

Chapitre I : Notions de Bases – MCC et leurs Commandes

1^{ère} partie

I. Généralités sur la MCC à excitation indépendante

1. Introduction

La machine à courant continu est relativement simple à modéliser dans le cas où le flux agissant sur l'induit est constant (machine à flux constant).

Ce chapitre est consacré à la présentation de la machine à excitation indépendante, ses caractéristiques statiques et dynamiques, principe de réglage de la vitesse et la commande du couple et la vitesse. Dans de nombreux cas, et selon le type de machine, le réglage de la vitesse fait appel à des convertisseurs de puissance réversibles (hacheurs, redresseurs à thyristors, onduleurs...).

2. Constitution

D'une manière générale, la machine à courant continu se compose :

D'un d'un **stator** comportant, soit un bobinage inducteur « d'excitation » parcouru par un courant continu, soit un aimant permanent ;

d'un d'un **rotor induit**. Selon les machines, les lignes de champ magnétique dans l'entrefer sont à champ **radial** ou **axial**.

La machine à champ radial est la plus utilisée car il permet une plus grande puissance massique.

En pratique, le champ magnétique dans l'entrefer ne dépasse guère **1,5T**, sinon le circuit « Fer » du moteur est trop saturé.

D'un collecteur qui est un ensemble de lames reliées sur lesquelles sont soudés deux faisceaux de conducteurs d'induit. C'est une pièce très fragile, qui impose des contraintes dans l'utilisation des machines. Il permet :

- L'alimentation de ces bobinages à partir d'une source appartenant forcément au référentiel; du laboratoire, dans le cas d'un moteur.
- Le lien entre les f.é.m. induites dans le rotor et la charge électrique extérieure dans le cas d'une génératrice.

Remarque : Dans le cas du moteur à courant continu, la commutation est réalisée mécaniquement par le collecteur.

3. Expression de la f.é.m.

On désigne par Φ le flux magnétique créé par chaque pôle du stator. La f.é.m induite au rotor, recueillie entre balais, est proportionnelle au flux par pôle et à la vitesse angulaire de rotation. Il s'agit d'une variante de la loi de Lenz.

$$E = k \cdot \Phi \cdot \Omega$$

La constante de proportionnalité k ne dépend que du nombre N de conducteurs au rotor, du mode de bobinage (a nombre de paires de voies d'enroulement) et du nombre p de paires de pôles.

$$k = \frac{p N}{a 2\pi}$$

Dans le cas où le flux Φ est créé par un bobinage inducteur, plusieurs possibilités de branchement existent :

- Le bobinage inducteur est alimenté par un courant continu indépendant. la machine est dite à excitation séparée. **Le flux Φ est constant.**
- Le bobinage inducteur est alimenté par un courant continu égal ou proportionnel au courant passant dans le bobinage induit. La machine est dite à excitation série. **Le flux Φ est variable.**

Plus la puissance nominale de la machine est élevée, plus le nombre de pôles est grand pour mieux répondre aux contraintes et technologies de bobinage.

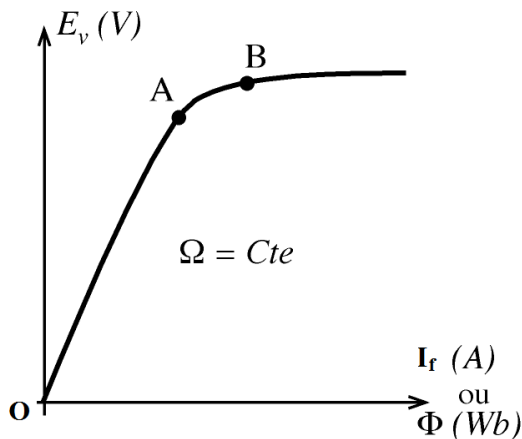
Le rotor est toujours « feuilleté » pour réduire les pertes par courants de Foucault. Le choix des tôles du rotor doit être tel que les pertes par hystérésis soient les plus faibles possible.

4. Caractéristique d'une f.é.m. d'une machine à courant continu

On entraîne la machine en génératrice à vide. Dans le cas d'une machine comportant un circuit inducteur, parcouru par le courant d'excitation I_f , on trace la caractéristique à vide à vitesse constante (nominale).

Pour un courant d'excitation I_f nul, la f.é.m. est égale à E , f.é.m. rémanente.

Le tracé de cette caractéristique suppose que les relevés sont effectués à I_f (croissant et décroissant).



1/ de O à A, la caractéristique est linéaire.

2/ de A à B coude de saturation.

3/ après B la saturation.

Sous le point A, la machine est sous utilisée, et après le point B les possibilités de la machine n'augmentent plus (mais les pertes augmentent puisque I_f augmente)

La zone utile de fonctionnement de la machine se situe au voisinage du point A.

Figure(1) : F.é.m. à vide à vitesse constante d'une machine à courant continu

5. Réversibilité

La machine à courant continu (à flux Φ constant) est a priori réversible, si les conditions de transfert de la puissance sont réunies.

