

CH6 : La machine à courant continu à aimant permanent

Enjeu : motorisation des systèmes

Problématique : Le principal intérêt des moteurs à courant continu est que l'on peut facilement faire varier leur vitesse. Longtemps omniprésentes, les MCC sont sévèrement concurrencées depuis les années 1990 par les machines à courant alternatif qui, grâce au progrès de l'électronique de puissance, sont maintenant facilement réglables en vitesse tout en proposant une plus grande robustesse.

Quelles sont les caractéristiques électriques et mécaniques d'une MCC ? Comment faire varier la vitesse des MCC ?

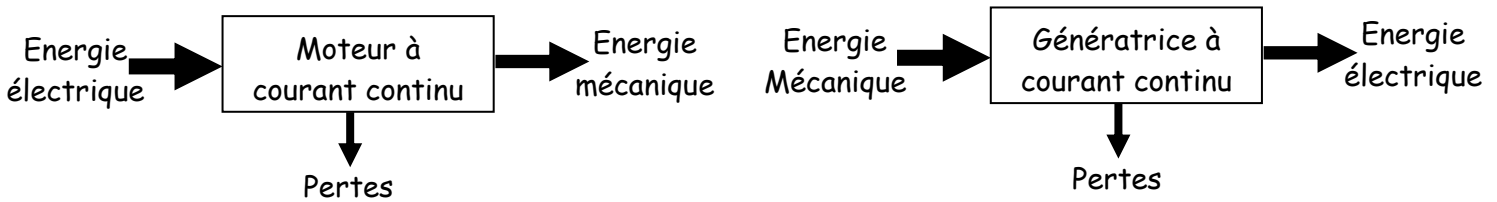
Objectifs :

A l'issue de la leçon, l'étudiant doit :

	A l'issue de la leçon, l'étudiant doit :		
6.1	Savoir expliquer le principe de fonctionnement d'une machine à courant continu à aimant permanent en moteur et en génératrice		
6.2	Connaître le modèle équivalent de l'induit en régime permanent		
6.3	Connaître la relation entre la fem, la vitesse de rotation et le flux magnétique.		
6.4	Connaître la relation entre le couple électromagnétique, le flux magnétique et le courant de l'induit		
6.5	Connaître les relations électriques et mécaniques d'un moteur à courant continu au régime permanent		
6.6	Connaître les relations électriques et mécaniques d'une génératrice à courant continu au régime permanent		
6.7	Connaître les 2 relations de la puissance électromagnétique		
6.8	Savoir effectuer un bilan de puissance dans une MCC		
6.9	Savoir déterminer un point de fonctionnement avec une charge mécanique ou électrique suivant le fonctionnement		

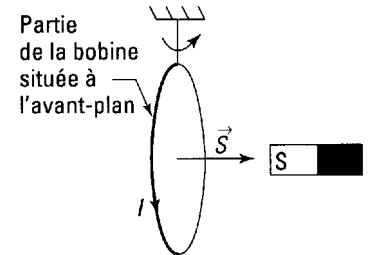
1. Quel est le rôle d'une machine à courant continu ?

Une machine à courant continu est un convertisseur rotatif d'énergie réversible :



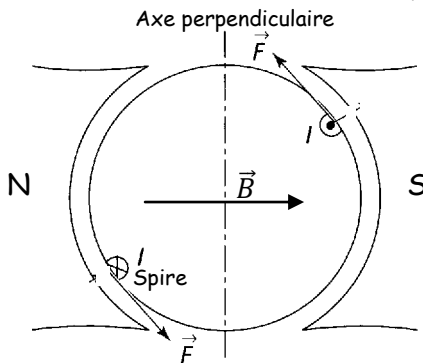
2. Qu'est-ce que la règle du flux maximal ?

Si elle est libre de se mouvoir, une bobine parcourue par un courant électrique et plongée dans un champ magnétique se déplace de telle façon que **le flux qui le traverse soit maximal**



3. Quel est le principe du fonctionnement en moteur d'une MCC ?

Considérons une machine simplifiée : bipolaire (1 seule paire de pôles N/S) et une seule spire :



Au stator il est créé un champ magnétique par le biais d'un aimant permanent. Le flux est donc fixe : il n'y a aucun réglage possible sur celui-ci. Les conducteurs formant la spire sont reliés à un générateur et traversés par un courant continu I .

