

Chapitre I : Notions de Bases – MCC et leurs Commandes

2^{ème} partie

II : Contrôle de vitesse Pour moteur a Courant Continu :

L'importance d'un moteur dans les différentes applications industrielles réside dans le fait qu'on puisse contrôler sa vitesse de rotation. Pour une charge donnée, la vitesse Ω est fonction des deux variables (U_a, Φ). Comme indiquée par l'équation de vitesse, donc pour faire varier la vitesse Ω , on doit procéder à la variation de ces deux variables par variateurs électromécaniques ou variateurs électroniques :

$$\Omega = \frac{U_a - R_a \cdot I_a}{k\Phi}$$

A. Variateurs électromécaniques de vitesse

a. Action sur le flux Φ :

En fixant la tension d'alimentation, il est possible donc d'accroître la vitesse par réduction du flux dans la MCC. En général, un rhéostat est placé en série avec l'inducteur shunt et en parallèle avec l'inducteur série. Il est simple et économique.

b. Action sur U_a :

Le contrôle rhéostatique est simple mais onéreux. Utilisable pour un essai pas pour un fonctionnement au régime permanent.

C'est le meilleur procédé de réglage étant donné qu'il permet de varier la vitesse de 0 à Ω_n sans aucune perte d'énergie.

B. 1. Variateurs électroniques de vitesse

Les variateurs de vitesse sont des prés actionneurs analogique c'est-à-dire qu'ils permettent de commander des actionneurs électriques par exemple moteur à courant continue par modulation d'énergie. Ils ont tendance à remplacer les autres méthodes, moins coûteux et de plus en plus fiable même pour les grosses puissances.

2. Les différents types des Variateurs de vitesse pour moteur à courant continue :

On a supposé que le transfert de puissance s'effectuait de la source vers la charge certains convertisseurs peuvent fonctionner dans les deux sens et son qualifiés de réversible.

Pour faire varier la vitesse du moteur nous allons faire varier sa tension d'induit à l'aide d'un convertisseur statique, pour cela nous avons le choix entre un hacheur (série, 2 quadrants, ou 4 quadrants) ou un redresseur (mixte ou tout thyristor), selon choix et applications.

3. Conversion ALTERNATIF/ CONTINU : le redresseur

Le redressement est la conversion d'une tension alternative en une tension continue, on l'utilise pour alimenter un récepteur en continu à partir du réseau de distribution alternatif pour varier la vitesse de machine à courant continu.



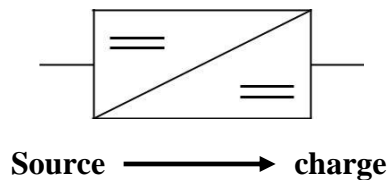
4. Conversion CONTINU/ CONTINU: le hacheur

Les hacheurs sont les convertisseurs statiques continu-continu permettant de fabriquer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe.

Il permet de faire varier la vitesse d'une machine à courant continu par action sur le rapport cyclique afin de régler la valeur moyenne de la tension qui alimente le moteur.



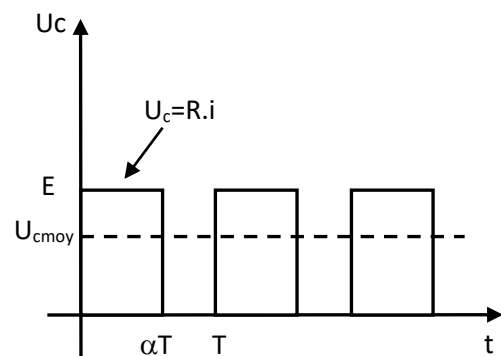
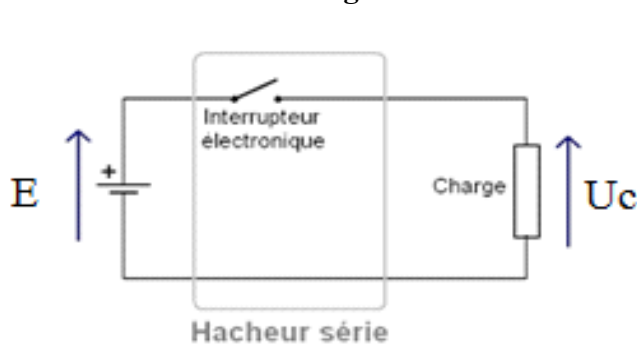
Donc, le hacheur est un interrupteur qui peut être placé en série (dévolteur) ou en parallèle (survolteur) selon l'utilisation. Il est constitué par un transistor ou thyristor. Son symbole normalisé est :



5. Hacheur série

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

5.1. Alimentation d'une charge résistive



Figure(1) : Charge résistive

figure (2) : tension et courant pour charge résistive

Pour $0 < t < \alpha T$: L'interrupteur est fermé on a : $E = U_c = Ri$

Pour $\alpha T < t < T$: L'interrupteur est ouvert on a : $U_c = Ri = 0$, avec $0 < \alpha < 1$.

α : est appelé rapport cyclique.

