

CH2. – COMMANDE DES MACHINES A COURANT CONTINU

I. LA MACHINE A COURANT CONTINU (rappel)

1 – Principe

L'application par excellence de la loi de Laplace est le moteur à courant continu. Cette loi affirme que l'action d'un champ magnétique sur un courant produit une force. Cette force engendre un couple pour réaliser un moteur.

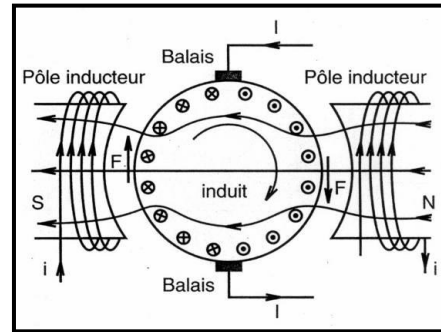
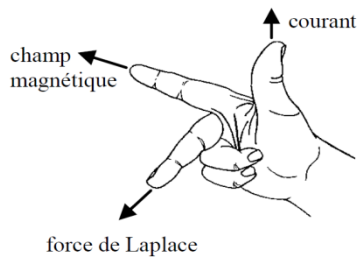


Figure (1) : principes fondamentaux du champ magnétique dans le fonctionnement d'un MCC

Le champ statorique fixe est créé par un élément appelé inducteur qui est soit un aimant, soit un électroaimant alimenté par un courant continu.

Le champ rotorique est créé par une armature mobile constituée de conducteurs bobinés axialement et alimentés en courant continu.

Quand les inducteurs sont alimentés, ils créent un champ magnétique dans l'entrefer.

Quand l'induit (rotor) est alimenté, ses conducteurs situés sous un même pôle sont parcourus par des courants de même sens et sont soumis à une force de Laplace. Les conducteurs situés sous le pôle opposé sont soumis à une force de même intensité et de sens opposé.

Les deux forces créent un couple qui fait tourner le moteur.

2 – Constitution

Le stator (inducteur) produit le champ magnétique (ou flux d'excitation). Ce champ est créé soit à partir d'un bobinage, soit à l'aide d'aimants permanents collés à l'intérieur de du stator.

Le rotor (induit), solidaire de l'arbre, reçoit le courant de puissance par l'intermédiaire du collecteur assurant avec les balais un contact glissant.

3 – Types de moteurs

a. Moteurs à excitation en dérivation « shunt » :

Les enroulements de l'inducteur et l'induit sont reliés en parallèle. Une seule tension d'alimentation est utilisée, le flux ψ est constant. Alimentés à tension constante, ils ont les mêmes caractéristiques que les moteurs à excitation indépendante. Leur caractéristique principale est de disposer d'une vitesse peu sensible à la charge.

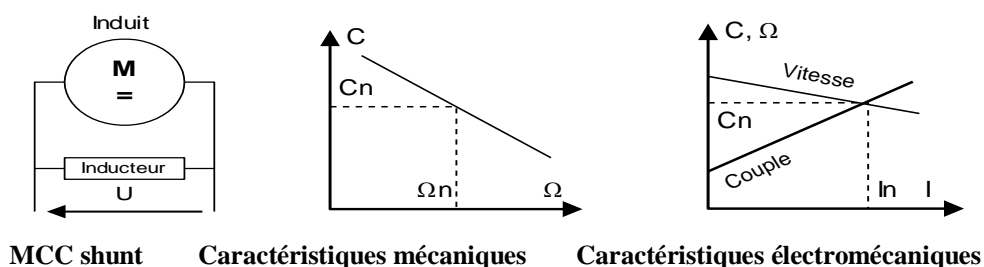
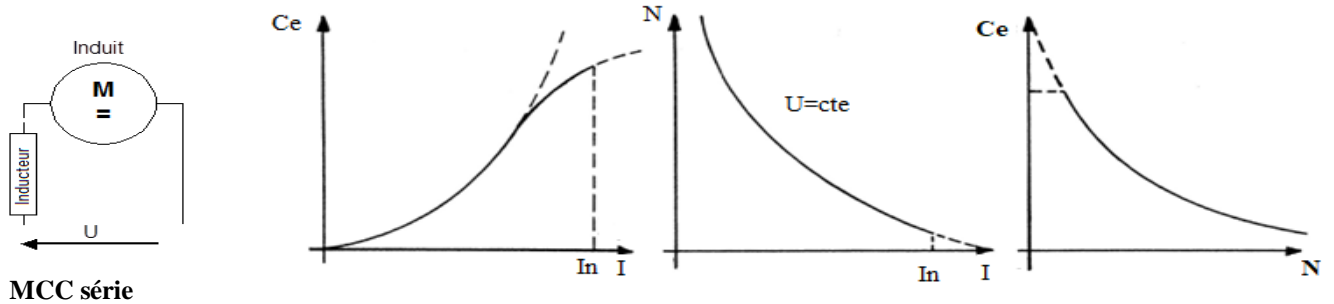


Figure (1) : Moteur shunt

b. Moteurs à excitation série :

les enroulements inducteurs et induits sont montés en série, la tension d'alimentation est unique avec un même courant qui les traverse. (Moteur universel). Ces moteurs ont un très fort couple de démarrage et sont utilisés principalement en traction électrique (domaine ferroviaire).



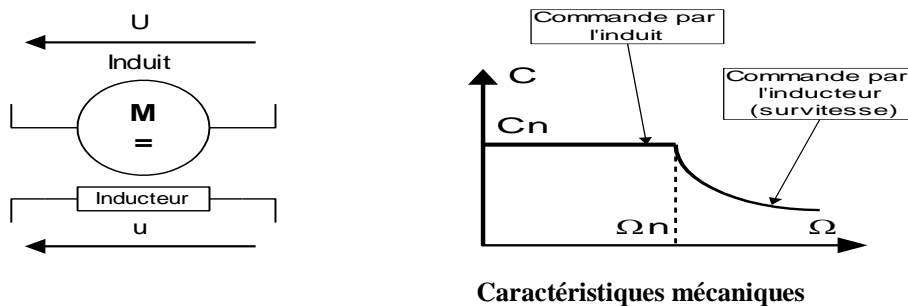
Caractéristiques électromécaniques et mécaniques

Figure (2) : MCC série

c. Moteurs à excitation indépendante (séparée):

Ce sont les moteurs à courant continu standards. Ces moteurs ont leurs alimentations d'inducteur et d'induit totalement séparées. Pour faire varier leur vitesse, ils peuvent ainsi être commandés par l'induit (à flux constant) ou par l'inducteur (à puissance constante) :

- Commandés par l'induit, leur vitesse est pratiquement insensible aux variations de charge, mais ils nécessitent de contrôler de fortes puissances électriques.
- Commandés par l'inducteur, ils nécessitent de faibles puissances, mais leur couple est alors variable.

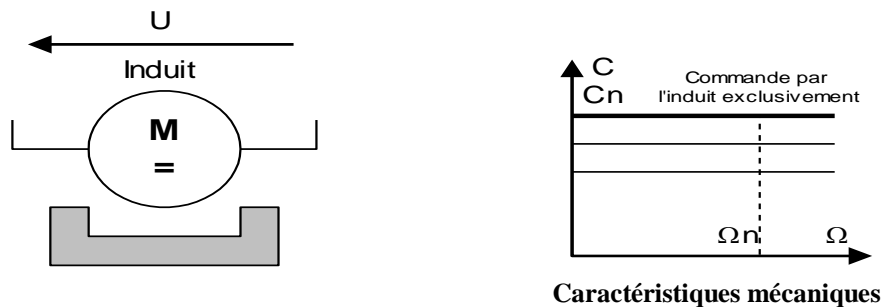


Caractéristiques mécaniques

Figure (3) : MCC séparé

d. Moteurs à aimants permanents

Ces moteurs sont très utilisés pour des puissances allant jusqu'à quelques kW. Ils disposent d'un flux d'induction constant obtenu sans branchement électrique, donc un couple pouvant être élevé au démarrage. La variation de vitesse est très facile à réaliser, Ils sont très utilisés en robotique.



