

Génie électrique

Électrotechnique

Machines électriques tournantes

Notes de cours

Faculté de génie
Université de Sherbrooke

Note : En vue d'alléger le texte, le masculin est utilisé pour désigner les femmes et les hommes.

Document GEI345_Notes_de_Cours.doc

Version 3, 6/27/23

Rédigé par Cao Minh Ta <Cao.Minh.Ta@USherbrooke.ca>

Copyright © 202

Chapitre 1. Général

1.1 Rappel des équations de base

Le lien qui uni le couple exercé par un moteur à la force est donné par :

$$T = F \cdot r$$

Où T est le couple du moteur en [Nm]; F est la force en N appliquée à une distance r du centre de rotation de l'arbre (rayon)

La puissance P à la sortie d'un arbre est le produit de sa vitesse de rotation ω et du couple T transmis.

$$P = T \cdot \omega$$

La puissance peut aussi s'exprimer en terme du produit de la force F en [N] et de la vitesse v en [m/s] d'un objet.

$$P = F \cdot v$$

L'énergie cinétique d'un objet est donnée par l'équation suivante pour un objet se déplaçant selon une trajectoire linéaire :

$$W = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Où m est la masse de l'objet en [kg]

L'énergie cinétique d'un objet en rotation ayant un moment d'inertie J en [kg.m²] tel l'arbre d'un moteur est donné par l'équation suivante :

$$W = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2$$

Table I. Variables équivalentes du mouvement rectiligne et mouvement rotationnel

Mouvement linéaire (rectiligne)		Mouvement rotationnel	
Distance	s ou l [m]	θ [rad]	Position
Vitesse	v [m / s] $v = \omega r$	n [rpm], ω [rad / s] ω [rad / s] = $\frac{n \text{ [rpm]}}{60} \cdot 2\pi = \frac{n \text{ [rpm]}}{9.55}$	Vitesse angulaire
Accélération	a [m/s ²]	$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$ [rad/s ²]	Accélération angulaire
Mass	m [kg]	J [kg.m ²]	Moment d'inertie
Force	F [N]	T [N.m]	Couple
Puissance	$P = F.v$ [W]	$P = T.\omega$ [W]	Puissance
Énergie	$W = \frac{1}{2}mv^2$ [J]	$W = \frac{1}{2}J\omega^2$ [J]	Énergie

Équations de mouvement :

La deuxième loi de Newton

$$F = m.a$$

$$T = J.\varepsilon$$

Équation de mouvement (équation dynamique)

$$F - F_{res} = m \frac{dv}{dt}$$

$$T - T_L = J \frac{d\omega}{dt}$$

$$T > T_L ; \varepsilon > 0$$

$$T < T_L ; \varepsilon < 0$$

$$T = T_L ; \varepsilon = 0 ; \omega = \text{const}$$

Où T est le couple développé par moteur en [N.m], T_L est le couple de charge en [N.m]. F est la force développée par moteur en [N], F_{res} est la force résistive en [N].

1.2. Système électromécanique, mécatronique

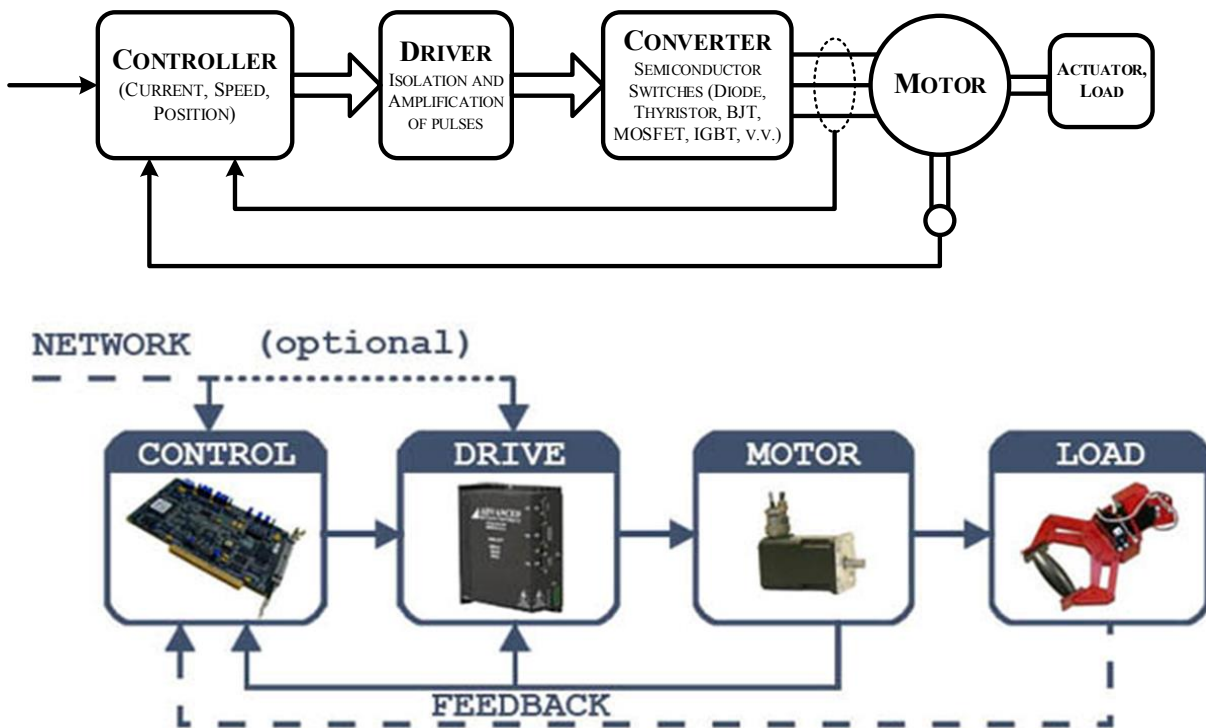


Fig. 1a. Système électromécanique

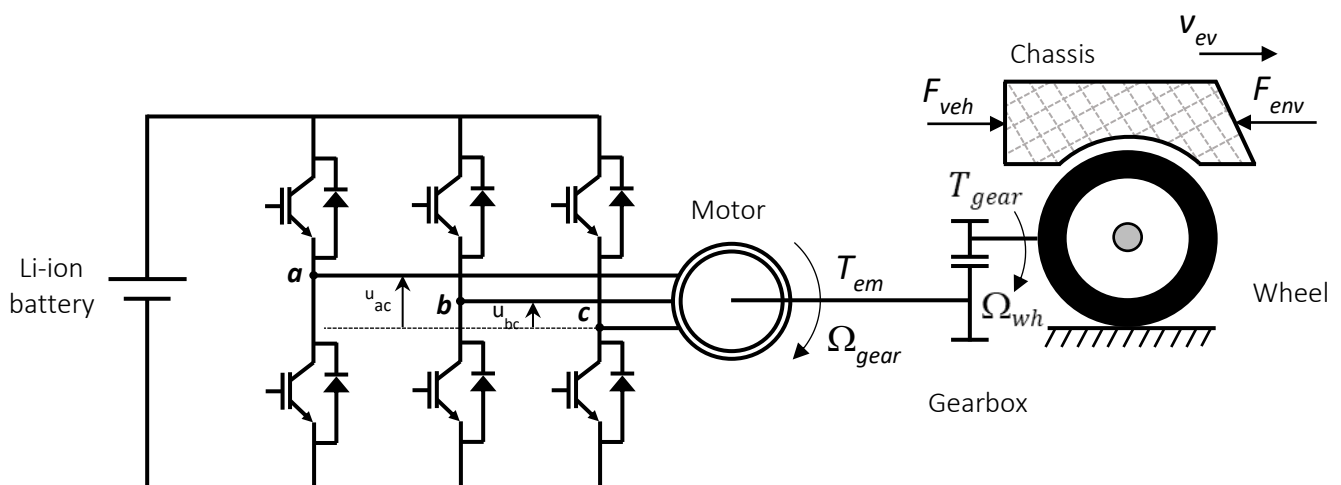


Fig. 1b. Système électromécanique : exemple de véhicule électrique.

