

LP20 CONVERSION DE PUISSANCE ÉLECTROMÉCANIQUE

9 juin 2020

MONNET Benjamin & Mr B

Niveau : L3

Commentaires du jury

- 2016 : Afin de pouvoir aborder des machines électriques de forte puissance, le rôle essentiel du fer doit être considéré car les forces électromagnétiques ne se réduisent pas aux seules actions de Laplace s'exerçant sur les conducteurs traversés par des courants.
- 2015 : Il est souhaitable de préciser le rôle de l'énergie magnétique lors de l'étude des convertisseurs électromécaniques constitués de matériaux ferromagnétiques linéaires non saturés.
- 2014 : Dans le cas des machines électriques, les candidats sont invités à réfléchir au rôle du fer dans les actions électromagnétiques qui peuvent également être déterminées par dérivation d'une grandeur énergétique par rapport à un paramètre de position.
Jusqu'en 2013, le titre était : Conversion de puissance électromécanique. Exemples et applications.
- 2011, 2012, 2013 : Dans cette leçon, le plus grand soin dans la définition des orientations et des conventions de signe s'impose. Les applications doivent occuper une place significative dans la présentation. Ce ne sont pas les machines de technologie complexe qui illustrent le mieux les idées en jeu. Les notions de base sur l'induction sont supposées connues.
- 2008 : Cette leçon nécessite une bonne connaissance des machines présentées et de leurs applications.
- 2006 : Les principes élémentaires de l'induction ne sont pas correctement utilisés dans cette leçon qui nécessite un minimum de connaissance de la technologie des machines.
- 2005 : Il ne faut pas confondre force de Lorentz sur un porteur de charge et force de Laplace sur un conducteur. Toutes les grandeurs introduites doivent être algébriques ou vectorielles, ce qui nécessite de préciser les orientations et les bases de projection.
- 2004 : La conversion de puissance a donné lieu à des exposés purement descriptifs. Nous attendons une attitude de physicien, c'est-à-dire une justification des modèles simples proposés pour les machines à courant continu, par exemple avec les conditions d'algébrisation des grandeurs électriques et mécaniques introduites.
Jusqu'en 2003, le titre était : Exemples de couplage électromécanique : haut-parleur électrodynamique, moteurs... Bilans énergétiques.
- 1999 : Les candidats doivent pouvoir donner le principe des moteurs électriques des différents types (à champ tournant, unipolaires, universels) ainsi que celui des générateurs électriques à courant continu ou alternatif. Il faut être particulièrement attentif aux signes dans cette leçon et ne pas omettre de mentionner des ordres de grandeur.
- 1998 : Il est essentiel de montrer l'importance des termes de couplage entre équation mécanique et équation électrique. Dans le bilan d'énergie global, il faut faire ressortir le rôle du champ magnétique et expliquer l'origine du bilan auxiliaire $P_{\text{Laplace}} + P_{\text{fem}} = 0$.
- 1997 : Dans les bilans énergétiques, deux approches sont possibles : raisonner sur le circuit mobile seulement ou sur le système constitué du circuit et des sources de B. Dans le premier cas, un fait important est que le travail des forces de Laplace extérieures subies par le circuit mobile augmenté du travail de la force électromotrice d'induction dans ce circuit et dû à son déplacement seulement, est nul ; cela provient de la nullité du travail des forces de Lorentz au niveau microscopique. Une illustration expérimentale des exemples traités, haut-parleur ou moteur, s'impose.

Bibliographie

- ♣ *PSI-PSI**, **Tech et Doc** → Très bien pour le moteur à courant continu mais incomplet pour le reste
- ♣ *Electronique*, **Le Bréal** → Complet et très bien pour cette leçon. Manque peut être de détails pour les questions.
- ♣ *Electronique*, **Hprepa** → Calculs complets de tous les couples de tous les moteurs (en particulier asynchrones). Complet mais moins compréhensible que Le Bréal
- ♣ *Electrotechnique*, **Parcours IUT** → Très... et même beaucoup trop complet et très compréhensible. Permet d'anticiper les questions.

