

2.1 Introduction

La charge mécanique généralement appelée charge dynamique, telle que les véhicules électriques, les ventilateurs, les robots, les machines-outils, les trains et les perceuses, est couplée à l'arbre du moteur. Les divers couples de charge sont généralement classés en deux catégories : (i) Couple actif de charge; (ii) Couple passif de charge.

Les couples de charge qui ont le potentiel d'entraîner le moteur dans des conditions d'équilibre sont appelés les couples actifs de charge. Le couple dû à la force de gravité, les treuils, les ascenseurs et les trains des moteurs électriques ont également des couples dues à la traction, la compression et la torsion subies par un corps élastique introduisent dans cette catégorie.

2.2 Composantes du couple de charge (C_r)

Le couple résistant ou le couple de charge C_r peut être subdivisé en les composants suivants :

1. Couple de friction ou de frottement C_f : La friction sera présente au niveau de l'arbre moteur et également dans les différentes parties de la charge.
2. Couple de dérive ou de la partie tournante C_d : Lorsqu'un moteur tourne, le mouvement génère un couple s'opposant au mouvement du moteur. C'est connu sous le nom de couple de dérive.
3. Couple nécessaire pour effectuer le travail mécanique utile, C_u : La nature de ce couple dépend du type de charge. Cela peut être constant et indépendant de la vitesse, ceci peut être une fonction de la vitesse, ou peut-être le temps invariant ou variant dans le temps, et sa nature peut également varier avec l'évolution du mode de fonctionnement de la charge.

Le couple de friction « C_f » peut être divisé en trois composantes, comme illustré par la Figure (2.1) a.

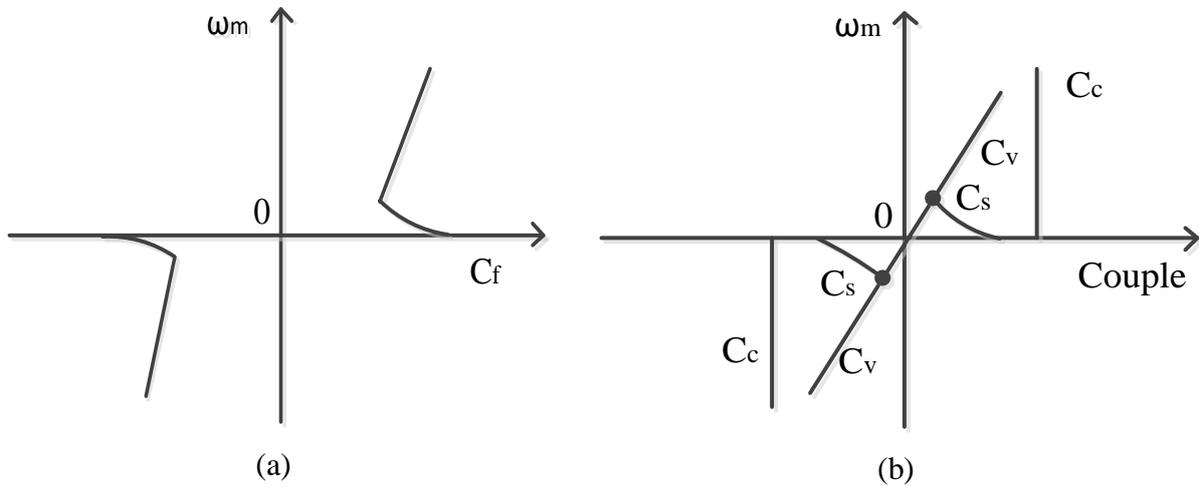


Figure (2.1) : Couple de friction en fonction de la vitesse de rotation

$$C_f = C_c + C_v + C_s \quad (2.1)$$

La première composante C_v qui varie linéairement avec la vitesse est appelée frottement visqueux et est donnée par l'équation suivante :

$$C_v = B\omega_m \quad (2.2)$$

Où B est le coefficient de frottement visqueux.

Le couple de dérive C_d , qui est proportionnel à la vitesse au carré, est donné par l'équation suivante :

$$C_d = D\omega_m^2 \quad (2.3)$$

Où D est une constante.

Ainsi, $C_f = C_v$ est pris en compte

Maintenant, le couple résistant peut être représenté par $C_r = C_v + C_d + C_u$

Donc, par analogie on a :

$$C_r = B\omega_m + D\omega_m^2 + C_u \quad (2.4)$$

Dans de nombreuses applications $C_d = D\omega_m^2$ est très petit par rapport $C_v = B\omega_m$ et négligeable par rapport à C_u . Pour simplifier l'analyse, le terme C_d est négligé.

$$C_r = B\omega_m + C_u \quad (2.5)$$

2.3 Caractéristiques couple-vitesse de la charge mécanique

2.3.1 Équations fondamentales du couple

La charge mécanique influencée directement sur les caractéristiques couple-vitesse. Les couples peuvent être représentés par une formule empirique suivante :

$$C_r = C_n \left(\frac{n}{n_n} \right)^k \quad (2.6)$$

Où C est une constante du gain proportionnel, C_n est le couple de charge à la vitesse nominale n_n , n est la vitesse de rotation actuelle, et k est un coefficient exponentiel représentant le type de caractéristique $C(\Omega)$. La Figure (2.2) montre le type de charges mécaniques existants dans le domaine d'entraînement électrique.

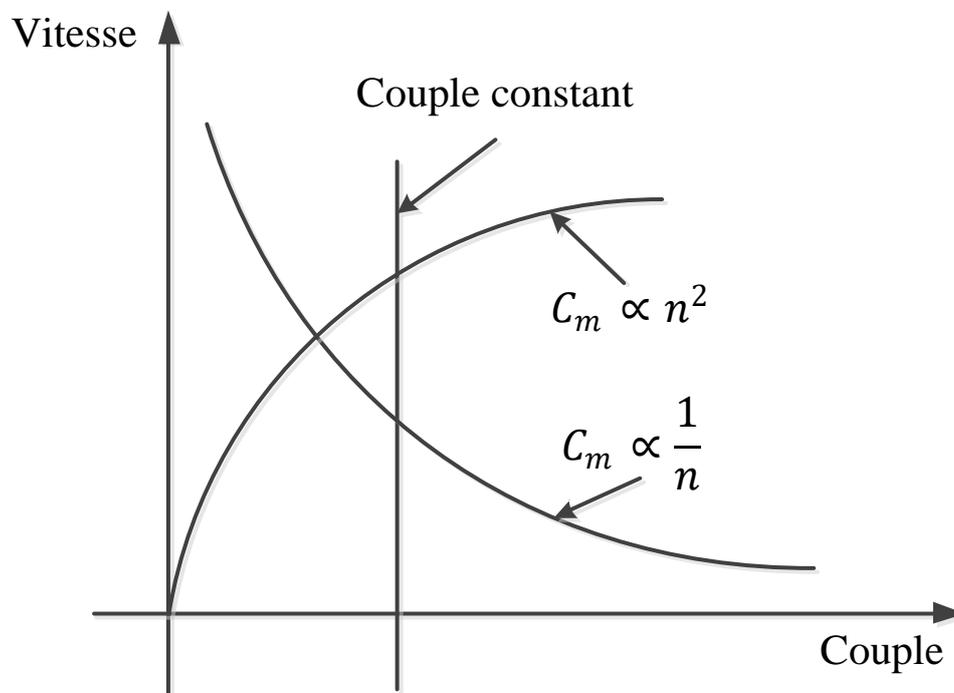


Figure (2.2) : Caractéristiques typiques couple-vitesse des charges mécaniques

✓ Couple indépendant de la vitesse

Les caractéristiques de ce type de charge mécanique sont représentées par la mise k est égal à zéro et C est égal à 1. Tandis que le couple est indépendant de la vitesse. Les exemples de ce type des charges sont : les treuils, le pompage de l'eau, etc.

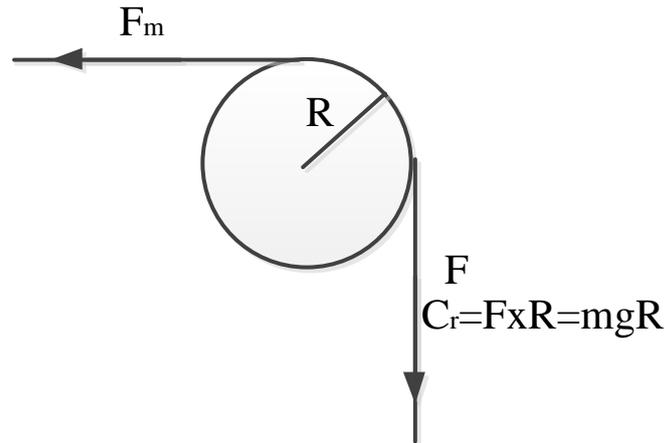


Figure (2.3) : Couple indépendant de la vitesse

✓ **Couple linéairement dépendant de la vitesse**

Le couple est linéairement proportionnel à la vitesse $k=1$, et la puissance mécanique est proportionnelle au carré de la vitesse. L'exemple de ce type d'entraînement, serait un moteur à courant continu qui entraîne un générateur connecté à une charge résistive à flux constant. Il peut être montré comme :

$$C_r = \frac{P}{\omega_m} \quad (2.7)$$

Où P est la puissance générée par le générateur.

