



REPUBLIQUE TUNISIENNE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Sfax

Note de cours :

Commande Electrique des Machines

Filière : Génie mécanique

Option : MI & CI

Youssef AGREBI ZORGANI

Hichem ZAYANI

Année Universitaire : 2013/2014

Sommaire

Chapitre1 : Entraînements à vitesse variable des machines électriques :	1
I- Généralités :	1
II- Avantages d'un entraînement :	1
III- Eléments d'un entraînement :	2
IV- Plan couple vitesse :	2
1- Description :	2
2- Utilisation et point de fonctionnement :	3
3- Stabilité du point de fonctionnement :	4
V- Mode de fonctionnement :	4
1- Modes de fonctionnement 1 quadrant (non réversible) :	4
2- Modes de fonctionnement 2 quadrants :	5
3- Modes de fonctionnement 4 quadrants (réversible) :	5
Chapitre 2 : Variation de vitesse des machines a courant continu :	7
I- Présentation de la machine à courant continu :	7
1- Vue d'ensemble (d'après LEROY SOMMER) :	7
2- Les différents types de moteurs à courant continu :	7
3- Equations de fonctionnement du moteur à courant continu (rappel) :	7
4- Modélisation (moteur à excitation séparée) :	8
II- Caractéristiques électromécaniques :	8
III- Rendement :	8
IV- Quadrants de fonctionnement :	9

V- Variation de vitesse :	10
1- Par action sur le courant d'excitation :	10
2- Par action sur la tension d'alimentation :	10
VI- Les dispositifs électroniques utilisés pour la variation de vitesse des moteurs à courant continu :	10
1- La conversion alternatif-continu :	11
2- La conversion continu-continu :	13
Chapitre3 : Régulation de la vitesse des machines a courant continu :	18
I- Introduction :	18
II- Régulation de vitesse de moteur à courant continu :	19
1- Modélisation d'un moteur à courant continu : (schéma fonctionnel) :	20
2- Etude de la boucle en courant : (régulation du courant) :	22
3- Etude de la boucle en vitesse : (régulation de vitesse) :	26
Chapitre 4 : Commande des machines asynchrones par convertisseurs statiques :	27
I- Introduction :	27
II- Variation de vitesse des machines asynchrone :	27
1- Quadrants de fonctionnement :	27
2- Schéma équivalent et expression du couple électromagnétique :	28
3- Variation de vitesse d'une machine asynchrone :	29
3.1. Réglage par variation du nombre de paires de pôles :	31
3.2. Réglage par action sur le glissement :	32
3.3. Réglage par variation de fréquence :	35
III- Variateur de vitesse Altivar :	39
Travaux dirigés :	41



Entraînements à vitesse variable des machines électriques

I- Généralités :

La commande des machines électriques est l'une des applications des convertisseurs statiques. Cette commande nécessite l'association d'une machine (courant continu, synchrones, asynchrones ou autres) dont le fonctionnement est à une vitesse variable en lui conservant un couple optimum, à un convertisseur statique (redresseur, hacheur, gradateur, onduleur).

En fait, le choix du moteur d'entraînement dépend du travail demandé, du lieu de travail et de la puissance à fournir. De même, la source d'énergie dont on dispose, les contraintes sur les paramètres que l'on doit fournir et le prix de revient de l'ensemble déterminent le type du convertisseur à associer au moteur.

Alors, on ambitionne d'étudier et d'analyser les possibilités d'association de convertisseur en vue de la commande. L'apport des convertisseurs statiques tel que la possibilité de fonctionner dans les quatre quadrants des axes couple vitesse, la solution des problèmes de démarrage et la possibilité de régulation et de contrôle à distance.

II- Avantages d'un entraînement :

Dans un entraînement de ce type, on ne fait pas varier la vitesse du moteur et de la machine entraînée par action sur les pertes d'énergie dans le circuit électrique d'alimentation, dans le moteur ou dans la charge mais on convertit l'énergie électrique fournie au moteur pour que celui-ci fournisse avec le minimum de pertes les caractéristiques mécaniques demandées par le processus. Outre les économies d'énergie, cette technique offre des avantages supplémentaires qui peuvent être déterminants dans le dimensionnement d'une installation.

☞ Pour ce qui concerne le réseau d'alimentation, nous pouvons citer :

- La suppression des fortes surintensités du courant appelé par le moteur alternatif au démarrage.
- La diminution de la puissance du système d'alimentation.

☞ Pour ce qui concerne le moteur, la technique d'entraînement à vitesse variable permet d'allonger sa durée de vie grâce à la diminution des contraintes qui lui sont appliquées.

☞ Pour ce qui concerne la charge entraînée, nous pouvons citer la possibilité de régler le couple et la vitesse en tout point du plan effort-vitesse. Cet avantage provient des qualités de souplesse, de flexibilité, de précision et de rapidité attachées aux régulations du système.

III- Éléments d'un entraînement :

Dans un variateur de vitesse on trouve :

- Une machine électrique : moteur à courant continu, moteur asynchrone, moteur synchrone...
- Alimentation électronique (convertisseur statique) à partir d'une source d'alimentation : Redresseur, hacheur, onduleur, gradateur.
- Des capteurs : de vitesse, de position, de niveau...
- Une régulation

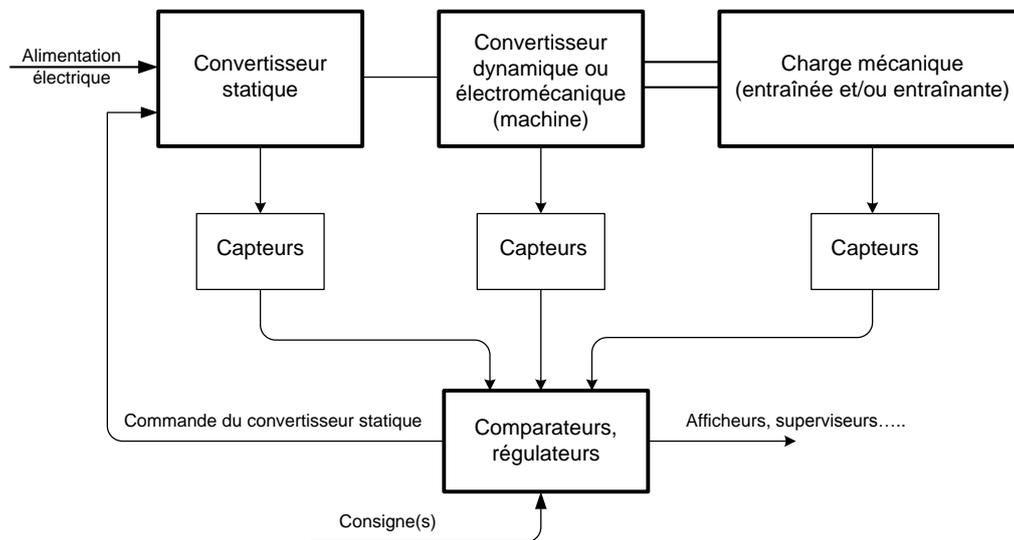


Figure 1 : Synoptique de la commande d'une machine électrique

IV- Plan couple vitesse :

1- Description :

Les caractéristiques des entraînements sont décrites dans le plan couple-vitesse $\Gamma = f(\Omega)$, c'est-à-dire on porte sur un digramme le couple électromagnétique Γ_{em} de la machine en fonction de la vitesse de rotation Ω .

Vue que ces grandeurs (couples et vitesse) sont algébriques, on choisit un sens positif de manière que le produit du couple électromagnétique par la vitesse (la puissance fournie par la machine) donne un fonctionnement en moteur dans le quadrant I et donc aussi dans le quadrant III. Lors que les quadrants II et IV correspondent à une puissance reçue par la

machine. Elle fonctionne alors en frein pour la charge (exp : machine asynchrone tournant en sens inverse du champ tournant). Elle peut aussi renvoyer l'énergie au réseau.

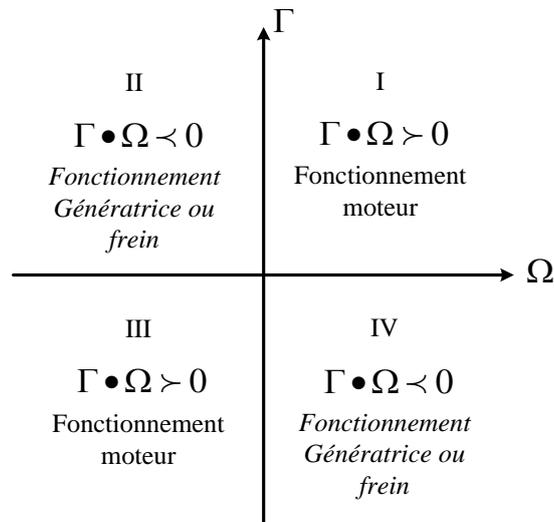


Figure 2 : caractéristiques $\Gamma = f(\Omega)$

2- Utilisation et point de fonctionnement:

Dans le diagramme couple vitesse, on trace :

- Les lieux de fonctionnement de la machine sous certaines conditions.
- La caractéristique électromécanique de la charge.
- Les limites de fonctionnement.

Le point d'intersection de la caractéristique de la charge donne le point de fonctionnement en régime établi puisque le 1^{er} principe de la dynamique en rotation :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \sum \Gamma = \Gamma_{em} - \Gamma_r .$$

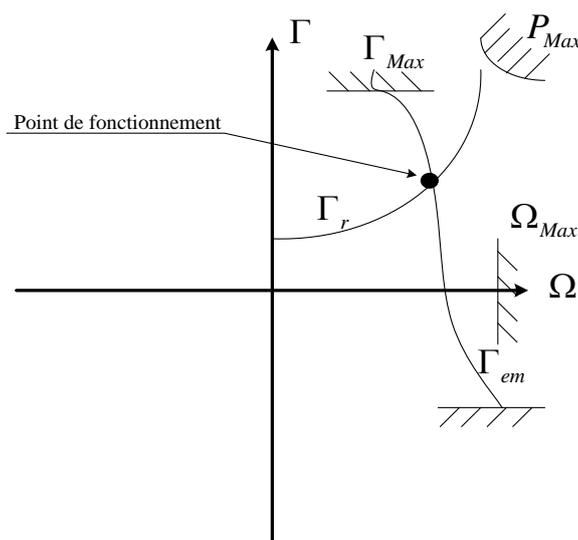


Figure 3 : point et limites de fonctionnement

☞ Faire de la variation de vitesse, c'est modifier le point de fonctionnement, donc à courbe de couple résistant donné Γ_r , c'est agir sur la courbe $\Gamma_{em} = f(\Omega)$ de la machine électrique.

3- Stabilité du point de fonctionnement :

L'étape le plus essentiel c'est de déterminer est-ce que le point de fonctionnement trouvé est stable ou instable, on parle alors d'équilibres stable et instable.

Alors que, pour que le point de fonctionnement soit stable, il faut et il suffit que :

La pente du couple résistant par rapport à la vitesse soit plus grande que la pente du couple moteur par rapport à la vitesse. A une augmentation de la vitesse correspondra alors $J \frac{d\Omega}{dt} < 0$, donc une diminution de la vitesse de rotation et un retour à l'équilibre.

V- Mode de fonctionnement :

Le diagramme du couple électromagnétique Γ_{em} de la machine en fonction de la vitesse de rotation Ω , montre l'existence de quatre quadrants. Alors ce sont les convertisseurs d'alimentation qui limitent le nombre de quadrants utilisables par la machine selon la nature de l'entraînement. Soient les fonctionnements 1,2 ou 4 quadrants.

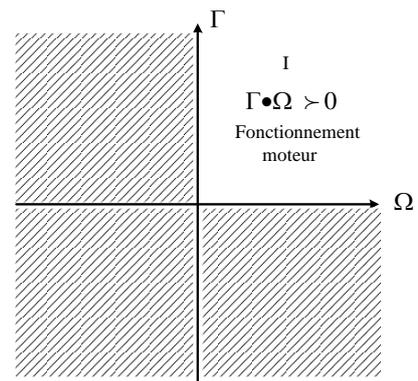
1- Modes de fonctionnement 1 quadrant (non réversible)

a- Modes de fonctionnement 1 quadrant moteur

Dans ce mode de fonctionnement, on peut contrôler l'accélération mais non le ralentissement, qui ne peut être lieu que par dissipation de l'énergie cinétique de rotation dans la charge.

Ce type de variateur utilise un convertisseur non réversible.

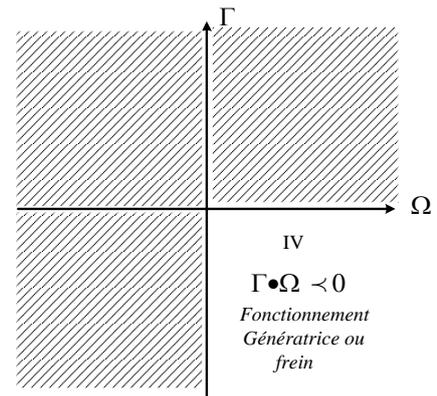
Application : perceuse électrique à variateur, aspirateur, pompage....



b- Modes de fonctionnement 1 quadrant générateur

Seul le fonctionnement en génératrice est possible. La machine ne peut démarrer de manière électrique, elle doit être entraînée par le côté mécanique depuis la vitesse nulle.

Application : Eolienne (si génératrice utilisée en vitesse variable : machine asynchrone à double alimentation ou alternateur)....

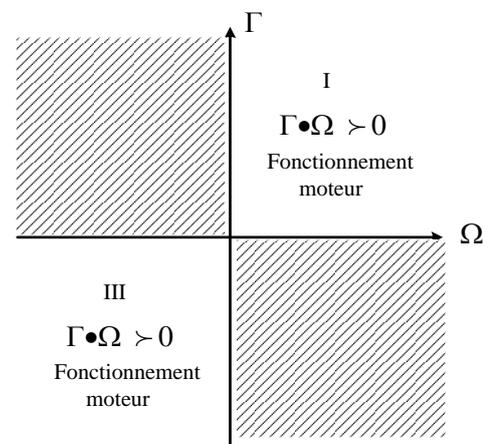


2- Modes de fonctionnement 2 quadrants

a- Mode de fonctionnement 2 quadrants I+III (non réversible)

Ce type de variateur utilise un convertisseur non réversible, sachant qu'il garantit une inversion du couple et de la vitesse tout en passant par l'état d'arrêt.

Application : visseuse-dévisseuse, lève-vitre électrique et réglage de rétroviseur d'automobile...

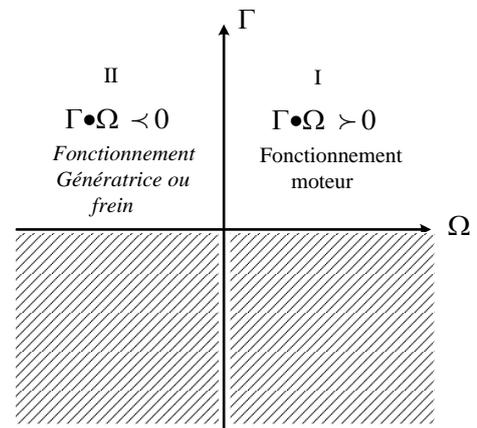


b- Mode de fonctionnement 2 quadrants I+II (réversible, type treuil ou lavage)

Ce type de variateur utilise un convertisseur réversible 2 quadrants.

A l'arrêt, le couple résistant peut ne pas être nul (exp : machine à courant continu alimentée à flux et courant unidirectionnel mais avec inversion de tension d'induit).

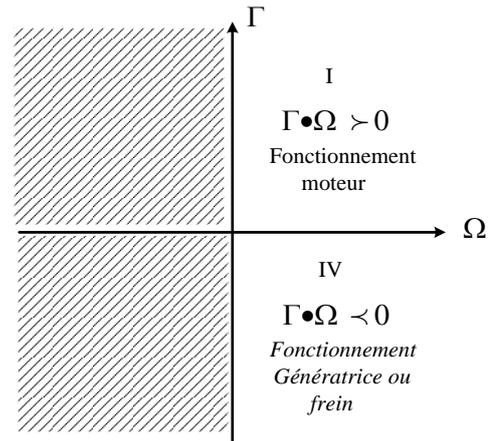
Application : treuil, levage...



c- Mode de fonctionnement 2 quadrants I+IV (réversible, type laminoir)

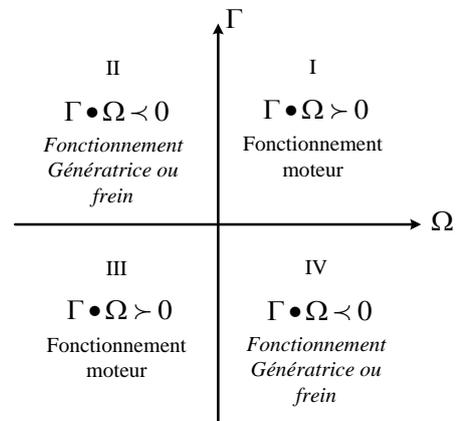
Ce type de fonctionnement correspond par exemple à l'entraînement d'un véhicule. Il faut pouvoir accélérer le véhicule puis le freiner électriquement. (ex : machine à courant continu alimentée à flux à tension unidirectionnel, le courant d'induit s'inversant comme le couple)

Applications : scooter électrique laminoir...



3- Modes de fonctionnement 4 quadrants (réversible)

Le variateur sait gérer des accélérations et décélérations, ainsi que des freinages dans toutes les situations disponibles.





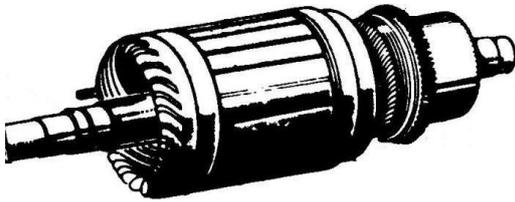
Variation de vitesse des machines à courant continu

I- Présentation de la machine à courant continu

1- Vue d'ensemble (d'après LEROY SOMMER)

La machine comporte deux parties principales :

- une partie fixe : le STATOR qui porte l'inducteur
- une partie mobile : le ROTOR qui porte l'induit



Rotor



Stator

La machine à courant continu est totalement réversible : elle peut fonctionner indifféremment en moteur ou en génératrice.

2- Les différents types de moteurs à courant continu

☞ Moteur à excitation séparée : l'induit et l'inducteur sont alimentés par des sources séparées

☞ Moteur à excitation série : l'induit et l'inducteur sont alimentés par la même source de tension. Ce type de moteur présente un très fort couple au démarrage, il reste encore utilisé dans certaines applications de traction électrique.

3- Equations de fonctionnement du moteur à courant continu (rappel)

$$U = E' + R.I$$

$$E' = K.\Omega.\phi$$

$$\Omega = \frac{U - R.I}{K.\phi}$$

$$T = K.\phi.I$$

Avec : E' : force contre-électromotrice (V)

U : tension d'alimentation de l'induit (V)

R : résistance de l'induit (Ω)

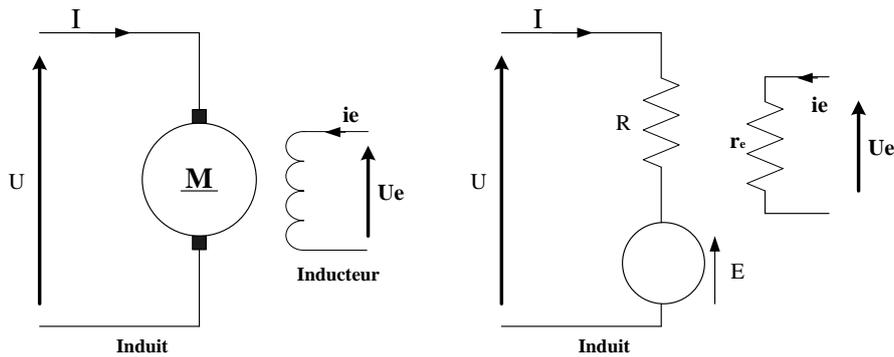
I : courant absorbé par l'induit (A)

ϕ : flux créé par l'inducteur (Weber)

T : couple moteur (Nm)

K est une constante de fabrication du moteur

4- Modélisation (moteur à excitation séparée)



Remarque :

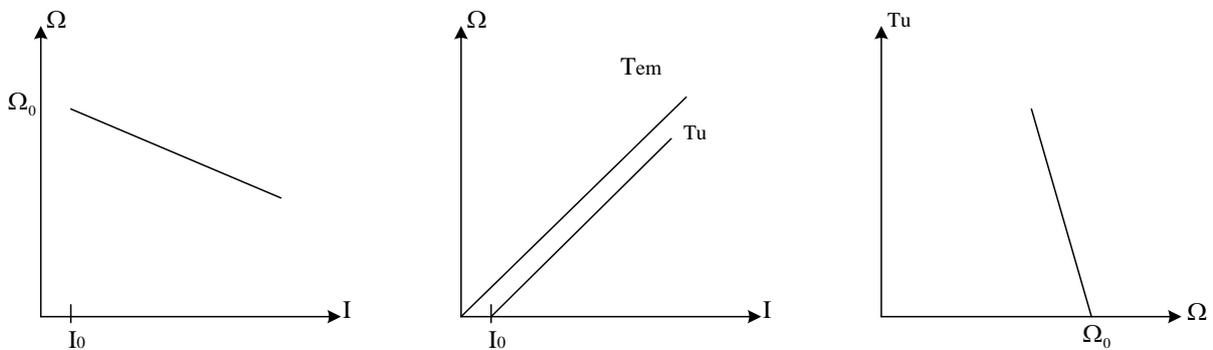
U et I sont de même signe en fonctionnement moteur et en convention récepteur.

II- Caractéristiques électromécaniques

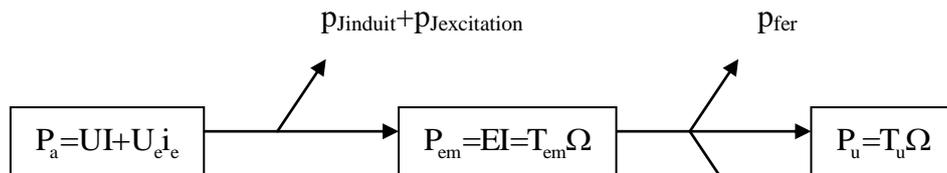
$$T_{em} = K\phi I$$

Des relations $E = K\phi\Omega$ et $U = E + RI$ on tire $\Omega = \frac{U - RI}{K\phi}$

A flux ϕ constant (courant d'excitation i_e constant ou aimants permanents) on obtient :



III- Rendement



$p_{Jinduit}$ = pertes Joules de l'induit = RI^2

$p_{Jexcitation}$ = pertes Joules du circuit d'excitation = $U_e i_e = r_e i_e^2$

p_{fer} = pertes fer (hystérésis et courants de Foucault) surtout localisées au rotor. Les pertes fer dépendent de la fréquence de rotation et de l'amplitude du flux.

$p_{\text{méca}}$ = pertes mécaniques (frottements fluides et solides). Les pertes mécaniques dépendent de la vitesse de rotation du moteur.

Le couple de pertes T_p est associé aux pertes fer et mécaniques : $T_p = \frac{P_{\text{fer}} + P_{\text{méca}}}{\Omega} = T_{\text{em}} - T_u$

$$\eta_{\text{moteur}} = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - \sum \text{pertes}}{P_a}$$

Mesure du rendement :

☞ Directe : on mesure P_a (facile) et P_u (capteur de couple et de vitesse)

☞ Indirecte :

Essai à vide : on mesure au niveau de l'induit $P_{a0} = P_{J0} + p_{\text{fer}} + p_{\text{méca}} = RI_0^2 + p_{\text{fer}} + p_{\text{méca}} \rightarrow$

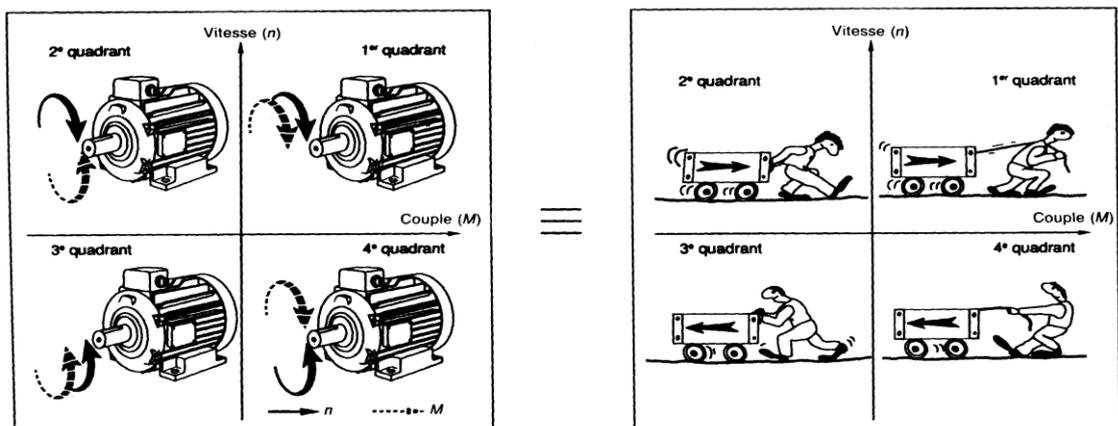
$$p_{\text{fer}} + p_{\text{méca}} = P_{a0} - P_{J0}$$

Si l'essai à vide est réalisé à vitesse nominale et sous excitation nominale, les pertes fer et les pertes mécaniques déduites de cet essai seront identiques lors du fonctionnement nominal. Une condition suffisante à ces critères est l'égalité de la f.e.m à vide avec la f.e.m en charge, ce qui nécessite une tension d'alimentation à vide U_0 telle que $U_0 - RI_0 = U - RI$.

La mesure de R (induit) est réalisée lors d'un essai à rotor bloqué par la méthode voltampèremétrique.

IV-Quadrants de fonctionnement

La machine à courant continu est complètement réversible. Les relations $E = K_1 \phi \Omega$ et $T_{\text{em}} = K_2 \phi I$ sont des relations algébriques. A flux constant et en convention récepteur, on obtient :



V- Variation de vitesse

1- Par action sur le courant d'excitation

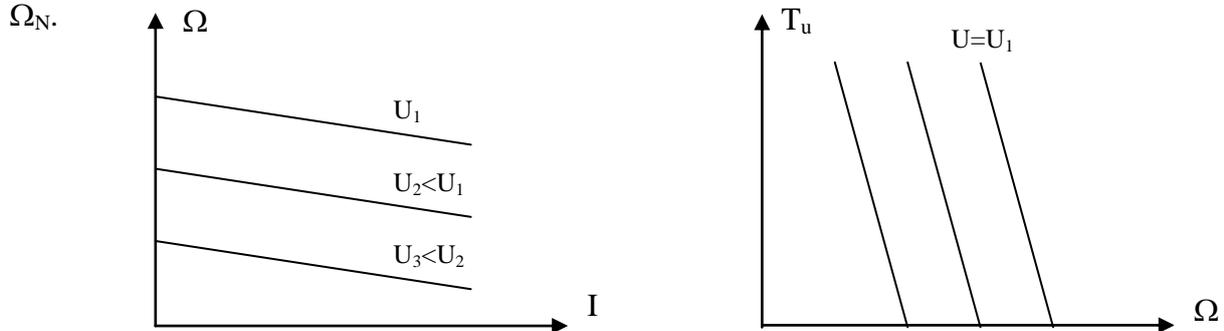
A tension U constante, la vitesse du moteur est inversement proportionnelle au flux et donc au courant d'excitation (i_e). L'action sur le courant d'excitation permet donc essentiellement d'accroître la vitesse à partir du point de fonctionnement nominal jusqu'à la vitesse maximale supportable par le moteur.