Règle du flux maximum : la spire formée par les deux conducteurs actifs va se placer de manière à ce que le flux soit maximum, soit suivant l'axe perpendiculaire.

A cause de l'inertie du rotor, la spire va dépasser légèrement l'axe perpendiculaire. A cet instant, le sens de circulation du courant dans les conducteurs s'inverse par le biais du système collecteur - balais. La spire se déplace à nouveau d'un demi tour dans le même sens de rotation en respectant la règle du flux maximal, et ainsi de suite...

4. Que dit la loi de Faraday ?

Lorsqu'un circuit électrique est soumis à une variation de flux φ (que l'on note avec une minuscule lorsqu'il est variable), il apparaît une f.e.m. induite (tension) notée e aux bornes de celui-ci telle que :

$$e = - \frac{d\varphi}{dt}$$

Une variation de flux peut apparaître lorsque le champ magnétique varie (transformateur), lorsqu'un bobinage se déplace (machine à courant continu) ou lorsque le circuit est déformé.

5. Quelle est la conséquence de la loi de Faraday pour le fonctionnement moteur d'une MCC ?

La spire est en mouvement dans un champ magnétique fixe : le flux la traversant est donc variable. Il apparaît une f.e.m. induite notée E . On montre que E est proportionnelle à la vitesse à flux constant :

$$E = K\Phi\Omega$$

Remarque : à flux constant, $K\Phi = \text{Cte}$: on note alors souvent $E = k\Omega$ avec $k = K\Phi$

Avec : E : fem à vide (en V) aux bornes de la spire
 K : constante qui ne dépend que des caractéristiques de la machine
 Φ : flux sous un pôle (en Wb)
 Ω : vitesse de rotation (en rad/s)

6. Quel est le principe du fonctionnement en génératrice d'une MCC ?

Les conducteurs actifs ne sont plus reliés à un générateur. Par contre, le rotor est entraîné à la vitesse Ω par un dispositif annexe.

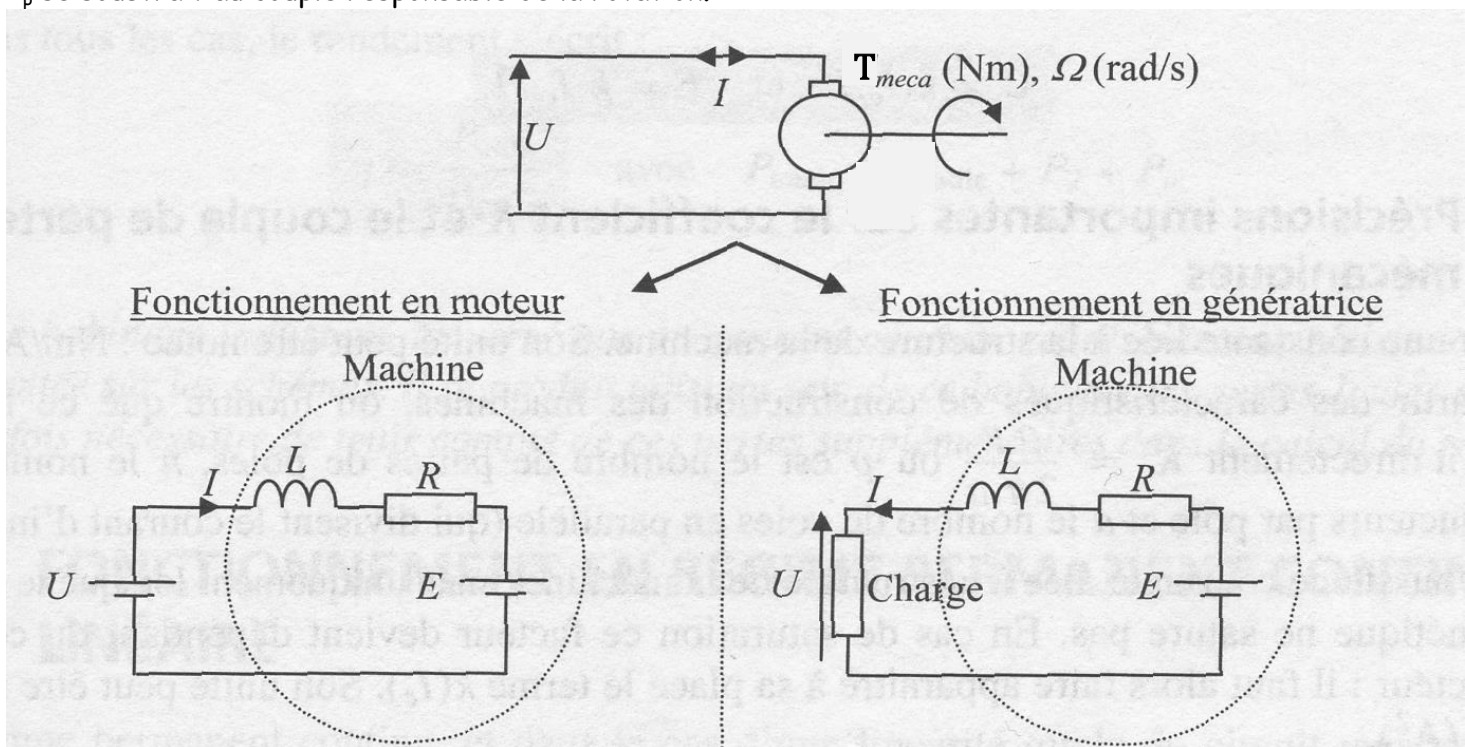
La spire est en mouvement dans un champ magnétique fixe : le flux la traversant est donc variable. Il apparaît une f.e.m. induite notée E qui a la même expression que dans le fonctionnement moteur.

