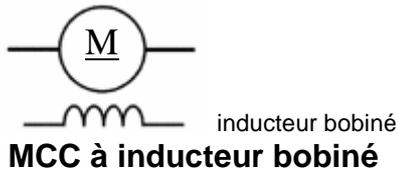


Machine à courant continu

Symboles



1 INTRODUCTION, PRINCIPE

1.1 HISTORIQUE

Le moteur à collecteur fut la première machine électrique inventée. L'histoire retient le nom de Zénobe Gramme pour sa première réalisation industrielle en 1871 (fig 1a). Wernher von Siemens proposa peu après la version à induit cylindrique de cette machine. Leur application rapide comme machine réversible (moteur et générateur) leur valut un franc succès et, dès 1880, des trains de mines furent électrifiés et un premier ascenseur électrique fut construit. Au début du 20^{ème} siècle, la traction électrique acquit ses lettres de noblesse, avec plusieurs vitesses record de 205 km/h. La première voiture à dépasser les 100 km/h était électrique...

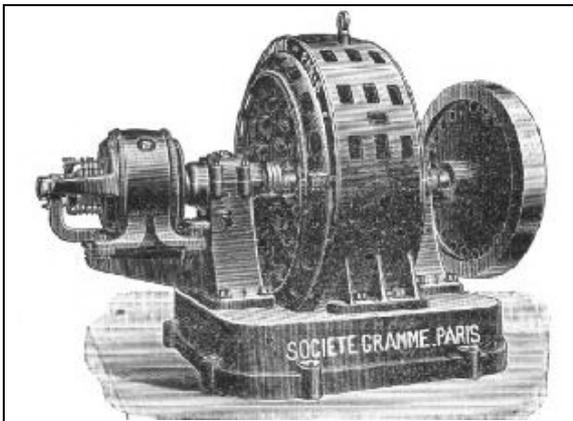


Fig. 1 Machine Gramme, induit en anneau

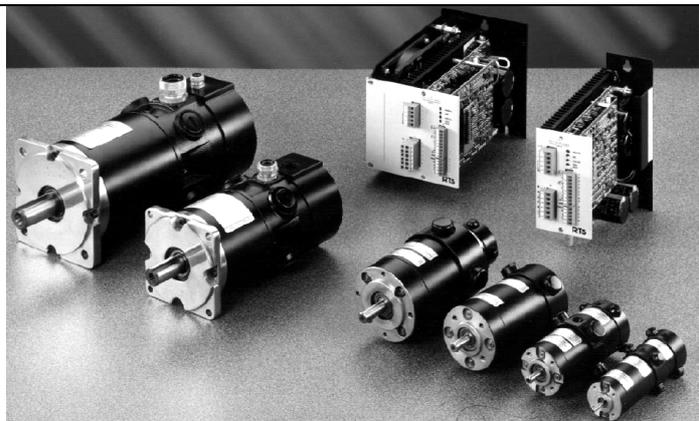
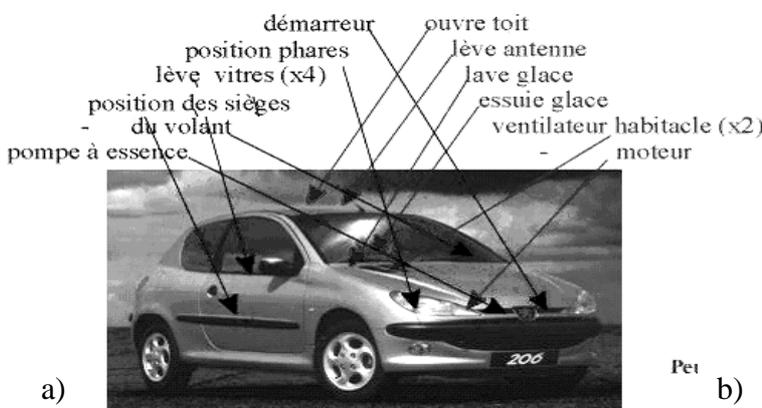


Fig.2 Servomoteurs robotique de 50W à 5kW (Parvex Dijon)

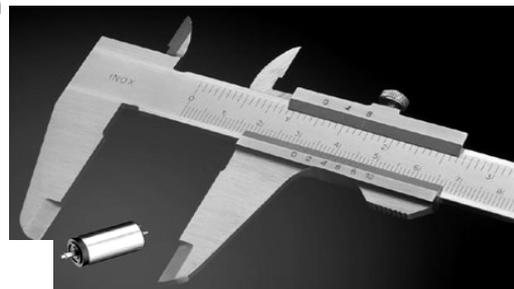
Les moteurs à courant continu ont pendant longtemps été les seuls aptes à la vitesse variable à large bande passante (fig.2. machines de robotique). Ils ont donc fait l'objet de nombreuses améliorations jusqu'à une époque récente. Ce sont les progrès de l'électronique de puissance qui ont détrôné les machines à collecteur et balais.