Caractéristiques mécaniques

Figure (4) : MCC à aimant permanent

d. Moteurs compound : A excitation série-parallèle (composée ou « compound ») Cette technologie permet de réunir les qualités du moteur à excitation série et du moteur à excitation parallèle. Ce moteur comporte deux enroulements par pôle inducteur. L'un est en parallèle avec l'induit. Il est parcouru par un faible courant au regard du courant de travail. L'autre est en série. Le moteur est à flux additif si les ampères-tours des deux enroulements ajoutent leurs effets. Il est à flux soustractif dans le cas contraire, mais ce mode de montage est très rarement utilisé car il conduit à un fonctionnement instable pour les fortes charges.

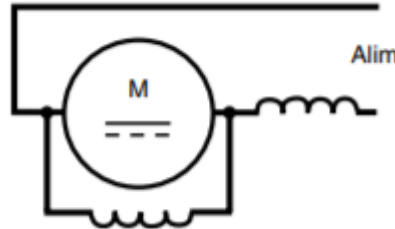


Figure (5) : MCC compound

4 - Equations et caractéristiques :

<p>La modélisation se fera pour un moteur à excitation séparée dont la commande est réalisée par l'induit (flux constant).</p> <ul style="list-style-type: none"> • I_e : courant d'excitation en ampères • U_e : tension d'alimentation des inducteurs 	
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

<p>Variables :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Flux utile : $\varphi(t)$ en Wb • Courant dans l'induit : $i(t)$ en A • Force contre électromotrice : $e(t)$ en V • Tension d'alimentation de l'induit : $U_a(t)$ en V • Fréquence de rotation : $\omega(t)$ en rad/s • Couple moteur : C_m en Nm • Couple électromagnétique $C_{em}(t)$ en Nm • Couple utile C_u en Nm , <p>RQ : $C_m=C_{em}=C_u$ quand les pertes mécaniques et magnétique sont négligeables.</p>	<p>Constantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Résistance de l'induit : R en ohms • Inductance de l'induit : L en H
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

La force contre électromotrice est proportionnelle au flux utile et à la vitesse de rotation :

$$e(t) = k' \cdot \varphi(t) \cdot \omega(t)$$

Comme le flux est constant, $k' \cdot \varphi(t) = cte = k$

k_c est une constante de couple : $k_c = \frac{C_{em}(t)}{i_a(t)}$ en Nm/A

k_v est une constante de vitesse : $k_v = \frac{e(t)}{\omega(t)}$ en V/(rad/s) ; en général $k_c=k_v$,

donc $k = \frac{C_{em}}{I_a} = \frac{e}{\omega}$

Puissance électromagnétique : $P_{em} = e(t) \cdot i(t) = C_{em}(t) \cdot \omega(t)$

Equation de la maille électrique de l'induit au régime transitoire:

$$U_a = R_a I_a + e + L_a \frac{di_a}{dt} \tag{I.1}$$

Equation d'équilibre dynamique (la vitesse) :

$$C_{em} - C_r = J \cdot \frac{d\omega}{dt} + f_v \omega \tag{I.2}$$

Avec f_v le coefficient de frottement visqueux et $C_r(t)$ le couple résistant de la charge à entraîner.

J est l'inertie totale du mécanisme ramenée sur l'arbre moteur.

Force contre électromotrice et vitesse :

Au régime permanent, l'équation électrique (1) s'écrit : $U_a = R_a I_a + e$ et $e = k_v \omega$

$$\omega = \frac{U_a - R_a I_a}{k_v} \tag{I.3}$$

Avec ; $k_v = k' \varphi$

Puissance électromécanique : c'est la puissance électrique réellement transformée en puissance mécanique :

$$P_{em} = C_{em} \cdot \omega = e \cdot I_a = U_a I_a - R_a I_a^2 \tag{I.4}$$

Couple électromécanique : issu de la puissance électromécanique, ce couple est légèrement supérieur au couple utile.

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\omega} = \frac{e \cdot I_a}{\omega} = k_c \cdot I_a \tag{I.5}$$

Intensité et couple électromécanique au démarrage : à la mise sous tension le moteur à une vitesse nulle. La force contre électromotrice est donc elle aussi nulle :

$$I_d = \frac{U_a}{R} \text{ et } C_d = k_c \cdot I_d = \frac{k_c U_a}{R}, \text{ avec } R = R_a + R_h, R_h = \text{rhéostat de démarrage.}$$

Intensité et vitesse (caractéristique électromécanique) $\omega=f(I_a)$

L'éq. (3), $\omega = \frac{1}{k_v} (U_a - R_a \cdot I_a)$ est linéaire.

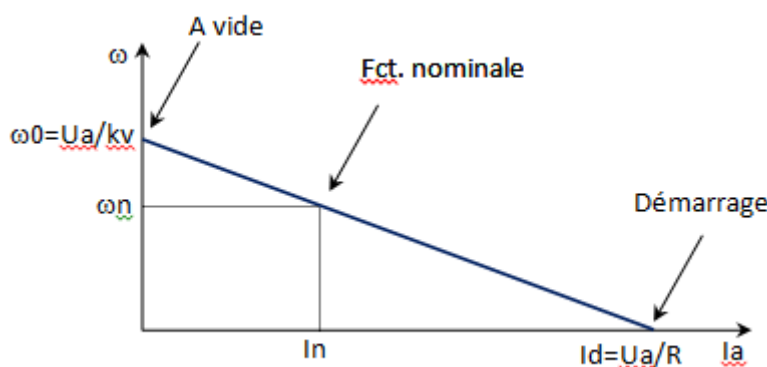


Figure (6) : caractéristique électromécanique

Puissances absorbées :

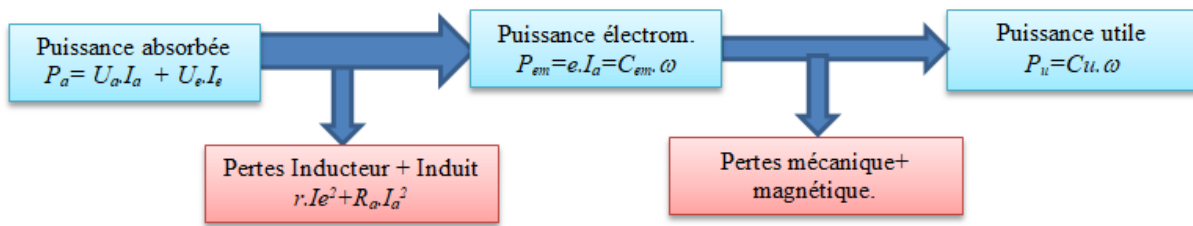
Par l'induit : $P_a = U_a \cdot I_a$,

Par l'inducteur : $P_e = U_e \cdot I_e$

Puissance mécanique utile et rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a + P_e} = \frac{C_{em} \omega}{U_a I_a + U_e I_e}$$

5 – Bilan énergétique :



Figure(7): Bilan énergétique

6 – Mode de fonctionnement et utilisation

Le point de fonctionnement en charge, comme pour tous les moteurs, est défini par l'intersection entre la caractéristique mécanique du moteur et celle de la charge entraînée.

a. Mode de fonctionnement en régulation de vitesse

Les deux modes de fonctionnement possibles pour un MCC sont :

- Le fonctionnement à couple constant (c'est à dire à courant constant et à flux constant) avec réglage de la vitesse par la tension d'induit.
- Le fonctionnement à puissance constante avec diminution du flux pour augmenter la vitesse au-delà de sa valeur nominale. On parle aussi de l'excitation par réduction du courant inducteur. Ce mode est impossible avec les moteurs à aimants permanents.

