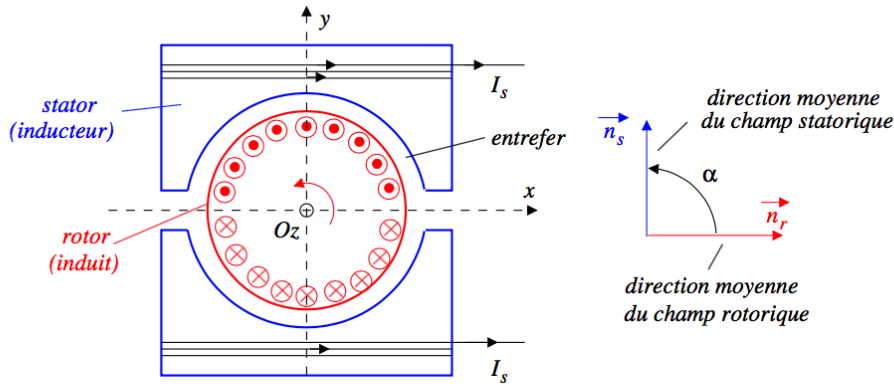


Machine à courant continu MCC

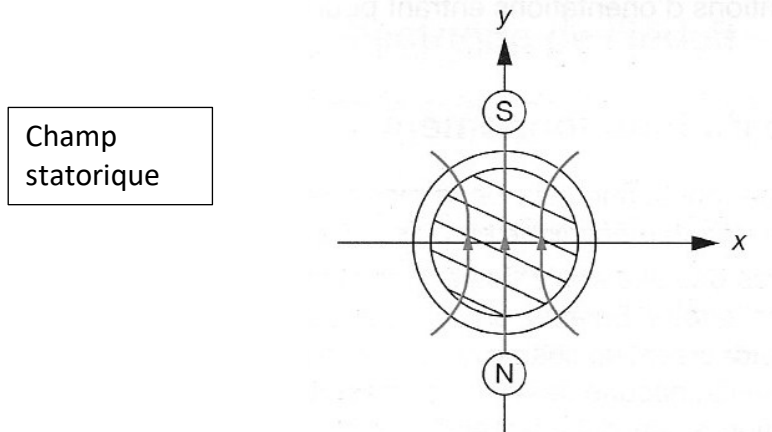
Les machines à courant continu font partie des convertisseurs électro-magnéto-mécanique réversibles. On s'intéresse par la suite aux machines à pôles lisses et à excitation séparée.

3.1 Structure d'un moteur à courant continu

Un moteur à courant continu comporte :



→ un **stator**, également appelé **inducteur**, fabriqué dans un matériau ferro-magnétique doux. L'enroulement inducteur parcouru par un courant permanent d'intensité I_s génère un champ magnétique, radial dans l'entrefer, et de direction



moyenne $\vec{u}_y$ (Cf. schéma). Pour un petit moteur, un simple aimant permanent peut suffire.

→ un **rotor**, mobile autour de l'axe Oz , comportant des encoches parallèles à l'axe abritant les conducteurs de l'enroulement induit. Cet enroulement est alimenté en courant continu d'intensité i par l'intermédiaire d'un **collecteur** qui assure la circulation du courant telle que représentée sur la figure.

Il en résulte un champ rotorique de direction moyenne $\vec{u}_x$.

3.2 Rôle du collecteur

Principe

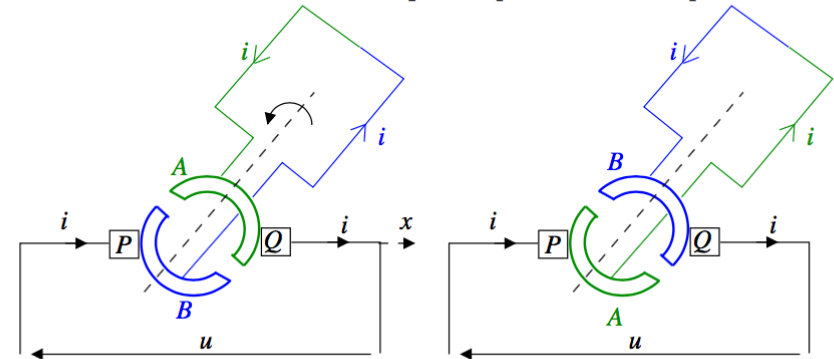
→ Dans le cas du moteur synchrone, nous avons constaté la présence d'un couple moteur lorsque les champs statorique et rotorique tournent de façon synchrone.

→ Pour un moteur à courant continu, le champ statorique $\vec{B}_s$ étant fixe et dirigé, en moyenne, selon $\vec{u}_y$, le champ rotorique doit lui aussi être fixe malgré la rotation du rotor !

