

LP 09 : Conversion de puissance électromécanique

Nicolas Chastrette

Mai 2020

Pour nous

Rapport du jury

- **2017** : Une approche à l'aide des seules forces de Laplace est insuffisante. Les candidats doivent aussi s'interroger sur l'intérêt d'utiliser des matériaux ferromagnétiques dans les machines électriques
- **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.
- **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.
- **2009, 2010** : Dans ces deux leçons, 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.
- **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 $P_{Laplace} + P_{fem} = 0$.
- **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.

biblio

- Breal électrotechnique PSI
- Maria et Mathieu

0.1 prérequis

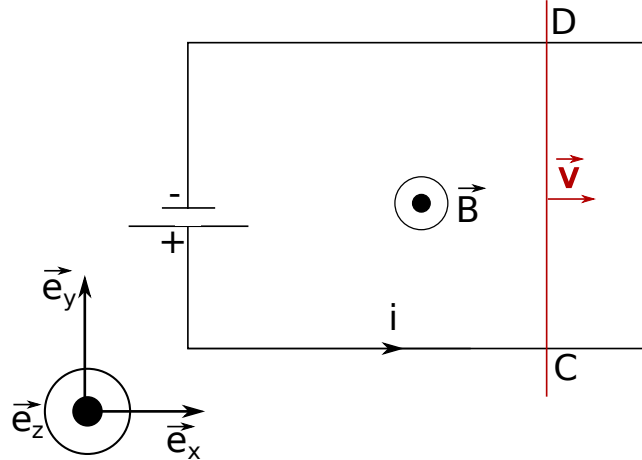
- Électromagnétisme
- Induction
- Mécanique

Introduction

Les expériences de Faraday sur l'induction, dès 1921, démontrent l'existence d'un couplage entre énergie électrique et énergie mécanique ainsi que la possibilité de convertir l'une en l'autre. En 1871 Zénobe Gramme invente la machine à courant continu et des 1880 Nikola Tesla invente la machine synchrone permettant cette conversion réciproque. Nous allons dans un premier temps étudier les conséquences de l'induction pour la conversion électromécanique, puis étudier le fonctionnement d'une machine à courant continu et pour finir étudier le comportement d'une machine synchrone.

1 Principe de la conversion

1.1 Mise en évidence d'une conversion électromécanique



Considérons le système des rails de Laplace : un générateur électrique est connecté à un **conducteur parfait** formé de deux rails et d'un cylindre métallique posé en travers des deux rails. Le cylindre est capable de rouler sur les rails. On place le tout dans un champ magnétique. Lorsque le courant parcourt le circuit, le barreau cylindrique mobile subit une action mécanique (la force de Laplace) qui le fait bouger dans la direction x .

Considérons un conducteur électrique dans lequel les porteurs de charges sont des électrons de charge notée $-q$. En conservant l'hypothèse du champ magnétique constant et en notant que la barre se déplace à la vitesse \vec{V} par rapport au référentiel R lié au laboratoire. Exprimons la puissance P de la force $\vec{f} = (-q(\vec{v} + \vec{V}) \wedge \vec{B})$ exercée sur les porteurs, qui se déplacent à la vitesse \vec{v} :

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

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

$$\mathcal{P} = -q(\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{V} - q(\vec{V} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{v} = 0 \quad (1)$$

Cette puissance est nulle, mais on peut analyser chacun des deux termes de cette dernière expression :

- le premier terme décrit la puissance de la résultante des forces de Laplace, responsable d'un mouvement du barreau mobile puisque cette force est dirigée selon l'axe x . Les électrons ne peuvent pas quitter le barreau conducteur : il y a donc un transfert de quantité de mouvement depuis les électrons vers le réseau cristallin, provoquant un mouvement de l'ensemble du barreau cylindrique. Ce terme traduit donc la **conversion d'une énergie électrique (liée à un courant électrique) en une énergie mécanique (liée au mouvement du conducteur)**. C'est donc une puissance mécanique :

$$\mathcal{P}_m \equiv -e(\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{V};$$