La plupart des applications fonctionnent à couple constant car le moteur peut y fournir un couple constant quelle que soit la vitesse demandée. Il est même capable d'y fournir son couple nominal sans s'échauffer normalement.

b. Inversion du sens de rotation

Deux possibilités existent pour inverser le sens de rotation d'un moteur à courant continu :

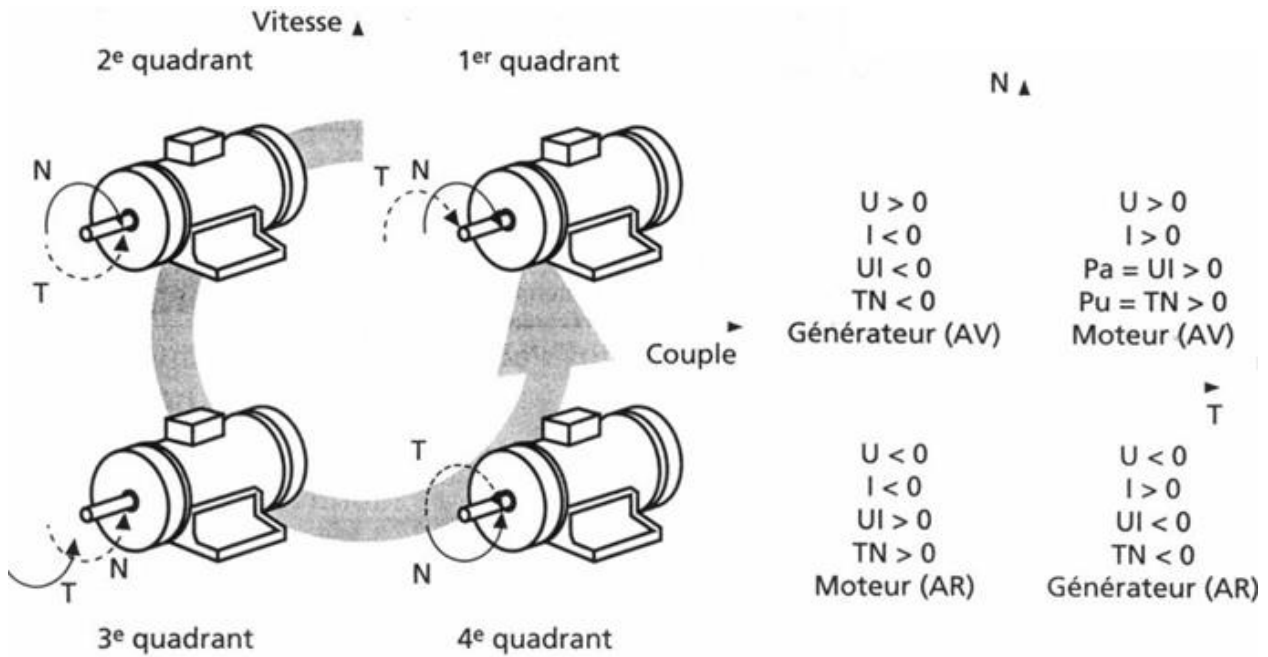
- changer le sens de l'induction (impossible pour les moteurs à aimant permanent) en inversant le sens du courant (les polarités) dans l'inducteur
- changer le sens du courant (les polarités) dans l'induit

c. Domaines d'utilisations

- Les marchés de l'électroménager et des équipements automobiles.
- Par le biais du moteur universel, l'outillage et l'électroménager portatif exploitent une adaptation particulière du moteur à courant continu : il s'agit d'un moteur continu sur réseau alternatif.
- Un autre domaine d'emploi est celui des machines spéciales nécessitant de grandes vitesses de rotation (10000 tr/min et plus).

7 – Réversibilité des machines à courant continu :

Le moteur à courant continu est réversible : de moteur, il peut devenir générateur. Dans ce cas, la chaîne de conversion s'inverse. Le moteur reçoit de l'énergie mécanique (énergie cinétique) et la transforme en énergie électrique. Cette possibilité de fonctionner en génératrice offre au moteur un avantageux moyen de freinage.



Figure(8) Quadrants de fonctionnement d'un MCC

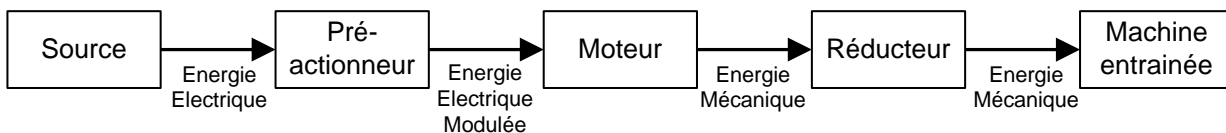
Si on se place dans les 4 quadrants de fonctionnement d'un moteur :

- Dans le 1er et le 3ème quadrant, la machine fonctionne en moteur
- Dans le 2ème et 4ème quadrant, la machine tournante fonctionne en générateur. Ces deux cas peuvent être des modes de marche en freinage car la machine absorbe de l'énergie mécanique et fournit de l'énergie électrique.

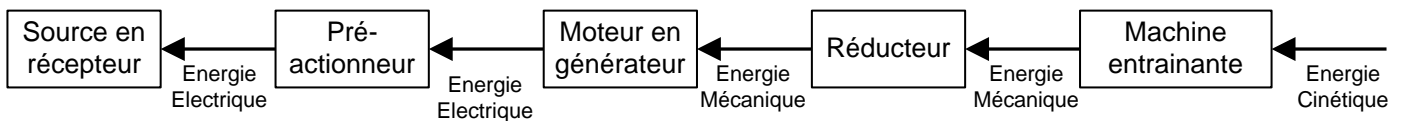
La machine à courant continu est réversible. Elle fonctionne aussi bien en moteur qu'en générateur. Cette conversion de l'énergie n'est possible que si les éléments de la chaîne cinématique sont réversibles. De plus, si la récupération de l'énergie de freinage est souhaitable, le pré-actionneur et la source doivent aussi être réversibles.

Pour le choix d'un variateur de vitesse pour moteur à courant continu, les quatre quadrants constituent un critère essentiel.

CHAINE DIRECTE



CHAINE INVERSE



II. Variation de vitesse pour moteur à 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 c.à.d. le courant I_a (la vitesse Ω est fonction des trois variables (U_a , R_a , Φ)). Comme indiquée par l'équation de vitesse, donc pour faire varier la vitesse Ω , on doit procéder à la variation de ces trois paramètres:

$$\omega = \frac{U_a - R_a \cdot I_a}{k\phi}$$

a. Action sur la résistance d'induit (R_a+R_h) :

On fixe la tension d'alimentation et le flux à leur valeur nominal et on fait varier la résistance d'induit en utilisant un rhéostat.

b. Action sur le flux ϕ :

En fixant la tension d'alimentation, il est possible donc de varier la vitesse par variation du flux.

c. Action sur U_a :

C'est le meilleur réglage, et le plus utilisé, procédé de réglage étant donné qu'il permet de varier la vitesse de 0 à ω_n .

Rq : Certains ouvrages nomment les procédés (a,b,c) variateurs électromécaniques.

1. Variateur de vitesse électronique pour moteur à courant continu

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 continu :

Le transfert de puissance s'effectue de la source vers la charge certains convertisseurs peuvent fonctionner dans les deux sens et son qualifiés de réversible.

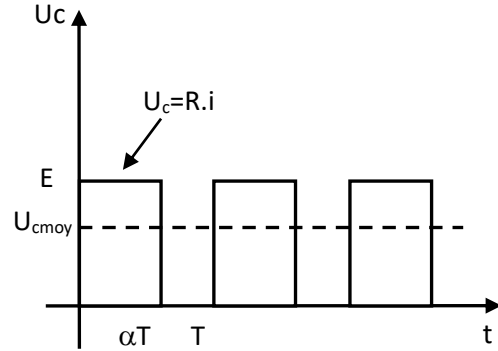
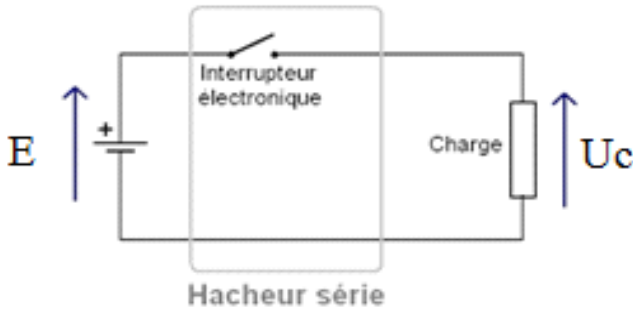
Pour faire varier la vitesse du moteur, on doit varier sa tension d'induit à l'aide d'un convertisseur statique. Ici, on présentera les principales topologies des convertisseurs les plus répandus dans les entraînements à vitesse variable (les hacheurs et les redresseurs).