1.3 Caractéristiques couple-vitesse de différents procédés

Speed-couple caractéristique est une relation entre le couple et la vitesse (le couple en fonction de vitesse, ou inversement, la vitesse en fonction de couple)

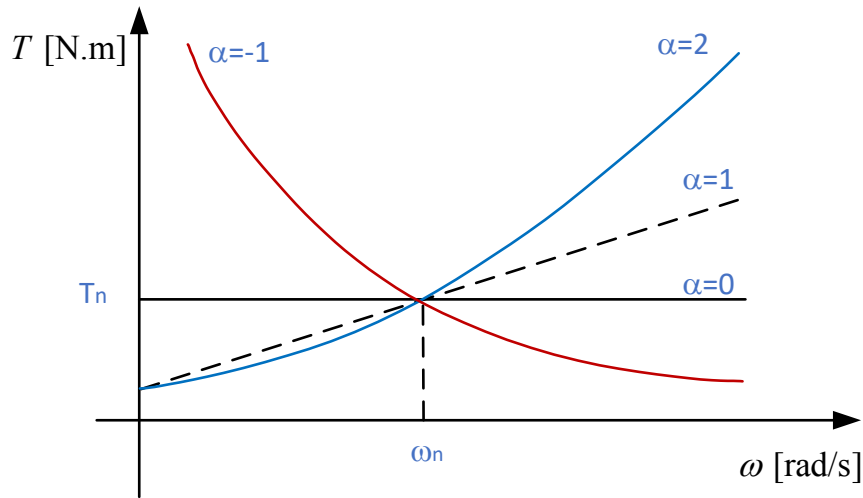


Fig. 2. Caractéristiques couple-vitesse de différents procédés

Équations de charge :

$$T_L = T_0 + (T_n - T_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^\alpha$$

$$\alpha = 0 \rightarrow T_L = T_n$$

Charge potentielle (e.g. Ascenseur)

$$\alpha = 1 \rightarrow T_L = T_0 + \frac{(T_n - T_0)}{\omega_n} \cdot \omega = a + b \cdot x$$

Charge linéaire

$$\alpha = -1 \rightarrow T_L = T_0 + (T_n - T_0) \cdot \omega_n \cdot \frac{1}{\omega} = a + b \cdot \frac{1}{x}$$

Charge inverse (hyperbole),
(e.g. véhicules, trains)

$$\alpha = 2 \rightarrow T_L = T_0 + \frac{(T_n - T_0)}{\omega_n^2} \cdot \omega^2 = a + b \cdot x^2$$

Charge carrée (hyperbole),
(e.g. ventilateurs, pompes)

1.4. Caractéristiques couple-vitesse de différentes machines

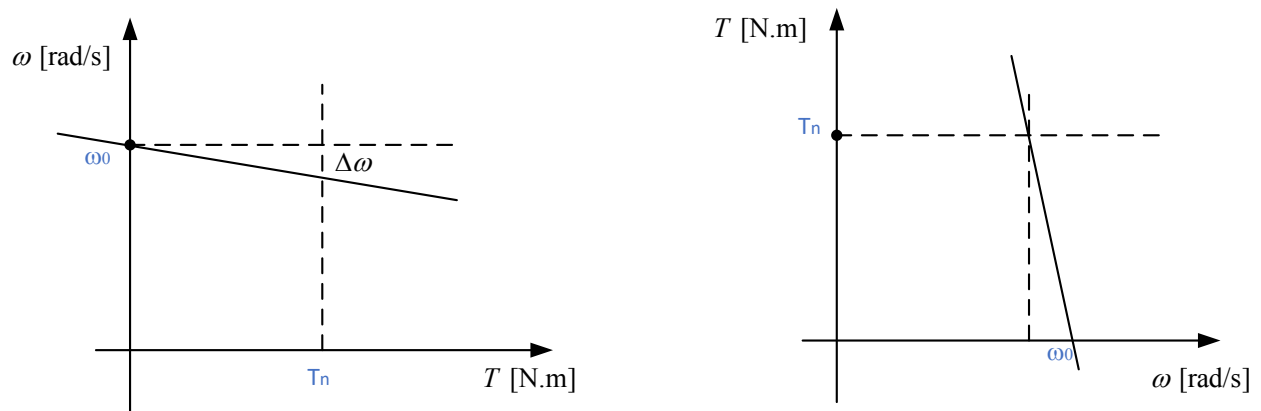


Fig. 3. Caractéristique d'une machine à courant continu à excitation séparée.

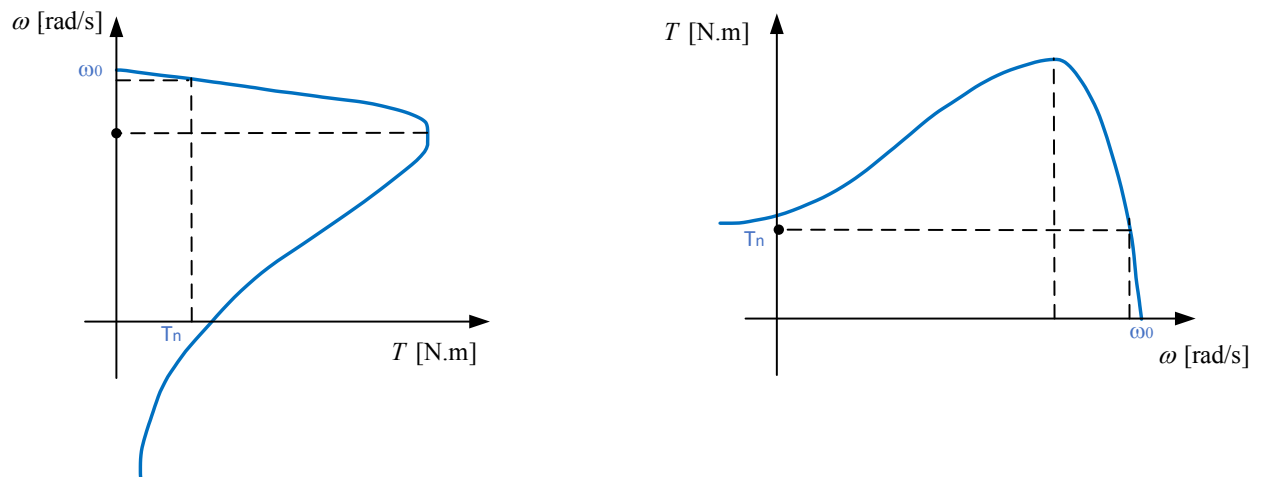


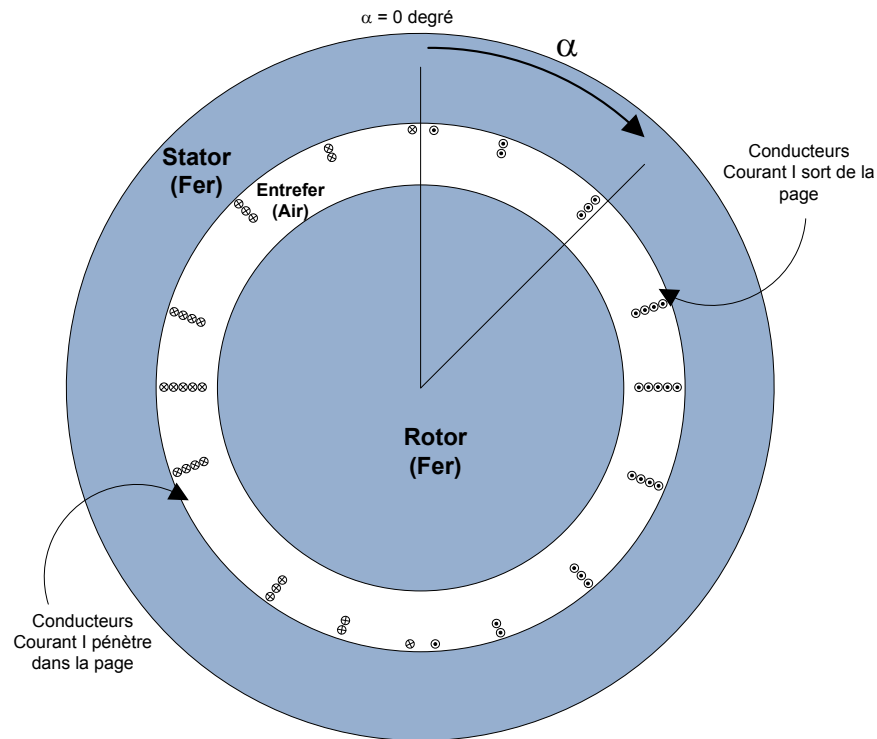
Fig. 4. Caractéristique d'une machine à courant alternatif triphasée : machine asynchrone

Chapitre 2. Moteur asynchrone triphasé

2.1 Champ tournant dans une machine triphasé

Démonstration mathématique de l'existence d'un champ tournant dans un stator triphasé.

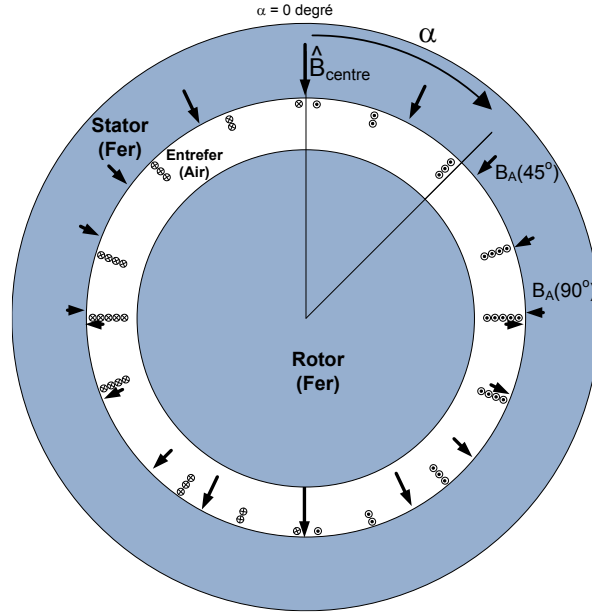
Soit un bobinage A où les enroulements sont distribués sur le pourtour intérieur du stator suivant une répartition sinusoïdale du nombre de conducteurs.



