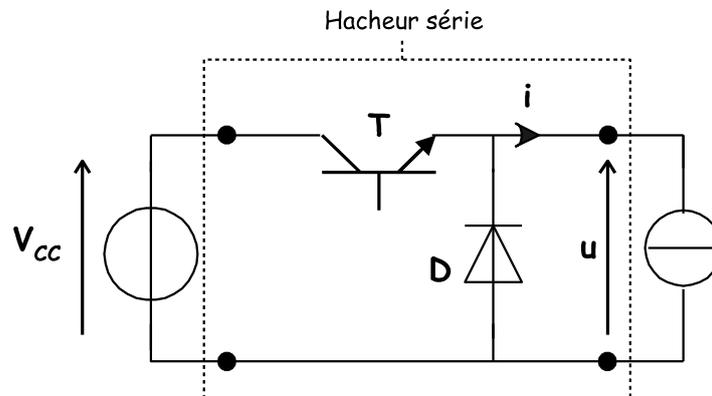
$$\alpha = \frac{\text{durée de conduction du transistor}}{\text{période de hachage}}$$

5. Quels sont les différents types de hacheur ?

- On distingue :
- Le hacheur série
 - Le hacheur parallèle
 - Les hacheurs 2 et 4 quadrants
 - Les alimentations à découpage.

6. Quelle est la structure du hacheur série ?

Le hacheur série est un convertisseur statique réglant le transfert d'énergie entre une générateur de tension continue est une source de courant continu.

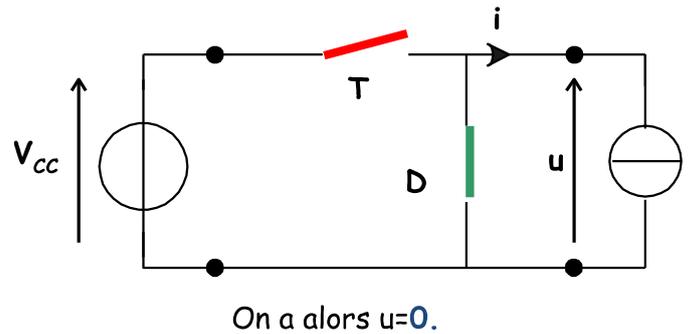
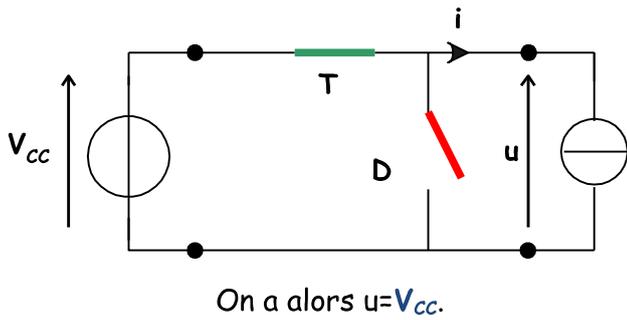


7. Quelle est la forme d'onde de la tension en sortie du hacheur série ?

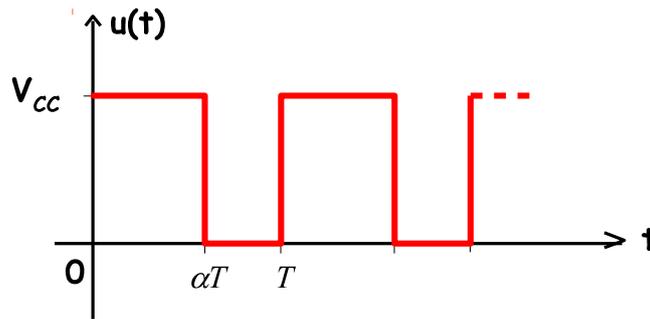
Les conductions de T et D sont complémentaires : quand T est passant (T=1) alors D est bloquée (D=0) et vice-versa.

De 0 à αT , le transistor est passant : $T=1$ et $D=0$

De αT à T , le transistor est bloqué : $T=0$ et $D=1$



D'où la forme d'onde suivante :



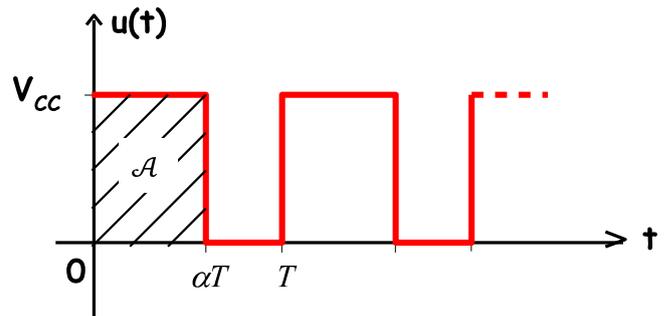
8. Quelle est l'expression de la valeur moyenne de la tension en sortie du hacheur série ?

$$\langle u \rangle = \frac{1}{T} \times \mathcal{A}$$

Avec \mathcal{A} : aire située sous la courbe (voir surface hachurée ci-contre).

$$\langle u \rangle = \frac{1}{T} \times \alpha T \times V_{CC}$$

$$\langle u \rangle = \alpha \times V_{CC}$$



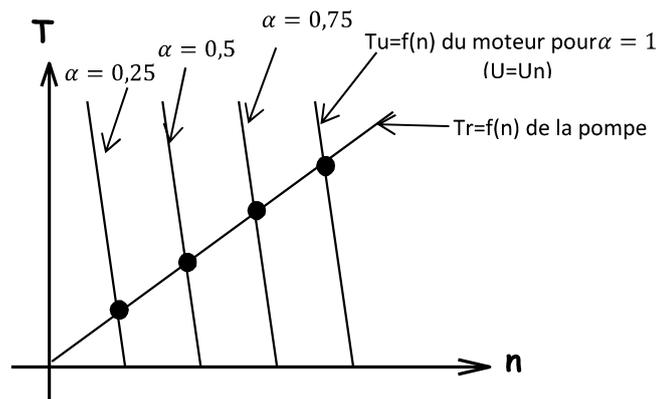
9. Comment le hacheur série permet-il la variation de vitesse des moteurs à courant continu ?