Les machines synchrones autopilotées ont l'équivalent d'un collecteur électronique et donnent accès à des vitesses de rotation très élevées, quelques dizaines de milliers de tour par minute pour l'UGV (Usinage à Grande Vitesse) et à une meilleure compacité.

On fabrique actuellement des millions de machines à courant continu, elles sont utilisées dans les applications grand public (fig.3), automobile, petits mécanismes (portails, volets roulants, jouets...).



a)



Pe1

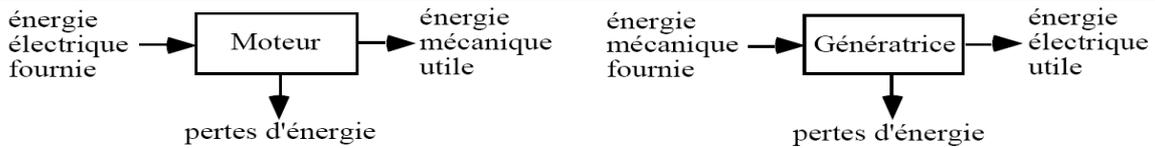
b)

Fig. 3 a) MCC dans l'automobile

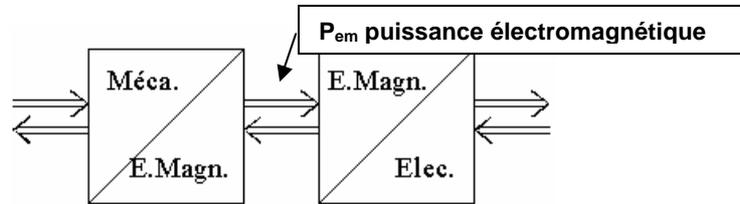
b) Moteur de 8 mm de diamètre, $P_u = 0,7W$, $T = 0,1Nm$

1.2 REVERSIBILITE DE LA CONVERSION ELECTROMECHANIQUE

Comme toutes les machines électriques, la machine à courant continu, est un convertisseur électromécanique réversible. Elle fonctionne en MOTEUR ou GENERATEUR



La conversion électromécanique utilise les phénomènes électromagnétiques qui se développent dans l'entrefer, l'énergie est alors sous forme électromagnétique.



1.3 CONSTITUTION ET PRINCIPE DU COLLECTEUR

Alimenter le moteur avec la bonne polarité

Représenter après une rotation de 45° à droite

Représenter après une rotation de 180° à droite

Commutation du collecteur, redresseur mécanique

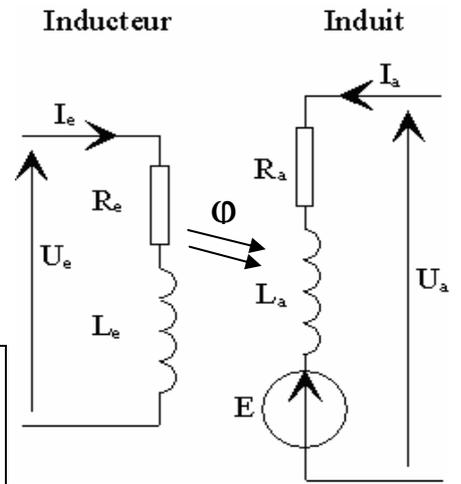
- L'ensemble des conducteurs du rotor constitue l'INDUIT
- La partie créant le champ magnétique est l'INDUCTEUR (bobiné ou à aimants permanents)
- Les lignes d'induction se développent dans un circuit magnétique comportant :
 - une partie fixe supportant l'inducteur,
 - une partie en rotation supportant l'induit
 - un entrefer
- Les conducteurs de l'induit parcourus par un courant I et dans le champ d'induction B sont le siège d'une force de Laplace selon le produit vectoriel : $\vec{dF} = I \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B}$, $d\vec{l}$ étant un élément de longueur du conducteur d'induit.
- Les conducteurs de l'induit se déplaçant dans le champ d'induction B à vitesse v sont le siège d'une fem induite e (loi de Faraday) telle que $e = d\vec{l} \cdot (\vec{v} \wedge \vec{B})$, $d\vec{l}$ étant un élément de longueur du conducteur d'induit.