3. Les hacheurs.

a. 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.

3.1. Alimentation d'une charge résistive



Figure(10) : Charge résistive

figure (11) : 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 :

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

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

3.2. 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} .

a) interrupteur H fermé : $0 < t < \alpha T$, la tension aux bornes de la charge (R,L), avec la diode D ouverte, est :

$$U_c = E = Ri_c + L di_c / dt, \text{ le courant de charge est } i_c = i_h = E/R + (I_{\text{min}} - E/R) \cdot \exp(-t/\tau)$$

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

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

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.

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

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

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 :

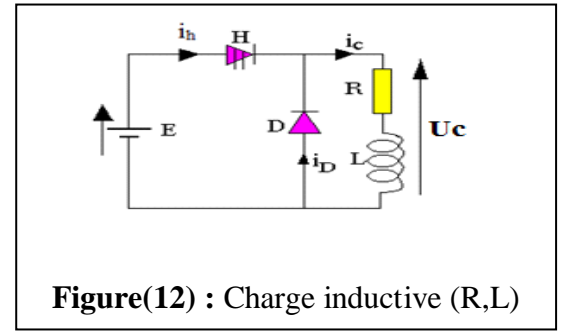
$$\int_0^T U_c dt = R \int_0^T i_c dt + \int_{I_m}^{I_m} L di_c$$

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 (13), 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(12) : Charge inductive (R,L)

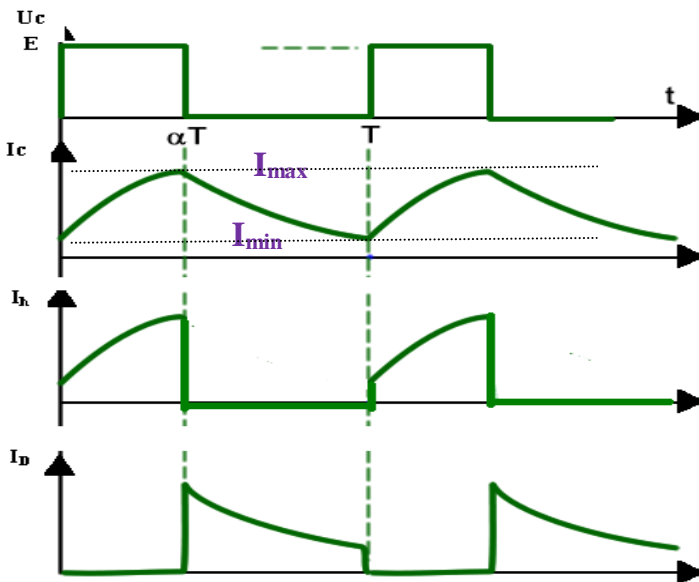


Figure (13) : Formes d'ondes des principales grandeurs d'un Hacheur série pour une charge R-L en conduction continue.

3.3. 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 : $U_c = Ri_c + L di_c / dt + E'$

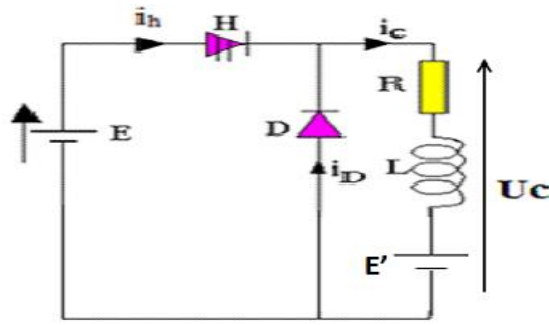
D'où ; $U_c dt = Ri_c dt + L di_c + E' dt$

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

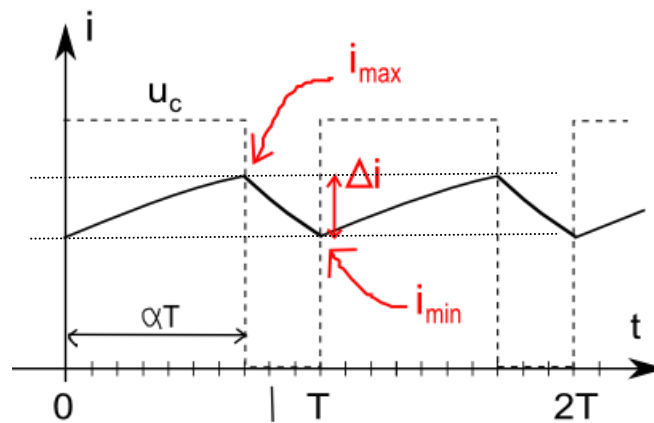
D'où : $U_c = \alpha E = Ri_c + E'$

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



Figure(14) : Charge (R, L, E') (alimentation d'une MCC)

3.4. Amélioration le lissage du courant



Figure(15) : 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 $i(t_1) = 0$.

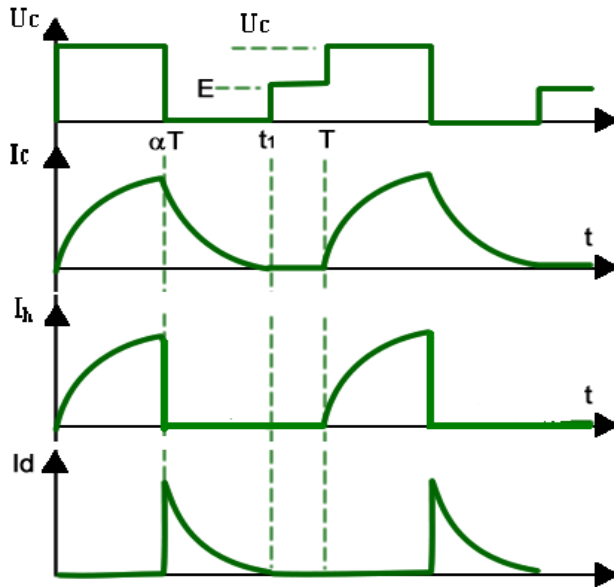


Figure (16) : Formes d'ondes des principales grandeurs d'un Hacheur série pour une charge R-L en conduction discontinue.

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.

b. 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.

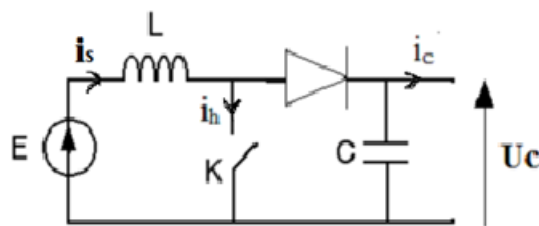


Figure (17) : hacheur parallèle (survolteur)

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 :

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

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 :

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

$$d'où \quad (U_c - E)(T - \alpha T) = -L(I_{min} - I_{max}) \quad (II.2)$$

D'après (II.1) et (II.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 CC élévateur de tension.

