

Machine à courant : RAPPELS THEORIQUES

I-1 – Constitution de la Machine à Courant Continu (MCC)

La machine à courant continu est une machine réversible permettant de convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique, et vice versa. Lorsque qu'elle convertit de l'énergie électrique (entrée) en énergie mécanique (utile), elle fonctionne en moteur, tandis qu'en fonctionnement générateur elle convertit l'énergie mécanique (entrée) en énergie électrique (utile). Appartenant à la famille des machines à induction, elles nécessitent un champ magnétique d'induction (champ inducteur) pour son fonctionnement, en moteur comme en générateur.

Il existe plusieurs familles de machine à induction, notamment les machines à courant continu nécessitant une alimentation continue ainsi que les machines synchrones et asynchrones nécessitant, quant à eux, une alimentation alternative (souvent sinusoïdale). Elles sont principalement utilisées pour des applications domestiques dans les appareils électroménagers (hacheurs, mixeurs, machines à laver), pour la traction (train, métro, véhicules, ascenseurs, etc.) pour la récupération d'énergie éolienne, par des automates en robotique, pour le positionnement de disques durs, dans des imprimantes, pompes, démarreurs de voiture, etc

Tous les moteurs et générateurs électriques à induction mettent à profit l'interaction entre deux champ magnétiques généralement obtenus à partir de courants électriques. Ils contiennent deux organes principaux, le stator (bobinage statique ou fixe) et le rotor (bobinage en rotation). Ces organes jouent principalement le rôle d'inducteur (création du champ magnétique inducteur) ou d'induit (apparition de force électromotrice induite). Ces différentes machines se distinguent par la configuration de leurs inducteurs et induits, d'une part et d'autre part, de la façon dont ces deux bobinages sont alimentés.

➤ Constitution de la MCC bobinée

La machine à courant continu bobinée comporte deux parties :

- l'une fixe, appelé STATOR , est un électroaimant (alimenté en continu, quelque soit le régime de fonctionnement) et aura le rôle de l'INDUCTEUR.

- l'autre mobile, appelée ROTOR, est solidaire de l'arbre moteur : il joue le rôle d'INDUIT.

L'induit est le bobinage où apparaît la f.é.m. induite lors de la variation d'un flux du champ d'induction magnétique créé par l'inducteur. En fonctionnement moteur, son induit est alimenté en continu.

La figure 4-2 représente une coupe latérale de la machine à courant continu bobinée. On distingue les enroulements (bobinage) statoriques autour d'un noyau en *matériau ferromagnétique* (en gris) en forme de mâchoires, ainsi que les enroulements rotoriques (*spires* montées sur des cadres *rectangulaires* d'aire A situés dans des encoches) autour d'un second *matériau ferromagnétique cylindrique* (en gris). Quand le stator (fixe) est parcouru par un courant continu I_e , il est le siège d'un

vecteur champ magnétique d'induction \mathbf{B}_e axial (*champ inducteur*). Le module B_e de ce vecteur champ d'induction magnétique \mathbf{B}_e est continu. Il est proportionnel à I_e et au nombre de spires N_S statorique.

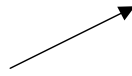


Figure 4-2 : Machine à courant continu bobinée vue en coupe latérale

Les lignes de champ sortent du pôle Nord, traversent *l'entrefer* (portion d'air compris entre les deux matériaux ferromagnétiques) puis l'induit et entrent dans le pôle Sud. Elles retournent dans le pôle Nord par la culasse. Le flux magnétique Φ est généré par les bobines placées sur les pôles. Le rotor se trouve alors en présence de ce champ magnétique d'induction B_e . Lorsque le rotor est mis en rotation (fonctionnement moteur) avec une vitesse angulaire constante Ω , l'angle θ entre la normale au cadre rotorique et l'axe du champ B_e vaut $\theta(t) = \Omega \times t$. Le flux $\phi_e(t)$ du vecteur champ magnétique d'induction \mathbf{B}_e à travers le cadre du bobinage rotorique est sinusoïdal :

$$\Phi_e(t) = k A B_e \cos(\theta) = k A B_e \cos(\Omega t) = \Phi_{eM} \cos(\Omega t)$$