La tension en sortie du hacheur est continue mais pas parfaitement lissée. Cependant, en rendant par réglage la période T du hacheur négligeable par rapport à la constante de temps mécanique du moteur, la vitesse de celui-ci n'aura pas le temps de varier. Tout se passe comme-ci le moteur était alimenté par une tension continue parfaitement lissée $U = \langle u \rangle = \alpha \times V_{CC}$.

Avec le réglage de α , on obtient différentes valeurs de U qui correspondent à des caractéristiques mécaniques différentes pour le moteur (droites parallèles).

Ces droites permettent d'obtenir plusieurs points de fonctionnement avec la charge entraînée (voir ci-contre l'exemple de l'entraînement d'une pompe).

Le hacheur permet également le démarrage à tension d'induit réduite.



10. Quelle est la forme d'onde du courant en sortie d'un hacheur série alimentant un moteur à courant continu ?

La constante de temps électrique du moteur est beaucoup plus faible que la constante mécanique de celui-ci et n'est pas négligeable devant la période du hacheur. Le courant va donc répondre aux fluctuations de la tension en sortie du hacheur.

Une fois le régime permanent établi (le moteur démarre avant $t=0$), on a montré dans le paragraphe précédent que la vitesse était constante : donc $E=Cte$

⇒ A $t=0$, u passe brutalement de 0 à V_{cc} .

La variation du courant d'induit du moteur est régit par l'équation différentielle suivante :

$$E + Ri + L \frac{di}{dt} = V_{cc}$$

C'est un régime transitoire du 1^{er} ordre, dont on peut mettre l'équation sous sa forme canonique :

$$\frac{L di}{R dt} + i = \frac{V_{cc} - E}{R}$$

La constante de temps est $\tau = \frac{L}{R}$ est la valeur finale de i est $\frac{V_{cc}-E}{R}$

i croit donc suivant la courbe de réponse d'un 1^{er} ordre à un échelon, mais n'a pas le temps d'atteindre sa valeur finale avant $t = \alpha T$.

⇒ A $t = \alpha T$, u passe brutalement de V_{cc} à 0.

La variation du courant d'induit du moteur est régit par l'équation différentielle suivante :

$$E + Ri + L \frac{di}{dt} = 0$$

C'est un régime transitoire du 1^{er} ordre, dont on peut mettre l'équation sous sa forme canonique :

$$\frac{L di}{R dt} + i = -\frac{E}{R}$$

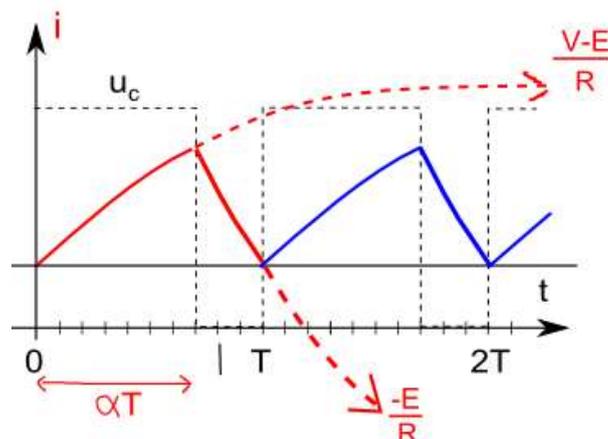
La constante de temps est $\tau = \frac{L}{R}$ est la valeur finale de i est $-\frac{E}{R}$

i décroît donc suivant la courbe de réponse d'un 1^{er} ordre à un échelon, mais n'a pas le temps d'atteindre sa valeur finale avant $t = T$.

⇒ A $t = T$, on revient à la configuration de $t=0$

Le courant i est donc périodique.

On obtient la forme d'onde suivante :

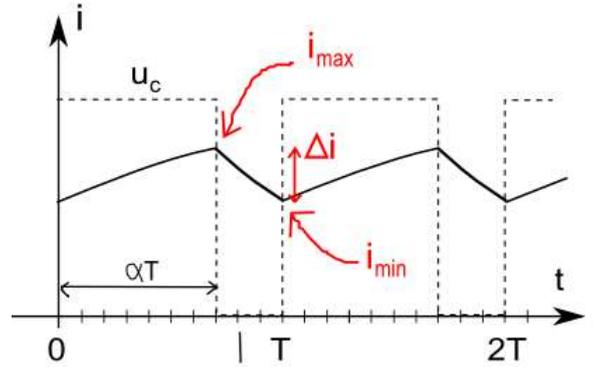


11. Comment améliorer le lissage du courant ?

L'ondulation de courant Δi peut être approximé pour le hacheur série par la relation :

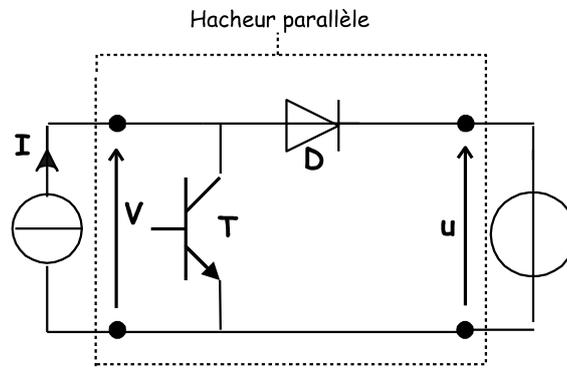
$$\Delta i = \frac{V_{cc} \alpha (1 - \alpha)}{LF}$$

Pour diminuer cette ondulation de courant, on peut donc **augmenter la fréquence F** du hacheur ou **augmenter le L** du moteur en ajoutant à celui-ci **une inductance de lissage en série**.



12. Quelle est la structure du Hacheur parallèle ?

Le hacheur parallèle est un convertisseur statique réglant le transfert d'énergie entre une générateur de courant continu est un récepteur de tension continue.