Mais :

$$P = V I \text{ et } C_r = \frac{P}{\omega_m} = \frac{k^2 \omega_m^2}{R \omega_m} = \frac{k^2 \omega_m}{R} \quad (2.8)$$

$$\Rightarrow C_r \propto \omega_m \quad (2.9)$$

✓ **Couple proportionnel au carré de la vitesse**

La caractéristique couple-vitesse est parabolique, $k=2$. Les exemples de ce type des charges sont les ventilateurs, les pompes centrifuges, et hélices.

$$\Rightarrow C_r \propto \omega_m^2 \quad (2.10)$$

✓ **Couple inversement proportionnel à la vitesse**

Dans ce cas, $k = -1$. Les exemples sont les fraiseuses, les aléseuses, les véhicules électriques et les systèmes de traction, etc.

$$\Rightarrow C_r \propto \frac{1}{\omega_m} \quad (2.11)$$

2.4 Caractéristiques couple-vitesse avec association moteur-charge

2.4.1 Caractéristiques couple-vitesse du moteur et de la charge mécanique

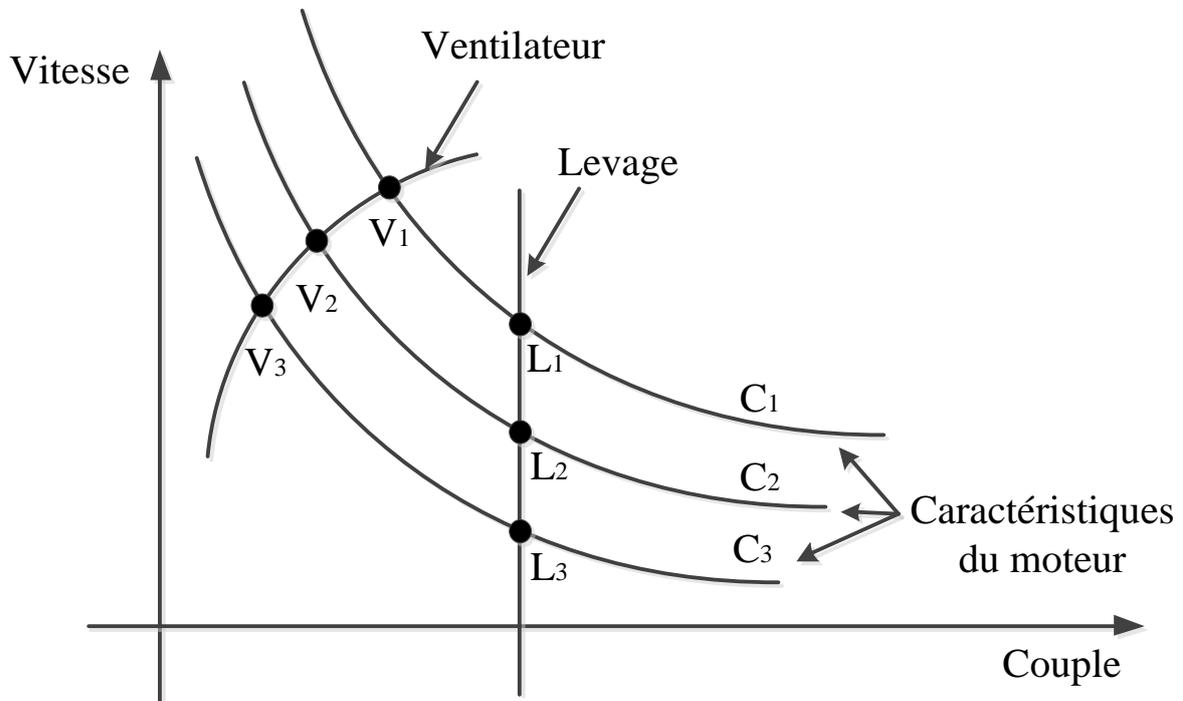


Figure (2.4) : détermination de points du fonctionnement

Les V_i et L_i ($i=1, 2$ et 3) sont les points de fonctionnement stable de l'ensemble moteur+charge mécanique. On dit qu'un point de fonctionnement est stable lorsque toute modification de l'une des variables qui le caractérise entraîne une action correctrice qui tend à rétablir les valeurs initiales des variables. Supposons par exemple que, pour une cause extérieure, le groupe ralentisse. Il y a deux possibilités selon le type de point de fonctionnement initial :

2.4.2 Dynamique du système de charge moteur

- Equations fondamentales du couple

Les relations dynamiques applicables à tous les types de moteurs et de charges. La condition dynamique ou transitoire. Cette condition apparaît lors du démarrage, du freinage et de l'inversion de vitesse du variateur.

Chapitre 2 Caractéristiques des charges $C(\Omega)$

Un moteur entraîne généralement une charge (machine) via un système de transmission. Alors la charge peut tourner ou subir un mouvement de translation. Il est cependant commode de représenter le système de charge+moteur par un système de rotation équivalent, comme le montre la Figure (2.5).

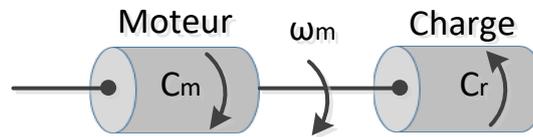


Figure (2.5) : Chaîne d'entraînement

Les notations suivantes sont adaptées :

J = moment d'inertie polaire du système moteur-charge rapporté à l'arbre moteur, $\text{Kg}\cdot\text{m}^2$

ω_m = vitesse angulaire instantanée de l'arbre moteur, rad/sec

C_r = le couple de charge (résistant), rapporté à l'arbre du moteur, $\text{N}\cdot\text{m}$

C_m = couple développé du moteur, $\text{N}\cdot\text{m}$

Tout système de charge/moteur peut être décrit par l'équation fondamentale du couple suivante pendant la dynamique

$$C_m = C_r \pm \frac{d}{dt}(J \omega_m) \quad (2.12)$$

$$\Rightarrow C_m = C_r \pm J \frac{d\omega_m}{dt} \pm \omega_m \frac{dJ}{dt} \quad (2.13)$$

Cette équation est applicable pour les entraînements à inertie variable tels que les enrouleurs de mines, les robots industriels, etc.

Et :

$$C_m = C_r \pm J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.14)$$

Cette équation est pour une inertie constante, c'est-à-dire $\frac{dJ}{dt} = 0$

Signe négatif pour la décélération et signe positif pour l'accélération. L'accélération ou la décélération dépend de C_m est supérieur ou inférieur à C_r . Pendant l'accélération, le moteur

doit fournir non seulement le couple de charge C_r mais aussi une composante de couple supplémentaire appelée couple d'inertie $J \frac{d\omega_m}{dt}$ pour tourner l'inertie de l'entraînement. Pendant la décélération, le couple dynamique $J \frac{d\omega_m}{dt}$ a un signe négatif. Par conséquent, il assiste le couple moteur C_m et maintient le mouvement d'entraînement en extrayant de l'énergie cinétique stockée. L'équilibre fondamental de l'équation de couple entre les différents couples dans l'entraînement peut être pris en compte tout en investissant le comportement dynamique est

$$C_m = C_r + J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2.15)$$

Où :

$$C_r = B\omega_m + C_u \quad (2.16)$$

Il ressort de l'équation ci-dessus que :

- i) Le variateur va accélérer, en particulier, prendre de la vitesse pour atteindre la vitesse nominale

$$C_m > C_r \text{ c'est-à-dire } \frac{d\omega_m}{dt} > 0 \quad (2.17)$$

- ii) L'entraînement va décélérer et surtout s'immobiliser

$$C_m < C_r \text{ c'est-à-dire } \frac{d\omega_m}{dt} < 0 \quad (2.18)$$

- iii) Le moteur continuera à tourner à la même vitesse s'il fonctionnait ou continuera à être au repos s'il ne fonctionnait pas.

$$C_m = C_r \text{ c'est-à-dire } \frac{d\omega_m}{dt} = 0 \quad (2.19)$$

2.4.2 Stabilité

Stabilité à l'état d'équilibre

a) Stabilité à l'état transitoire ou stabilité dynamique

Critères de stabilité à l'état d'équilibre :

Supposons que la courbe vitesse-couple de l'ensemble moteur-charge soit en équilibre, c'est-à-dire en régime permanent. Les perturbations modifient les états d'équilibre. Deux types de perturbations sont engendrés :

Chapitre 2 Caractéristiques des charges $C(\Omega)$

1. En raison du changement lent de l'inertie des masses en rotation ou de celui des inductances, les états d'équilibre changent lentement. Ainsi, l'effet de l'inertie et des inductances est négligé pour la dynamique.

2. En raison de changements importants et brusques d'inertie et d'inductances, il y a des changements brusques d'état d'équilibre. Ainsi, l'inertie et les inductances sont prises pour l'étude de dynamique.

L'étude de la stabilité dans les conditions données ci-dessus, le premier type de perturbation est consacré à la stabilité en régime permanent et le deuxième est sacré à la stabilité en régime dynamique ou transitoire.