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

La tension moyenne aux bornes de la charge est :

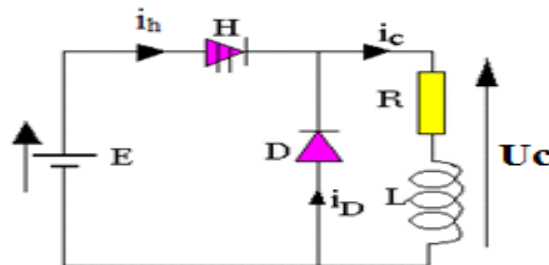
$$U_{cmoy} = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} E dt + \int_{\alpha T}^T 0 dt = \frac{1}{T} [Et]_0^{\alpha T} = \alpha E$$

L'intensité dans la charge est : $I_c = I_{moy} = U_c / R = E / R$

5.2. Alimentation d'une charge inductive

Quand on utilise une charge inductive, celle-ci accumule à chaque instant une énergie électromagnétique $W = Li^2/2$. Il serait dangereux de libérer brutalement cette énergie par l'ouverture du hacheur, il en résulterait une surtension ($e = -d/dt$) qui provoquerait de graves dommages. Cet inconvénient est évité par utilisation d'une diode dite de roue libre. Elle assure le passage du courant (décharge de l'inductance) quand le hacheur H est ouvert.

Le fonctionnement est alors continu et le courant évolue entre une I_{min} et I_{max} .



Figure(3) : Charge inductive (R,L)

a) interrupteur H fermé : $0 < t < \alpha T$, la tension aux bornes de la charge (R,L), avec la diode D ouverte, est : $U_c = E = Ri_c + L di_c/dt$, le courant de charge est $i_c = i_h = E/R + (I_{min} - E/R) \cdot \exp(-t/\tau)$

Avec, $\tau = L/R$, constante de temps.

D'où la valeur maximale du courant de charge est : $I_{max} = E/R + (I_{min} - E/R) \cdot \exp(-\alpha T/\tau)$

b) interrupteur H ouvert : $\alpha T < t < T$, on a la tension aux bornes de la charge (R,L) D fermée. Ce qui permet à l'inductance de libérer l'énergie emmagasinée.

$U_c = 0 = Ri_c + L di_c/dt$ et le courant de charge est ; $i_c = i_D = I_{max} \cdot \exp(-(t - \alpha T)/\tau)$

D'où : $I_{min} = I_{max} \exp(-(T - \alpha T)/\tau)$

Si U_c désigne la valeur instantanée aux bornes de la charge, on a : $U_c = E = Ri_c + L di_c/dt$

Si l'on intègre les deux membres pendant la durée d'une période, il vient :

$$\int_0^T U_c dt = R \int_0^T i_c dt + \int_{I_m}^{I_m} L di_c$$

d'où $E\alpha T = Ri_{moy}.T + 0$ soit $i_c = i_{moy} = E\alpha T / RT$

On en déduit la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge ($U_{moy} = U_c = \alpha.E$).

Ainsi on arrive à la même conclusion qu'avec une résistance pure.

La figure (4), donne l'allure de la tension de la charge U_c , courant dans la charge I_c , courant I_h dans l'interrupteur H et le courant dans la diode I_D .

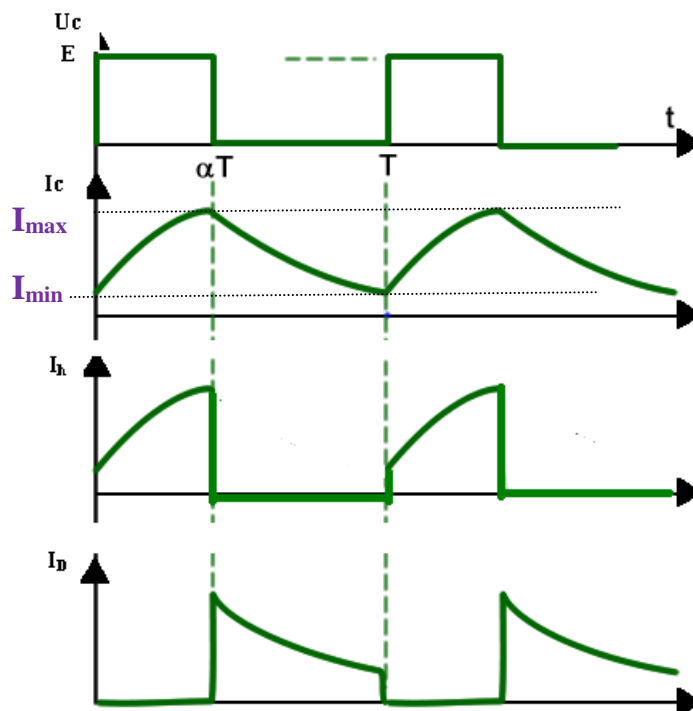


Figure (4) : Formes d'ondes des principales grandeurs d'un Hacheur série pour une charge R-L en conduction continue.

