

LP20 - Conversion de puissance électromécanique

07 Avril 2021
Valentin Dorel & Antoine Chauchat

C'était pas votre question, ce sera ma réponse.
Joël Bellessa

Niveau : L2

Bibliographie

- ⚡ *Poly d'électrotechnique de Montrouge,* →
- ⚡ *BUP 846, Charles Henry Vigouroux* →
- ⚡ *Leçons 2018 et 2016,* →

Prérequis

- Électromagnétisme
- Principe de l'induction
- Force de Lorentz et force de Laplace

Expériences

- ☞ Rails de Laplace
- ☞ Aiguille de boussole dans champ magnétique tournant

Table des matières

1	Principe de la conversion électromécanique : les rails de Laplace	2
1.1	Description du système	2
1.2	Bilan de puissance	3
1.3	Fonctionnement moteur	3
2	La machine à courant continu	4
2.1	Structure et principe de fonctionnement	4
2.2	Modes de fonctionnement	5
2.3	Bilan de puissance et pertes	6
3	Les machines à courant alternatif	6
3.1	Principe de fonctionnement, création d'un champ tournant	6
3.2	Étude de la machine synchrone	7
3.3	Principe de la machine asynchrone	8
4	Questions et commentaires	8
4.1	Questions	8
4.2	Commentaires	9

Introduction

Les machines convertissant l'énergie électrique en travail mécanique utile sont omniprésentes aussi bien dans notre quotidien que dans l'industrie. Ce sont elles qui permettent le déplacement des trains, le fonctionnement de l'électroménager, la commande des machines-outil etc. Il y en a entre 10 et 100 dans une voiture (ventilation, essuie-glace, déplacement de la vitre).

Ils répondent à une problématique spécifique, l'énergie produite à un endroit (centrale nucléaire) doit être transportée (conversion mécano-électrique) puis employée autre part (conversion électromécanique).

Leur compréhension et leurs performances sont primordiales pour pouvoir remplacer les machines thermiques dans une optique de transition énergétique.

1 Principe de la conversion électromécanique : les rails de Laplace

1.1 Description du système

L'illustration canonique de la conversion de puissance électromécanique est celle des rails de Laplace. Les rails sont formés de deux barreaux conducteurs parallèles, espacés d'une distance L , fixes dans le référentiel du laboratoire R_0 sur lequel repose un barreau conducteur mobile dans R_0 , il est animé d'une vitesse $\vec{V}$. Le système est plongé dans un champ magnétique stationnaire homogène dans R_0 , $\vec{B}$, typiquement créé par un aimant permanent en U.

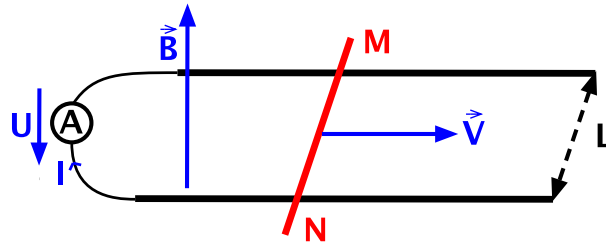


Fig. 1 : Rails de Laplace en fonctionnement générateur

Pour illustrer le fonctionnement générateur, on relie les rails de Laplace à un microampèremètre. En déplaçant le barreau mobile on constate l'apparition d'un courant non nul. C'est la conséquence de la loi de Lenz. En faisant varier l'aire du circuit on fait varier le flux à travers le circuit. On induit donc une force électromotrice e qui s'oppose aux variations de flux. Or le circuit est fermé donc cette tension induit un courant qui crée un champ $\vec{B}_i$ qui s'oppose au champ $\vec{B}$ permanent.

On introduit la notion de *Champ électromoteur*. Pour un conducteur à la vitesse $\vec{V}$ dans R , plongé dans un champ $\vec{B}$, il apparaît une force électromotrice E qui est la circulation du champ électromoteur $\vec{E}_m$.

$$\vec{E}_m = \vec{V} \times \vec{B} \quad (1)$$

On oriente le circuit de M vers N , on impose ainsi l'orientation de I . La force électromotrice est alors positive et est calculée en convention générateur.

$$e = \int_M^N \vec{E}_m \cdot d\vec{l} = \int (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (2)$$

On note R la résistance de l'ensemble de circuit, on a alors comme schéma électrique équivalent le suivant :

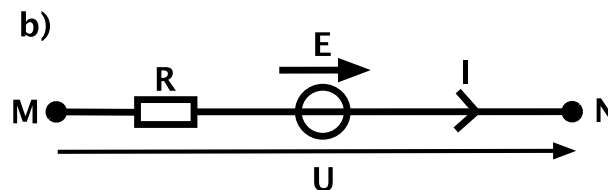


Fig. 2 : Schéma électrique équivalent aux rails de Laplace

Le mouvement du conducteur dans un champ permanent fournit une puissance électrique. Montrons que ce phénomène est réversible.