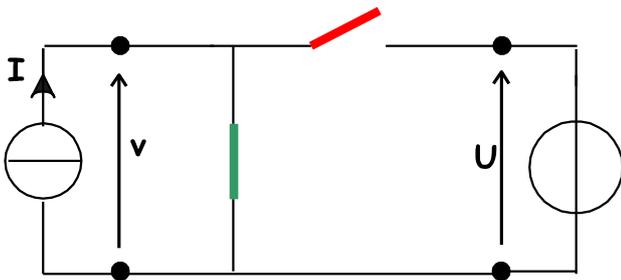


13. Quelle est la forme d'onde de la tension à l'entrée du hacheur parallèle ?

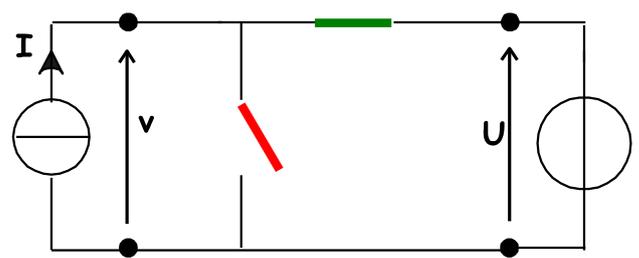
Les conductions de T et D sont complémentaires : quand T est passant (T=1) alors D est bloquée (D=0) et vice-versa.

De 0 à αT , le transistor est passant : T=1 et D=0

De αT à T, le transistor est bloqué : T=0 et D=1

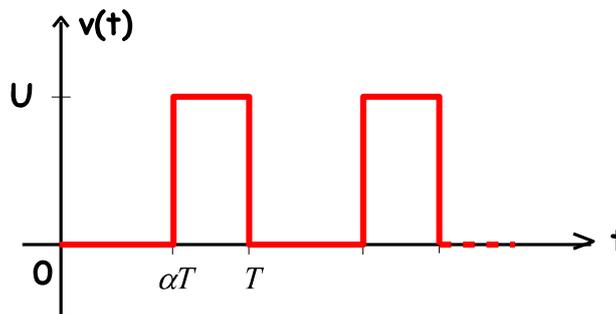


On a alors $v=0$.



On a alors $v=U$.

D'où la forme d'onde suivante :



14. Quelle est l'expression de la tension en sortie d'un hacheur parallèle ?

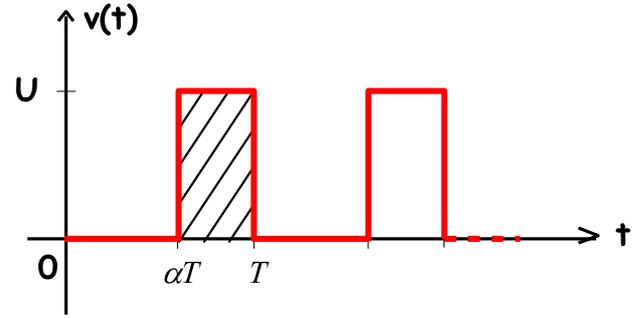
$$\langle v \rangle = \frac{1}{T} \times \mathcal{A}$$

Avec \mathcal{A} : aire située sous la courbe (voir surface hachurée ci-contre).

$$\langle v \rangle = \frac{1}{T} \times (T - \alpha T) \times U$$

$$\langle v \rangle = (1 - \alpha) \times U$$

$$U = \frac{\langle v \rangle}{1 - \alpha}$$

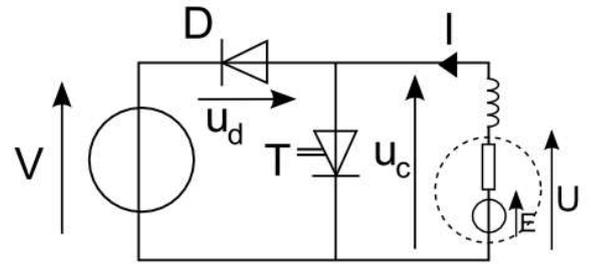


⇒ $U \geq \langle v \rangle$: le hacheur parallèle est élévateur de tension

15. Quelle est l'application concernant les machines à courant continu ?

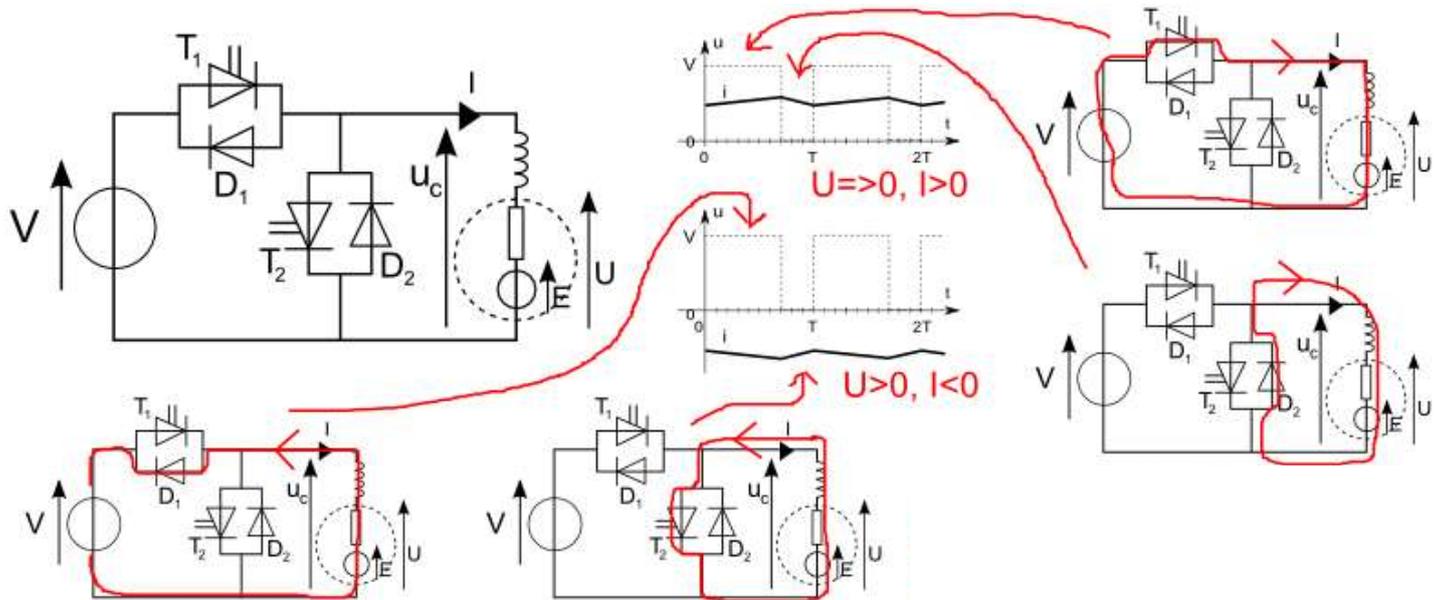
Lors de la phase de freinage, la machine à courant continu fonctionne en génératrice, mais sa f.e.m. E (qui décroît car la vitesse diminue) est inférieure à la tension U qui alimentait le moteur.