Lorsqu'un courant continu $i_A = I$ circulera dans ce bobinage, une induction magnétique B sera générée dans l'entrefer. Étant donné la répartition sinusoïdale des conducteurs du bobinage, l'induction B possèdera une valeur qui variera sinusoïdalement avec la position angulaire dans la machine, soit :

$$B_A(\alpha) = B_{centre} \cos(\alpha)$$

Où B_{centre} est l'induction produite par le bobinage dans l'entrefer à la position radiale $\alpha = 0$.



Sur cette figure, B_{centre} est représenté par la longueur de la flèche localisée à $\alpha = 0$ degré. Admettons maintenant que le courant circulant dans ce bobinage A n'est pas constant dans le temps, mais varie temporellement tel que :

$$i_A(t) = I \cos(\omega t)$$

Il en découlera que B_{centre} ne sera plus constant et qu'il variera sinusoïdalement en fonction du temps. Ainsi, l'induction dans l'entrefer pourra s'écrire :

$$B_A(\alpha, t) = \hat{B}_{\text{centre}} \cos(\omega t) \cos(\alpha)$$

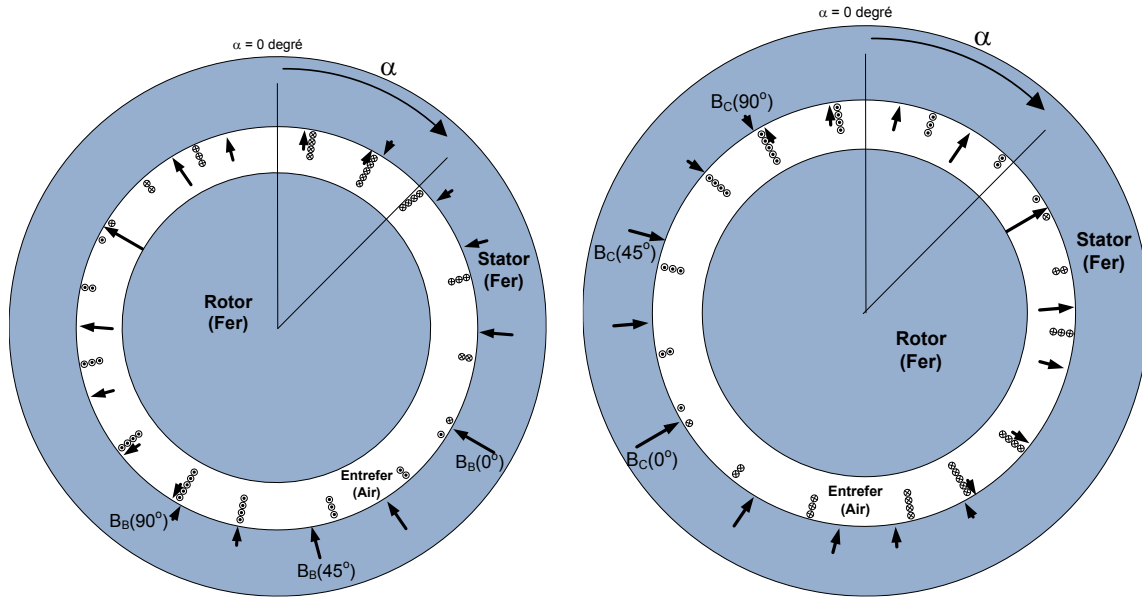
En utilisant les identités trigonométriques de Simpson, soit :

$$\cos(p) \cos(q) = \frac{1}{2} [\cos(p + q) + \cos(p - q)]$$

On réécrit l'induction générée par le bobinage A :

$$B_A(\alpha, t) = \frac{\hat{B}_{\text{centre}}}{2} \cos(\omega t + \alpha) + \frac{\hat{B}_{\text{centre}}}{2} \cos(\omega t - \alpha)$$

Si un second bobinage B et un troisième bobinage C sont également montés sur le pourtour intérieur du stator, que ces bobinages sont exactement identiques au bobinage A, à la différence que ceux-ci sont mécaniquement décalés d'un angle respectivement de 120 degrés et 240 degrés.



On pourra obtenir des inductions B_B et B_C tels que

$$B_B(\alpha, t) = \hat{B}_{centre} \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$B_C(\alpha, t) = \hat{B}_{centre} \cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cos\left(\alpha - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Que l'on exprime par une somme de cosinus, selon l'identité de Simpson, soit :

$$B_B(\alpha, t) = \frac{\hat{B}_{centre}}{2} \cos\left(\omega t + \alpha - \frac{4\pi}{3}\right) + \frac{\hat{B}_{centre}}{2} \cos(\omega t - \alpha)$$

$$B_C(\alpha, t) = \frac{\hat{B}_{centre}}{2} \cos\left(\omega t + \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{\hat{B}_{centre}}{2} \cos(\omega t - \alpha)$$

On obtiendra l'induction totale créée par les trois bobinages A, B et C en faisant la somme de B_A , B_B et B_C .

Ainsi, on obtient

$$B_{tot}(\alpha, t) = \frac{3\hat{B}_{centre}}{2} \cos(\omega t - \alpha) + \frac{\hat{B}_{centre}}{2} \cos(\omega t + \alpha) \\ + \frac{\hat{B}_{centre}}{2} \cos(\omega t + \alpha - \frac{2\pi}{3}) + \frac{\hat{B}_{centre}}{2} \cos(\omega t + \alpha - \frac{4\pi}{3})$$

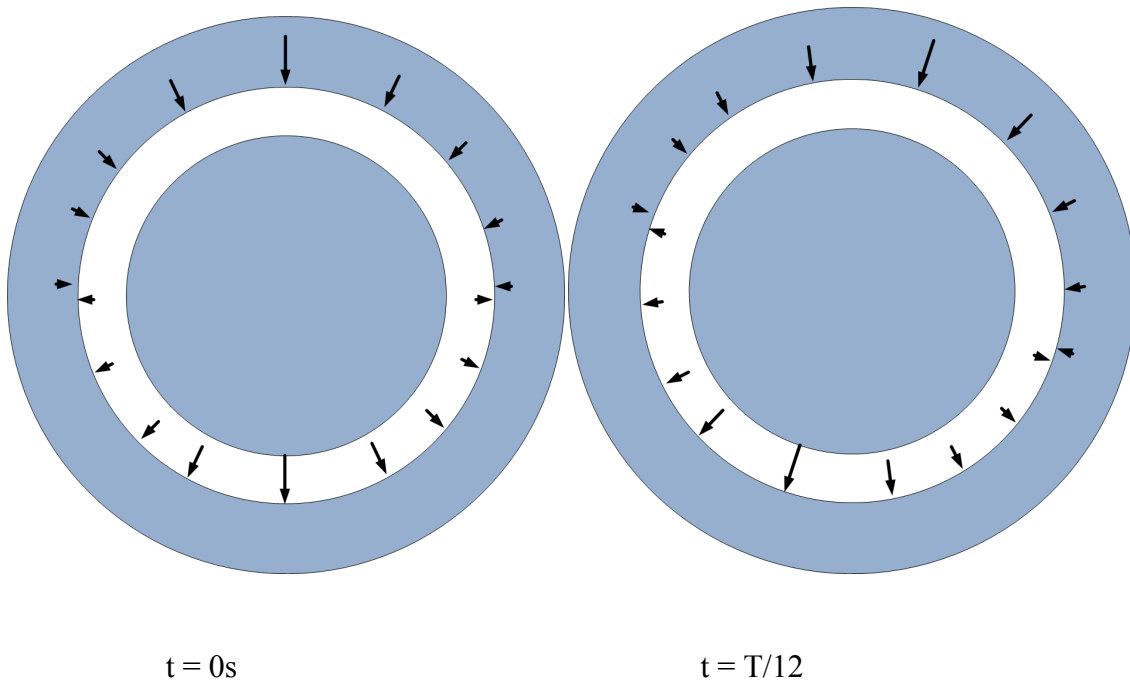
Étant donné que :

$$\cos(\beta) + \cos(\beta - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\beta - \frac{4\pi}{3}) = 0$$