On assimile, en régime établi, la machine à un dipôle électrique de f.é.m. E et de résistance interne R_a ; on a en convention récepteur :

$$U_M = E + R_a \cdot I_a$$

ce qui donne en puissance absorbée :

$$P_M = U_M \cdot I_a = E \cdot I_a + R_a \cdot I_a^2$$

Avec la convention générateur, on a la puissance fournie :

$$P_G = U_G \cdot I_a = E \cdot I_a - R_a \cdot I_a^2$$

On retrouve en commun pour ces deux états de fonctionnement la puissance électromagnétique.

$$P_e = E \cdot I_a = k \cdot \Phi \cdot \Omega$$

Cette puissance est aussi celle qui donne le moment du couple électromagnétique C_e .

$$P_e = k \cdot \Phi \cdot \Omega \cdot I_a = C_e \cdot \Omega$$

Soit encor :

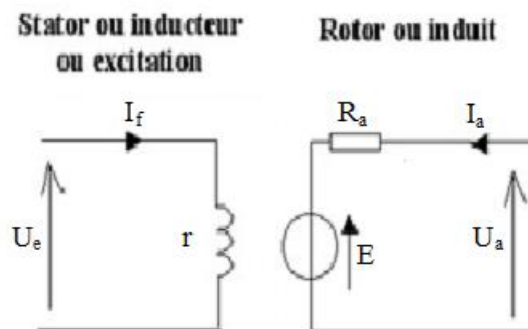
$$C_e = k \cdot \Phi \cdot I_a$$

Ce : est moteur ou résistant selon que la machine fonctionne en moteur ou en génératrice.

6. Couplage

Il est possible de coupler de plusieurs manières les bobinages inducteurs et les bobinages induits, le fonctionnement dépendant de l'état moteur ou «génératrice». L'ensemble des branchements possibles est indiqué dans le tableau ci-dessous.

Nombre de bobinages inducteurs	Câblage Inducteur/ induit	Nombre de sources extérieures	Type de charge électrique ou mécanique	Machine
1	indépendant	2	mécanique	Moteur à excitation séparée
1	indépendant	1	réseau électrique ou Résistance	Génératrice à excitation séparée
1	en parallèle	1	mécanique	Moteur à excitation shunt
1	en parallèle	0 (auto excitation)	réseau électrique ou Résistance	Génératrice à excitation shunt
1	En série	1	mécanique	Moteur à excitation série
1	En série	0 (auto excitation)	Résistance seulement	Génératrice à excitation série
2	Excitation composée	2	mécanique	Moteur à excitation composée
2	Excitation composée	1	réseau électrique ou Résistance	Génératrice à excitation composée



En pratique : $r \gg R_a$, En charge : $I_a \gg I_f$

Figure(2) : MCC à excitation indépendante (séparée)

7. Equations du moteur à flux constant en régime établi

En régime établi, le courant et la vitesse sont constants en fonction du temps.

On désigne respectivement par U_a et R_a , tension et la résistance de l'induit.

On considère les pertes par hystérésis P_H et de frottement solide P_s (frottement sec essentiellement dû au contact balai-collecteur et à l'arbre sur les paliers). Ces pertes sont proportionnelles à la vitesse. On introduit un couple total de pertes C_p tel que :

$$P_H + P_s = C_p \cdot \Omega$$

Remarque : P_H donc C_P varient avec le flux.

Les pertes P_F par courant de Foucault et les pertes mécaniques P_v de ventilation (frottement fluide) sont proportionnelles au carré de la vitesse. On introduit f le coefficient frottement visqueux total équivalent tel que :

$$P_f + P_v = f \cdot \Omega^2$$

Remarque : P_F donc f varient avec le flux.

Le couple équivalent de frottement total dû aux pertes autres que l'effet Joule est alors:

$$C = C_p + f \cdot \Omega$$

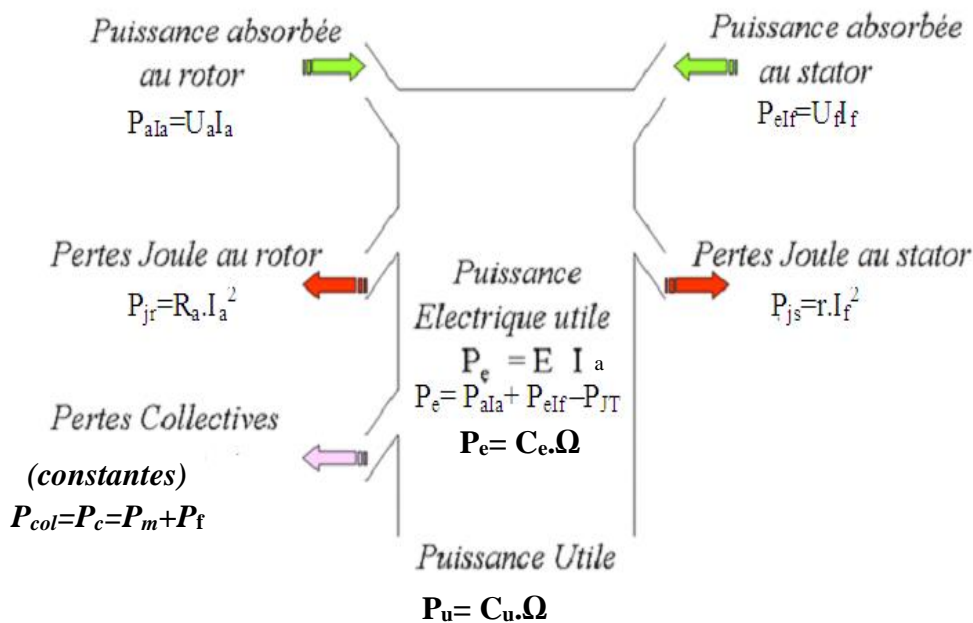


Figure (3) : arbre de puissance pour une MCC (mode moteur)

On désigne par C_r , le couple résistant du moteur, ou ce qui revient au même, en régime stationnaire, le couple utile C_u . Les équations du moteur à courant continu à flux constant, et en régime permanent, sont alors :

$$U_a = R_a \cdot I_a + k \cdot \Phi \cdot \Omega \quad (1)$$

$$C_e = k \cdot \Phi \cdot I_a = C_p + f \cdot \Omega + C_r \quad (2)$$

On remarque que la constante $k\Phi$ intervient à la fois dans l'expression de la **f.é.m.** et dans celle du couple électromagnétique C_e .