Le système collecteur balais permet d'obtenir un courant circulant toujours dans le même sens en sortie.

7. Quel est le modèle équivalent de l'induit (rotor) d'une MCC ?

Le circuit induit d'une MCC est composé d'un bobinage qui présente une certaine résistance R et une inductance L . Lors de la rotation, les spires de ce bobinage sont traversées par un flux variable et sont le siège d'une fem E que l'on peut considérer comme continue du fait du grand nombre de conducteurs.

Sur le plan mécanique, le rotor de la machine et les éléments qui lui sont solidaires possèdent un certain moment d'inertie noté J . Enfin, comme dans toute machine tournante, un couple de pertes mécaniques T_p se soustrait au couple responsable de la rotation.



Equation électrique :

$$U = E + RI + L \frac{dI}{dt}$$

Equation mécanique :

$$T_{em} - T_p - T_r = J \frac{d\Omega}{dt}$$

Ici $T_{méca}$ est un couple résistant souvent noté T_r .

Le couple utile du moteur vaut $T_u = T_{em} - T_p$

Equation électrique :

$$U = E - RI - L \frac{dI}{dt}$$

Equation mécanique :

$$T_{méca} - T_p - T_{em} = J \frac{d\Omega}{dt}$$

Ici $T_{méca}$ est un couple moteur.

Cas du régime permanent :

Toutes les grandeurs sont constantes. Donc $\frac{dI}{dt} = 0$ et $\frac{d\Omega}{dt} = 0$ les équations deviennent :

$$U = E + RI$$

$$T_{em} - T_p - T_r = 0$$

$$U = E - RI$$

$$T_{méca} - T_p - T_{em} = 0$$

8. Doit-on changer de modèle à chaque fois que l'on change de mode de fonctionnement ?

Non, car entre les équations du fonctionnement moteur et du fonctionnement récepteur, seul le signe de I et des couples T_{em} et T_r (ou $T_{méca}$) changent. On peut donc très bien travailler avec l'une ou l'autre des conventions.

Par exemple si on prend la convention utilisée pour le moteur, on comptera I positif pour un fonctionnement moteur et I négatif pour un fonctionnement en génératrice. Il en va de même pour les couples T_{em} et T_r .

9. Qu'est-ce que la puissance électromagnétique ?

Dans le cas du moteur, c'est la partie de l'énergie électrique absorbée qui va être convertie sous forme mécanique.