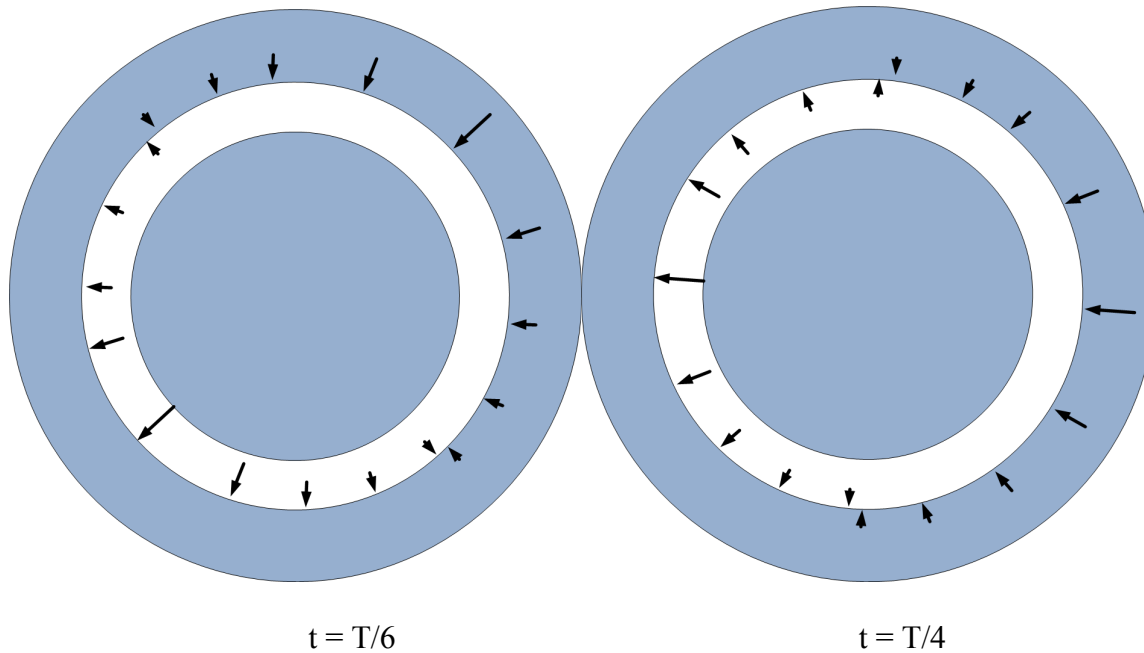
On obtient

$$B_{tot}(\alpha, t) = \frac{3\hat{B}_{centre}}{2} \cos(\omega t - \alpha)$$

La formulation mathématique finale de $B_{tot}(\alpha, t)$ possède la signification physique suivante : $B_{tot}(\alpha, t)$ se comporte comme une répartition sinusoïdale de l'induction magnétique, laquelle se déplace à une vitesse ω . Ainsi, si l'on trace $B_{tot}(\alpha, t)$ à différents instants $t = 0$, $t = T/12$, $t = T/6$, $t = T/4$, on obtient les répartitions suivantes.



Répartition des vecteurs induction magnétique B_{tot} à $t = 0$ et à $t = T/12$

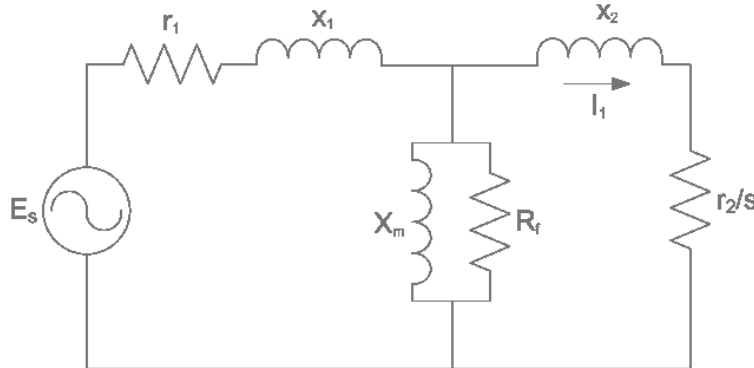


Répartition des vecteurs induction magnétique B_{tot} à $t = T/6$ et à $t = T/4$.

On a donc bien démontré que l'utilisation de trois bobinages décalés mécaniquement de 120 degrés l'un par rapport à l'autre et alimentés par des courants sinusoïdaux également déphasés de 120 degrés l'un par rapport à l'autre crée, au stator, un champ TOURNANT se déplaçant à une vitesse angulaire ω .

2.2 Moteur asynchrone triphasé – Circuit équivalent complet

On dérive ici la formulation mathématique exacte du couple utile d'un moteur asynchrone, à partir de son schéma électrique équivalent complet.



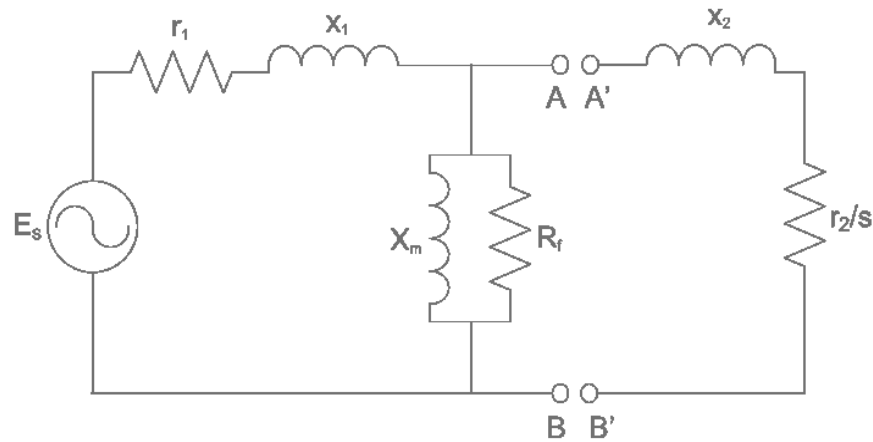
La puissance électromagnétique (puissance active) transmise au rotor est égale à (par phase):

$$P_r = I_1^2 \left[\frac{r_2}{s} \right]$$

Cette dernière expression, bien que simple, requiert la connaissance du courant I_1 dirigé vers le circuit rotorique. Le courant I_1 dépend des valeurs des six éléments du circuit équivalent et sa détermination nécessite un examen plus approfondi.

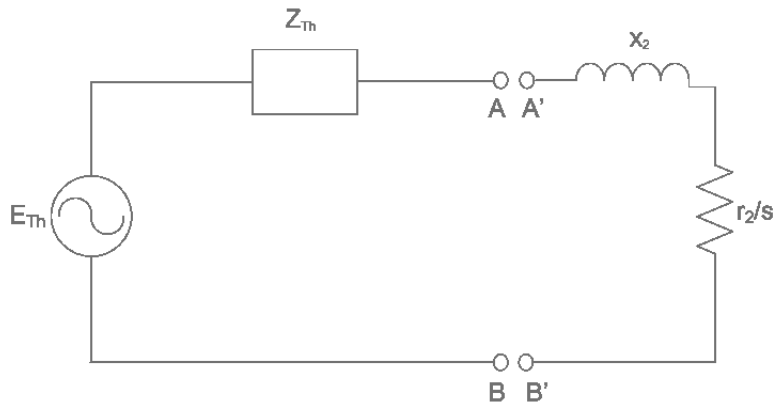
Il serait possible de déterminer une expression pour I_1 , en effectuant la mise en parallèle et la mise en série des impédances complexes (rappel : complexe = contenant une partie réelle et une partie imaginaire) de ce circuit. Toutefois, à l'application de ce procédé simple, on arrive à des expressions difficiles à traiter mathématiquement.

Il existe une seconde manière de procéder, afin de tirer le courant I_1 , qui consiste à utiliser le théorème de Thévenin. La portion de gauche du circuit équivalent (de la page précédente) et vue des points AB est constituée d'une source E_s et de quatre (4) impédances r_1 , X_1 , R_f , X_m .



Le théorème de Thévenin dit que tout circuit constitué d'une source et d'un ensemble d'impédances peut être modélisé par une seule source E_{Th} et une seule impédance Z_{Th} placée en série avec cette source.