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

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

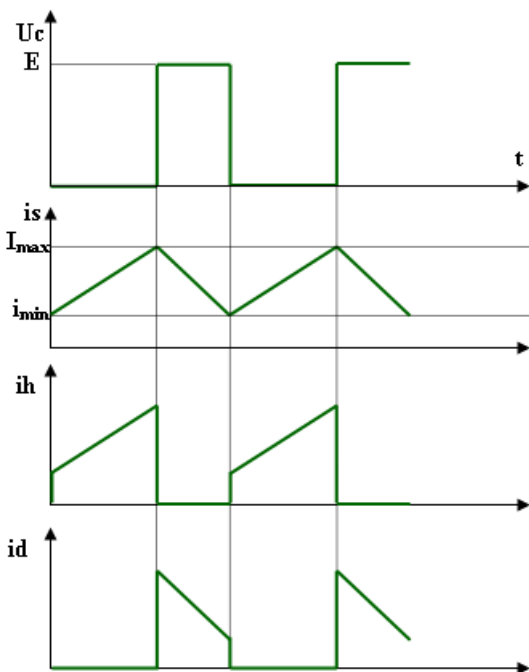
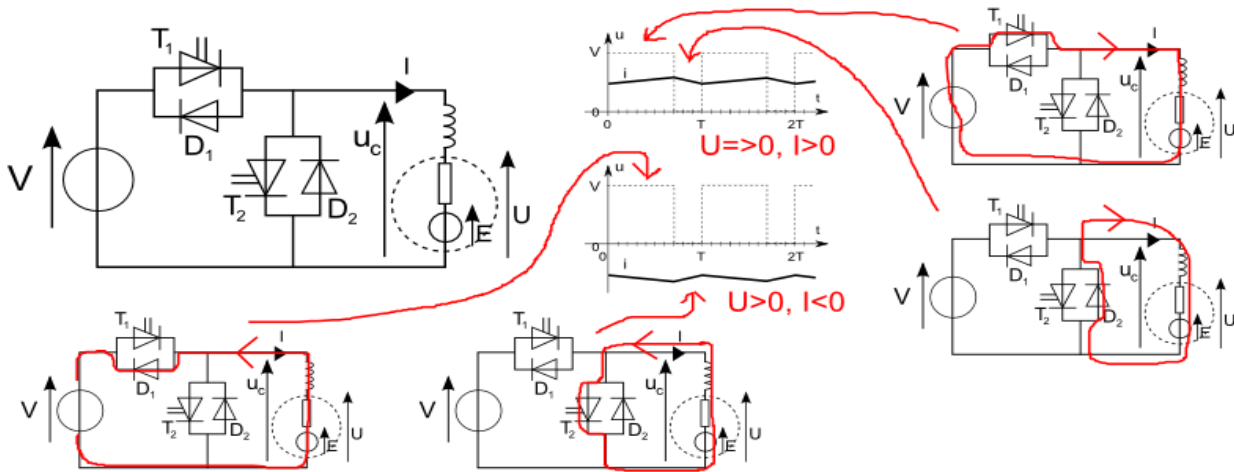


Figure (18) : Formes d'ondes des principales grandeurs d'un Hacheur parallèle pour une charge (R-L-E') en conduction continue.

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.

c. Hacheur réversible en courant

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



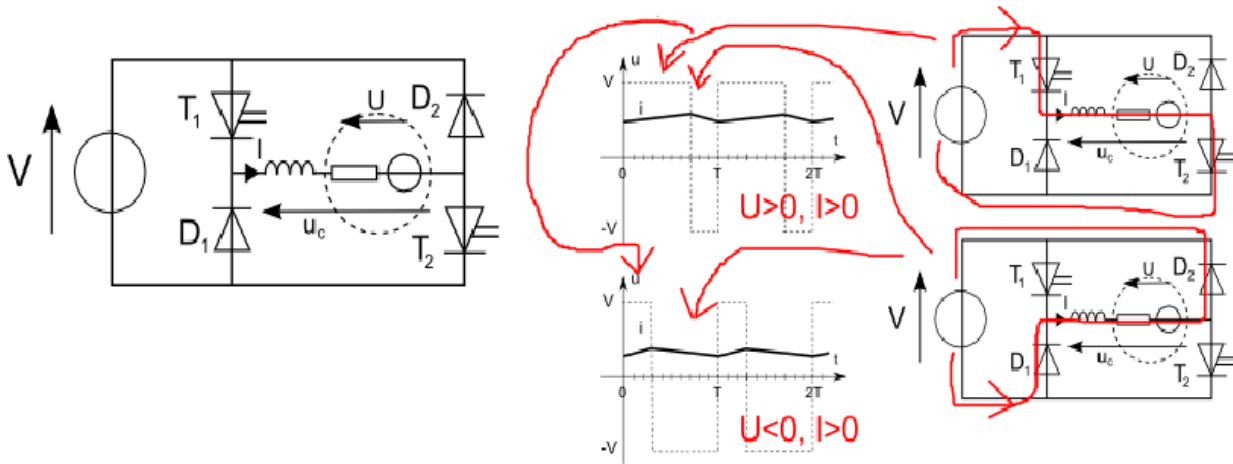
Figure(19) : les séquences de fonctionnements en HR en courant

On a alors la valeur moyenne $U_c = \alpha V$

Ce montage permet un fonctionnement en moteur et freinage avant quadrant 1 et 2.

d. Hacheur réversible en tension

On l’obtient en réalisant une structure en pont :



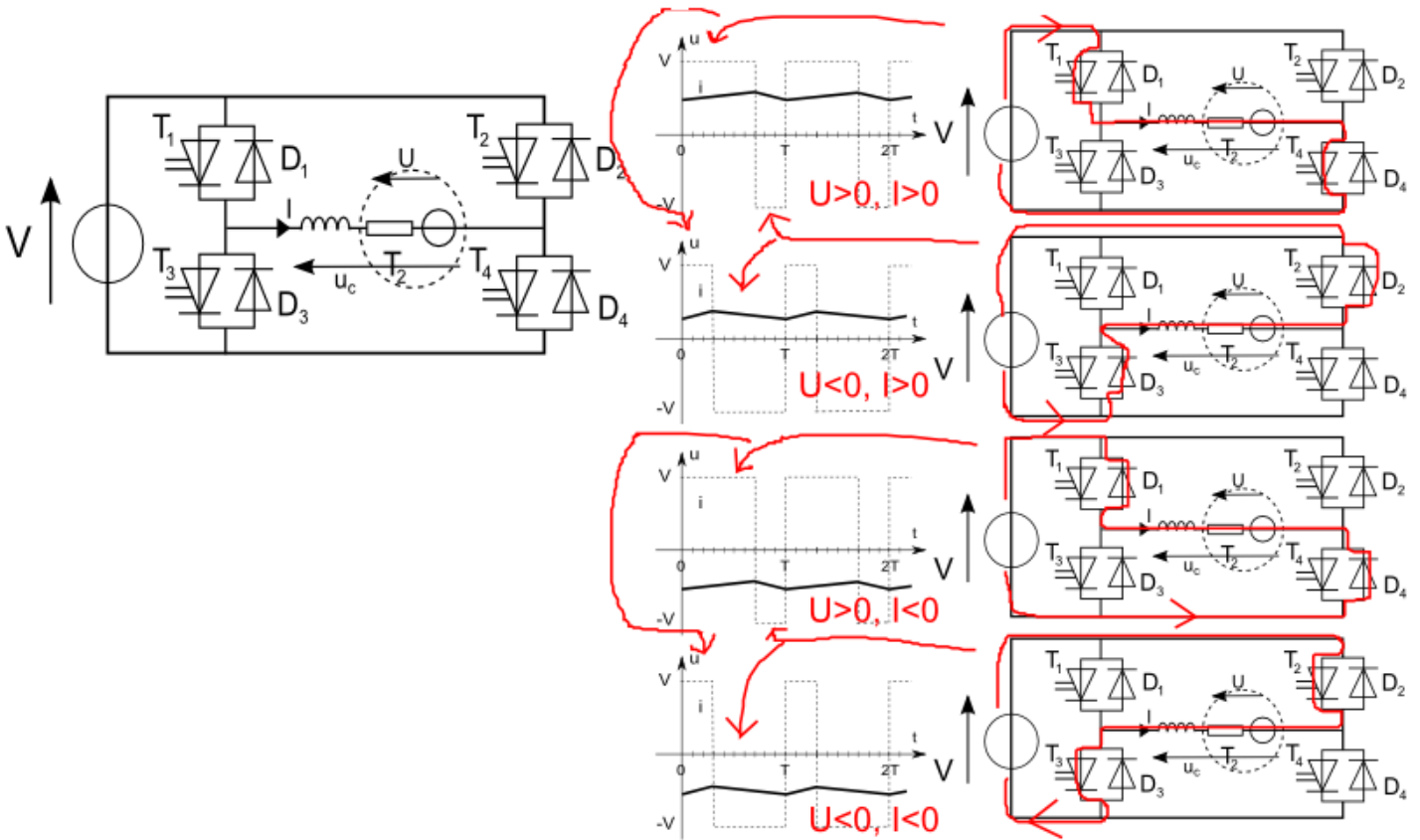
Figure(20) : les séquences de fonctionnements en HR en tension

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

Ce montage permet un fonctionnement en moteur avant et freinage arrière quadrant 1 et 4.

e. hacheur réversible en courant et en tension

On l’obtient en combinant les 2 montages précédents.