Ces équations donnent les caractéristiques du moteur en régime permanent.

Comme la machine à flux constant est réversible, on peut considérer que les grandeurs sont algébriques, sauf les pertes. On obtient à partir des équations (1) et (2), en éliminant la vitesse :

$$I_a \left(k\Phi + \frac{fR_a}{k\Phi} \right) = C_p + f \left(\frac{U_a}{k\Phi} \right) + C_r$$

La relation entre le courant d'induit I_a et le couple résistant C_r , est linéaire.

Mais à couple résistant nul, le courant sera non nul car il faut créer un couple électromagnétique qui corresponde aux pertes Fer et mécaniques du moteur.

En pratique, le terme de frottement visqueux est très faible (de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} N.m.s/rad). Il est possible alors de simplifier l'expression précédente.

On obtient alors :

$$k \cdot \Phi \cdot I_a \approx C_p + C_r$$

Selon que la machine fonctionne en moteur ou en génératrice, les effets du couple C_p s'additionnent ou se soustraient de ceux du couple C_r . Ceci est mis en évidence dans la caractéristique « Quatre quadrants » de la machine à courant continu (**figure 4**). Le fonctionnement à courant constant correspond en pratique au cas où le moteur est asservi avec une limitation de courant.

Étudions la caractéristique de la vitesse, $\Omega = g(C_r)$ avec $U_a = \text{cte}$.

A partir des équations (1) et (2), par élimination du courant. On trouve :

$$\Omega \left(k\Phi + \frac{Ra \cdot f}{k\Phi} \right) = U_a - Ra \cdot \left(\frac{C_p + C_r}{k\Phi} \right)$$

La figure 3 présente l'allure des courbes (pour plusieurs valeurs de la tension d'induit):

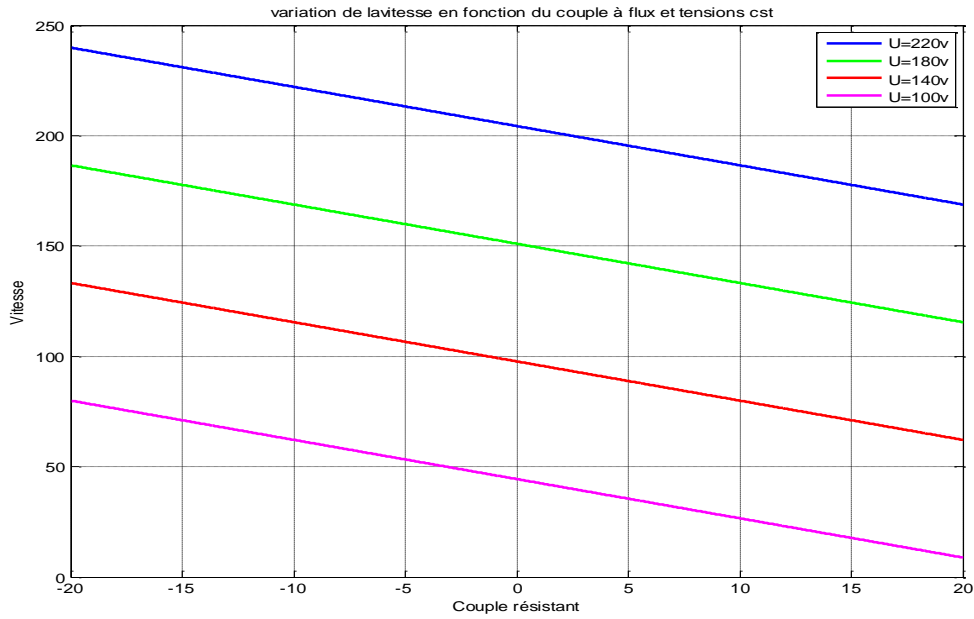


Figure (4) : Caractéristique vitesse - couple d'une machine à courant continu pour une vitesse Ω positive