Prérequis

- Induction
- Mécanique du solide

Expériences

- ☞ Rail de Laplace
- ☞ Aiguille dans un champ tournant
- ☞ Cage d'écureuil dans un champ tournant

Table des matières

1	Exemple introductif : les rails de Laplace	3
1.1	Principe	3
1.2	Réversibilité du phénomène	3
2	La machine à courant continu	4
2.1	Modèle simplifié	4
2.2	Cas d'un enroulement de spire et équations de fonctionnement	4
2.3	Machines réelles	5
3	Les machines synchrones	6
3.1	Principe de fonctionnement	6
3.2	Calcul du couple	6
3.3	Machine réelle et critiques	7
4	Moteurs asynchrones	7

Introduction

Les moteurs sont utilisés de partout autour de nous. On pense en particulier aux voitures, aux trains ou aux photocopieurs (qui comportent plusieurs petits moteurs). Dans cette leçon, on va présenter le fonctionnement de différents moteurs, utilisant tous le même principe : la conversion électromécanique.

On commencera, afin d'expliquer le principe de cette conversion, par étudier l'exemple des rails de Laplace.

1 Exemple introductif : les rails de Laplace

🔗 Le Bréal Electrotechnique p 122

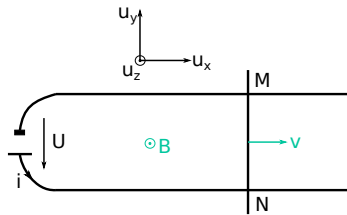


Rail de Laplace

🔗 ⊗
L'idée est juste de mettre en mouvement un rail de Laplace avec un courant puis de montrer que l'on voit un courant si on fait bouger nous-mêmes le rails. Cet exemple est très bon pour illustrer la conversion électromécanique.

1.1 Principe

Quand on met un courant i dans la barre dans le champ $\vec{B}$, des forces de Laplace de formule $\int i d\vec{l} \wedge \vec{B}$ apparaissent, ce qui met en mouvement la barre métallique.

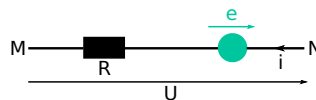


Dans le cas où l'on bouge la barre nous même, nous modifions le flux coupé par le circuit, ce qui crée donc des courants induits.

Dans tous les cas, le fait que les rails de Laplace bougent génèrent une force électromotrice (fem) égale à :

$$e = \int (\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

On peut donc résumer avec le schéma équivalent :



Remarques :

- Dans le cas où l'on fonctionne en mode moteur, c'est-à-dire dans le cas où l'on met en mouvement la barre, la fem e s'oppose par loi de Lenz à la tension d'alimentation U . Donc sur le schéma précédent, $e < 0$
- Dans le cas où l'on fonctionne en mode générateur, la fem e sera donc positive mais le schéma équivalent reste le même

1.2 Réversibilité du phénomène

Intéressons nous maintenant un peu plus aux détails mathématiques. On note $\vec{v}$ la vitesse des porteurs de charge. La puissance appliquée par la force magnétique vaut :

$$P = (-q(\vec{v} + \vec{V}) \wedge \vec{B}) \cdot (\vec{v} + \vec{V}) = 0$$

En développant cette expression, on obtient :

$$P = (-q\vec{v} \wedge \vec{B}).\vec{V} + (-q\vec{V} \wedge \vec{B}).\vec{v} = P_m + P_e = 0$$

On remarque que la puissance P_m correspond à une force colinéaire à $\vec{V}$, donc à une puissance qui tend à faire bouger la barre métallique. C'est en fait une force qui s'applique aux électrons mais qui est transmise à la barre car ces derniers sont accrochés à leur réseau cristallin. On a donc eu ici un transfert de l'énergie électrique (mouvement des électrons) en énergie mécanique.

Pour ce qui est la puissance P_e , on remarque qu'elle correspond à une force selon l'axe de la barre. On a donc cette fois-ci transfert d'énergie mécanique en énergie électrique.