Pour assurer le transfert d'énergie électrique vers la source, il faut un convertisseur d'énergie continu-continu élévateur de tension : le hacheur parallèle.



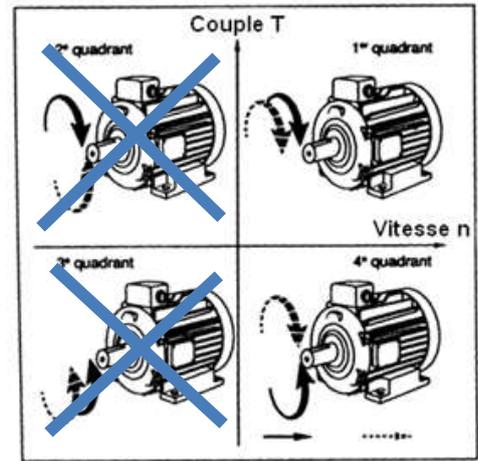
16. Comment obtenir un hacheur réversible en courant ?

On l'obtient en plaçant en parallèle inverse des interrupteurs unidirectionnels :



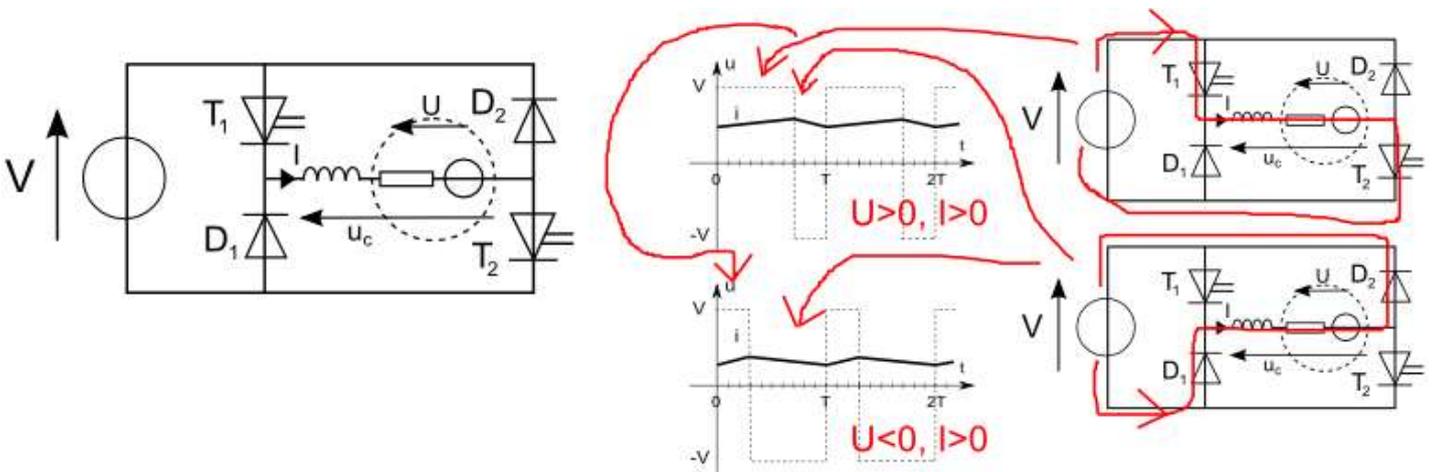
On a alors $\langle u_c \rangle = \alpha \times V$

Ce montage permet un fonctionnement en moteur et freinage avant.



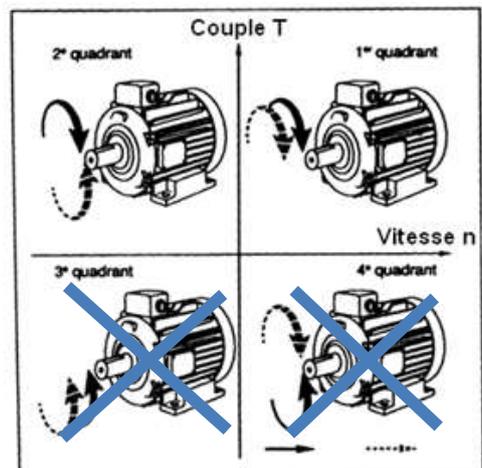
17. Comment obtenir un hacheur réversible en tension ?

On l'obtient en réalisant une structure en pont :