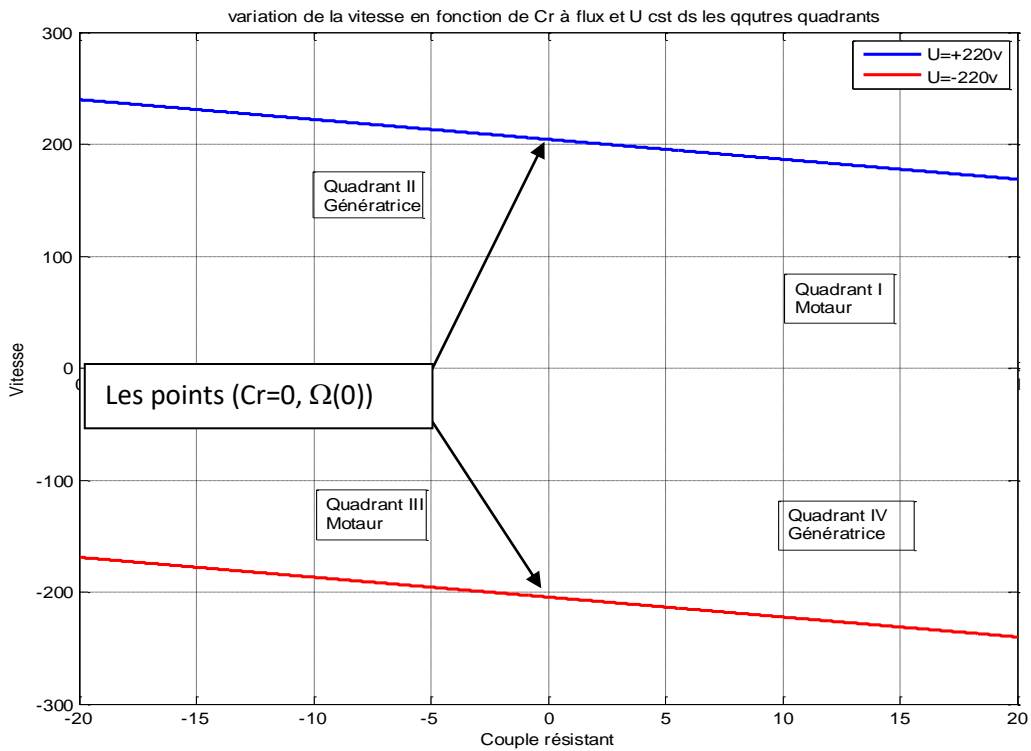


Figure (5) : Caractéristique vitesse - couple d'une machine à courant continu dans les quatre quadrants

Si le terme de frottement visqueux est très faible, il sera possible de simplifier l'expression précédente. On obtient alors les caractéristiques à tension d'induit constante positive pour les vitesses positives, ($C_p > 0$) :

$$\Omega(Cr) = \frac{U_a}{k\Phi} - \frac{Ra}{(k\Phi)^2} (C_p + Cr), \text{ quadrant I et II}$$

C'est une droite passant par le point de « marche à vide » $Cr=0$ et $\Omega(0)$ tel que :

$$\Omega(0) = \frac{U_a}{k\Phi} - \frac{Ra}{(k\Phi)^2} C_p$$

Ces caractéristiques montrent la réversibilité de la machine à courant continu.

On obtient les caractéristiques à tension d'induit constante négative pour les vitesses négatives, en négligeant le frottement visqueux :

$$\Omega(Cr) = \frac{U_a}{k\Phi} - \frac{Ra}{(k\Phi)^2} (C_p + Cr), \text{ quadrant III et IV}$$

7.1. Réglage de la vitesse

Considérons l'équation suivante :

$$\Omega = \frac{U_a}{k\Phi} - \frac{Ra}{(k\Phi)^2} (C_p + Cr) \quad \text{et} \quad C_e = k \cdot \Phi \cdot I_a \approx C_p + C_r$$

$$\text{il vient :} \quad \Omega = \frac{U_a}{k\Phi} - \frac{Ra}{(k\Phi)^2} (k\Phi I_a) = \frac{U_a - R_a I_a}{k\Phi} \quad (3)$$

L'équation (3) montre que la vitesse varie :

Linéairement en fonction de U_a à flux constant.

Presque linéairement en fonction de l'inverse du flux $\frac{1}{k\Phi}$ à U_a fixée (par exemple la tension nominale). L'augmentation de la vitesse est obtenue en réduisant le courant d'excitation passant dans le bobinage inducteur.

7.2. Caractéristique $\Omega(I_f)$ à U_a constante :

La charge augmente \Rightarrow le courant I_a augmente

En pratique $R_a I_a \ll U_a$ d'où $\Omega = \frac{U_a}{k\Phi}$ et le flux $\Phi \propto I_f$ (courant d'excitation), donc $\Omega \propto 1/I_f$.

