

Notes de cours*

**Module : Commandes des entraînements
électromécaniques**

Niveau : L3 Electromécanique

*Une grande partie de ces notes de cours est prise du support de cours : commande des machines électriques du Dr. BOUDRIES Zoubir (Univ. de Bejaia)

PARTIE I. COMMANDE DES MOTEURS A COURANT CONTINU**1. Rappels sur les caractéristiques des moteurs à courant continu****1.1 Moteur à courant continu**

C'est une machine électromagnétique qui transforme l'énergie électrique qu'elle reçoit sous forme de courant continu en énergie mécanique.

1.2 Grandeurs caractéristiques**1.2.1 Force contre-électromotrice (f.c.e.m)**

$$E' = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi} \cdot \Omega \cdot \Phi \quad (\text{I.1})$$

Avec :

p : Nombre de paire de pôles de l'inducteur ;

a : Nombre de paire de voies de l'enroulement d'induit ;

N : Nombre total de brins actifs de l'induit ;

Φ : Flux utile par pôle (Weber) ;

Ω : Vitesse de rotation (rd/s) ;

E' : Force contre-électromotrice en Volts ;

Le facteur $\frac{p}{a} \frac{N}{2\pi}$ est constant. Posons : $\frac{p}{a} \frac{N}{2\pi} = k$; il vient :

$$E' = k\Omega \Phi \quad (\text{I.2})$$

1.2.2 Couple électromagnétique

- Définition

C'est le couple qui correspond à la puissance passée de la forme électrique à la forme mécanique. Cela apparaît clairement dans le bilan des puissances du moteur. Raisonnons sur un moteur à excitation séparée schématisé ci-après :

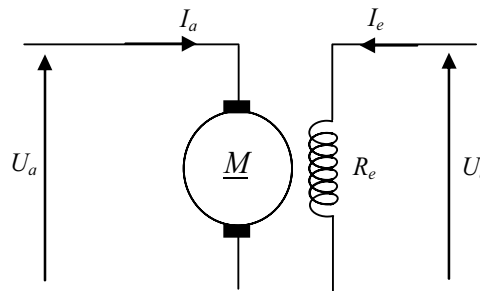


Fig. I.1 Schéma électrique équivalent d'un MCC à excitation séparée

▪ Equation électrique de l'induit

D'après la figure I.1, l'équation électrique de l'induit s'écrit :

$$U_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E' \quad (I.3)$$

Soit en régime permanent ;

$$U_a = R_a I_a + E' \quad (I.4)$$

D'où l'on tire l'expression de la f.c.e.m. E' :

$$E' = U_a - R_a I_a \quad (I.5)$$

▪ Bilan des puissances

Le bilan des puissances est illustré par la figure suivante :

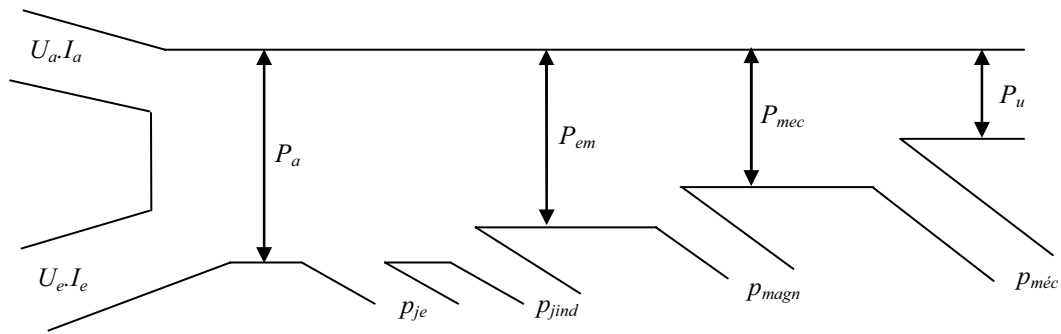


Fig. I.2 Bilan des puissances d'un moteur à courant continu à excitation séparée

○ *Puissance absorbée (P_a) :*

$$P_a = U_a I_a + U_e I_e \quad (I.6)$$

○ *Pertes Joule excitation (p_{j_e}) et dans le circuit d'induit ($p_{j_{ind}}$) :*

$$p_{j_e} = U_e \cdot I_e \quad (I.7)$$

$$p_{j_{ind}} = R_a \cdot I_a^2 \quad (I.8)$$

$$p_j = p_{j_{ind}} + p_{j_e} \quad (I.9)$$

○ *Puissance électromagnétique :*

$$P_{em} = P_a - p_j \quad (I.10)$$

○ *Puissance mécanique :*

$$P_{méc} = P_{em} - p_{magn} \quad (I.11)$$

p_{magn} : étant les pertes magnétiques définies par la somme des pertes par hystérésis et par courants de Foucault:

$$p_{magn} = p_{hys} + p_{cf} \quad (I.12)$$

○ *Puissance utile :*

$$P_u = P_{méc} - p_{méc} \quad (I.13)$$

$p_{méc}$: désigne les pertes mécaniques et qui rassemblent les pertes par frottement et ventilation.

$$p_{méc} = p_{frt} + p_{ven} \quad (I.14)$$

N.B. : La somme des pertes magnétiques p_{magn} et mécaniques $p_{méc}$ est désignée par pertes constantes (p_c) du fait que leurs valeur est indépendant de l'état de charge du moteur.

- Expressions des couples
 - Couple électromagnétique

On a la relation :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} \quad (I.15)$$

La puissance qui passe de la forme électrique à la forme mécanique est P_{em} (Puissance électromagnétique). Exprimons cette puissance :

$$P_{em} = P_a - p_j,$$

Ce qui donne

$$P_{em} = (U_a - R_a I_a) I_a$$

Soit en utilisant l'équation électrique de l'induit (I.4) :

$$P_{em} = E' I_a \quad (I.16)$$

On obtient :

$$C_{em} = \frac{E' I_a}{\Omega} = \frac{k \cdot \Phi \cdot I_a}{\Omega} \quad (I.17)$$

$$C_{em} = k \cdot \Phi \cdot I_a \quad (I.18)$$

- Couple utile :

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{P_{em} - p_c}{\Omega} = C_{em} - C_p \quad (I.19)$$

C_p : couples des pertes

En pratique le couple de pertes qui dépend de la vitesse ne dépasse pas quelques pourcents du couple électromagnétique, aussi peut-on le négliger et se permettre ainsi d'écrire :

$$C_u = C_{mec} = C_{em} = C = k \cdot \Phi \cdot I_a \quad (I.20)$$

- ❖ *Le couple utile d'un moteur à courant continu est proportionnel au courant induit et au flux inducteur.*

1.3 Caractéristiques des moteurs à courant continu

Les caractéristiques qui nous intéressent sont :

- ✓ Caractéristique électromécanique de vitesse $\Omega = f(I_a)$.
- ✓ Caractéristique électromécanique de couple $C = f(I_a)$.
- ✓ Caractéristique mécanique $C = f(\Omega)$.

- *Cas du moteur shunt ou à excitation séparée :*

L'induit et l'inducteur d'un moteur shunt sont alimentés sous la même tension U_a inscrite sur la plaque signalétique (tension nominale). Dans le cas d'un moteur à excitation séparée, ils sont alimentés par deux sources différentes. Mais pour les deux types, la tension appliquée à l'enroulement d'excitation et par suite le courant d'excitation sont indépendants de la charge, aussi leurs propriétés sont-elles identiques.

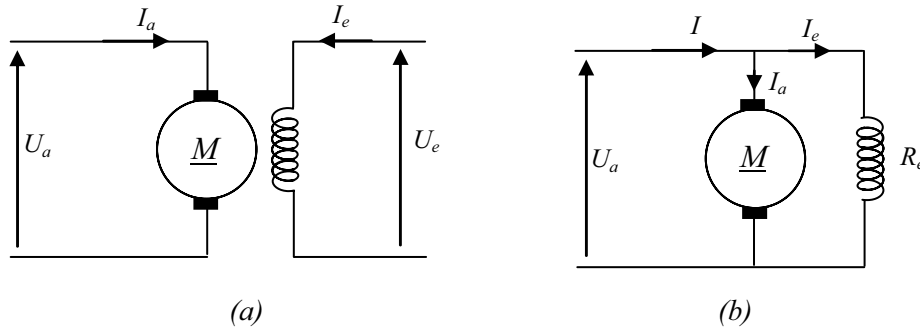


Fig. I.3 Moteur à courant continu ; (a) à excitation séparée, (b) à excitation shunt

Dans le cas d'un moteur shunt, il vient :

$$I = I_a + I_e \quad (I.21)$$

$$\text{Avec: } I_e = \frac{U_a}{R_e} \quad (I.22)$$

La résistance de l'inducteur étant toujours élevée, le courant inducteur ne représente que quelques pourcents du courant de l'induit, aussi peut-on écrire : $I = I_a$.

❖ Le moteur shunt ou à excitation séparée est un moteur à flux constant ; ainsi, on peut écrire :

$$C = k \cdot \Phi \cdot I_a = k' \cdot I_a \quad (I.23)$$

$$\text{Avec: } k' = k \Phi = \frac{p N}{a 2\pi} \Phi \quad (I.24)$$

1.3.1 Caractéristique électromécanique de vitesse : $\Omega=f(I_a)$, U_a et ϕ constants

De l'équation (I.4), en introduisant $E' = k' \Omega$, on obtient :

$$U_a = k' \Omega + R_a I_a ; \text{ soit :}$$

$$\Omega = \frac{U_a - R_a I_a}{k'} \quad (I.25)$$

$$\Omega = \frac{U_a}{k'} - \frac{R_a}{k'} I_a = A - B I_a \quad (I.26)$$

Le tracé de la caractéristique correspondante est représenté sur la figure I.4.