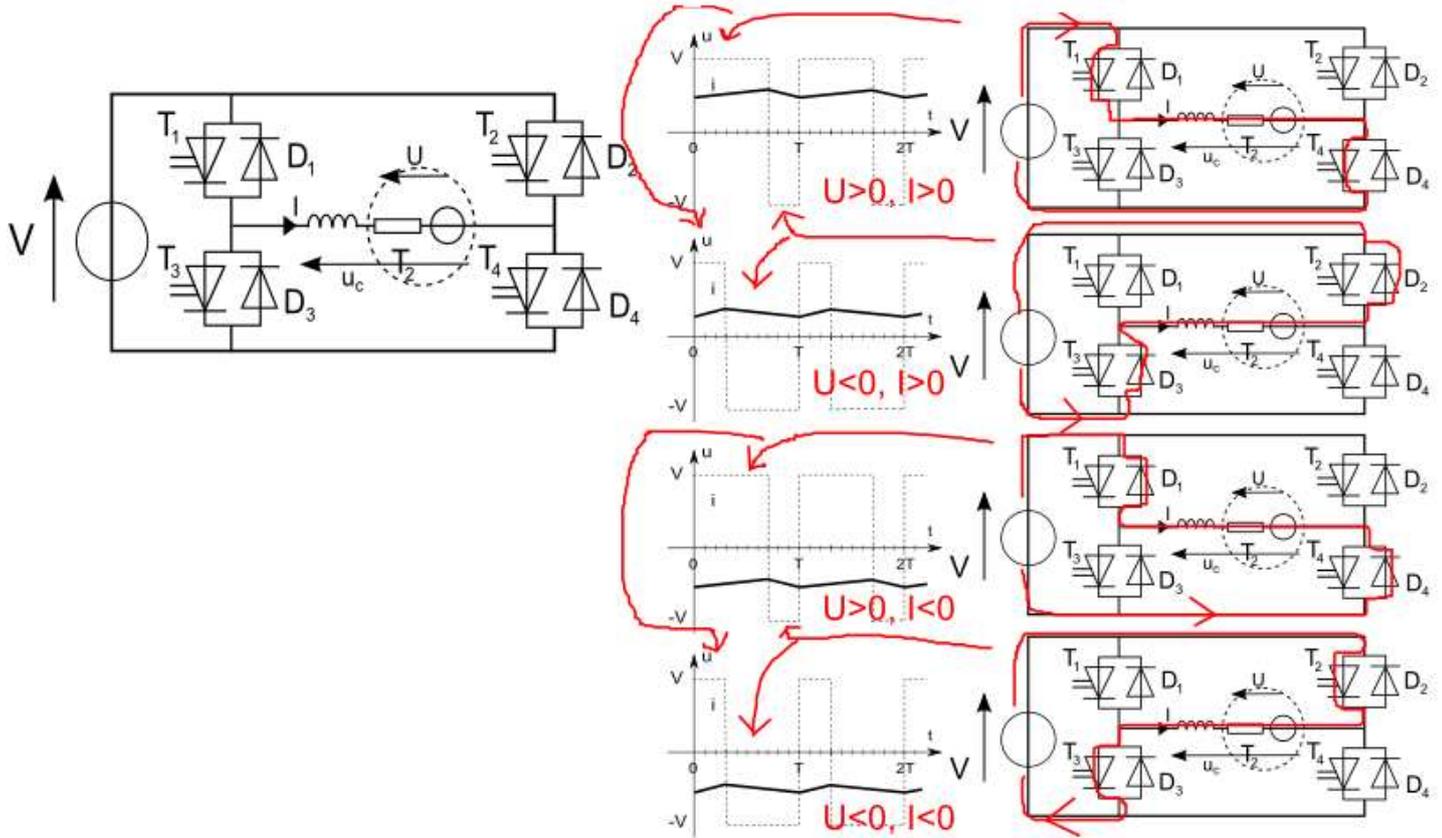
On a alors $\langle u_c \rangle = (2\alpha - 1) \times V$

Ce montage permet un fonctionnement en moteur avant et freinage arrière.



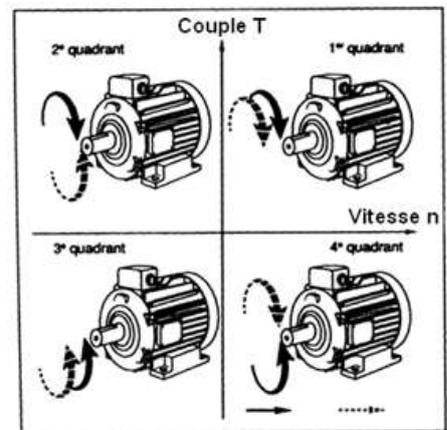
18. Comment obtenir un hacheur réversible en courant et en tension ?

On l'obtient en combinant les 2 montages précédents :



On a alors $\langle u_c \rangle = (2\alpha - 1) \times V$

Ce montage permet un fonctionnement dans les 4 quadrants



19. Comment calculer la puissance en entrée ou en sortie d'un hacheur ?

En continu et pour une tension parfaitement lissée, la relation permettant le calcul de la puissance est (voir document de synthèse de calcul des puissances de 1^{ère} année) :

$$P = U \times \langle i \rangle$$

Cette relation peut donc être utilisée en sortie du hacheur parallèle et en entrée des autres hacheurs de ce chapitre.

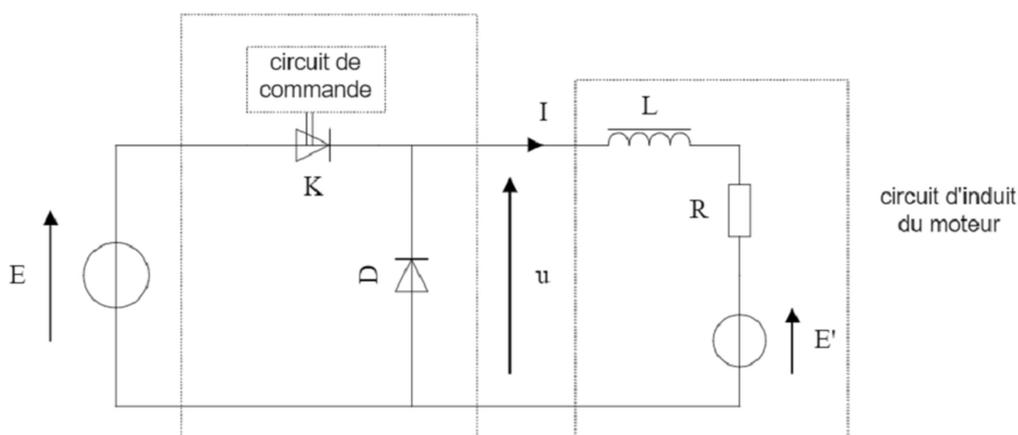
Les interrupteurs étant considérés idéaux, la puissance d'entrée peut être considérée égale à la puissance de sortie.

Série d'exercices N°02 (2021)

EXO 1 : Hacheur série1

On alimente un moteur à courant continu dont le schéma équivalent est donné ci-dessous, à l'aide d'un hacheur. L'interrupteur électronique K et la diode sont supposés parfaits. La période de hachage est T, le rapport cyclique α . L'inductance L du bobinage de l'induit du moteur a une valeur suffisante pour que la forme du courant dans l'induit soit pratiquement continue. Le hacheur est alimenté par une tension continue $E = 220 \text{ V}$. La f.e.m. E' du moteur est liée à sa vitesse de rotation N par la relation : $E' = 0,20N$ avec E' en V et N en tr/min. L'induit a pour résistance $R = 2,0 \Omega$.