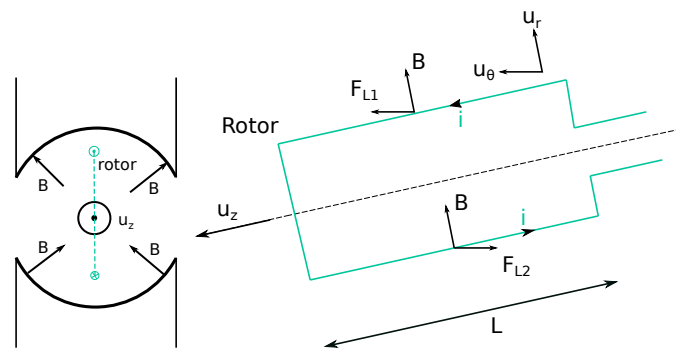
Dans tous les cas, le bilan $P_m + P_e = 0$ signifie que toutes la puissance mécanique provient de la puissance électrique et inversement ! Elle traduit la conversion de l'énergie et son passage d'une forme à une autre (mécanique ou électrique).

↓ Maintenant que nous comprenons l'origine de la conversation électromécanique de puissance, intéressons-nous aux machines réelles utilisées.

2 La machine à courant continu

✚ Tech et Doc PSI-PSI*

2.1 Modèle simplifié



On considère une spire parcourue par un courant i (appelée rotor) plongée dans un champ $\vec{B}$ généré par une partie fixe appelée stator. Au vu des symétries de notre problème, le champ $\vec{B}$ est de la forme $\vec{B} = B(r, \theta)\vec{u}_r$ avec $B(r, \theta + \pi) = -B(r, \theta)$. On voit sur la figure que la spire subit deux forces de Laplace. Les deux sont de norme $F_L = iLB$ mais de sens opposé. Donc $\vec{F}_{tot} = \vec{0}$. Néanmoins, le couple exercé par ces deux forces est non nul et vaut :

$$\vec{C}_L = idLB\vec{u}_\theta$$

dont on notera la norme C_L . On peut retrouver l'équation de conservation de la puissance que l'on a mis en avant plus tôt.

- La puissance mécanique vaut $P_m = C_L\omega$
- La puissance vaut $P_e = e.i$ avec $e = -2 \int (\vec{v} \wedge \vec{V}).d\vec{l} = -dLB\omega$

2.2 Cas d'un enroulement de spire et équations de fonctionnement

Afin d'augmenter l'efficacité des moteurs, on utilise pas une seule spire mais un enroulement de spire. On peut garder en toute généralité les relations suivantes :

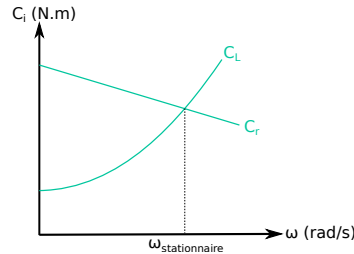
- La force électromotrice est proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation $e = -\Phi\omega$ (**avec notre convention, e est négative!!**) (Φ est directement relié au flux du champ magnétique)
- La conservation de la puissance donne $ei + C_L\omega = 0$ donc $C_L = \Phi i$

Remarque : On négligera l'auto-induction du circuit dans toutes la suite
Les équation de fonctionnement s'écrivent donc :

$$U = e + Ri \quad \text{pour l'équation électrique}$$

$$J \frac{d\Phi}{dt} = \Phi i - C_r \quad \text{où } C_r \text{ est un couple résistant (typiquement les frottements ou la charge)}$$

La vitesse de rotation va donc augmenter jusqu'à avoir $\Phi i = C_r$. Avec $U = Ri + \Phi\omega$ et $C_L = \Phi I$, on trouve $C_L = \Phi \frac{U}{R} - \frac{\Phi^2}{R}\omega$. On peut résumer cela sur le schéma suivant :