2 MODELE ELECTRIQUE ET EQUATIONS

2.1 EQUATION ELECTRIQUE DE L'INDUIT

L'induit d'une MCC étant constitué d'un bobinage au voisinage d'un circuit magnétique en mouvement dans un champ magnétique, le modèle comporte :

- La résistance du bobinage d'induit R_a .
- L'inductance du bobinage d'induit L_a .
- Une FEM E non nulle lorsque la machine est en rotation,



Equation électrique de l'induit

2.2 RELATIONS DE COUPLAGE ELECTROMAGNETIQUE

2.2.1 MACHINE A INDUCTEUR BOBINE

L'inducteur, s'il est bobiné, se modélise par une résistance R_e et une inductance L_e . Comme il est immobile dans le champ, il n'y a pas de fem induite.

Equation électrique de l'inducteur :

Deux relations fondamentales de couplage électromagnétique interviennent entre les relations électriques et les relations mécaniques au niveau de l'entrefer.

Force électromotrice (FEM) $E = K_E \cdot \Omega \cdot \phi$ Couple électromagnétique $T_E = K_T \cdot \phi \cdot I_a$

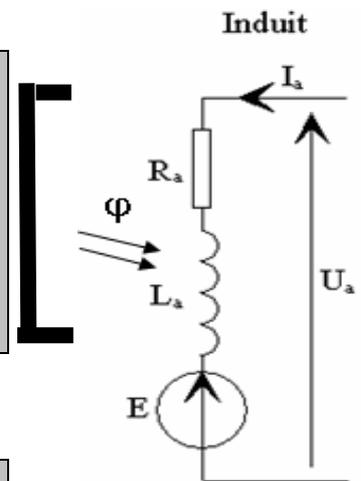
Avec Ω vitesse de rotation du rotor, K_e et K_T constantes de construction de la machine et ϕ flux inducteur.

2.2.2 MACHINE A AIMANTS PERMANENTS

Pour une machine à aimants permanents, le bobinage inducteur n'existe pas, le flux ϕ est fixé à la construction par l'aimant. Les relations de couplage deviennent :

Force électro motrice (FEM) $E = K_E \cdot \Omega$

Couple électromagnétique $T_E = K_T \cdot I_a$



CHOIX DES UNITES DANS LES RELATIONS DE COUPLAGES

Si la vitesse Ω est exprimée en rd/s, les constantes K_E et K_T ont même valeur.

Démonstration à partir de l'expression de la puissance électromagnétique P_{em} dans l'entrefer.

Expression électrique (1) $P_{em} = E \cdot I_a = K_E \cdot \Omega \cdot I_a$

Expression mécanique (2) $P_{em} = T_{em} \cdot \Omega = K_T \cdot I_a \cdot \Omega$ avec Ω nécessairement en rd/s

Pour P_{em} les deux résultats étant identiques, $K_T = K_E$ si Ω est en rd/s dans l'expression (1).

3 BILAN DES PUISSANCES (moteur et générateur)

Quelle que soit la transformation d'énergie et en considérant les pertes p , la puissance absorbée par un système P_a , la puissance utile P_u qu'il restitue et le rendement η sont liées par les relations :

$$P_a = P_u + p$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - p}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + p}$$

POUR UN FONCTIONNEMENT EN MOTEUR

On alimente la machine par une source de tension fournissant la puissance électrique P_a et la puissance utile P_u est délivrée sous forme mécanique à la charge par le rotor.