1. Etude de la tension u pour $\alpha = 0,80$.
 - 1.1 Représenter, en la justifiant, l'allure de la tension u. On prendra comme instant origine celui où l'interrupteur K se ferme.
 - 1.2 Déterminer l'expression littérale de la valeur moyenne U_{moy} de la tension u, en fonction de E et du rapport cyclique α . Calculer sa valeur numérique.
2. Fonctionnement du moteur pour $\alpha = 0,80$.
 Le moteur fonctionne en charge, la valeur moyenne du courant d'induit est $I_{\text{moy}} = 10 \text{ A}$. Déterminer E' et en déduire N.
3. Le dispositif de commande du hacheur est tel que le rapport cyclique α est proportionnel à une tension de commande u_c : $\alpha = 100 \%$ pour $u_c = 5 \text{ V}$. Tracer la caractéristique U_{moy} en fonction de u_c .

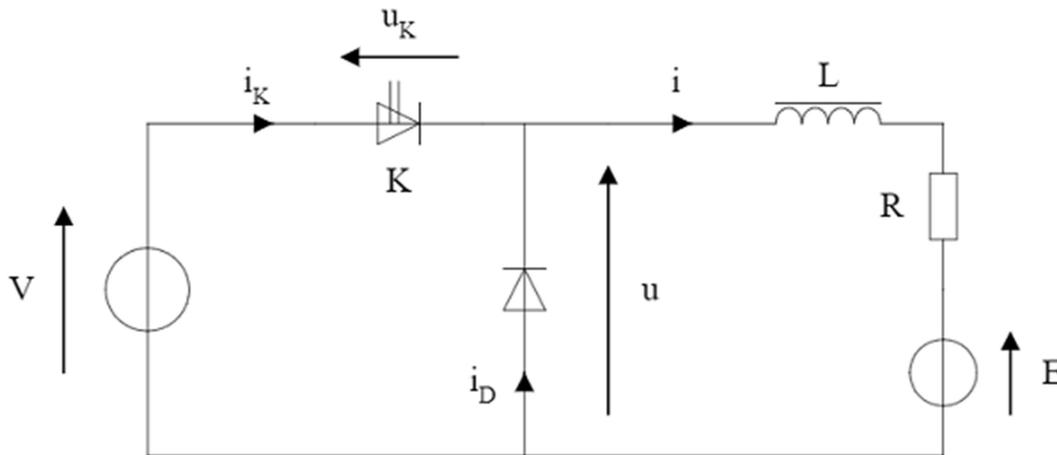


EXO 2 : Hacheur série2

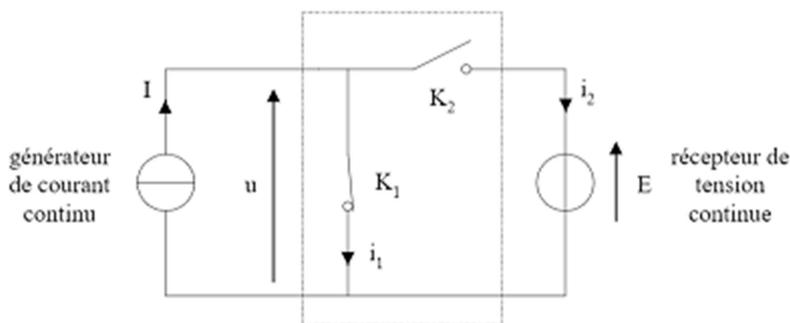
Un moteur à courant continu travaillant à couple constant est inclus dans le montage ci-dessous : Le hacheur fonctionne à une fréquence $f = 500 \text{ Hz}$. L'interrupteur K est fermé lorsque $0 < t < \alpha T$ et ouvert entre αT et T. La diode est supposée parfaite. L'inductance de la bobine de lissage L est de valeur suffisante pour que le courant dans le moteur soit considéré comme constant : $i = I = C^{\text{te}}$. La résistance de l'induit du moteur est : $R = 1 \Omega$.

1. Représenter les allures de u et u_K en fonction du temps.
2. Exprimer la valeur moyenne de u en fonction de V et α .
3. Représenter les allures de i_K et i_D en fonction du temps.
4. Exprimer les valeurs moyennes des courants i_K et i_D en fonction de I et α .

5. Déterminer l'intensité I du courant dans le moteur en fonction de V , E , R et α .
6. Application numérique : Calculer U_{moy} , I et i_{Dmoy} pour $V = 220$ V, $E = 145$ V et $\alpha = 0,7$.
7. Établir la relation liant la vitesse N du moteur (en tr/min) à α pour $E = 0,153N$, sachant que $R = 1 \Omega$, $V = 220$ V et $I = 9$ A.
8. Tracer N en fonction de α .

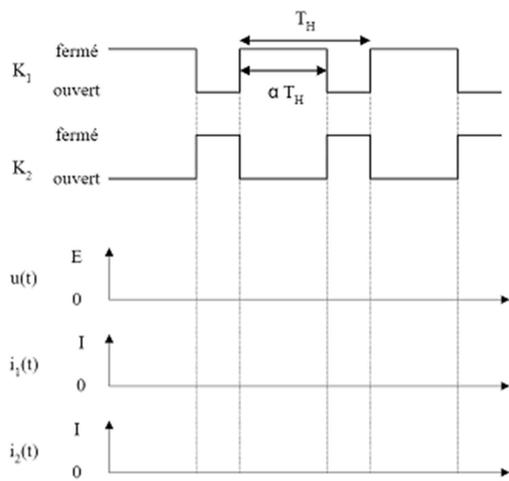


EXO 3 : Hacheur parallèle



Les deux interrupteurs électroniques sont supposés parfaits.

1. On donne les séquences de conduction de K_1 et K_2 . Compléter les chronogrammes :



2. Donner la relation entre U_{moy} , α et E .

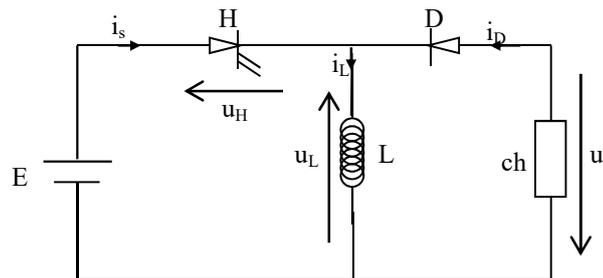
EXO 4:

Le montage de la figure suivant fonctionne en régime permanent par l'intermédiaire de l'interrupteur (H) unidirectionnel en courant commandable à l'ouverture et à la fermeture de façon séquentielle :

- de $t_0 = 0$ à $t_1 = \alpha T$ H est fermé
- de $t_1 = \alpha T$ à $t_2 = T$ H est ouvert

On donne $E = 48V$, $L = 25mH$, la charge (ch) est constituée par la mise en parallèle d'une résistance $R = 100\Omega$, et d'un condensateur de capacité $C = 100\mu F$ de période de hachage $T = 500\mu s$.