→ Ceci est assuré par l'intermédiaire du collecteur qui assure que le courant dans les spires change de signe lorsque les spires traversent le plan neutre xOz .

Réalisation pratique

Pour simplifier, on considère la présence d'un unique enroulement pour le rotor. Le collecteur est un commutateur rotatif constitué de deux lames A et B connectées à l'enroulement et de deux balais P et Q connectés au circuit électrique extérieur. Les courants s'inversent lorsque la spire traverse le plan neutre.



Le collecteur est le point faible du moteur à courant continu. Le contact glissant entraîne une usure régulière des balais.

3.3 Couple

On peut alors assimiler la machine à courant continu à un moteur synchrone dans lequel α , l'angle entre le champ statorique et le champ rotorique est en permanence égal à $\pi/2$, ce qui donne pour le couple électromagnétique :

$$\Gamma_{em} = \Gamma_{max} \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = \Gamma_{max}$$

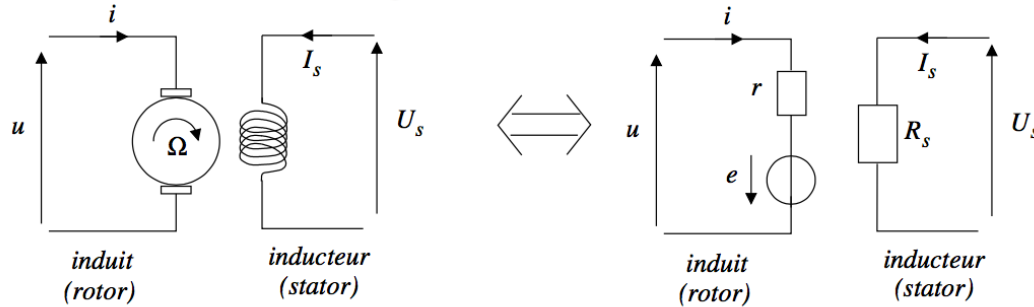
Ce couple est proportionnel à l'intensité i du courant qui circule dans le rotor et peut donc s'écrire :

$$\Gamma_{em} = \Phi_0 i$$

avec Φ_0 , la constante de couplage, homogène à un flux en weber (Wb), caractéristique du moteur et proportionnel au champ produit par l'inducteur.

3.4 Force contre-électromotrice

Représentons le schéma électrique équivalent du dispositif en régime entretenu, le rotor tournant à la vitesse angulaire Ω fixée.



→ Circuit statorique : le stator est parcouru par un courant permanent et le champ rotorique a une direction fixe, il n'y a pas de phénomène d'induction dans l'enroulement du stator qui est donc assimilé à une simple résistance R_s . **Le stator est l'inducteur.**

$$U_s = R_s I_s$$

→ Circuit rotorique : les spires du rotor tournant dans le champ du stator, il subit un phénomène d'induction, **le rotor est l'induit.**

$$u = ri - e$$

Le bilan énergétique s'écrit donc :

$$U_s I_s + ui = R_s I_s^2 + ri^2 - ei$$

On peut exprimer directement le bilan énergétique pour ce moteur : l'énergie

magnétique stockée dans le dispositif étant constante, la puissance électrique totale reçue par le système : $U_s I_s + ui$, va être dissipée par effet Joule et fournir la puissance mécanique pour faire tourner le rotor à la vitesse angulaire Ω , ce qui s'écrit :

$$U_s I_s + ui = R_s I_s^2 + ri^2 + \Gamma_{em} \Omega$$

La comparaison des deux expressions conduit à :

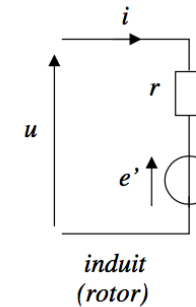
$$-ei = \Gamma_{em} \Omega$$

qui n'est autre que la relation habituelle : la puissance fournie par la force électromotrice est opposée à la puissance du couple électromagnétique.

On en déduit $-ei = \Gamma_{em} \Omega = \Phi_0 i \Omega$ donc $e = -\Phi_0 \Omega$.