- le second terme décrit la puissance d'une force mécanique, liée au mouvement du barreau mobile, agissant sur le mouvement des électrons par rapport au circuit, donc susceptible de créer un courant électrique. Les électrons perçoivent en effet le terme $\vec{V} \wedge \vec{B}$ comme un champ électrique, le champ électromoteur $\vec{E}_m = \vec{V} \wedge \vec{B}$. Ce terme est donc une puissance électrique

$$\mathcal{P}_e \equiv -e\vec{E}_m \cdot \vec{v}.$$

Il s'agit donc d'une conversion d'énergie mécanique (l'énergie cinétique liée au déplacement du barreau mobile) en énergie électrique (la mise en mouvement des électrons sous l'effet d'un champ électrique correspond à la génération d'un courant électrique dans le circuit).

On peut alors réécrire le bilan de puissance comme

$$\mathcal{P}_m + \mathcal{P}_e = 0 \quad (2)$$

Cette équation résume ainsi la conversion électromécanique de la puissance ayant lieu à chaque instant, puisque $\mathcal{P}_m = -\mathcal{P}_e$. En autres termes, la puissance mécanique créée provient de la puissance électrique \mathcal{P}_e perdue par les porteurs de charges. Elle traduit en outre la conservation de l'énergie.

Modèle électrocinétique On peut faire une modélisation électrocinétique du système selon que c'est l'alimentation électrique (moteur, consommateur de puissance électrique) ou le mouvement du barreau conducteur (générateur, producteur de puissance électrique) qui initie le phénomène :

- **fonctionnement en moteur** : le sens du courant délivré par l'alimentation détermine l'orientation du circuit ($d\ell = +dy\vec{e}_y$, donc de M vers N dans le barreau) à partir de laquelle on calcule la force électromotrice $e = \int_C^D (\vec{V} \wedge \vec{B}) \cdot d\ell =$

$-VBL < 0$. Le modèle équivalent est celui d'un générateur idéal de tension e opposé à la tension d'alimentation U . On a donc

$$U = -e \quad \text{d'où} \quad UI = -eI = -\mathcal{P}_e \quad (3)$$

en multipliant par l'intensité I du courant circulant dans le conducteur. Comme la force électromotrice est ici négative, elle a tendance à générer un courant s'opposant à I . On a alors plutôt tendance à définir la **force contre-électromotrice** $E \equiv -e > 0$. Si le conducteur n'est plus parfait ($\vec{E} \neq 0$ dans tout le conducteur), on doit ajouter une résistance en série. La tension aux bornes de l'ensemble s'écrit donc $U = E + RI$ et $UI = EI + RI^2$

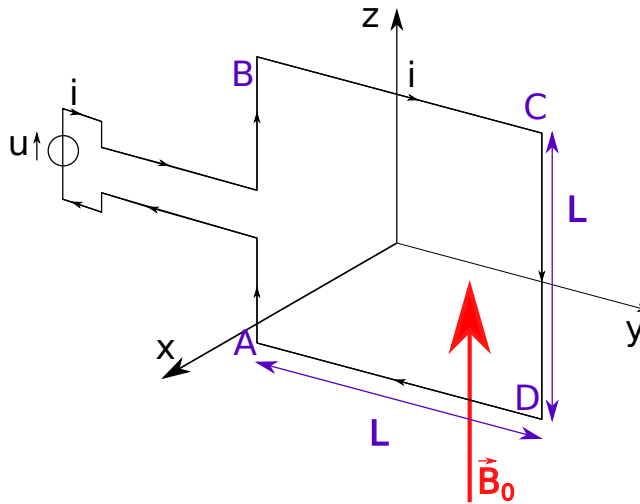
On redéfinit la puissance électrique récupérée par le barreau conducteur en utilisant E au lieu de e , d'où $\mathcal{P}_e \equiv EI$ et on réécrit le bilan de puissance en conséquence :

$$\mathcal{P}_m = \mathcal{P}_e$$

- **Fonctionnement en générateur :** on retire l'alimentation, qu'on remplace par un ampèremètre et on déplace le barreau conducteur avec une vitesse \vec{V} selon \vec{e}_x . On crée un champ électromoteur dirigé selon $-y$, donc les électrons se déplacent selon $+y$, donc le courant créé est dirigé selon $-y$, direction qui définit l'orientation de la f.e.m. On intègre de D vers C et cette fois

Nous venons de montrer le principe de conversion électromécanique à partir du rail de Laplace. Ici le mouvement est un mouvement de translation. Comment pouvons-nous obtenir un mouvement de rotation ?