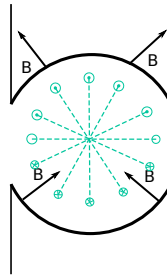
Enfin, on peut écrire avec $U = e + Ri$, $e = \Phi\omega$ et $\Gamma = \Phi i$ que $U = \Phi\omega + \frac{R}{k\Phi}C_L$. En régime stationnaire, on en déduit :

$$\omega = \frac{1}{k\Phi} \left(U - \frac{R}{k\Phi} C_r \right)$$

On en déduit **qu'il ne faut jamais couper l'alimentation de l'inducteur en premier** ! Autrement l'induit s'emballe et la machine explose.

2.3 Machines réelles

Comme on peut le remarquer sur le schéma présenté plus tôt, la spire s'arrêterait en fait de tourner afin que son moment magnétique $\vec{M}$ soit aligné avec le champ $\vec{B}$. Afin d'éviter ce problème, on ajoute un dispositif redresseur formé de balais et de collecteur. Les collecteurs font en sorte que le courant qui arrivent dans les balais alimentent les bonnes spires, c'est-à-dire celles qui vont permettre une rotation permanente des spires :



Nous n'avons pas spécialement parlé de pertes jusqu'à présent mais il faut avoir conscience qu'elles existent : il ya a les pertes par effet Joule, les pertes par courant de Foucault ou les pertes par hystérésis ainsi que les pertes mécaniques, liées aux frottements. Une machine réelle atteint tout de même un rendement d'environ 80%.

IL FAUT PARLER DE L'UTILISATION DES FERRO!!

Les moteurs à courant continu étaient utilisés en 1981 pour les trains en France. La puissance totale du moteur était de 6.4 MW.

Nous avons parlé ici de moteur fonctionnant avec une tension continue. Le réseau fournit était alternatif, nous allons nous intéresser à des machines fonctionnant avec des sources alternatives.

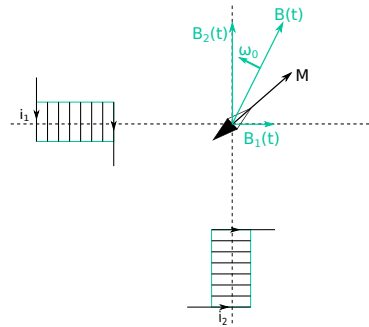


3 Les machines synchrones

3.1 Principe de fonctionnement

Une machine synchrone repose sur le fait qu'un moment magnétique $\vec{M}$ tend à s'aligner avec un champ extérieur $\vec{B}$ car le couple que subit le système vaut :

$$\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}$$



Ainsi, on utilisant un champ tournant, on va pouvoir faire tourner le moment magnétique $\vec{M}$. Afin de réaliser un champ tournant, on peut utiliser deux bobines déphasées de π . Ainsi, le champ total vaut :

$$\vec{B} = B_0(\cos(\omega_0 t)\vec{u}_x + \sin(\omega_0 t)\vec{u}_y)$$

ce qui correspond bien à un champ magnétique total tournant à la vitesse ω



aiguille qui tourne



Ca peut être cool de montrer l'expérience avec l'aiguille là !

3.2 Calcul du couple

On considère que le moment magnétique $\vec{M}$ tourne à la vitesse ω . Donc :

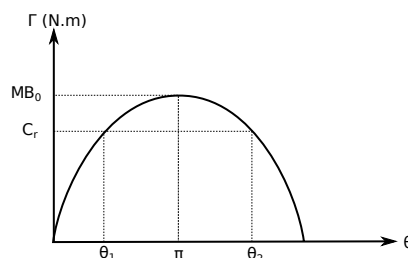
$$\vec{M} = M(\cos(\omega t + \theta_0)\vec{u}_x + \sin(\omega t + \theta_0)\vec{u}_y)$$

On trouve après calcul que le couple s'exerçant sur l'aiguille vaut :

$$\vec{\Gamma} = MB_0 \sin((\omega_0 - \omega)t - \theta_0)$$

On remarque alors que **le couple moyen est nul sauf si la vitesse de rotation du moment magnétique est la même que celle du champ magnétique**. Par conséquent, l'aiguille tourne forcément à la même vitesse que le champ magnétique. C'est de là que vient le nom de moteur synchrone.