POUR UN FONCTIONNEMENT EN GENERATEUR

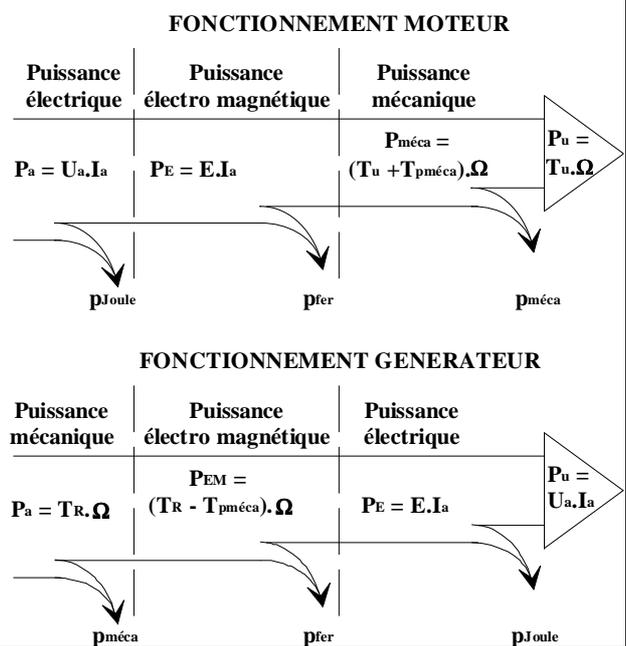
On entraîne le rotor mécaniquement en fournissant la puissance mécanique P_a et on récupère une puissance électrique P_u aux bornes de l'induit.

Un bilan des pertes p renseigne sur la machine. Elles sont d'ordre :

- Électrique (p_j) :
 - Pertes Joules dans l'induit = $R_a \cdot I_a^2$
 - Pertes Joules dans l'enroulement d'inducteur s'il existe = $R_e \cdot I_e^2$
- Magnétiques dans l'induit (p_F) :
 - Pertes par courants de Foucault
 - + Pertes par hystérésis.
- Mécaniques (p_m) :
 - Pertes par frottements.
 - Pertes par ventilation.

On en tire :

$$P_a = P_u + p_j + p_F + p_m$$



Puissance électromagnétique Pem

La conversion électromécanique a lieu dans l'entrefer de la machine, on y exprime la **puissance électromagnétique Pem**.

- Pour un fonctionnement en moteur : $P_{em} = P_a - R_a \cdot I_a^2 = E \cdot I_a$
- Pour un fonctionnement en générateur : $P_{em} = P_u + R_a \cdot I_a^2 = E \cdot I_a$

La puissance électrique transformée sous forme électromagnétique (moteur) a la même expression que la puissance électromagnétique transformée en puissance électrique (générateur).

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

Un changement du signe de P_{em} sera significatif d'une inversion du sens de transfert de l'énergie.

Le passage de générateur en moteur ou l'inverse est obtenu lors d'un changement unique de signe sur E^* ou I_a

- * L'inversion de E peut être obtenue par :
- L'inversion du sens de rotation donc du signe de la vitesse Ω de la machine
 - L'inversion du flux ϕ si la machine possède un inducteur bobiné

4 RÉGLAGE DE LA VITESSE DU MOTEUR A COURANT CONTINU :

4.1 EXPRESSION DE LA VITESSE :

L'expression de la vitesse du moteur est obtenue à partir de la relation donnant sa f.e.m. $E = K_E \cdot \Omega \cdot \phi$ et de la loi des mailles en convention récepteur.

- MCC à inducteur bobiné

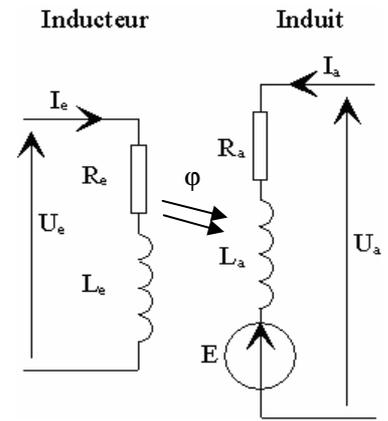
$$\Omega = \frac{U_a - R_a \cdot I_a}{K_E \cdot \phi}$$

- MCC à aimants permanents

$$\Omega = \frac{U_a - R_a \cdot I_a}{K_E}$$

Les paramètres agissant sur la vitesse du moteur sont :

- La tension d'alimentation U_a de l'induit,
- Le courant traversant l'induit I_a ,
- Le flux d'excitation ϕ de la machine si son inducteur est bobiné.