1.2 Bilan de puissance

On considère qu'il y a une densité de charge dues aux ions ρ_{ion} dans le conducteur mobile et une densité de charge dues aux électrons ρ_e , qui sont animés d'une vitesse $\vec{v}$ dans le référentiel du barreau. Le conducteur est neutre donc $\rho_{\text{ions}} = -\rho_e$. La force volumique de Lorentz totale sur le conducteur est

$$d\vec{f}_{\text{Lorentz}} = \rho_e d\tau (\vec{E} + (\vec{v} + \vec{V}) \times \vec{B}) + \rho_{\text{ions}} d\tau (\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (3)$$

La densité de courant est $\vec{j} = \rho_e \vec{v}$ d'où

$$d\vec{f}_{\text{Lorentz}} = \vec{j} d\tau \times \vec{B} = I d\vec{l} \times \vec{B} \quad (4)$$

Dans le référentiel du laboratoire, la force de Lorentz travaille car $\vec{j}$ et $\vec{V}$ ne sont pas colinéaires, c'est normal, elle est la source de la conversion d'énergie.

$$dP_{\text{Lorentz}} = (\vec{j} d\tau \times \vec{B}) \cdot \vec{V} \quad (5)$$

Réécrivons cette puissance

$$\begin{aligned} dP_{\text{Lorentz}} &= I (d\vec{l} \times \vec{B}) \cdot \vec{V} \\ &= -I (\vec{V} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \\ &= -I \vec{E}_m \cdot d\vec{l} \\ &= -I de \\ (I d\vec{l} \times \vec{B}) \cdot \vec{V} &= -I de \end{aligned}$$

Ainsi

$$P_{\text{Laplace}} + P_{\text{électrique}} = 0 \quad (6)$$

La puissance de la force de Laplace traduit une puissance mécanique, c'est un mouvement d'ensemble macroscopique à la vitesse $\vec{V}$.

La puissance électrique est celle due à la force électromotrice d'induction, elle traduit une mise en mouvement des électrons dans le conducteurs et donc une énergie électrique.

Le couplage entre ces deux puissances traduit donc la conversion électromécanique de puissance. On peut alors envisager une conversion mécano-électrique.

Puisque la conversion électromécanique est réversible, illustrons le fonctionnement des rails de Laplace en tant que moteur.

1.3 Fonctionnement moteur

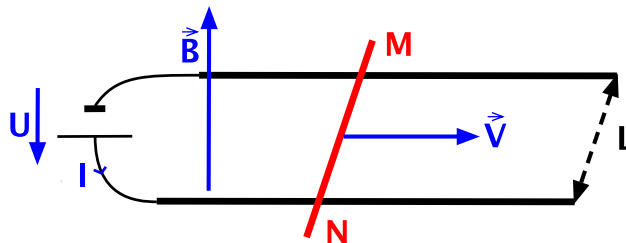


Fig. 3 : Rails de Laplace en fonctionnement moteur

On remplace l'ampèremètre par une source de courant continu U . Alors la force de Laplace met en mouvement le rail, et on a apparition d'une force électromotrice $e < 0$ en convention générateur. Le système reçoit bien de l'énergie électrique qu'il transforme en énergie mécanique.

Nous venons d'étudier les rails de Laplace qui sont un premier exemple de conversion électromécanique de puissance. Nous allons étudier maintenant la machine à courant continu que nous simplifions pour en extraire le principe de fonctionnement.

2 La machine à courant continu

2.1 Structure et principe de fonctionnement

La machine à courant continu est composée de :

Circuit magnétique :

Le stator : comme son nom l'indique c'est la partie fixe de la machine qui est assez massive pour ne pas être mise en mouvement par les effets de la partie mobile.

Le rotor : c'est la partie mobile, solidaire de l'arbre mécanique sur lequel est fixé le bobinage de l'induit.