Notons les valeurs d'équilibre des couples et de la vitesse par C_r , C_m et ω_m

Puis à l'équilibre, lorsqu'il n'y a pas d'écart, on a :

$$C_m = C_r \quad (2.20)$$

On ajoute des petites variations dans le couple de charge, de sorte que tous les changements d'équilibre sont donnés par ΔC_m , ΔC_r et $\Delta \omega_m$. Ensuite, la dynamique du système est donnée par :

$$C_m + \Delta C_m = C_r + \Delta C_r + J \frac{d(\omega_m + \Delta \omega_m)}{dt} \quad (2.21)$$

$$\Rightarrow \Delta C_m = \Delta C_r + J \frac{d(\Delta \omega_m)}{dt} \quad (2.22)$$

Si nous supposons que ces incréments sont petits et qu'ils peuvent être exprimés comme des fonctions linéaires du changement de vitesse, puis :

$$\Delta C_m = \frac{dC_m}{d\omega_m} \Delta \omega_m \quad (2.23)$$

$$\Delta C_r = \frac{dC_r}{d\omega_m} \Delta \omega_m \quad (2.24)$$

Avec $\frac{dC_m}{d\omega_m}$ et $\frac{dC_r}{d\omega_m}$ indique les dérivées au point d'équilibre. En remplaçant ces relations dans

les premières équations et en les réarrangeant, nous avons :

$$J \frac{d\Delta \omega_m}{dt} + \left(\frac{dC_r}{d\omega_m} - \frac{dC_m}{d\omega_m} \right) \Delta \omega_m \text{ et } \Delta \omega_m = (\Delta \omega_m)_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.25)$$

Chapitre 2 Caractéristiques des charges $C(\Omega)$

Où $(\Delta\omega_m)_0$ c'est la vitesse à l'état initial et τ est la constante de temps mécanique et est donnée par :

$$\tau = \frac{J}{\left(\frac{dC_r}{d\omega_m} - \frac{dC_m}{d\omega_m}\right)}$$

Pour que le système soit stable lorsque l'exposant de l'équation est négatif. Cet exposant sera négatif lorsque

$$\frac{dC_r}{d\omega_m} - \frac{dC_m}{d\omega_m} > 0 \quad (2.26)$$

Où :

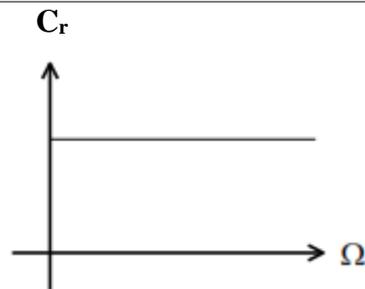
$$\frac{dC_r}{d\omega_m} > \frac{dC_m}{d\omega_m} \quad (2.27)$$

2.5 Types de charges

Une charge mécanique est caractérisée également par sa caractéristique mécanique moment du couplerésistant en fonction de la vitesse : $C_r=f(\Omega)$.

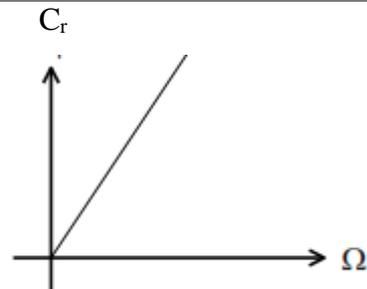
Les charges que l'on rencontre le plus sont :

Les charges à couple constant $C_r = \text{cte}$ représentées par une droite horizontale. C'est le cas pour de nombreuses machines-outils (perceuse, ...) et pour le **levage**.



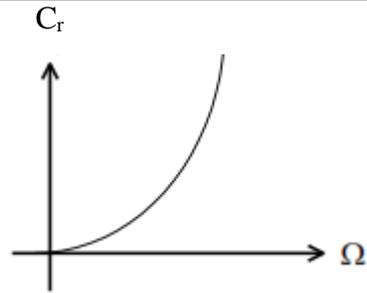
Les charges à couple proportionnel à la vitesse $C_r = a\Omega$, ce qui donne une droite qui passe par l'origine.

C'est le cas des pompes hydrauliques.



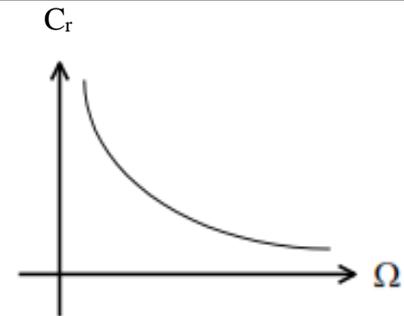
Les charges à couple proportionnel au carré de la vitesse $C_r = a\Omega^2$ ce qui donne une parabole.

C'est le cas des ventilateurs.



Les charges à puissance constante $P = C_r \Omega = \text{cte}$, ce qui donne une relation du type $C_r = \frac{a}{\Omega}$ et donc une courbe hyperbolique.

C'est le cas de l'essorage.



Une fois le régime transitoire terminé (exemple démarrage), la machine et la charge connectée tourneront à la vitesse indiquée par l'intersection des 2 caractéristiques :

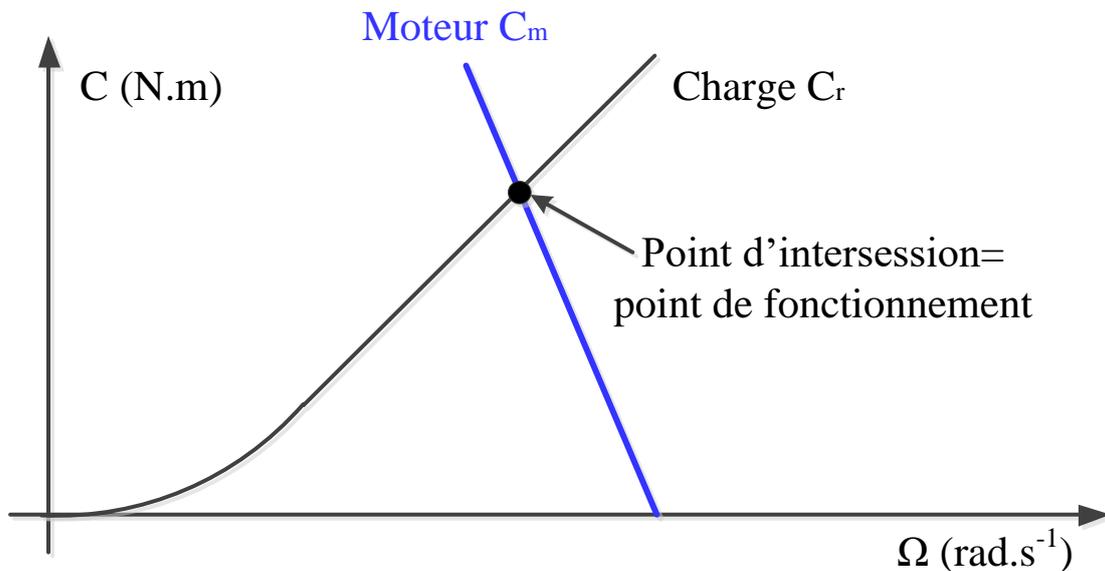


Figure (2.6) : détermination du point de fonctionnement

Au régime permanent (vitesse constante) le couple moteur C développé par la machine est égal au couple résistant C_r imposé par la charge $C_m = C_r$.

Exemple d'application :

Un moteur à courant continu à excitation indépendante et constante a les caractéristiques suivantes :

Tension d'alimentation de l'induit : $U_a=160V$.

Résistance de l'induit : $R_a=0.2\Omega$.

- 1) la FEM E du moteur est $150V$ quand sa vitesse de rotation est $N=1500\text{tr/min}$. En déduire la relation entre E et N .
- 2) déterminer l'expression de I_a (courant d'induit) en fonction de E .
- 3) déterminer l'expression de C_{em} (couple électromagnétique en $N.m$) en fonction I_a .
- 4) En déduire que ; $C_{em}=764-0.477.N$ (on donne $K_m=0.955 \text{ Nm/A}^2$).
- 5) On néglige les pertes collectives du moteur. Justifier qu'alors ;
 C_u (couple utile) $=C_{em}$.
- 6) Calculer la vitesse de rotation du moteur à vide.
- 7) Le moteur entraîne maintenant une charge dont le couple résistance varie proportionnellement avec la vitesse de rotation ($20N.m$ à 1000 tr/min).

Calculer la vitesse de rotation de rotation du moteur en charge :

- a) par une méthode graphique.
- b) Par un calcul algébrique.

En déduire le courant d'induit est la puissance utile du moteur.

2.6 Types de machines électriques

Les machines électriques sont classées en machines à courant alternatif et machines à courant continu.

2.6.1 Machine à courant continu

Les moteurs à courant continu sont des appareils qui transforment l'énergie électrique qu'ils reçoivent en énergie mécanique. L'usage des moteurs à courant continu est plutôt restreint, car la distribution se fait à courant alternatif. Cependant, pour certaines applications il est parfois avantageux d'utiliser des moteurs à courant continu alimentés par des convertisseurs qui transforment le courant alternatif en courant continu (cas des redresseurs à thyristor). La supériorité de ces moteurs réside dans le fait qu'ils se prêtent facilement à un contrôle souple, continu et presque instantané de leur vitesse.

Il existe quatre types différents de moteurs électriques qui sont classés en fonction du type d'excitation qui est employé, qui sont :

- ∞ Le moteur à excitation séparée,
- ∞ Le moteur à excitation shunt,
- ∞ Le moteur à excitation série,
- ∞ Le moteur à excitation composée.

2.6.1.1 Équations électriques de la machine

Dans cette modélisation nous allons utiliser le moteur à courant continu afin d'établir les équations et ce qui s'en suit. Du fait que, par des changements de connexions entre l'induit et l'inducteur on aboutit aux autres types de MCC (par rapport à l'excitation) et que les MCC sont réversibles, nous pourrions donc obtenir les autres modèles moyennant des modifications à partir du premier.

2.6.1.2 Équations électriques de la MCC à excitation indépendante

Le schéma électrique d'une machine à excitation indépendante est donné par la Figure (2.7).