5.3. Alimentation d'une charge inductive avec fcm (Moteur)

Tension aux bornes de la charge par hacheur série

Quand alimente un récepteur qui comporte une f.c.é.m. la conduction peut être soit continue, soit discontinue. Si U_c désigne la tension aux bornes de la charge qui comporte (R, L, E') on a la relation suivante : $U_c = Ri_c + L di_c / dt + E'$

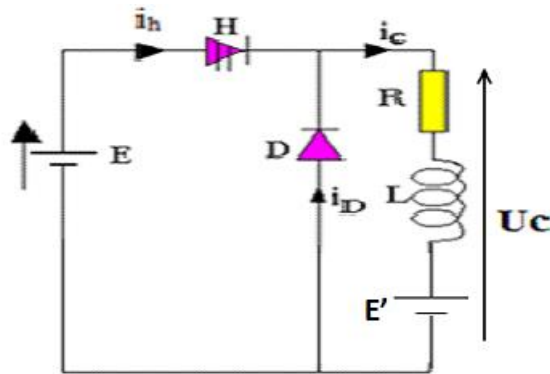
D'où ; $U_c dt = Ri_c dt + L di_c + E' dt$

Par intégration sur une période T : $\int_0^T U_c dt = R \int_0^T i_c dt + \int_{I_m}^{I_m} L di_c + \int_0^T E' dt$

D'où : $E\alpha T = Ri_{moy}.T + 0 + E'.T$ $i_c = i_{moy} = E\alpha / R - E' / R$

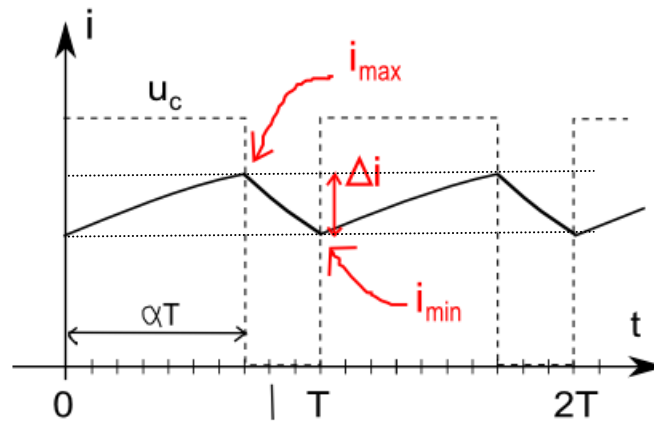
D'où : $U_c = \alpha E = Ri_c + E'$

Elle a conservé la même valeur que pour une impédance de charge sans fcm.



Figure(5) : Charge (R, L, E') (alimentation d'une MCC)

5.4. Amélioration le lissage du courant



Figure(6) : ondulation du courant

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

$$\Delta i = I_{max} - I_{min} = \frac{E\alpha(1 - \alpha)}{LF}$$

Pour réduire cette ondulation de courant, on peut donc soit :

- augmenter la fréquence F du hacheur.
- ou augmenter le L du moteur en ajoutant à celui-ci une inductance de lissage en série.

Remarque :

Dans le cas le plus général, en conduction discontinue, l'inductance existe mais ne possède pas une valeur suffisante pour assurer une conduction continue. La conduction est, discontinue si la valeur minimale I_{min} du courant s'annule à chaque période à $t = t_1$ pour $t_1 \in [\alpha T, T]$; soit $i(t_1) = 0$.

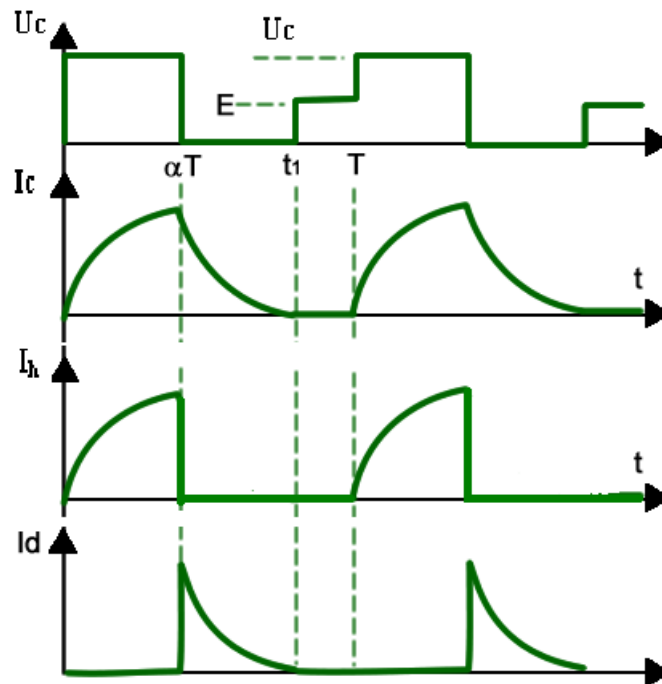


Figure (7) : Formes d'ondes des principales grandeurs d'un Hacheur série pour une charge R-L en conduction discontinue.

De 0 à αT , l'interrupteur H est passant, U_c vaut E , le courant augmente exponentiellement, la diode est bloquée.

De αT à t_1 , l'interrupteur H est bloqué, le courant diminue exponentiellement, la diode conduit tant que le courant est positif, la tension est nulle en négligeant la tension de seuil de la diode.

A $t=t_1$, le courant s'annule, la diode se bloque, U_c vaut $+E'$ jusqu'à la commande suivante du transistor.