De nouveau, on a à l'équilibre $C_r = -\Gamma = MB_0 \sin(\theta_0)$, ce qui se résume sur le graphe suivant :



On a alors deux positions d'équilibre possibles :

- La position à $\theta_0 = \theta_1$, qui correspond à un état stable : si l'angle augmente, la vitesse de rotation diminue et inversement
- La position à $\theta_0 = \theta_2$, qui correspond à un état instable. Dans ce cas, si l'angle diminue, la vitesse de rotation va diminuer et la vitesse de rotation va continuer de diminuer.

3.3 Machine réelle et critiques

Une machine synchrone réelle a un très bon rendement allant de 85% à 95% et a l'avantage d'avoir une vitesse de rotation facilement réglable. Néanmoins son gros défaut est qu'il ne peut pas être lancé sans un autre moteur. De plus, en cas de surcharge, il y a un décrochage.

Pour ce qui est de leur utilisation, 8 moteurs synchrones ont été installés en 1988 pour la ligne TGV "Atlantique" d'une puissance de 1,1 MW et pesant 1 450 kg.

On va essayer maintenant de palier au gros défaut du moteur synchrone qui est que le couple est nul si les vitesses de rotation ne sont pas les mêmes

4 Moteurs asynchrones



cage d'écureuil

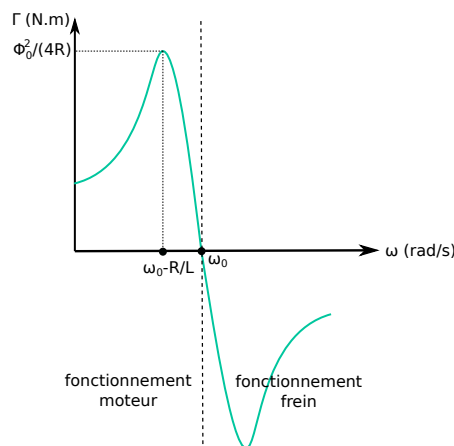


Mettre cage d'écureuil à la place de l'aiguille.

Il suffit dans un moteur synchrone de remplacer le moment magnétique permanent $\vec{M}$ par des spires. La variation de champ magnétique dans les spires vont induire un courant i qui va lui-même induire un moment magnétique $\vec{M}_{induit}$. En introduisant R la résistance des spires et L leur inductance, on peut montrer après calcul que le couple appliqué sur les spires vaut :

$$\Gamma(\omega) = \frac{1}{2} \frac{\Phi_0^2 R (\omega_0 - \omega)}{R^2 + L^2 (\omega_0 - \omega)^2}$$

On peut résumer cela sur le graphe suivant :



On remarque alors plusieurs choses :

- Le couple pour une vitesse $\omega \neq \omega_0$ est non nul ! En particulier, $\Gamma(0) \neq 0$! On résout ainsi le problème majeur du moteur synchrone.
- Cette fois, la vitesse de rotation n'est pas tout le temps ω_0 mais varie avec la charge imposée !
- On a toujours un décrochage si la charge est trop importante

Questions

- Justifie l'orientation de B ? Mettre les lignes de champs, parler de l'utilisation des ferro.
- le vrai B c'est pas que celui du stator y'a aussi le rotor qui génère du B d'ordre 2 qui diminue l'efficacité

Quelle partie de la MCC crée le champ ? Comment se fait-il qu'on parle de forces de Laplace alors que les conducteurs ne sont pas dans le champ ? Le stator

Pourquoi utilise-t-on des matériaux ferromagnétiques ? C'est le champ dans les matériaux ou dans l'entrefer qui est fort ? Dessiner des schémas équivalents des dispositifs utilisés, les orienter, etc. Ferro pour canaliser les lignes de champ

vous avez dit que pour réduire les pertes par courants de Foucault on utilise "des matériaux de forte résistivité, par exemple des tôles de silice feuilletées" (trouvé dans le H-prépa), qu'est-ce qui est utile, l'aspect tôle, l'aspect feuilleté ou l'aspect silice ? L'aspect feuilleté

si les moteurs électriques sont si fantastiques niveau rendement pourquoi on utilise encore des moteurs thermiques ? il faut créer l'électricité avant de la convertir et puis assez coûteux d'entretien (MCC : frottement rotor-stator, composants...)