2- Par action sur la tension d'alimentation

A flux constant, la vitesse du moteur est quasiment proportionnelle à U :

$$\Omega = \frac{U - RI}{K\phi} \approx \frac{U}{K\phi}$$

L'alimentation de l'induit par l'intermédiaire d'un pont redresseur commandé ou d'un hacheur permet donc de faire varier continuellement la vitesse de 0 jusqu'à Ω_N .

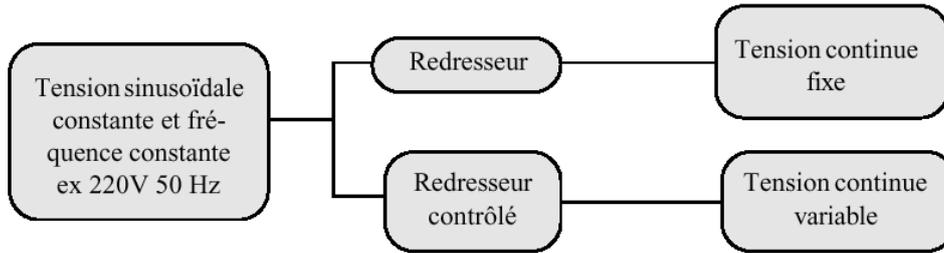


VI- Les dispositifs électroniques utilisés pour la variation de vitesse des moteurs à courant continu

Pour obtenir une tension continue variable, il existe 2 possibilités :

- Partir d'une tension continue fixe et utiliser un hacheur
- Partir d'une tension alternative sinusoïdale et utiliser un redresseur

Redresseur contrôlé à tension variable		Fournit à partir d'un réseau alternatif monophasé ou triphasé, une tension redressée de valeur moyenne variable
Hacheur		Fournit à partir d'une source de tension continue fixe, une source de tension « continue » dont on contrôle la valeur moyenne.

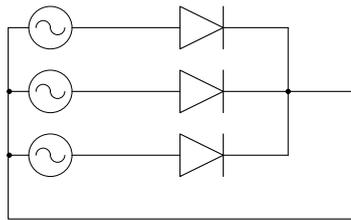


1- La conversion Alternatif – Continu

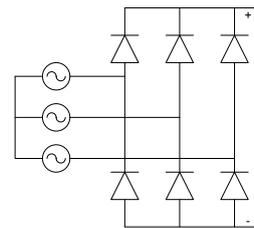
1.1. Les différents redresseurs

1.1.1. Les redresseurs non commandés :

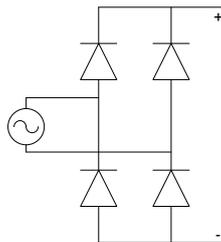
Ces ponts ne délivrent qu'une tension de sortie fixe, et ne seront donc pas utilisés pour faire la variation de vitesse pour les MCC. Ces redresseurs ne sont composés que de diodes.



Le pont simple triphasé PS3



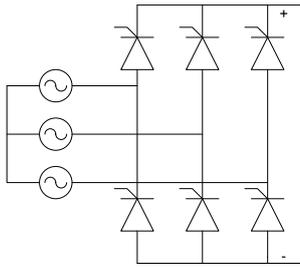
Le pont double triphasé PD3



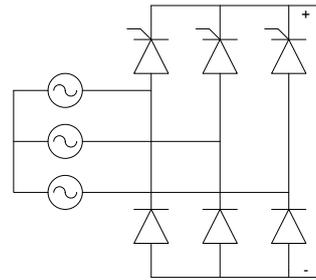
Le pont double monophasé PD2

1.1.2. Les redresseurs commandés

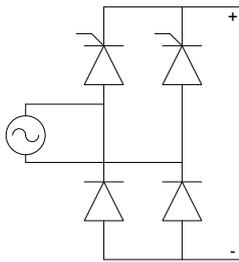
Ces redresseurs permettent de faire varier la tension efficace avec, soit des diodes et des thyristors, soit seulement des thyristors.



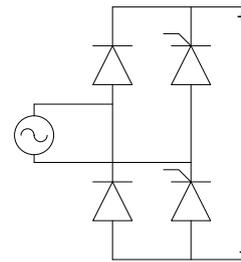
Le pont tout thyristor triphasé PT3



Le pont mixte triphasé PM3



Le pont mixte symétrique monophasé



Le pont mixte asymétrique monophasé

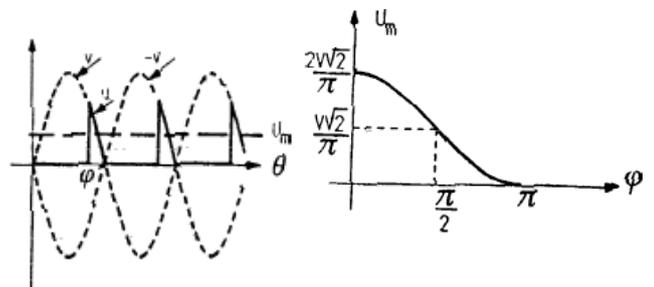
1.2. La variation de tension sur un pont mixte monophasé asymétrique

Les deux diodes assurent la diode de roue libre. La tension aux bornes du moteur est nulle quand elles entrent en conduction.

Valeur moyenne de la tension :

Si φ augmente U_m diminue donc n diminue

$$U_m = \frac{V\sqrt{2}}{\pi} (1 + \cos \varphi).$$



1.3. Les ponts tout thyristor

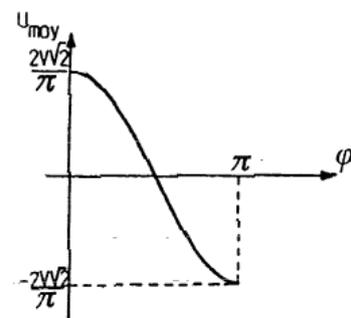
Il n'y a plus de diode de roue libre. La conduction des thyristors se poursuit tant que le courant ne s'annule pas, bien que la tension de sortie soit négative.

Si φ augmente U_m diminue donc n diminue

Si φ diminue U_m augmente donc n augmente

Si on augmente l'angle de retard à l'amorçage au-delà de 90° , le signe de la tension redressée s'inverse et l'on passe d'un montage redresseur à un onduleur assisté.

- $\varphi < 90^\circ$ fonctionnement en moteur



- $\varphi = 90$ le moteur est arrêté mais il peut fournir un couple (maintient d'une charge)
- $\varphi > 90^\circ$ Fonctionnement en générateur

Un onduleur est un système qui permet de transformer un courant continu en courant alternatif. On le dit assisté lorsqu'il a besoin de la présence de la tension du réseau pour fonctionner. Il fournit de l'énergie active au réseau, mais il absorbe de l'énergie réactive.

1.4. Les ponts unidirectionnels – bidirectionnels

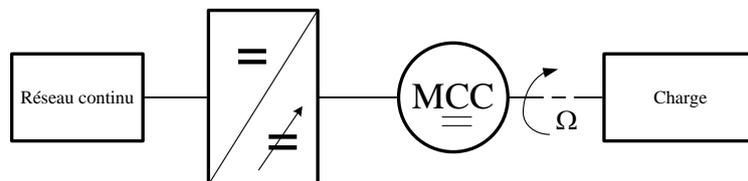
Avec tous les ponts que l'on a vus précédemment, on a changé la tension, le signe de la tension (changement de la vitesse et inversion du sens de la rotation du moteur). Par contre, le courant, donc le couple est toujours du même signe, de ce fait, on n'a pas modifié le signe du couple.

2- La conversion Continu – Continu

Si le réseau disponible est un réseau continu, alors le convertisseur statique qu'on associe à la machine à courant continu ne peut être qu'un hacheur. Cette commande est réalisable soit par action sur la tension d'induit soit par action sur le flux.

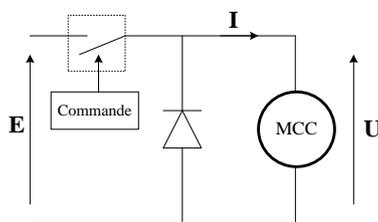
Sachant que le réseau continu provient soit :

- Soit de batteries.
- Soit d'un redresseur à diode.

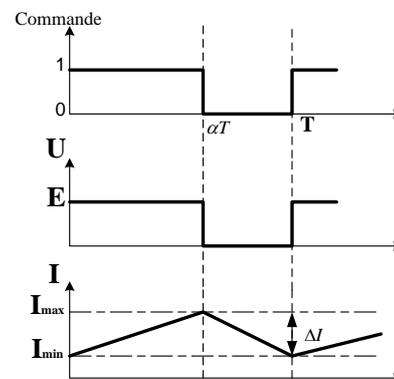


Synoptique d'un moto variateur à hacheur (en B.O)

☞ Principe du hacheur



La figure ci-dessus présente le schéma de principe d'un hacheur. Il comporte un interrupteur commandé à l'amorçage et au blocage (transistor bipolaire, IGBT,...) et un interrupteur à amorçage naturel (diode).



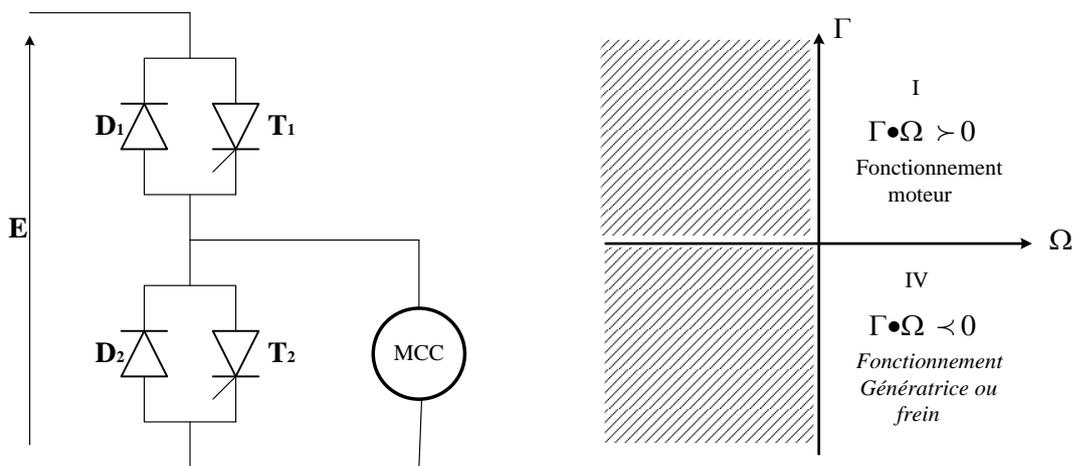
La tension moyenne de sortie est peut être inférieure ou supérieure à la tension d'entrée.

Avec ce type de hacheur on peut travailler dans un quadrant (1) ou 2 quadrants (1 et 4) suivant la réversibilité en courant de l'interrupteur statique et de la source.

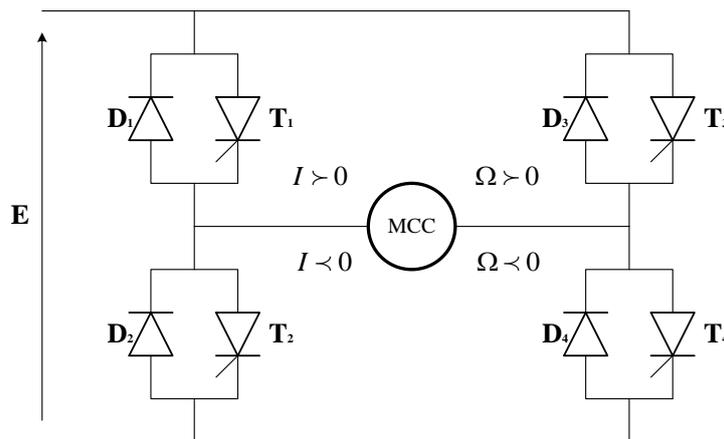
☞ **Réversibilité**

L'association d'un hacheur série et d'un autre parallèle permet le fonctionnement dans deux cadrons :

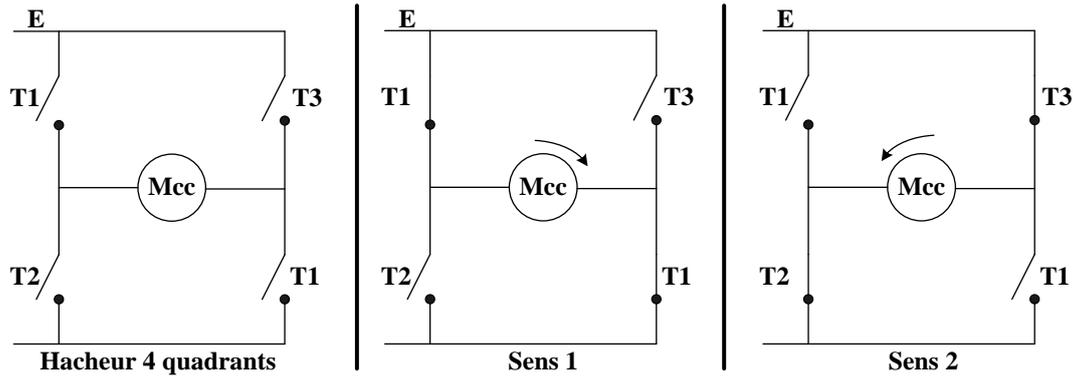
- Tension constante
- Courant bidirectionnel dans la machine



Dans de nombreux systèmes, il est nécessaire de pouvoir commander le sens de rotation ainsi que la vitesse d'un moteur à courant continu



Principe :



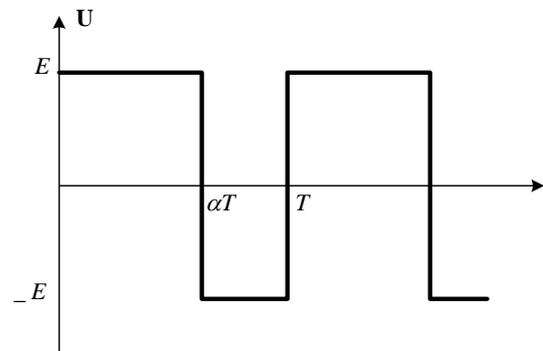
Changement du sens de rotation : principe général :

4 thyristor, symbolisés ici par des interrupteurs T1, T2, T3 et T4, sont montés en pont et permettent de commander le sens de rotation du moteur : Lorsque T1 et T4 sont fermés (saturés), le moteur tourne dans un sens (sens 1) . Lorsque T2 et T3 sont fermés, le moteur va tourner dans l'autre sens (sens 2).

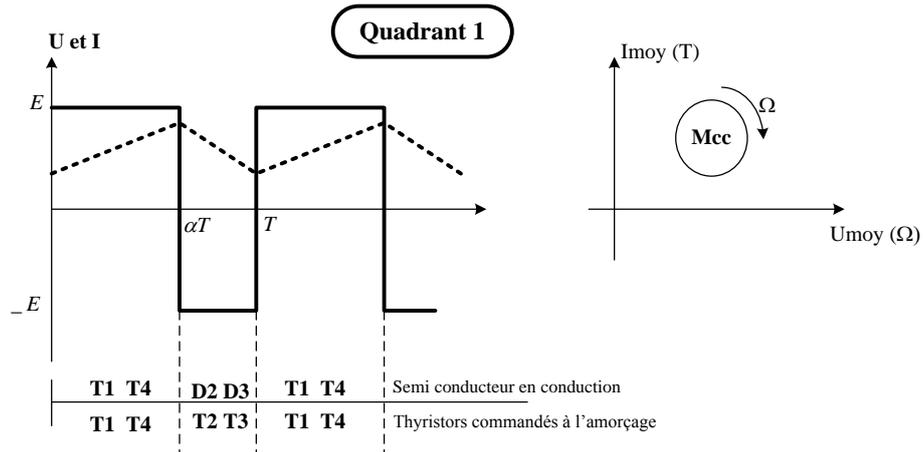
Principe de la variation de vitesse et fonctionnement dans les 4 quadrants :

En jouant sur la fréquence de commutation des thyristors, il est possible de faire varier la vitesse de rotation du moteur en limitant plus où moins la puissance fournie au moteur.

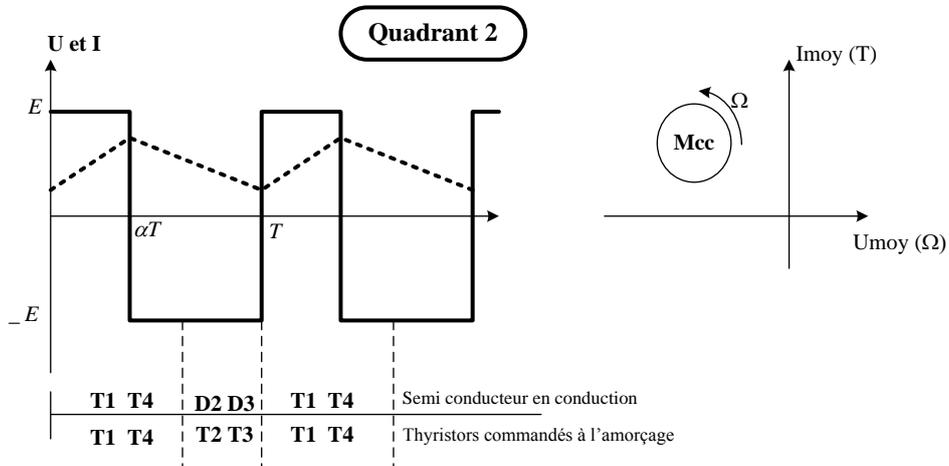
La commande des interrupteurs est du type complémentaire : Les thyristors T1, T4 d'une part et T2, T3 d'autre part reçoivent des signaux de commande identiques : au cours d'une période de fonctionnement, lorsque T1 et T4 sont commandés à l'amorçage, T2 et T4 sont commandés au blocage et inversement.



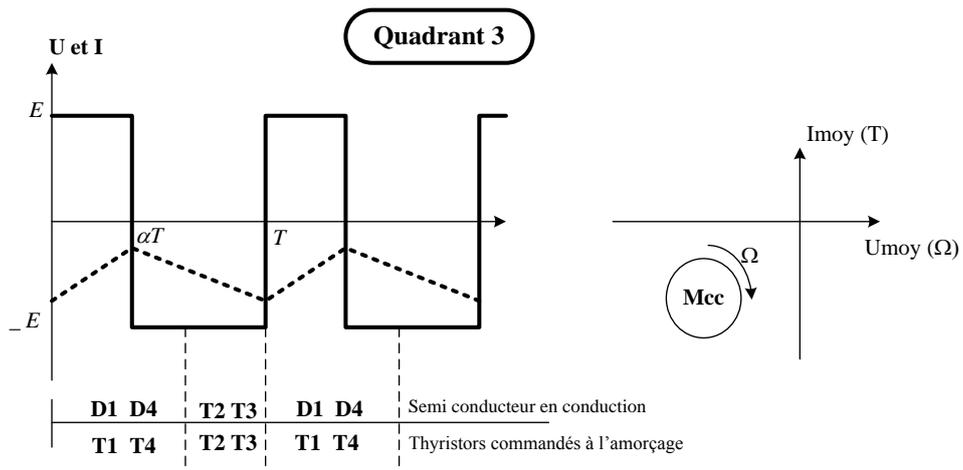
Sur le schéma ci-dessus, T1 et T4 sont commandés pendant le temps αT et les transistors T2, T3 sont commandés pendant le temps $(T - \alpha T)$ [$0 \leq \alpha \leq 1$]. On constate naturellement que la tension U aux bornes du moteur s'inverse :



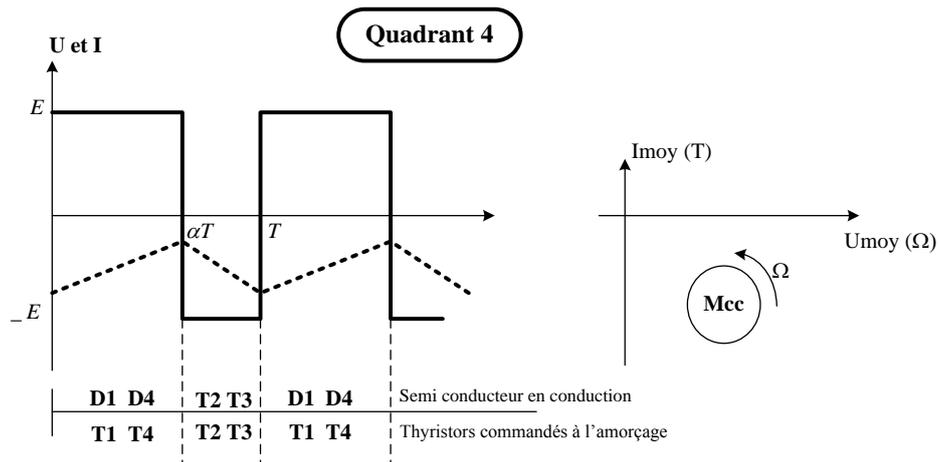
$Umoy > 0$ et $Imoy < 0 \Rightarrow P > 0$ d'où fonctionnement moteur



$Umoy < 0$ et $Imoy > 0 \Rightarrow P < 0$ d'où fonctionnement Générateur



$Umoy < 0$ et $Imoy < 0 \Rightarrow P > 0$ d'où fonctionnement moteur



$Umoy > 0$ et $Imoy < 0 \Rightarrow P < 0$ d'où fonctionnement Générateur

Remarque :

Composant de base du hacheur :

- Transistor bipolaire,
- Transistor MOS,
- Transistor IGBT,
- Thyristor.



Régulation de la vitesse des machines a courant continu

I. Introduction :

L'association du convertisseur à la machine à courant continu permet le réglage de la vitesse ou la position. Mais cette commande est élaborée sans l'aide de la connaissance des grandeurs de sortie. Au niveau des inconvénients, il n'y a aucun moyen de contrôler, à plus forte raison de compenser les erreurs, les dérives, les accidents qui peuvent intervenir à l'intérieur de la boucle, autrement dit, il n'y a pas de précision ni surtout de fidélité qui dépendent de la qualité intrinsèque des composants. Enfin, ce type de commande ne compense pas les signaux de perturbation. C'est pour cela on dit qu'il s'agit d'un système en boucle ouverte. Le schéma bloc de système en boucle ouverte est donné par la **figure 1** :

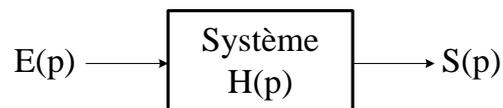


Figure. 1 : Schéma bloc d'un système en boucle ouverte

E : grandeur réglant (consigne)

S : grandeur réglée

$$H(p) = \frac{S(p)}{E(p)}$$

Alors que la commande en boucle fermée (contre réaction) est capable de stabiliser un système instable en boucle ouverte. Dans une régulation en boucle fermée, une bonne partie des facteurs perturbateurs externes sont automatiquement compensés par la contre-réaction à travers le procédé.

L'utilisation du retour d'information est le principe fondamental en automatique. La commande appliquée au système est élaborée en fonction de la consigne et de la sortie. La **figure 2** représente le principe de retour unitaire.

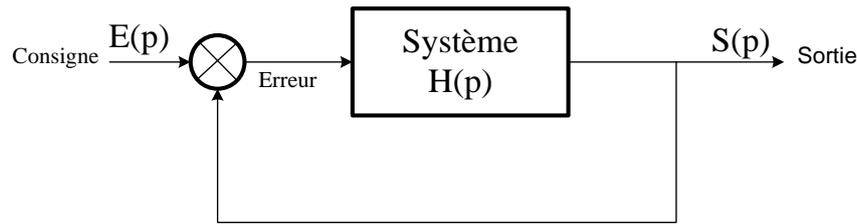


Figure. 2 : Schéma bloc d'un système en boucle fermée avec un retour unitaire

D'après la figure ci-dessus et selon Black, le comportement du processus est décrit par la

$$\text{relation : } G(p) = \frac{H(p)}{1 + H(p)}$$

E : grandeur réglante (consigne)

S : grandeur réglée

ε : erreur = $E(p) - S(p)$

II. Régulation de vitesse de moteur à courant continu.

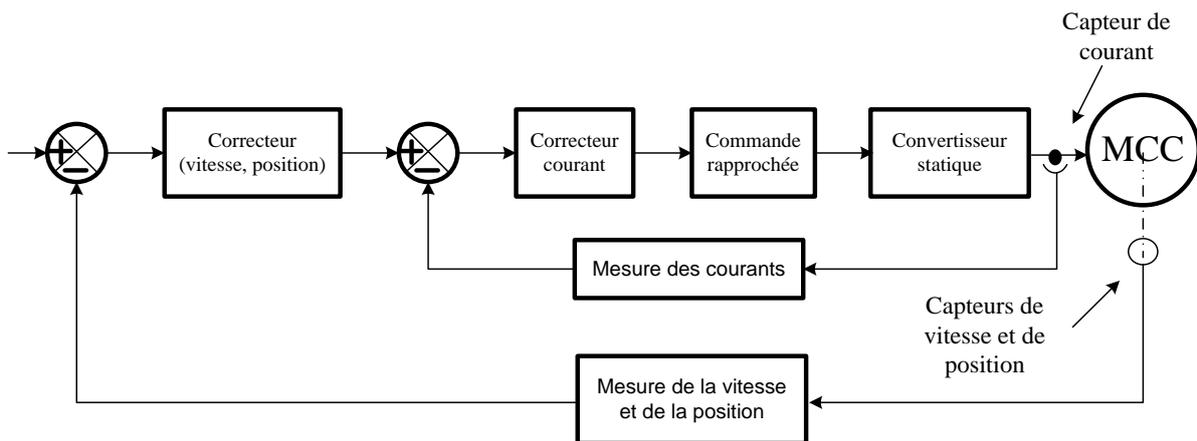


Figure. 3 : Schéma synoptique de la régulation d'un moteur à courant continu

La figure 3 donne la structure générale la plus fréquente. C'est celle d'un variateur de vitesse à deux boucles en cascade. 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.

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

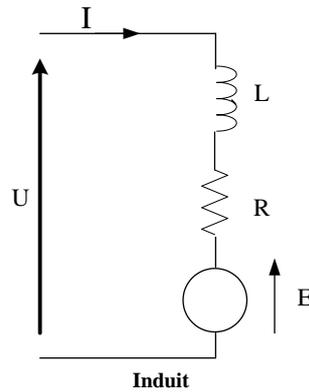


Figure. 3 : Schéma équivalent d'un moteur à courant continu

On note :

R : La résistance interne de l'induit du moteur à courant continu.

L : L'inductance interne de l'induit du moteur à courant continu,

E : La f.c.e.m. du moteur

J : Le moment d'inertie ramené à l'arbre du moteur.

f : Le coefficient de frottement visqueux (Le couple de frottement est proportionnel à Ω).

T_m : Le couple moteur.