Dans le cas de la génératrice, c'est la partie de l'énergie mécanique absorbée qui va être convertie sous forme électrique.

Elle se déduit d'un bilan de puissance électrique au rotor.

Par exemple dans le cas du moteur, il absorbe une puissance électrique : $P_a = UI$

Du fait de la résistance de ses conducteurs, il est le siège de pertes par effet Joule : $P_j = RI^2$

La puissance électromagnétique correspond à la puissance électrique restante qui sera convertie :

$$P_{em} = P_a - P_j$$

$$P_{em} = UI - RI^2$$

$$P_{em} = (E + RI)I - RI^2$$

$$P_{em} = EI + RI^2 - RI^2$$

Soit :

$$P_{em} = EI$$

10. Qu'est-ce que le couple électromagnétique ?

Puisque l'énergie mécanique se présente sous la forme d'une rotation, on peut définir le couple électromagnétique T_{em} correspondant à la puissance électromagnétique :

$$P_{em} = T_{em} \Omega$$

11. Quelle est la relation entre le couple électromagnétique et le courant d'induit ?

Des 2 relations précédentes de P_{em} , on déduit :

$$T_{em} \Omega = EI$$

$$T_{em} = \frac{EI}{\Omega}$$

$$\text{or } E = K\Phi\Omega$$

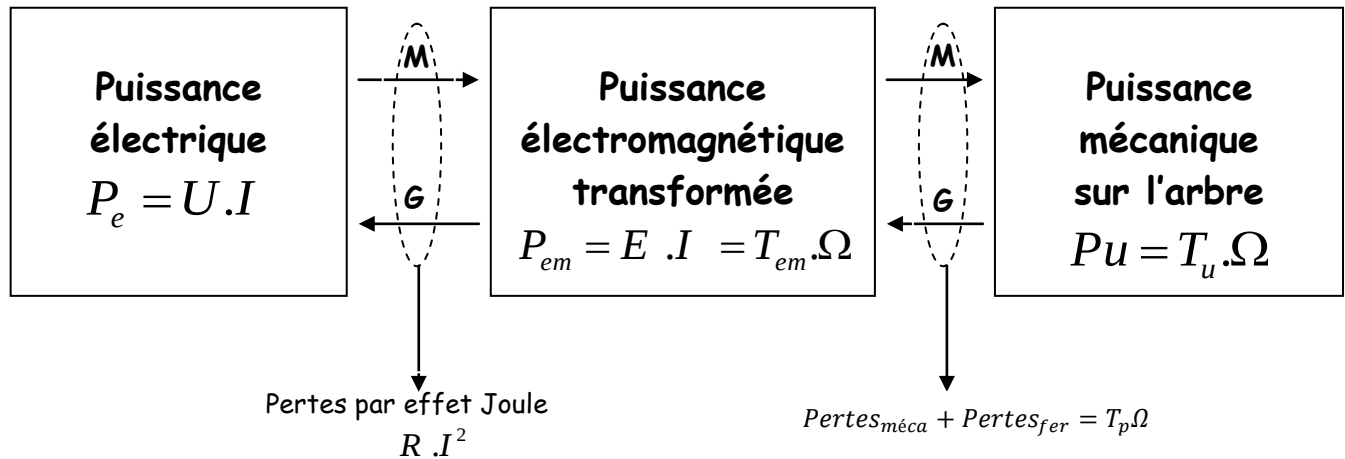
$$\text{donc } T_{em} = \frac{K\Phi\Omega I}{\Omega}$$

Le couple électromagnétique est donc proportionnel au courant d'induit :

$$T_{em} = K\Phi I$$

La même relation serait obtenue en raisonnant sur un fonctionnement en génératrice.

12. Quel est le bilan de puissance complet d'une MCC à aimant permanent ?



Les pertes mécaniques sont dues aux frottements et les pertes fers à l'échauffement du circuit magnétique constitué par le stator et le rotor.