Ainsi, on modélise le circuit équivalent de la machine asynchrone par le circuit modifié suivant :



Où selon le théorème de Thévenin la source équivalente E_{Th} est la tension aux bornes de A-B lorsque A'-B' est déconnecté, soit :

$$E_{Th} = E_S \left| \frac{[jX_m \parallel R_f]}{jX_m \parallel R_f + jx_1 + r_1} \right|$$

Soit

$$E_{Th} = kE_S$$

où

$$k = \left| \frac{[jX_m \parallel R_f]}{jX_m \parallel R_f + jx_1 + r_1} \right| \cong \frac{X_m}{\sqrt{(X_m + x_1)^2 + r_1^2}}$$

Selon le théorème de Thévenin l'impédance série équivalente Z_{Th} est égale à l'impédance vue des bornes de A-B lorsque A'-B' est déconnecté, et lorsque que la source E_s est remplacée par un court-circuit, soit :

$$Z_{Th} = \left\{ jX_m \parallel R_f \right\} \parallel [jx_1 + r_1]$$

$$Z_{Th} = \frac{r_1 \left[1 + \frac{x_1^2}{r_1 R_f} + \frac{r_1}{R_f} \right] + jx_1 \left[1 + \frac{r_1^2}{x_1 X_m} + \frac{x_1}{X_m} \right]}{\left(1 + \frac{x_1}{X_m} + \frac{r_1}{R_f} \right)^2 + \left(\frac{x_1}{R_f} - \frac{r_1}{X_m} \right)^2}$$

On peut généralement considérer que $r_1 \ll R_f$, $x_1 \ll R_f$, $r_1 \ll X_m$

$$Z_{Th} \cong \frac{r_1 \left[1 + \frac{x_1^2}{r_1 R_f} \right] + jx_1 \left[1 + \frac{r_1^2}{x_1 X_m} + \frac{x_1}{X_m} \right]}{\left(1 + \frac{x_1}{X_m} \right)^2}$$

Soit

$$Z_{Th} \cong r_{Th} + jx_{th}$$

Où

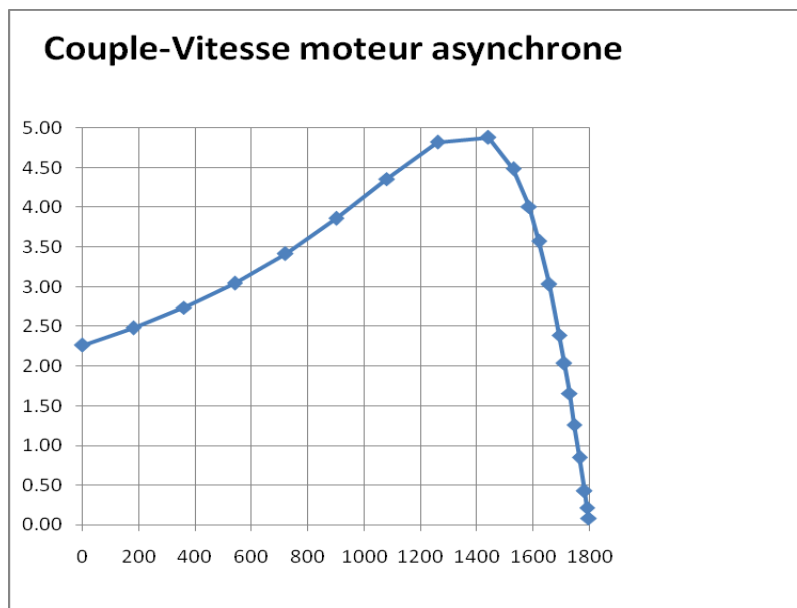
$$r_{Th} = \frac{r_1 \left[1 + \frac{x_1^2}{r_1 R_f} \right]}{\left(1 + \frac{x_1}{X_m} \right)^2} \quad x_{Th} = \frac{x_1 \left[1 + \frac{r_1^2}{x_1 X_m} + \frac{x_1}{X_m} \right]}{\left(1 + \frac{x_1}{X_m} \right)^2}$$

$$T_{em} = \frac{60}{2\pi} \frac{k^2 E_s^2 (n_s - n) r_2}{\left(r_{th} (n_s - n) + n_s r_2 \right)^2 + (n_s - n)^2 (x_{th} + x_2)^2}$$

Ce qui donne, pour un moteur triphasé (3 phases) :

$$T_{em} = \frac{180}{2\pi} \frac{k^2 E_s^2 (n_s - n) r_2}{\left(r_{th} (n_s - n) + n_s r_2 \right)^2 + (n_s - n)^2 (x_{th} + x_2)^2}$$

Polynôme dont la forme caractéristique est la suivante



2.3. Puissance électromagnétique, Puissance mécanique et Puissance utile

La puissance mécanique se déduira de la Puissance électromagnétique transmise au rotor, en soustrayant de P_r les pertes dans les barres rotoriques, égales à $3r_s I_1^2$. La puissance utile se déduira de la Puissance mécanique en y soustrayant les pertes rotationnelles par friction dans les roulements à billes et les pertes par frottement aérodynamique.

2.4. Couple de démarrage et de décrochage

Couple de démarrage :

En utilisant l'expression du couple électromagnétique par phase obtenu précédemment avec le schéma équivalent complet de la machine asynchrone, soit :

$$T_{em} = \frac{60}{2\pi n_s} \frac{k^2 E_s^2}{\left(r_{th} + \frac{r_2}{s}\right)^2 + (x_{th} + x_2)^2} \left[\frac{r_2}{s} \right]$$

On tire une expression du couple de démarrage $T_{démarrage}$ en considérant un glissement $s=1$. Pour un moteur triphasé, on obtient :

$$T_{démarrage} = \frac{180}{2\pi n_s} \frac{k^2 E_s^2 r_2}{(r_{th} + r_2)^2 + (x_{th} + x_2)^2}$$

Couple de décrochage :

Le couple de décrochage est le couple maximal que peut exercer le moteur sur sa charge. Si la charge mécanique augmente au-delà de cette valeur, le moteur ralentit et cale jusqu'à son arrêt complet. Le couple de décrochage correspond au pic de la courbe couple-vitesse du moteur. Ainsi, on détermine la valeur du glissement s à laquelle le décrochage se produit en annulant la dérivée de l'expression du couple.

$$\frac{dT_{em}}{ds} = \frac{d}{ds} \left(\frac{60}{2\pi n_s} \frac{k^2 E_s^2}{\left(r_{th} + \frac{r_2}{s}\right)^2 + (x_{th} + x_2)^2} \left[\frac{r_2}{s} \right] \right) = 0$$

Que l'on résout par les méthodes habituelles de dérivation. On obtient la valeur suivante pour le glissement maximal s_d :

$$s_d = \frac{r_2}{\sqrt{r_{th}^2 + (x_{th} + x_2)^2}}$$

En insérant cette expression du glissement maximal dans l'expression du couple électromagnétique, on détermine une expression analytique pour le couple de décrochage. Pour un moteur asynchrone triphasé, on obtient :

$$T_d = \frac{180}{2\pi n_s} \frac{k^2 E_s^2}{2 \left[r_{th} + \sqrt{r_{th}^2 + (x_{th} + x_2)^2} \right]}$$

Chapitre 3. Moteur à courant continu

3.1 Principe de fonctionnement du moteur à courant continu

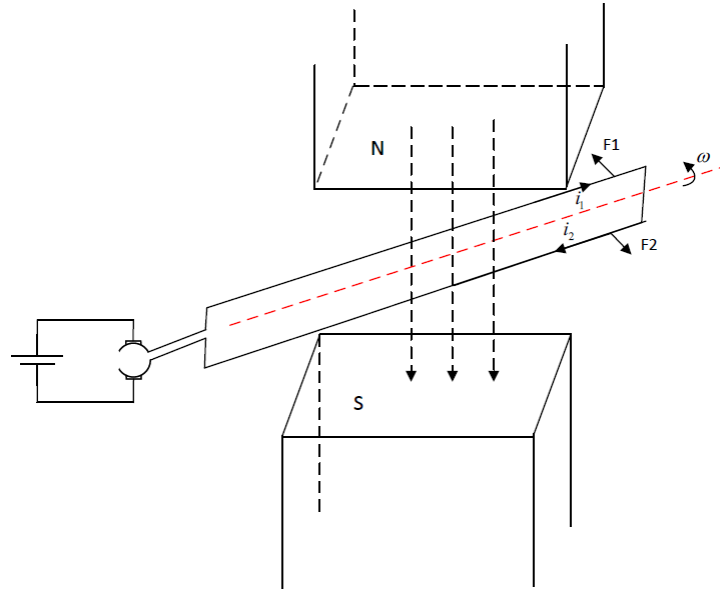


Fig. 3.1. Principe de fonctionnement du moteur à courant continu

Un moteur à courant continu à excitation séparée peut être représenté de manière simplifiée par le schéma électrique équivalent suivant :

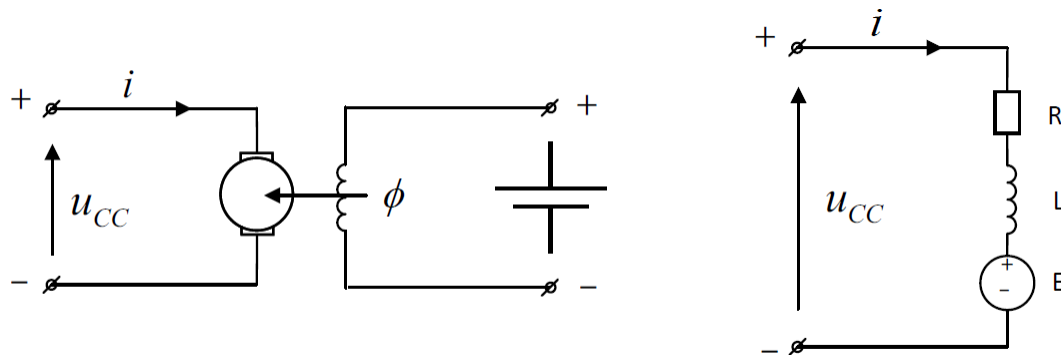


Fig. 3.2. Schéma équivalent de l'induit d'un moteur à courant continu à excitation séparée.