1.2 Machine tournante



On place une spire rectangulaire parcouru par un courant I dans un champ \vec{B}_0 uniforme orienté selon \vec{e}_z . Le bilan des forces s'appliquant sur la spire

$$\Sigma \vec{F} = \vec{F}_{AB} + \vec{F}_{BC} + \vec{F}_{CD} + \vec{F}_{DA} = \vec{0}$$

en effet : $\vec{F}_{AB} = \int_A^B I dz \vec{e}_z \wedge B_0 \vec{e}_z = 0 = -\vec{F}_{CD}$ et idem pour les deux autres sections.

Les moments s'écrivent

$$\Sigma \vec{M}(O) = \vec{M}_{BC}(O) + \vec{M}_{DA}(O) = iB_0 DL \vec{e}_y$$

Il existe donc un couple s'exerçant sur la spire $C = iB_0 DL = I\Phi_0$ où $\Phi_0 = B_0 LD$ est le flux du champ B_0 à travers la spire. Nous constatons que lorsque Φ_0 est constant, le couple électromagnétique C est directement proportionnel à l'intensité électrique I .

On peut donc générer un mouvement de rotation : nous venons de décrire, de façon très simplifiée, le principe de fonctionnement d'un moteur. Notons qu'on peut faire comme pour le moteur linéaire : remplacer l'alimentation par un ampèremètre et forcer mécaniquement la rotation du moteur pour générer un courant électrique. Ce type de machine peut donc être utilisé comme moteur ou comme générateur.

2 machine à courant continue

Les machines à courant continu font partie des convertisseurs électro-magnéto-mécanique réversibles. Elles ont été les premières à être inventées puis utilisées massivement dans toutes les gammes de puissance du fait de la simplicité de leur commande en vitesse.

2.1 Description de la machine

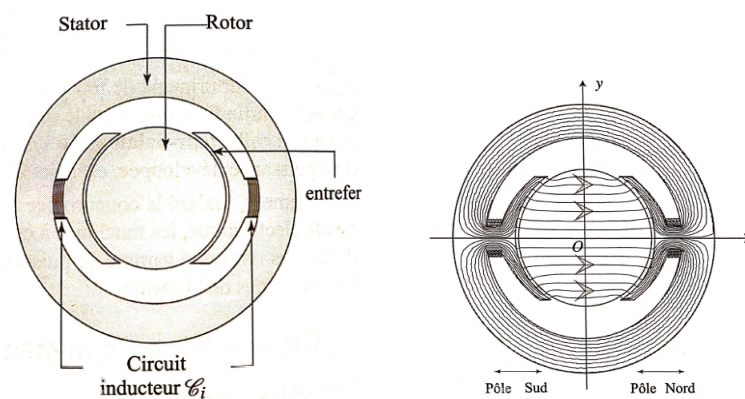
Définissons les principaux éléments de ce moteur :

- **Circuits électriques :**

- L'inducteur : constitue la source de champ magnétique dans la machine. Il est réalisé soit à partir d'aimants permanents (machines de faible puissance, en robotique par exemple), soit à l'aide d'un électro-aimant;
- L'induit : circuit électrique soumis au champ magnétique produit au niveau du stator et placé sur le rotor;

- **Circuits magnétiques :**

- Le stator est la partie fixe du moteur, portant le circuit inducteur.
- Le rotor est la partie mobile, reliée à l'arbre moteur, sur laquelle est bobiné le circuit induit.