Son amplitude Φ_{eM} est proportionnel à B_e et A , donc proportionnel à I_e et A :

$$\Phi_{eM} = k B_{eM} = k' I_e$$

Le rotor est alors le siège d'une force électromotrice induite $e_V(t)$ sinusoïdale, proportionnelle à la dérivée du flux $\phi_e(t)$: $e_V(t) \propto \frac{d\Phi_e(t)}{dt}$ (loi de Faraday-Lenz). L'amplitude de $e_V(t)$ est :

$$E_V = k'' \Omega B_{eM} = k_1 \Omega I_e$$

Le rotor (figure 4-3) est constitué de plusieurs assemblages de spires indépendantes. Chaque assemblage est constitué par des "voies" mises en parallèle pour augmenter le courant d'induit I . Chaque "voie" est constituée d'un certain nombre de spires (une spire est une combinaison de brins actifs, siège de la f.é.m induite) couplées en série pour augmenter la f.é.m. induite E_V . L'assemblage de spires" peut être considéré comme un "*cadre rectangulaire actif*" connecté avec l'extérieur au

moyen d'un système collecteur/balais (figure 4-4). Le collecteur est un ensemble de paires de lames diamétralement opposées, isolées les unes des autres et connectées deux-à-deux au "cadre actif" rotorique. Chaque balai (il y a une paire de balais) est constituée de conducteurs en graphite (non-métalliques) dont une extrémité est en contact permanent avec le collecteur à l'aide de ressorts se situant aux extrémités opposées. Ce couple collecteur/balais (ou bagues/balais pour une machine alternative) permet de connecter un bobinage en rotation à un dipôle électrique externe fixe (alimentation pour le moteur, résistance pour la génératrice) en assurant la liaison électrique tout en évitant des étincelles au niveau des contacts, lors des éventuelles micro-coupures survenant pendant la rotation du collecteur.



Figure 4-3 : Le rotor d'une MCC

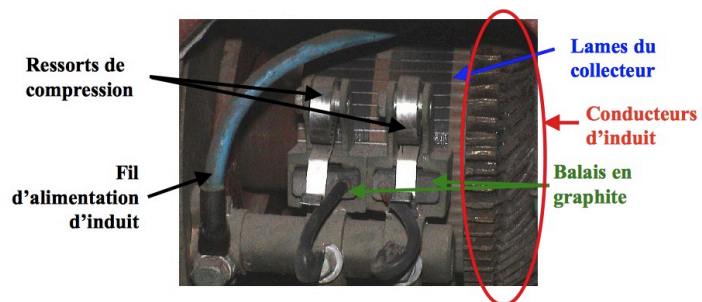


Figure 4-4 : Collecteur et balais du rotor

Lorsque le "cadre actif" du rotor est vertical (perpendiculaire au le vecteur champ B_e), l'angle $\theta = 0$. Le flux magnétique qui le traverse est maximal et par conséquent la force électromotrice induite E_v est nulle. Par contre, lorsque le rotor est horizontal (aligné avec le vecteur champ B_e), l'angle $\theta = \frac{\pi}{2}$. Le flux magnétique qui le traverse est nul mais la force électromotrice induite E_v est maximale.

A un instant donné de la rotation du rotor, le collecteur permet de connecter aux balais, uniquement le "cadre actif" horizontal dont la f.é.m est maximale. Ainsi, même si la f.é.m. aux bornes des spires est sinusoïdale, vue de l'extérieur (derrière les balais) la f.é.m induite E_v est continue.

En fonctionnement générateur, le rotor est mis en rotation par un moteur d'entraînement. L'inducteur est alimenté en continu pour crée le champ magnétique inducteur B_e . L'induit n'est pas alimenté mais tout simplement connecté à une résistance de charge R_{CH} . En fonctionnement moteur, les deux bobinages (inducteur et induit) sont alimentés séparément ou en série ou en parallèle.

➤ **Constitution de la MCC à aimant permanent**

Pour la machine à courant continu à aimant permanent (figure 4-5), le champ inducteur est créé par un aimant permanent au lieu d'un électroaimant. L'excitation (le champ magnétique inducteur) est alors constante.

En fonctionnement générateur, l'induit n'est pas alimenté, mais tout simplement connecté à une résistance de charge R_{CH} . Le rotor est mis en rotation par un moteur d'entraînement et la force électromotrice induite est proportionnelle à la vitesse de rotation Ω : $E_V = K_\Omega \Omega$

En fonctionnement moteur, seul l'induit de la machine est alimenté au moyen d'une source de tension (continue) car l'inducteur n'est plus un bobinage.