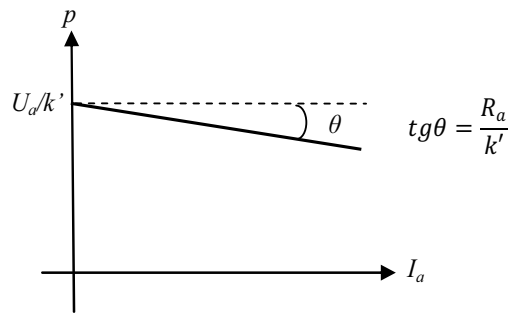


Fig. I.4 Caractéristique électromécanique de vitesse

1.3.2 Caractéristique électromécanique du couple : $C = f(I_a)$, U_a et ϕ constants

La relation $C = k'I_a$ donnant le couple nous permet de tracer la caractéristique suivante :

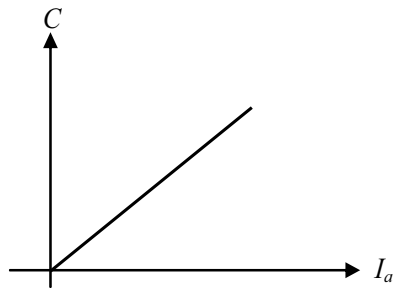


Fig. I.5 Caractéristique électromécanique de couple

1.3.3 Caractéristique mécanique: $C = f(\Omega)$, U_a et ϕ constants.

On détermine facilement la caractéristique mécanique soit par élimination graphique de l'intensité entre les caractéristiques $p(I)$ et $C(I)$, soit par le calcul. On a, en effet ;

$$U_a = E' + R_a I_a = k' \Omega + R_a I_a \tag{I. 27}$$

$$C = k' I_a \tag{I. 28}$$

Par élimination du courant entre les relations (1.27) et (1.28), on obtient ;

$$U_a = k' \Omega + R_a \frac{C}{k'} \tag{I. 29}$$

D'où :

$$C = \frac{k'}{R_a} U_a - \frac{k'^2}{R_a} \Omega \tag{I. 30}$$

La caractéristique mécanique (Fig. I.6) est une droite descendante presque parallèle à l'axe des couples.

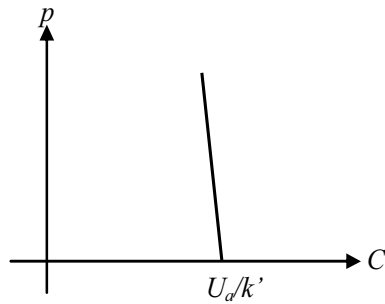


Fig. I.6 Caractéristique mécanique.

- ❖ *La vitesse du moteur shunt (séparé) est presque constante indépendamment de la charge du moteur.*

1.4 Caractéristiques mécaniques des charges entraînées

La caractéristique mécanique de la charge entraînée est souvent compliquée. En pratique, on se réfère habituellement à l'un ou l'autre des deux modes de fonctionnement suivants :

1.4.1 Fonctionnement à couple constant $C_r = \text{Const}$

Le couple est indépendant de la vitesse, tandis que la puissance est proportionnelle à la vitesse. Ce fonctionnement est applicable à l'ensemble des engins de levage (grues, ascenseurs, convoyeurs,...).

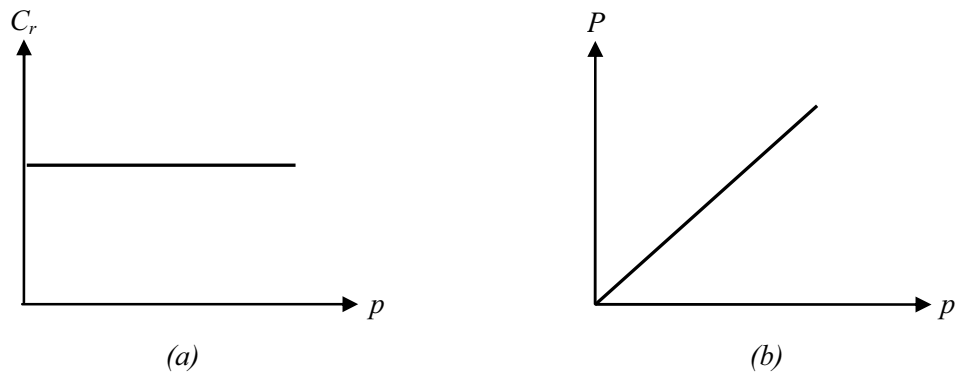


Fig. I.7 Fonctionnement à couple résistant constant ; (a) courbe $C(p)$, (b) courbe $P(p)$

1.4.2 Fonctionnement à puissance constante $P = \text{Const}$

Le deuxième entraînement beaucoup moins fréquent que le précédent travaille à puissance constante, aussi le couple ($C_r = P/p = K/p$) est-il inversement proportionnel à la vitesse.

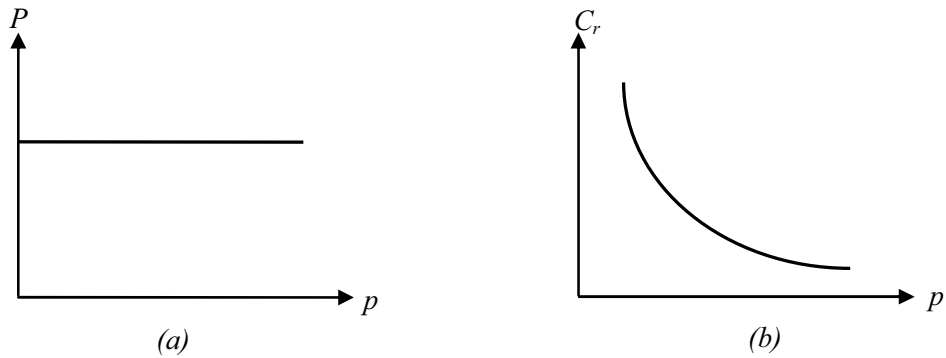


Fig. I.8 Fonctionnement à puissance constante ; (a) courbe $C(p)$, (b) courbe $P(p)$

1.5 Point de fonctionnement d'un groupe moteur- charge entraînée

Le point d'intersection des deux courbes $C_m=f(\Omega)$ et $C_r=f(\Omega)$ donne le point de fonctionnement. A ce point on associe habituellement le couple nominal (C_n) et la vitesse nominale (Ω_n) du groupe.

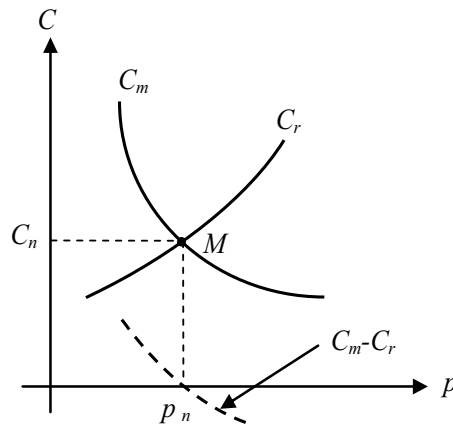


Fig. I.9 Point de fonctionnement d'un groupe (moteur – charge entraînée).

1.6 Stabilité

Il est intéressant de rechercher à quelles conditions le fonctionnement d'un ensemble moteur-charge entraînée est stable. A cet effet, considérons à nouveau la figure et supposons que pour une cause extérieure quelconque (frottement de la main sur l'arbre), la vitesse du groupe ralentisse, on constate que le couple moteur devient alors supérieur au couple résistant. Ainsi, à cet effet externe s'oppose une action interne qui tend à ramener le groupe à sa vitesse initiale. Inversement, si on agissait pour accélérer la vitesse du groupe, le couple résistant deviendrait supérieur au couple moteur et l'action interne tendrait bien à s'opposer à cet effet. Le même raisonnement nous montre que le groupe de la figure est instable. On peut traduire mathématiquement la condition de stabilité en écrivant que la pente de la caractéristique ($C_m - C_r$) doit être négative ; soit :

$$\Delta(C_m - C_r)/\Delta\Omega < 0 \quad (\text{I.31})$$

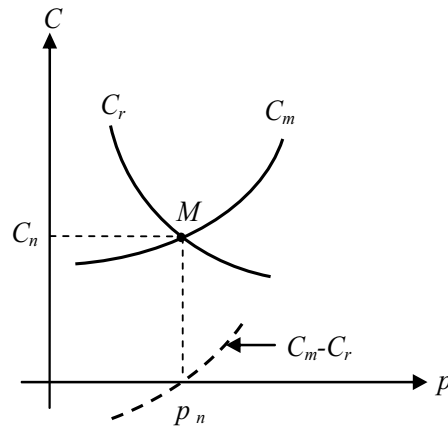


Fig. I.10 Fonctionnement instable d'un groupe moteur-charge entraînée

1.7 Réglage de la vitesse d'un moteur à flux constant

1.7.1 Introduction

La marche d'un groupe moteur-charge entraînée est fonction d'un équilibre dynamique. En effet, celle-ci est définie par l'égalité du couple moteur et du couple résistant, autrement dit correspond au point de rencontre des courbes $C_m(\Omega)$ et $C_r(\Omega)$. C'est à partir de cet équilibre dynamique que l'on passe aux conditions électriques de fonctionnement.

Il s'ensuit que le principe de réglage de la vitesse peut être énoncé comme suit : si nous supposons immuable la caractéristique $C_r(\Omega)$, le problème de réglage de la vitesse n'est donc qu'un problème de déplacement de la caractéristique $C_m(\Omega)$ du moteur.

1.7.2 Méthodes de réglage de la vitesse

La relation de la vitesse d'un moteur à courant continu (à excitation shunt ou séparée) est donnée par :

$$\Omega = \frac{U_a - R_a \cdot I_a}{k\Phi} \quad (I.32)$$

En explorant cette relation, il apparait clairement trois possibilités pour le réglage de la vitesse :

- ✓ Action sur R_a (réglage rhéostatique) ;
- ✓ Action sur Φ (réglage par le flux) ;
- ✓ Action sur U_a (réglage par la tension).

Proposons-nous d'étudier les différentes méthodes de réglage de la vitesse d'un moteur shunt qui entraîne une charge mécanique dont le couple résistant est constant.

A) Réglage rhéostatique

La tension et le flux étant fixés à leur valeur nominale, on peut réduire la vitesse en augmentant la résistance de l'induit à l'aide d'un rhéostat (R_h) branché en série avec l'induit.

On a en paramétriques les relations suivantes :

$$\begin{cases} C = k' \cdot I_a \\ \Omega = \frac{U_a - (R_a + R_h) \cdot I_a}{k'} \end{cases} \quad (I.33)$$

$$- \text{Pour } C = 0; I_a = 0 \rightarrow \Omega = \frac{U_a}{k'} \quad (I.34)$$

Cette vitesse ne dépend pas de R_h , donc le point correspondant est immuable.

$$- \text{Pour } \Omega = 0; I_a = \frac{U_a}{R_a + R_h} \rightarrow C = k' \frac{U_a}{R_a + R_h} \quad (I.35)$$

Lorsqu'on augmente R_h , le couple C diminue.

❖ *On obtient un faisceau de droites concourantes*

Ce réglage est mauvais à la fois sur le plan technique et sur le plan économique. En effet, du point de vue technique, les caractéristiques étant concourantes, celles-ci, deviennent de plus en plus « série », c'est-à-dire qu'avec une résistance insérée, la chute de vitesse augmente avec la charge. Techniquement un bon réglage doit entraîner un déplacement des caractéristiques parallèlement à la caractéristique d'origine. De plus, ce réglage est mauvais du point de vue économique car la consommation d'énergie dans le rhéostat est d'autant plus importante que la chute de vitesse réclamée est plus élevée. C'est ainsi qu'à la demi-vitesse, on consomme autant d'énergie dans le rhéostat que dans le moteur.