T_r : Le couple résistant

D'après la loi de Newton, combiné à des lois de Kirchhoff, On peut écrire les équations différentielles de premiers ordres suivantes :

$$U = E + RI_a + L \frac{dI_a}{dt} \quad (1)$$

Avec : $E = K\phi\Omega$

On passe en Laplace on obtient :

$$U - E = (R + Lp) I_a(p) \quad (2)$$

D'après le principe fondamental de la dynamique on a :

$$T_m - T_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f.\Omega \quad (3)$$

Avec : $T_m = K\phi I_a$

On passe en Laplace on obtient :

$$(T_m - T_r) = (Jp + f)\Omega(p) \quad (4)$$

☞ Pour $T_r = 0$, obtient on a :

$$U(p) = K\phi\Omega(p) + (P + Lp) \frac{T_m}{K\phi} \quad (5)$$

Sachant que : $T_m = (Jp + f)\Omega(p)$

$$D'où : U(p) = \Omega(p) \left[K\phi + \left(\frac{R + Lp}{K\phi} \right) (Jp + f) \right] \quad (6)$$

Soit T(p) la fonction de transfert : $T(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{1}{K\phi + \left(\frac{R + Lp}{K\phi} \right) (Jp + f)}$

$$T(p) = \frac{K\phi}{(K\phi)^2 + (R + Lp)(Jp + f)}$$

$$T(p) = \frac{K\phi}{JLp^2 + (RJ + Lf)p + Rf + (K\phi)^2} \quad (7)$$

La tension de sortie du redresseur est :

$$U = U_{co} \cos \psi \quad (8)$$

$$\cos \psi = \frac{U}{U_{co}} \quad (9)$$

La tension u_c est l'image de la vitesse souhaitée, soit alors :

$$u_c = k \cos \psi \quad (10)$$

$$\cos \psi = \frac{u_c}{k} \quad (11)$$

Des expressions (9) et (11) :

$$U = U_{co} \frac{u_c}{k} = K' u_c \quad (12)$$

D'où :

$$\frac{\Omega(p)}{u_c} = \frac{K' K\phi}{JLp^2 + (RJ + Lf)p + Rf + (K\phi)^2} \quad (13)$$

Soit alors :

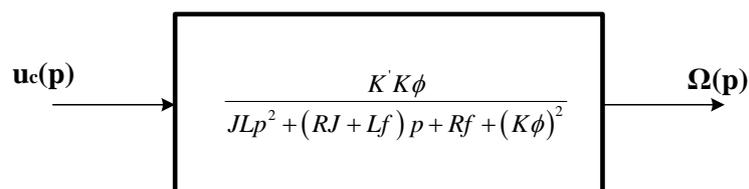


Figure. 5 : Schéma bloc de la fonction de transfert (moteur+ redresseur)

Alors le réglage de la vitesse de rotation Ω se fait par variation de la tension aux bornes de l'induit

D'où le schéma fonctionnel de la commande en boucle ouvert d'une machine à courant continu :

$$I_a(p) = \frac{U - E}{Lp + R} ; \quad T_m = K\phi I_a(p) ; \quad E = K\phi\Omega(p) \quad \text{et} \quad \Omega(p) = \frac{T_m - T_r}{Jp + f}$$

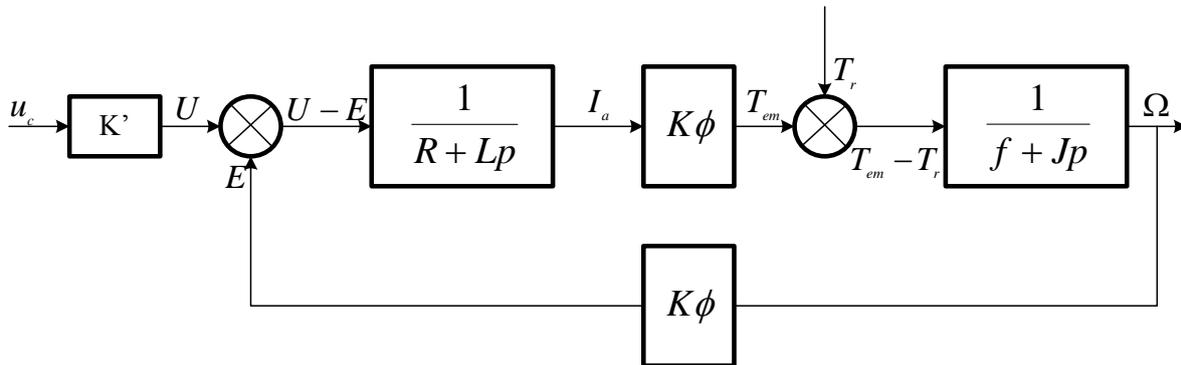


Figure. 6 : Schéma fonctionnel d'un convertisseur statique et d'un moteur à courant continu

2. Etude de la boucle en courant : (régulation du courant)

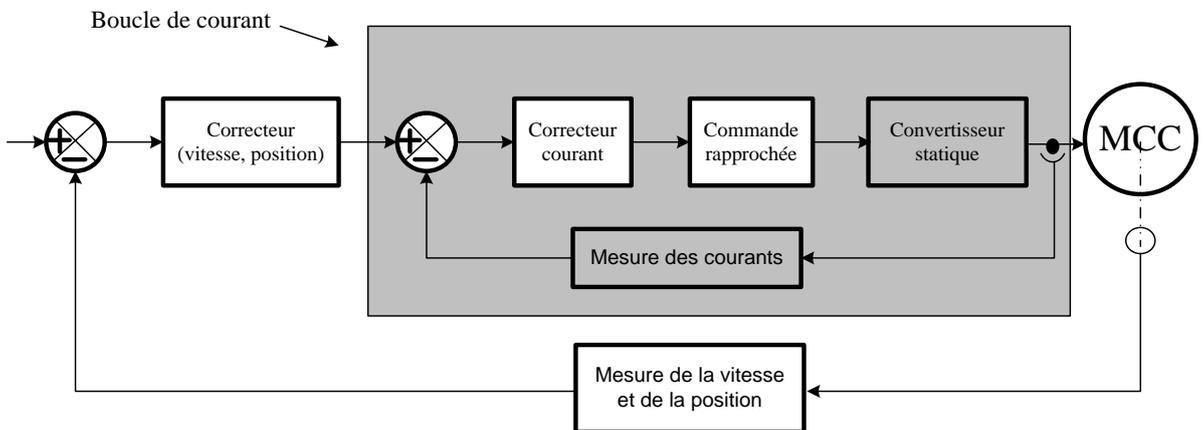


Figure. 7 : Identification de la boucle en courant

On utilise dans la chaîne de régulation des amplificateurs à courant continu et à grand gain.

Pour la boucle de courant, le schéma synoptique est le suivant :

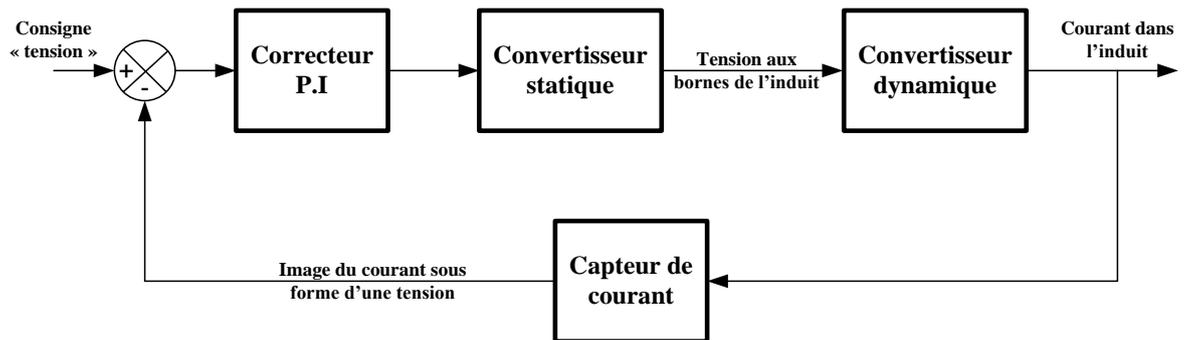


Figure. 8 : Synoptique de la boucle du courant

☞ Convertisseur dynamique :

$$\text{On a : } U = E + RI_a + L \frac{dI_a}{dt} \text{ et } E = K\phi\Omega \text{ d'où : } U = K\phi\Omega + RI_a + L \frac{dI_a}{dt}$$

D'autre part, la relation fondamentale de la dynamique permet d'écrire :

$$T_m - T_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega$$

On néglige f et on suppose que $T_r = 0$

$$\text{D'où : } T_m = J \frac{d\Omega}{dt}$$

Sachant que : $T_m = K\phi I_a$

$$\text{Alors : } K\phi I_a = J \frac{d\Omega}{dt} \Rightarrow \frac{d\Omega}{dt} = \frac{K\phi}{J} I_a \text{ Le passage par la transformée de Laplace}$$

$$\text{donne : } p\Omega(p) = \frac{K\phi}{J} I_a(p) \Rightarrow \Omega(p) = \frac{K\phi}{J \cdot p} I_a(p)$$

$$\text{Or } U(p) = K\phi\Omega(p) + RI_a(p) + Lp \cdot I_a(p)$$

$$\text{D'où : } U(p) = K\phi \frac{K\phi}{J \cdot p} I_a(p) + RI_a(p) + Lp \cdot I_a(p) \quad \Rightarrow$$

$$U(p) = \left(\frac{(K\phi)^2}{J \cdot p} + R + Lp \right) I_a(p)$$

$$\text{Soit : } T_m = \frac{RJ}{(K\phi)^2} \text{ d'où : } U(p) = \left(\frac{R}{T_m \cdot p} + R + Lp \right) I_a(p) \quad \Rightarrow$$

$$U(p) = R \left(\frac{1}{T_m \cdot p} + 1 + \frac{L}{R} p \right) I_a(p) \quad \text{Soit} \quad T_e = \frac{L}{R}$$

D'où :
$$\frac{I_a(p)}{U(p)} = \frac{T_m \cdot p}{R(T_m T_e p^2 + T_m p + 1)}$$

Sachant que : $T_m \ll T_e$ alors $T_m + T_e \approx T_m$

Soit alors :

$$(1 + T_e \cdot p)(1 + T_m \cdot p) = 1 + (T_e + T_m) p + T_m T_e \cdot p^2 \approx 1 + T_m \cdot p + T_m T_e \cdot p^2$$

On peut utiliser cette condition pour simplifier la boucle de courant, on obtient :

$$\frac{I_a(p)}{U(p)} = \frac{T_m \cdot p}{R(1 + T_e)(1 + T_m)}$$

☞ Convertisseur statique :

$$U = U_{co} \frac{u_c}{k} = K' u_c$$

☞ Correcteur P.I :

Le correcteur PI « proportionnel-intégrale » améliore la précision de la boucle (erreur statique nulle).

$$C(p) = g_p + \frac{g_i}{p} = g_0 \frac{1 + T \cdot p}{T \cdot p}$$

☞ Capteur de courant : Soit un shunt soit un transformateur. Dans les deux cas l'image du courant est obtenue sous forme d'une tension, soit alors : $U_{image} = m \cdot I_a$

D'où le schéma fonctionnel :

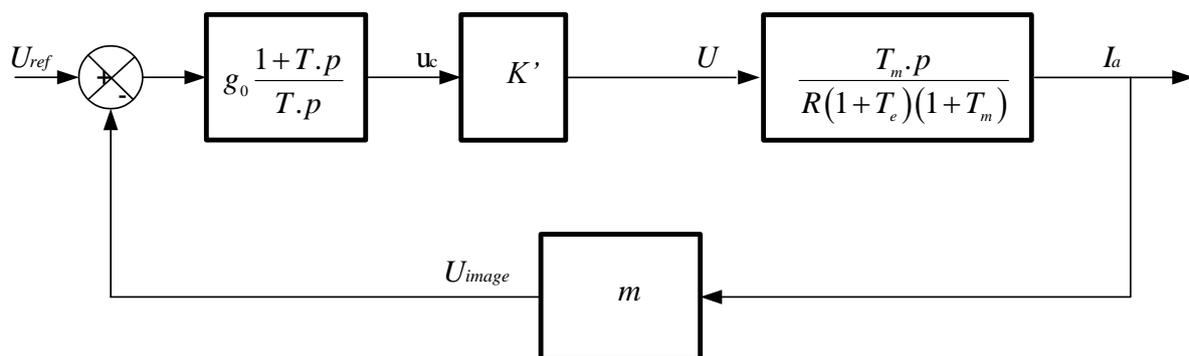


Figure. 9 : Schéma fonctionnel de la boucle du courant

Soit en faisant un schéma avec retour unitaire :

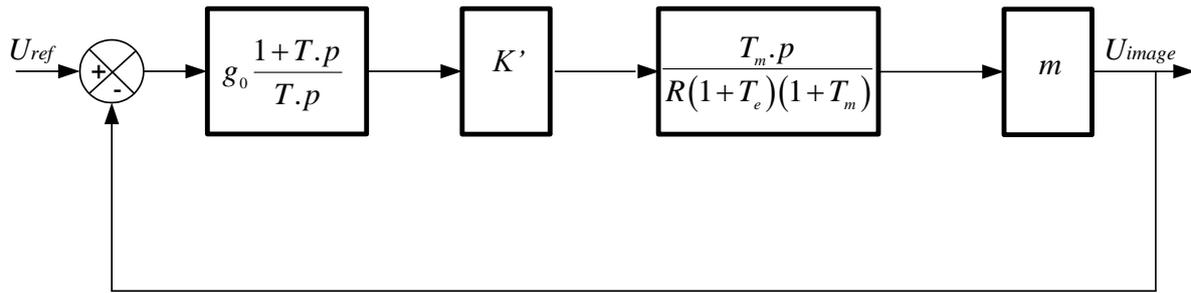


Figure. 10 : Schéma fonctionnel à retour unitaire

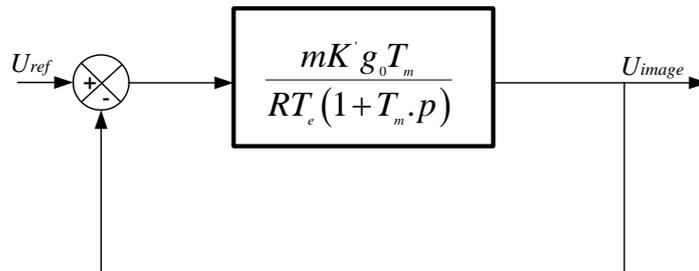
✎ Fonction de transfert en boucle ouverte :

Choisissant $T = T_e$ d'où $C(p) = g_0 \frac{1 + T_e \cdot p}{T_e \cdot p}$

Soit $F_{TBO}(p)$ la fonction de transfert en boucle ouverte :

$$F_{TBO}(p) = \left(g_0 \frac{1 + T_e \cdot p}{T_e \cdot p} \right) K' \frac{T_m \cdot p}{R(1 + T_e \cdot p)(1 + T_m \cdot p)} \cdot m = \frac{mK' g_0 T_m}{RT_e (1 + T_m \cdot p)}$$

Ainsi :



✎ Fonction de transfert en boucle fermée :

Soit $R_0 = g_0 m K'$

$$F_{TBF}(p) = \frac{F_{TBO}(p)}{1 + F_{TBO}(p)} = \frac{\frac{R_0 T_m}{RT_e (1 + T_m \cdot p)}}{1 + \frac{mK' g_0 T_m}{RT_e (1 + T_m \cdot p)}} = \frac{R_0 T_m}{RT_e (1 + T_m \cdot p) + R_0 T_m}$$

Et comme $T_m \ll T_e$ alors $\frac{RT_e}{R_0 T_m} \gg 0$ alors la fonction de transfert en boucle fermée est

un système de la forme : $F_{TBF}(p) = \frac{1}{1 + \tau p} \Rightarrow$ système de 1^{er} ordre avec $\tau = \frac{RT_e}{R_0}$

✎ Réalisation pratique du correcteur P.I

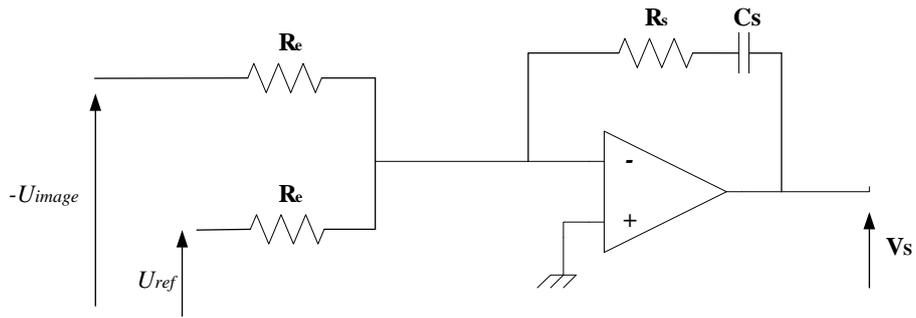


Figure. 11 : Correcteur P.I

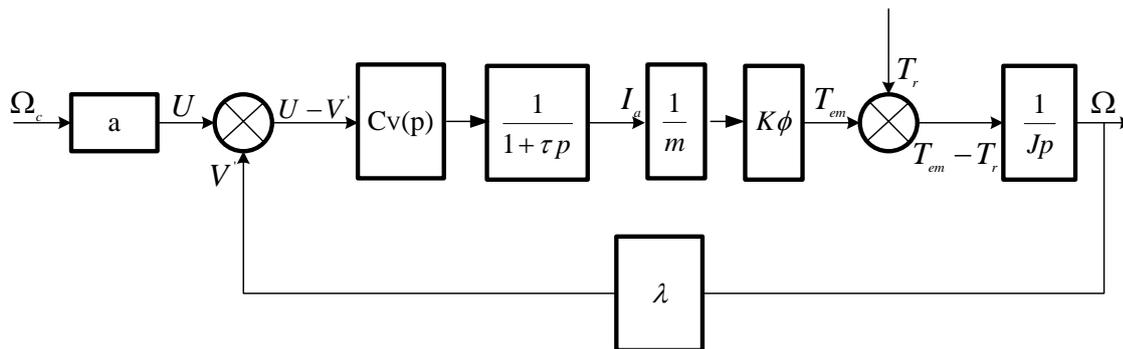
$$\tau = \frac{R_s}{R_e}$$

$$T = R_s C_s$$

$$V_s(p) = \left(g_0 + \frac{g_0}{p} \right) [U_{ref}(p) - U_{image}(p)]$$

3. Etude de la boucle en vitesse : (régulation de vitesse)

Tenant compte la boucle en courant, le schéma fonctionnel complet de la boucle de vitesse est le suivant :





Commande des machines asynchrones par convertisseurs statiques

I. Introduction :

Le réglage de la vitesse d'une machine à induction n'est pas simple que celui d'un moteur à courant continu. Les onduleurs à fréquence de sortie variable sont la principale application des dispositifs de puissance à semi-conducteurs pour la commande de moteur à courant alternatif. Pour obtenir des caractéristiques de commande comparables à celle d'un moteur à courant continu, il faut utiliser un équipement de commande et de puissance plus compliqué.

Pour bien choisir un système d'entraînement à vitesse variable il est absolument nécessaire de connaître les contraintes imposées par la charge à l'ensemble réseau/convertisseur statique/machine :

- ☞ Caractéristiques couple vitesse de la machine entraînée
- ☞ Inertie de la machine entraînée
- ☞ Performances statiques et dynamiques attendues
- ☞ Régime et service dans tous les cas d'exploitation

II. Variation de vitesse des machines asynchrone :

1. Quadrants de fonctionnement

Les machines à courant alternatif (synchrone et asynchrone) et à courant continu sont naturellement réversibles. Pour bénéficier de cette propriété, il faut que le convertisseur statique et la source soient également réversibles. Si la source ne l'est pas on ne peut pas récupérer l'énergie lors d'une phase de freinage de la machine mais on peut le dissiper dans des rhéostats (réversibilité dissipatrice).

Comme pour une machine à courant continu le choix d'une structure convertisseur /machine asynchrone 1, 2 ou 4 quadrants repose exclusivement sur le cahier des charges.

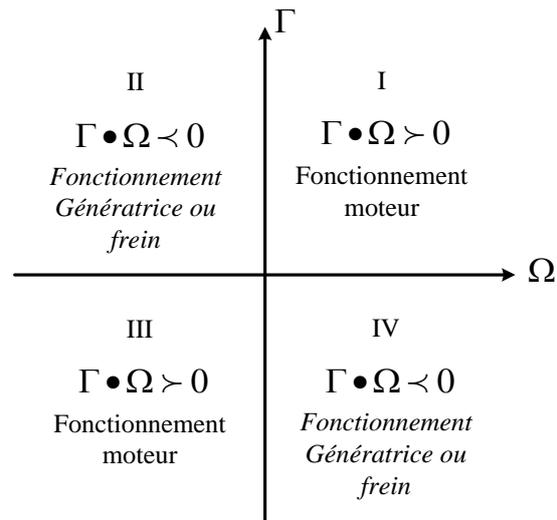


Figure 1

- ☞ Quadrant I seul : Accélérations contrôlées et décélération non contrôlées, et la machine tourne dans un seul sens.
- ☞ Deux quadrants I et II : La machine tourne dans les deux sens avec accélérations contrôlées et décélération non contrôlées
- ☞ Deux quadrants I et IV: La machine tourne dans un seul sens avec accélérations et décélération contrôlées
- ☞ Quatre quadrants (I à IV): La machine tourne dans les deux sens avec accélérations et décélération contrôlées.

2. Schéma équivalent et expression du couple électromagnétique :

On suppose que l'impédance de fuite d'un enroulement statorique est négligeable. Le schéma équivalent devient celui de la figure ci-dessous :

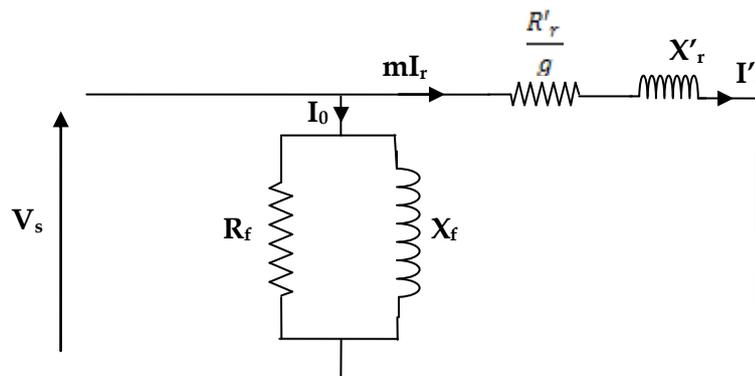


Figure 2. Schéma équivalent

$$\text{On a : } T_{em} = \left(\frac{P_{tr}}{\Omega_s} \right) \text{ avec } P_{tr} = 3 \cdot \left(\frac{R_r'}{g} \right) \cdot I_r'^2 \text{ et } I_r' = \frac{V_s}{\sqrt{\left(\frac{R_r'}{g} \right)^2 + X_r'^2}}$$

$$\text{D'où : } T_{em} = \frac{3}{\Omega_s} \cdot \frac{R_r'}{g} \cdot \frac{V_s^2}{\left(\frac{R_r'}{g} \right)^2 + (X_r')^2} \quad \text{Or } \Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$$

$$\text{Donc : } T_{em} = 3 \cdot p \cdot \left(\frac{V_s}{\omega_s} \right)^2 \cdot \omega_s \cdot \frac{\frac{R_r'}{g}}{\left(\frac{R_r'}{g} \right)^2 + (L_r' \cdot \omega_s)}$$

3. Variation de vitesse d'une machine asynchrone :

☞ Au démarrage :

$$\Omega = 0 \Rightarrow g = 1$$

Soit T_d : Le couple de démarrage

$$\text{D'où : } T_d = \frac{3p}{\omega_s} R_r' \frac{V_s^2}{R_r'^2 + X_r'^2}$$

☞ A vide :

$$\Omega = \Omega_s \Rightarrow g = 0 \text{ D'où : } T_{em} = 0$$

$$\text{☞ On a : } T_{em} = \frac{3p}{\omega_s} R_r' \cdot \frac{V_s^2}{\frac{R_r'^2}{g} + gX_r'^2} = F = \frac{a}{x+y} \quad \text{avec } a = C^{te}, x \text{ et } y \in \mathbb{R}$$

Si $x \cdot y = C^{te} \Rightarrow F$ est maximale si et seulement si $x = y$

On note alors g_m le glissement tel que le couple est maximal :

$$\text{Alors : } g_m \cdot (X_r')^2 = \frac{(R_r')^2}{g_m} \Rightarrow g_m^2 = \left(\frac{R_r'}{X_r'} \right)^2 \text{ soit alors : } g_m = \frac{R_r'}{X_r'}$$

Donc pour chercher le couple maximal il suffit de remplacer l'expression de g_m dans l'expression du couple électromagnétique T_{em} .

$$\text{Donc : } T_{em} = \frac{3p}{\omega_s} R_r' \frac{V_s^2}{\frac{R_r'}{g_m} + \frac{R_r'}{X_r'} X_r'^2} = \frac{3p}{\omega_s} R_r' \frac{V_s^2}{2R_r' X_r'}$$

$$\text{D'où : } T_{em} = \frac{3p}{2\omega_s} \frac{V_s^2}{2X_r'}$$

- Pour $g \ll g_m$ alors $g(X_r')^2 \ll \frac{(R_r')^2}{g} \Rightarrow T_{em} = \frac{3p}{\omega_s} R_r' \frac{V_s^2}{\frac{R_r'^2}{g}} = \frac{3p}{\omega_s} \frac{V_s^2}{R_r'} g$

On remarque bien que : $T_{em} = k.g$ avec $k = \frac{3p}{\omega} \frac{V_s^2}{R_r'} = C^{te}$

Alors on peut conclure que pour $g \in [0, g_m], T_{em} = f(g)$ est une droite linéaire.

- Pour $g \gg g_m$ alors $g(X_r')^2 \gg \frac{(R_r')^2}{g} \Rightarrow T_{em} = \frac{3p}{\omega_s} R_r' \frac{V_s^2}{g(X_r')^2}$

On remarque bien que : $T_{em} = \frac{a}{g}$ avec $a = \frac{3p}{\omega_s} R_r' \frac{V_s^2}{(X_r')^2} = C^{te}$

Alors on peut conclure que pour $g \in [g_m, 1], T_{em} = f(g)$ est une hyperbole.

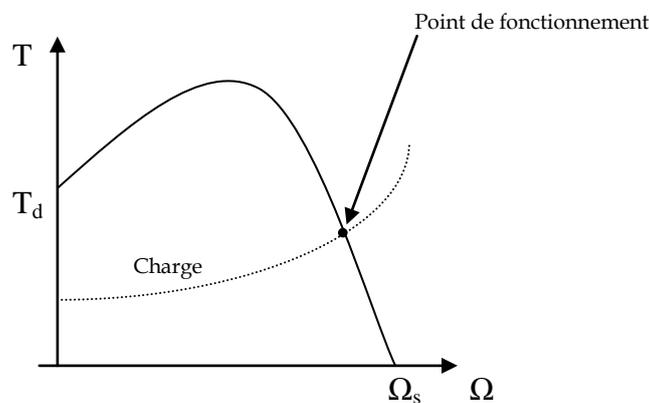


Figure 3. Caractéristique couple-vitesse

Le point de fonctionnement (T, Ω) dans le quadrant I en régime établi de l'ensemble machine plus charge se situe à l'intersection des caractéristiques $T_{em}=f(\Omega)$ du moteur et $T_r=f(\Omega)$ de la charge. Le réglage de la vitesse de la machine asynchrone est donc obtenu en agissant sur le couple qu'elle produit, soit, si l'on se réfère à son expression ci-dessus : le

nombre de paires de pôles de la machine, la tension d'alimentation, le glissement ou la fréquence d'alimentation de la machine.