La tension aux bornes du moteur U est exprimée par l'équation suivante :

$$U = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + E \quad (1)$$

Où U est la tension d'alimentation du moteur, R et L sont la résistance et l'inductance d'enroulement de l'induit, E est la force contre électromotrice générée par la rotation du rotor et Ri représente la chute de tension causée par le passage du courant i .

La force contre électromotrice peut s'exprimer par l'équation suivante :

$$E = \frac{Z}{60} \cdot \phi \cdot n = \frac{Z \cdot \phi}{60} \cdot \omega \cdot \frac{60}{2\pi} = \frac{Z}{2\pi} \cdot \phi \cdot \omega = k_1 \cdot \phi \cdot \omega \quad (2)$$

Où Z le nombre de conducteurs actifs sur l'induit, n la vitesse de rotation du rotor en [rpm] (nombre de tours par minute), ω est la vitesse de rotation du rotor en [rad/s] et Φ est le flux magnétique en [Wb].

3.2 Modèle stationnaire du moteur à courant continu

Tout d'abord, nous considérons le cas où le flux Φ du moteur est maintenu constant. La majorité du temps un moteur électrique est utilisé en régime stationnaire, c'est-à-dire que $\frac{di}{dt} = 0$ ce qui permet de simplifier l'équation générale du modèle à :

$$i \approx \text{const} \rightarrow \frac{di}{dt} = 0$$

$$U = R \cdot I + E \quad (3)$$

$$U = R \cdot I + \frac{Z}{2\pi} \cdot \phi \cdot \omega$$

$$\omega = \frac{U}{\frac{Z}{2\pi} \cdot \phi} - \frac{R \cdot I}{\frac{Z}{2\pi} \cdot \phi} \quad (4)$$

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega|_I$$

$$\phi = \text{const} \rightarrow \omega = f(I)|_U$$

Nous pouvons avoir la relation linéaire entre la vitesse de rotation et le courant, ce qui peut être montrée sur la Fig. 7. Cette relation linéaire est appelée *caractéristiques électromécaniques* du moteur à courant continu.

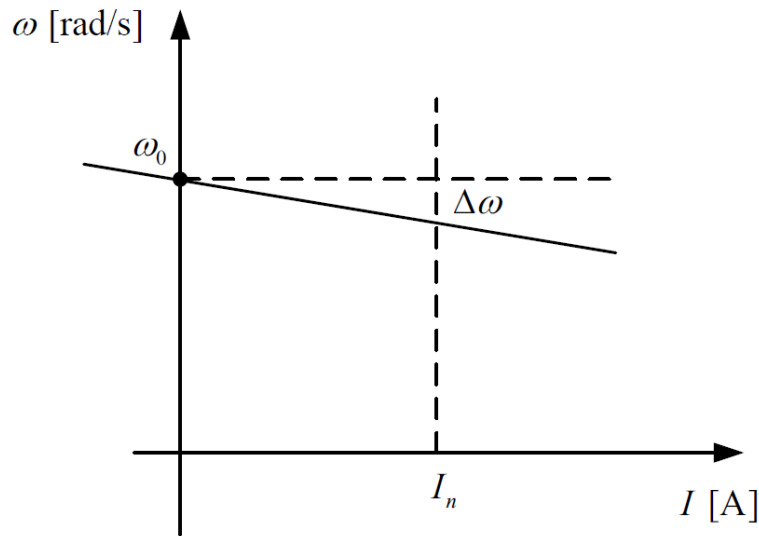


Fig. 3.3. Caractéristiques électromécaniques du moteur à courant continu.

Le couple développé par le moteur est le résultat de l'interaction entre le courant et le flux.

$$T = \frac{Z}{2\pi} \phi \cdot I \quad (5)$$

D'après l'équation (5) on peut obtenir le courant sous la forme :

$$I = \frac{T}{\frac{Z}{2\pi} \phi} \quad (6)$$

En remplaçant (6) en (4), nous pouvons avoir la relation entre le couple et la vitesse de rotation, ce qui est appelée les *caractéristiques mécaniques* du moteur à courant continu

$$\omega = \frac{U}{\frac{Z}{2\pi} \phi} - \frac{R}{\left(\frac{Z}{2\pi} \phi\right)^2} \cdot T \quad (7)$$

$$\phi = \text{const} \rightarrow \omega = f(T) \Big|_U$$

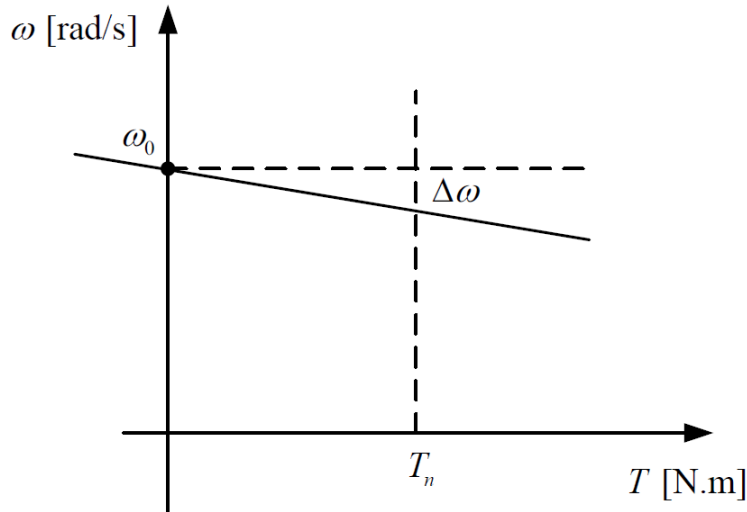


Fig. 3.4. Caractéristiques mécaniques du moteur à courant continu.

On définit la constante de force contre-électromotrice k_e ou k_{emf} (en $V/\text{rad.s}^{-1}$) et la constante de couple k_T (en $N.m/A$) tel que :

$$k_e = k_{emf} = k_T = \frac{Z}{2\pi} = k_1$$

On écrit à nouveau les équations électromécaniques de la machine sous la forme :

$$T = k_T \cdot \phi \cdot I \quad \text{et} \quad E = k_e \cdot \phi \cdot \omega$$

3.3 Puissance d'un moteur et la relation couple - vitesse

Dérivation de la caractéristique couple-vitesse d'un moteur CC à excitation indépendante (aussi appelé « à excitation séparée ») :

On écrit ici la relation générale liant la puissance mécanique et le couple :

$$P_{mec} = T \cdot \omega = T \cdot \left(2\pi \frac{n}{60} \right)$$

Où n est la vitesse de rotation du rotor en [rpm] (nombre de tours par minute), ω est la vitesse de rotation du rotor en [rad/s].

Un moteur CC à excitation indépendante alimenté par une source de tension U possèdera le schéma équivalent suivant :

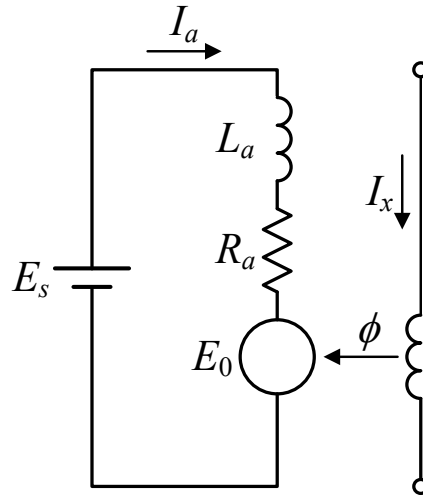


Fig. 3.5. Modèle d'un moteur CC

On pourra déduire de ce schéma une seconde expression de la puissance mécanique, en effectuant un bilan de puissance. Ainsi, selon la loi de conservation de l'énergie, la puissance fournie par la source se divisera en deux : la puissance dissipée en chaleur dans R et la puissance électromagnétique. Celle-ci pourra donc s'écrire :

$$P_{em} = E \cdot I$$

La puissance électromagnétique P_{em} est ici la somme de la puissance fournie à la charge (ou Puissance utile P_u) et des pertes mécaniques rotationnelles P_{rot} causées par la friction dans les roulements à bille, ainsi que par le frottement de l'air sur les parties tournantes du rotor. D'où :

$$P_{em} = P_u + P_{rot}$$

Sachant que :

$$I = \frac{U - E}{R}$$

On obtient :

$$P_{em} = E \frac{U - E}{R}$$

En remplaçant E par son expression $E = \frac{Z}{2\pi} \cdot \Phi \cdot \omega = k_e \cdot \Phi \cdot \omega$

Où Z le nombre de conducteurs actifs sur l'induit et Φ est le flux magnétique en Wb.

$$P_{em} = (k_e \cdot \Phi \cdot \omega) \cdot \frac{U - k_e \cdot \Phi \cdot \omega}{R}$$

Avec l'égalité entre les deux expressions de P_{em} , et en considérant $P_{rot} = 0$, on aura :

$$T \cdot \omega = (k_e \cdot \Phi \cdot \omega) \cdot \frac{U - k_e \cdot \Phi \cdot \omega}{R}$$

Ou encore, isolé la vitesse Ω sur le membre de gauche de l'égalité :

$$\omega = \frac{U}{k_e \cdot \phi} - \frac{R}{(k_e \cdot \phi)^2} \cdot T$$

On constate que plus le moteur est chargé, plus sa vitesse diminue. Il y a un « calage » de la vitesse.