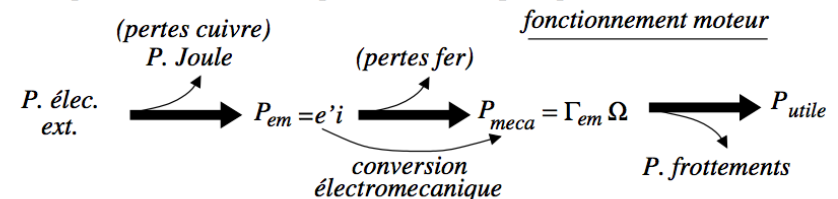
Pour s'affranchir du signe négatif, on introduit la **force contre-électromotrice** $e' = -e$, ce qui donne pour les caractéristiques de l'induit du moteur à courant continu :

$$\Gamma_{em} = \Phi_0 i \quad \text{et} \quad e' = \Phi_0 \Omega$$



3.5 Bilan énergétique du moteur réel

La puissance électrique fournie par les générateurs est cédée à la force contre électromotrice aux pertes cuivre près. La puissance électromagnétique est transformée en puissance mécanique aux pertes fer près. La puissance mécanique permet de fournir une puissance utile aux pertes mécaniques près dues aux frottements :



3.6 Régimes de fonctionnement moteur

Équations différentielles

On s'intéresse aux équations différentielles décrivant le fonctionnement du moteur sans supposer nécessairement le régime permanent atteint, i et Ω pouvant varier.

→ Équation électrique : l'équation découle du schéma électrique équivalent de l'induit, on introduit une inductance propre pour tenir compte de l'installation du courant dans l'enroulement :

$$u = ri + L \frac{di}{dt} + e' \quad \text{avec} \quad e' = \Phi_0 \Omega$$

→ Équation mécanique : l'équation s'obtient en appliquant le théorème du moment cinétique par rapport à l'axe Oz pour le rotor de moment d'inertie J qui tourne à la vitesse angulaire Ω .

En plus du couple électromagnétique, on considère que le rotor est soumis à un couple résistant Γ_r , somme du couple utile Γ_u et d'un couple de frottement proportionnel à la vitesse angulaire :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \Gamma_{em} - \Gamma_u - f\Omega \quad \text{avec} \quad \Gamma_{em} = \Phi_0 i$$

Partant de ces deux équations, on peut décrire les différents fonctionnements possibles du moteur à courant continu.

Démarrage et régime permanent

En régime permanent, l'équation électrique se simplifie selon :

$$u = ri + e' \quad \text{avec} \quad e' = \Phi_0 \Omega \quad \text{et} \quad \Gamma_{em} = \Phi_0 i$$

En éliminant i , on obtient la caractéristique « couple-vitesse » :

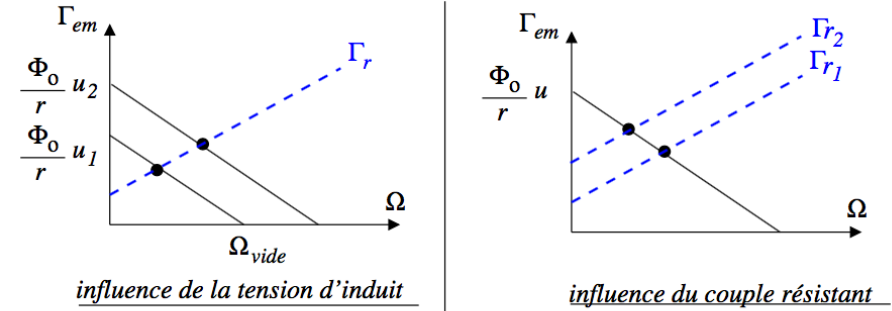
$$\Gamma_{em} = \frac{\Phi_0}{r} u - \frac{\Phi_0^2}{r} \Omega$$

→ Démarrage : pour le moteur à l'arrêt ($\Omega = 0$), le couple est non nul : $\Gamma_{em} = \frac{\Phi_0}{r} u$.

Contrairement au moteur synchrone le moteur à courant continu peut démarrer sans dispositif annexe.

Le démarrage est possible si le couple moteur dépasse le couple résistant ce qui impose $\frac{\Phi_0}{r} u(0) > \Gamma_u$.

→ Point de fonctionnement : en régime permanent, les couples moteur et résistant doivent se compenser. Cette égalité se traduit par l'intersection des droites donnant Γ_{em} et Γ_r en fonction de la vitesse de rotation :



La vitesse de rotation augmente avec la tension de l'induit.

En régime établi, la vitesse Ω du moteur est une fonction décroissante du couple résistant.

Régime transitoire

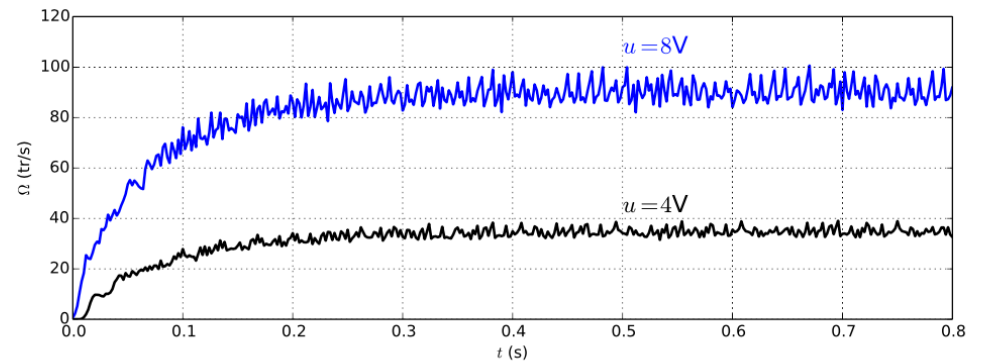
Si on néglige l'inductance propre de l'induit, le système d'équations s'écrit :

$$u = ri + \Phi_0 \Omega \quad \text{et} \quad J \frac{d\Omega}{dt} = \Phi_0 i - \Gamma_u - f\Omega$$