II.3.1. Réglage par variation du nombre de paires de pôles :

Une action sur le nombre de paire de pôles d'un moteur asynchrone triphasé permet d'obtenir des fréquences de rotation différentes mais fixes et la plage de vitesse n'est pas variée. (*moteurs à couplage de pôles type DAHLANDER et moteurs à enroulements indépendants*).

De manière que :

- Si le nombre de paire de pôles augmente, la fréquence de rotation d'un moteur diminue.
- Si le nombre de paire de pôles diminue, la fréquence de rotation d'un moteur augmente.

II.3.1.1. Moteurs à enroulements indépendants ou à couplage de pôles

Ces moteurs ont plusieurs stators pour un seul rotor (le nombre de paire de pôle est différent pour chaque stator). Plusieurs bobinages sont insérés au stator et le nombre p de paires de pôles est différent pour chaque bobinage. À chaque bobinage alimenté, on obtient une vitesse de synchronisme différente et au glissement près, une vitesse du rotor différente.

II.3.1.2. Moteurs à couplage de pôles DAHLANDER

Le stator est constitué de 6 bobinages et selon leur mode de connexion, on obtient p_1 ou p_2 paires de pôles par phase. Ces deux possibilités de couplage des pôles et permet ainsi 2 vitesses mais uniquement dans un rapport de 1 à 2. Par exemple 3000/1500 tr/min ou 1500/750 tr/min.

- Triangle série pour la petite vitesse
- Etoile parallèle pour la grande

La difficulté de maîtriser le couple de la machine et les faibles plages de variation de la vitesse du moteur font que cette possibilité n'est pratiquement plus utilisée.

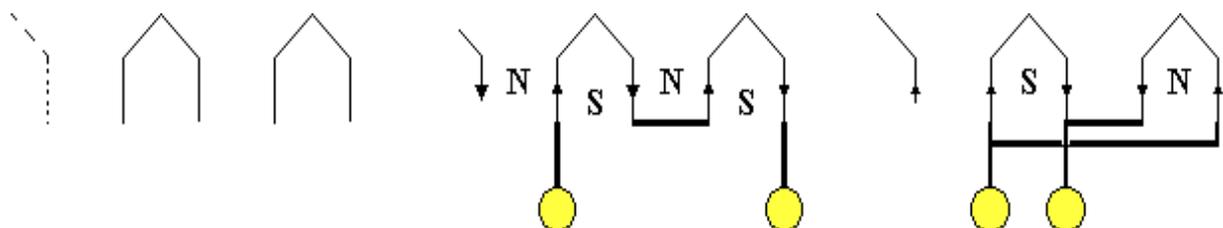
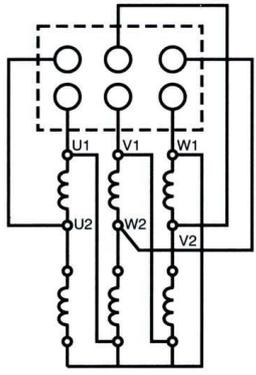
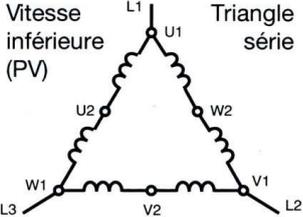
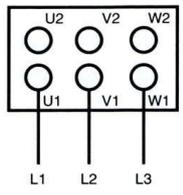
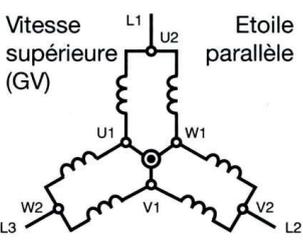
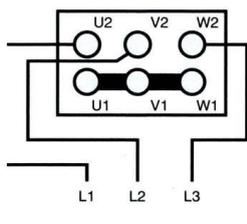
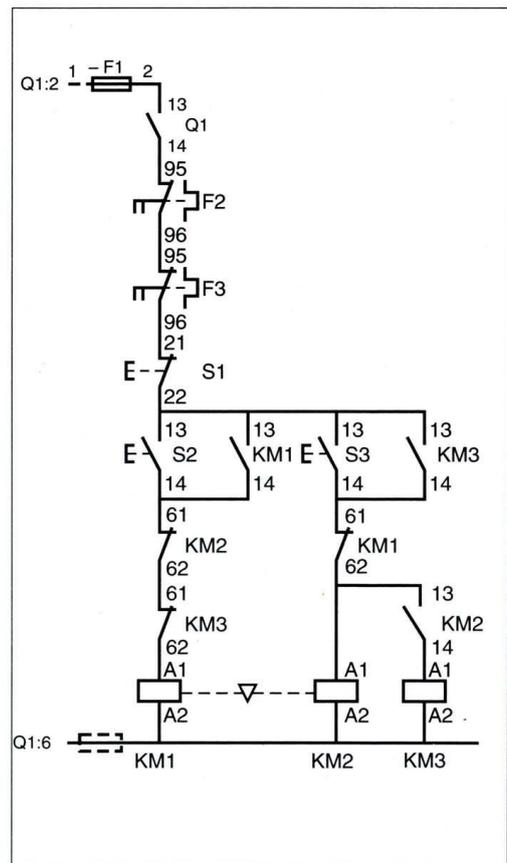
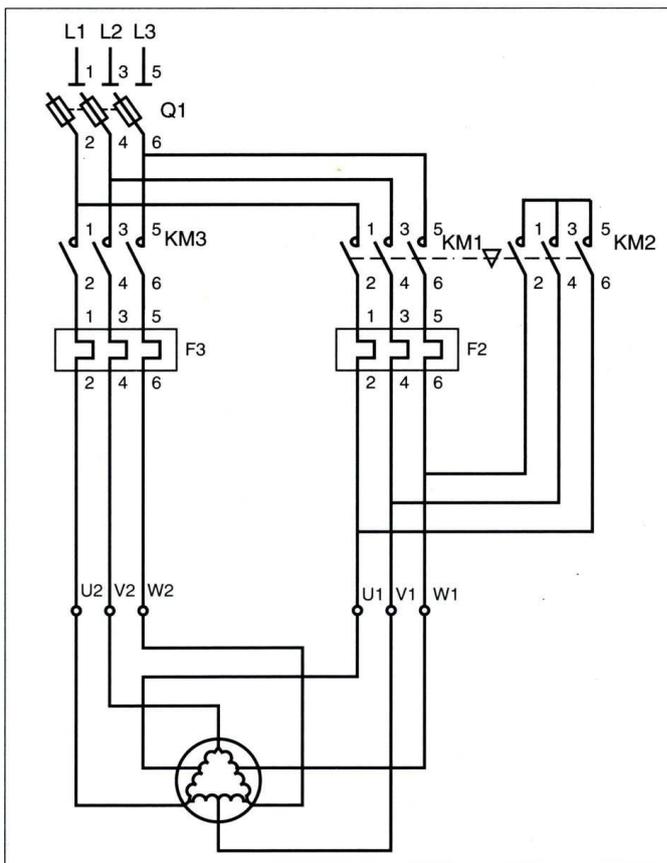


Figure 4 : Couplage des enroulements

Tensions et couplage	Schéma des connexions internes	Schéma de principe	Branchements plaques à bornes
Dahlander "couple constant" ou "usage courant" 6 bornes couplage Δ intérieur des 6 enroulements		Vitesse inférieure (PV)  Triangle série	
		Vitesse supérieure (GV)  Etoile parallèle	
Ce type de moteur ne permet que des rapports de vitesse de 1 à 2			

• Schémas du circuit de puissance et du circuit de commande

Télé mécanique



II.3.2. Réglage par action sur le glissement

☞ Action sur la tension d'alimentation statorique (autotransformateur, gradateur)

- ☞ Rhéostat de glissement au rotor
- ☞ Cascade de récupération (cascade hyposynchrone)

Ce résultat montre qu'il est possible d'obtenir le couple maximal, pour différentes vitesses de rotation, à condition que le rapport tension d'alimentation / fréquence de la tension soit constant (U/f constant).

II.3.2.1. L'action se fait sur la tension statorique

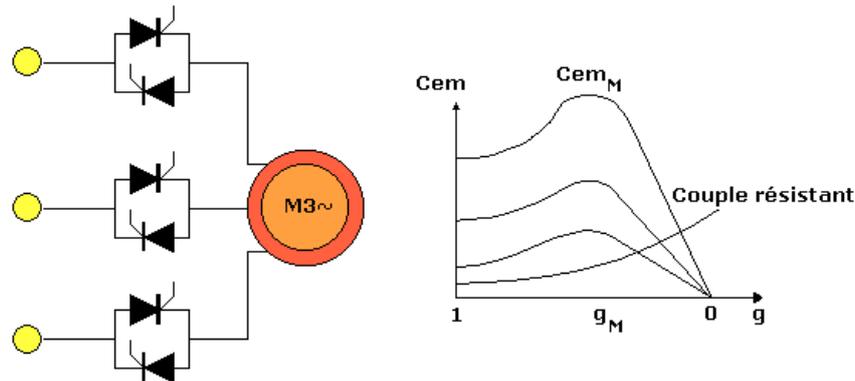


Figure 5 : Variation de vitesse par action sur la tension statorique

Du fait de sa faible plage de variation de vitesse sur moteur à cage standard, le gradateur statorique est surtout utilisé comme procédé de démarrage sur des machines dont le couple résistant est de type parabolique.

II.3.2.2. Rhéostat de glissement au rotor

Cette technique est utilisée sur moteur à rotor bobiné.

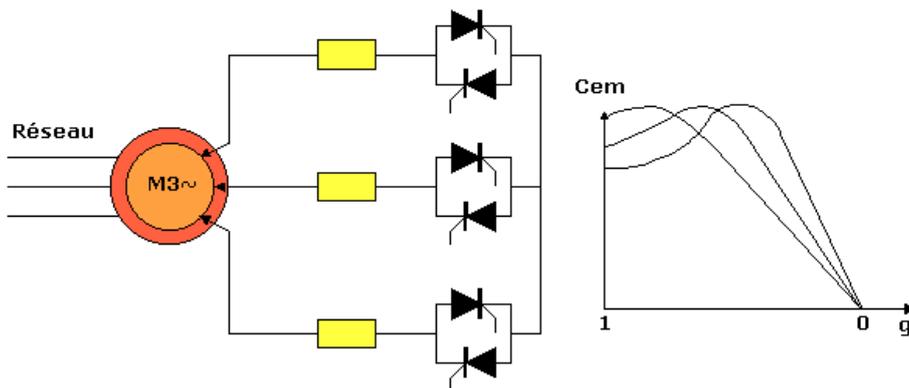


Figure 6 : Variation de vitesse par action sur les enroulements rotoriques

L'utilisation de résistance rotorique permet un réglage de la vitesse au dessous de la vitesse nominale mais avec un très mal rendement.

Un choix judicieux de la valeur des jeux de résistances insérées au rotor, permet de régler la vitesse de ce type de moteur dans une plage intéressante.

L'insertion permanente d'une résistance aux bornes du rotor abaisse la vitesse et ce, d'autant plus, que la valeur de la résistance est élevée. Ce procédé est intéressant pour démarrer très progressivement des charges d'inertie élevée.

Par contre, s'il s'agit de régler réellement la vitesse, ce procédé cumule 3 inconvénients :

- instabilité à de faibles vitesses (<40%)
- pertes actives importantes dans les résistances
- instabilité de la vitesse lorsque la charge varie ; cette variation de vitesse peut se visualiser sur le graphe en dessinant une horizontale $C_{charge} = 0,85 \text{ CN}$ par exemple.

II.3.2.3. Cascade de récupération (cascade hyposynchrone)

Pour de récupérer l'énergie transmise au rotor (deuxième inconvénient) : c'est la cascade hyposynchrone réservée à la très forte puissance pour des machines à rotor bobiné.

Cette technique est utilisée sur moteur à rotor bobiné.

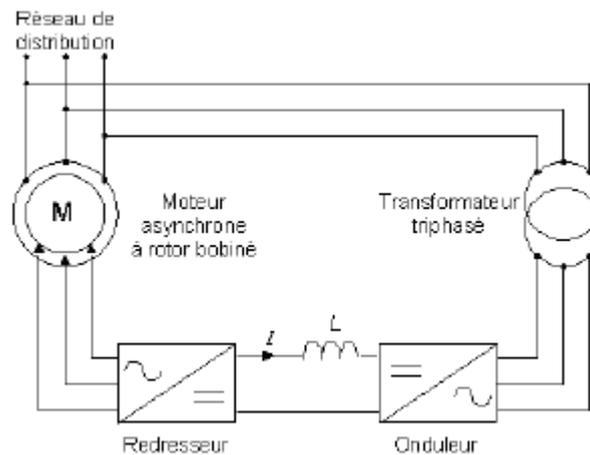


Figure 7 : Synoptique d'une cascade hyposynchrone

Le transformateur est choisi avec un rapport de transformation permettant le glissement maximal souhaité.

La récupération de l'énergie rotorique assure un excellent rendement, voisin de celui du moteur seul.

Le facteur de puissance de la cascade est plus faible que celui du moteur seul et il y a nécessité de le relever avec une batterie de condensateurs.

La cascade ne peut démarrer seule : il est nécessaire de prévoir un dispositif annexe de démarrage par résistances rotoriques.

Ce résultat montre qu'il est possible d'obtenir le couple maximal, pour différentes vitesses de rotation, à condition que le rapport tension d'alimentation / fréquence de la tension soit constant (U/f constant).

II.3.3. Réglage par variation de fréquence

L'alimentation à fréquence variable des machines asynchrones se fait à l'aide d'un convertisseur statique généralement continu-alternatif (Fig. 8). La source d'entrée peut être du type source de courant ou du type source de tension. En sortie du convertisseur, on contrôle l'amplitude des tensions ou des courants statoriques ainsi que leur fréquence f_s .

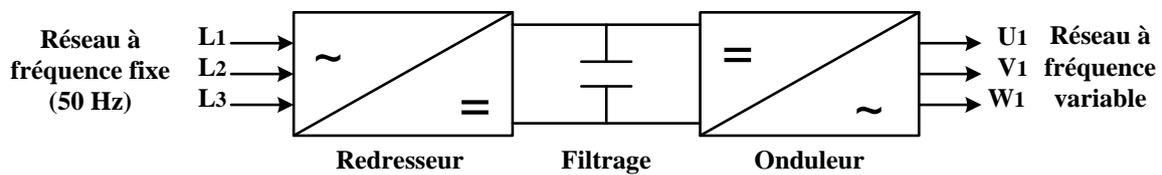


Figure 8 : Synoptique d'un convertisseur continu-alternatif

La tension et le flux statorique sont liés par la relation : $V_s = j\omega\phi_s$

Ainsi le couple électromagnétique peut s'exprimer par : $T_{em} = 3 \cdot p \cdot \phi_s^2 \frac{R_r' \omega_r}{R_r'^2 + (L_r' \omega_r)^2}$ avec

$$\omega_r = \omega_s - \omega = g\omega_s$$

Pour contrôler le couple électromagnétique de la machine asynchrone, nous voyons d'après la relation précédente qu'il faut contrôler le flux statorique Φ_s et la pulsation des courants rotoriques ω_r (grandeur qui n'est pas directement accessible).

II.3.3.1. Machine asynchrone - onduleur MLI

Le terme M.L.I. signifie : Modulation de Largeur d'Impulsion. Son principe est le suivant : La tension continue d'entrée de l'onduleur est hachée de façon à créer une succession de créneaux d'amplitude égale à celle-ci, mais de largeur variable.

La commande en M.L.I. est utilisée pour l'onduleur car elle permet d'obtenir un courant dont la forme est très proche d'une sinusoïde.

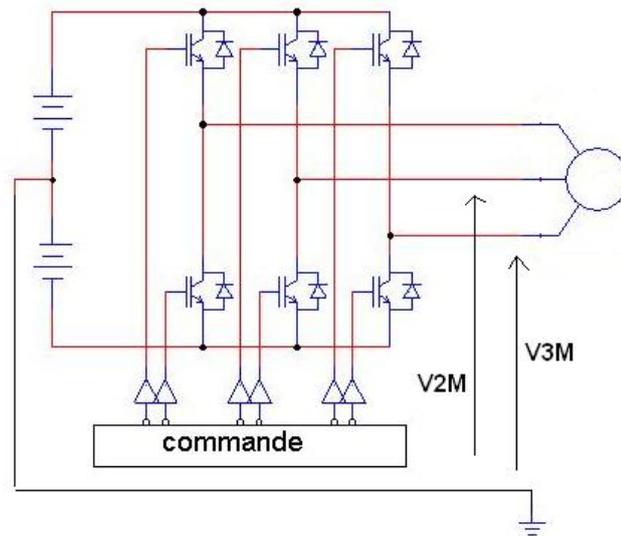


Figure 9 : Schéma structurel d'un onduleur M.L.I. triphasé

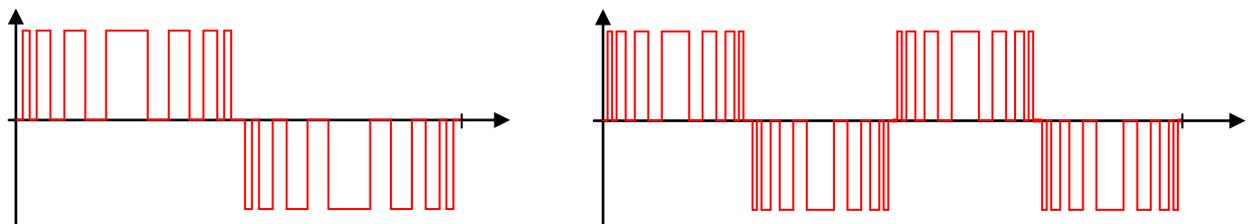


Figure 10 : Forme de la tension de sortie pour $f = 25 \text{ Hz}$ et $f = 50 \text{ Hz}$

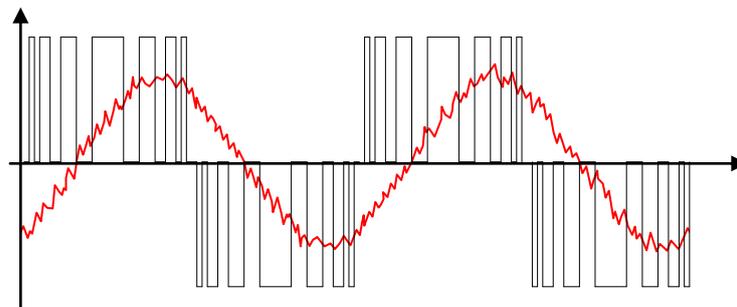


Figure 11 : forme du courant de sortie pour $f = 50 \text{ Hz}$

II.3.3.2. Contrôle des tensions statoriques

☞ Principe de la commande en boucle ouverte.

A flux constant, le couple électromagnétique de la machine asynchrone ne dépend que de la pulsation ω_r . Ainsi, pour différentes valeurs de la pulsation des grandeurs statoriques ω_s obtient-on une famille de caractéristiques Couple-Vitesse, $\text{CEM} = f(\omega)$ (Fig. 12)

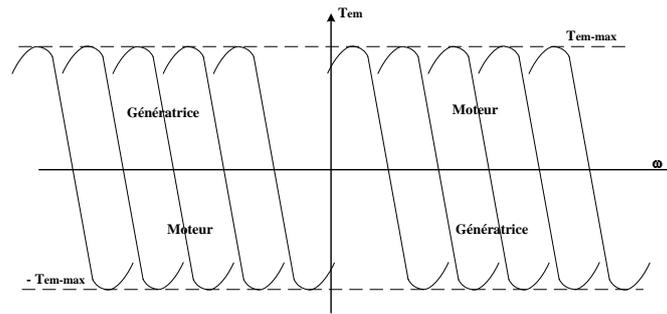


Figure 12 : Caractéristiques Couple-Vitesse

Dans la zone linéaire (faibles glissements), cette famille de caractéristiques Couple-Vitesse est tout à fait analogue à celle d'une machine à courant continu où la tension d'induit constitue le paramètre de réglage de la vitesse. Ainsi pour faire varier en boucle ouverte la vitesse d'une machine asynchrone doit-on faire varier la fréquence d'alimentation au stator tout en maintenant le flux constant. Les réglages de tension et de fréquence au stator de la machine sont obtenus grâce à un onduleur de tension MLI.

Ainsi, pour maintenir le flux Φ_s constant, il faut que la tension efficace V_s soit

$$\text{proportionnelle à la fréquence d'alimentation statorique : } \phi_s = \frac{V_s}{\omega_s}.$$

Toutefois, cette relation n'est pas valable pour des faibles valeurs de la pulsation ω_s car la chute de tension due à la résistance des enroulements du stator n'est plus négligeable (voir cours machine asynchrone modèle de SteinMetz). Aussi envisage-t-on sur la plupart des variateurs une compensation de cette chute de tension en augmentant l'amplitude des tensions statoriques pour les faibles valeurs de ω_s de façon à maintenir Φ_s constant. D'autre part, si un fonctionnement en survitesse de la machine asynchrone est envisagé, il n'est pas possible de dépasser la tension statorique nominale (claquage des isolants). Le flux Φ_s est alors diminué de même que le couple électromagnétique maximum (fig 13).

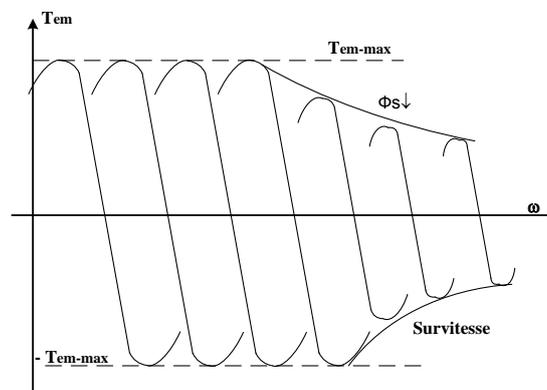


Figure 13 : Effet d'un fonctionnement en survitesse sur le flux et le couple

La commande en boucle ouverte ne permet pas de contrôler parfaitement la vitesse de rotation de la machine puisque à pulsation ω_s constante, la vitesse de rotation dépend du couple résistant de la charge entraînée (glissement).

☞ Réalisation de l'asservissement de vitesse

Pour assurer l'asservissement de vitesse de rotation, on rajoute une boucle externe sous forme d'un correcteur, généralement de type PI, qui permet d'estimer la pulsation rotorique. L'erreur de vitesse, permet d'augmenter la fréquence des tensions statoriques (fig 14).

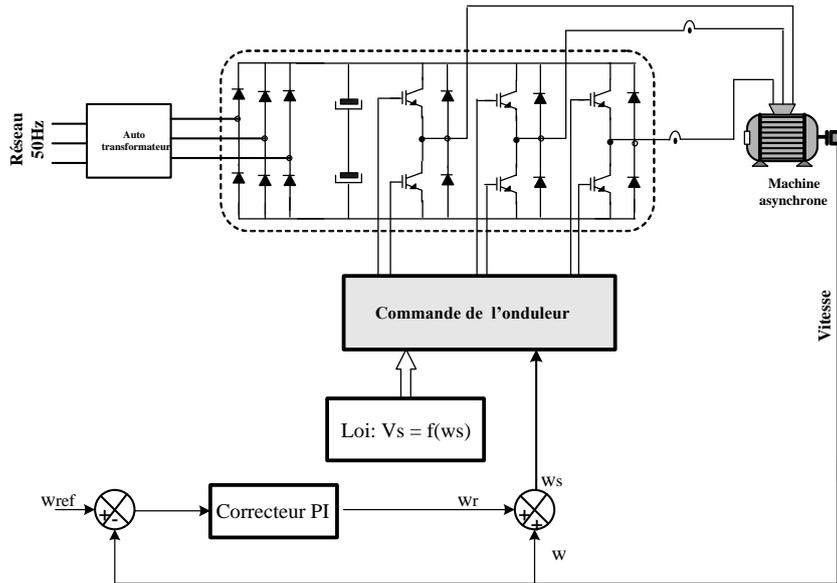


Figure 14 : Synoptique de la commande avec asservissement de vitesse

La tension de sortie du correcteur notée ω_r est additionnée à la tension image de la vitesse de rotation ω et ceci de façon à obtenir la valeur adéquat pour la pulsation statorique. La pulsation statorique est calculée par la relation : $\omega_s = \omega_r + \omega$. C'est l'autopilotage fréquentiel.

Dans cette stratégie de commande le contrôle de l'amplitude des courants statoriques est assuré uniquement en régime permanent. Lors des régimes transitoires, les valeurs instantanées des courants ne sont pas contrôlées. Par suite, il est préférable d'asservir les courants de sortie de l'onduleur MLI de façon à contrôler parfaitement les valeurs instantanées des courants statoriques de la machine asynchrone.

II.3.3.3. Contrôle des courants statoriques

Une boucle de courant est nécessaire pour assurer le contrôler le courant en sortie de chaque bras de l'onduleur MLI.

Il faut maintenir le flux statorique constant et contrôler la pulsation ω_r , pour que le couple électromagnétique de la machine asynchrone soit contrôlé. Etant donné que la machine

est ici alimentée en courant et non en tension, alors la loi de variation $I_s = f(\omega_r)$ permet de maintenir le flux ϕ_s constant.

☞ Réalisation de l'asservissement de vitesse

Le schéma synoptique de la figure 15 décrit le principe de l'asservissement de vitesse de la machine asynchrone.

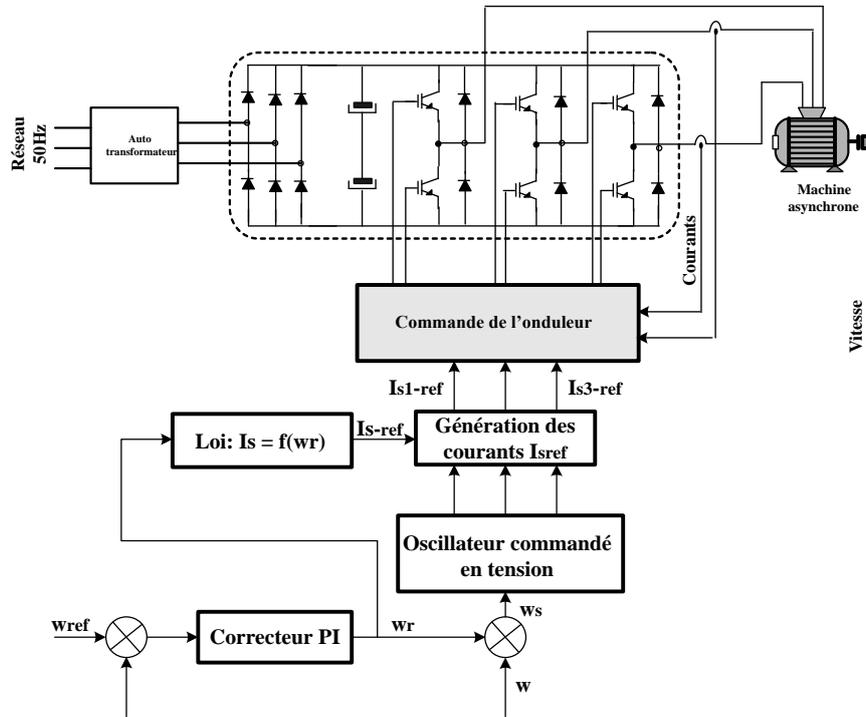


Figure 15 : Synoptique de l'asservissement de vitesse de la MAS

La pulsation rotorique ω_r est estimée grâce au correcteur PI. Pour déterminer la pulsation des courants statoriques, il faut additionner l'image de la vitesse de rotation et l'image de la pulsation rotorique. Ceci permet de vérifier l'équation $\omega_s = \omega_r + \omega$ et de réaliser l'autopilotage fréquentiel. Etant donné que $\omega_r \ll \omega_s$, le capteur de vitesse utilisé doit être numérique (codeur incrémental) afin d'avoir une grande précision sur la mesure de ω .