L'entrefer : c'est l'espace qui sépare le rotor du stator. Il doit être aussi faible que possible pour maximiser le champ magnétique dans le rotor (quelques millimètres, un centimètre maximum).

Circuit électrique :

L'inducteur : c'est la source de champ magnétique de la machine, l'inducteur est lié au stator et est donc fixe. Il crée un champ magnétique radial dans le rotor. C'est soit un aimant permanent soit un bobinage.

L'induit : circuit électrique placé sur le rotor et excité par le champ magnétique de l'inducteur. Les forces de Laplace dans l'induit vont causer le mouvement de la machine.

Balais et lame : permet l'alimentation de l'induit et la commutation du courant.

Pour illustrer le fonctionnement nous allons prendre un modèle simplifié de la MCC. On considère que l'induit est composé d'une spire ouverte. Ce dispositif est représenté sur la figure 4. Le circuit est fermé par le dispositif de lames et balais. Ce dispositif est crucial au fonctionnement de la machine. En effet lors du passage d'un brin de spire au delà de la ligne neutre le champ magnétique qu'elle ressent change de signe. Ainsi sans inversion du sens du courant, la force de Laplace subie par ce conducteur changerait de sens ce qui arrêterait la machine. Le dispositif de balai permet l'inversion du sens du courant à chaque passage de la ligne neutre. Ceci permet de maintenir le sens de rotation de la machine constant.

Les portions de conducteur PO et NM subissent des forces égales et de signe opposé, ainsi la force totale ressentie par le conducteur est nul. Le conducteur subit par contre un couple, c'est ce couple qui est responsable de la rotation du rotor.

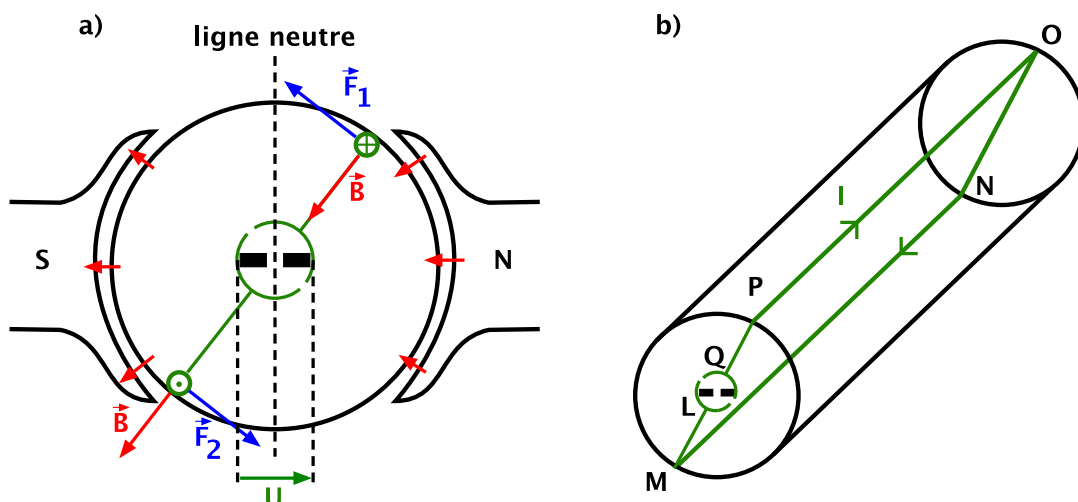


Fig. 4 : Schéma de principe de la MCC simplifiée.

Après avoir vu le principe de fonctionnement nous allons étudier plus en détail la MCC à excitation indépendante, c'est à dire lorsque inducteur et induit sont alimentés indépendamment.

2.2 Modes de fonctionnement

Couple électromagnétique : Notons l la longueur active des conducteurs i.e. NM et PO . Dans la base cylindrique $\vec{u}_r, \vec{u}_\theta, \vec{u}_z$ ou z est l'axe du rotor, on peut calculer le couple Γ subi :

$$\vec{\Gamma} = R\vec{u}_r \wedge \vec{F}_1 - R\vec{u}_r \wedge \vec{F}_2 \quad (7)$$

$$\text{Or } \vec{F}_1 = -\vec{F}_2 = I \int \vec{u}_z \wedge B\vec{u}_r dz = IB l \vec{u}_\theta$$