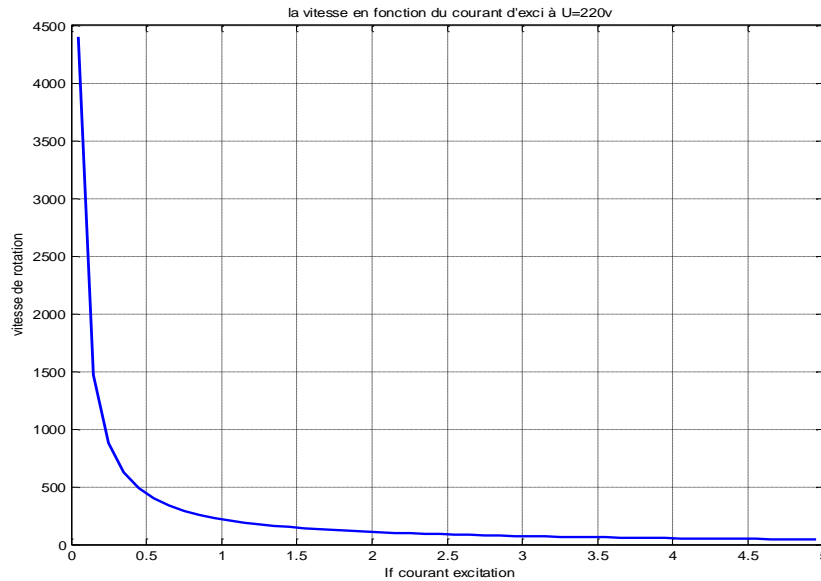


Figure (6) : Caractéristique $\Omega(I_f)$ à $U_a = 220$ v constante

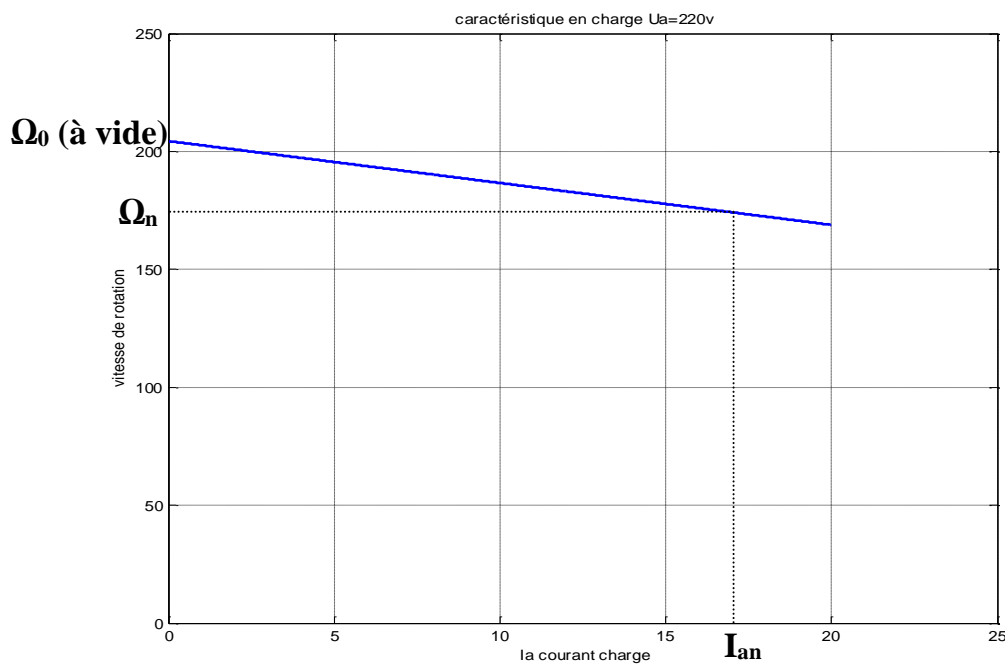
Remarque : Si on coupe accidentellement le courant d'excitation ($I_f = 0$), la vitesse augmente très rapidement : le moteur s'emballe.

En marche il ne faut jamais couper l'excitation d'un moteur à excitation indépendante.

7.3. Caractéristique $\Omega(I_a)$ en charge

à U_a constante et I_f constant (Φ constant)

Charge augmente \Rightarrow courant d'induit I_a augmente et la vitesse de rotation Ω diminue.



Figure(7) : caractéristique en charge à U_a et I_f constants.

La vitesse de rotation varie peu avec la charge

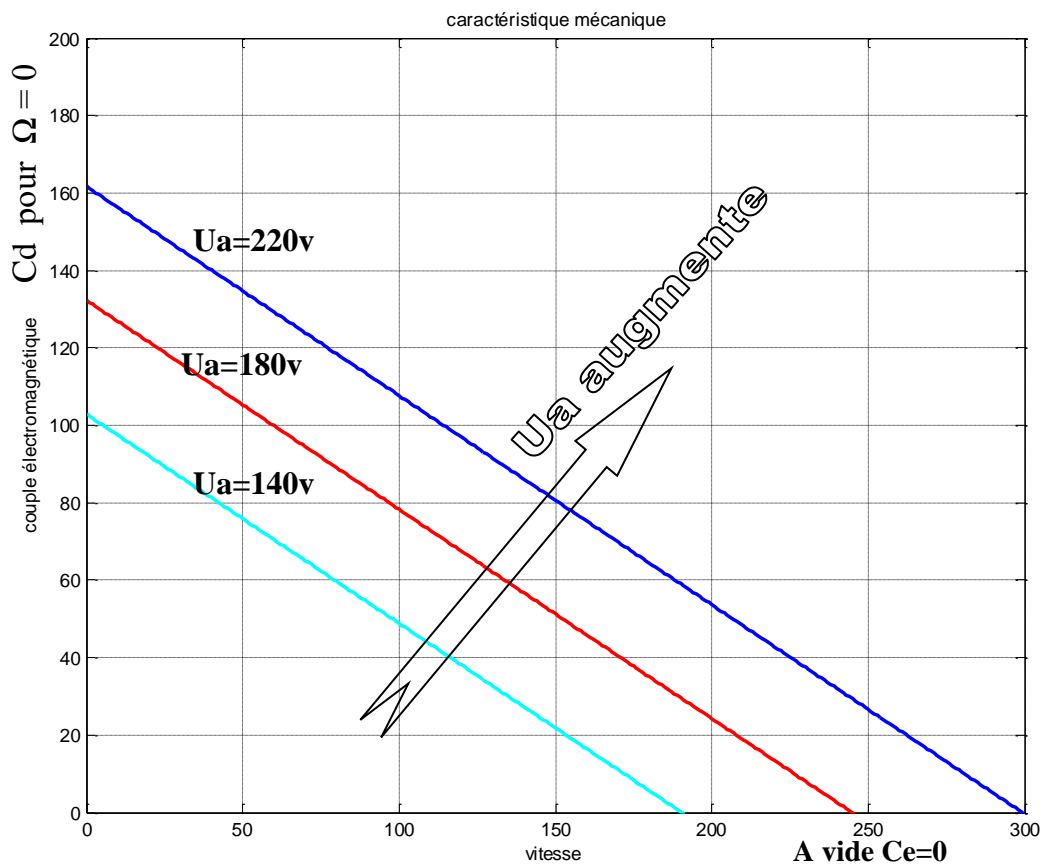
7.4. Caractéristique mécanique $C_e(\Omega)$ à U_a constante et I_f constant

De l'équation (3) on a :

$$\Omega = \frac{U_a}{k\Phi} - \frac{R_a}{(k\Phi)^2} C_e$$

A excitation constante : $\Omega \propto U$

En faisant varier U , on travaille sur une large plage de vitesse de rotation.