6. Hacheur parallèle

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

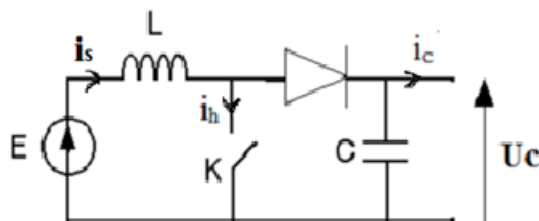


Figure (8) : hacheur parallèle (survolteur)

Pour $0 < t < \alpha T$ le hacheur conduit on a : $E = L \frac{di_c}{dt}$

Le courant i varie linéairement de I_{min} pour $t=0$ à I_{max} pour $t=\alpha T$; soit :

$$i_s = \frac{E.t}{L} + I_{min} \quad , \quad d'o\grave{u} \quad I_{max} = \frac{E\alpha T}{L} + I_{min} \quad (1)$$

Pour $\alpha T < t < T$, le hacheur est ouvert, l'énergie emmagasinée dans l'inductance se divise dans le condensateur et dans la charge. Comme le courant i_d passe d'une valeur nulle à la valeur i_s . Il faut une capacité pour absorber cette brusque variation sans provoquer des surtensions dangereuses pour l'équipement.

La tension U_c étant supposée constante, on a :

$$U_c = E - L \frac{di_s}{dt} \quad \text{soit} \quad (E - U_c)di = -Ldi_s$$

$$d'o\grave{u} \quad (U_c - E)(T - \alpha T) = -L(I_{min} - I_{max}) \quad (2)$$

D'après (1) et (2), il vient :

$$(U_c - E)(T - \alpha T) = E\alpha T$$

$$\text{Soit :} \quad U_c = \frac{E}{(1-\alpha)}$$

Ainsi on peut conclure :

Le HP est équivalent à un transformateur à courant continu élévateur de tension.

Si on néglige les pertes dans l'inductance on peut écrire :

$$E. I_s = U_c. I_c = \frac{E}{(1-\alpha)}. I_c \Rightarrow I_c = I_s(1-\alpha)$$

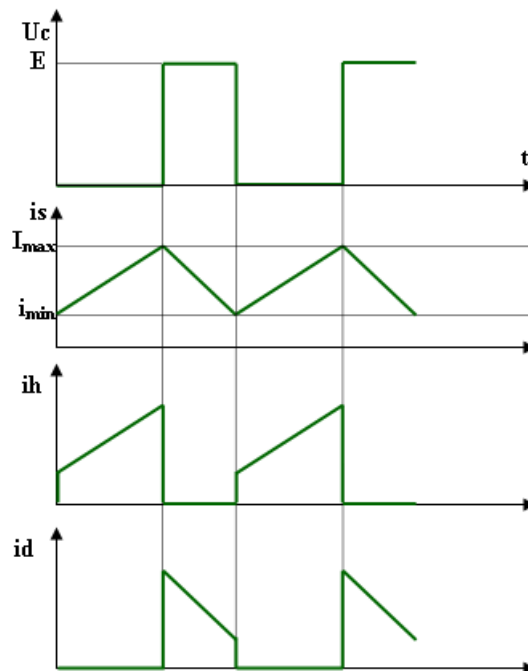
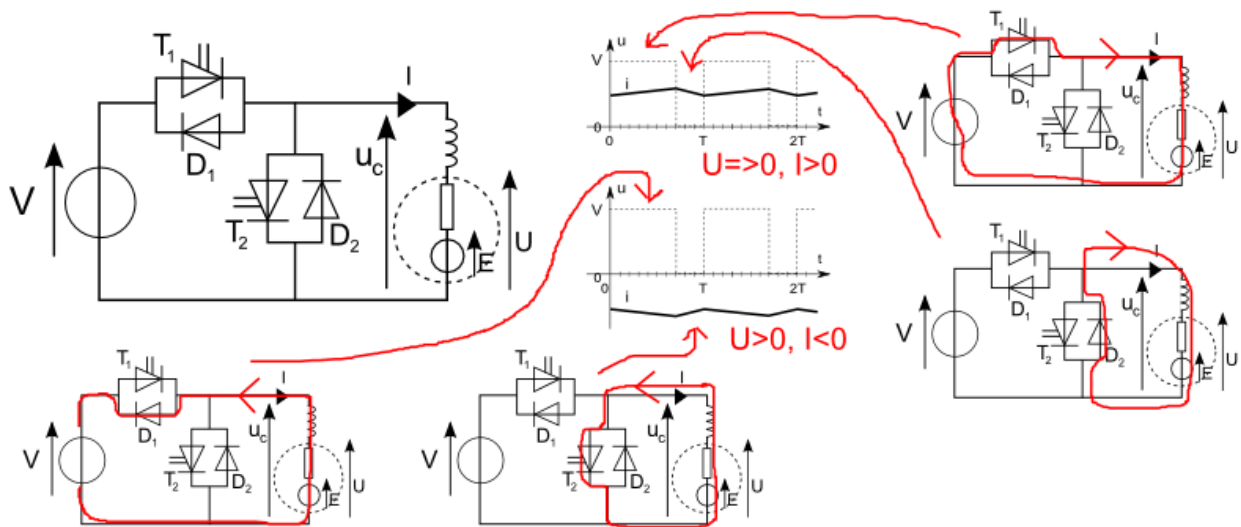


Figure (9) : Formes d'ondes des principales grandeurs d'un Hacheur parallèle pour une charge (R-L-E') en conduction continue.