Dans la pratique, ce procédé de réglage n'est utilisé que pour le démarrage ou le freinage.

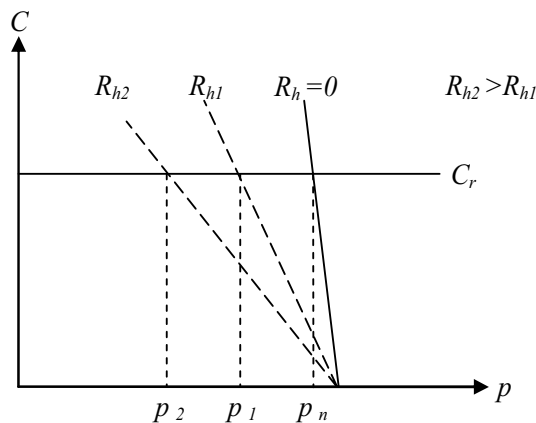


Fig. I.11 Réglage rhéostatique : Caractéristiques de réglage

B) Réglage par le flux

Il est important de noter, qu'en vertu de la relation du couple ($C=k \cdot \Phi \cdot I_a$), on a toujours intérêt à appliquer le flux maximal lors du démarrage pour permettre au moteur de porter à la vitesse nominale toutes les masses qui sont initialement au repos. Par ailleurs, du fait de la saturation du fer de la machine, cette valeur du flux ne peut pas être augmentée davantage.

Il en résulte donc et conformément à la relation (I.32) donnant la vitesse du moteur ; que le réglage est obtenu par augmentation de la vitesse par rapport à la vitesse nominale en réduisant la valeur du flux (courant d'excitation). Cela se réalise par l'introduction d'un rhéostat de champ dans le circuit d'excitation.

On a les relations suivantes :

$$\begin{cases} \Omega = \frac{U_a - R_a I_a}{k\Phi} \\ C_m = K \cdot \Phi \cdot I_a \end{cases} \quad (\text{I.36})$$

$$\text{--Pour } C = 0; I_a = 0 \rightarrow \Omega = \frac{U_a}{k\Phi} \quad (\text{I.37})$$

Lorsqu'on réduit la valeur de Φ , la vitesse augmente.

$$\text{--Pour } \Omega = 0; I_a = \frac{U_a}{R_a} \rightarrow C = k \cdot \Phi \cdot \frac{U_a}{R_a} \quad (\text{I.38})$$

Lorsqu'on réduit la valeur de Φ , le couple diminue.

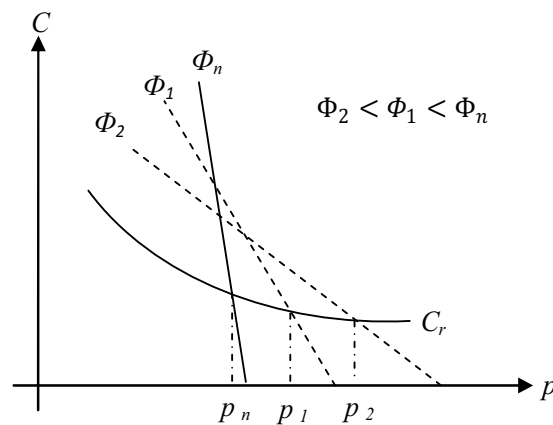


Fig. I.12 Caractéristique de réglage par le flux

Ce réglage est mauvais du point de vue technique ; les caractéristiques étant concourantes.

Il est bon du point de vue économique car la puissance dissipée dans l'inducteur étant très faible par rapport à la puissance absorbée ; le rendement du moteur ne sera pas modifié. Toutefois, il y'a lieu de faire les remarques suivantes :

- ✓ Avec ce procédé, on ne peut qu'augmenter la vitesse du moteur par rapport à sa vitesse nominale.
- ✓ Si le couple résistant est constant ($C_m = k \cdot \Phi \cdot I_a = cte$), l'intensité augmentera quand on diminuera le flux et le moteur risquera de chauffer. Dans ces conditions, on doit dimensionner le moteur en conséquence. Il est à noter que cet inconvénient n'a pas lieu si l'entraînement est à puissance constante car en vertu de la relation $P = U \cdot I_a = cte$, comme la tension U est constante, l'intensité I_a demeurera constante.

C) Réglage par la tension d'induit

Le flux d'excitation étant fixé à sa valeur nominale, le réglage est obtenu par réduction de la vitesse par rapport à la vitesse nominale en réduisant la valeur de la tension d'alimentation.

En vertu des relations:

$$\begin{cases} \Omega = \frac{U_a - R_a I_a}{k'} \\ C_m = k' \cdot I_a \end{cases} \quad (I.39)$$

$$- \text{Pour } C = 0; I_a = 0 \rightarrow \Omega = \frac{U_a}{k'} \rightarrow \Delta\Omega = \frac{\Delta U_a}{k'} \quad (I.40)$$

Lorsqu'on réduit la tension U_a , la vitesse diminue.

$$- \text{Pour } \Omega = 0; I_a = \frac{U_a}{R_a} \rightarrow C = k' \cdot \frac{U_a}{R_a} \rightarrow \Delta C = k \frac{\Delta U_a}{R_a} \quad (I.41)$$

Lorsqu'on réduit la valeur de la tension, le couple diminue.

Calculons la pente ($\Delta C / \Delta p$) :

$$\frac{\Delta C}{\Delta \Omega} = \frac{k'^2}{R_a} = \text{constante} \quad (I.42)$$

- ❖ Les caractéristiques se déplacent parallèlement par rapport à la caractéristique d'origine, comme le montre la figure suivante :

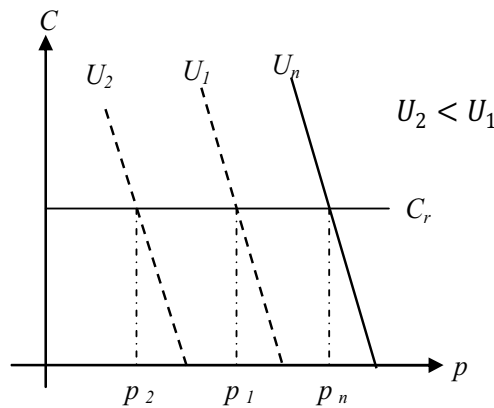


Fig. I.13 Caractéristique de réglage par la tension d'induit

Ce mode de réglage est excellent du point de vue technique car les caractéristique ne sont pas déformées (l'allure shunt est conservée), d'autre part du point de vue économique, aucune énergie n'est gaspillée et le rendement demeure élevé. Cependant, cette solution nécessite l'emploi d'un variateur de vitesse. Ceci a constitué pendant de longues années un réel problème, mais avec le développement de l'électronique de puissance, les convertisseurs électroniques assurent parfaitement cette tâche.

2. Variateurs de vitesse pour moteurs à courant continu

2.1 Introduction

Le moteur à courant continu a longtemps été considéré comme le moteur le mieux adapté au fonctionnement à vitesse variable à condition de régler sa vitesse par la tension d'induit.

A l'époque où les seuls semi-conducteurs de puissance disponibles étaient les diodes et les thyristors, l'association d'un montage redresseur commandé ou semi-commandé et d'une machine à courant continu constituait la solution type dans le domaine de la variation de vitesse.

A l'heure actuelle, les IGBT et les GTO permettent de réaliser des onduleurs à commande MLI fiables, compacts d'un coût raisonnable. Aussi, dans pratiquement tous les domaines d'application, les variateurs de vitesse avec moteur à courant alternatif remplacent les variateurs à moteur à courant continu. En raison de son système collecteur-balais, le moteur à courant continu est plus fragile que les moteurs à courant alternatif, il nécessite plus d'entretien et est mal adapté aux conditions d'ambiance hostile.

Dans les équipements récents, on limite le plus souvent l'emploi des variateurs à courant continu à des applications de faible puissance et performances dynamiques élevées. Dans ce qui suit, on présentera tout d'abord le schéma de principe du variateur de vitesse, ensuite on donnera un aperçu sur les différents variateurs associés au moteur à courant continu selon que le réseau d'alimentation est alternatif ou continu.

2.2 Réalisation d'une tension d'induit variable

Pour réaliser une tension d'induit variable, on a longtemps utilisé le montage WARD-LEONNARD. Avec l'apparition des semi-conducteurs, on a trouvé intéressant d'utiliser un convertisseur d'électronique de puissance (Fig. I.14).

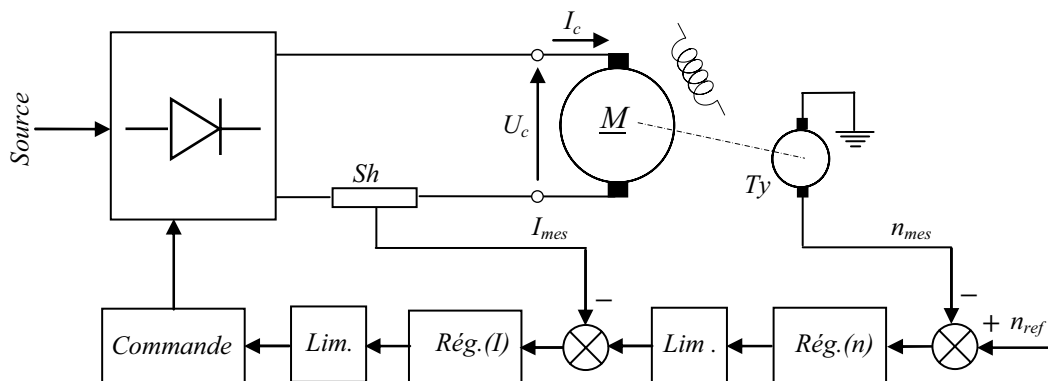


Fig. I.14 Tension continue variable à semi-conducteurs

Le convertisseur électronique (conv.) alimente l'induit du moteur et sa vitesse est captée par une dynamo tachymétrique T_y . La valeur mesurée (n_{mes}) est comparée à la vitesse de référence (n_{ref}). L'écart de régulation constitue l'entrée du régulateur de vitesse qui génère le signal à l'entrée du bloc de commande.

A cette boucle de vitesse, on rajoute une boucle de courant ; un shunt Sh donne une tension proportionnelle à I_c appliquée à l'entrée du régulateur de courant. Les limiteurs placés à la sortie des régulateurs servent à maintenir le courant et la tension d'induit entre les valeurs maximales admises.

Les convertisseurs utilisés être classés comme suit :

- ✓ Convertisseurs alternatif-continu (Redresseurs) : on distingue les montages non réversibles et les montages réversibles.
- ✓ Convertisseurs continu-continu (Hacheurs): il existe, également, les deux types de montages ; non réversibles et réversibles.