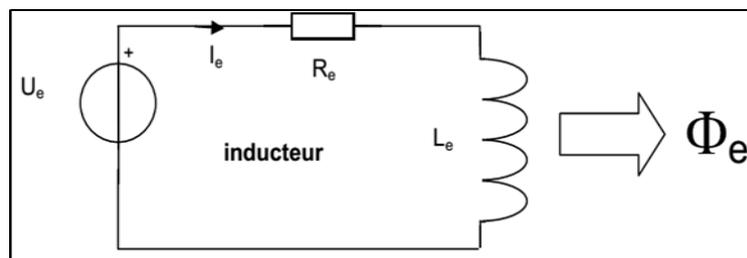


Figure (2.7) : Modèle électrique de la MCC à excitation indépendante pour l'inducteur.

✓ Équation de l'inducteur

Prenant en compte la résistance R_{exc} et l'inductance L_{exc} du circuit inducteur, et en les supposant toutes deux constantes (pas de variation due à l'échauffement, ni à la saturation magnétique), d'après la Figure (2.7), l'équation de tension induite de l'inducteur s'écrit :

$$u_e(t) = R_{exc} \cdot i_e(t) + L_e \cdot \frac{di_{ex}}{dt} \quad (2.28)$$

✓ Équation de l'induit

Prenant en compte la résistance R_a et l'inductance L_a du circuit d'induit, du collecteur, des balais et des connexions, et en les supposant toutes deux constantes (pas de variation due à

l'échauffement ni à la saturation magnétique), d'après la Figure (2.8), l'équation de tension induite s'écrit :

$$u_a(t) = R_a \cdot i_a(t) + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + E = R_a \cdot i_a(t) + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + k \cdot \Omega \cdot \phi_e \quad (2.29)$$

Avec : Ω vitesse de rotation en rad/s .

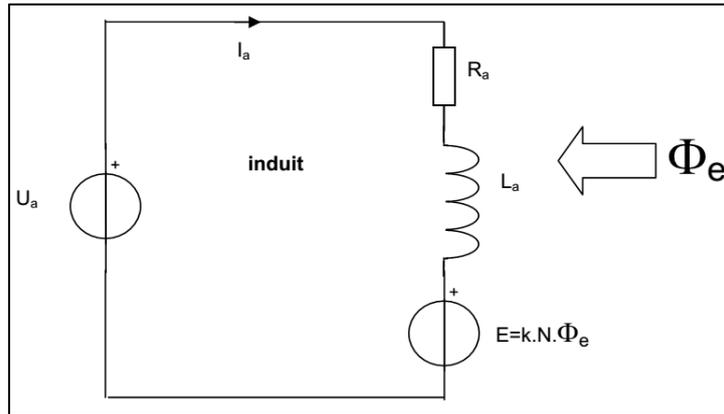


Figure (2.8) : Modèle électrique de la MCC à excitation indépendante pour l'induit.

✓ Équation du flux

1. On réalise une simulation simple où le flux est toujours une fonction linéaire du courant d'excitation et donc où on néglige les effets de la saturation :

$$\phi_e = M_{ea} \cdot I_e \quad (2.30)$$

2. En tenant compte de la saturation, la relation est plus complexe et elle n'est pas forcément une relation mathématique simple. Néanmoins, on peut la tabuler si l'on a relevé les points de la courbe $\Phi = f(I_e)$; le logiciel Matlab permet ainsi d'introduire une telle fonction.

✓ Équations électromécaniques

La tension induite $e_m(t)$, appelée *FEM* «force électromotrice», dans l'optique de l'exploitation en générateur, est proportionnelle à la vitesse angulaire $\Omega(t)$ et au flux inducteur $\Phi_f(t)$:

$$e_m(t) = k \cdot \Phi_f(t) \cdot \Omega(t) \quad (2.31)$$

k est une constante dépendant de la construction de la machine.

Chapitre 2 Caractéristiques des charges $C(\Omega)$

L'équation (2.28), montre que $e_m(t)$ s'oppose à $u_a(t)$, c'est à dire que le moteur réagit en créant une FEM $e_m(t)$ tendant à équilibrer $u_a(t)$. Cet effet correspondra à une contre-réaction bien visible dans le schéma fonctionnel du moteur.

✓ Équations du couple

On l'obtient à partir de la puissance électromagnétique :

$$P_e = EI_a = I_a \cdot k \cdot \Phi \cdot \Omega = C_{em} \cdot \Omega \quad (2.32)$$

Ce qui donne :

$$C_{em} = I_a \cdot k \cdot \Phi \quad (2.33)$$

✓ Équation mécanique

Le moteur en rotation est décrit par l'équation (de la dynamique) d'équilibre suivante :

$$J \frac{d\Omega(t)}{dt} = C_{em}(t) - f_v \omega(t) - C_r(t) - f(t) \quad (2.34)$$

Avec :

j_t : Inertie totale entraînée (moteur j_m et charge j_{ch})

f_v : Coefficient de frottement visqueux

C_r : Couple résistant

f : Couple de frottement de coulomb.

✓ Transformées de Laplace

On somme les équations régissant le fonctionnement du moteur. Mais pour mieux les exploiter, nous allons utiliser leurs transformées de Laplace. Les transformées de Laplace des équations sont les suivantes :

$$\begin{cases} u_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a}{dt} + e_m(t) \xrightarrow{L} U_a(p) - E_m(p) \\ u_a(t) = R_a \cdot I_a(p) + p \cdot L_a \cdot I_a(p) \end{cases} \quad (2.35)$$

$$e_m(t) = k \cdot \Phi_f(t) \cdot \omega(t) \xrightarrow{L} E_m(p) = k \cdot \Phi_f \cdot \Omega(p) \quad (2.36)$$

$$C_{em}(t) = k \cdot \Phi_f(t) \cdot i_a(t) \xrightarrow{L} T_{em}(p) = k \cdot \Phi_f \cdot I_a(p) \quad (2.37)$$

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = C_{em}(t) - C_r(t) - B\omega(t) - T_f \xrightarrow{L} J \cdot p \cdot \Omega(p) \\ J \frac{d\omega}{dt} = C_{em}(p) - C_r - B\omega(t) - C_f \end{cases} \quad (2.38)$$

2.6.1.3 Schéma et simulation de la MCC à excitation indépendante

L'objectif de la simulation est d'établir un schéma de bloc fonctionnel à partir duquel les tensions de sortie permettent de déterminer les grandeurs électrique, électromagnétique et mécanique en fonction du temps.

Si on considère comme grandeur d'entrée, la tension appliquée aux bornes de l'induit et comme grandeur de sortie, la vitesse du moteur, nous obtenons le schéma bloc tension – vitesse. Ce dernier nous permet de voir l'évolution de la vitesse avec la tension. On utilise l'environnement (MATLAB/SIMULINK).

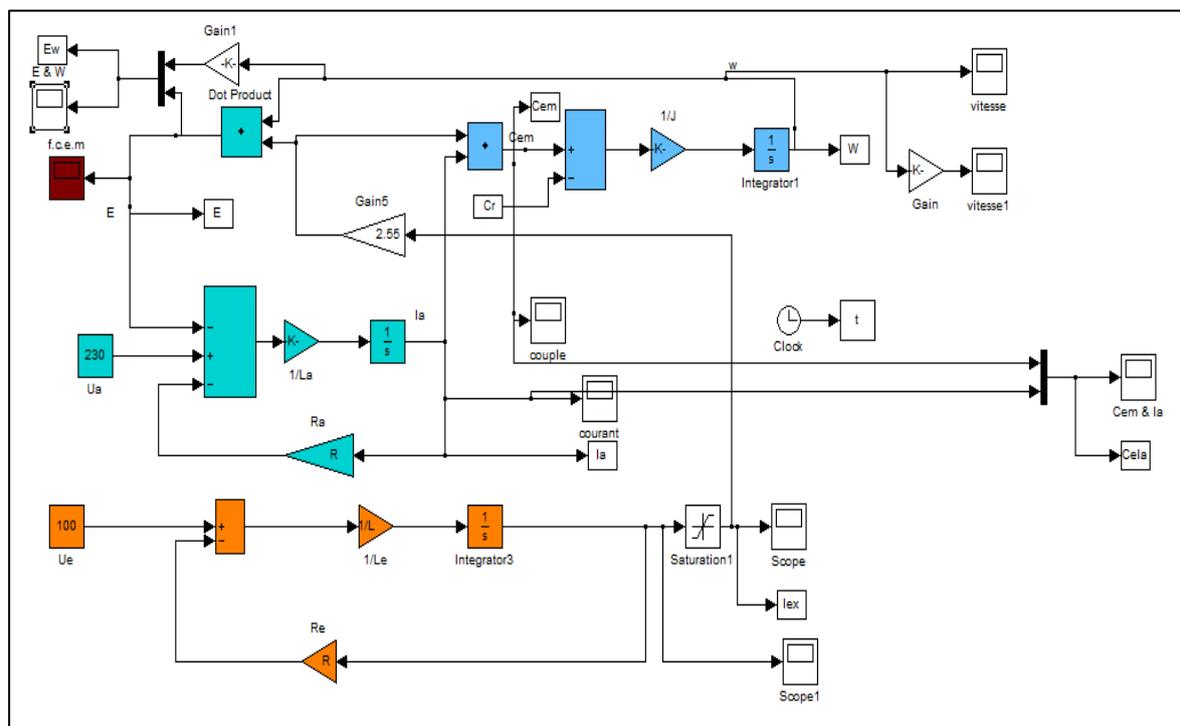


Figure 2.9 : Schéma de simulation de la MCC à excitation indépendante.

- **Résultats**

La Figure n° 2.10 présente l'évolution du couple électromagnétique C_{em} , la vitesse Ω , les courants statoriques I_a et I_{ex} en appliquant un couple résistant constant de valeur de $Cr = 10 \text{ N.m}$ à $t = 2s$.