Figure(21) : les séquences de fonctionnements en HR en courant et en tension

On a alors la valeur moyenne $U_c = (2\alpha - 1) \times V$ Ce montage permet un fonctionnement dans les 4 quadrants.

4. Les redresseurs

4.1. Les redresseurs monophasés

Il existe différentes topologies des redresseurs mixtes ou complets.

a. Pont mixte monophasé symétrique

Le pont mixte monophasé est constitué de 2 diodes et 2 transistors. Il permet le réglage de la tension de sortie à travers l'angle d'amorçage du thyristor α . La tension de la source est :

$$V(\theta) = V_m \sin \theta, \text{ avec } \theta = \omega t, V_m : \text{valeur maximale.}$$

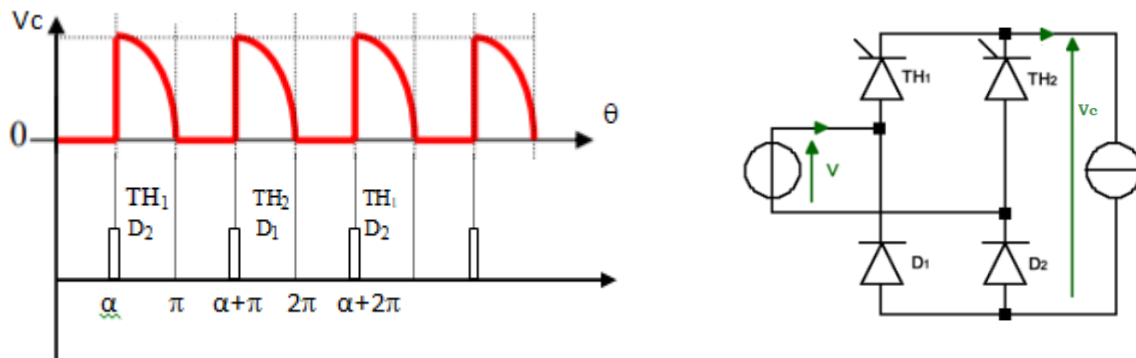


Figure (22) : redresseur monophasé en pont mixte

Il n'est pas réversible en puissance : ne peut pas renvoyer d'énergie sur le réseau alternatif. La valeur moyenne de la tension est réglable avec l'angle d'amorçage α allant de 0 à π . La valeur moyenne est :

$$V_{cmoy} = \frac{1}{T} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \sin\theta d\theta = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos\alpha).$$

En la remplaçant dans l'équation (3) l'équation de la vitesse de rotation du moteur sera :

$$\omega = \frac{U - R_a \cdot I_a}{k_v} = \frac{1}{k_v} \left(\frac{V_m}{\pi} (1 + \cos\alpha) - R_a \cdot I_a \right)$$

b. Pont complet

Il est à 4 thyristors dans lequel on fait varier l'angle d'amorçage α . Il est utilisé lors l'envoi de l'énergie sur le réseau.

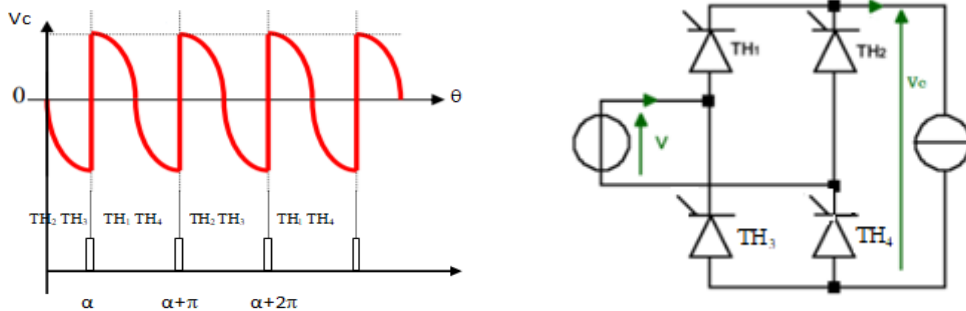


Figure (23) : redresseur monophasé en pont complet

La tension moyenne aux bornes du moteur est :

$$V_{cmoy} = \frac{1}{T} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \sin\theta d\theta = \frac{2V_m}{\pi} \cos\alpha$$

Avec cette tension, l'équation de la vitesse du moteur devient :

$$\omega = \frac{U - R_a \cdot I_a}{k_v} = \frac{1}{k_v} \left(\frac{2V_m}{\pi} \cos\alpha - R_a \cdot I_a \right)$$

Selon l'angle d'amorçage, il existe trois possibilités de fonctionnement du moteur :

- $\alpha < \pi/2$: la tension moyenne aux bornes de la machine à courant continu est positive. Il s'agit du fonctionnement en moteur.
- $\alpha = \pi/2$: La tension moyenne aux bornes du récepteur est nulle, il n'y a aucun courant dans le circuit.
- $\pi/2 < \alpha < \pi$: fonctionnement en onduleur. La tension moyenne s'inverse.

Les montages redresseurs sont naturellement réversibles en tension. Pour obtenir la réversibilité en courant et construire ainsi un convertisseur quatre quadrants, on associe à tête-bêche deux redresseurs de même type.

4.2. Les redresseurs triphasés

Le pont triphasé permet de ne pas trop déséquilibrer le réseau alternatif.

La particularité de ne comporter que des thyristors permet une réversibilité en puissance et de renvoyer de la puissance au réseau alternatif.

Le courant de sortie est toujours positif mais la tension moyenne peut devenir négative (onduleur assisté) si l'angle d'amorçage est compris entre 90° et 180°.

Lorsqu'on amorce les thyristors avec un angle de retard à l'amorçage de 0°, la tension de sortie est similaire à celle obtenue avec un pont de diodes.

Pour un angle d'amorçage non nul, il suffit de décaler les intervalles de conduction du même angle et reconstruire la tension de sortie.

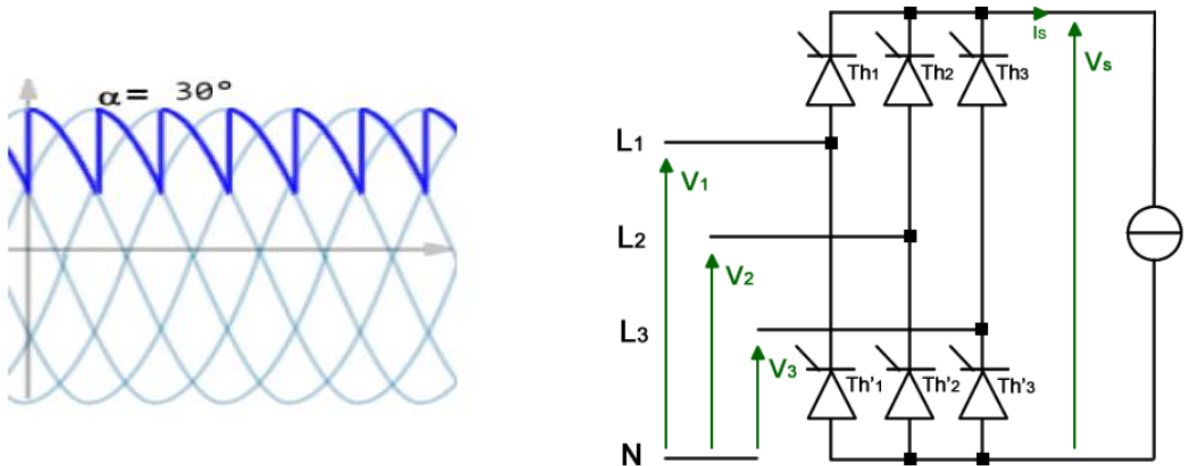


Figure (24) : redresseur triphasé en pont complet

La tension moyenne aux bornes du moteur est :

$$V_{cmoy} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos\alpha$$

Avec cette tension, l'équation de la vitesse du moteur devient :

$$\omega = \frac{U - R_a \cdot I_a}{k_v} = \frac{1}{k_v} \left(\frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos\alpha - R_a \cdot I_a \right)$$

Récapitulation

Tous les 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.