L'amplitude des courants de références $i_{s1\text{réf}}$, $i_{s2\text{réf}}$, $i_{s3\text{réf}}$ qui sont générés par un oscillateur commandé en tension est fixé par la loi $I_s = f(\omega_r)$. La commande de la figure 15 est complexe et est généralement réalisée en faisant appel aux techniques numériques.

III. variateur de vitesse altivar

Le variateur de vitesse ALTIVAR est un convertisseur de fréquence destiné à l'alimentation des moteurs asynchrones triphasés à cage. Ils fonctionnent suivant le principe MLI. Cette technique assure une rotation des moteurs régulière et sans à coup à basse vitesse.

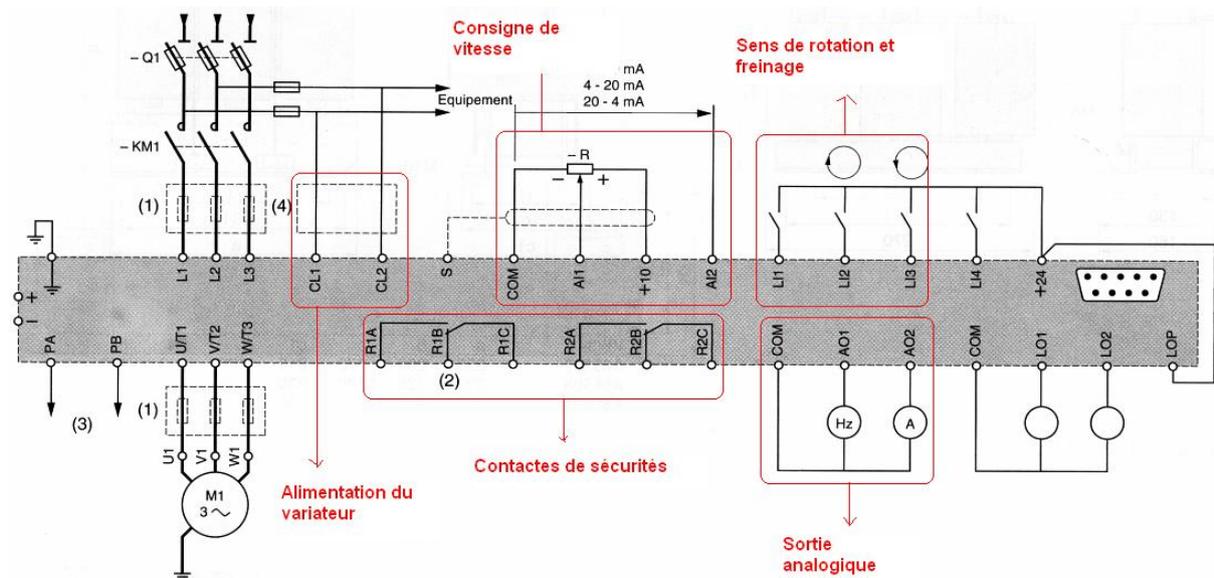


Figure 16 : Branchement d'un variateur de vitesse ALTIVAR 66

☞ Caractéristiques des ALTIVAR 66

Référence	ATV 66 M2	ATV 66 N4
Alimentation du redresseur	Monophasé	Triphasé
Réseau d'alimentation	220-240 V 50 : 60 Hz	380-415 V 50 : 60 Hz
Pont de puissance		
Forme de la tension et du courant		
Gamme de fréquence	1 à 67 Hz	1 à 110 Hz
Sens de marche	2	2
Quadrant de fonctionnement		
Freinage d'arrêt	/////	Par injection de courant continu
Freinage de ralentissement	Rhéostatique avec module option	Rhéostatique avec module option
Tension moteur	220-240 V	380-415 V
Gamme de puissance	0.75 à 37 kW	0.75 à 250 kW

Les variateurs de vitesse peuvent être équipés en option des éléments suivant :

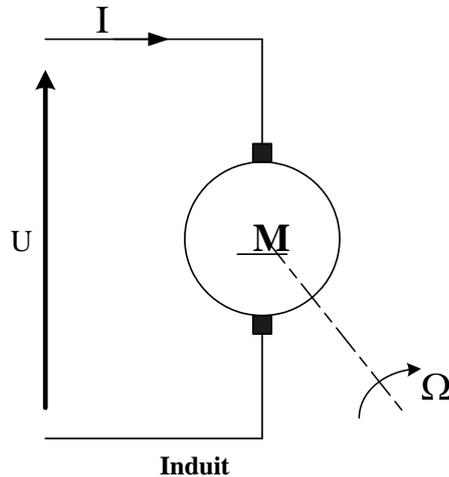
- Résistance externe pour le freinage
- Inductances de lignes pour la réduction des courants harmoniques.

TD N°1 Commande des machines à MCC

Exercice N°1 : (BTS Electrotechnique 1995)

1^{ère} partie : Etude de la machine à courant continu

Caractéristiques



- Inducteur à aimant permanents ;
- Induit : résistance $R = 4 \Omega$;
- Constante de f.é.m et de couple : $k=0.3 \text{ V.s.rad}^{-1}$
- Intensité nominale : $I_n = 4 \text{ A}$

Les frottements ainsi que les pertes dans le fer seront négligés.

On notera :

E : la f.é.m (V) $E = K \cdot \Omega$

U : tension d'alimentation de l'induit (V)

n : la fréquence de rotation en tr/s

Ω : la vitesse angulaire de rotation

T_e : couple électromagnétique (Nm)

I.1. Etablir l'expression du moment du couple électromagnétique T_e .

I.2. Pour le courant nominal d'intensité I_n , calculer les valeurs numériques de la tension d'alimentation U et du moment du couple électromagnétique T_e pour les fréquences de rotation :

* $n = 0$

* $n = 50 \text{ tr/s}$

I.3. On applique sur l'arbre de la machine, un couple résistant, de moment $T_R = 0.8 \text{ N.m}$.

I.3.1. Quelle relation lie les moments des couples électromagnétique et résistant en régime permanent ?

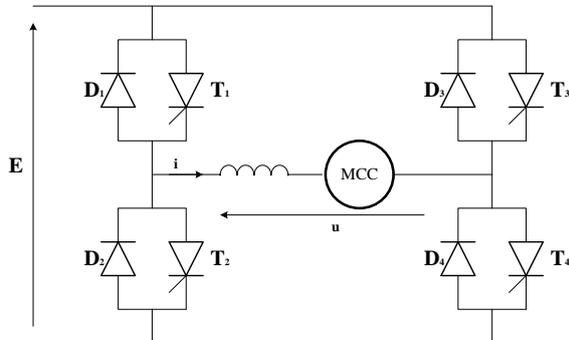
I.3.2. Déterminer la relation exprimant Ω en fonction de U , R , k et T_R en régime permanent.

I.3.3. A partir de quelle valeur de l'intensité I , le moteur peut-il démarrer? Quelle est la tension U correspondante?

I.4. Quelle tension U maximale doit-on s'imposer au démarrage pour que l'intensité I_d de démarrage demeure inférieure à $1.25 I_n$?

2^{ème} partie: Etude du convertisseur

La machine est alimentée par le convertisseur dont le schéma est représenté ci-dessous. Les ordres d'ouvertures et de fermetures des interrupteurs (T_1 , T_2 , T_3 et T_4) sont élaborés à partir d'une tension de contrôle V_c .



T_1 , T_2 , T_3 et T_4 sont des interrupteurs unidirectionnels en courant commandés à l'ouverture et la fermeture ; à l'état fermé, ils ne présentent pas de chute de tension à leurs bornes.

L est une bobine de lissage

II.1. Soit T la période de fonctionnement et α un coefficient compris entre 0 et 1

- Pour $0 < t < \alpha T$ T_1 et T_4 sont commandés à l'état fermé ;

T_2 et T_3 sont commandés à l'état ouvert ;

- Pour $\alpha T < t < T$ T_3 et T_2 sont commandés à l'état fermé ;

T_1 et T_4 sont commandés à l'état ouvert ;

II.1.1. Dans ces conditions, représenter sur le document réponse 1 la tension $u(t)$ en fonction du temps

II.1.2. Calculer la valeur moyenne U_{moy} de $u(t)$.

II.1.3. Comment varie le signe de U_{moy} en fonction de α ?

II.2. Le document réponse 2 présente 4 cas de fonctionnement. Pour chacun de ces 4 cas, $i(t)$ évolue entre une valeur minimale I_m et une valeur maximale I_M .

II.2.1. Tracer $u(t)$ et en déduire le signe de U_{moy} .

II.2.2. Tracer $i(t)$ et en déduire le signe de I_{moy} .

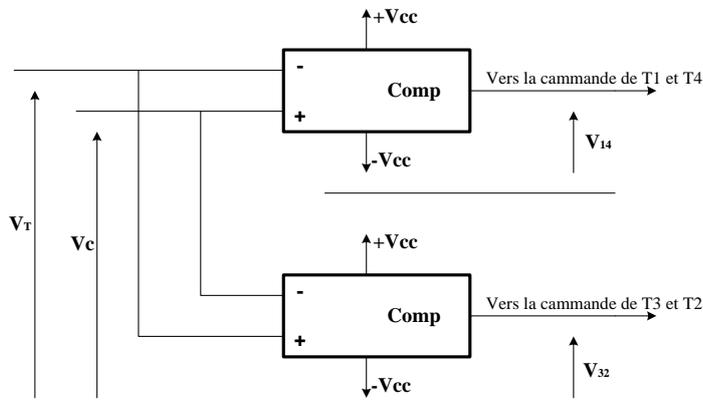
II.2.3. Quel est le régime de fonctionnement de la machine à courant continu (moteur ou génératrice) ?

II.2.4. Compléter le document réponse 2, en indiquant pour chacun des cas les éléments du convertisseur en conduction.

II.3. On désire piloter le convertisseur avec une tension de commande V_c pour avoir la relation : $U_{\text{moy}} = H.V_c$

H est une constante propre au montage.

L'ensemble ci-dessous sert à élaborer 2 signaux V_{14} et V_{32} utilisés pour la commande des interrupteurs.



Les deux comparateurs sont alimentés entre $+V_{cc}$ et $-V_{cc}$. La tension de sortie de chacun de ces comparateurs commute entre $+V_{cc}$ et $-V_{cc}$.

☞ Lorsque la tension de sortie d'un comparateur est au niveau $+V_{cc}$, les interrupteurs associés sont commandés à la fermeture.

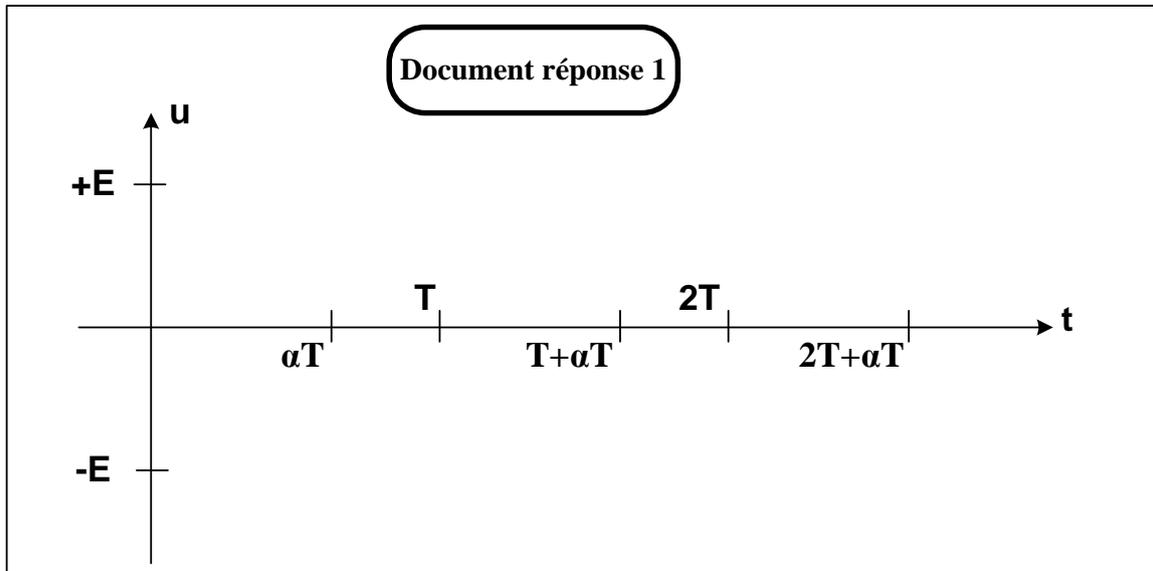
☞ Lorsque la tension de sortie d'un comparateur est au niveau $-V_{cc}$, les interrupteurs associés sont commandés à l'ouverture.

La tension V_T est définie en document réponse 3 ; sa période est T , elle évolue entre $+V_{TM}$ et $-V_{TM}$.

On considère le cas où $V_c > 0$

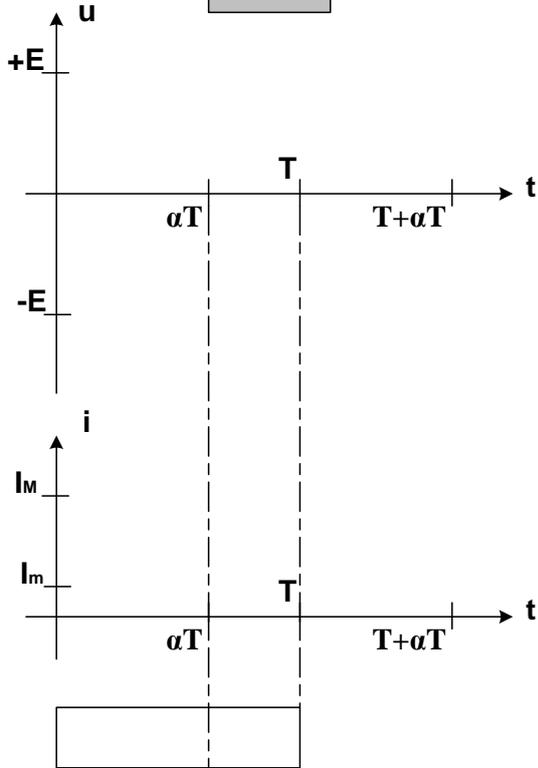
II.3.1. Représenter les signaux V_{14} et V_{32} sur le document réponse 3

II.3.2. Calculer la date t_1 en fonction de T , V_c et V_{TM} .

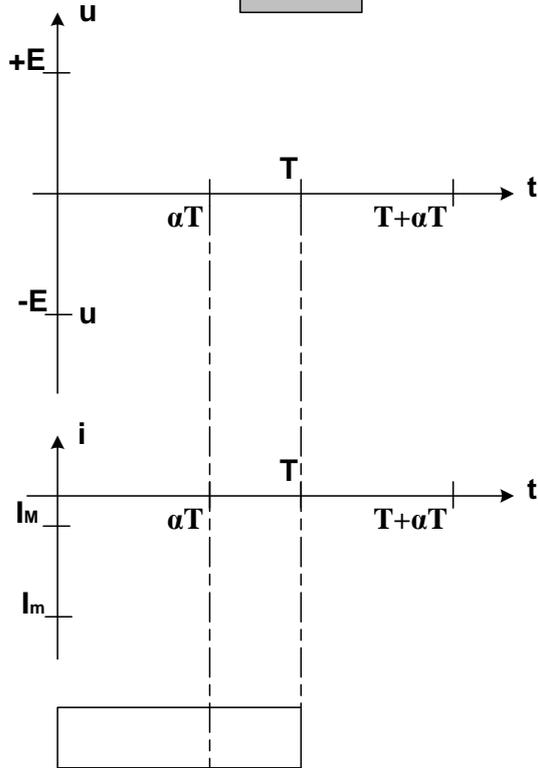


Document réponse 2

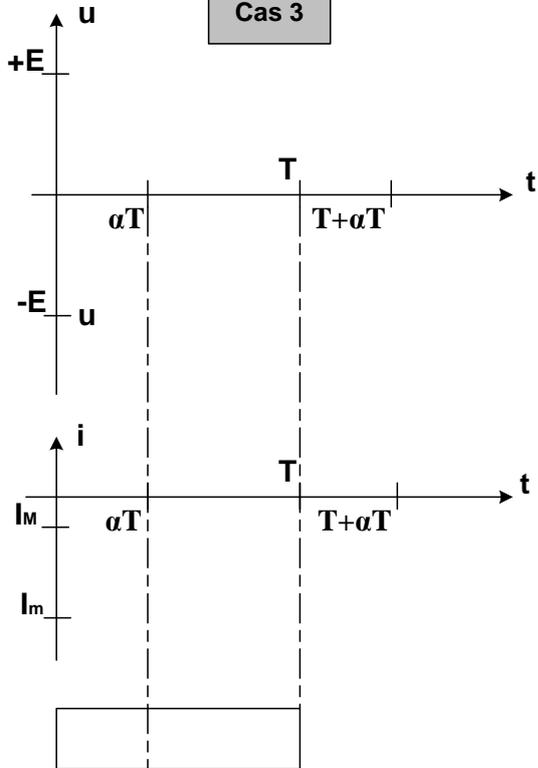
Cas 1



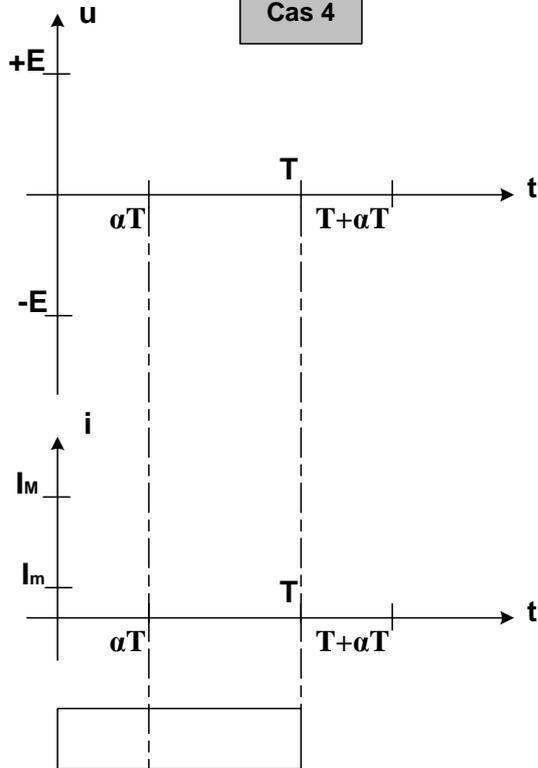
Cas 2

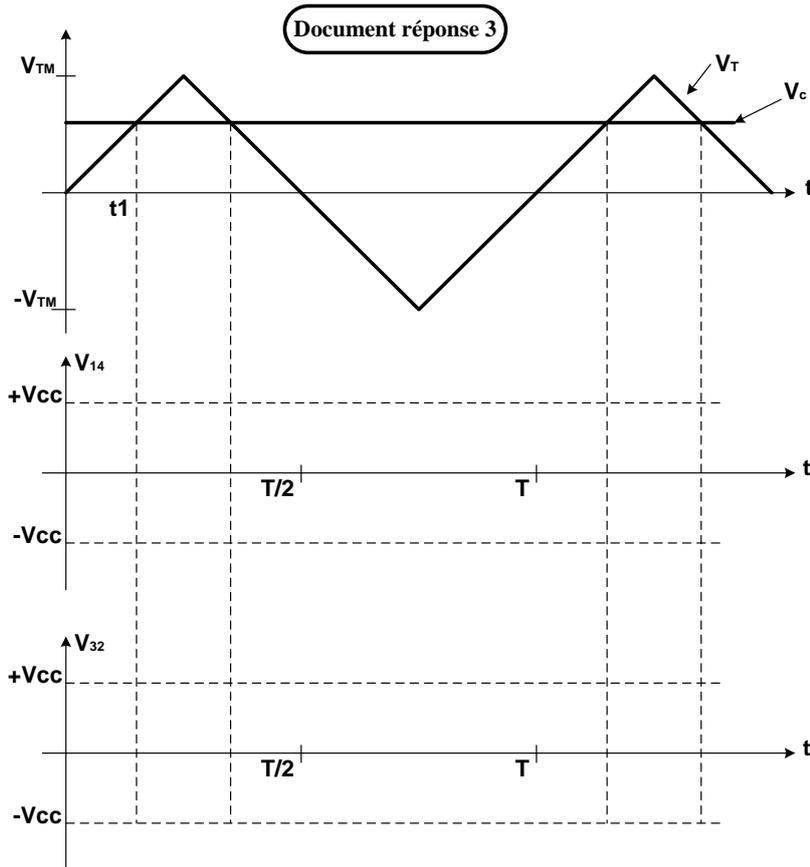


Cas 3



Cas 4





Exercice N° 2 :

Un moteur à courant continu, à aimant permanent, entraîne une charge opposant un couple résistant T_R proportionnel à la vitesse de rotation. Ce moteur est alimenté par un hacheur quatre quadrants. La position de la charge est asservie à une tension continue dite « tension de consigne ».

Le problème proposé est composé de quatre parties totalement indépendantes :

- Fonctionnement quatre quadrant du moteur à courant continu ;
- Etude du variateur ;
- Génération des signaux de commande du hacheur ;
- Asservissement de position.

De nombreux résultats intermédiaire sont fournis permettant de traiter indépendamment chaque sous ensemble de chacune des quatre parties.

Caractéristiques du moteur à courant continu et de sa charge :

- Coefficient de proportionnalité entre la vitesse angulaire et la fém de l'induit : $K_E = 0.5 \text{ Vrd}^{-1} \text{ s}$
- Coefficient de proportionnalité entre le courant et le couple : $K_C = 0.5 \text{ NmA}^{-1}$
- Vitesse nominale de rotation $n_N = 1500 \text{ tr/mn}$

- Résistance de l'induit $R = 1 \Omega$
- Courant nominal d'induit $I_N = 8 \text{ A}$
- Courant maximal admis $I_{\max} = 16 \text{ A}$
- Couple nominale $T_N = 4 \text{ Nm}$
- Moment d'inertie total ramené à l'axe du moteur $J = 0.01 \text{ kgm}^2$
- Couple résistant de type frottement visqueux : $f.\Omega$ avec $f = 12.7 * 10^{-3} \text{ N.m.rd}^{-1}\cdot\text{s}$

1^{ère} partie : Fonctionnement quatre quadrants du moteur à courant continu

On négligera les pertes du moteur à courant continu

1.1. Identification des quatre quadrants

Soient Ω la vitesse angulaire et T le moment du couple du moteur à courant continu. Une convention d'orientation sur l'axe est choisie. Suivant les signes de Ω et de T , la figure 1 définit quatre quadrants de fonctionnement.

Le moteur est alimenté par un hacheur quatre quadrants.

Le courant et la tension ont été relevés (figure 2) pour plusieurs phases de fonctionnement. Le courant i et la tension u de l'induit sont orientés de manière à ce que la figure 2a corresponde à un fonctionnement dans le quadrant I.

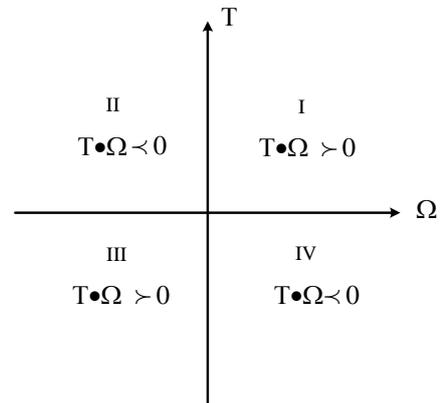


Figure 1

I.1.1. Montrer que la valeur moyenne u_{moy} de la tension proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur.

I.1.2. Montrer que la valeur moyenne i_{moy} du courant est proportionnelle au couple de la machine.

I.1.3. Préciser dans quels quadrants fonctionnait la machine lorsqu'on a relevé les oscillogrammes présentés en figure 2a, 2b, 2c et 2d.

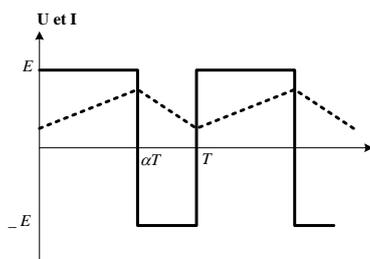


Figure 2a

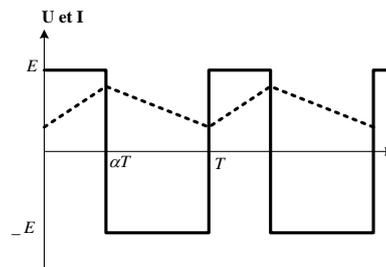


Figure 2b

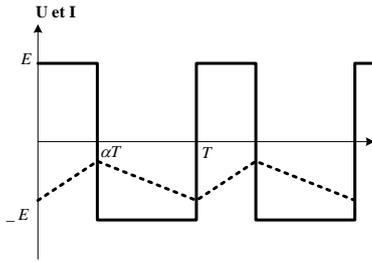


Figure 2c

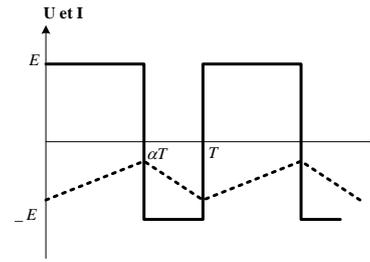


Figure 2d

I.2. Etude d'un cycle de fonctionnement :

Le moteur étant initialement au repos, on envisage un fonctionnement périodique défini comme suit :

- a** Mise en rotation sens positif à couple maximum ($C_a = 8 \text{ Nm}$) jusqu'à atteindre la vitesse nominale.
- b** Fonctionnement à vitesse nominale pendant 0.5 seconde.
- c** Freinage à couple maximum jusqu'à l'arrêt ($C_c = -8 \text{ Nm}$).
- d** Temps d'arrêt de 1 seconde.
- a'** Mise en rotation sens négatif à couple maximum ($C_a = -8 \text{ Nm}$) jusqu'à atteindre la vitesse nominale.
- b'** Fonctionnement à vitesse nominale pendant 0.5 seconde.
- c'** Freinage à couple maximum jusqu'à l'arrêt ($C_c = +8 \text{ Nm}$).
- d'** Temps d'arrêt de 1 seconde.

I.2.1. Déterminer le couple pour les phases de fonctionnement b, d, b' et d'.

I.2.2. Représenter dans le repère d'ordonnée T et d'abscisse Ω , défini figure 1, le déplacement du point de fonctionnement du moteur lors du cycle. On distinguera les déplacements instantanés et les déplacements ayant une durée non nulle du point de fonctionnement (par exemple en traçant les premiers en traits pointillés et les seconds en traits pleins).