- ✓ **Discussion des résultats de simulation**

Lors du démarrage à vide du moteur à courant continu, on constate que le courant d'appel est très élevé. Ceci est dû au fait que le démarrage de rotation de l'induit fait l'appel à un courant

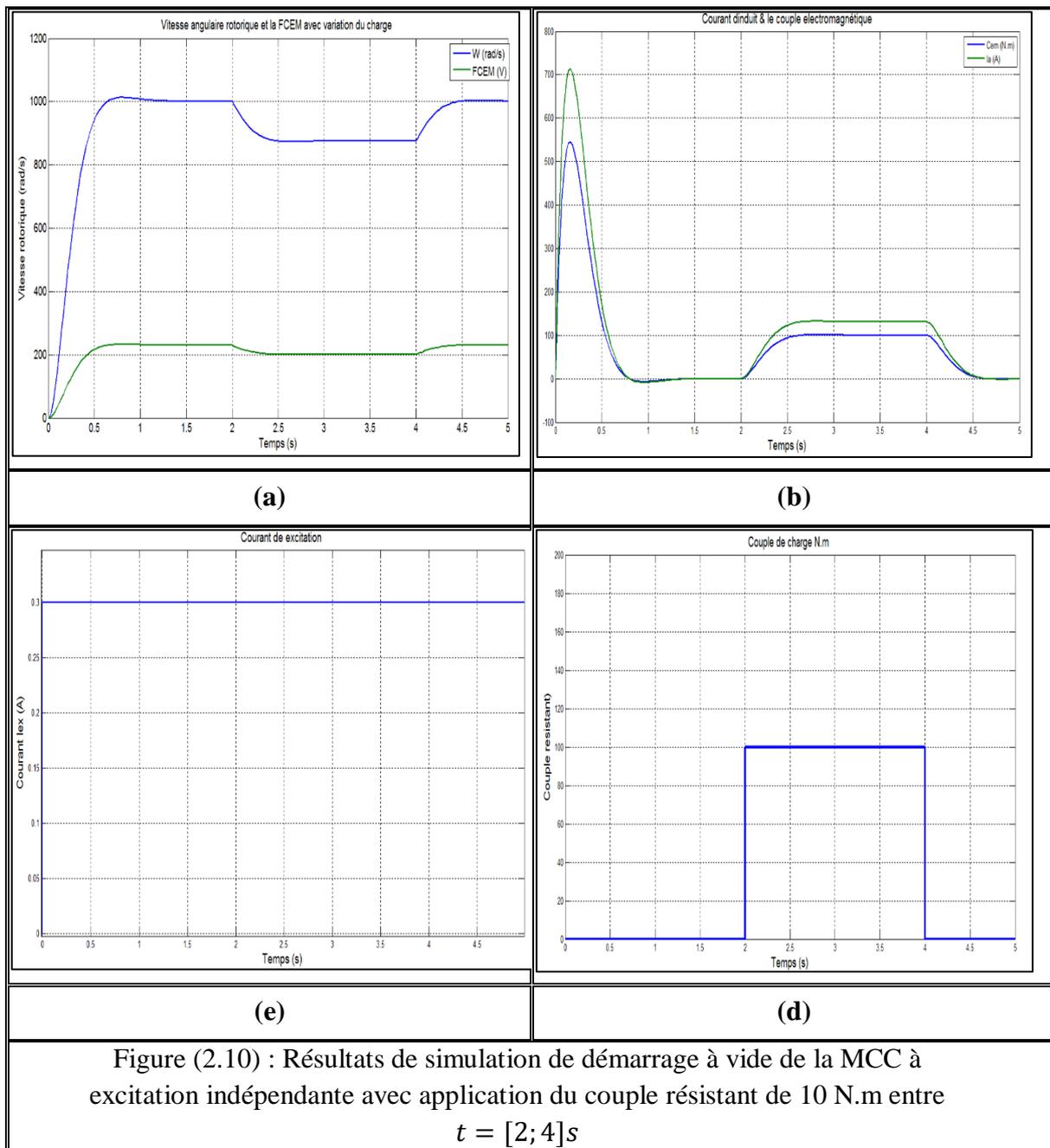
Chapitre 2 Caractéristiques des charges $C(\Omega)$

de démarrage. Un établissement rapide dû au démarrage avec un maximum de tension à vide. Pendant le régime transitoire, le couple t fait un pic aux premiers instants.

Le régime transitoire du courant d'induit a une durée équivalente au temps de démarrage, avec une pointe.

Fonctionnement en charge :

La Figure (2.10) montre que le couple électromagnétique rejoint la valeur qui compense le couple résistant ($C_r=10$ N.m). Les courants d'induit évoluent selon la charge appliquée à l'arbre de la machine et la vitesse diminue, cela revient à couple résistant.



2.6.1.4 Équations électriques de la MCC à excitation shunt

Les caractéristiques de ce moteur sont les mêmes que celle d'un moteur à excitation indépendante puisque le flux Φ est maintenu constant comme la tension U .

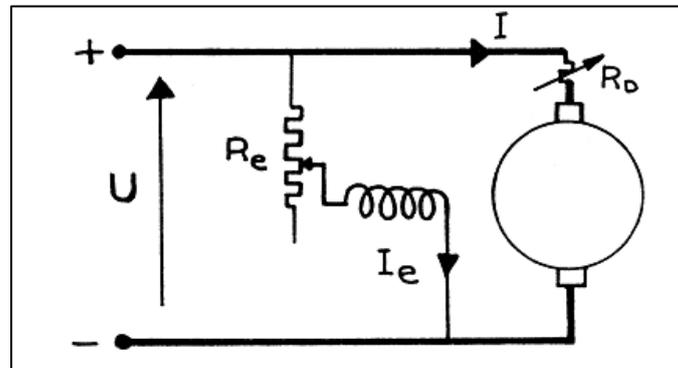


Figure (2.11) : Schéma d'une MCC à excitation shunt.

On alimente en parallèle sous la tension continue, l'induit et l'inducteur comme le montre la Figure (2.11). On étudiera les caractéristiques pour $U = c^{te}$ et $I_e = c^{te}$. Le couple devient :

$$C_{em} = \frac{k}{2\pi} I \phi(I_e) = \frac{E(n, I_e)}{\Omega} I \quad (2.39)$$

Pour chaque valeur de I_{ex} , le couple est donc proportionnel au courant d'induit I . La formule ci-dessus permet, en utilisant la caractéristique à vide, de calculer la pente de cette droite. On remarque que le courant ne dépend que du couple. On peut remarquer qu'au démarrage :

$$C_D = \frac{k}{2\pi} I_D \phi(I_e) = \frac{E(n, I_e)}{\Omega} I_D \quad (2.40)$$

Pour la vitesse, la loi d'Ohm appliquée à l'induit s'écrit :

$$E = U + (R)I \text{ ou } E = U - (R)I = K\Omega\phi I_e \quad (2.41)$$

Avec :

$$\Omega = \frac{U - RI}{K\phi I_e} \quad (2.42)$$

Pour chaque valeur de I_e , le dénominateur est constant et Ω est donc fonction linéaire du courant I . Pour un courant nul (donc pour un couple nul), on obtient la vitesse à vide Ω_v :

$$\Omega_v = \Omega \frac{U}{E(\Omega, I_e)} \quad (2.43)$$

Chapitre 2 Caractéristiques des charges C(Ω)

En charge, la vitesse diminue légèrement, car, en pratique, on aura : $RI \leq RI_n \leq U$. Pour la caractéristique mécanique, on élimine le courant entre les expressions précédentes :

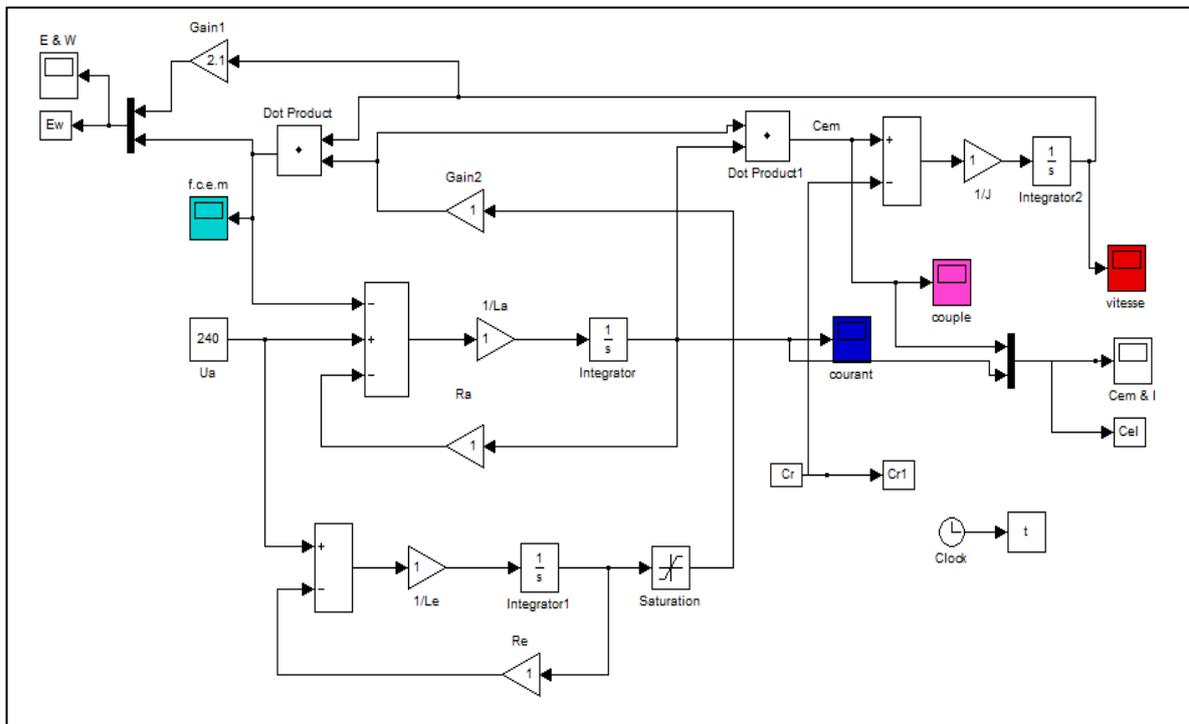
$$\Omega = \frac{U}{K\phi I_e} - \left[\frac{R}{K\phi I_e} \frac{2\pi}{K\phi I_e} \right] C_{em} \tag{2.44}$$

Pour chaque valeur de I_e , la vitesse est une fonction linéaire du couple. Le fonctionnement moteur correspond à C_{em} et Ω de même sens. Lorsque C_{em} et I sont ici négatifs, il s'agit d'un freinage : la charge est alors motrice (ou entraînée) et le courant est envoyé vers le réseau.