Pour les rails de Laplace, comment résoudre dans un référentiel centré sur la barre ?

Fonctionnement d'une machine asynchrone ? Comment sont les lignes de champs dans la MCC ? Rôle du ferromagnétique dans la MCC ? Pourquoi y a-t-il des encoches dans le rotor de la MCC et pourquoi sont-elles inclinées ?

Y a-t-il un intérêt à faire une étude de la MCC en régime non-stationnaire ?

Lien force de Laplace/force de Lorentz ; que se passe-t-il au niveau micro ?

Question sur les conventions d'orientation : est-ce que le signe de la fém ou du courant dépendent de l'orientation ? Est-ce que ça change quelques chose à la physique ?

Comment calculer la fém autrement qu'à partir du champ électromoteur ?

Que représente le point de fonctionnement du moteur ?

Pourquoi on utilise des matériaux ferromagnétiques ? Laquelle de leurs caractéristiques leur donne cette propriété ? (Canalisation des lignes de champs), (grande perméabilité magnétique)

- Je pense qu'on souhaite que les lignes de champ soit radial pour que ce soit optimal mais c'est pas vraiment possible

Est-ce que l'on peut créer une MCC avec une moitié où existe un champ magnétique radial et une moitié avec un champ nul ? Dessiner les lignes de champs dans la MCC.

La force de Lorentz est-elle valable dans un référentiel non-galiléen ?

Différence moteur synchrone/asynchrone ? Applications ? Le synchronisme comme le nom l'indique, et asynchrone pas du tout stable en vitesse ni en position, il faut lancer la machine synchrone. Synchrone : textile, alternateur, industrie quand besoin d'être précis en vitesse/position, asynchrone : ascenseur, propulsion des navires, pompes...)

Rails de Laplace : Choix de l'ampèremètre, caractéristiques ? Comment évaluer un O_{dg} du courant théoriquement ? Petit courant μA , à aiguille parce que c'est plus visible, et avec les numériques, on voit juste que cela s'affole.

D'où vient la résistance ? Rôle ? Vient principalement du contact (couche d'oxydation, contact sur des pointes, etc...) et des contacts.

Quand on met du courant la tige bouge. Peut tu en dire plus ? (surtout pour le sens)

Loi de Lenz : D'où cela provient ? Toujours valable ? Forme intégrale de l'équation de Maxwell-Faraday. Pas toujours valable, si on rajoute un condensateur, déphasage de $\frac{\pi}{2}$ entre l'intensité et le courant donc l'effet peut s'ajouter à la cause. Marche bien pour les moteurs car fortement inductifs.

Pourquoi le bilan de puissance est toujours généralisable ? Puissance électrique UI totalement général et puissance des forces de Laplace ($j d\tau \times B$ en volume, $\vec{v}$) et en volumique on peut écrire la P électrique aussi qui est avec le même produit mixte mais à une rotation prêt.

Avantage et Inconvénients de la machine à courant continu ? On peut la démarrer à vitesse nulle (la machine asynchrone), en utilisation industrielle il n'y a besoin que d'une source d'alimentation. Très bon rendement. Il y a besoin de renverser le courant au moment de la ligne neutre, avec les balais : frottement solide en permanence.

Sources de pertes dans la machine à courant continu ? Corrections dans les termes de e et M Couple mécanique résistif

Terme en ω^2 car en général machine entraîne un ventilateur pour évacuer la chaleur.

Remarques

- Attention à bien tout définir dans cette leçon.