Figure(7) : caractéristique mécanique $C_e(\Omega)$ à U_a et I_f constants.

* A vide le couple électromagnétique est nul ($C_e=0$), le courant est nul ($I_a=0$), la vitesse

c'est donnée par ; $\Omega = \frac{U_a}{k\Phi}$.

* Au démarrage, la vitesse de rotation est nulle ($\Omega=0$), la fem aussi ($E=0$). L'intensité I_d (courant de démarrage) est importante et peut causer des problèmes.

Donc la solution réside dans la manière d'alimenter le moteur à courant continu.

8. Couple de charge ou résistant

Pour animer une mécanique en rotation, il faut que le couple généré par le moteur C_m soit supérieur ou égal au couple que lui oppose la machine C_r . Il est donc nécessaire de connaître l'évolution du couple résistant en fonction de la vitesse de la machine.

Essentiellement il existe quatre familles du couple résistant, figure (8).

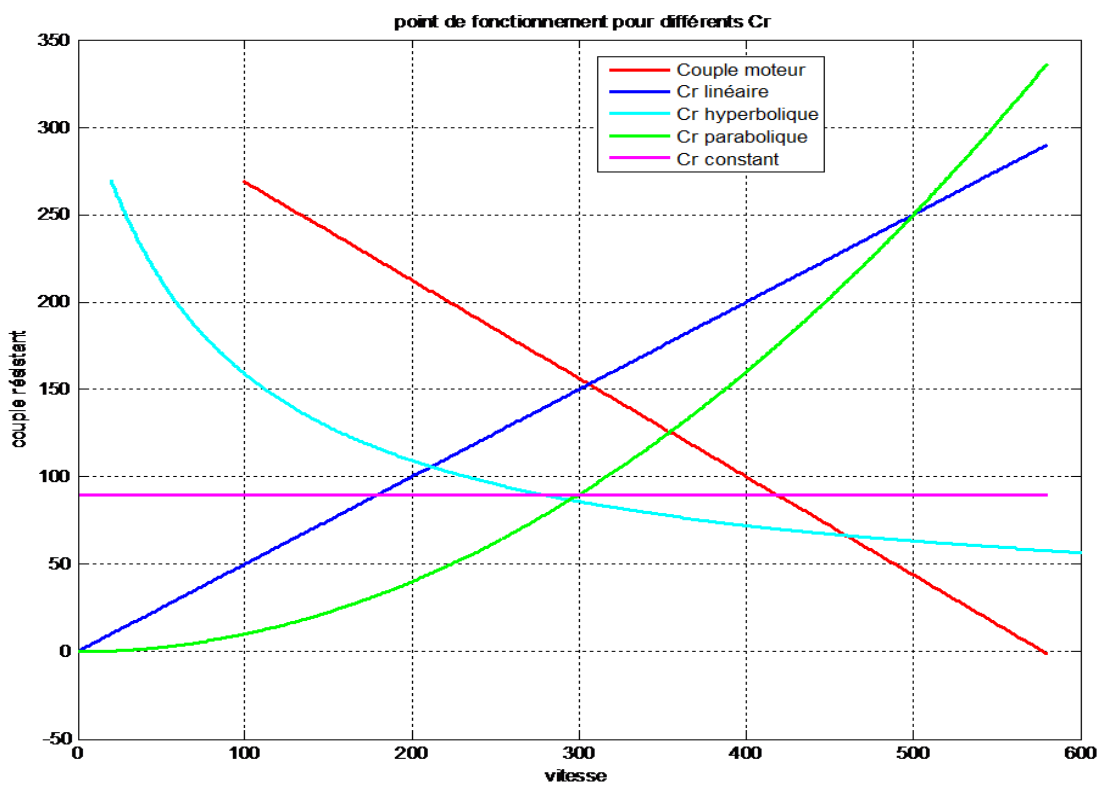


Figure (8) : points de fonctionnement pour différentes charges.

9. Couple à fournir par le moteur

Si on considère le mouvement suivant, il est caractérisé par deux régimes de fonctionnement.