13. Comment déterminer le point de fonctionnement d'un moteur à CC avec une charge mécanique en régime permanent ?

Dans ce mode de fonctionnement l'alimentation impose en générale sa tension U . A tension U constante, la vitesse de rotation et le courant dépendent alors juste de la charge mécanique (plus précisément du couple résistant appliqué). Le flux Φ est également constant.

Les équations sont :

$$E = K\Phi\Omega \ ; \ T_{em} = K\Phi I \ ; \ U = E + RI \ ; \ T_u = T_r = T_{em} - T_p$$

Le moteur à courant continu peut être vu comme un quadripôle dont les grandeurs de sortie sont le couple utile et la vitesse de rotation.

On obtient tous les points de fonctionnements possibles en sortie en traçant $T_u = f(\Omega)$:

$$T_u = T_{em} - T_p$$

$$T_u = K\Phi I - T_p$$

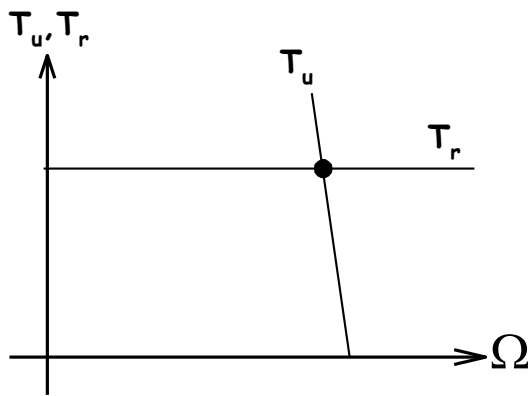
$$\text{or } I = \frac{U - E}{R} = \frac{U - K\Phi\Omega}{R}$$

$$\text{ce qui donne : } T_u = -\frac{(K\Phi)^2}{R}\Omega + \frac{K\Phi U}{R} - T_p$$

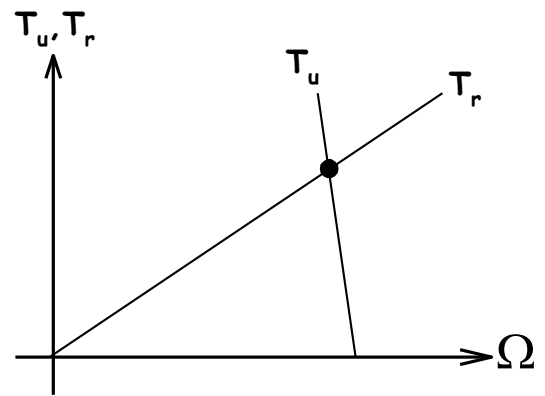
Cette équation est du type : $T_u = a\Omega + b$ où $a < 0$ (droite décroissante).

La charge mécanique connectée a sa propre caractéristique mécanique $T_r = f(\Omega)$.

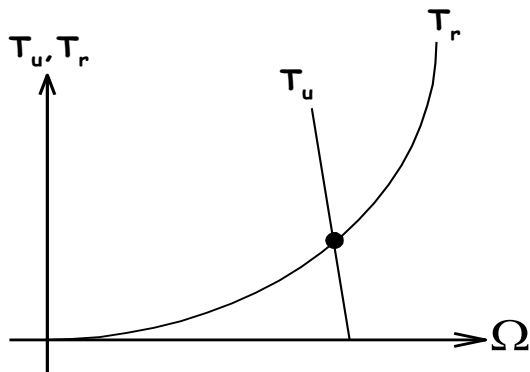
Puisqu'en régime permanent on a $T_u = T_r$, le point de fonctionnement correspond à l'intersection des caractéristiques mécaniques du moteur et de la charge.



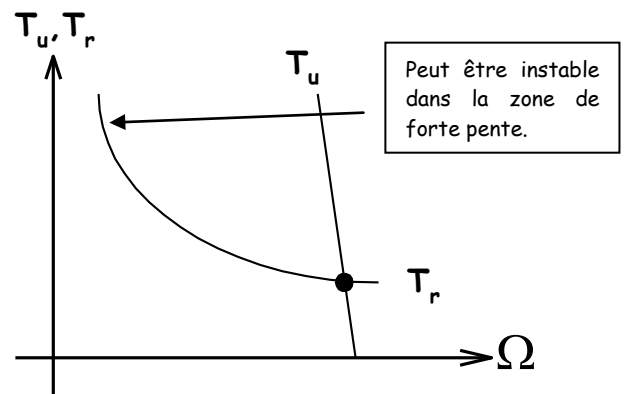
Charge de type levage
(point de fonctionnement stable)