- ∞ Si I_e augmente le flux augmente, la vitesse diminue.
- ∞ Si I_e diminue au contraire, la vitesse augmente et si I_e tend vers zéro, la vitesse à vide tend vers l'infini : en l'absence d'excitation, le moteur s'emballe. Il ne faut donc jamais couper ce circuit.
- ∞ Si la tension U augmente, la vitesse augmente proportionnellement.

2.6.1.5 Schéma et simulation de la MCC à excitation shunt

Si on considère comme grandeur d'entrée la tension appliquée aux bornes de l'induit et comme grandeur de sortie la vitesse du moteur, nous obtenons le schéma bloc tension –



vitesse. Ce dernier nous permet de voir l'évolution de la vitesse avec la tension.

Figure (2.12) : Schéma de simulation de la MCC à excitation shunt.

• **Résultats**

La Figure (2.13) présente l'évolution du couple électromagnétique C_{em} , la vitesse Ω , les courants statoriques I_a et I_e . En applique un couple résistant constant de valeur de $Cr = 10 \text{ N.m}$.

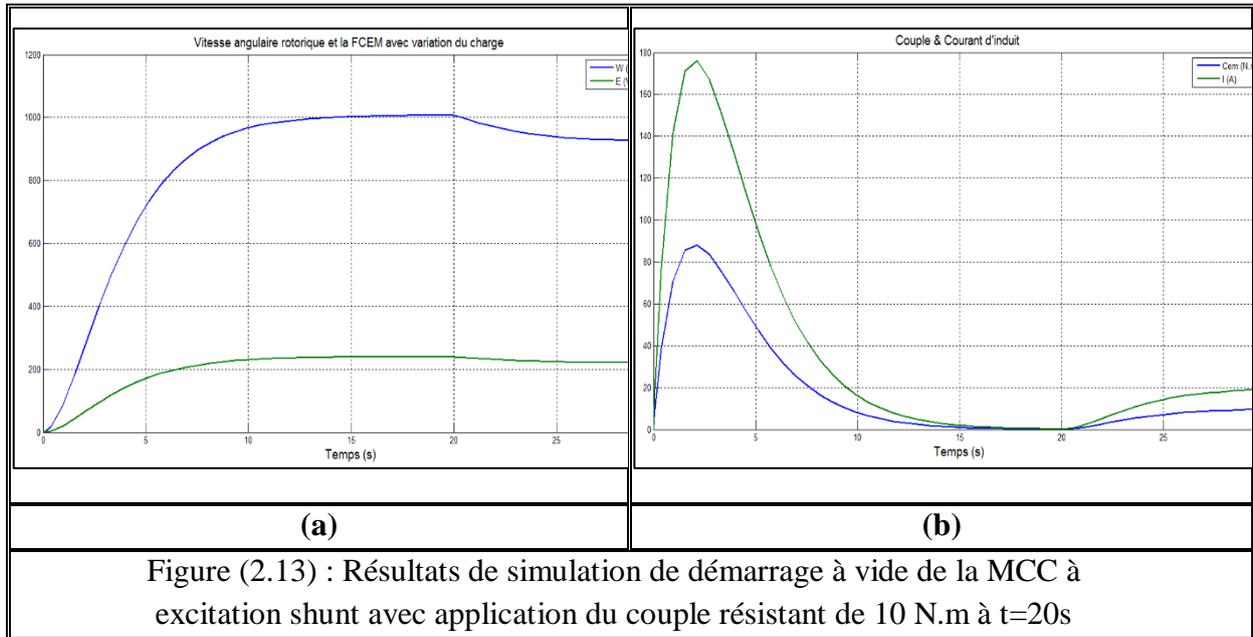


Figure (2.13) : Résultats de simulation de démarrage à vide de la MCC à excitation shunt avec application du couple résistant de 10 N.m à t=20s

2.6.1.6 Équations électriques de la MCC à excitation série

On utilise un moteur dont l'inducteur, réalisé en conducteur de forte section, peut-être mis en série avec l'induit comme le montre la Figure (2.14)., On impose $I = I_a = I_e$, ce qui modifie les propriétés du moteur. On étudiera les caractéristiques sous tension constante U, donc le couple devient :

$$C_{em} = \frac{k}{2\pi} I \phi(I) = \frac{E(n,I)}{\Omega} I = \frac{k'}{2\pi} I^2 \tag{2.45}$$

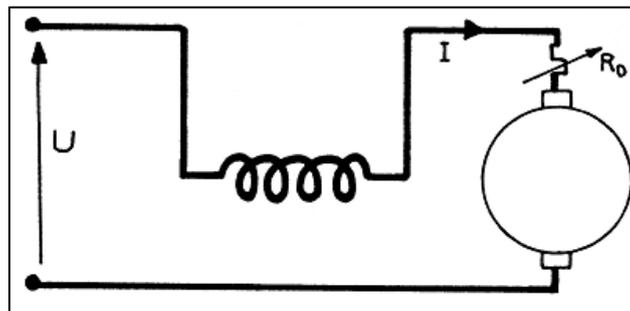


Figure (2.14) : Schéma d'une MCC à excitation série.

Pour les faibles valeurs de I , le flux est proportionnel à I et le couple est donc proportionnel au carré du courant d'induit. Or, lorsque I augmente, le circuit magnétique se sature, le flux croît moins fortement, de même que le couple. On trace la courbe point par point à partir des valeurs de la caractéristique à vide. On remarque ici encore que le courant d'induit est lié au couple. Au démarrage, le couple de démarrage pourra être très élevé $I_D \gg I_n$:

$$C_D = \frac{k}{2\pi} I_D^2 \quad (2.46)$$

En notant R_s la résistance de l'inducteur série, la loi d'Ohm s'écrit :

$$E = U - (R + R_s)I = K\Omega\phi I \quad (2.47)$$

Avec :

$$\Omega = \frac{U - (R + R_s)I}{K\phi I} = \frac{U}{K\phi I} - \frac{(R + R_s)}{K\phi} \quad (2.48)$$

Lorsque I tend vers zéro (fonctionnement à vide, $C_{em} = 0$) la vitesse tend vers l'infini : il y a emballement à vide. Il faut éliminer I entre les expressions du couple et de la vitesse. Comme I intervient dans la f.é.m., il faut procéder point par point. Pour un couple nul, on trouve un courant nul et une vitesse infinie.

2.6.1.7 Schéma et simulation de la MCC à excitation série

L'objectif de la simulation est d'établir un schéma de bloc fonctionnel à partir duquel les tensions de sortie permettent de déterminer les grandeurs électrique, électromagnétique et mécanique en fonction du temps.