Mais I_a se comporte donc comme une **PERTURBATION** du système plutôt que comme un moyen de réglage (car le courant I_a dépend de la puissance appelée par la charge et de la tension d'induit ; $I_a \approx P_u / U_a$).

4.2 REGLAGE PAR LA TENSION D'INDUIT U_a

Si on néglige l'influence le terme $R_a \cdot I_a$ devant U_a , ce qui est admissible en dehors des faibles vitesses, on constate que la vitesse est proportionnelle à la tension d'alimentation de l'induit.

Soit pour une machine à aimants permanents.
$$\Omega \approx \frac{U_a}{K_E}$$

L'action sur U_a est retenue dans la majorité des applications avec une source de tension variable de type **HACHEUR**.

Si le réglage s'effectue à couple constant ($T_E = K_T \cdot I_a$), l'action sur la tension U_a n'affecte pas le courant I_a .

Il en résulte que la puissance électromagnétique fournie est proportionnelle à la vitesse $P_{em} = K_E \cdot \Omega \cdot I_a$

4.3 REGLAGE PAR LE FLUX

L'action sur le flux ϕ n'affecte pas la tension d'induit. Si le courant I_a est constant, la puissance électrique absorbée par l'induit est constante ($P_a = U_a \cdot I_a$). Le réglage s'effectue à **PUISSANCE CONSTANTE**.

L'exploitation des relations donnant le couple $T_E = K_T \cdot \phi \cdot I_a$ et la vitesse
$$\Omega = \frac{U_a - R_a \cdot I_a}{K_E \cdot \phi}$$
 montre que l'augmentation

de vitesse (quand ϕ diminue) est obtenue au détriment du couple.

5 CONTROLE COMPLET D'UNE MCC

5.1 QUADRANTS DE FONCTIONNEMENT

Conventionnellement lorsque La fem E et le courant d'induit I_a moyen sont positifs, la machine fonctionne dans le premier quadrant en mode moteur.

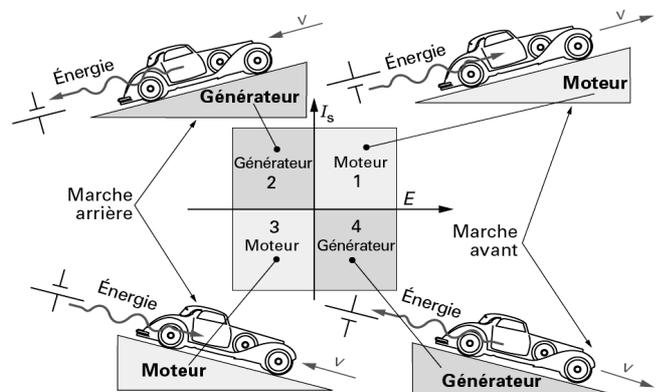
L'inversion d'un de ces deux termes permet d'obtenir un mode générateur (Quadrants 2 ou 4).

L'inversion simultanée des 2 termes permet d'obtenir un fonctionnement moteur avec un sens de rotation inversé (Quadrant 3).

Le fonctionnement en mode générateur nécessite une charge mécanique entraînant soit :

- momentanément par restitution d'énergie cinétique ou potentielle lors respectivement d'un freinage ou de la descente d'une charge mécanique (levage).
- En permanence lors d'un entraînement par un couple moteur extérieur (éolienne, turbine...).

L'accès à ces différents points de fonctionnements dépend fortement de l'électronique de puissance (hacheur) et de contrôle associée à la MCC.



5.2 LIMITES DE LA MCC EN VARIATION DE VITESSE :

Limite électrique $U_{a\text{maxi}}$ et $I_{a\text{maxi}}$:

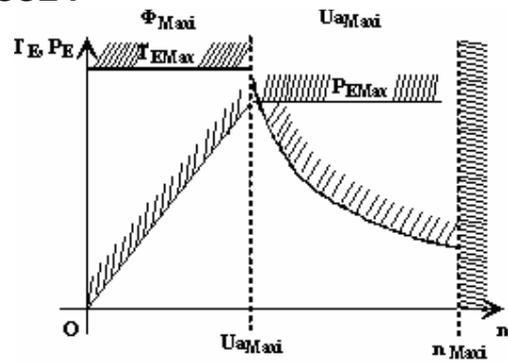
Donnée par la tenue en tension des isolants du bobinage d'induit et du collecteur, et la tenue en courant des conducteurs d'induit.