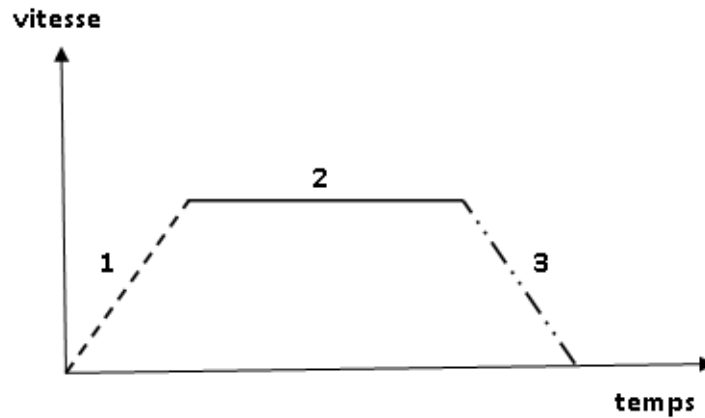
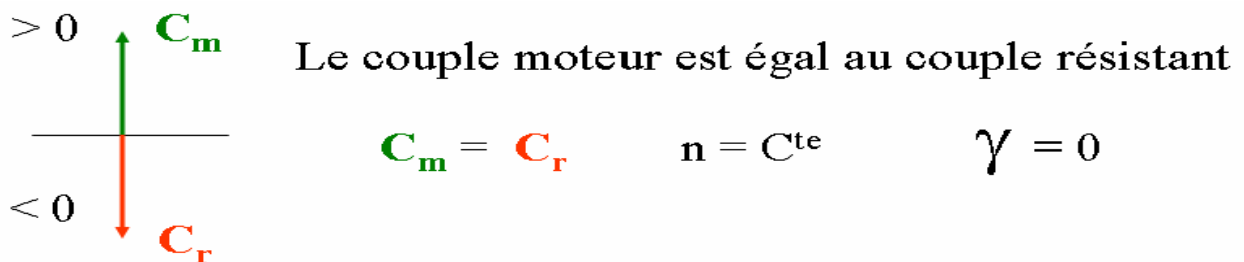


Figure (8) : phases des couples

a) **Le régime établi**

Le régime est établi lorsque la vitesse est constante, partie (2) de la figure(8).

Il y a équilibre dynamique correspondant à l'égalité entre le couple moteur et le couple résistant.



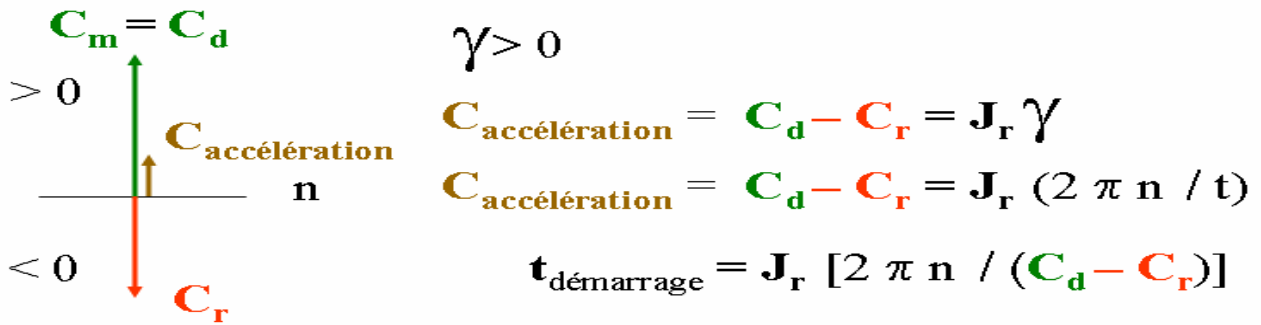
b) **Le régime transitoire**

***/ Accélération (démarrage)**

Lors de la phase de montée en vitesse on a une accélération positive, partie (1) de la figure(8).

Il faut démarrer en un temps imposé donc développer un couple d'accélération positif.

Le couple accélérateur C_a et le couple résistant C_r déterminent le couple moteur nécessaire au démarrage.

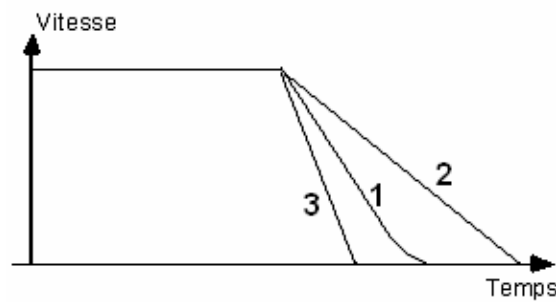


****/ Décélération (arrêt)**

Lors de la phase de ralentissement on a une accélération négative, partie (3) de la figure (8).

Trois cas peuvent se présenter:

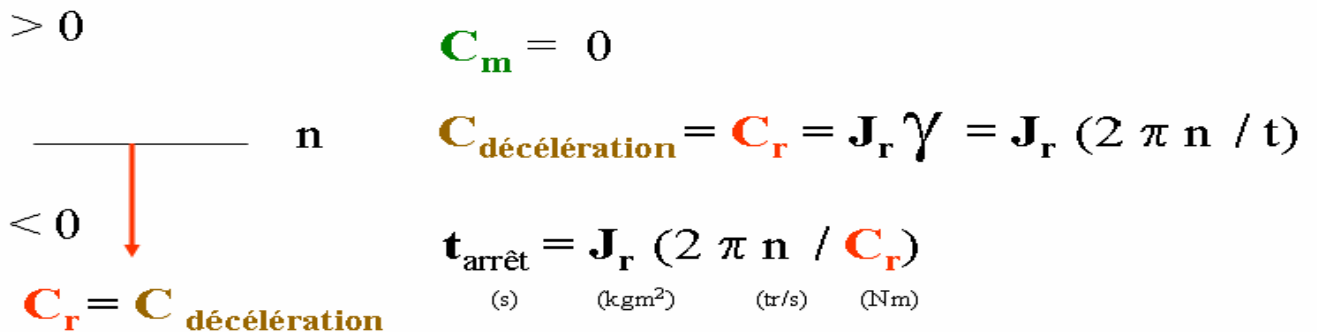
- 1 - la décélération est naturelle,
- 2 - la décélération est très lente. Ralentissement.
- 3 - la décélération est très rapide. Freinage.



Figure(9) : phases de freinages

1) décélération naturelle

La machine est laissée à elle même, on coupe la tension du moteur d'entraînement qui développe donc un couple nul, seul intervient le couple résistant.