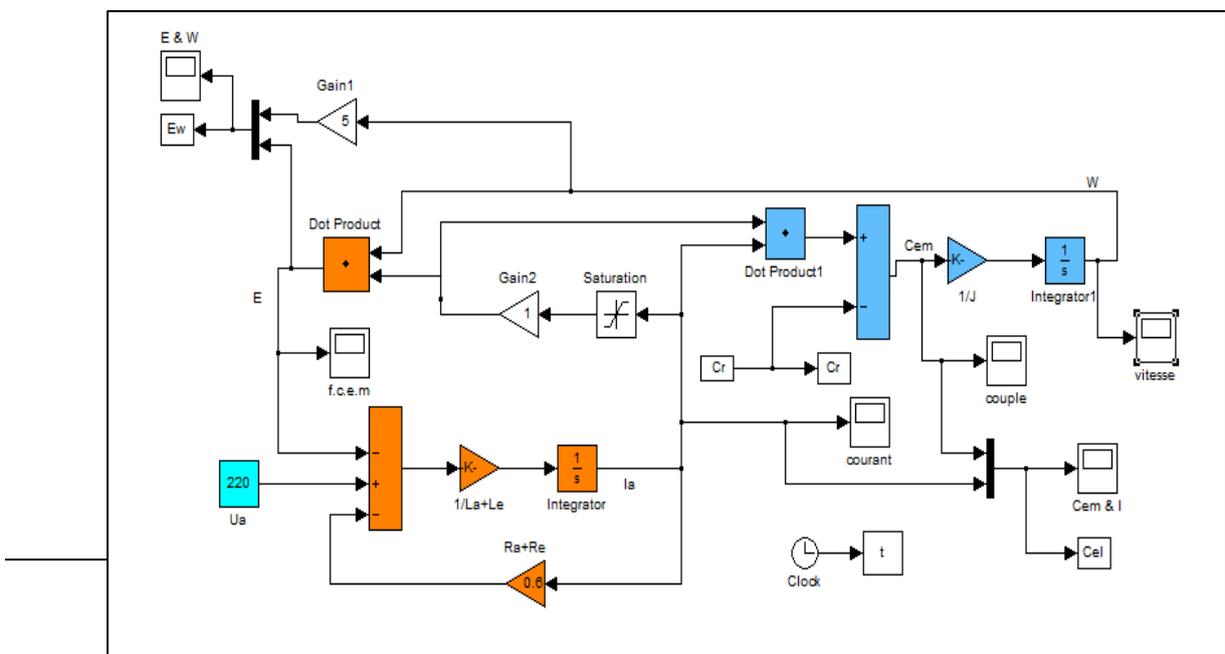


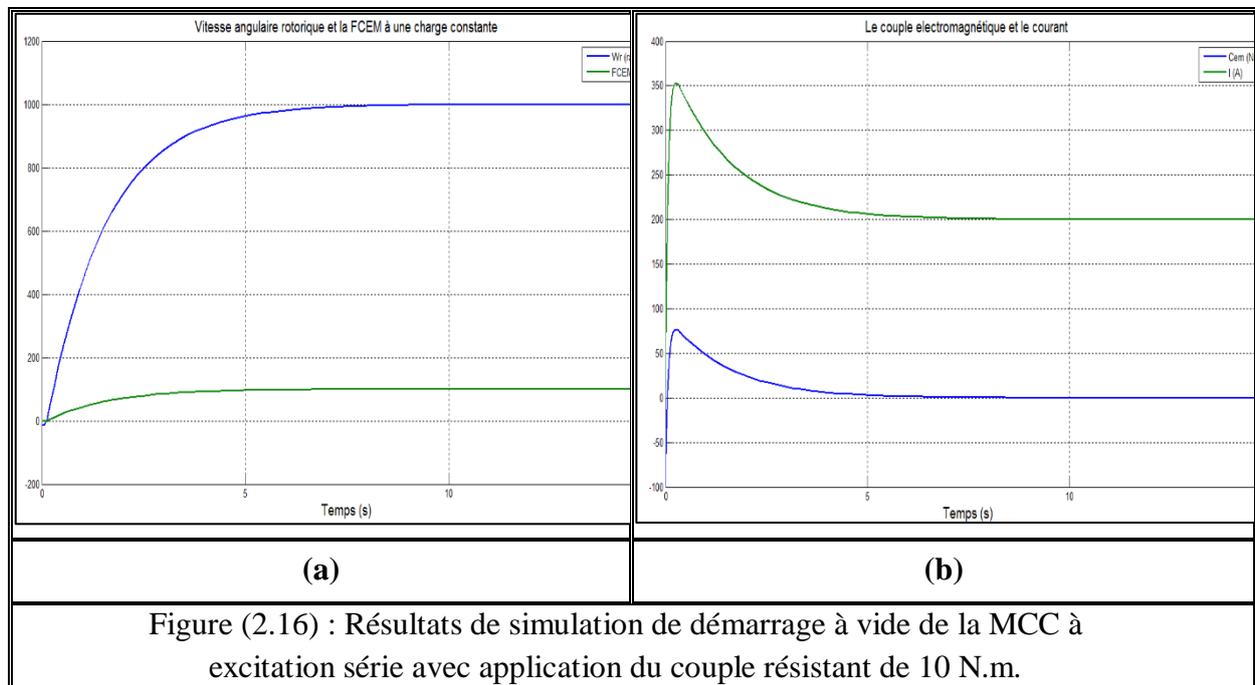
Figure (2.15) : Schéma de simulation de la MCC à excitation série.

• **Résultats**

La Figure (2.16) présente l'évolution du couple électromagnétique C_{em} , la vitesse Ω , les courants statoriques I_a et I_e , en appliquant un couple résistant constant de valeur de $Cr = 10 \text{ N.m}$.

✓ **Discussion des résultats de simulation**

- Si U augmente, le couple reste inchangé et la vitesse augmente proportionnellement à U.
- Le moteur série peut être utilisé en courant alternatif car le couple est proportionnel au carré du courant, donc toujours de même signe. Le circuit magnétique doit être entièrement feuilleté pour réduire les pertes fer et le moteur utilisable en alternatif ou en continu porte le nom de moteur universel. Il est très utilisé pour les petites puissances car sa vitesse n'est pas liée à la fréquence du réseau.



2.6.2 Moteur à courant alternatif

2.6.2.1 Moteur asynchrone

Chapitre 2 Caractéristiques des charges C(Ω)

Les moteurs Asynchrones sont des moteurs à courant alternatif, appelés également moteurs à induction.

Ils sont les moteurs les plus répandus dans les secteurs industriels et commerciaux. On les subdivise comme suit :

- ✓ les moteurs à cage d'écureuil,
- ✓ les moteurs à rotor bobiné.

80% des moteurs électriques dans le domaine industriel sont des moteurs asynchrones. Les avantages du moteur à induction triphasé sont énumérés ci-dessous :

- ∞ Conception simple
- ∞ Construction robuste
- ∞ Fonctionnement fiable
- ∞ Faible coût initial
- ∞ Facilité d'utilisation et maintenance simple
- ∞ Appareillage de commande simple pour le démarrage et le contrôle de la vitesse
- ∞ Haute efficacité.

Le moteur asynchrone est présenté en régime permanent par les indications illustrées par la Figure (2.17).

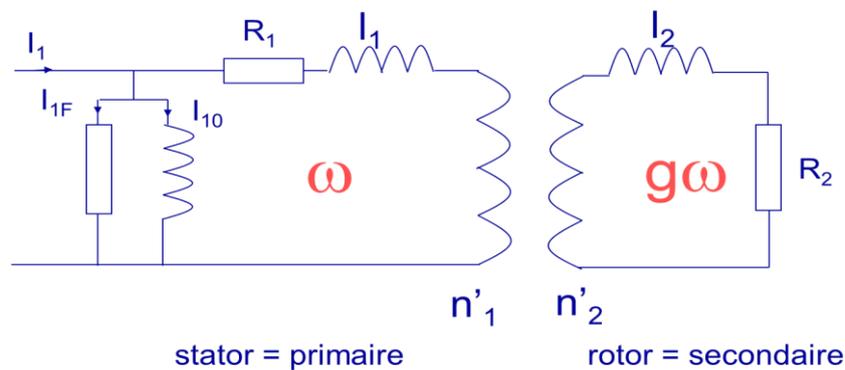


Figure (2.17) : Schéma équivalent de la MAS en régime permanent

La caractéristique du couple en fonction de la vitesse du moteur à induction est illustrée par la Figure (2.18).