I.2.3. En résolvant l'équation différentielle régissant le mouvement, déterminer les durées t_a des phases a et a' et t_c des phases c et c'.

I.2.4. On rappelle que le couple quadratique moyen est défini par :
$$T_{quad} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n T_i^2 t_i}$$

Où T est la période du cycle de fonctionnement, T_i et t_i le couple et la durée de la phase i de fonctionnement. Calculer le couple quadratique moyen. Comparer le résultat obtenu au couple nominal, conclure.

2^{ème} partie : Etude du variateur

Le montage utilisé est un hacheur en pont à thyristor. Ils sont assimilés à des interrupteurs commandés, unidirectionnels. Les diodes sont supposées idéales. L'ensemble moteur et bobine de lissage est assimilé dans cette partie à une charge E, L. Soit T la période et α le rapport cyclique de hachage.

- Pour $0 < t < \alpha T$ T1 et T4 sont commandés à l'état fermé ;
T2 et T3 sont commandés à l'état ouvert ;
- Pour $\alpha T < t < T$ T3 et T2 sont commandés à l'état fermé ;
T1 et T4 sont commandés à l'état ouvert ;

II.1. Composants en conduction

La figure 3 montre l'allure du courant et de la tension d'induit correspondant à trois types de fonctionnement différents. Reproduire ces trois schémas en précisant sur chacun de ces relevés, à chaque instant, parmi les quatre thyristors et les quatre diodes, les composants en conduction.

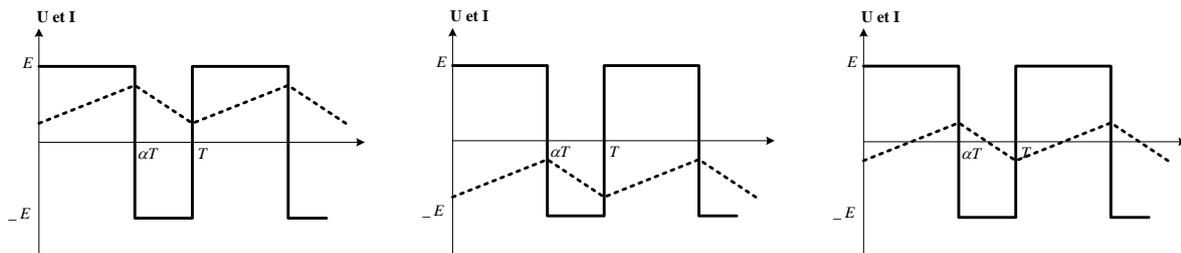


Figure 3

II.2. Expression de la valeur moyenne de u

Déterminer u_{moy} « valeur moyenne » de $u(t)$, en fonction de E et α . En déduire l'expression de la f.e.m E' en fonction de E et α .

II.3. Expression de $i(t)$

On notera I_0 et I_1 les valeurs de i lorsque $t = 0$ et $t = \alpha$.

II.3.1. Etablir les expressions de $i(t)$ de 0 à αT et de αT à T en fonction de E , L , E' , I_0 et I_1

II.3.2. Exprimer l'ondulation du courant en fonction de E , α , T et L .

II.4. Application

Déduire du relevé de la figure 5, la valeur de L

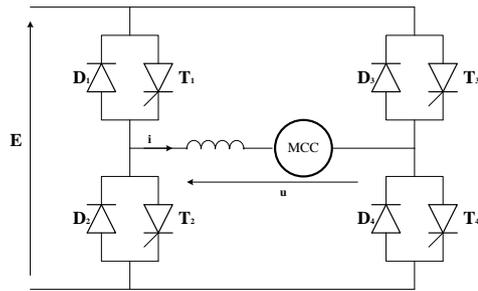


Figure 4

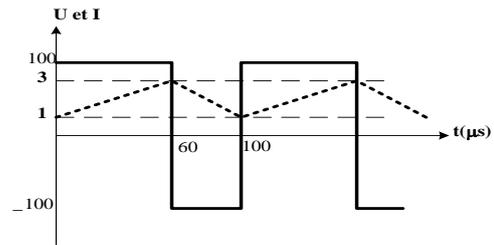


Figure 5

Exercice N°3 : (D-S ISET Sidi Bouzid, Novembre 2010)

Ce sujet comporte 3 parties indépendantes :

1^{ère} Partie : Etude du moteur

2^{ème} partie : Etude du convertisseur

3^{ème} partie : Asservissement de vitesse

Nous vous proposons d'étudier le comportement d'un moteur à courant continu, à excitation indépendante, inséré dans une boucle de régulation. Ce moteur est commandé par l'induit à travers un hacheur quatre quadrants, et le circuit inducteur est commandé par une alimentation stabilisée fournissant un courant constant pour tout le problème.

Les conditions nominales de fonctionnement du moteur sont :

- Tension d'induit nominale : $U_N = 164 \text{ V}$
- Courant d'induit nominal : $I_N = 7.2 \text{ A}$
- Fréquence nominale de rotation : $n_N = 3000 \text{ tr/min}$
- Résistance de l'induit : $R = 1.6\Omega$

On néglige toutes les pertes

1^{ère} Partie : Etude du moteur

I.1. Donner l'expression de la f.é.m E en fonction du flux et de la vitesse angulaire de rotation

Ω , sachant que $E = K \cdot \Phi \cdot n$

I.2. L'intensité du courant circulant dans l'induit est I_a

I.2.1. Donner l'expression de la puissance électromagnétique P_{em} .

I.2.2. Dédire l'expression du moment de couple électromagnétique T_{em} .

I.2.3. Calculer le couple T_N correspond au point nominal.

Sachant que : la f.é.m du moteur égale à 51 V pour une fréquence de rotation de 1000 tr/min

I.3. La tension d'alimentation du moteur est $u = U_N$, on suppose que le régime permanent est établi.

I.3.1. Sachant que le moteur fonctionne à vide, ses pertes sont négligées ($E = U_N$), calcules sa fréquence de rotation n_0 tr/min

I.3.2. Le moteur fournit son couple nominale T_N . Calculer sa fréquence de rotation n en tr/min

I.3.3. Calculer la variation de fréquence. $\Delta n = n_0 - n$

2^{ème} partie : Etude du convertisseur

La machine est alimentée par hacheur dont le schéma est représenté par la figure 1. Les ordres d'ouvertures et de fermetures des interrupteurs (T_1, T_2, T_3 et T_4) sont élaborés à partir d'une tension de contrôle V_c . T_1, T_2, T_3 et T_4 sont des interrupteurs unidirectionnels en courant commandés à l'ouverture et la fermeture ; à l'état fermé, ils ne présentent pas de chute de tension à leurs bornes.

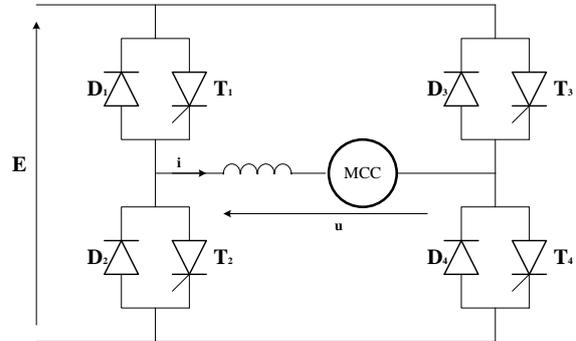
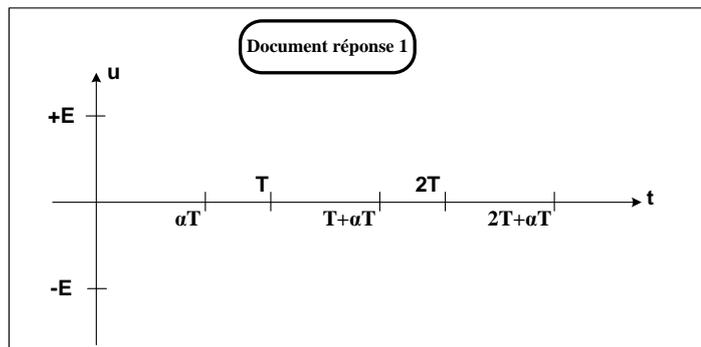


Figure 1

II.1. Soit T la période de fonctionnement et α le rapport cyclique de hachage tel que : $0 < \alpha < 1$

☞ Pour $0 < t < \alpha T$ T_1 et T_4 sont commandés à l'état fermé ;

☞ Pour $\alpha T < t < T$ T_3 et T_2 sont commandés à l'état fermé ;



II.1.1. Dans ces conditions, représenter sur le document réponse 1 l'allure de la tension $u(t)$ en fonction du temps.

II.1.2. Calculer la valeur moyenne U_{moy} de $u(t)$.

II.1.3. Comment varie le signe de U_{moy} en fonction de α ?

II.2.

La figure 2 définit quatre quadrants de fonctionnement.

Le courant et la tension ont été relevés figure pour plusieurs phases de fonctionnement.

Le courant i et la tension u sont orientés de manière à ce que la figure 3a corresponde à un fonctionnement dans le quadrant I.

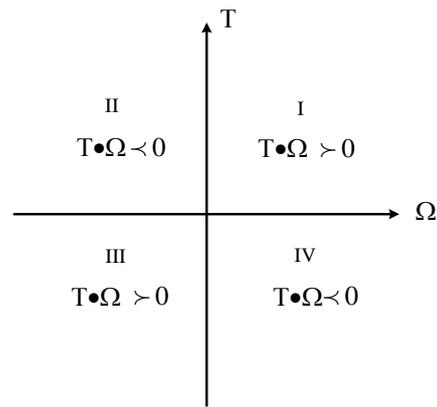


Figure 2

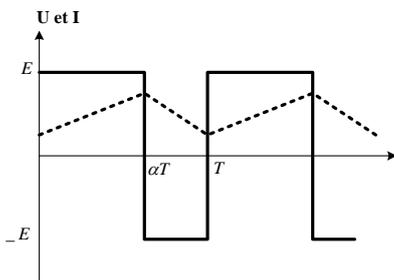


Figure 3a

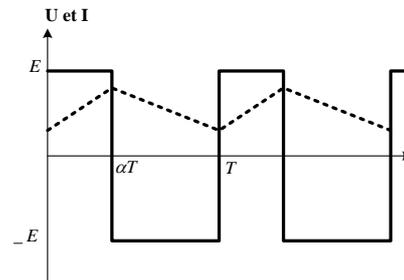


Figure 3b

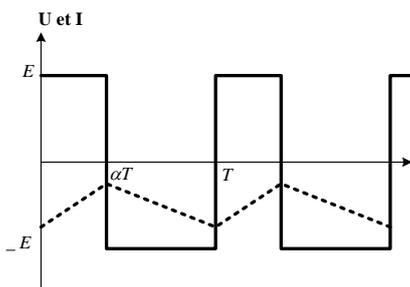


Figure 3c

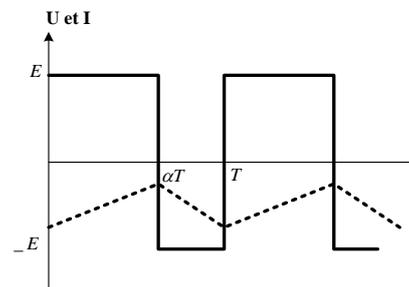


Figure 3d

Préciser dans quels quadrants fonctionnait la machine lorsqu'on a relevé les oscillogrammes présentés en figure 3a, 3b, 3c et 3d. Déduire le régime de fonctionnement de la machine à courant continu (moteur ou génératrice)

3^{ème} partie : Asservissement de vitesse

La figure 4 donne la structure générale la plus fréquente. C'est celle d'un variateur de vitesse à deux boucles en cascade. 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).

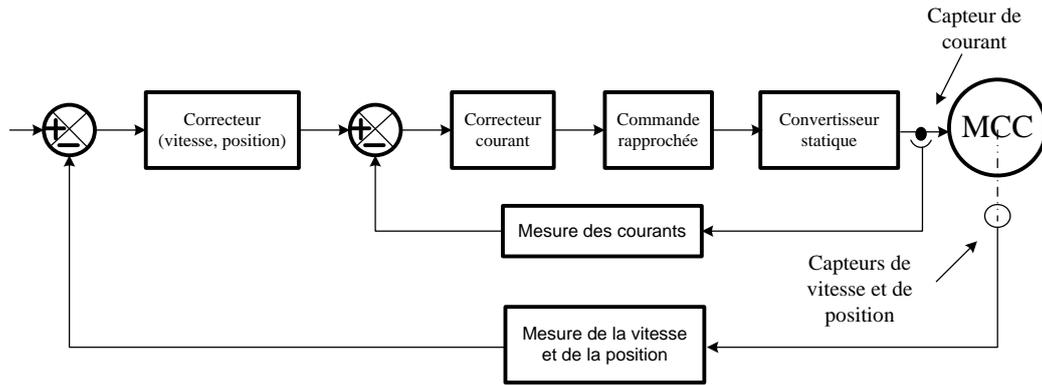


Figure 4

Dans cette partie on se limitera à l'étude du convertisseur statique, convertisseur dynamique et la boucle du courant.

On rappelle les conditions de fonctionnement du système :

- Le modèle électrique du moteur à courant continu est un modèle (E, R, L).
- La charge oppose un couple résistant proportionnel à la vitesse : $T_R = f \cdot \Omega$.
- Le moment d'inertie ramené à l'arbre du moteur est J.

III.1.1. Déterminer la fonction de transfert $H_m(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)}$

III.1.2. Mettre H(p) sous la forme : $H_m(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{k}{1 + a_1 p + a_2 p^2}$

III.2. Une variation brutale de la consigne provoque une augmentation de la tension d'induit qui conduit à des surintensités dans l'induit qui ne sont pas admissibles. Aussi, pour contrôler le courant d'induit, on introduit une boucle de courant figure 5

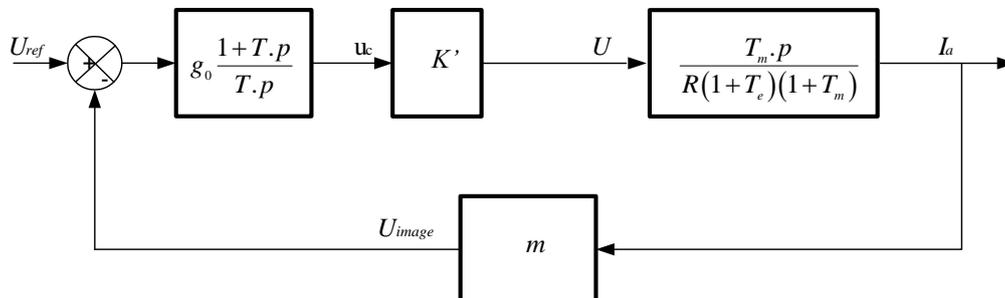


Figure 5

Sachant que :

- Le correcteur courant présente une fonction de transfert : $C(p) = g_0 \frac{1 + \tau \cdot p}{\tau \cdot p}$
- Le convertisseur statique : $U(p) = K' u_c(p)$
- Le convertisseur dynamique : $I_a(p) = \frac{\tau_m \cdot p}{R(1 + \tau_e)(1 + \tau_m)} U(p)$ avec : τ_e est la constante du temps électrique et τ_m la constante de temps mécanique tel que : $\tau_m \gg \tau_e$

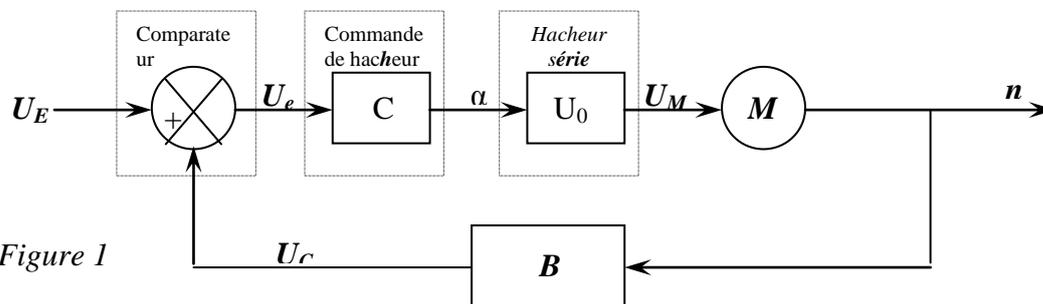
III.2.1. Quel est le rôle du correcteur proportionnel intégral PI ?

III.2.2. Comment peut-on choisir la constante du temps τ pour que la fonction de transfert en boucle fermée assimilable à une fonction de premier ordre.

III.2.3. Montrer alors que $F_{TBF}(p) = \frac{I_a(p)}{U_{ref}(p)} = \frac{H_0}{1 + \lambda p}$

Exercice N° 4 : (Examen ISET Ksar-Hellal 2013)

On réalise l'asservissement de vitesse d'un moteur à courant continu à excitation indépendante par le biais d'un hacheur de type série. Le diagramme de la figure 1 représente la méthode employée :



M : moteur à courant continu

B : capteur de vitesse

PARTIE A : ÉTUDE DU MOTEUR

Le moteur est de type « excitation séparée constante ». La réaction magnétique de l'induit est parfaitement compensée.

Ce moteur doit entraîner une charge à vitesse constante, quelque soit le moment du couple résistant imposé. Pour le fonctionnement envisagé, en régime nominal, on donne :

- résistance de l'induit : $R = 1 \Omega$;
- fréquence de rotation nominale : $n = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$;
- la force électromotrice induite E est de la forme : $E = k \cdot \Omega$ (Ω en rad.s^{-1}) avec $k=1.5\text{V/rds}^{-1}$

- le moment T_p du couple de perte associé aux pertes autres que par effet Joule, est négligeable devant le moment du couple électromagnétique du moteur.

1 – Constante de la machine :

1.1- Déterminer la valeur de E pour $n = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$

1.2- Montrer que le moment T_u de couple utile disponible sur le rotor s'écrit : $T_u = k.I$.

2 – Démarrage en charge :

Le moteur entraîne une charge dont le moment du couple résistant est constant et vaut $T_R = 25 \text{ N.m}$. L'intensité du courant au démarrage vaut $I_D = 20 \text{ A}$.

Calculer la valeur de la tension U_D qu'il faudra appliquer à ses bornes pour provoquer le début du démarrage.

3 – Fonctionnement en régime nominal :

Le moment du couple résistant reste constant égal à 25 N.m .

3.1 – Calculer l'intensité I du courant dans l'induit pour ce régime.

3.2 – calculer la tension d'alimentation U_M du moteur.

4 – Bilan des puissances :

La puissance absorbée par l'inducteur de la machine est égale à $P_{exc} = 300 \text{ W}$. On rappelle que le moment T_u du couple utile vaut 25 N.m et que $n = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$.

4.1 – Calculer la puissance utile P_u du moteur.

4.2 – calculer la puissance totale P_{abs} absorbée par le moteur en régime nominal.

4.3 – En déduire le rendement η de la machine.

5 – Variation de vitesse : En régime nominal, l'intensité du courant absorbée vaut $I = 30 \text{ A}$.

Soit : $\Omega = 0,67.U_M - 10$.

5.1 – Calculer $n = f(U_M)$ (n exprimée en tr.min^{-1}).

5.2 – Calculer U_M pour avoir $n = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$.

6- Freinage : $U_M=250\text{V}$. On limite la vitesse de la machine à courant continu en descente à 1650tr/min . L'excitation étant constante ($i_{ex}= 1 \text{ A}$).

6.1. Calculer la fem E et le courant induit. Montrer que la machine fonctionne en génératrice.

6.2. Calculer la puissance renvoyée dans le réseau continu $U_M=250\text{V}$.

PARTIE B : ÉTUDE DU HACHEUR

L'induit du moteur est alimenté par un hacheur série ; le montage est alors le

suivant :

u_L

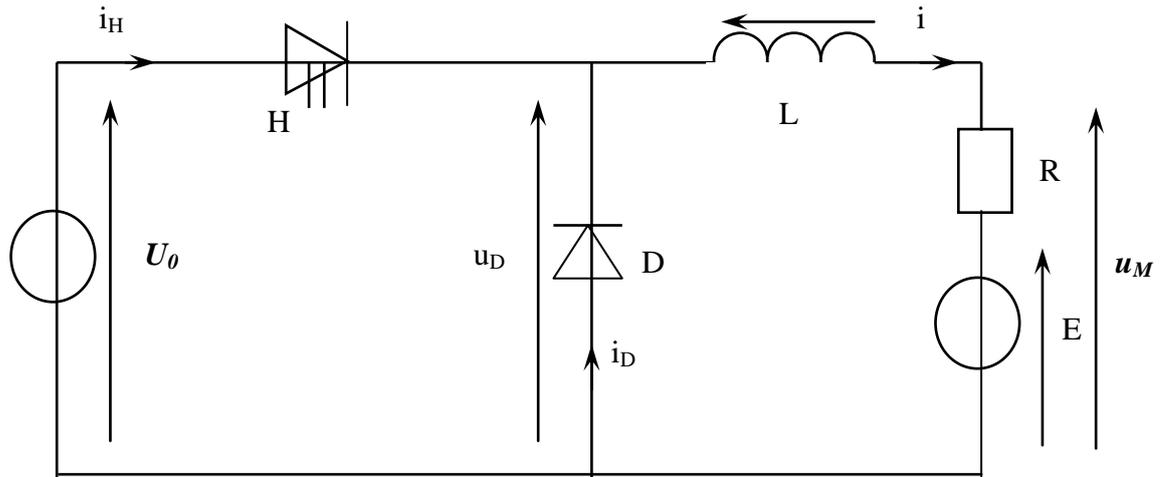


Figure 3

- La tension d'alimentation du hacheur vaut $U_0 = 300$ V.
- H est un interrupteur électronique fermé dans l'intervalle $[0 ; \alpha T]$ et ouvert dans l'intervalle $[\alpha T ; T]$.
- α est le rapport cyclique et T la période de hachage ; on donne $T = 3$ ms.
- La conduction dans l'induit du moteur est ininterrompue.

1 – Calculer la fréquence de hachage.

2 – *Exploitation d'un oscillogramme :*

L'oscillogramme de $u_H(t)$ est donné sur le document réponse 1 page 5.

- 2.1 – Déterminer la valeur du rapport cyclique.
- 2.2 – En supposant que $\langle u_L \rangle = 0$, montrer que $\langle u_D \rangle = \langle u_M \rangle$.
- 2.3 – Démontrer que la valeur moyenne de u_M peut s'exprimer par $\langle u_M \rangle = \alpha \cdot U_0$; calculer sa valeur numérique.
- 2.4 – Hachurer, sur le document réponse, les intervalles de conduction de D et de H.

3 – *Etude en charge :*

Le moteur appelle un courant sensiblement constant d'intensité $I = 30$ A.

- 3.1 – En utilisant l'équation $n = f(U_M)$ de la question 5.1 de la partie A, montrer que :

$$n = 1917 \cdot \alpha - 95.$$

- 3.2 – Calculer la valeur de α qui permettra d'obtenir une fréquence de rotation égale à 1500 tr.min⁻¹.

PARTIE C : COMMANDE DU HACHEUR

Afin de pallier la variation de vitesse du rotor de la machine, un dispositif permet d'agir sur le rapport cyclique du hacheur et de maintenir ainsi la fréquence de rotation n constante à 1500 tr.min⁻¹.

1 – Capteur de vitesse :

Sur l'arbre du moteur, une machine de faible puissance est accouplée et fournit une tension proportionnelle à la fréquence de rotation n .

$$U_C = B.n$$

1.1 – Calculer B si $U_C = 9$ V pour une vitesse de 1500 tr.min^{-1} .

PARTIE D : ÉTUDE DU SYSTEME COMPLET

On étudie le montage de la figure 1.

La transmittance T d'un système est le rapport de sa grandeur de sortie et de sa grandeur d'entrée :

$$T = \frac{Y_{\text{sortie}}}{Y_{\text{entrée}}} \quad \text{Par exemple, pour le hacheur : } T_{\text{hacheur}} = \frac{U_M}{\alpha} = U_0$$

On donne les valeurs suivantes :

$$n = 6,39.U_M - 95 \quad B = 5,53.10^{-3} \text{ V.min.tr}^{-1} \quad U_0 = 300 \text{ V} \quad C = 0,1 \text{ V}^{-1}$$

1.1 – Exprimer U_M en fonction de U_0 , C et U_{er} .

En déduire l'expression de n en fonction de U_0 , C et U_{er} .

1.2 – Exprimer U_{er} en fonction de U_E et U_C .

1.3 – En remplaçant cette expression dans l'équation de la question 1.1, montrer que :

$$n = \frac{6,39.U_0.C}{1+6,39.U_0.C.B}.U_E - \frac{95}{1+6,39.U_0.C.B} \quad \text{avec } n \text{ en tr.min}^{-1}$$

2.1 – On pose $n = R.U_E - S$; calculer R et S .

2.2 – Quelle valeur faut-il donner à U_E si l'on souhaite une fréquence de rotation $n = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$.

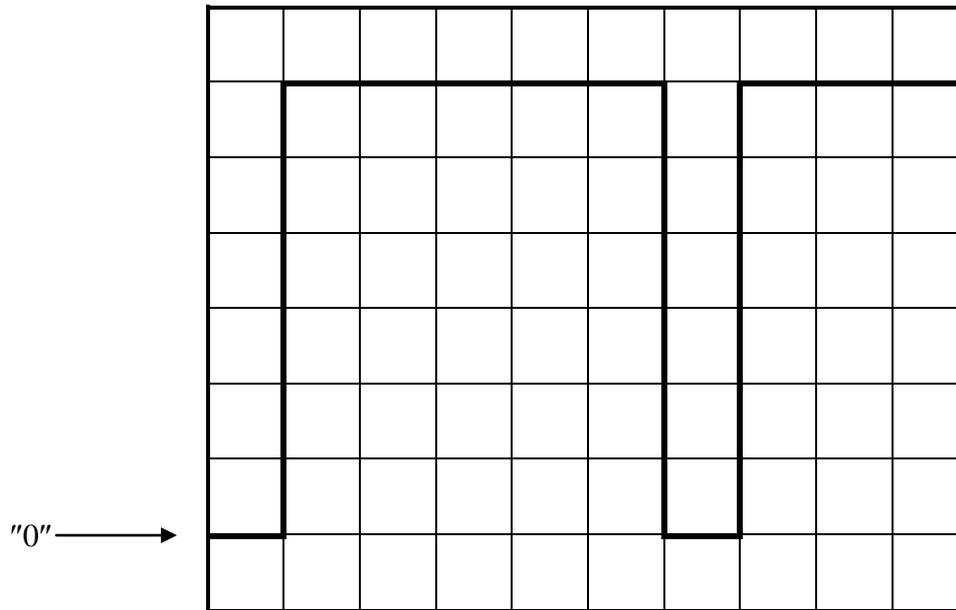
DOCUMENT RÉPONSE N°1

(à rendre avec la copie)

PARTIE B : Oscillogramme de $u_H(t)$

Balayage : 0,5 ms/ cm

Sensibilité : 50 V/ cm



Conduction de H				
Conduction de D				

Exercice N° 5: (D-S ISET Sfax (CI) 2013)

Étude du moteur du ventilateur de la climatisation automobile

Le moteur du ventilateur (moto-ventilateur) utilisé pour refroidir le condenseur du climatiseur automobile est de type moteur à courant continu. Son inducteur est un aimant permanent maintenant sous chaque pôle un flux Φ constant. La résistance de l'induit est $R = 0,20 \Omega$.