3.4 Contrôle de vitesse du moteur à courant continu

Principe de contrôle

D'après l'équation (4) et (7), nous pouvons voir que pour un courant ou un couple de charge donné, nous pouvons contrôler la vitesse du moteur en faisant varier la tension d'alimentation du moteur.

$$\omega = \frac{U_{cc}}{\frac{Z}{2\pi} \cdot \phi} - \frac{R \cdot I}{\frac{Z}{2\pi} \cdot \phi} \quad (4)$$

$$\omega = \frac{U_{cc}}{\frac{Z}{2\pi} \cdot \phi} - \frac{R}{\left(\frac{Z}{2\pi} \cdot \phi\right)^2} \cdot T \quad (7)$$

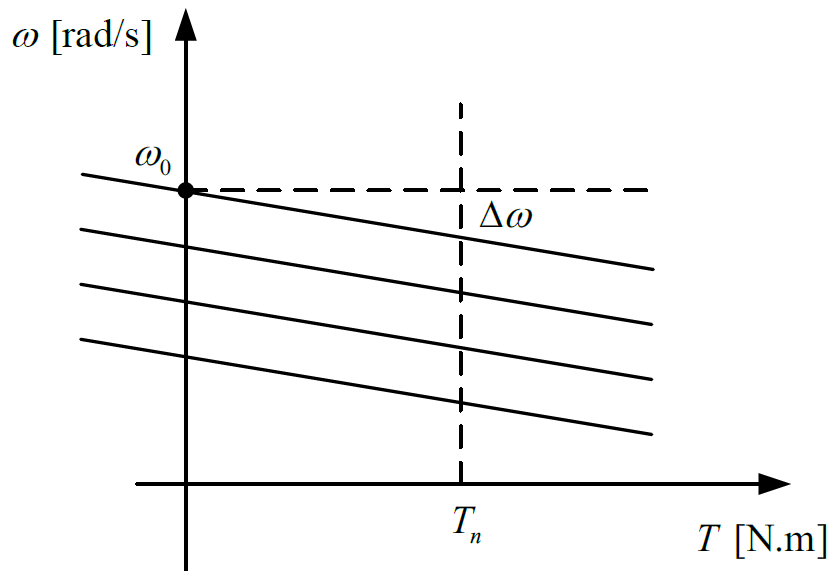


Fig. 3.6. Contrôle de vitesse du moteur en variant la tension d'alimentation

En variant la tension d'alimentation, on obtient les lignes parallèles de caractéristiques mécaniques. La vitesse du moteur est modifiée en conséquence. C'est la manière courante de contrôler la vitesse du moteur.

Note: Dans le cadre de ce cours, nous considérons que le flux de moteur est constant. L'opération d'affaiblissement de flux dans la région à grande vitesse sera abordée dans le cours avancé de Machines électriques ou le cours de Traction de véhicules électriques.

Variateurs de tension

Les convertisseurs statiques composés de commutateurs d'électronique de puissance (semi-conducteurs) font le rôle de variateurs de tension. Selon les applications, on peut voir différents types de convertisseurs (différents par nature, puissance ...).

a) Redresseur de la source AC

Le rôle d'un redresseur est de convertir l'alimentation AC en alimentation DC (réglable). L'alimentation AC peut être triphasée ou monophasée, selon la puissance du système contrôlé. Le schéma typique est illustré à la Fig. 10.

Applications: process industriel, machines outils, ...

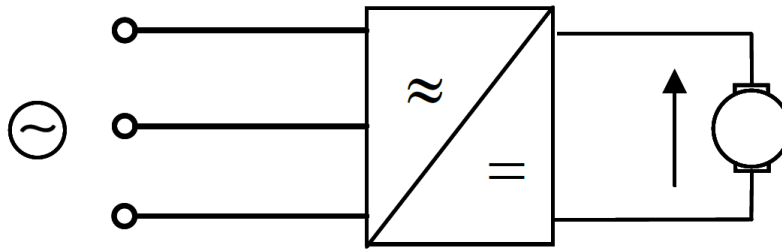


Fig. 3.7. Alimentation du moteur par un redresseur de la source AC

b) Convertisseur de la source CC (hacheur)

Le rôle d'un convertisseur CC / CC est de convertir l'alimentation CC à tension constante en alimentation CC à tension réglable. Le schéma typique est illustré à la Fig. 11.

Applications: Robotique, électroménager, véhicules électriques (vélos électriques, e-scooters, drones, ...)

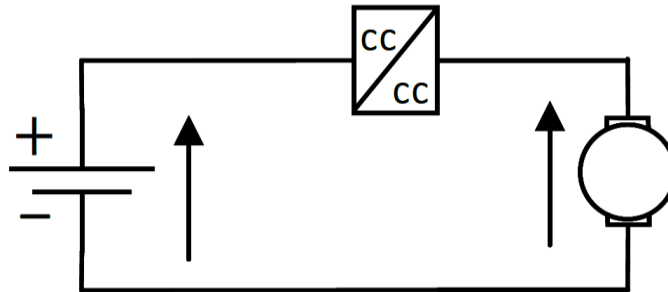


Fig. 3.8. Alimentation du moteur par un convertisseur CC / CC de la source CC

3.5 Fonctionnement du moteur à courant continu

Configuration de base

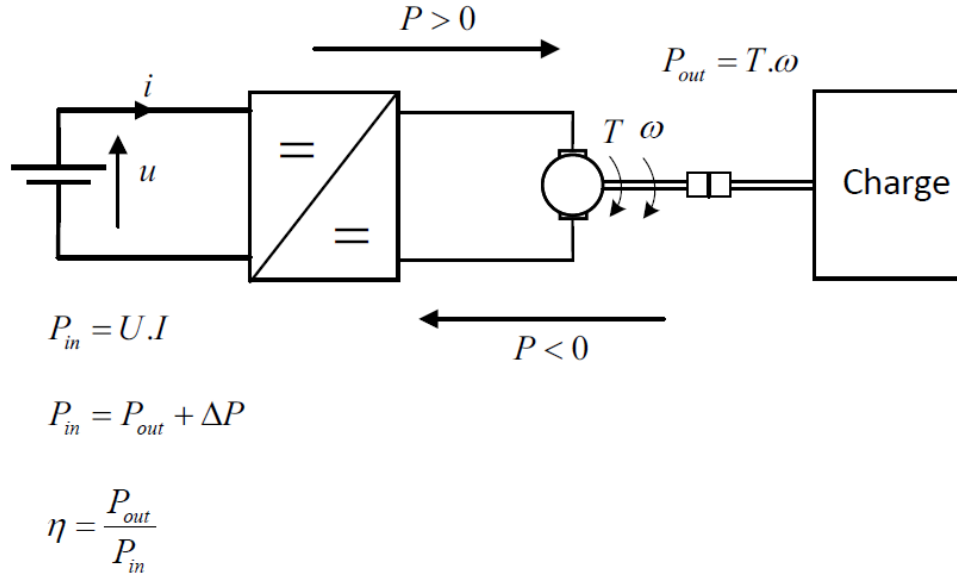


Fig. 3.9. Configuration de base de l'entraînement du moteur DC alimenté par une source CC

Bilan de puissances:

Puissance électrique à l'entrée :

$$P_e = U.I \quad (14)$$

Puissance mécanique, ou puissance utile à la sortie :

$$P_u = T.\omega \quad (15)$$

Bilan de puissance:

$$\begin{aligned}
 P_{input} &= P_{output} + \Delta P \\
 P_e &= P_u + \Delta P \\
 U.I &= T.\omega + \Delta P
 \end{aligned} \quad (16)$$