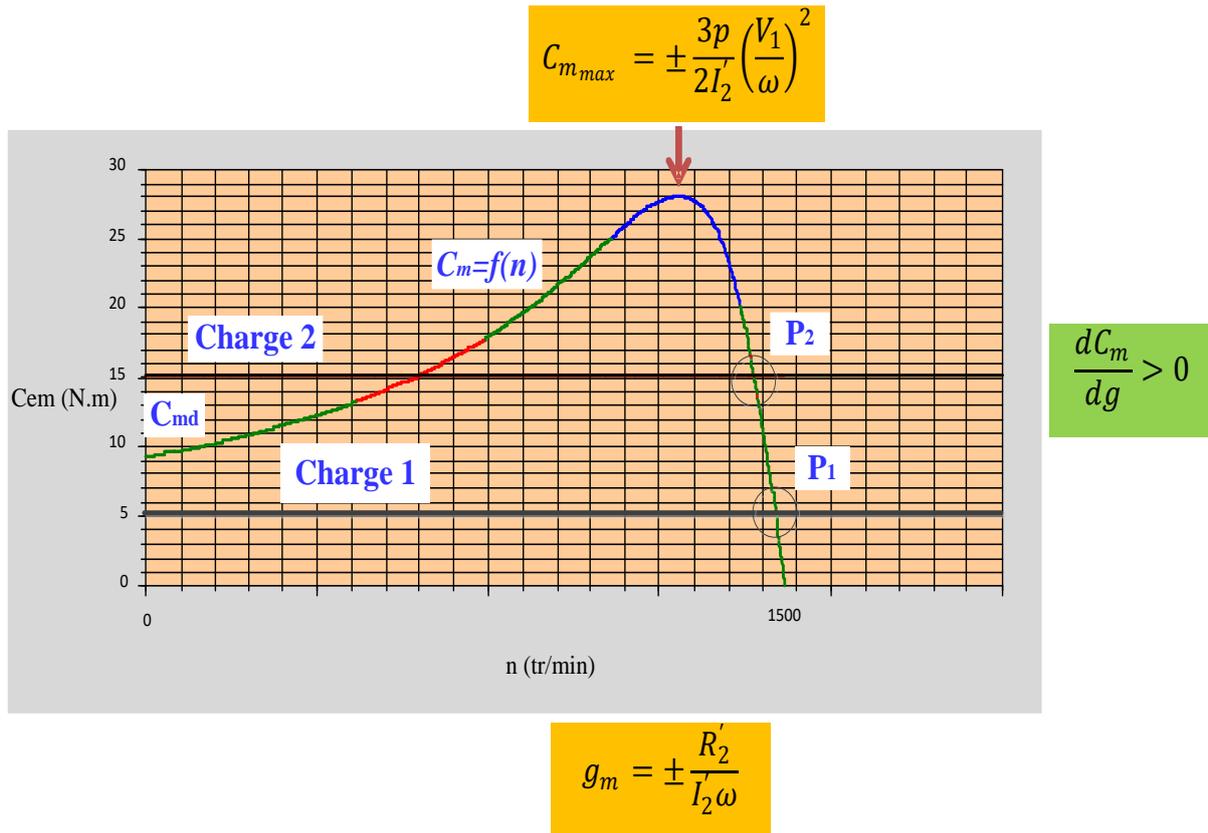


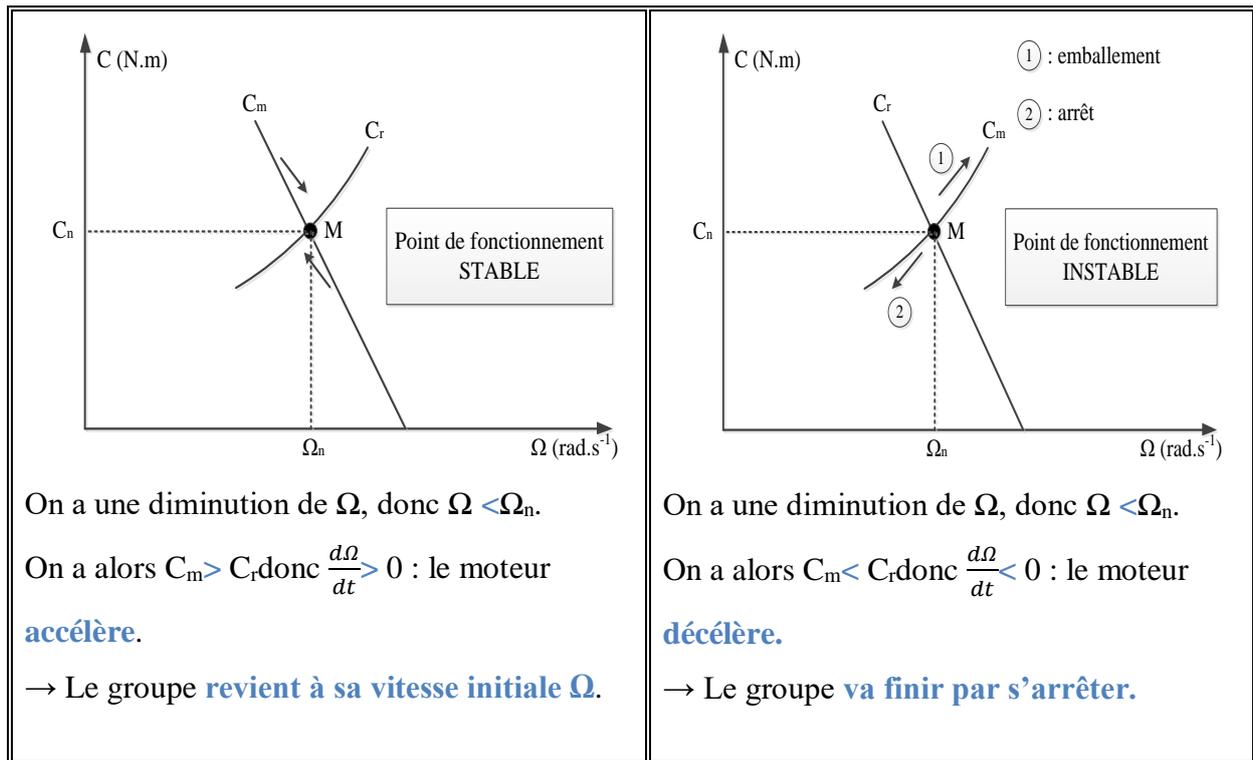
Figure (2.18) : Caractéristique vitesse vs couple du moteur à induction

Au démarrage, il faut que $C_m > C_r$ sinon le moteur n'accélère pas et ne pourra donc pas démarrer. Exemple d'un moteur asynchrone entraînant une charge à couple résistant constant :

- ∞ Pour l'entraînement de la charge 1, le couple utile au démarrage (C_{md}) est supérieur au couple résistant de la charge. Le moteur démarrera et accélérera jusqu'à atteindre le point de fonctionnement P_1 .
- ∞ Pour l'entraînement de la charge 2, $C_{md} < C_r$, le moteur ne démarrera pas. Le point de fonctionnement P_2 est théoriquement possible mais ne peut pas être atteint dans ces conditions. Pour l'atteindre, il faut charger après démarrage ou intervenir sur les grandeurs électriques pour obtenir un C_{md} plus important.

On dit qu'un point de fonctionnement est stable lorsque toute modification de l'une des variables qui le caractérise entraîne une action correctrice qui tend à rétablir les valeurs initiales des variables.

Supposons par exemple que, pour une cause extérieure, le groupe ralentisse. Il y a deux possibilités selon le type de point de fonctionnement initial :



2.6.2.2 Moteur synchrone

Les Moteurs Synchrones sont des moteurs à courant alternatif (c.a.) et sont le plus souvent utilisées pour les applications industrielles de très grande puissance ou dans les cas où une vitesse précise est nécessaire. On les subdivise comme suit :

- ✓ les machines à pôles lisses,
- ✓ les machines à pôles saillants.

Le coût initial d'un moteur synchrone est supérieur à celui d'un moteur à induction conventionnel en raison des frais du rotor bobiné et des circuits de synchronisation. Ces coûts initiaux sont souvent compensés par :

- ∞ La régulation précise de la vitesse du moteur synchrone exige le choix idéal pour certains processus industriels et comme moteur principal pour les générateurs.
- ∞ Les moteurs synchrones ont des caractéristiques de vitesse/couple qui sont parfaitement adaptées à l'entraînement direct de charges de grande puissance telles que les compresseurs alternatifs.

- Les moteurs synchrones fonctionnent à un facteur de puissance amélioré, améliorant ainsi le facteur de puissance global du système et éliminer ou réduire les pénalités liées au facteur de puissance du service public. Un facteur de puissance amélioré réduit également la chute de tension aux bornes du moteur.

Une caractéristique importante des machines synchrones à aimants permanent (MSAP) est le fait qu'à des vitesses non nulles, une tension contre-électromotrice non nulle induite dans les enroulements du stator par les aimants permanents. Cet effet peut être utilisé comme frein d'urgence pour ralentir la machine en court-circuitant les enroulements du stator. D'autre part, ce courant de court-circuit peut surcharger le convertisseur ou même détruire les appareils d'alimentation en cas de court-circuit. La valeur du courant de court-circuit dépend de la liaison de flux d'aimant permanent, ainsi que la résistance et l'inductance du stator et dans une certaine mesure sur la vitesse de la machine. Le courant de court-circuit atteint une limite à des vitesses plus élevées (Figure (2.19)). L'onduleur doit être conçu pour que ce courant évite une panne. Il est à noter que ce courant de court-circuit est parfois inférieur au courant nominal de la machine. De plus, le couple court-circuit est proportionnel au carré de la liaison de flux divisé par l'inductance du stator (Figure (2.19)).

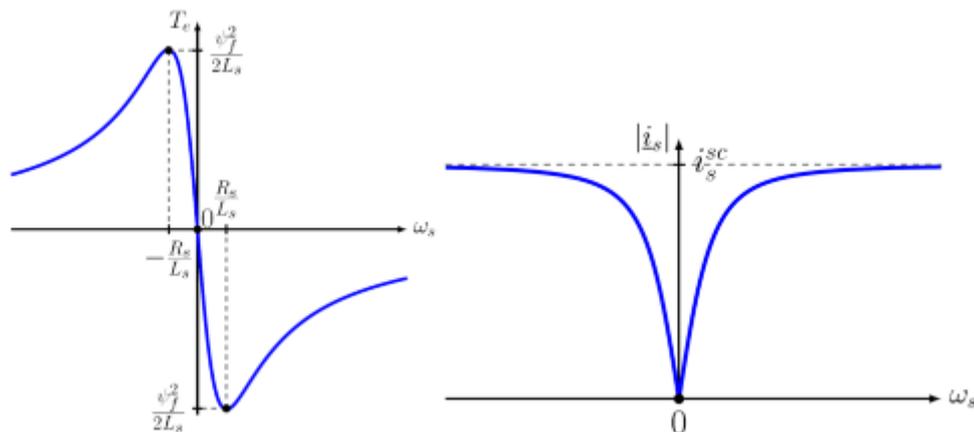


Figure (2.19) : Caractéristique couple-vitesse moteur MSAP

2.7 Conclusion

Ce chapitre se focalise sur les principes de fonctionnement et les caractéristiques des différents types des machines et des charges avec des explications à l'aide de brèves descriptions de machines, de schémas, des équations, etc. L'utilisation des moteurs dans le domaine industriel est devenue plus en plus exploitable avec l'évolution de l'électronique de puissance et des circuits basés sur les microcontrôleurs. Plus de 60% de l'énergie électrique

Chapitre 2 Caractéristiques des charges $C(\Omega)$

demandée par l'industrie est utilisée dans la motorisation électrique. Un objectif important dans la gestion de la demande électrique se situe au niveau du moteur et de la charge qu'il actionne. Lorsqu'on travaille dans des conditions de charge variable, qui sont très fréquentes dans l'industrie, la régulation de vitesse des moteurs en fonction des besoins s'impose. Il se substitue aux systèmes traditionnels de contrôle, responsables d'importantes pertes d'énergie, et permet d'obtenir des résultats énergétiques spectaculaires. Le chapitre suivant montre c'est circuits de commande et les différentes structures des convertisseurs d'électronique de puissance associée aux moteurs électriques.