2.3 Variateurs à redresseurs

Ce sont les plus répandus dans les applications industrielles puisqu'ils partent directement de la tension du réseau (avec ou sans transformateur). Ils sont monophasés ou triphasés selon la puissance du moteur.

2.3.1 Montages non réversibles

Lorsque le moteur à courant continu ne doit tourner que dans un sens et que l'entraînement ne nécessite pas un freinage rapide, on utilise un variateur non réversible permettant la marche de la machine en moteur dans le quadrant I du plan (C, n).

A) Montages alimentés en monophasé

Seuls les variateurs de faible puissance, jusqu'à 10 kW environ, sont d'ordinaire alimentés en monophasé. On utilise le plus souvent les montages en pont (PD2) qui ont surtout l'avantage de ne pas nécessiter de transformateur. Il y'a deux possibilités :

- Pont complet à quatre thyristors
- Pont mixte à deux thyristors et deux diodes.

Le pont tout thyristors ne soulève pas de difficultés pour faire varier U_c de $+U_{cmax}$ à zéro ($\psi: 0 \rightarrow \pi/2$). Au contraire, pour faire varier U_c de $+U_{cmax}$ à zéro dans le cas d'un montage mixte, il faut faire varier ψ de 0 à π . Ce qui engendrerait des difficultés de commutation aux faibles valeurs de U_c donc de la vitesse.

Sauf dans le cas où il faut prévoir la marche à faible vitesse et à faible charge, on adopte le montage mixte qui donne :

- ✓ Une ondulation de tension redressée moins forte
- ✓ Une moindre détérioration du facteur de puissance en ligne donc une absorption de puissance réactive plus réduite.

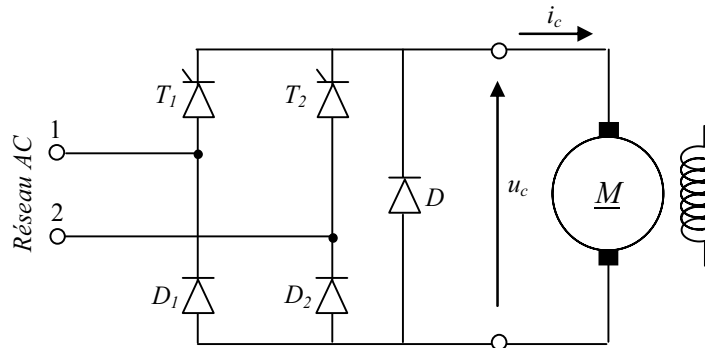


Fig. I.15 Association pont PD2 mixte-moteur continu

B) Montages alimentés en triphasé

On utilise les montages en pont pour éviter l'emploi d'un transformateur. Il y'a deux possibilités :

- Pont complet à six thyristors
- Pont mixte (3 thyristors et 3 diodes)

Le montage mixte est le plus économique, mais ses performances sont si mauvaises qu'on utilise le plus souvent le pont tout thyristors.

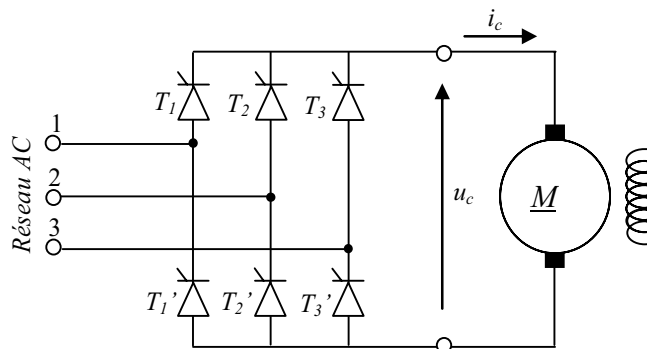


Fig. I.16 Association pont PD3 tout thyristors-MCC

2.3.2 Montages réversibles

Par variateur réversible, on entend un entraînement permettant une inversion rapide du sens de rotation.

Le variateur doit pouvoir assurer le fonctionnement dans les quatre quadrants.

- Quadrant 1 : marche en moteur dans le sens direct.
 $n > 0, \quad U_c I_c > 0$ (I. 43)

- Quadrant 2 : marche en générateur (récupération) dans le sens direct.
 $n > 0, \quad U_c I_c < 0$ (I. 44)

- Quadrant 3 : marche en moteur dans le sens inverse.

$$n < 0, \quad U_c I_c > 0 \quad (I.45)$$

- Quadrant 4 : marche en récupération dans le sens inverse.

$$n < 0, \quad U_c I_c < 0 \quad (I.46)$$

Le déroulement d'un cycle de travail conduit à passer d'un quadrant à l'autre dans le sens de leur numérotation.

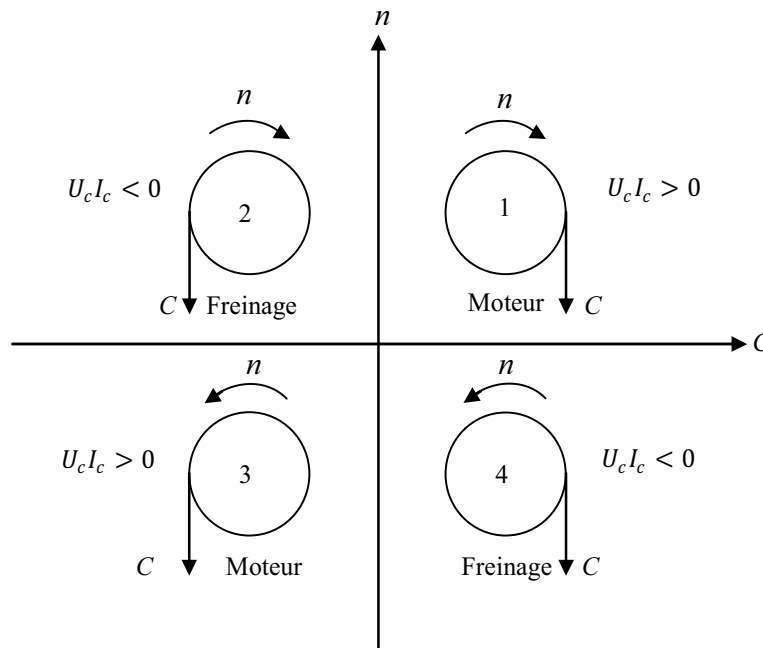


Fig. I.17 Fonctionnement dans les quatre quadrants de la machine à courant continu

Trois montages sont possibles :

- ✓ Inversion du courant inducteur,
- ✓ Inversion du courant d'induit,
- ✓ Montage réversible tête-bêche.

Ils utilisent tous au moins un montage tout thyristors permettant l'inversion de la tension U_c ; c'est la réalisation des passages entre les quadrants 1 et 2 ou 3 et 4 qu'ils diffèrent. C'est la rapidité de ces passages qui permet de les classer.

A) Montage à inversion du courant inducteur

L'induit est alimenté par un seul montage redresseur tout thyristors (pont à quatre thyristors en monophasé, pont à six thyristors en triphasé, le plus souvent). L'inversion du couple est réalisée par inversion du courant inducteur à courant I_c dans l'induit nul. Elle est d'ordinaire obtenue par deux petits montages redresseurs montés en tête-bêche et alimentant l'enroulement inducteur dans un sens ou dans l'autre.

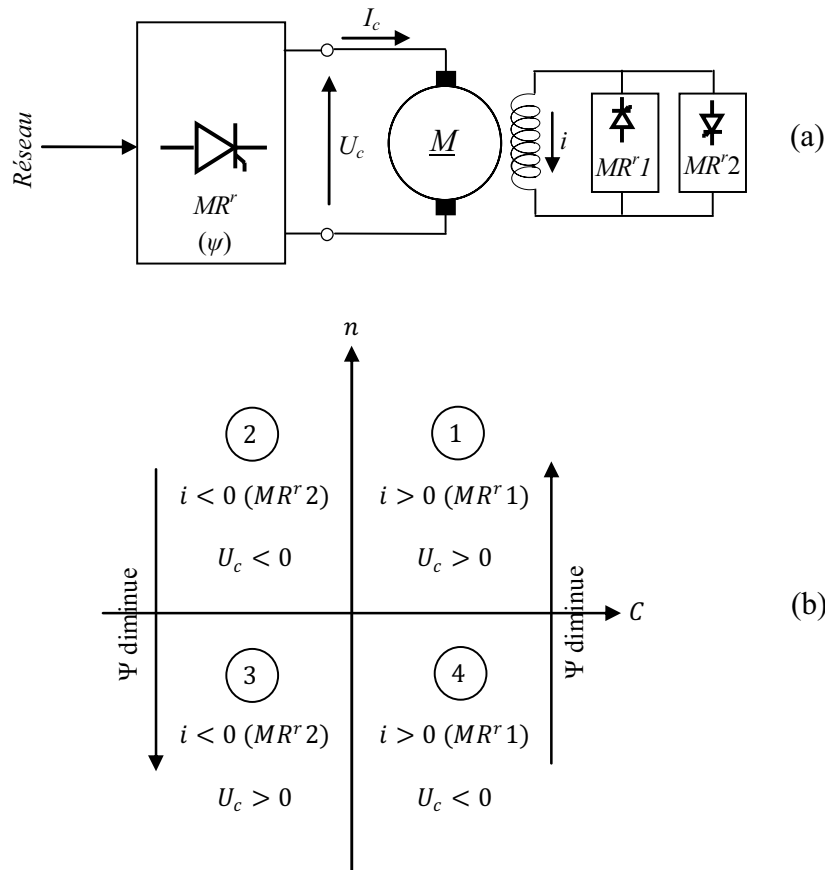


Fig. I.18 Réversibilité par inversion du courant inducteur : a) schéma de principe, b) représentation du fonctionnement dans le plan (C, n)

Cette solution simple et économique n'est utilisable que lorsqu'on accepte un temps mort d'inversion du couple assez élevé (0.5 seconde à quelques secondes) car à cause de la constante de temps de l'inducteur, l'inversion du courant i ne peut être très rapide.

B) Montage à inversion du courant induit

L'induit est toujours alimenté par le même montage tout thyristors ; l'inversion du couple s'obtient par inversion du courant I_c à l'aide d'un contacteur bipolaire. Cela permet au redresseur de jouer tantôt le rôle du pont « tête », tantôt celui du pont bêche.

L'inversion du contacteur ne doit s'opérer qu'à courant nul. Le temps mort d'inversion du couple correspond au temps de détection du courant nul augmenté du temps de réponse du système mécanique ; il varie entre 0.1 et 0.3s.