Tous les montages en ponts à thyristors avec 0 α 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.

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.

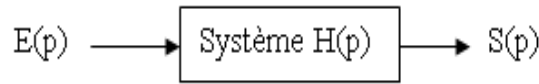
En agissant sur l'excitation ils permettent :

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

III. Régulation de la vitesse des machines à courant continu:

1. Introduction :

L'association du convertisseur à la machine à courant continu permet le réglage de la vitesse ou la position. Lorsque le système de commande n'a pas d'information sur l'évolution et le comportement du système commandé, on ne sait pas si notre système commandé converge vers la solution souhaitée ou non. Ici, on parle alors de la commande en Boucle Ouverte (BO), comme schématisé dans la figure (III.1).



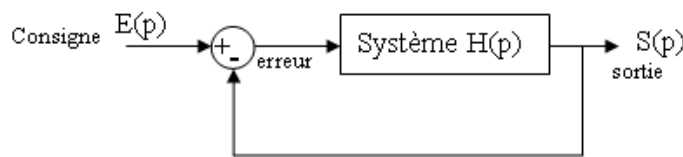
Figure(III.1) : schématisation d'un système en BO

$E(p)$: signal d'entrée. $S(p)$: signal de sortie. $H(p)=S(p)/E(p)$: fonction de transfert en BO.

Par contre la commande en boucle fermée (BF) est capable :

- * de recevoir des observations (mesures) et donc de connaître l'état du système commandé.
- * de comparer le comportement observé avec le comportement désiré.
- * de corriger en conséquence la commande pour réduire les écarts.

Donc on aura des informations complètes sur le système commandé, figure(III.2).

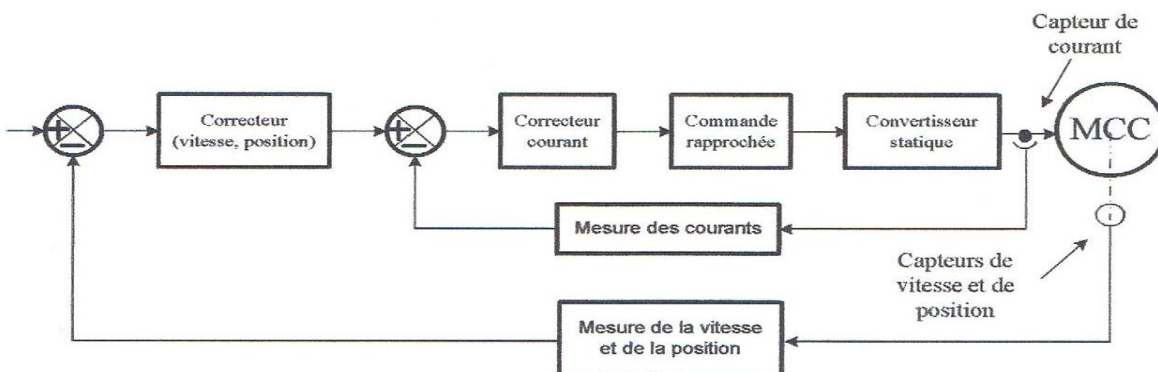


Figure(III.2) : schématisation d'un système en BF

La fonction de transfert en BF est : $G(p) = \frac{H(p)}{1+H(p)} \text{Erreur} = E(p) - S(p)$

2. régulation de vitesse pour un moteur à courant continu

La régulation est faite en générale par deux boucles fermées en cascades (courant et vitesse) telle qu'il est montrée sur la figure (III.3).

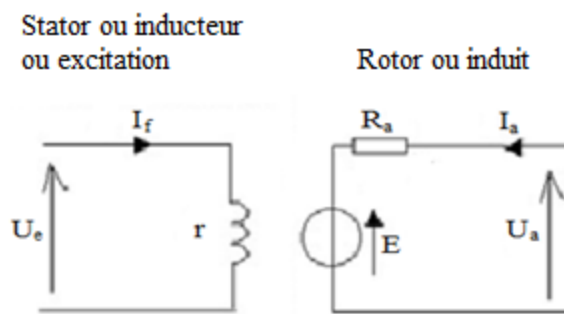


Figure(III.3) : schématisation de la régulation d'un moteur à courant continu

On y distingue les deux organes de puissance (le moteur et le convertisseur statique avec son électronique de commande), les deux capteurs (courant et vitesse) et les deux régulateurs (de courant et de vitesse). Dans cette structure, la tension de sortie du régulateur de vitesse (correcteur vitesse et position) sert de référence au régulateur de courant. C'est l'image du courant (donc du couple) désiré.

3. Modélisation d'un moteur à courant continu : (schéma fonctionnel)

La modélisation c'est la description mathématique d'un processus physique à étudier. C'est une étape très importante de l'étude préliminaire, elle consiste à établir les relations entre les grandeurs d'entrée et de sortie. Dans le cas du moteur à courant continu, l'établissement du modèle passe par l'écriture des équations électriques, magnétiques et mécaniques. Et cela permet de décrire les différentes parties du système par des fonctions de transfert.



Figure(III.4) : MCC à excitation indépendante (séparée)

L'équation de l'induit peut être écrite sous forme d'une différentielle du premier ordre comme suit :

$$U_a = R_a I_a + E + L \frac{di_a}{dt} \tag{III.1}$$

Avec : $E=K\Omega$ et $K= k\Phi$

L'équation du mouvement est : $Ce - Cr = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega$ (III.2)

Et : $Ce=kI_a$

Par passage au plan de Laplace :

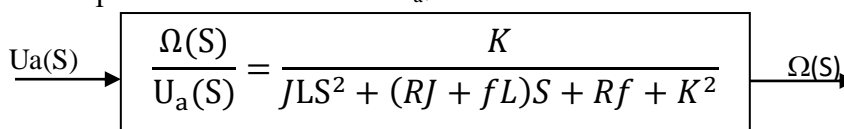
(1) devient : $U_a = R_a I_a + E + L I_a \cdot S \Rightarrow U_a - E = (R_a + L \cdot S) I_a \Rightarrow I_a = \frac{U_a - E}{R_a + L \cdot S}$ (III.3)

(2) devient : $Ce - Cr = J \Omega \cdot S + f \Omega \Rightarrow Ce - Cr = (J \cdot S + f) \Omega \Rightarrow \Omega = \frac{Ce - Cr}{J \cdot S + f}$ (III.4)

De (3) et (4) on peut écrire la fonction de transfert :

$$\frac{\Omega(S)}{U_a(S)} = \frac{K}{JLS^2 + (RJ + fL)S + Rf + K^2}$$

Où on peut donner le schéma bloc de cette fonction de transfert sur la figure (4), ci-dessous où la vitesse $\Omega(S)$ peut être obtenue par la tension d'entrée U_a .



On peut établir le modèle mathématique de la réponse en vitesse du moteur électrique qui est donné par la figure (III.5):

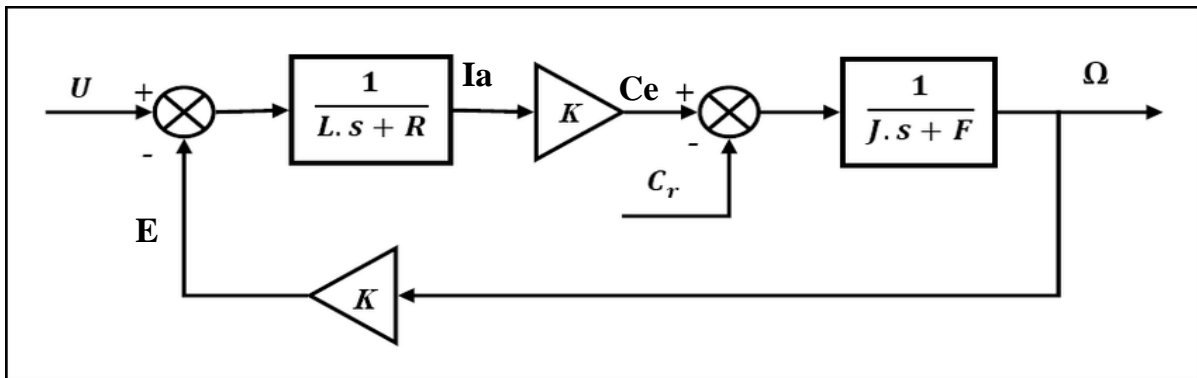


Figure (III.5) : Schéma fonctionnel du moteur à courant continu

On note : $\tau_e=L/Ra$: constante de temps électrique.