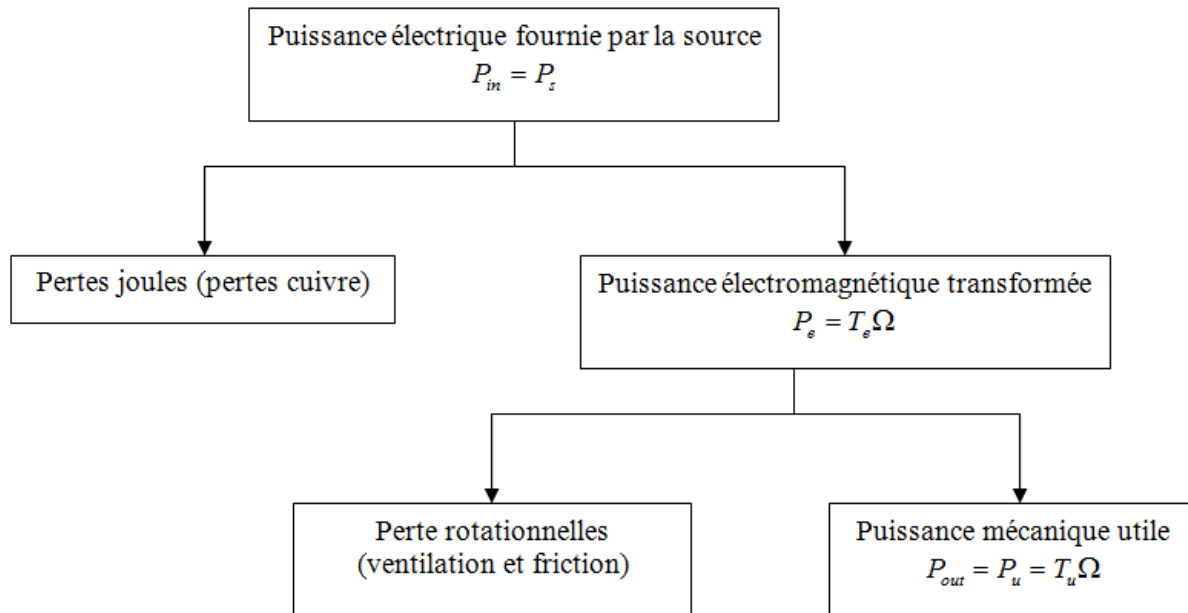
Où ΔP représente les pertes de puissance.

L'efficacité du moteur est le rapport de la puissance utile (à la sortie) et la puissance totale (à l'entrée) d'alimentation du moteur.

$$\eta = \frac{P_u}{P_e} = \frac{P_u}{P_u + \Delta P} = \frac{T.\omega}{U.I} \quad (17)$$

3.6 Pertes, échauffements, rendement des machines CC

Bilan de puissance active : Machine CC fonctionnant en moteur



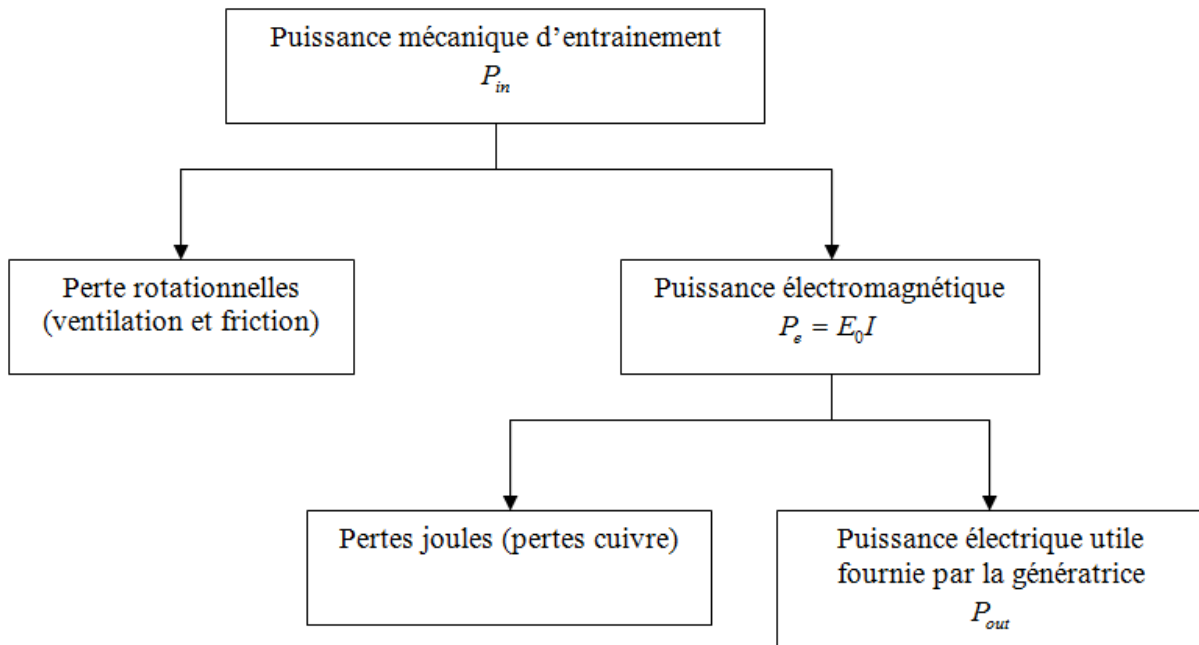
Avec :

$\Omega = \frac{2\pi n}{60}$, la vitesse de rotation en radian par seconde

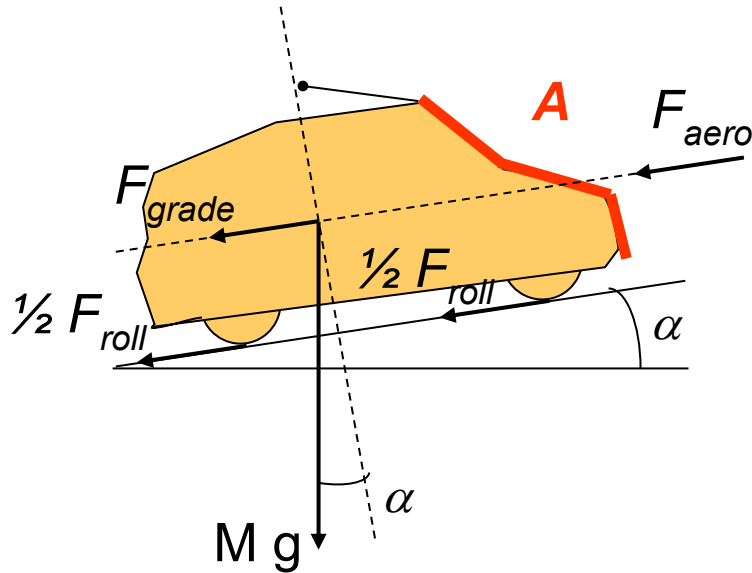
T_u , le couple mécanique utile en Newton mètre

T_e , le couple électromagnétique en Newton mètre

Bilan de puissance active : Machine CC fonctionnant en génératrice



Annexe – Équations de dynamiques et les forces pour un véhicule



La force totale sur un véhicule peut-être exprimée par :

$$F_{traction} = F_{accélération} + F_{res}$$

$$F_{traction} = F_a + F_{roll} + F_{aero} + F_p$$

$$F_{traction} = m_t \cdot a + F_{res}$$

$$F_{traction} = m_t \cdot \frac{dv_{ev}}{dt} + F_{res}$$

$$M_t \cdot \frac{dv_{ev}}{dt} = F_{traction} - F_{res}$$

La force d'accélération demandée par le conducteur ou par le système automatique de conduite est égale à

$$F_a = m_t a$$

Où m_t est la masse totale du véhicule et le conducteur en [kg], a est l'accélération demandée par le conducteur en [m/s²].

La force de résistance au roulement (due au frottement des pneus sur la route) F_{roll} , est égale à

$$F_{roll} = k_r \cdot m_t \cdot g \cdot \cos \alpha$$

Où k_r coefficient de résistance au roulement, α est angle de pente de surface. La pesanteur (accélération de gravité) g sur Terre est égale 9,8 N/kg ou 9,8 m/s² et la pesanteur g sur Mars est 3.49 N/kg ou 3.49 m/s²

La force de frottement aérodynamique (due à la friction de l'air) F_{aero} , est égale à

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \rho_{air} C_d A v^2$$

Où ρ_{air} est la densité de l'air, C_d est coefficient de trainée aérodynamique, A est surface frontale équivalente, v est la vitesse du véhicule en [m/s].

Note : $\rho_{air} = 1,225 \text{ kg/m}^3$ est la densité de l'air sur Terre à 15°C. La densité de l'air sur Mars est $\rho_{air} = 10^{-2} \text{ kg/m}^3$.

La force due à la pente de surface F_p est égale à

$$F_p = m_t \cdot g \cdot \sin \alpha$$