Charge de type pompage
(point de fonctionnement stable)



Charge de type ventilation
(point de fonctionnement stable)



Charge de type essorage
(point de fonctionnement stable)

14. Comment faire varier la vitesse des moteurs à courant continu ?

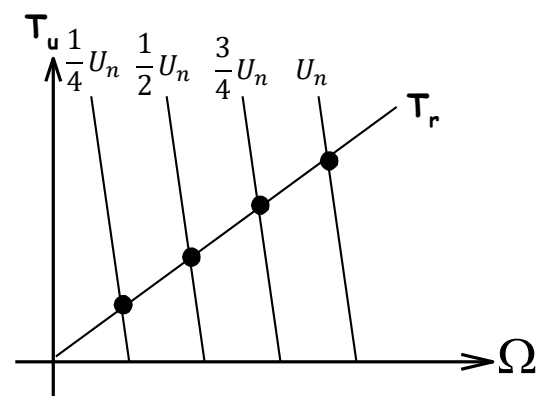
Pour obtenir un autre point de fonctionnement on joue sur la grandeur réglable en entrée, c'est-à-dire U .

Sur l'équation de la caractéristique du moteur, U intervient uniquement sur l'ordonnée à l'origine et pas sur le coefficient directeur : si on trace $T_u = f(\Omega)$ pour plusieurs valeurs de U , on obtient le réseau de caractéristiques ci-contre.

Les moteurs à courant continu sont de façon très commune alimentés sous tension variable par des convertisseurs statiques de type hacheur ou alimentation à découpage.

Ces dispositifs fournissent une tension moyenne réglable permettant le déplacement sur le réseau de caractéristiques $T_u = f(\Omega)$.

Ils peuvent être également alimentés par un réseau alternatif par le biais d'un redresseur qui doit être commandé pour permettre la variation de vitesse.



15. Comment déterminer le point de fonctionnement d'une génératrice à CC avec une charge électrique en régime permanent ?

Dans ce mode de fonctionnement, c'est l'entraînement mécanique qui régit l'évolution des grandeurs mécaniques. La machine fournit une tension U et un courant I à une charge. Ces deux grandeurs dépendent ainsi directement de la charge, mais aussi de la réaction de l'entraînement mécanique (ralentissement lorsque le courant débité augmente).

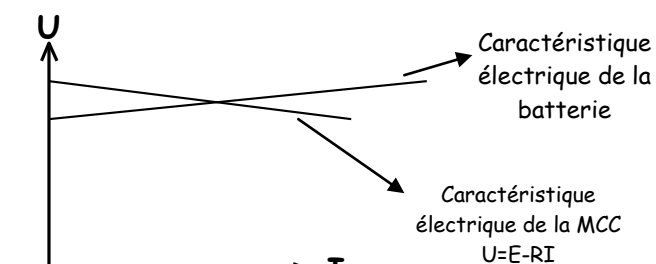
Les équations sont :

$$E = K\Phi\Omega ; T_{em} = K\Phi I ; U = E - RI ; (T_{méca} =) T_{moteur} = T_{em} + T_p$$

Le moteur à courant continu peut être vu comme un générateur dont les grandeurs de sortie sont la tension U et le courant I .

On obtient tous les points de fonctionnements possibles en sortie en traçant $U=f(I)$ qui est une droite de pente négative.

La charge connectée à sa propre caractéristique électrique. Le point de fonctionnement est l'intersection des deux caractéristiques (voir exemple ci-contre).



Exemple : débit sur batterie d'accumulateurs

16. Quels sont les fonctionnements dans les 4 quadrants ?

Avec les conventions utilisées pour le fonctionnement moteur, cela donne la figure ci-contre.

Comme T et Ω sont proportionnels respectivement à I et à E , pour déterminer dans quel quadrant fonctionne le moteur, on peut étudier le signe de E et I .