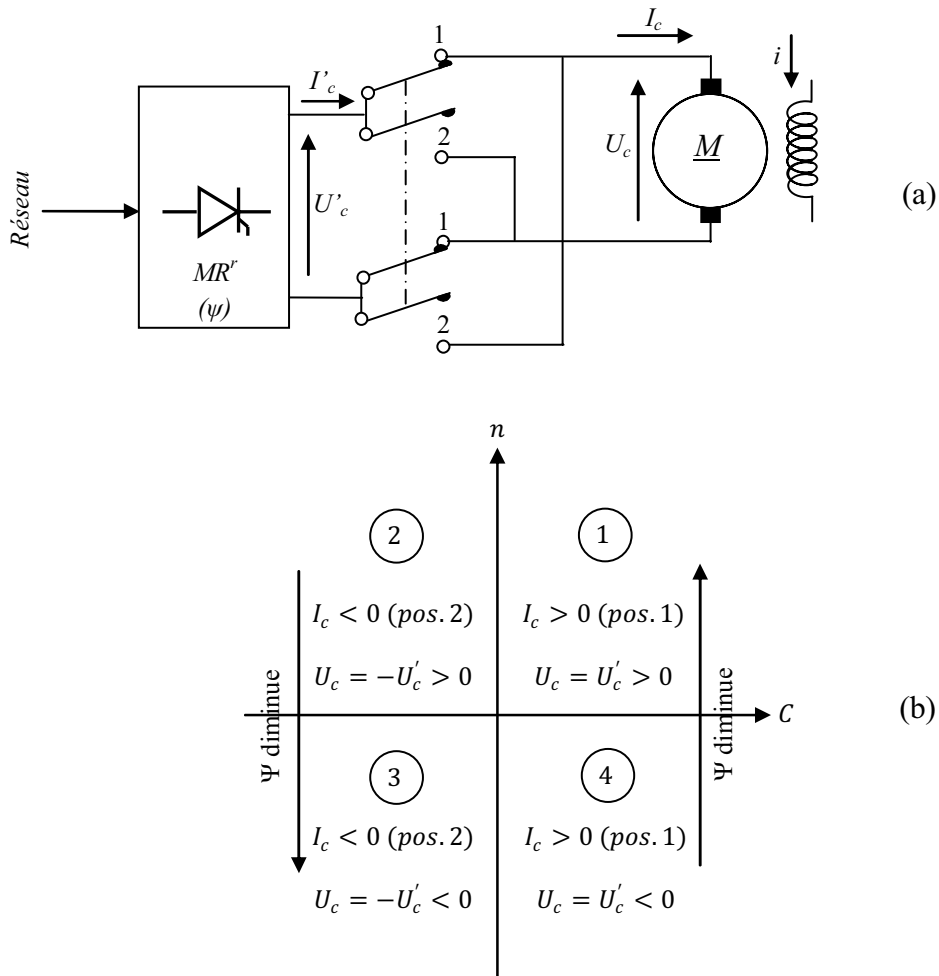


Fig. I.19 Réversibilité par inversion du courant induit : a) schéma de principe, b) représentation du fonctionnement dans le plan (C, n)

C) Montage réversible tête-bêche

Pour assurer des inversions très rapides (5 à 20 ms) avec un équipement totalement statique, on doit utiliser deux montages redresseurs principaux tout thyristors montés en tête-bêche aux bornes de l'induit ; l'un fournit au moteur le courant I_d positif, l'autre le courant I_d négatif.

Le pont 1 assure le fonctionnement dans les quadrants 1 et 4, le pont 2 dans les quadrants 2 et 3 suivant le mode de commande des redresseurs des deux ponts, on distingue les variateurs avec courant de circulation et sans courant de circulation.

➤ Montage avec courant de circulation

Dans ce cas, on commande en permanence les redresseurs des deux ponts de façon qu'ils donnent toujours aux bornes du moteur des tensions redressées moyennes égales :

$$U_{c1} = -U_{c2} \quad \text{avec} \quad \psi_2 = \pi - \psi_1 \quad (I.47)$$

Ce montage a l'avantage de ne pas présenter de temps mort car dès que le courant I_c devient négatif, le courant passe instantanément du pont 1 au pont 2.

Cependant, les valeurs instantanées des tensions u_{c1} et u_{c2} ne sont pas égales en raison des harmoniques, aussi y'a-t-il un courant de circulation entre les deux redresseurs. On s'efforce d'étouffer ce courant de circulation en plaçant des inductances de filtrage dans la boucle à courant continu.

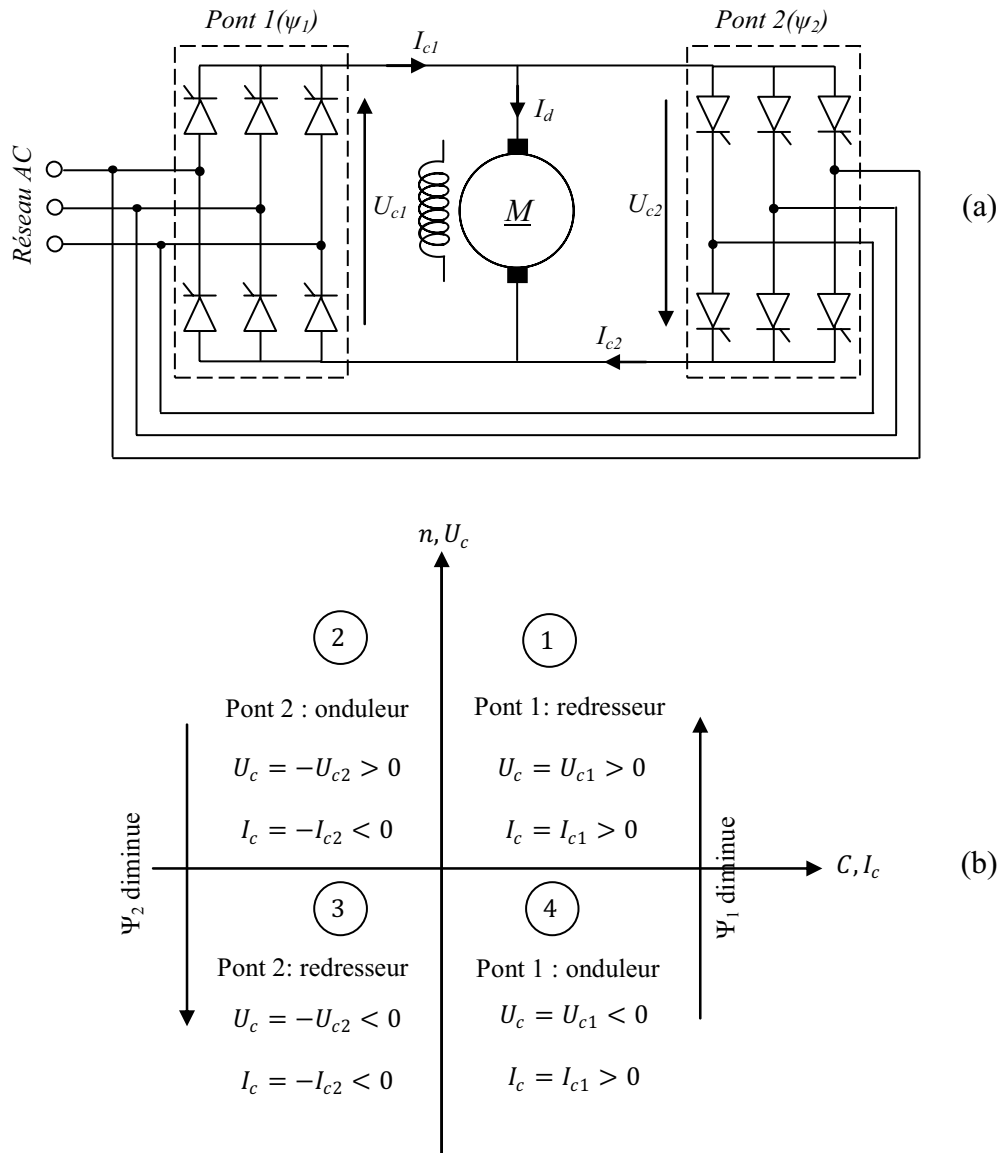


Fig. I.20 Montage Réversible tête-bêche: a) schéma de principe, b) représentation du fonctionnement dans le plan (C, n)

➤ Montage sans courant de circulation

Dans la pratique, on préfère habituellement éviter la présence des inductances de filtrage en acceptant un faible temps mort. A cet effet, on règle la logique de commande des gâchettes pour que tous les thyristors d'un groupe soient bloqués quand l'autre groupe fonctionne.

2.4 Variateurs à hacheurs

Lorsque l'équipement est alimenté en courant continu, comme c'est le cas avec une batterie d'accumulateurs ou la caténaire à courant continu en traction électrique, l'obtention de la tension continue variable appliquée à l'induit U_d est réalisée au moyen d'un hacheur.

2.4.1 Hacheur série

On emploie le hacheur série lorsque le moteur ne doit travailler que dans le quadrant 1 ;

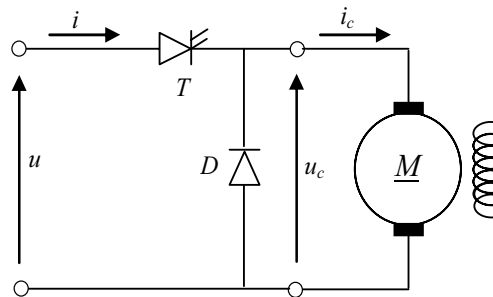


Fig. I.21 Association hacheur série-MCC

2.4.2 Hacheur réversible en courant

Le hacheur à deux interrupteurs réversible en courant est utilisé lorsque le moteur doit travailler dans les quadrants 1 et 2 ;

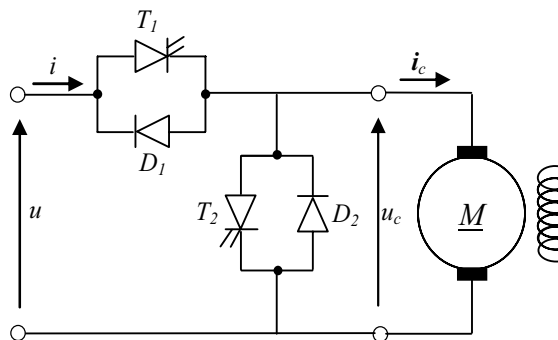


Fig. I.22 Association hacheur réversible en courant-MCC

2.4.3 Hacheur en pont

Lorsque le fonctionnement a lieu dans les quatre quadrants, on a recours au hacheur en pont réversible en courant et en tension.

La marche dans les quadrants 2 et 3 nécessite que la source alimentant le hacheur soit réversible en courant.