- 1- Quel est l'état de la diode D lorsque H est fermé ? comment évolue i_s durant cette période ? on note I_0 sa valeur à $t_0 = 0$
- 2- Lorsque H est ouvert que vaut le courant i_L , comment évolue-t-il ? représenter u_L , u_H et i_L sur une période.
- 3- Calculer l'ondulation du courant sur une période pour $\alpha = 1/3$ et $\alpha = 2/3$.
- 4- Exprimer U_{cmoy} en fonction de E et du rapport cyclique α
- 5- Calculer numériquement la valeur moyenne de u_c pour un rapport cyclique de $1/3$ puis pour $2/3$, dans chaque cas évaluer le courant dans la charge



Corrigés des exercices

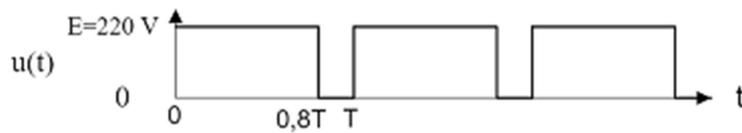
EXO 1 : Hacheur sériel

1- Etude de la tension u pour $\alpha = 0,80$.

1.1

$0 < t < \alpha T$ K fermé : $u = E$

$\alpha T < t < T$ K ouvert : phase de roue libre : D conduit et $u = 0$ V



1.2

$$U_{moy} = \alpha E$$

$$\text{A.N : } U_{moy} = 0,8 \times 220 = 176 \text{ V}$$

2- Fonctionnement du moteur pour $\alpha = 0,80$

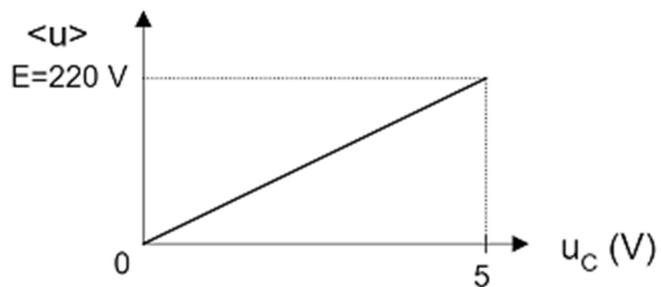
$$E' = U_{moy} - R I_{moy} = 176 - 2 \times 10 = 156 \text{ V}$$

$$E' = kN \text{ alors, } N = E' / k = 156 / 0,2 = 780 \text{ tr/min}$$

3.

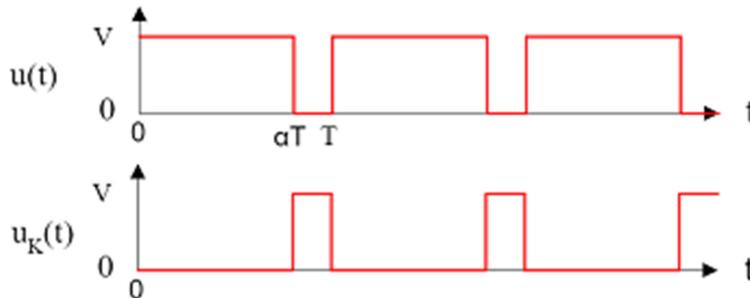
$$\alpha = 0,2 u_c$$

$$U_{moy} = \alpha E = 0,2 u_c E = 0,2 \times 220 u_c = 44 u_c$$



EXO 2 : Hacheur série2

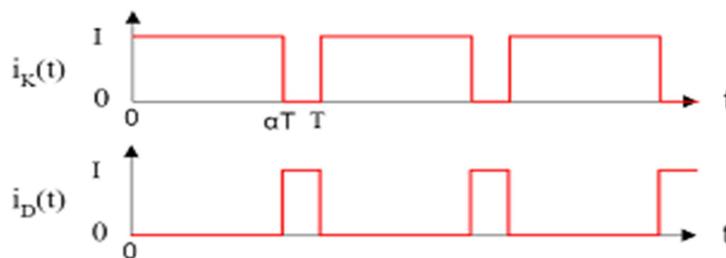
1. Représentation de de u et u_K en fonction du temps.



2. Exprimer la valeur moyenne de u en fonction de V et α .

$$U_{moy} = \alpha V$$

3- Représenter les allures de i_K et i_D en fonction du temps.



4- Exprimer les valeurs moyennes des courants i_K et i_D en fonction de I et α .

$$\begin{aligned} \langle i_K \rangle &= \alpha I \\ \langle i_D \rangle &= (1 - \alpha) I \end{aligned}$$

5- Déterminer l'intensité I du courant dans le moteur en fonction de V , E , R et α .

$$\begin{aligned} \langle u \rangle &= E + RI = \alpha V \\ I &= \frac{\alpha V - E}{R} \end{aligned}$$

6- Application numérique :

Calculer $\langle u \rangle$, I et $\langle i_D \rangle$ pour $V = 220$ V, $E = 145$ V et $\alpha = 0,7$.

$$\begin{aligned} \langle u \rangle &= 154 \text{ V} \\ I &= 9 \text{ A} \\ \langle i_D \rangle &= 2,7 \text{ A} \end{aligned}$$

7- Établir la relation liant la vitesse n du moteur (en tr/min) à α pour $E = 0,153 n$, sachant que $R = 1 \Omega$, $V = 220$ V et $I = 9$ A.

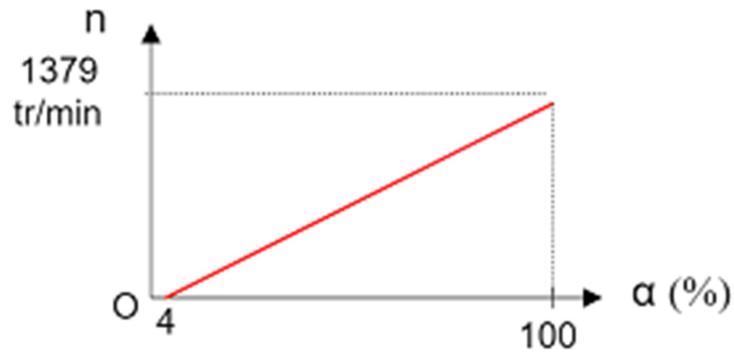
$$\begin{aligned} I &= \frac{\alpha V - 0,153n}{R} \\ n &= \frac{\alpha V - RI}{0,153} \end{aligned}$$

$I = 9$ A = constante car le moteur travaille à couple constant.