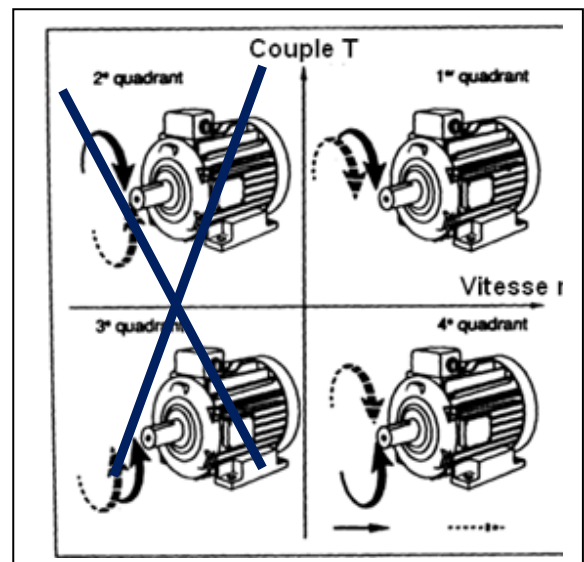
Une application importante du hacheur parallèle concerne le freinage par récupération d'un moteur de traction. **E** représente la fem du moteur que l'on fait fonctionner en génératrice à excitation séparée tandis que **U_c** est la tension du réseau.

7. Hacheur réversible en courant

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

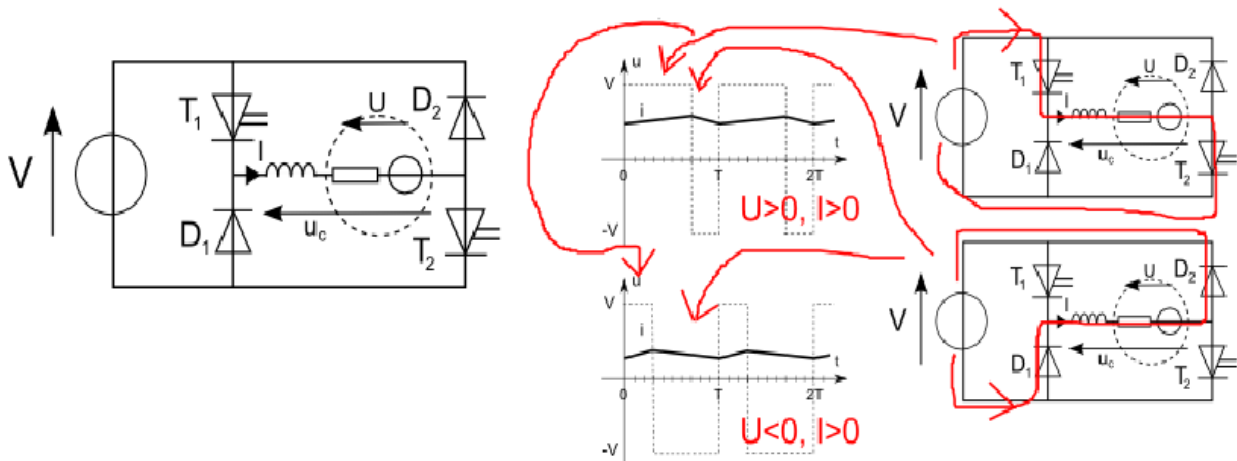


On a alors la valeur moyenne $U_c = \alpha \cdot V$
 Ce montage permet un fonctionnement en moteur et freinage avant.



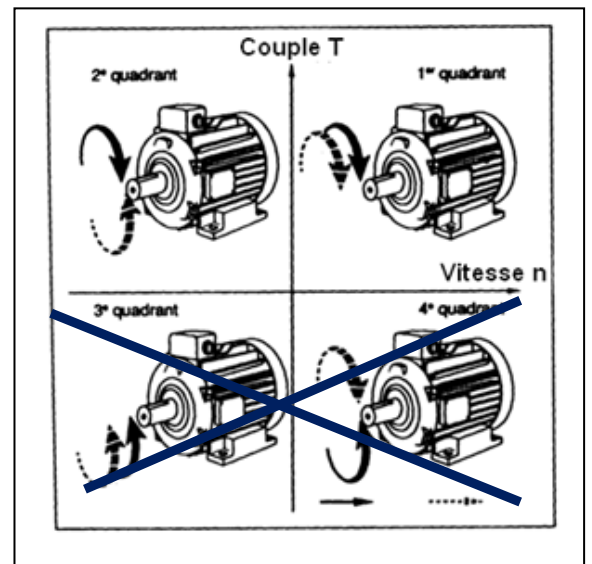
8. Hacheur réversible en tension

On l'obtient en réalisant une structure en pont :