La machine à courant continu comporte deux bobinages, l'un porté par le stator et l'autre par le rotor. Le stator et le rotor, constitués d'un matériau magnétique à base de fer, sont séparés par un entrefer. Il doit être suffisamment faible pour optimiser le couplage entre le champ généré au stator et l'induit, ce qui permet de limiter la consommation de l'inducteur. L'ensemble forme un circuit magnétique où les lignes de champ traversant l'entrefer et le rotor se referment dans le stator.

On se limite à l'étude de la machine à courant continu vérifiant les **hypothèses** suivantes :

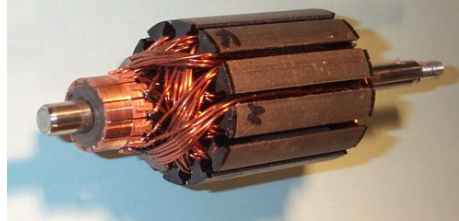
- le matériau constituant le stator et le rotor est un matériau magnétique linéaire de perméabilité magnétique relative infinie (**c'est pour ça qu'il est en fer.**
- Machine à entrefer radial et d'épaisseur constante.
- chaque bobinage ne génère que deux pôles (nord et sud). Machine bipolaire

Circuit statorique Deux bobinages identiques portés par les deux cols situés de part et d'autre du rotor sont connectés en série et donc parcourus par le même courant inducteur permanent de d'intensité I_c . Le champ magnétique créé par l'inducteur est donc permanent.

En négligeant les effets de bord, les plans orthogonaux à l'axe de rotation, tel que le plan de coupe étudié, sont des plans d'antisymétrie de la distribution de courant inducteur. Par conséquent, les lignes de champ magnétique sont contenues dans ce plan. La simulation numérique des équations locales satisfaites par le champ magnétique permet de simuler la géométrie de ces lignes de champ. L'entrefer étant entouré de deux cylindres en matériau de perméabilité magnétique infinie, les lignes de champ dans l'entrefer, orthogonales aux cylindres, sont radiales.

Circuit rotorique Le rotor est constitué d'un enroulement de spires conductrices, réunies en faisceaux et positionnées dans les encoches de la structure, de telle sorte que lorsqu'un côté de l'enroulement fait face au pôle nord, l'autre est au pôle sud

(on retrouve alors la configuration traitée dans la dernière partie du grand un : une spire rectangulaire, plongée dans le champ magnétique produit par le stator).



Ces spires sont parcourues par un courant d'intensité I fourni par une alimentation électrique extérieure. Comme le courant électrique provient généralement d'une source extérieure fixe, et donc pour ne pas emmêler les fils durant la rotation, les bobines du rotor sont alimentées par des **contacts électriques frottants**, entre d'une part :

- les **balais** (ou charbons) fixés sur le stator, et d'autre part
- le **collecteur**, fixé sur le rotor.

Le collecteur a une autre utilité : il permet d'inverser le sens du courant. Les forces font tourner la spire autour de l'axe de rotation du moteur, mais quand la spire a fait un demi-tour, il est faut inverser le sens du courant pour continuer le mouvement. Ce système est sujet à l'usure et nécessite un entretien régulier. Il implique également une limitation en vitesse de rotation.

Couple électromagnétique, couple résistant On va supposer que le moteur est un **moteur à excitation indépendante** : les circuits de l'inducteur et de l'induit sont indépendants électriquement (on parle aussi de moteur à flux constant). La grandeur mécanique d'intérêt est le couple de forces de Laplace exercé sur le rotor. Nous avons calculé ce **couple électromagnétique** pour une spire dans la section précédente :

$$C = \Phi_0 I$$

Lorsque le flux Φ_0 est constant (ce qui est le cas car le circuit inducteur travaille à flux constant : aimants permanents, ou électroaimant dont le bobinage est traversé par un courant constant), le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'alimentation I de l'induit.

La puissance mécanique associée à ce couple s'écrit

$$P_m = C\Omega \quad (4)$$

si Ω est la vitesse angulaire (en rad/s) de l'arbre-moteur.