$$\vec{\Gamma} = 2RIB l \vec{u}_z \quad (8)$$

La grandeur d'intérêt est le module de ce couple que l'on note $C = 2RIBl$, appelé moment du couple électromagnétique. On remarque que $2RBl$ est homogène à un flux magnétique que l'on va noter ϕ_0 . On a donc $C = \phi_0 I$. **F.é.m.**

d'induction e : La rotation du rotor entraîne l'apparition d'une force électromotrice induite e telle que $P_m = P_i$ avec P_m la puissance mécanique et P_i la puissance induite. On a $P_m = \vec{\Gamma} \cdot \vec{\Omega}$ et $P_i = eI$. Or $P_m = C\Omega$ ainsi $eI = C\Omega = \phi_0 I \Omega$ ainsi $e = \phi_0 \Omega$. **Modes de fonctionnement.** Le circuit de l'induit est analogue à celui des rails de Laplace. On

représente sur la figure 5 le modèle équivalent en convention récepteur (électrique).

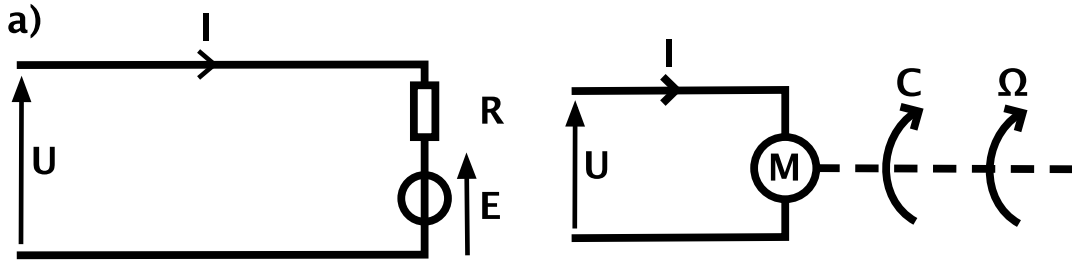


Fig. 5 : Modèle électromécanique équivalent de la MCC en convention récepteur.

Lorsque $C\Omega > 0$ la machine fournit de la puissance mécanique et travaille donc en moteur (elle reçoit de la puissance électrique et fournit de la puissance mécanique). On a également $eI > 0$ ce qui montre bien que l'on reçoit de la puissance électrique.

À l'inverse si $C\Omega < 0$ on a $eI > 0$, la machine reçoit de la puissance mécanique et fournit de la puissance électrique : elle travaille donc en génératrice.

Les deux modes de fonctionnement ont chacun deux sous-cas, correspondant à une marche avant ou arrière. Le tout est résumé dans la figure 6.

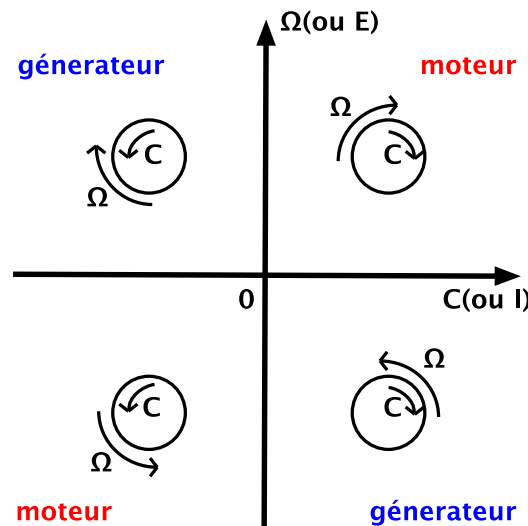


Fig. 6 : Modes de fonctionnement de la machine à courant continu

2.3 Bilan de puissance et pertes

Nous allons ici décrire les différentes origines de pertes lors du fonctionnement de la machine à courant continu.