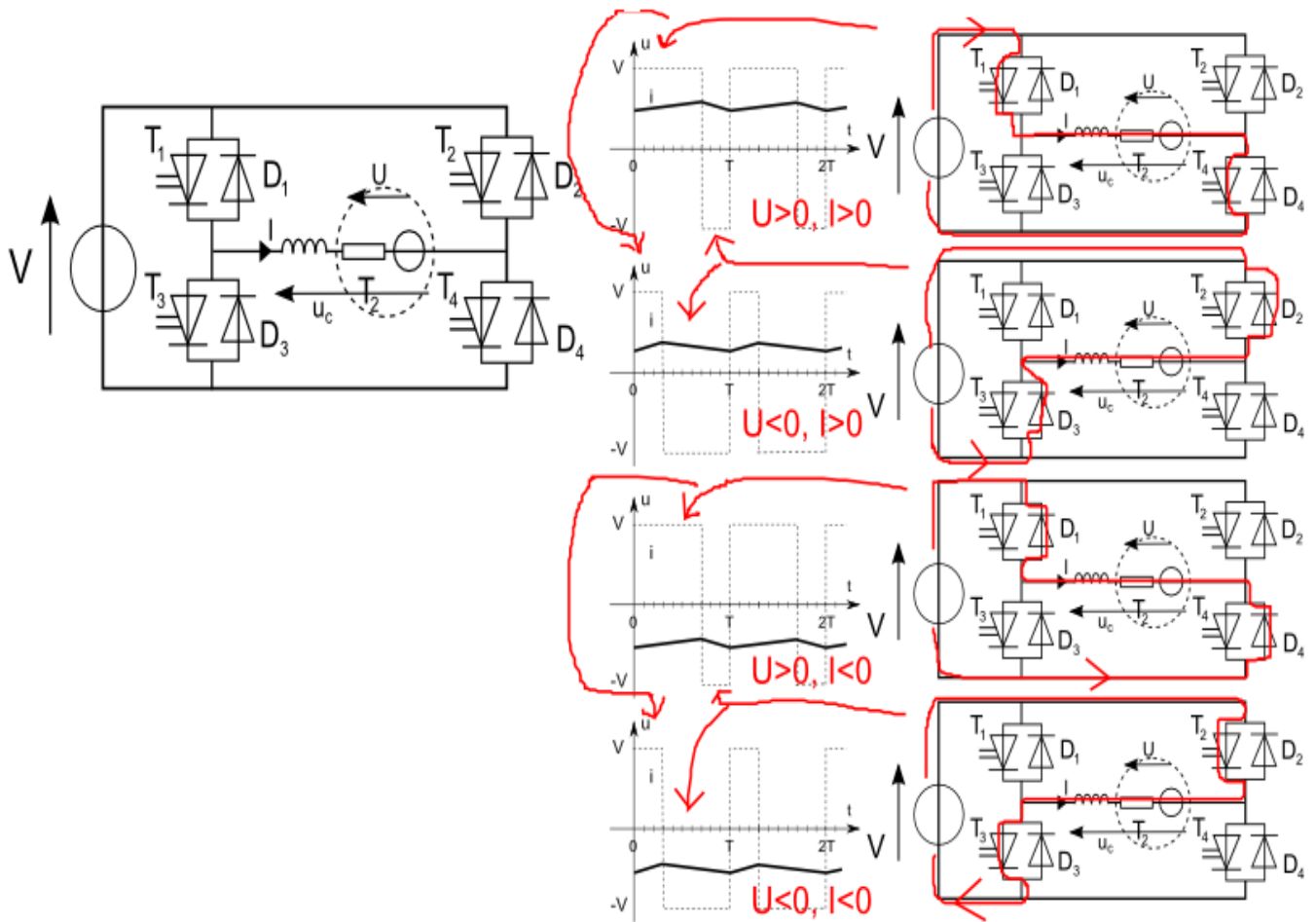
On a alors la valeur moyenne $U_c = (2\alpha - 1) \times V$

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



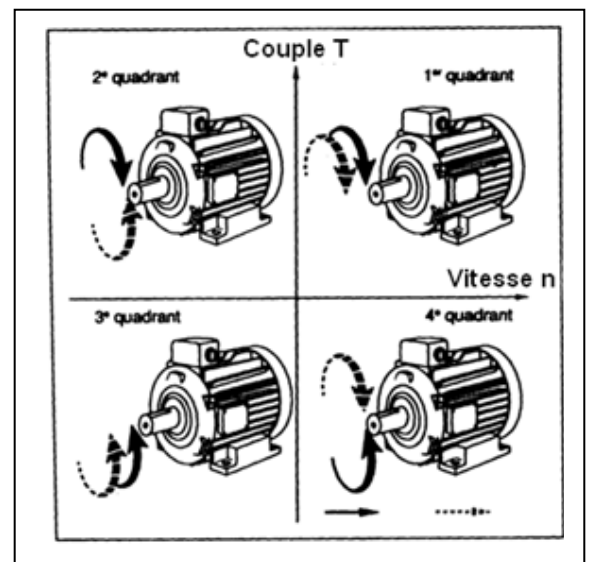
9. hacheur réversible en courant et en tension

On l'obtient en combinant les 2 montages précédents.



On a alors la valeur moyenne $U_C = (2\alpha - 1) \times V$

Ce montage permet un fonctionnement dans les 4 quadrants.