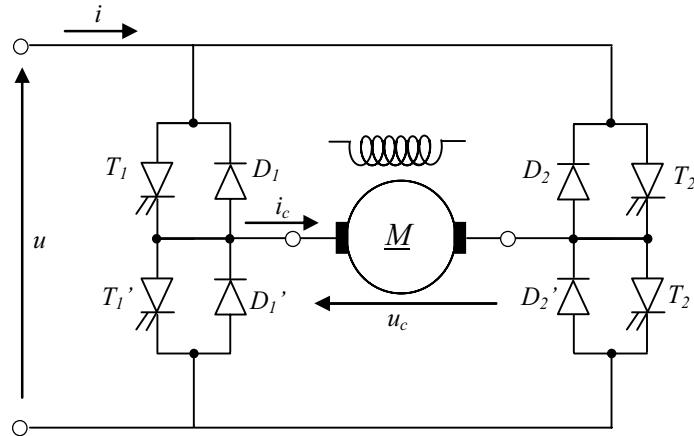


Fig. I.23 Association hacheur en pont (quatre quadrants)-MCC

3. Notions générales sur la commande des MCC

3.1 Introduction

Pour réaliser la commande de la grandeur d'entrée (référence) d'un système (I_a , Ω dans notre cas), on utilise un système asservi (structure en boucle) selon le schéma de principe ci-après :

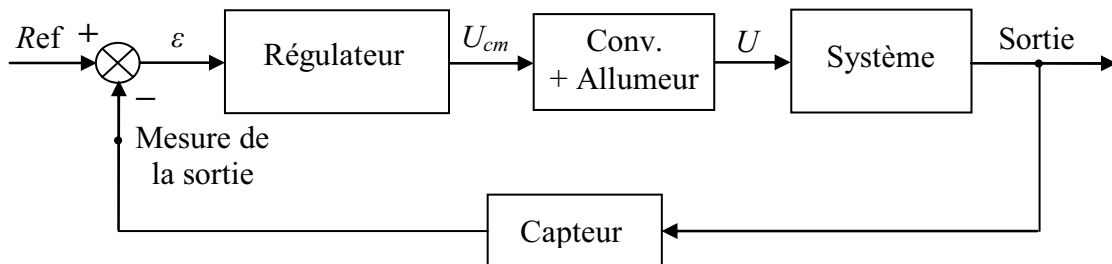


Fig. I.24 Schéma de principe de base d'une commande asservie.

Le recours à une commande à rétro-réaction est motivé, essentiellement, par le fait qu'une telle structure permet d'éliminer (minimiser) l'influence des perturbations extérieures (variation du couple résistant par exemple). Ce que ne permet pas de réaliser un système en boucle ouverte.

Il existe 3 principes de régulation :

- Régulation à boucles convergentes ;
- Régulation à boucles en parallèle ;
- Régulation en cascade.

Ils permettent, tous les trois, de contrôler la variable principale et de limiter des variables secondaires. Nous allons les décrire brièvement et, pour comparer leurs propriétés respectives, nous choisirons pour exemple une régulation de vitesse d'un moteur à courant continu assortie d'une limitation du courant d'induit.

3.2 Régulation à boucles convergentes

Le schéma de principe de cette commande est donné sur la figure I.25

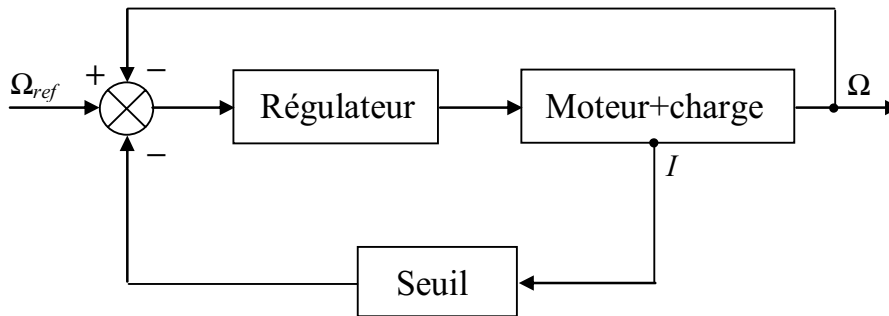


Fig. I.25 Schéma fonctionnel de la régulation à boucles convergentes

- Ce système comporte un seul régulateur.
- Le signal de réaction venant de la variable principale est constamment présent à l'entrée du régulateur.
- celui qui provient de la variable secondaire (courant), est comparé à un seuil, et est en quelque sorte bloqué tant que la valeur de limitation n'est pas atteinte. Au delà du seuil, le dépassement atteint l'entrée du régulateur et combat le signal de retour de vitesse, tendant ainsi à limiter le courant dans l'induit.

Avantages:

- ✓ Simplicité.
- ✓ cout réduit.

Inconvénients:

- ✓ Mauvaise qualité (1 seul régulateur pour 2 boucles).

3.3 Régulation parallèle

Le système de régulation parallèle (Fig. I.26) comporte un régulateur séparé pour chaque variable à contrôler (I et Ω). Les sorties des deux régulateurs sont connectées grâce à un dispositif électronique de commutation à un point commun qui est l'entrée du système de puissance qui alimente le moteur. Dans un tel dispositif, seul un régulateur est en service à tout instant.

Dans notre exemple, le régulateur de vitesse, seul, est en fonctionnement aussi longtemps que le courant n'atteint pas sa valeur de limitation. Dès que cela arrive, c'est le régulateur de courant qui prend le relais et le régulateur de vitesse est commuté hors du circuit. Cela signifie que, dans ce système, le régulateur de courant travaille en régulateur limiteur, tandis que le régulateur de vitesse a le fonctionnement habituel tant que le courant évolue à l'intérieur des limites prévues.

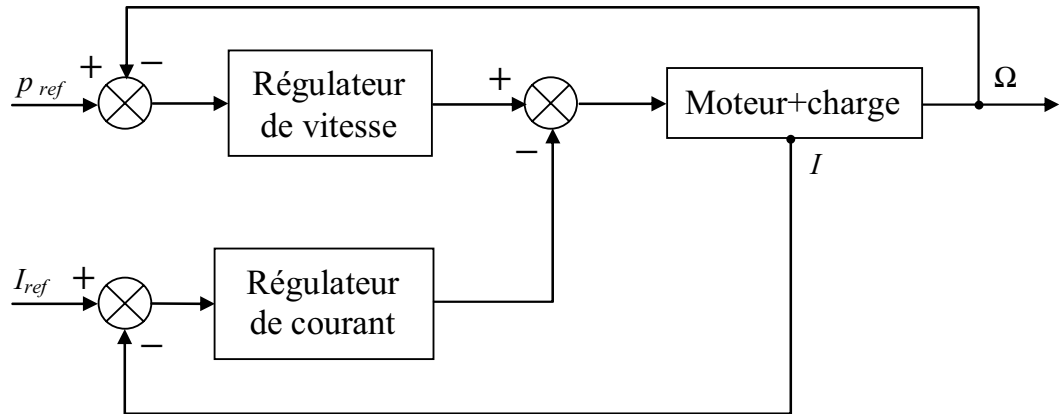


Fig. I.26 Schéma fonctionnel de la régulation parallèle

Avantages :

- ✓ chaque variable sous contrôle correspond à un régulateur séparé ; chaque boucle peut donc être réglée à l'optimum.
- ✓ on peut régler les caractéristiques statiques et dynamiques d'une régulation parallèle indépendamment les unes des autres.
- ✓ l'étude, le calcul et la mise en service des régulateurs sont simples du fait de l'indépendance de chaque boucle par rapport à l'autre.

Inconvénients:

- ✓ coût élevé.
- ✓ difficulté d'étude et de calculs.

3.4 Régulation en cascade

Un système de régulation en cascade comporte un régulateur individuel pour chacune des variables contrôlées. La variable asservie principale (vitesse) est réglée par la boucle extérieure. La sortie du régulateur de vitesse sert d'entrée, c.à.d. de signal de référence, au régulateur de la boucle intérieure (courant). En limitant la sortie du régulateur externe de vitesse, on limite donc la référence de courant et on obtient très simplement la caractéristique de limitation désirée.

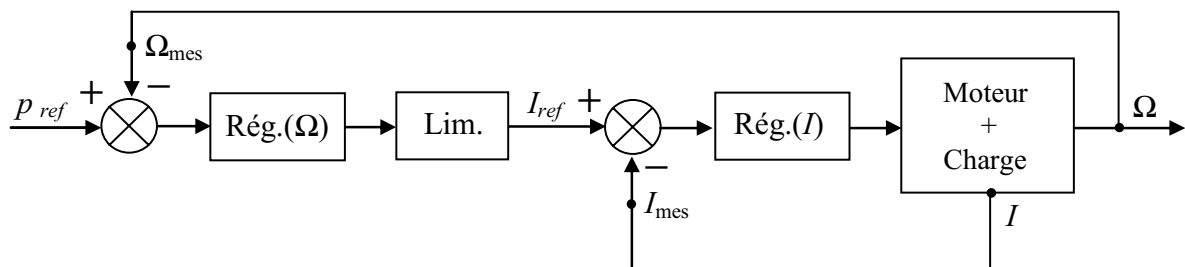


Fig. I.27 Schéma fonctionnel de la régulation en cascade

Avantages :

- ✓ il y'a un régulateur séparé pour chacune des variables contrôlées. Chaque boucle peut donc être ajustée à l'optimum ;
- ✓ l'étude, le calcul et la mise en œuvre sont simples et suivent une méthode directe.

Inconvénients :

- ✓ On peut avoir une réponse assez lente de la boucle la plus externe si elle enveloppe trop de boucles internes, car la séparation dynamique des boucles exige un rapport minimal de 2 entre les rapidités des 2 boucles les plus adjacentes.

3.5 Modèle du moteur à courant continu à flux constant

La modélisation est la description mathématique d'un processus technique (notre système à régler). Il s'agit d'une étape très importante de l'étude préliminaire, cela consiste à établir les relations entre les grandeurs d'entrée et de sortie. Dans le cas du moteur à courant continu, l'établissement du modèle passe par l'écriture des équations électriques de l'induit et l'équation du mouvement. Cela permet de représenter les différentes parties du système par des fonctions de transfert.