- Les pertes électriques (ou pertes cuivre) : elles se produisent par effet Joule dans les circuits électriques de l'inducteur et de l'induit ainsi qu'au niveau des contacts avec les balais. On note i_e et r_e les grandeurs relatives à l'inducteur (dont la contribution est nulle si il est constitué d'un aimant permanent) et r la résistance totale de l'induit. On a ainsi : $P_J = rI^2 + r_e I_e^2$
- Les pertes fer P_{fer} : ce sont les pertes par cycle d'hystérésis et par courants de Foucaults dans la carcasse ferromagnétique du rotor.
- Les pertes mécanique P_{frot} : elles sont dues au contact des balais sur l'induit

En régime permanent pour une machine fonctionnant en moteur alimentée par une puissance $P_{\text{elec ext}}$ et délivrant une puissance $P_{\text{méca ext}} = \vec{\Gamma}_{\text{utile}} \cdot \vec{\omega} < 0$ le bilan de puissance est :

$$P_{\text{elec ext}} - P_J - P_{\text{fer}} - P_{\text{frot}} = -P_{\text{méca ext}} \quad (9)$$

Le rendement du moteur est $\eta = \frac{-P_{\text{méca ext}}}{P_{\text{elec ext}}}$.

La présence de balais pose certains problèmes : ils s'usent ce qui nécessite un entretien régulier de la machine. D'autres technologies existent à base de courant alternatif, ce sont les machines synchrones et asynchrones.

3 Les machines à courant alternatif

3.1 Principe de fonctionnement, création d'un champ tournant

Illustrons la création d'un champ tournant et l'entraînement d'un rotor à l'aide de trois bobines et d'une aiguille de boussole

Aiguille dans un champ tournant

On alimente trois bobines identiques placées en étoile autour d'une aiguille de boussole. On alimente ces bobines avec un courant de même intensité mais déphasé de $\frac{2\pi}{3}$. L'aiguille au repos ne démarre pas. Si on la lance avec une pichenette, elle est accélérée jusqu'à une fréquence de rotation de 50 Hz.

Mettons ce système en équation. Les courants dans les 3 bobines sont

$$\begin{aligned} i_1 &= I \cos \omega t \\ i_2 &= I \cos \omega t - \frac{2\pi}{3} \\ i_3 &= I \cos \omega t - \frac{4\pi}{3} \end{aligned}$$

Le champ magnétique crée au centre du système par une bobine est de la forme

$$\vec{B}_i = k i_i(t) \vec{u}_i, \quad (10)$$

avec $\vec{u}_i$ le vecteur unitaire dirigé du centre du système vers la bobine.

Les trois champs résultants sont donc

$$\begin{aligned} \vec{B}_1 &= k I \cos \omega t \vec{u}_x \\ \vec{B}_2 &= k I \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \left(\cos \left(\frac{2\pi}{3} \right) \vec{u}_x + \sin \left(\frac{2\pi}{3} \right) \vec{u}_y \right) \\ \vec{B}_3 &= k I \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \left(\cos \left(\frac{4\pi}{3} \right) \vec{u}_x + \sin \left(\frac{4\pi}{3} \right) \vec{u}_y \right) \end{aligned}$$

Le champ au centre des bobines est la somme des trois champs créés par chacune des bobines.

On trouve que

$$\vec{B} = \frac{3}{2} k I (\cos \omega t \vec{u}_x + \sin \omega t \vec{u}_y) \quad (11)$$

On a réussi à créer un champ magnétique tournant à la pulsation ω au centre du système.

En modélisant l'aiguille par un dipôle magnétique $\vec{M}$, l'interaction entre ce champ $\vec{B}$ tournant et l'aiguille se traduit par un couple

$$\vec{\Gamma} = \vec{M} \times \vec{B} \quad (12)$$

$\vec{M}$ et $\vec{B}$ sont dans le même plan (xy) donc $\vec{\Gamma}$ est selon $\vec{u}_z$, on comprend donc que le champ tournant met en rotation l'aiguille. Cependant ceci n'explique pas pourquoi le champ magnétique ne peut faire démarrer l'aiguille.

À retenir : une machine alternative met en interaction un moment magnétique engendré par le rotor (permanent ou créé par électroaimant ou induction) et un champ magnétique créé par le stator.

On voit que l'on peut créer un mouvement avec un courant alternatif, appliquons cela à la mise en place d'une machine particulière, la machine synchrone

3.2 Étude de la machine synchrone

Fonctionnement moteur : Dans ce mode de fonctionnement le champ tournant est créé par le bobinage du stator. Le rotor peut être vu comme un moment magnétique $\vec{M}$ en interaction avec le champ $\vec{B}$ tournant. Le champ tournant peut être noté :

$$\vec{B} = B_0 \cos(\omega t + \theta_0) \vec{u}_x + B_0 \sin(\omega t + \theta_0) \vec{u}_y \quad (13)$$

Ici θ_0 représente l'angle entre le champ magnétique tournant et le moment magnétique $\vec{M}$ à l'instant $t = 0$. On considère le rotor en rotation dans le plan Oxy . Notons :

$$\vec{M} = M_0 \cos(\Omega t) \vec{u}_x + M_0 \sin(\Omega t) \vec{u}_y \quad (14)$$

où Ω est la vitesse de rotation du rotor.