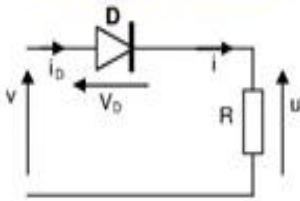


7. Les redresseurs

Redresseurs à diodes (redresseurs non commandés)

Redresseur monophasé- simple alternance-

Schéma de montage

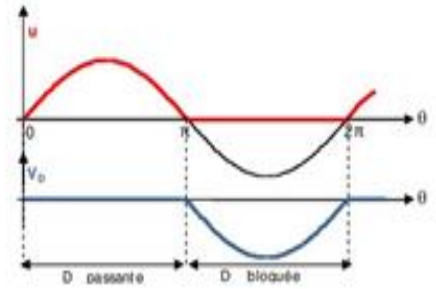


Grandeurs caractéristiques

Valeur moyenne de u : $u_{moy} = V\sqrt{2}/\pi$

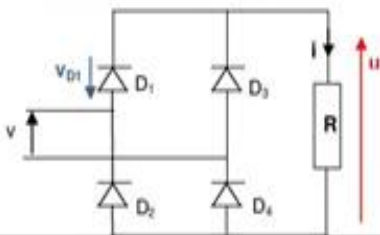
Valeur efficace de u : $U = V\sqrt{2}/2$

Tension maximale supportée par la diode : $V_{Dmax} = V\sqrt{2}$



Redresseur monophasé- double alternance-

Schéma de montage PD2



Grandeurs caractéristiques

Valeur moyenne de u : $u_{moy} = 2V\sqrt{2}/\pi$

Valeur efficace de u : $U = V$

Tension maximale supportée par la diode : $V_{Dmax} = V\sqrt{2}$

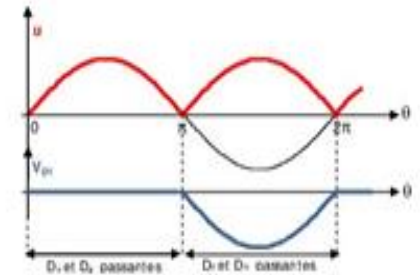
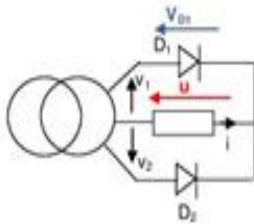


Schéma de montage P2

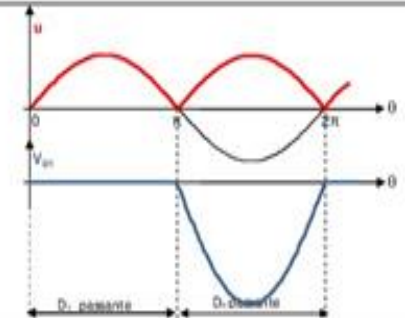


Grandeurs caractéristiques

Valeur moyenne de u : $u_{moy} = 2V\sqrt{2}/\pi$

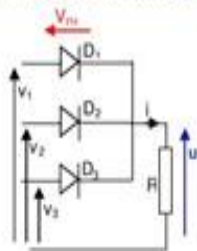
Valeur efficace de u : $U = V$

Tension maximale supportée par la diode : $V_{Dmax} = 2V\sqrt{2}$



Redresseur triphasé

Schéma de montage P3



Grandeurs caractéristiques

Valeur moyenne de u :

$$u_{moy} = 3\sqrt{3} V\sqrt{2}/2\pi$$

Valeur efficace de u :

$$U = V\sqrt{1 + (\sin 2\pi/3) / 2\pi/3}$$

Tension maximale supportée par la diode : $V_{Dmax} = \sqrt{3} V\sqrt{2}$

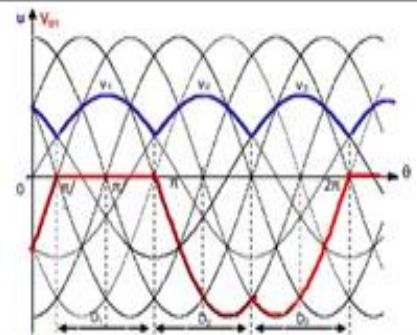
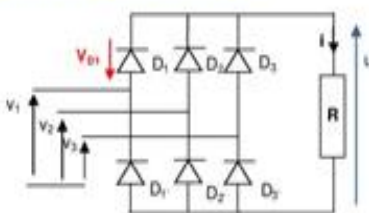


Schéma de montage PD3



Grandeurs caractéristiques

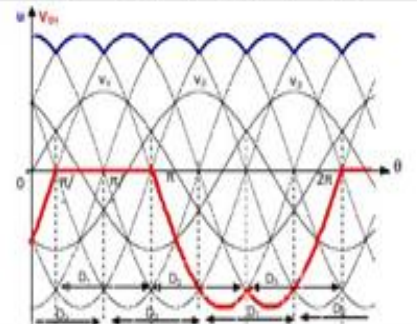
Valeur moyenne de u :

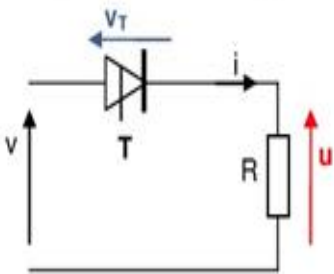
$$u_{moy} = 3\sqrt{3} V\sqrt{2}/\pi$$

Valeur efficace de u :

$$U = \sqrt{3} V\sqrt{1 + (\sin \pi/3) / \pi/3}$$

Tension maximale supportée par la diode : $V_{Dmax} = \sqrt{3} V\sqrt{2}$



Redresseurs à thyristors monophasés (Redresseur commandé - simple alternance)
Schéma de montage