$\tau_m=J/f$: constante de temps mécanique. Avec : $\tau_e \ll \tau_m$.

4. Régulation par asservissement de vitesse ou position :

La régulation se fait en boucle fermée à retour unitaire. Les boucles de courant et vitesse sont en cascade. La boucle du courant c'est la boucle interne du schéma de régulation présenté par la figure (III.6), et celle de vitesse à l'externe.

Deux correcteurs de types (PID, PI, PD..) sont implémentés afin d'avoir la régulation souhaitée.

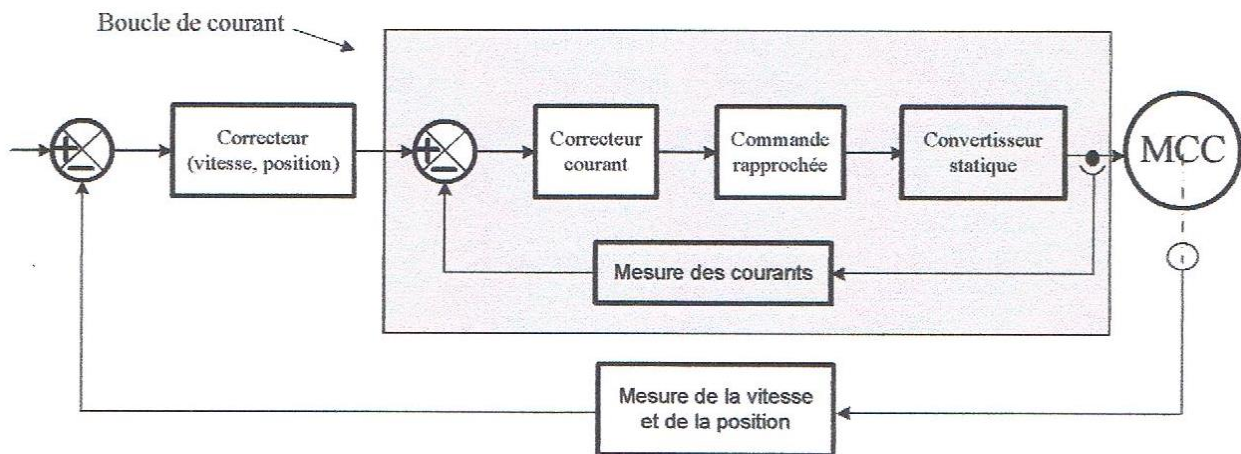


Figure (III.6) : boucle de réglage courant et vitesse\position d'une MCC

5. Régulateurs

Le régulateur est un élément de l'équipement de régulation. Placé dans la chaîne d'action ou dans une chaîne de réaction auxiliaire, il permet d'assurer plusieurs fonctions :

- Comparaison du signal de sortie au signal de référence ;
- Amplification ;
- Correction.

Les principaux types d'actions des régulateurs sont :

Action Proportionnelle : Ce régulateur produit un signal de commande proportionnel au signal d'erreur.

$S(t) = k_p \cdot \varepsilon(t)$, il est spécifié par sa constante de proportionnalité k_p .

Action Intégrale : Elle crée un signal de commande qui est l'intégrale du signal d'erreur.

$$S(t) = k_i \int_0^t \varepsilon(t) dt \Rightarrow (\text{plan de Laplace}) S(s) = \frac{k_i}{s} \varepsilon(s) = \frac{1}{\frac{1}{k_i} s} \varepsilon(s) = \frac{1}{T_i s} \varepsilon(s),$$

Avec, k_i : gain intégral

$T_i = 1/k_i$: constante de temps d'intégration.

Action Dérivée : L'action(D) crée un signal de commande qui est la dérivée du signal d'erreur.

$$S(t) = k_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \Rightarrow S(s) = k_d \cdot s \cdot \varepsilon(s) = T_d \cdot s \cdot \varepsilon(s) ; \quad k_d : \text{Gain dérivé} ; T_d : \text{Constante de temps de dérivation.}$$

Les actions précédentes peuvent être utilisées seules (P, I, D) ou combinés deux à deux (Pi, PD, DI) ou regroupées les trois (PID) selon la nécessité de l'application.

Pour un PID son équation dans le domaine temporel est :

$$S(t) = k_p \cdot \varepsilon(t) + k_i \int_0^t \varepsilon(t) dt + k_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

Dans le plan de Laplace : $S(s) = k_p \cdot \varepsilon(s) + \frac{k_i}{s} \varepsilon(s) + k_d \cdot s \varepsilon(s)$

Le réglage d'un PID consiste à déterminer les coefficients (k_p, k_i, k_d), afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation. Les objectifs sont d'être robustes, rapide et précis.

6. Les caractéristiques des contrôleurs P, I et D

Le contrôleur (P) a pour effet de réduire le temps de montée et de minimiser l'erreur statique (ne pourra jamais l'éliminer).

Le contrôleur (I) a pour effet d'éliminer l'erreur statique mais son temps de montée est mauvais.

Le contrôleur (D) a pour effet d'augmenter la stabilité du système, réduire le dépassement et améliorer le temps de réponse transitoire.

Les contrôleurs dépendent l'un de l'autre. En réalité, le changement d'un entraîne le changement de l'autre. La figure (III.7) donne les principales caractéristiques d'une réponse à un échelon pour une équation différentielle du premier ordre.

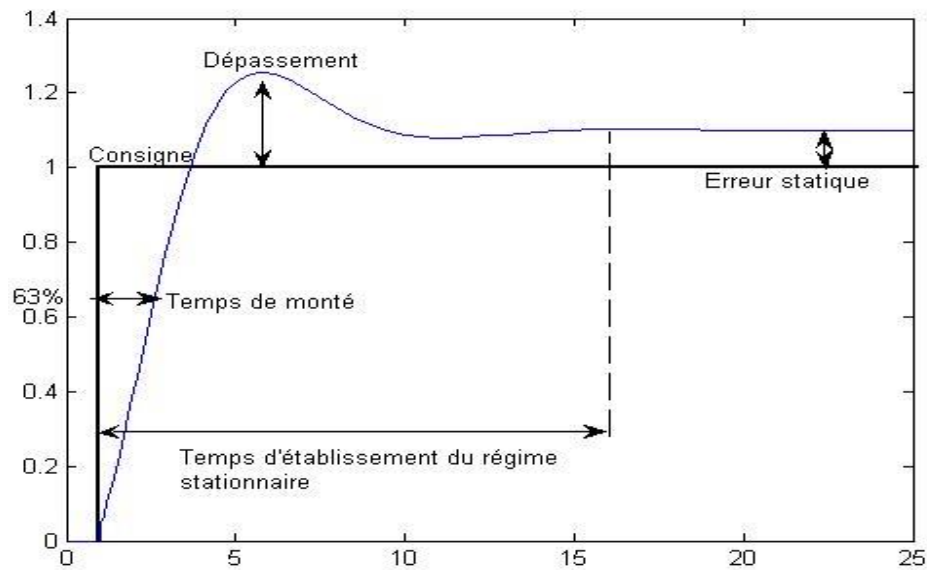


Figure (III.7) : principales caractéristiques d'une réponse à une consigne

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).
5. Claude Chevassu « MACHINES À COURANT CONTINU Cours et Problèmes », ENSM / 2014.
6. **Sites internet** : cours sitelec : <https://sitelec.org/cours.html>
chapitre 10 : les hacheurs. <http://f.holst.pagesperso-orange.fr>
<http://numlor.fr/elearning/etenp/co/3PONTTRI.html>