La force électromotrice E du moteur, exprimée en volts, s'écrit sous la forme $E = 0,24 n$ où n est la fréquence de rotation exprimée en tr.s^{-1} .

A. Étude du moteur

1. Donner le schéma équivalent de l'induit du moteur.
2. Ecrire l'expression du courant I absorbé par l'induit en fonction de n et de la tension d'alimentation U .

3. Etablir l'expression du moment T_{em} du couple électromagnétique en fonction de n et de U .
4. Montrer que $T_{em} = 0,19 U - 0,046 n$ (n en tr.s^{-1}).
5. Le moteur entraîne un ventilateur dont le moment T_R du couple résistant dépend de la fréquence de rotation suivant la relation : $T_R = 1,5 \times 10^{-3} n^2$.

Le graphique représentant la courbe $T_R = f(n)$ est donné en annexe.

5.1 On suppose négligeable la valeur du moment T_p du couple de pertes.

Le moment T_m du couple moteur est alors égal à celui T_{em} du couple électromagnétique.

Représenter la courbe $T_m = f(n)$ pour $U = 12 \text{ V}$ sur le graphique de l'annexe à joindre avec la copie.

5.2 Déduire du graphique, la fréquence de rotation de fonctionnement de l'ensemble en régime permanent pour $U = 12 \text{ V}$.

B. Etude de la variation de vitesse

Le fonctionnement linéaire du moteur à courant continu est caractérisé par les équations différentielles suivantes:

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}$$

$$T_m(t) = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = Ki(t)$$

1. Calculer la fonction de transfert $H_1(p) = \frac{I(p)}{U(p)}$
2. Calculer la fonction de transfert $H_2(p) = \frac{\Omega(p)}{I(p)}$
3. Déduire et calculer l'expression de $H(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)}$

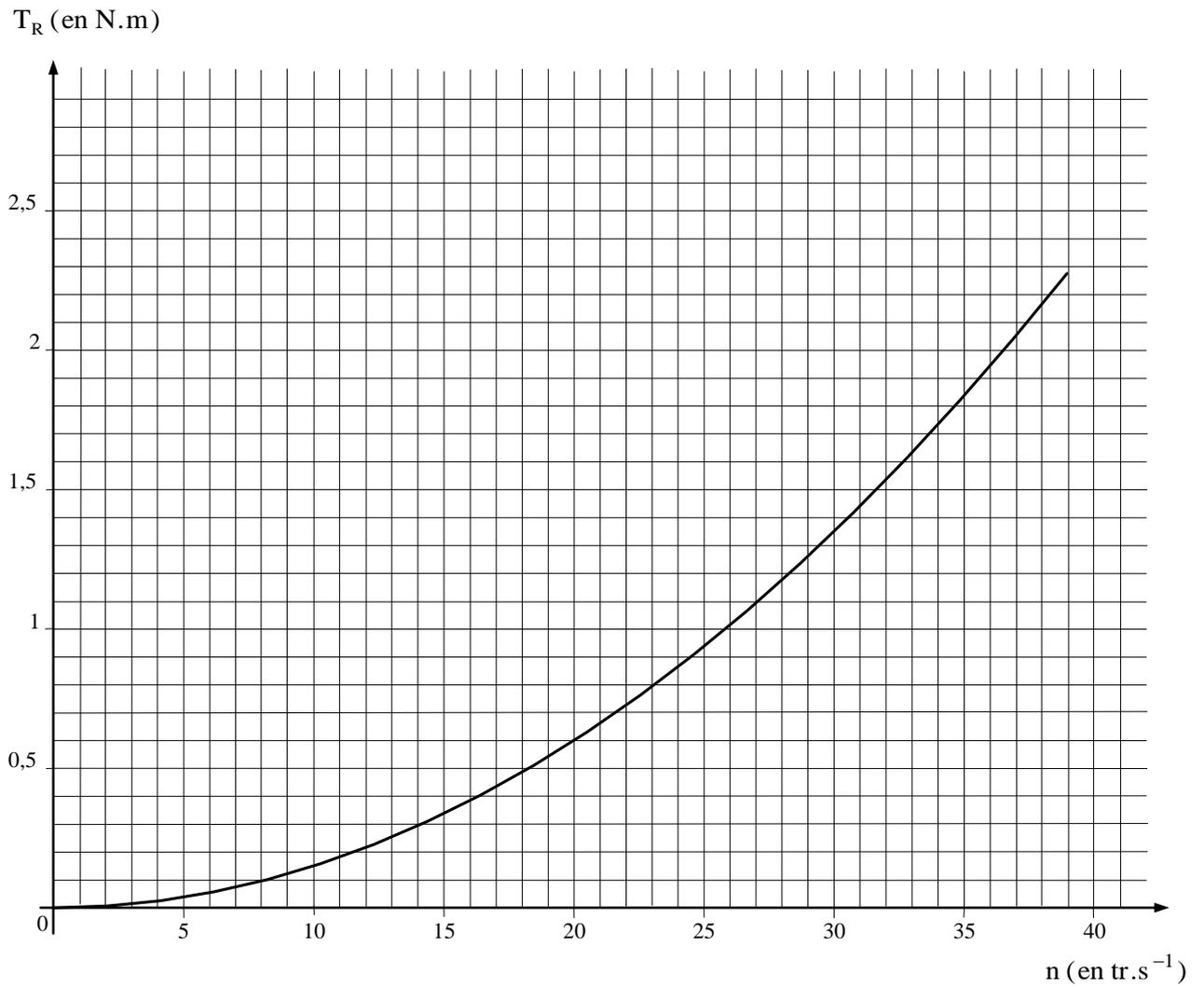
Sachant que : $R=0.2\Omega$, $L=0.010 \text{ H}$, $J=0.6.10^{-3} \text{ Kg.m}^2$, $f=10^{-4} \text{ Nm.rad.s}^{-1}$, $K=0.01 \text{ Nm.A}^{-1}$.

4. Mettre l'expression précédente sous la forme canonique suivante :

$$\frac{H_0}{1 + \frac{2\xi}{\omega_0} p + \frac{p^2}{\omega_0^2}}$$

En déduire : le gain statique H_0 , la pulsation libre ω_0 et le coefficient d'amortissement ξ .

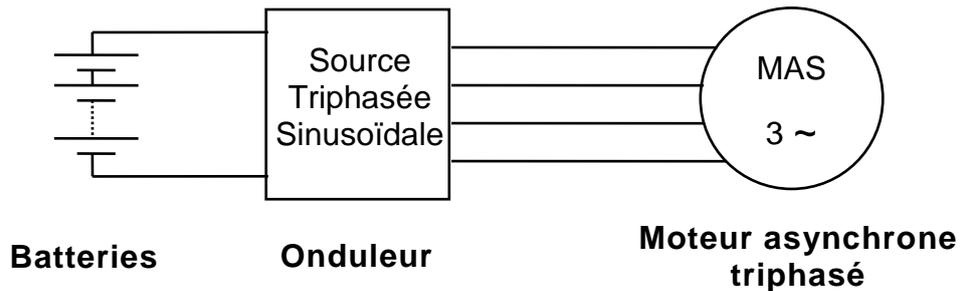
Annexe



TD : Commande des machines asynchrones

Exercice N°1: (Examen ISET Ksar-Hellal 2011)

Un constructeur automobile propose une voiture électrique à moteur asynchrone triphasé dont la source électrique est réalisée à l'aide d'un onduleur, lui-même alimenté par un ensemble de batteries.



A - Étude du moteur alimentée par un réseau fixe (12 points)

Le moteur asynchrone triphasé, dont les enroulements du stator sont couplés en **étoile**, est alimenté par une source triphasée équilibrée sinusoïdale de tension efficace et de fréquence réglables.

1. Les conditions nominales de fonctionnement du moteur asynchrone triphasé sont indiquées sur la plaque signalétique :

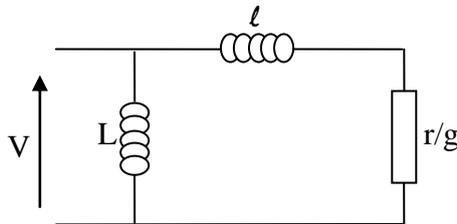
- **127 V / 220 V** ;
- intensité efficace nominale du courant de ligne $I_N = 80 \text{ A}$;
- facteur de puissance nominal $\cos \varphi_N = 0,79$.

- 1.1 Le moteur asynchrone triphasé est alimenté par une source de tension triphasée **127 V / 220 V**. Justifier le couplage étoile des enroulements statoriques du moteur.
- 1.2 Donner l'expression littérale de la puissance absorbée P_A par le stator. calculer la valeur de P_A .
- 1.3 Calculer la puissance utile P_U fournie à l'arbre du moteur sachant que le rendement η est égal à **90 %**.
- 1.4 Donner l'expression littérale de la puissance P_{JS} perdue par effet Joule dans le stator en fonction de la résistance r d'un enroulement statorique. Sachant que $r = 0,1\Omega$, calculer P_{JS} .

Dans la suite du problème on néglige les pertes fer statoriques et les pertes mécaniques

2. Dans les conditions nominales, le moteur tourne à la fréquence $n_r = 8500$ tr/min et la fréquence des tensions sinusoïdales triphasées est $f = 300$ Hz.

- 2.1 Donner la valeur de la vitesse de synchronisme n_s . En déduire le nombre de paires de pôles du rotor.
- 2.2 Déterminer pour le fonctionnement à charge nominale Le glissement g
- 2.3 Donner l'expression littérale du moment du couple électromagnétique T_{em} en fonction de la puissance transmise P_{tr} et de la vitesse n_s en tr/min.
- 2.4 Donner l'expression littérale du moment du couple utile T_U en fonction de la puissance utile P_U et de la vitesse n_r en tr/min.
- 2.5 Sachant que $P_U = 21,6$ kW, calculer la valeur de T_U .
- 2.6 Calculer Les pertes rotoriques par effet joule.
- 2.7 Soit le schéma équivalent par phase suivant :



2.7.1 Montrer que le moment T_{em} du couple de la machine peut s'écrire :

$$T_{em} = A \cdot \frac{X}{(X)^2 + (Y)^2} \text{ avec } X = \frac{r}{g} \text{ et } Y = l\omega$$

2.7.2 Donner l'expression et la valeur de A

2.7.3 Pour quelle valeur de glissement g_{max} le moment du couple est-il maximal ?

2.7.4 Donner la valeur de ce couple maximale T_{emmax} .

Sachant que : $r = 0.1\Omega$ et $l = 10mH$.

2.7.5 Compléter le tableau suivant :

n_s	Signe de T_{em}	Signe de P_u	fonctionnement
De 0 à 9000tr/min	+		
De 9000 à 18000 tr /min		-	

2.7.6 Tracer l'allure du graphe donnant le moment du couple T_{em} en fonction de la fréquence de rotation de **0 à 18000 tr/mn**. Préciser le type de fonctionnement suivant la fréquence de rotation.

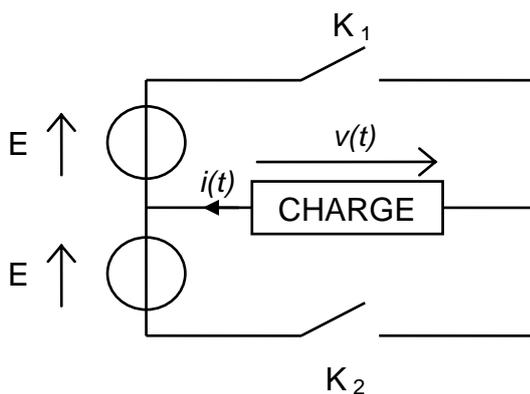
B - Etude du moteur alimenté à fréquence variable et $\frac{U}{f} = C^{te}$ (4 points)

Pour régler la vitesse du moteur, le moment du couple utile étant constant et égal à **24,3 N.m**, on fait varier la fréquence f de la source triphasée et la valeur efficace U de la tension composée en conservant le rapport $\frac{U}{f}$ constant.

1. Calculer la valeur du rapport $\frac{U}{f}$
2. La valeur de la fréquence de la source triphasée est réglée à $f' = 150 \text{ Hz}$. Calculer la nouvelle valeur efficace de la tension composée U' ainsi que la nouvelle valeur de la fréquence de synchronisme n'_s du moteur (en tr/min).
3. Sur la figure n° 1 du document réponse est représentée la caractéristique mécanique $T_u = f(n_r)$ du moteur pour $f = 300 \text{ Hz}$. Sachant que, pour $f' = 150 \text{ Hz}$, la fréquence du moteur n_r' est de 4000 tr/min, tracer sur le graphique la nouvelle caractéristique correspondant à ce fonctionnement.
4. Que peut-on dire des deux caractéristiques obtenues en conservant constant le rapport $\frac{U}{f}$?

C - Étude de l'onduleur (4 points)

Le schéma suivant représente le modèle simplifié d'une partie de l'onduleur :



$E = 127 \text{ V}$, La charge est inductive et T désigne la période de fonctionnement des interrupteurs.

K_1 et K_2 sont des interrupteurs parfaits.

- Entre 0 et $T/2$: on a K_1 fermé et K_2 ouvert.
- Entre $T/2$ et T : on a K_1 ouvert et K_2 fermé.

1. Quel type de conversion de l'énergie électrique effectue un onduleur.
2. Quelle est la valeur de $v(t)$ quand K_1 est fermé et que K_2 est ouvert.
3. Quelle est la valeur de $v(t)$ quand K_2 est fermé et que K_1 est ouvert.

Représenter l'évolution de la tension $v(t)$ sur la figure n°2 du document-réponse.

4. DOCUMENT-RÉPONSE (à rendre avec la copie)

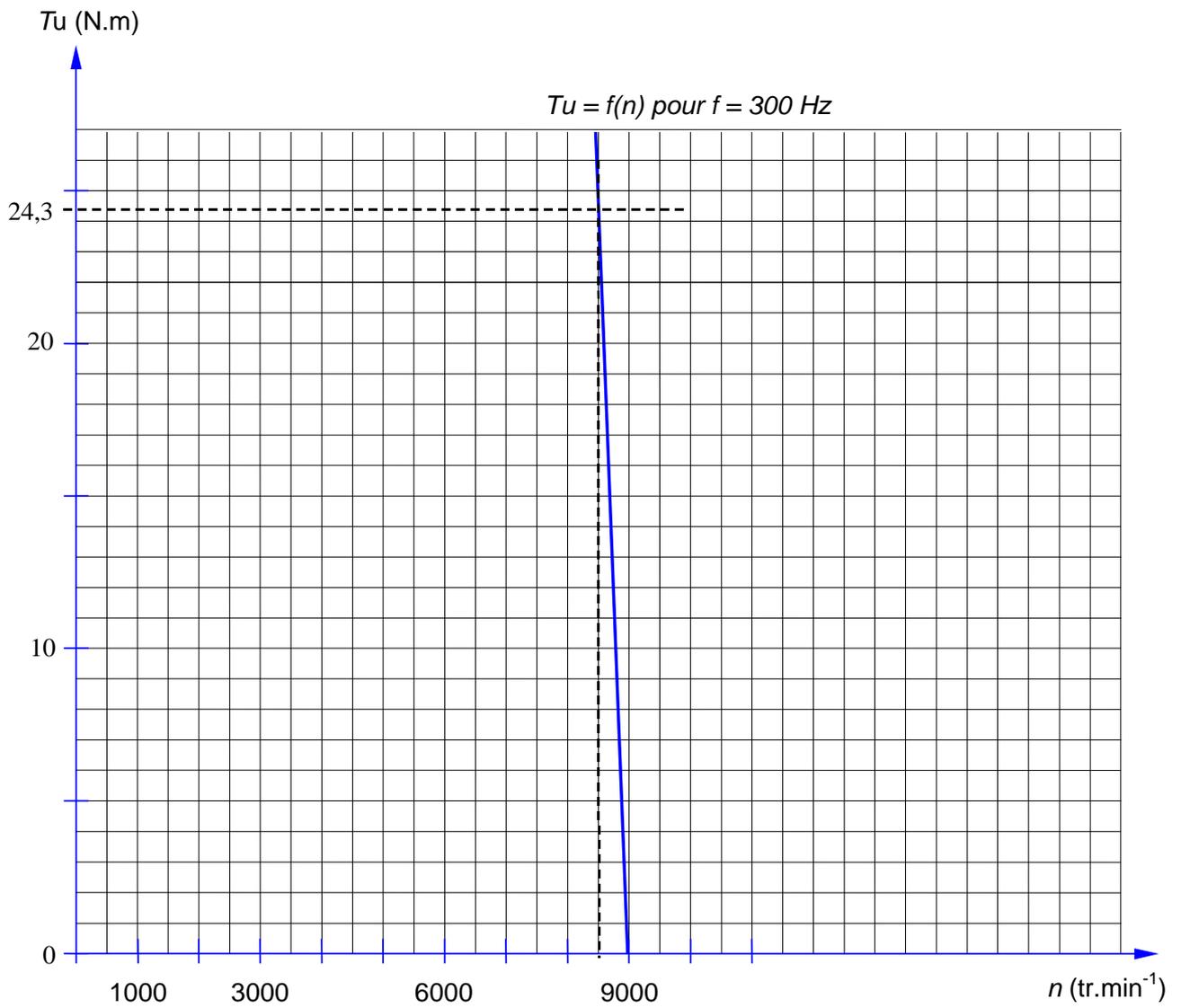


Figure n°1

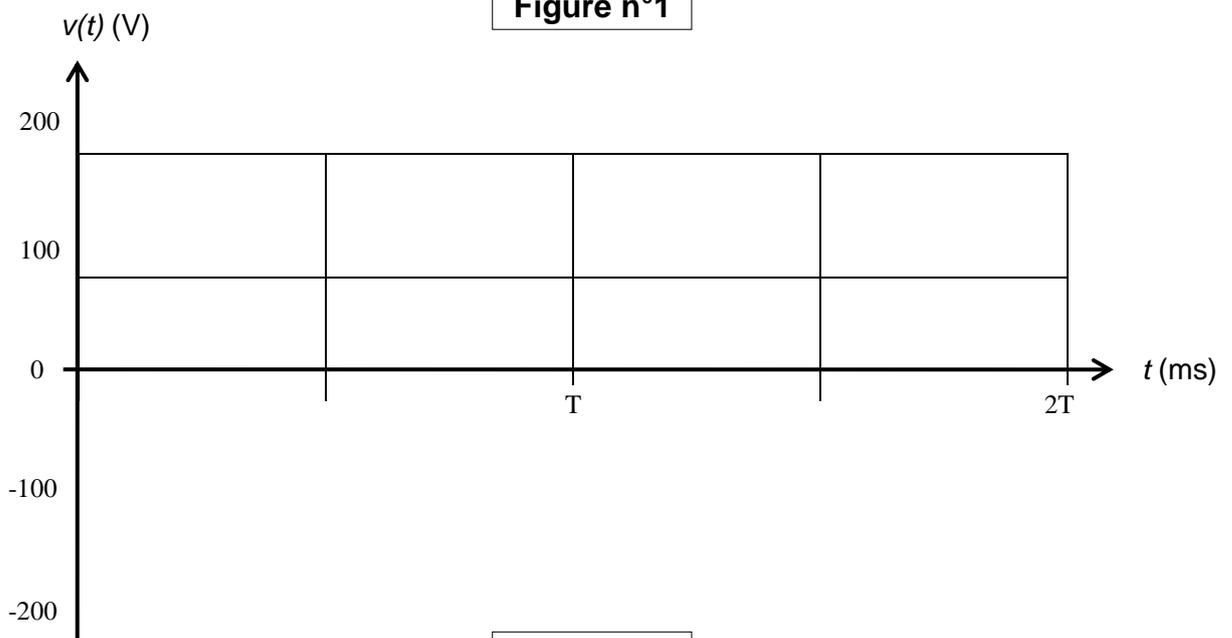
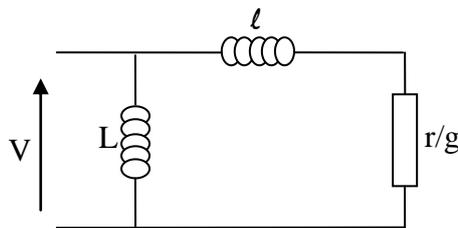


Figure n°2

2. Donner l'expression littérale de la puissance absorbée P_A par le stator. calculer la valeur de P_A .
 3. Calculer la puissance utile P_U fournie à l'arbre du moteur sachant que le rendement est égal à 90 %.
 4. Dans les conditions nominales, le moteur tourne à la fréquence $n_r = 8500$ tr/min et la fréquence des tensions sinusoïdales triphasées est $f = 300$ Hz.
 - 4.1 Donner la valeur de la vitesse de synchronisme n_s . En déduire le nombre de paires de pôles du rotor.
 - 4.2 Déterminer pour le fonctionnement à charge nominale Le glissement g
 - 4.3 Donner l'expression littérale du moment du couple électromagnétique T_{em} en fonction de la puissance transmise P_{tr} et de la vitesse n_s en tr/min.
 - 4.4 Donner l'expression littérale du moment du couple utile T_U en fonction de la puissance utile P_U et de la vitesse n_r en tr/min.
 - 4.5 Sachant que $P_U = 197$ kW, calculer la valeur de T_U .
- Soit le schéma équivalent par phase suivant :



- 4.6 Sachant que le moment T_{em} du couple de la machine peut s'écrire :

$$T_{em} = A \cdot \frac{X}{(X)^2 + (Y)^2} \text{ avec } X = \frac{r}{g} \text{ et } Y = l\omega$$

Pour quelle valeur de glissement g_{max} le moment du couple est-il maximal ?

Donner la valeur de ce couple maximale $T_{em,max}$ et la fréquence de rotation correspondante en tr/mn. Sachant que : $r = 0.1\Omega$, $l = 10\text{mH}$ et $A =$.

B Etude du moteur alimenté à fréquence variable et $\frac{U}{f} = C^{te}$

Pour régler la vitesse du moteur, le moment du couple utile étant constant et égal à 222 N.m, on fait varier la fréquence f de la source triphasée et la valeur efficace U de la tension composée en conservant le rapport $\frac{U}{f}$ constant.

1. Rappeler l'intérêt d'un onduleur à U/f constant.

2. Calculer la valeur du rapport U/f
3. La valeur de la fréquence de la source triphasée est réglée à $f' = 150$ Hz. Calculer la nouvelle valeur efficace de la tension composée U' ainsi que la nouvelle valeur de la fréquence de synchronisme n'_s du moteur (en tr/min).
- 3.1 Sur la figure n° 1 du document réponse 1 est représentée la caractéristique mécanique $T_u = f(n)$ du moteur pour $f = 300$ Hz. Sachant que, pour $f' = 150$ Hz, la fréquence du moteur est de 4000 tr/min, tracer sur le graphique la nouvelle caractéristique correspondant à ce fonctionnement.
- 3.2 Que peut-on dire des deux caractéristiques obtenues en conservant constant le rapport $\frac{U}{f}$?

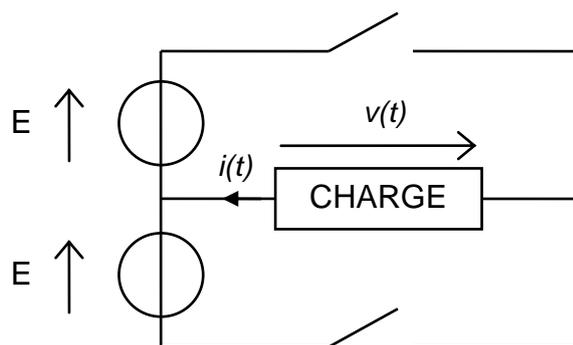
C - Étude de l'onduleur (6 points)

Le schéma suivant représente le modèle simplifié d'une partie de l'onduleur :

- $E = 230$ V.
- K_1 et K_2 sont des interrupteurs parfaits commandés à l'ouverture et à la fermeture.
- La charge est inductive.
- T désigne la période de fonctionnement des interrupteurs.

Entre 0 et $T/2$: K_1 fermé et K_2 ouvert

Entre $T/2$ et T : K_1 ouvert et K_2 fermé



1. Quel type de conversion de l'énergie électrique effectue un onduleur.
2. Quelle est la valeur de $v(t)$ quand K_1 est fermé et que K_2 est ouvert
3. Quelle est la valeur de $v(t)$ quand K_2 est fermé et que K_1 est ouvert
4. Représenter l'évolution de la tension $v(t)$ sur la figure 2 du document-réponse 1, si la période de fonctionnement des interrupteurs est de 3,33 ms.
5. Calculer la valeur moyenne V_{moy} .

Exercice N°3 : (Examen ISET Sidi Bouzid)

Nous nous intéressons dans ce problème au fonctionnement d'un Tramway.

PRÉSENTATION DU TRAMWAY

Une rame de tramway se compose de quatre bogies dont trois sont moteurs. Un bogie moteur est composé de quatre roues entraînées chacune par un moteur asynchrone triphasé par l'intermédiaire d'un réducteur. Une rame de tramway est donc motorisée par douze moteurs asynchrones.

Caractéristiques principales d'un moteur de traction

Il s'agit d'un moteur asynchrone triphasé à 4 pôles refroidis par un mélange eau (56%) et éthylèneglycol (44%) sous une pression d'environ 1.5 bars et un débit de 5 l/min.

Le stator est constitué de trois enroulements à pas raccourci et couplés en étoile. Chaque enroulement est réalisé à l'aide de couronnes formées de fils de cuivre pré-isolés.

Le rotor est constitué d'un enroulement à cage d'écureuil en aluminium moulé sous pression.

☞ Puissance \square utile nominale : $P_{UN} = 24,6 \text{ kW}$

☞ Couple \square utile nominal : $T_{UN} = 90 \text{ Nm}$

☞ Courant \square absorbé nominal : $I_{SN} = 35,4 \text{ A}$

☞ Tension \square nominale entre phases : $U_{SN} = 585 \text{ V}$;

☞ Fréquence \square statorique nominale : $f_{SN} = 88 \text{ Hz}$

☞ Nombre \square de paires de pôles : $p = 2$

☞ Vitesse \square nominale de rotation du rotor : $N_N = 2610 \text{ tr /mn}$

☞ Facteur \square de puissance nominal : $(\cos(\varphi_N) = 0,7341)$

☞ Rendement \square pour le point nominal : $\eta_N (\%) = 93,09\%$;

Question .1 : Déterminer pour le fonctionnement nominal :

- Le glissement g_N .
- La puissance active absorbée P_{aN} .

L'association du convertisseur et de la motorisation doit permettre le fonctionnement de la machine asynchrone dans les 4 quadrants mécaniques c'est-à-dire pour le Tramway, la circulation dans les deux sens de marche et le freinage électrique.

Nous supposerons dans cette partie que les tensions alimentant les machines asynchrones sont sinusoïdales triphasées et que le modèle équivalent par phase de ces machines peut être assimilé au schéma simplifié de la Figure 2.

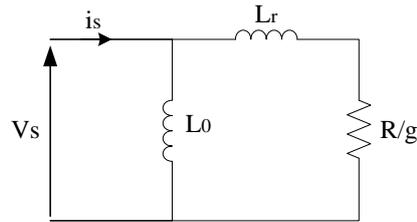


Figure 2

La valeur efficace du courant dans un enroulement rotorique est notée I_R ; le glissement est noté g .

Question.2. Déterminer l'expression du couple électromagnétique T_{em} en fonction de V_{seff} , L_r , R , g , p (nombre de paires de pôles de la machine asynchrone) et ω_s (pulsation des tensions statoriques).