Limite mécanique n_{Maxi} :

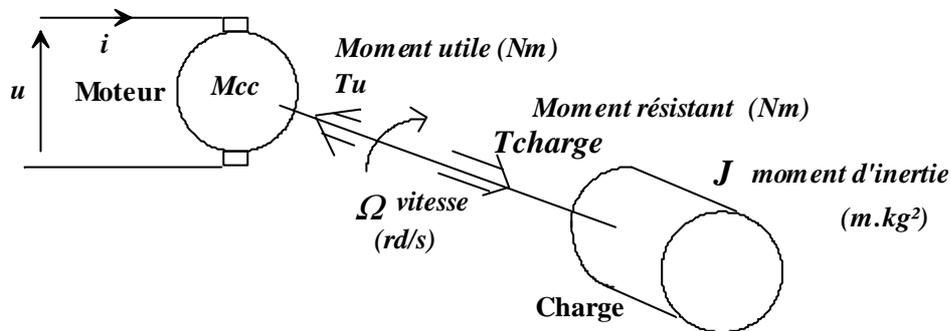
Fixée par la tenue mécanique des conducteurs à la périphérie de l'induit et des lames de collecteur (force centrifuge).

Limite thermique :

- Donnée par le courant maximal dans l'induit qui développe les pertes Joules $P_j = R_a \cdot I_a^2$.
- A basse vitesse la ventilation de la machine n'est pas suffisante, il faut alors la déclasser.



5.3 COMPORTEMENT DYNAMIQUE (régimes transitoires), PRINCIPE FONDAMENTAL DE LA DYNAMIQUE EN ROTATION



Lors des régimes transitoires (démarrage, changements de régime, etc., l'évolution du point de fonctionnement est régie par l'équation fondamentale de la dynamique des systèmes en rotation :

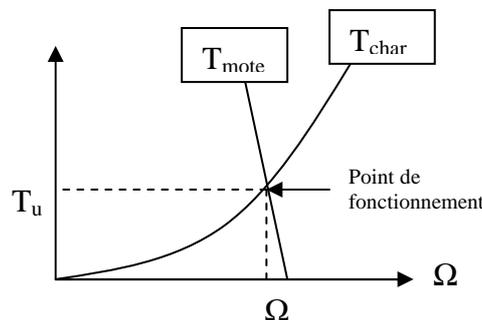
$$J_{\text{tot}} \frac{d\Omega}{dt} = T_u - T_r = T_{em} - T_p - T_r$$

Avec : J_{tot} : moment d'inertie total (moteur + charge) en kg.m^2

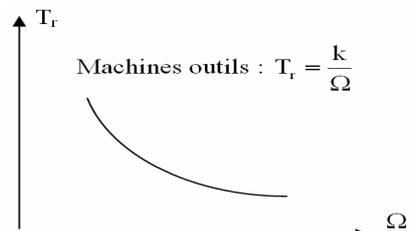
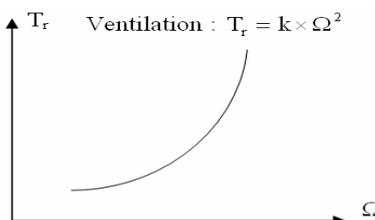
$\frac{d\Omega}{dt}$: Accélération angulaire de l'arbre moteur

Le moteur accélère quand $T_u > T_r$ ($\frac{d\Omega}{dt} > 0$) et ralenti quand $T_u < T_r$.

En régime permanent, le point de fonctionnement du moteur se situe à l'intersection de sa propre caractéristique couple/vitesse avec celle imposée par la charge qu'il entraîne et l'on a, à vitesse constante, $T_u = T_r$:



Couples ou moments résistants « types » :



6 FONCTION DE TRANSFERT ENTRE TENSION ET VITESSE D'UNE MCC

Pour une machine à aimants permanents, ayant une résistance d'induit R une inductance L et un coefficient de couplage K exprimé en unité SI. U et I sont les grandeurs électriques d'induit.

<p>Schéma électrique de l'induit</p>	<p>a) Equation électrique</p> <p>Introduction de la vitesse par E</p>
---	---

La charge mécanique correspond à un moment d'inertie J rapporté sur l'axe de la MCC, le couple résistant Tr est de type fluide (ou visqueux) $Tr = f \cdot \Omega$. Le couple électromagnétique est noté Tem.