Le rotor subit donc un couple $\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}$. On peut l'exprimer ainsi :

$$\vec{\Gamma} = M_0 B_0 (\cos(\Omega t) \sin(\omega t + \theta_0) - \sin(\Omega t) \cos(\omega t + \theta_0)) \vec{u}_z \quad (15)$$

$$\vec{\Gamma} = M_0 B_0 \sin((\omega - \Omega)t + \theta_0) \vec{u}_z \quad (16)$$

Pour des fréquences raisonnables de rotation, la constante de temps mécanique du moteur τ est très grande devant le temps caractéristique d'oscillation $T = \frac{2\pi}{\omega}$. Dans ce cas là la machine n'est ainsi sensible qu'aux valeurs moyennes.

On voit ainsi que pour $\omega \neq \Omega$ le couple moyen appliqué est nul. Ainsi pour avoir un couple non nul on a $\omega = \Omega$ d'où le nom de machine synchrone. Expérimentalement on remarque que si le moteur à l'arrêt est alimenté par une tension de 50 Hz il ne démarre pas. Si on réduit la fréquence, il démarre pour des fréquences faibles. On peut ensuite augmenter progressivement la fréquence de rotation et le moteur suit.

On a augmenté le temps caractéristique T pour qu'il soit de l'ordre de τ ce qui a permis à la machine d'accrocher. En régime permanent on a donc $\omega = \Omega$:

$$\langle \vec{\Gamma} \rangle = M_0 B_0 \sin(\theta_0) \vec{u}_z \quad (17)$$

En fonctionnement génératrice : Le rotor est assimilé à un moment magnétique $\vec{M}$ en rotation dans le stator. Le champ magnétique tournant engendré par le rotor de la génératrice synchrone, appelée aussi alternateur, est assimilable à celui créé par un aimant permanent en rotation autour de son axe. Le stator est composé d'un système de bobinage dans lequel apparaît une f.é.m. induite.

Considérons donc un moment magnétique $\vec{M}$ en rotation à la vitesse angulaire ω autour d'un axe passant par un point fixe O et placé près d'une bobine comportant N spires de section S et d'axe (Ox).

Ce moment magnétique engendre un champ tournant :

$$\vec{B} = B_0 \cos(\omega t) \vec{u}_x + B_0 \sin(\omega t) \vec{u}_y \quad (18)$$

Le flux dans la bobine est $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{u}_x NS = B_0 NS \cos(\omega t)$

D'après la loi de Faraday la force électromotrice induite est donc :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = \omega NS B_0 \sin(\omega t) \quad (19)$$

Les alternateurs sont utilisés par exemple en sortie des centrales électriques vers le réseau.

↓ Cette machine n'est pas la seule technologie, en réalité la machine asynchrone est la machine la plus employée dans l'industrie.

3.3 Principe de la machine asynchrone

Dans une machine asynchrone, le rotor est un bobinage en court-circuit qui placé dans le champ tournant est siège d'une force électromotrice induite et donc d'un courant induit. Ce courant conduit à la création d'un champ magnétique assimilé à celui créé par un moment magnétique $\vec{M}$. Ce moment va être entraîné par le champ magnétique tournant à une fréquence inférieure à la fréquence du champ tournant. D'où le nom de machine asynchrone.

Conclusion

On a pu étudier les principales technologies de moteurs électriques : machine à courant continu, machine synchrone et machine asynchrone. Toutes reposent fondamentalement sur l'induction et permettent un fonctionnement réversible aussi bien en moteur qu'en générateurs. Leurs applications sont très larges.

En ce qui concerne la conversion de puissance électromécanique de façon plus générale, notons l'exemple du haut-parleur qui permet la production d'ondes mécaniques sonores et de la piézoélectricité qui permet des mouvements fins.

Un des intérêts des convertisseurs électromécaniques réside dans leur très bon rendement, qui n'est pas limité par les effets entropiques qui imposent l'inégalité de Clausius aux moteurs thermiques.

4 Questions et commentaires

4.1 Questions

•

4.2 Commentaires

-