Question.3. Vous mettrez le résultat sous la forme ci-dessous en précisant les expressions de A et de g_0 :

$$T_{em} = \frac{A}{\frac{g}{g_0} + \frac{g_0}{g}}$$

Question.4 : A partir de l'expression du couple T_{em} , la valeur du glissement $g = 0.0101$ pour $T_{em} = 90\text{Nm}$ et $g = -0.0101$ pour $T_{em} = -90\text{Nm}$ calculer 88Hz . □ la vitesse de rotation du moteur N_r (en tr/mn) pour $f_s =$

☞ $T_{em} = 90 \text{ N.m}$. Sachant que :

☞ $T_{em} = -90 \text{ N.m}$. Sachant que :

B. ÉTUDE DES CONVERTISSEURS STATIQUES

Nous allons nous intéresser dans cette partie à la structure et aux principes de commande des convertisseurs statiques alimentant les 12 machines asynchrones du Tramway.

Problème posé

Le constructeur a choisi d'implanter une commande permettant de contrôler le couple électromagnétique des 12 machines asynchrones du tramway (contrôle effectué par demi-bogie). Ce contrôle est obtenu par le réglage simultané de la phase instantanée et de l'amplitude des tensions simples appliquées aux machines.

Les formes d'onde peuvent être délivrées aux machines asynchrones par l'intermédiaire d'onduleurs de tension. Nous allons étudier dans un premier temps l'association d'un onduleur de tension avec une machine asynchrone.

La structure de l'onduleur choisie dans cette première partie est donnée à la Figure 3.

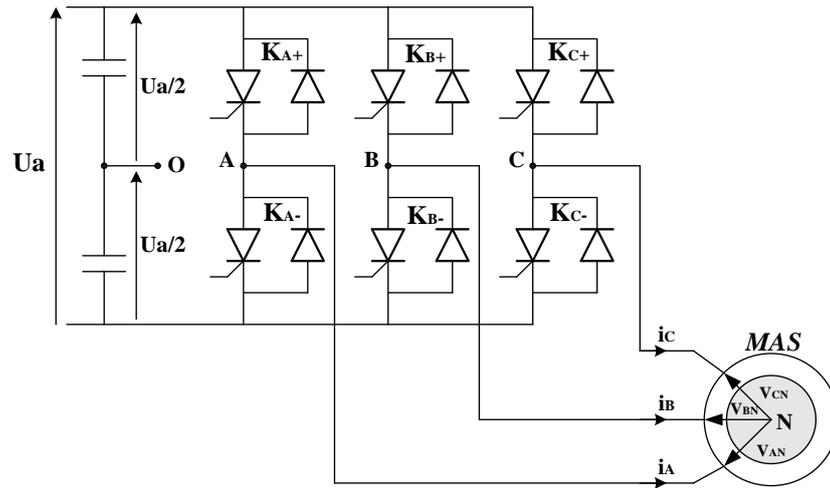


Figure 3

Pour simplifier l'étude de ce type de structure les différentes tensions sont référencées par rapport au milieu $\mathbf{0}$ (fictif ou réalisé à l'aide de condensateurs de même valeur) de la source continue de l'onduleur. Les tensions de référence pour les trois phases (grandeurs que l'on souhaite imposer à la machine) sont les tensions simples référencées par rapport au point neutre \mathbf{N} . Or nous pouvons remarquer que cette structure permet d'imposer les tensions composées aux bornes de la charge mais pas les tensions simples.

Question.1 : Déterminer l'expression des potentiels v_{AN} , v_{BN} et v_{CN} en fonction de v_{AB} , v_{BC} et v_{CA} . Vous supposerez pour cela que la machine asynchrone se comporte comme une charge triphasée linéaire et équilibrée.

Question.2 : En déduire que l'expression des potentiels v_{AN} , v_{BN} et v_{CN} en fonction de v_{AO} , v_{BO} et v_{CO} peut se mettre sous la forme suivante :

$$v_{AN} = \frac{2}{3}v_{AO} - \frac{1}{3}v_{BO} - \frac{1}{3}v_{CO}$$

$$v_{BN} = \frac{2}{3}v_{BO} - \frac{1}{3}v_{AO} - \frac{1}{3}v_{CO}$$

$$v_{CN} = \frac{2}{3}v_{CO} - \frac{1}{3}v_{BO} - \frac{1}{3}v_{AO}$$

Question.3 : Déterminer l'expression du potentiel v_{NO} en fonction de v_{AO} , v_{BO} et v_{CO} .

Il existe de nombreuses façons de commander un onduleur triphasé de ce type pour obtenir une tension alternative aux bornes de la charge. Les plus communes sont les suivantes:

☞ La commande pleine \square onde

☞ La commande par modulation de largeur d'impulsion :

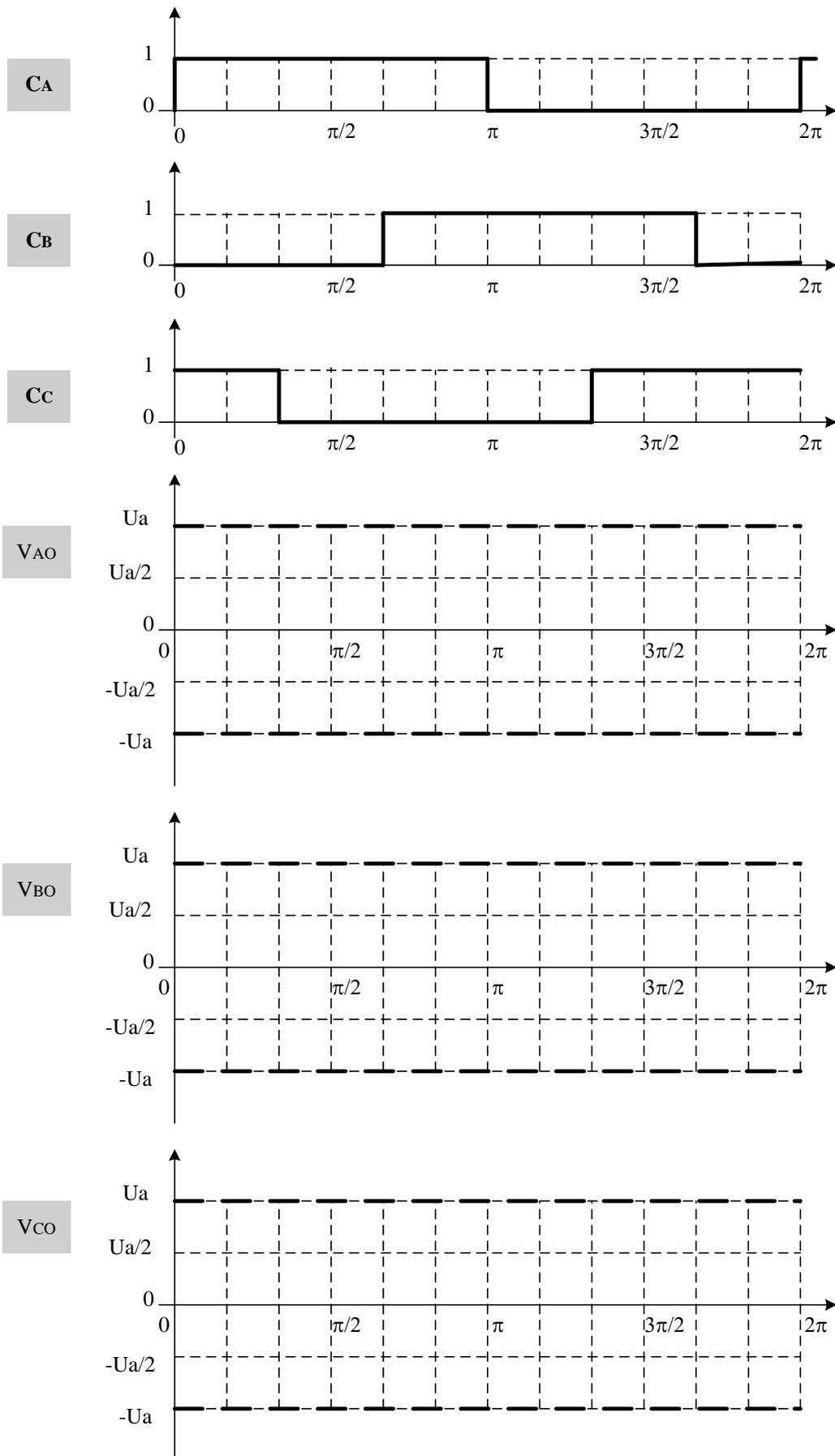
Notations utilisées

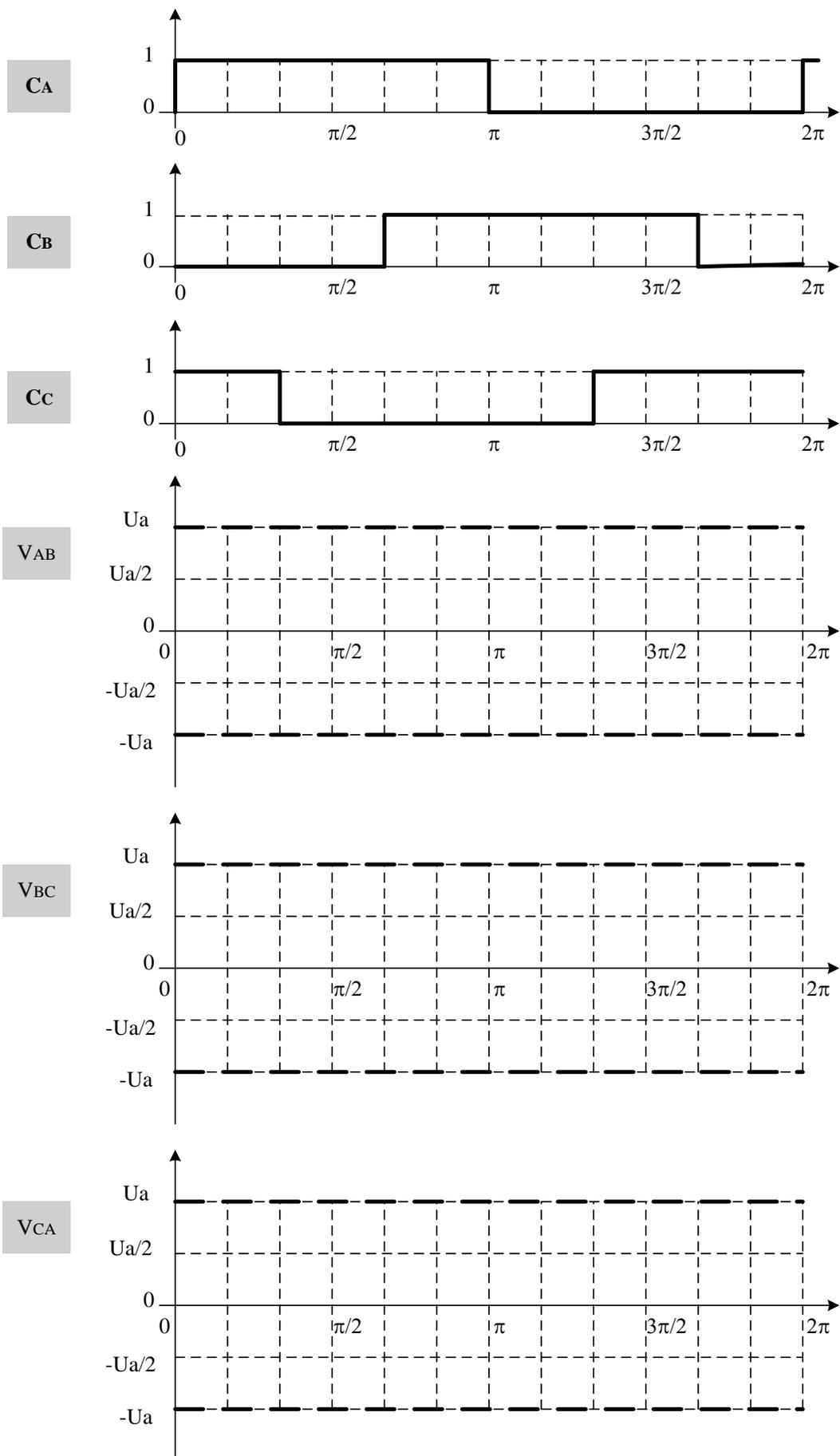
Les notations utilisées dans les questions qui suivent sont les suivantes : les six commandes relatives aux trois bras d'onduleurs sont notées $CA+$ et $CA-$ pour le bras associé à la phase A , $CB+$ et $CB-$ pour le bras associé à la phase B et $CC+$ et $CC-$ pour le bras associé à la phase C. $C_{x+} = 1$ ou $C_{x-} = 1$ implique que l'interrupteur correspondant est fermé et $C_{x+} = 0$ ou $C_{x-} = 0$ l'interrupteur correspondant est ouvert.

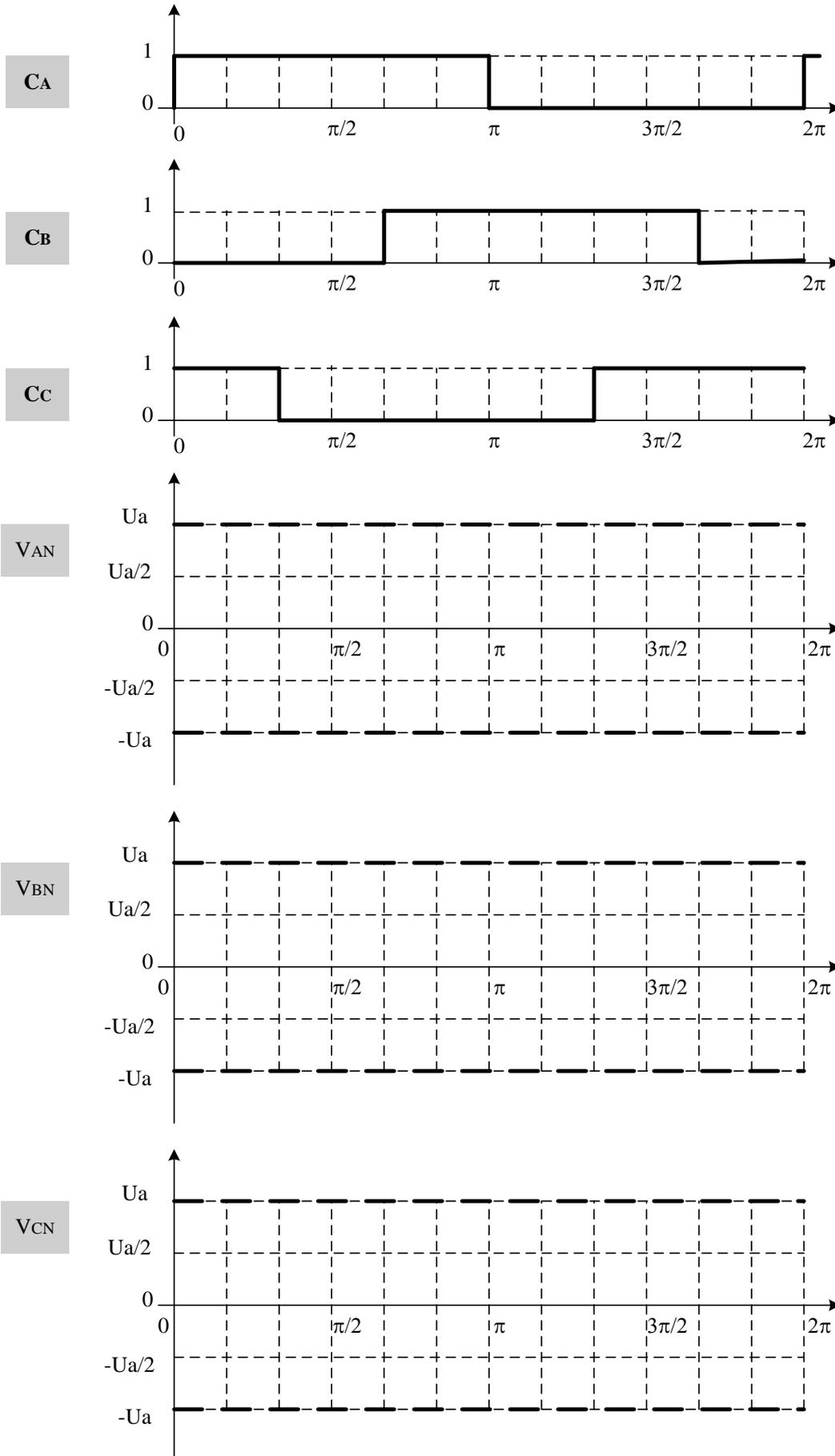
De façon générale $C_{x-} = 1 - C_{x+}$ et $C_{x+} = 1 - C_{x-}$

La commande pleine onde

Question.4 : Compléter les documents réponse REP.B.1, REP.B.2 et REP.B.3 correspondant à la commande pleine onde.







Exercice N°4 : (BTS Electrotechnique 1990)

Un moteur asynchrone triphasé 220/380 V, 50 Hz à 4pôles couplé en étoile et un rotor à cage.

Sous alimentation nominale, on a obtenu :

- A vide, un courant de ligne d'intensité 6A.
- A charge nominale, un courant de ligne d'intensité 19,4 A, une puissance absorbée de 11kW et une fréquence de rotation de 1440tr/mn.

Dans tout le problème, on néglige les résistances et l'inductance de fuite statoriques, les pertes fer et les pertes mécaniques.

I. Etude de la machine alimentée par un réseau fixe

La machine asynchrone est alimentée sous 220V/380V, 50 Hz

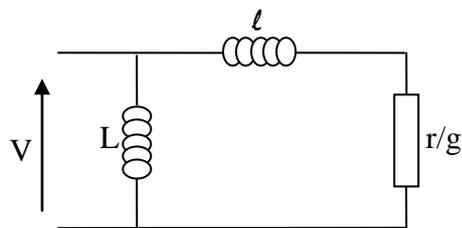
1. Déterminer pour le fonctionnement à charge nominale :

- Le glissement g
- La puissance réactive absorbée.
- Le moment du couple nominal T_N .
- Les pertes rotoriques par effet joule.

2. Montrer que le moment T du couple de la machine s'écrit :

3.

$$T = \frac{6 \cdot V^2}{\omega} \cdot \frac{\frac{r}{g}}{\left(\frac{r}{g}\right)^2 + (l \cdot \omega)^2}$$



4. Pour quelle valeur de glissement g_{max} le moment du couple est-il maximal ?

Donner la valeur de ce couple maximale T_{max} et la fréquence de rotation correspondante en tr/mn. Sachant que : $r = 0.5\Omega$ et $l = 9.4mH$.

5. Tracer l'allure du graphe donnant le moment du couple T en fonction de la fréquence de rotation de 0 à 3000 tr/mn. Préciser le type de fonctionnement suivant la fréquence de rotation.

II. Etude du moteur alimenté à fréquence variable et $\frac{V}{f} = Cte$

La tension simple V et sa fréquence f restent dans un rapport constant $\frac{V}{f} = A = 4,4V / Hz$ jusqu'à l'alimentation nominale de la machine. On suppose que la machine soit non saturée, la valeur de L est indépendante de la fréquence.

1. Montrer que l'expression du moment du couple T peut alors s'écrire :

$$T = A \cdot \frac{1}{\left(\frac{r}{gl\omega}\right) + \left(\frac{gl\omega}{r}\right)}$$

Donner la valeur numérique de A .

2. La valeur maximale du moment du couple dépend-elle de la fréquence d'alimentation ?
3. En régime permanent stable, pour un moment T du couple fixe, on montre que la quantité $g \cdot \omega$ reste constante quand la fréquence f varie.

Si N_s la fréquence de synchronisme, N la fréquence de rotation, exprimer $\Delta N = N_s - N$.

Quelle est la propriété de ΔN quand f varie à couple fixé ?

Préciser les valeurs de ΔN pour les couples T_N et T_{max} .

4. Dans un tableau, donner les valeurs numériques de la fréquence de rotation N en tr/mn pour les trois valeurs 10 Hz, 30 Hz et 50 Hz de la fréquence et correspondant à des fonctionnements :
 - A vide.
 - A couple nominal T_N .
 - A couple maximal T_{max} .
5. Tracer pour les trois fréquences précédentes l'allure du réseau de caractéristiques $T=f(\Omega)$ en limitant au cas de fonctionnement stable en moteur. Dans la suite du problème on se limitera à ce cas.
6. Déterminer la fréquence minimale pour obtenir un couple de démarrage au moins égal au couple nominal T_N .
7. Le moteur entraîne une charge mécanique qui lui oppose un couple résistant de moment constant $Tr = 40 \text{ Nm}$. Déterminer la fréquence de rotation du groupe en régime permanent pour une alimentation à fréquence 30 Hz.

III. Onduleur autonome triphasé.

L'alimentation du moteur asynchrone est fournie par un onduleur triphasé à partir d'une source continue réglable de f.e.m E proportionnelle à la fréquence de l'onduleur $E = a.f$. Le schéma de principe est donné par la figure 2. Les intervalles de fermeture des interrupteurs sont indiqués pour une période T de fonctionnement à la figure 3. Chaque interrupteur est constitué d'un transistor et d'une diode supposés parfaits figure 4.

1. Représenter $u_{12}(t)$, $u_{23}(t)$ et $u_{31}(t)$.
2. Montrer que $v_1 = \frac{1}{3}(u_{12} - u_{31})$ sachant que l'on a toujours $v_1 + v_2 + v_3 = 0$.
Représenter $v_1(t)$.
3. Indiquer le cycle de fermeture des interrupteurs permettant d'inverser le sens de rotation du moteur.

Exercice N° 5 :

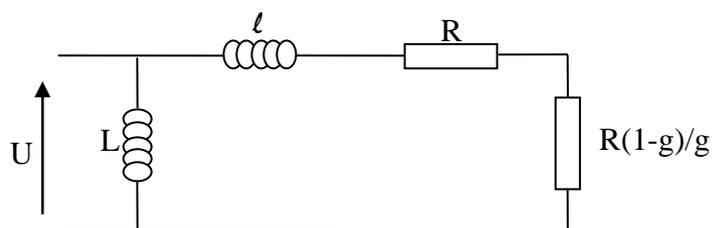
Un moteur asynchrone triphasé 220/380 V, 50 Hz à 4 pôles couplé en triangle et un rotor à cage. Sous alimentation nominale, on a obtenu :

- A vide, un courant de ligne d'intensité 2.8A.
- A charge nominale, un courant de ligne d'intensité 7.5 A, une puissance absorbée de 2.2kW et une fréquence de rotation de 1430tr/mn.

Dans tout le problème, on néglige les résistances et l'inductance de fuite statoriques, les pertes fer et les pertes mécaniques.

I. Etude de la machine

1. La machine asynchrone est alimentée sous sa tension nominale, 50 Hz
 - 1.1. Déterminer pour le fonctionnement à charge nominale :
 - Le glissement g_n .
 - La puissance réactive absorbé Q_n .
 - Le couple nominal T_n
 - Les pertes rotoriques par effet joules P_{jn} .
 - 1.2. Etablir la relation liant le couple T au glissement g



1.3. Pour quelle valeur de glissement g_{\max} le moment du couple est-il maximal ? Calculer sa valeur. Tracer l'allure du graphe donnant le moment du couple T en fonction de la fréquence de rotation de 0 à 3000 tr/mn. Préciser le type de fonctionnement suivant la fréquence de rotation.

2. Le moteur est alimenté à fréquence variable en gardant le rapport $\frac{V}{f} = Cte$.

2.1. Représenter sur un même graphe l'allure de la caractéristique mécanique de la machine pour 3 valeurs de f (50 Hz, 25 Hz et 10 Hz)

2.2. Le moteur est appelé à entraîner deux charges de caractéristiques différentes :

☞ Charge a : un ventilateur opposant un couple proportionnel au carré de la vitesse. Le moteur est en charge nominale pour une fréquence de 50 Hz.

☞ Charge b : un treuil opposant un couple constant égale en module au couple nominal de la machine.

- Pour quel type de charge doit-on maintenir le rapport U/f constant ? Pour quel type de charge peut-on se permettre de réduire le rapport U/f lorsque l'on réduit la fréquence ? justifiez votre réponse.

- Qu'a-t-on a y gagner en réduisant le rapport U/f ?

II. Etude du variateur (onduleur)

Le schéma de puissance du variateur est donné figure 2. Pour l'étude des formes d'ondes, on en tire le schéma de principe de la figure 3 dans lequel on fait apparaître le point o : point milieu fictif de l'alimentation continue E . On définit par rapport à ce point les tensions simples v_{1O} , v_{2O} et v_{3O} . Les interrupteurs d'un même bras sont toujours dans un état complémentaire (l'un ouvert l'autre et fermé). Le document réponse présente les commandes des bras d'onduleur 1 et 2. $C1 = 1$ impose la fermeture de l'interrupteur supérieur.

1. Déterminer l'expression des potentiels v_{1N} , v_{2N} et v_{3N} en fonction de v_{1O} , v_{2O} et v_{3O} . Vous supposerez pour cela que la machine asynchrone se comporte comme une charge triphasée linéaire et équilibrée.

2. En déduire que l'expression des potentiels v_{1N} , v_{2N} et v_{3N} en fonction de v_{1O} , v_{2O} et v_{3O} peut se mettre sous la forme suivante :

$$v_{1N} = \frac{2}{3}v_{1O} - \frac{1}{3}v_{2O} - \frac{1}{3}v_{3O}$$

$$v_{2N} = \frac{2}{3}v_{2O} - \frac{1}{3}v_{1O} - \frac{1}{3}v_{3O}$$

$$v_{3N} = \frac{2}{3}v_{3O} - \frac{1}{3}v_{2O} - \frac{1}{3}v_{1O}$$

3. Déterminer l'expression du potentiel v_{NO} en fonction de v_{1O} , v_{2O} et v_{3O} .

4. La commande pleine onde

Il existe de nombreuses façons de commander un onduleur triphasé de ce type pour obtenir une tension alternative aux bornes de la charge. Les plus communes sont les suivantes :

- La commande pleine onde
- La commande par modulation de largeur d'impulsion :
 - ☞ Par modulation naturelle ou modulation sinus-triangle ;
 - ☞ Par instants de commutation prédéfinis ou modulation précalculée ;
 - ☞ Par modulation vectorielle ou modulation postcalculée.

Notations utilisées

Les notations utilisées dans les questions qui suivent sont les suivantes : les six commandes relatives aux trois bras d'onduleurs sont notées $CA+$ et $CA-$ pour le bras associé à la phase A , $CB+$ et $CB-$ pour le bras associé à la phase B et $CC+$ et $CC-$ pour le bras associé à la phase C . $C_{x+} = 1$ ou $C_{x-} = 1$ implique que l'interrupteur correspondant est fermé et $C_{x+} = 0$ ou $C_{x-} = 0$ implique que l'interrupteur correspondant est ouvert.

De façon générale $C_x = 1$ implique que $C_{x+} = 1$, $C_{x-} = 0$ et $C_x = 0$ implique que $C_{x+} = 0$, $C_{x-} = 1$.

Compléter les documents réponse REP1, REP2 et REP3 correspondant à la commande pleine onde.

6. La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Sur le document réponse REP 4, tracer les graphes de tensions v_{1O} , v_{2O} et u_{12} . Préciser les amplitudes.