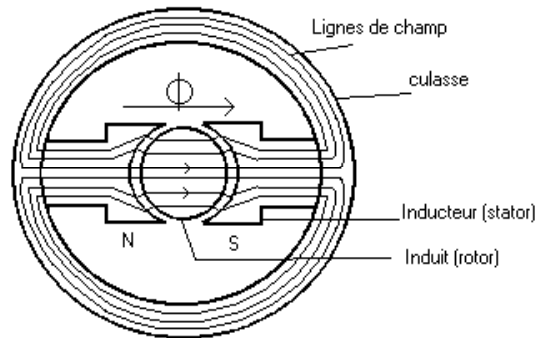


Figure 4-5 : Machine à courant continu à aimant permanent vue en coupe latérale

Les machines à aimant permanent sont utilisées pour des puissances inférieures à environ 1 kW. Au delà, les machines à courant continu sont bobinées.

I-2 – Principe de fonctionnement de la Machine à Courant Continu

➤ **Fonctionnement**

Que ce soit en fonctionnement moteur ou générateur, un champ magnétique inducteur est créé au stator.

- Moteur (figure 4-6)

Les brins du bobinage rotorique sont alimentés par un courant continu. Comme ces brins actifs baignent dans le champ magnétique statorique, ils sont le siège de la force de Laplace ($d\vec{F} = I \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B}$). Cette force exercée sur les brins est à l'origine de l'apparition du couple moteur. La charge mécanique couplé à l'arbre du moteur offre un couple résistant qui s'oppose au couple moteur. La tension E_V est une force contre-électromotrice qui s'oppose au courant d'induit I , mais elle obéit à la loi : $E_V = K_\Omega \Omega$

- Génératrice (figure 4-7)

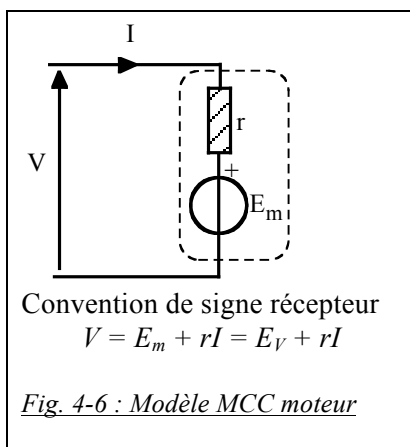
Dans ce mode de fonctionnement, le rotor de la machine est entraîné en rotation à l'aide d'un moteur d'entraînement. Les spires du bobinage rotorique vont alors tourner dans le champ magnétique statorique. Elles vont donc être soumises à un flux variable, et par voie de conséquence, vont être le siège de forces électromotrices induites (loi de Lenz-Faraday) : $E_V = K_\Omega \Omega$, fait provoque le passage

du courant d'induit I , lorsque qu'une résistance de charge R_{CH} est placée entre ses bornes. Le couple de la machine est un couple résistant qui s'oppose au couple moteur de la machine d'entraînement.

➤ **Modèle électrique**

Une machine à courant continu à aimant permanent fonctionnant à vitesse constante Ω , et parcourue par un courant continu I , peut être modélisée électriquement par une source de tension (force électromotrice ou contre-électromotrice) en série avec la résistance d'induit r .

Fonctionnement en moteur

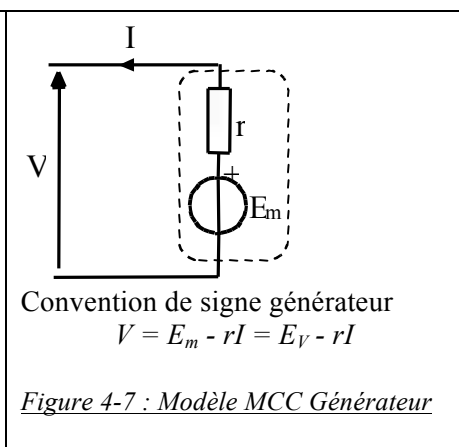


Force (contre-) électromotrice :
 $E_V = K_\Omega \cdot \Omega$ (avec Ω en rad.s^{-1})
 $(E_V = E_m)$

Couple électromagnétique :
 $C_{EM} = K_\Omega \cdot I$

K_Ω la constante de couple ou de force électromotrice, (caractéristique de la machine)

Fonctionnement en génératrice



➤ **Vitesse :**

En fonctionnement moteur, la vitesse de rotation est donnée par :

$$\Omega = \frac{E_V}{K_\Omega} = \frac{V - rI}{K_\Omega}$$

Si la résistance r est faible ($rI \ll E_V$), la vitesse Ω est indépendante du courant I , donc de la charge mécanique du moteur. C'est un des avantages de la MCC à aimant permanent : sa vitesse dépend très peu de la charge.