<p>Schéma de l'entraînement avec données mécaniques</p>	<p>b) Equation mécanique (PFD)</p> <p>Introduction du courant par Tem</p>
--	---

Déduire des deux équations a et b, l'équation différentielle liant la tension U et la vitesse Ω .

La présenter sous la forme
$$K_0 \cdot U = \Omega + \frac{2m}{\omega_0} \cdot \frac{d\Omega}{dt} + \frac{1}{\omega_0^2} \cdot \frac{d^2\Omega}{dt^2}$$

Identifier les trois paramètres K_0 , ω_0 et m

Comportement transitoire selon la valeur de m

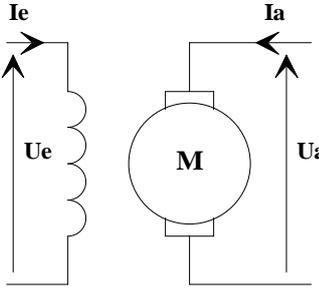
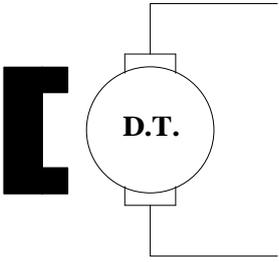
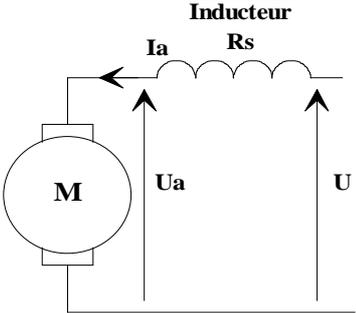
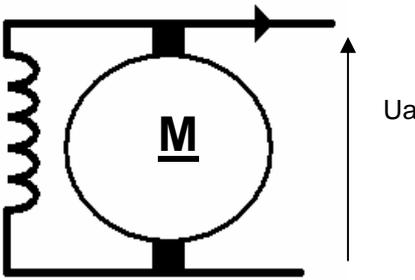
Pour le régime sinusoïdal établi $d/dt = j\omega$ donner la fonction de transfert complexe

$$H_{MCC} = \frac{\underline{\Omega}}{\underline{U}}$$

Donner le type de comportement fréquentiel d'une MCC.

7 DIVERS TYPES DE MACHINES A COURANT CONTINU

Les machines à courant continu se diversifient par le moyen employé pour créer le champ inducteur.

 <p>Inducteur Induit</p>	<p>Excitation indépendante :</p> <p>L'inducteur est alimenté par une source indépendante. Grande souplesse de commande. Utilisé en milieu industriel, associé avec un variateur électronique de vitesse et surtout sous la forme moteur d'asservissement. Large gamme de vitesse.</p> <p>Machines outils: Moteur de broche, d'axe.</p>
 <p>Inducteur Induit</p>	<p>Excitation par aimants permanents :</p> <p>On retrouve les caractéristiques de l'excitation indépendante sans action possible sur le flux. Les machines ne pourront pas dépasser la vitesse limite fixée par la tension d'alimentation maximale.</p> <p>Le développement de la technologie des aimants a permis la réalisation de machines de quelques mW à quelques kW.</p>
 <p>Induit</p>	<p>Excitation série ; moteur universel :</p> <p>Démarrage fréquent avec couple élevé; couple diminuant avec la vitesse. Traction ferroviaire, palans, ponts roulants, ventilateurs, pompes centrifuges.</p> <p>Pouvant être alimenté en courant alternatif, il sert à entraîner les appareils électroménagers pour lesquels une grande vitesse est requise (moulin à café, aspirateur, perceuse...).</p>
 <p>Ua</p>	<p>Excitation parallèle ; moteur universel :</p> <p>La mise en parallèle des 2 enroulements permet d'alimenter une MCC sous tension alternative. Il s'agit alors d'un moteur universel.</p> <p>L'inversion simultanée du flux ϕ et de la tension d'induit U_a donne toujours le même signe pour le couple donc le sens de rotation.</p> <p>Il suffit de feuilletter le circuit magnétique pour réduire les pertes fer de cette machine.</p> <p>Electroménager, outillage portatif...</p>