α = l'angle de retard à l'amorçage

Grandeurs caractéristiques

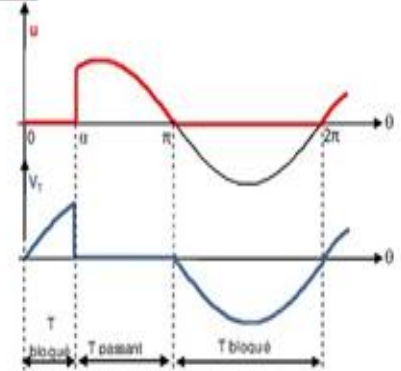
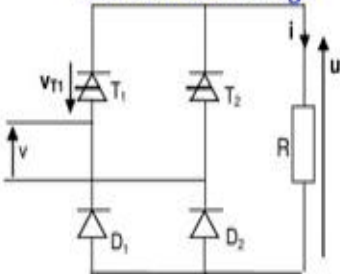
Valeur moyenne de u :

$$u_{\text{moy}} = V\sqrt{2}/\pi \cdot (1 + \cos \alpha)/2$$

Valeur efficace de u :

$$U = V\sqrt{2}/2 \cdot \sqrt{(1 - \alpha/\pi + \sin 2\alpha/2\pi)}$$

Tension maximale supportée par le thyristor : $v_{T\text{max}} = V\sqrt{2}$


Redresseur commandé - double alternance - pont mixte
Schéma de montage

Grandeurs caractéristiques

Valeur moyenne de u :

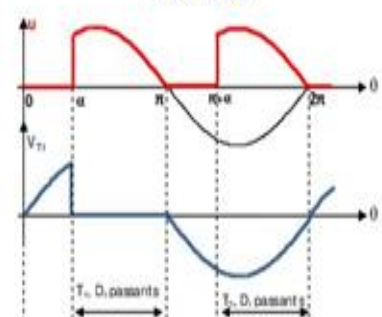
$$u_{\text{moy}} = 2V\sqrt{2}/\pi \cdot (1 + \cos \alpha)/2$$

Valeur efficace de u :

$$U = V \cdot \sqrt{(1 - \alpha/\pi + \sin 2\alpha/2\pi)}$$

Tension maximale supportée par le thyristor :

$$v_{T\text{max}} = v_{D\text{max}} = V\sqrt{2}$$

Courbes

Tous ces montages en ponts de diodes pour l'alimentation des moteurs :

- Ne sont pas des variateurs de vitesse.
- Donnent un sens unique du courant dans l'induit.
- Donnent une tension moyenne non réglable.
- Ne permettent qu'un fonctionnement moteur dans un seul sens.
- N'ont pas de contrôle du courant au démarrage.
- Sont des alimentations à tension continue redressée commutée.
- Doivent obligatoirement disposer d'un dispositif de démarrage.

En agissant sur l'excitation ils permettent :

- Le fonctionnement moteur dans les deux sens par inversion du flux à l'arrêt.
- Une légère variation de vitesse par action sur le flux.

Tous les montages en ponts à thyristors avec $0 < \alpha < 90$ pour l'alimentation des moteurs :

- Donnent une tension moyenne réglable.
- Sont des variateurs de vitesses.
- Sont des alimentations à tension continue redressée commutée.
- Donnent un sens unique de courant dans l'induit.
- Ne permettent qu'un fonctionnement moteur et dans un seul sens.

- Contrôlent le courant par le pont au démarrage.
- N'ont pas besoin de dispositifs supplémentaires au démarrage.

En agissant sur l'excitation ils permettent :

- Le fonctionnement moteur dans les deux sens par inversion du flux à l'arrêt.
- Le fonctionnement en survitesse par diminution du flux.

les montages en ponts semi commandés pour l'alimentation des moteurs :

- Donnent une tension moyenne réglable.
- Sont des variateurs de vitesses.
- Sont des alimentations à tension continue redressée commutée.
- Donnent un sens unique de courant dans l'induit.
- Ne permettent qu'un fonctionnement moteur et dans un seul sens.
- N'ont pas besoin de dispositifs supplémentaires au démarrage.
- Contrôlent le courant par le pont au démarrage.

En agissant sur l'excitation ils permettent :

- Le fonctionnement moteur dans les deux sens par inversion du flux à l'arrêt.
- Le fonctionnement en survitesse par diminution du flux.

Bibliographie :

1. Pinard, Michel : « La commande électronique des machines » (2013, Dunod, Paris).
2. Guy Séguier, Francis Labrique, Philippe Delarue : « Electronique de puissance. Structures, commandes, applications ». 10^{ème} édition, cours et exercices –Master et écoles d'ingénieurs, (Dunod, Paris, 2015).
3. Francis Milsant : « Cours d'Electrotechnique à l'usage de l'enseignement supérieur/ Machines électriques/Commande Electronique » Edition Ellipses, France 1992.
4. Max Marty, Daniel Dixneuf, Delphine Garcia Gilabert « Principes d'électrotechnique _ Cours et exercices corrigés » Licence. Master. Ecole d'ingénieurs, (2005, Dunod, Paris)

Sites internet : cours sitelec : <https://sitelec.org/cours.htm>