➤ **Puissances :**

En fonctionnement moteur, la puissance électrique $P_E = VI$ est injectée dans l'induit de la machine. Des pertes par effet Joule $P_r = rI^2$ sont produites dans la résistance r (en toute rigueur, il faut aussi tenir compte des pertes par effet Joule dans la résistance des balais et les lames du collecteur).

La différence P_{EM} (puissance électromagnétique) est alors intégralement convertie en puissance mécanique. Le couple associé est le couple électromagnétique C_{EM} . Comme E_V , Ces deux grandeurs sont inaccessibles à la mesure. Le transfert de puissances est représentée par la figure 4-8.

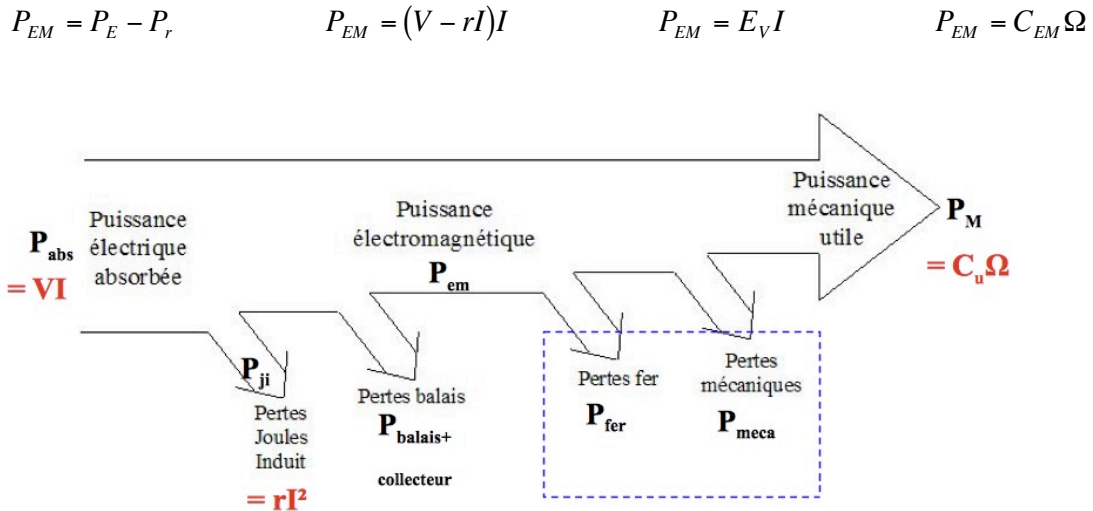


Figure 4-8 : Bilan de puissance pour un moteur à courant continu

Lors de la rotation du rotor, il y a des pertes "collectives" $P_{Collectives}$ d'origine mécanique et électromagnétique (pertes fer, se produisant dans le matériau ferromagnétique). Les pertes mécanique par frottement sec, et électromagnétique par effet hystérésis sont proportionnelles à la vitesse de rotation ($pertes \propto \Omega$). Les pertes mécanique de type ventilation, et électromagnétique par courants induits de Foucault (en anglais : *eddy currents*) sont proportionnelles au carré de la vitesse de rotation ($pertes \propto \Omega^2$). Ces pertes $P_{Collectives}$ peuvent s'exprimer par l'intermédiaire d'un couple de pertes collectives C_0 . Par conséquent, on récupère la puissance mécanique utile P_M (et le couple utile $C_U = C_M$) à la sortie du moteur :

$$P_M = P_{EM} - P_{Collectives} \qquad P_M = P_{EM} - C_0 \Omega \qquad P_M = (C_{EM} - C_0) \Omega \qquad P_M = C_M \Omega$$

$$\text{On a alors : } C_{EM} = C_M + C_0$$

Que peut-on dire si le couple de pertes ne dépend pas de la vitesse Ω ?