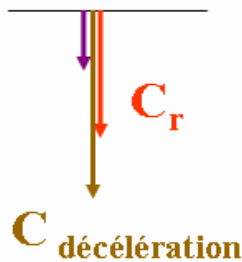
2) freinage

Si le temps de décélération doit être plus petit que le temps "naturel", il faut rajouter au couple résistant développé par la machine un couple de freinage.

Diverses possibilités permettent d'obtenir un couple de freinage:

- freinage par un élément extérieur (frein mécanique)
- freinage électrique (contre courant / injection de CC)
- freinage par récupération d'énergie (cas d'une charge entraînée)

> 0



$$C_{\text{décélération}} = C_r + C_F = J_r \gamma = J_r (2 \pi n / t)$$

$$t_{\text{arrêt}} = J_r [2 \pi n / (C_r + C_F)]$$

(s) (kgm²) (tr/s) (Nm) (Nm)

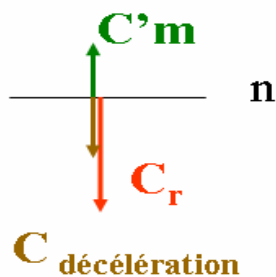
3) Ralentissement

Si le temps de décélération doit être supérieur au temps "naturel" le moteur doit développer un couple moteur pour éviter un arrêt prématuré.

Le moteur développe toujours un couple moteur mais plus faible que le couple résistant.

$$C'_m < C_r$$

> 0



$$C_{\text{décélération}} = C'_m - C_r = J_r \gamma = J_r (2 \pi n / t)$$

$$t_{\text{arrêt}} = J_r [2 \pi n / (C'_m - C_r)]$$

(s) (kgm²) (tr/s) (Nm) (Nm)

10. Les quadrants de fonctionnement

Quel que soit le moteur alternatif ou continu associé à un variateur, il peut fournir suivant les cas, un couple moteur et un couple de freinage dans les deux sens possibles de marche. Ces quatre types de fonctionnement ou de services peuvent être représentés par un système de coordonnées; les plages ainsi délimitées appelées quadrant sont comptées en sens inverse des aiguilles d'une montre et désignées par les chiffres romains I à IV.

D'après le sens de rotation de la machine, l'entraînement vers la droite est positif et le couple

agissant dans ce sens est lui aussi positif. Si l'on considère le diagramme couple-vitesse, on constate que les quadrants **I** et **III** représentent le service en moteur et que les quadrants **II** et **IV**, le service générateur ou freinage par récupération.

En fonction des comportements de la machine, on distingue des services à un quadrant et des services à plusieurs quadrants deux et quatre.

La figure suivante représente les services d'un moteur à courant continu associé à un variateur.

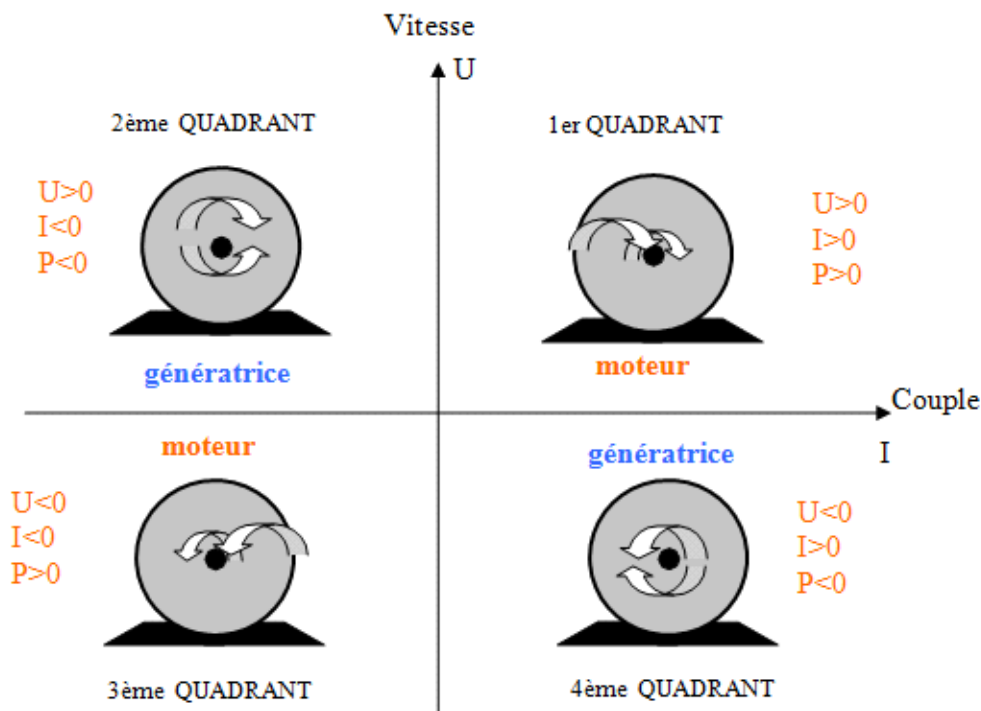


Figure (10) : fonctionnement en quatre quadrants

La notion de quadrant est déterminante dans le choix d'un variateur électronique. Elle caractérise ses possibilités en " réversibilité d'énergie ".

Le fonctionnement dans les quatre quadrants ne sera possible, dans le cas d'une solution à variation de vitesse électronique, que si à la fois la chaîne cinématique et la source d'alimentation électrique sont réversibles.