En éliminant l'intensité, on obtient l'équation différentielle pour la vitesse angulaire :

$$\frac{d\Omega}{dt} + \frac{1}{J} \left(\frac{\Phi_0^2}{r} + f \right) \Omega = \frac{1}{J} \left(\frac{\Phi_0 u}{r} - \Gamma_u \right)$$

On reconnaît une équation différentielle du premier ordre.



L'étude expérimentale de la réponse à un échelon de tension peut permettre d'accéder aux paramètres du moteur tels que la constante de couplage Φ_0 ou le moment d'inertie J .

À titre d'exemple, les courbes sur la page précédente présentent la réponse à un échelon de tension d'un petit moteur à courant continu pour deux valeurs de la tension d'induit.

3.7 Réversibilité : fonctionnement en génératrice

Principe

Le caractère réversible de la machine à courant continu lui permet de fonctionner en génératrice.

Dans ce cas de figure, la rotation du rotor est imposée par un opérateur extérieur. La rotation de l'induit dans le champ magnétique du stator implique l'apparition d'une force électromotrice qui fournit une énergie électrique à une charge.

Au bilan on observe une conversion mécanique $\rightarrow$ électrique.

Convention d'orientation

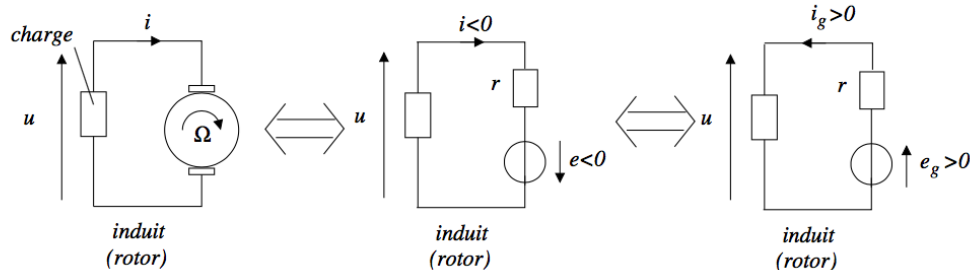
Repartons des formules caractérisant la machine à courant continu :

$$\Gamma_{em} = \Phi_0 i \quad \text{et} \quad e = -e' = -\Phi_0 \Omega$$

En régime entretenu, pour $\Omega > 0$, le couple de l'opérateur $\Gamma_{op} > 0$ est équilibré par le couple électromagnétique $\Gamma_{em} < 0$ ce qui impose $i < 0$ et $e < 0$ pour les grandeurs électriques.

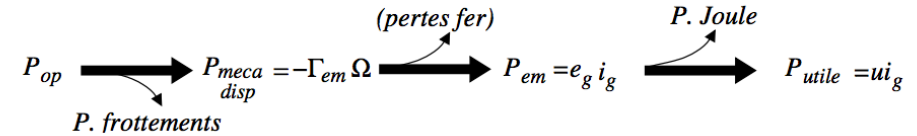
On préfère souvent travailler avec des grandeurs positives ce qui revient à changer les orientations électriques au sein de l'induit comme indiqué sur la figure ci-après :

$$\boxed{\Gamma_{em} = -\Phi_0 i_g} \quad \text{et} \quad \boxed{e_g = \Phi_0 \Omega}$$



Bilan énergétique de la génératrice

fonctionnement génératrice



Applications

Génératrice tachymétrique :

Le rotor est branché sur une charge de très grande résistance (voltmètre) ce qui permet de négliger le courant dans le circuit électrique de l'induit, l'équation électrique se simplifie selon :

$$u = e_g = \Phi_0 \times \Omega$$

La tension mesurée donne accès à la vitesse angulaire, la génératrice tachymétrique est donc un capteur de vitesse angulaire.

Freinage d'une machine :

En fonctionnement générateur, le couple électromagnétique est opposé à la vitesse angulaire et la machine à courant continu se comporte comme un frein.

La machine à courant continu, devenu génératrice, est branchée sur une résistance capable de dissiper la forte puissance délivrée par la force électromotrice.