D'où :

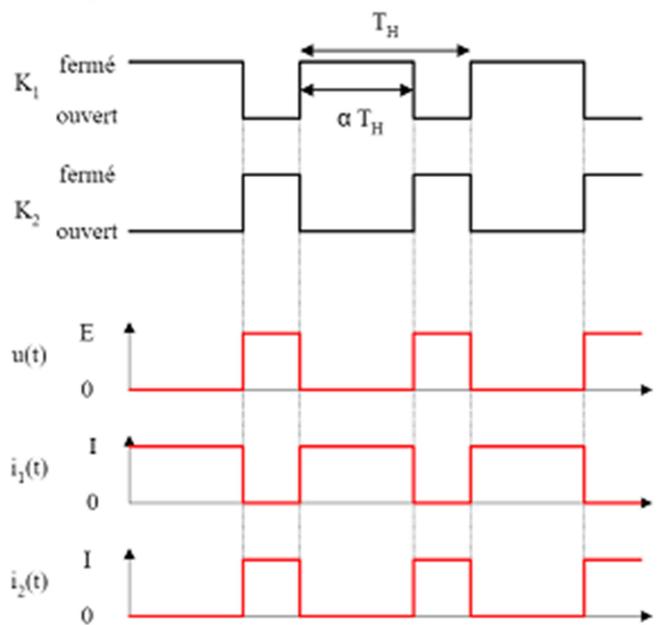
$$n = 1438\alpha - 59$$

8- Tracer n en fonction de α .



EXO 3 : Hacheur parallèle

1. Les chronogrammes :



2. $U_{moy} = f(E, \alpha)$

$$U_{moy} = (1-\alpha)E$$

Alors :

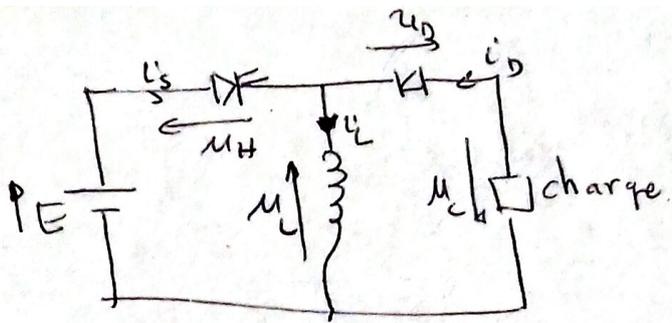
$$E = 1 / (1-\alpha)$$

Le hacheur parallèle est un élévateur de tension.

EX04:

1°) $[0, \alpha T]$ H est fermé

D est bloquée ($E + u_D + u_C = 0$)
 $u_D = -E - u_C < 0$



$$E = M_L = L \frac{di_L}{dt} \Rightarrow i_L(t) = \frac{E}{L} t + I_{min}$$

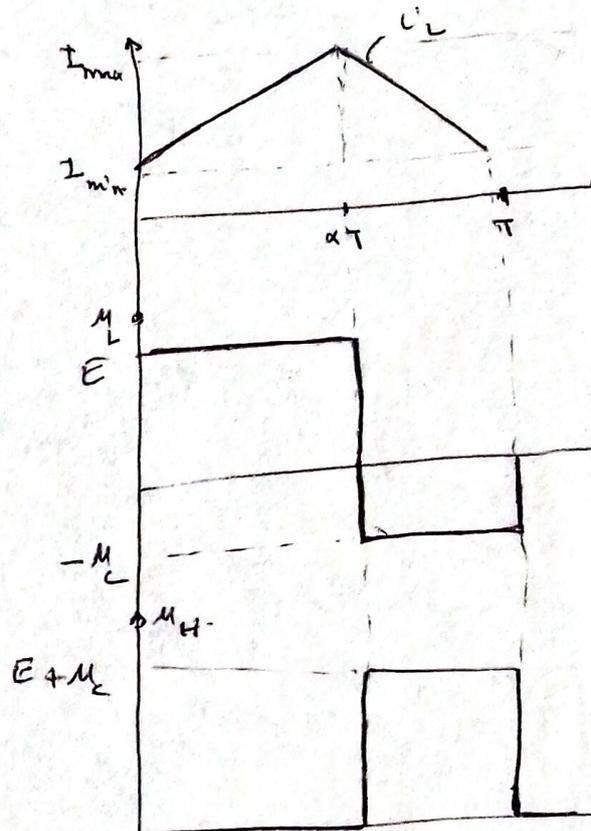
$$u_S = u_L = \frac{E}{L} t + I_0$$

$$M_H = 0$$

2°) H est ouvert $[\alpha T, T]$. à αT , $i_L(\alpha T) = I_{max}$

$$M_L = -M_C = L \frac{di}{dt} \Rightarrow i_L(t) = -\frac{M_C}{L} (t - \alpha T) + I_{max}$$

$$M_H = E - M_L = E + M_C$$



3°) $\Delta I = I_{max} - I_{min}$

$$I_{max} = \frac{E}{L} \alpha T + I_{min}$$

$$I_{min} = -\frac{M_C}{L} (T - \alpha T) + I_{max}$$

$$\Delta I = \frac{E}{L} \alpha T = \frac{48}{25 \times 10^{-3}} \frac{1}{3} \cdot 500 \times 10^{-6} = 0,32 \text{ A. } (\alpha = \frac{1}{3})$$

$$\Delta I = \frac{M_C}{L} (T - \alpha T) = 0,64 \text{ A } (\alpha = \frac{2}{3})$$

$$\Rightarrow M_C (1 - \alpha) = E \alpha \Rightarrow \boxed{\frac{\alpha}{1 - \alpha} E = M_C}$$

$$5°) M_C = \frac{\alpha}{1 - \alpha} E = \begin{cases} 24 \text{ V } (\alpha = \frac{1}{3}) \\ 96 \text{ V } (\alpha = \frac{2}{3}) \end{cases}$$