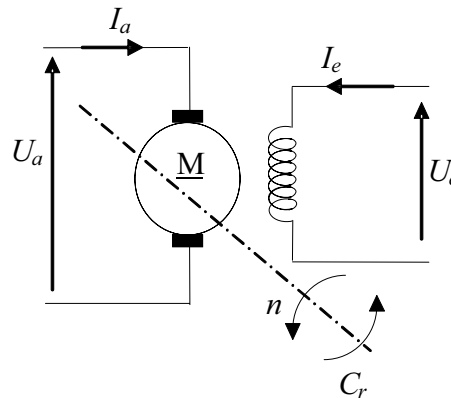


Fig. I.28 Schéma électrique équivalent du moteur à courant continu à flux constant

Modèle du moteur + charge :

- Equation électrique de l'induit :

$$u_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E' \tag{I. 48}$$

$$\text{Avec : } E' = k' \Omega \tag{I. 49}$$

- Equation du mouvement :

$$\sum C = j \frac{d\Omega}{dt} \tag{I. 50}$$

$$C_m - C_r = j \frac{d\Omega}{dt} \tag{I. 51}$$

Avec :

$$C_m = k' I_a \tag{I. 52}$$

$$C_r = C_{sec} + C_f \quad (I.53)$$

$$\text{Et : } C_f = f \cdot \Omega \quad (I.54)$$

f : coefficient de frottement visqueux

C_{sec} : couple sec (indépendant de la vitesse)

- Passage aux transformées de LAPLACE :

Par application de la transformée de LAPLACE aux équations précédentes, on obtient :

$$U_a = R_a I_a + L_a \cdot s \cdot I_a + E' \quad (I.55)$$

$$U_a - E' = (R_a + L_a \cdot s) I_a \rightarrow I_a = \frac{1}{R_a + L_a \cdot s} (U_a - E') \quad (I.56)$$

$$C_m - C_{sec} = (j \cdot s + f) \Omega \rightarrow \Omega = \frac{1}{j \cdot s + f} (C_m - C_{sec}) \quad (I.57)$$

- Schéma fonctionnel :

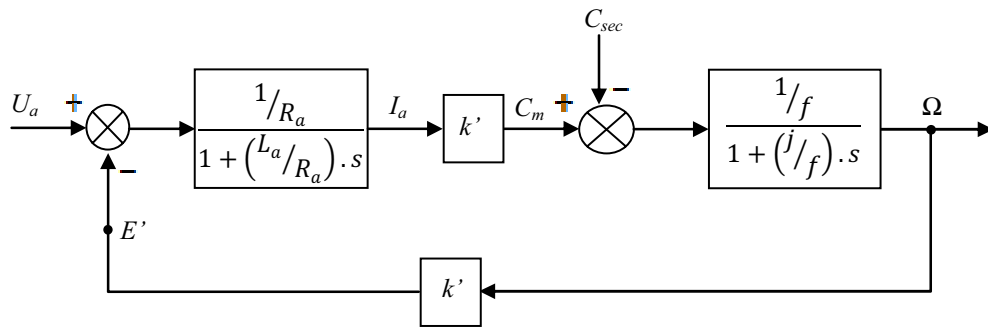


Fig. I.29 Schéma fonctionnel du moteur à courant continu

$L_a/R_a = T_e$ Constante de temps électrique du moteur

$\frac{j}{f} = T_m$ Constante de temps mécanique

3.6 Identification de la machine à courant continu

Elle consiste en la détermination des paramètres du modèle établi ci-avant; à savoir :

- Résistance d'induit R_a ;
- Inductance d'induit L_a ;
- Coefficient de la f.c.e.m. et du couple k' ;
- Coefficient de frottement f ;
- Moment d'inertie j .

3.6.1 Détermination de la résistance de l'induit

La résistance R_a est déterminée par un essai en courant continu (moteur à l'arrêt) selon le schéma de la figure I.30 montré ci-après :

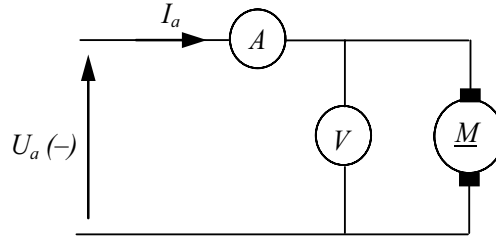


Fig. I.30 Montage pour la détermination de R_a

On calcule R_a par la relation :

$$R_a = \frac{U_a}{I_a} \quad (I.58)$$

3.6.2 Détermination de l'inductance de l'induit

Essai en courant alternatif (f suffisamment grande pour rendre l'effet inductif prépondérant par rapport à l'effet résistif de la bobine d'induit; $f \approx 1 \text{ kHz}$)

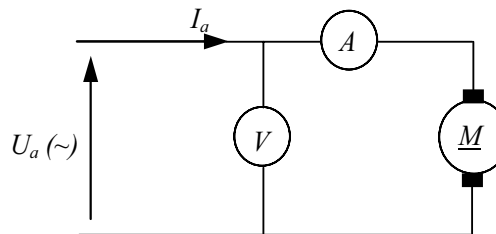


Fig. I.31 Montage pour la détermination de L_a

L'inductance L_a est calculée comme suit :

$$L_a = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\left(\frac{U_a}{I_a}\right)^2 - R_a^2} \quad (I.59)$$

3.6.3 Détermination du coefficient k' (constante de la f.c.e.m. et du couple)

k' est donné par la relation :

$$k' = \frac{E'}{\Omega} = \frac{U_a - R_a \cdot I_a}{\Omega} \quad (I.60)$$

Essai: à excitation constante et par action sur la tension U_a , on fait varier la vitesse et on relève le courant I_a absorbé par l'induit du moteur.

Excitation constante	$U_a(V)$	$I_a(A)$	$\Omega(rd/s)$	$E'=U_a-R_a I_a$	$k'=E'/\Omega$
	U_n				
	$0.9U_n$				
	$0.8U_n$				
	⋮				

3.6.4 Détermination du coefficient de frottement (f)

Le coefficient de frottement est donné par la relation :

$$f = \frac{p_{mec}}{\Omega^2} \tag{I.61}$$

p_{mec} étant les pertes mécaniques.

Essai : On réalise un essai à vide à $\Omega = \Omega_n$ et U_a décroissante à partir de U_n , et on relève la puissance consommée par le moteur.

U_v	U_n	$0.9U_n$	$0.8U_n$
I_v				
$P_v=U_v I_v$				
U_v^2				

On trace $P_v = f(U_v^2)$

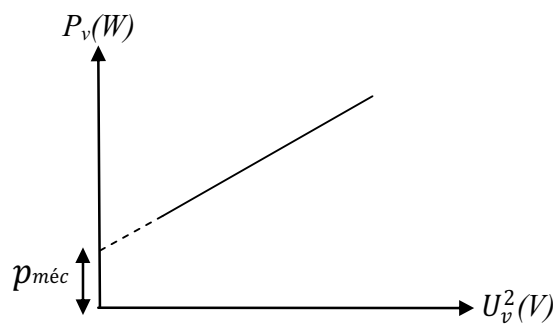


Fig. I.32 Détermination des pertes mécaniques

3.6.5 Détermination du moment d'inertie (j)

Essai de ralentissement :

Après avoir entraîné le moteur, à vide, à sa vitesse nominale, on coupe l'alimentation de l'induit. On provoque, ainsi, la décélération du moteur jusqu'à l'arrêt (Fig. I.33).

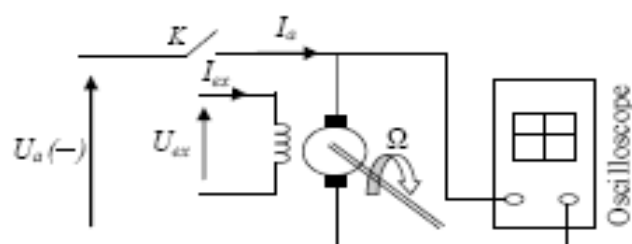


Fig. I.33 Montage pour essai de ralentissement

Nous avons les équations de fonctionnement suivantes :

$$j \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_r ; \quad (\text{à } t = 0; \Omega = \Omega_{rn}) \quad (1.62)$$

Où :

$$\begin{cases} C_m = 0 \\ C_r = f \cdot \Omega \end{cases} \quad (1.63)$$

Donc :

$$-f \cdot \Omega_r = j \frac{d\Omega_r}{dt} \Rightarrow \frac{d\Omega_r}{\Omega_r} = -\frac{f}{j} dt \quad (1.64)$$

La solution de cette équation est donnée par :

$$\Omega_r = \Omega_{rn} \cdot e^{-\frac{f}{j}t} \quad (1.65)$$

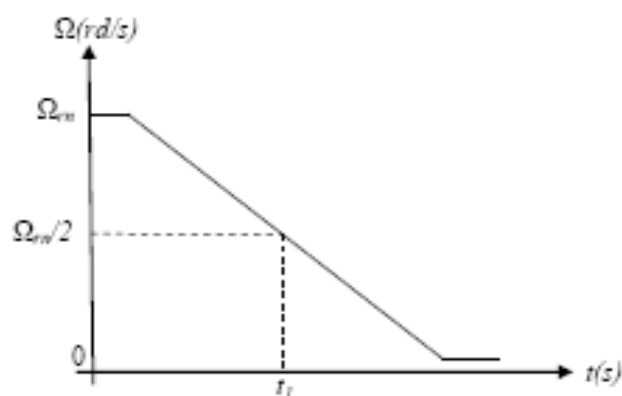


Fig. I.34 Courbe de vitesse lors de l'essai de ralentissement

On relève la courbe $\Omega_r = f(t)$ sur oscilloscope à mémoire ;

À $t = t_1$:

$$\Omega_r = \frac{\Omega_{rn}}{2} \quad (1.66)$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\frac{f}{j}t_1} \Rightarrow -\ln 2 = -\frac{f}{j} \cdot t_1 \quad (1.67)$$

Ce qui donne :

$$\Rightarrow j = \frac{f \cdot t_1}{\ln 2}$$

Exercice : Problème sur la commande des MCC

Un MCC à excitation indépendante constante, est parfaitement compensé, la force électromotrice est proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation, $E=k\Omega$ avec $k= 1.26\text{Vsrad}^{-1}$. Le couple de pertes, de moment T_p est constant ($T_p=1.5\text{Nm}$). Le moteur entraîne une charge nominale, le couple résistant dont le moment est noté T_r est égal à 17.4Nm . Le moment d'inertie de l'ensemble des parties tournantes est $J=0.20\text{kgm}^2$. L'induit a une résistance $R=1.5\Omega$, son inductance est négligeable. Une bobine de lissage, d'inductance L , non saturable, est placée en série avec l'induit du moteur. Sa résistance est négligeable et son inductance $L=20\text{mH}$. Une dynamo tachymétrique placée sur l'arbre délivre une tension proportionnelle à la vitesse angulaire : $u_t=k_T\Omega$ avec $k_T=0.255\text{Vsrad}^{-1}$.

I. Etude du hacheur série

Le moteur est alimenté par un hacheur série (Fig. 1), lui-même alimenté par une tension continue $V= 320\text{V}$. Le transistor Tr , supposé parfait, fonctionne en commutation (Fig. 2) :

- $V_{be} > 0$ Tr saturé, $i_s > 0$, $V_{ce} = 0$.
- $V_{be} < 0$ Tr bloqué, $i_s = 0$.

Les durées de commutation sont négligeables. La période du hacheur est $T=0.50$ ms. Le rapport cyclique est $\alpha=t_1/T$. La diode est supposée parfaite.

L'étude se fait dans le cas du régime permanent et de la conduction ininterrompue.

I.1 Etablir, avec toutes les justifications nécessaires, l'expression de U_{moy} en fonction de E , R et I_{moy} . (U_{moy} et I_{moy} sont les valeurs moyennes de $u(t)$ et $i(t)$).

I.2 Pour $\alpha=0.4$, représenter graphiquement $u(t)$. Déterminer la valeur de U_{moy} en fonction de V et α .

I.3 Le rapport cyclique est $\alpha=0.4$. Calculer la F.e.m E et la vitesse N du moteur à vide puis en charge nominale (N en tours par minute).

I.4 Etude du courant $i(t)$:

On néglige la résistance R du moteur.

I.4.1 Etablir les équations différentielles vérifiées par $i(t)$ pendant chaque phase de fonctionnement du hacheur.

I.4.2 On déduire les expressions de $i(t)$ pendant chaque phase. On notera I_{min} et I_{max} les valeurs minimales et maximales de l'intensité du courant.

I.4.3 Le moteur fonctionne à vide, avec $\alpha=0.4$. Calculer :

- La valeur moyenne I_{moy} de $i(t)$.
- L'ondulation du courant $\delta I = I_{max} - I_{min}$.
- Les valeurs extrêmes I_{max} et I_{min} de $i(t)$.
- Donner l'allure de $i(t)$ en précisant les valeurs numériques.

II. Etude en boucle ouverte

L'induit du moteur est alimenté par une tension continue comme l'indique le schéma de la

Fig.03. L'amplificateur de puissance vérifie : $A = \frac{u}{u_{ec}} = 19.8$.

1. Etablir la relation liant les grandeurs électriques : u_e , u_1 , i , E , R et A .
2. Etablir l'équation différentielle vérifiée par $\Omega(t)$ en fonction de J , T_r , T_p et T_e .

PARTIE I

3. Rappeler la relation entre T_e et i . Etablir l'équation différentielle du premier ordre vérifiée par $\Omega(t)$ en fonction de J , T_r , T_p , R , u_e , u_1 , k et A .
4. Pour quelle valeur u_{10} de u_1 peut-elle se mettre sous la forme simplifiée suivante :

$$\Omega + \frac{JR}{k^2} \frac{d\Omega}{dt} = A \frac{u_e}{k}.$$

Dans la suite de problème, on suppose que u_1 a précisément cette valeur u_{10} .

5. Exprimer la constante du temps de système et calculer sa valeur numérique.
6. En utilisant la transformation de Laplace, la fonction de transfert du système moteur-charge est $F(p) = \frac{\Omega(p)}{u_e(p)}$. Avec à l'instant $t=0$ on a $\Omega(0)=0$. Montrer que $F(p)$ peut se mettre

sous la forme $F(p) = \frac{F_0}{1+ap} = \frac{15.7}{1+0.189p}$.

III. Etude en boucle fermée

Le montage est maintenant celui du schéma de Fig.4. Il peut être représenté par le diagramme fonctionnel donné par la Fig.5.

1. Montrer que l'expression littérale de $F_b(p)$, fonction de transfert du système bouclé, peut se mettre sous la forme :

$$F_b(p) = \frac{\Omega(p)}{U_e(p)} = \frac{F_{bo}}{1+bp}$$

2. Donner les valeurs numériques de F_b0 et B . Comparer les constantes du temps du système bouclé et du système en boucle ouverte.

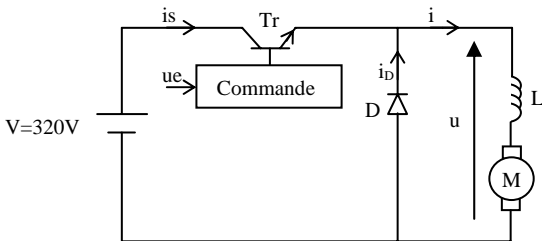


Figure 1

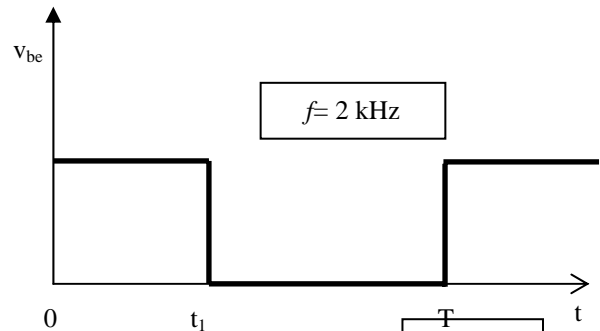


Figure 2

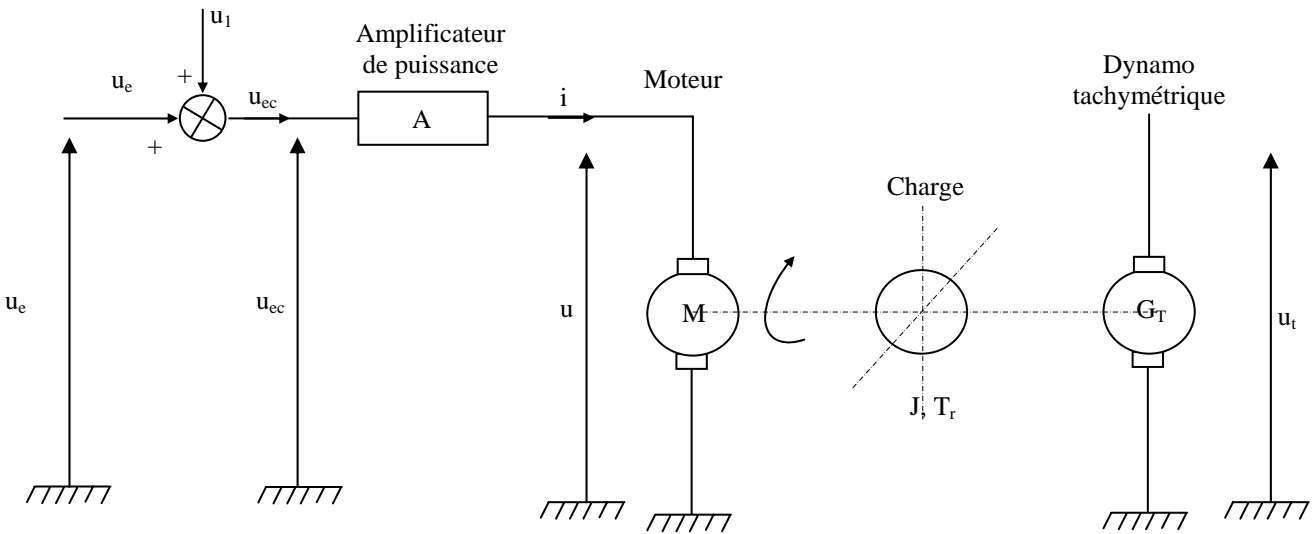


Figure 03

PARTIE I

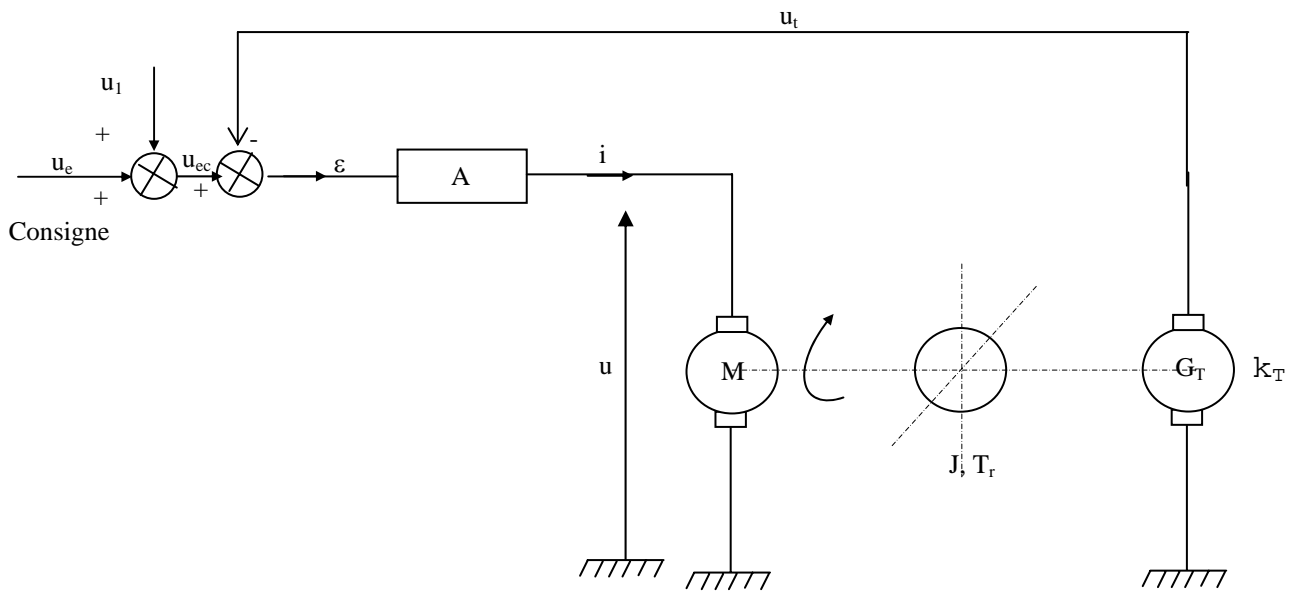


Figure 04

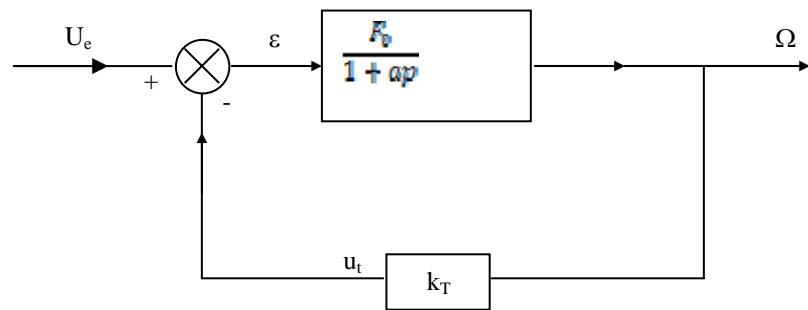


Figure 5