Soit J le moment d'inertie du rotor par rapport à l'axe de l'arbre-moteur. Le théorème du moment cinétique appliqué au rotor s'écrit alors

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C - C_r - f\Omega$$

où $-f\Omega$ désigne une force de frottement fluide et C_r le couple résistant exercé par la charge entraînée par le moteur (si $C_r = 0$ on dit que le moteur fonctionne à vide). En régime permanent et si les frottements sont négligeables, on a

$$C = C_r. \quad (5)$$

Cette condition donne le **point de fonctionnement** de la machine en régime permanent.

En régime permanent, c'est donc la charge mécanique du moteur (le milieu extérieur responsable du couple résistant) qui impose le couple électromagnétique à fournir pour l'entraîner à vitesse de rotation constante, et par conséquent la valeur courant I circulant dans l'induit à fournir pour produire le couple $C = C_r$.

2.2 Modèle électrocinétique de l'induit

Comme dans le problème des rails de Laplace, il s'établit dans l'induit une force contre-électromotrice (ou force électromotrice en convention électrotechnique) E . Pour la déterminer, on part du bilan de puissance

$$P_m = P_e \quad \text{d'où} \quad C\Omega = EI$$

On injecte dans C son expression en fonction de I , d'où

$$E = \Phi_0 \Omega \quad (6)$$

Ici, Φ_0 joue le rôle de **constante de force électromotrice**.

En régime établi, le circuit induit d'un MCC à excitation indépendante peut être représenté par l'association d'une résistance R (résistance de l'induit) et d'un générateur de tension de force électromotrice E , dirigée selon la tension aux bornes de l'induit U :

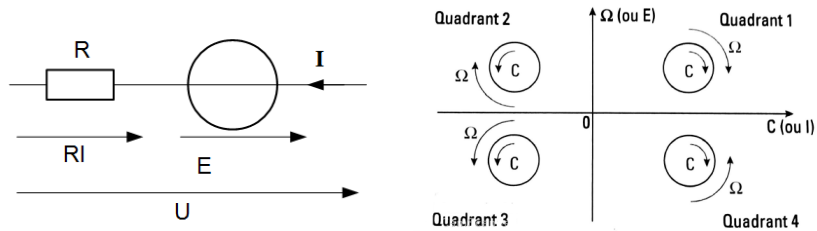
$$U = E + RI$$

Si on néglige la chute de tension résistive dans l'induit, on voit qu'il existe une relation de proportionnalité entre la tension d'alimentation de l'induit U et la vitesse de rotation du moteur Ω , ce qui rend un tel moteur très simple à commander. C'est cette simplicité de commande qui a justifié l'intérêt de cette machine, qui a longtemps été la seule pour laquelle c'était aussi simple.

En convention récepteur (celle choisie pour représenter le modèle), le sens des flèches de I et E indiqués sur le schéma correspondent à des valeurs de I et E positives. Dans cette convention, lorsque

- $E > 0$ et $I > 0$, la puissance électrique $P_e = EI > 0$: la machine reçoit de la puissance électrique et fournit de la puissance mécanique. Elle fonctionne en moteur;

- la machine fonctionne en générateur si $EI < 0$ (en convention récepteur) : elle reçoit de la puissance mécanique et fournit de la puissance électrique.



On peut représenter les régimes de fonctionnement de la machine à courant continu dans un diagramme (Ω, C) : on obtient les quatre quadrants de la machine à courant continu :

- Quadrant 1 : $EI > 0$ avec $E > 0$ (donc $\Omega > 0$) et $I > 0$. Fonctionnement moteur, l'arbre tourne dans le sens choisi positif
- Quadrant 2 : $EI < 0$ avec $E > 0$ et $I < 0$. Fonctionnement en générateur et tourne dans le sens positif.
- Quadrant 3 : $EI > 0$ avec $E < 0$ et $I < 0$. Fonctionne en moteur et tourne dans le sens négatif.
- Quadrant 4 : $EI < 0$ avec $E < 0$ et $I > 0$. Fonctionne en générateur et tourne dans le sens négatif.

A partir des relations précédentes ($U = E + RI$) on peut voir une conséquence pour le démarrage de la machine

Démarrage de la machine Par définition lorsqu'une machine démarre, sa vitesse initiale est nulle. Le courant de l'induit n'est donc limité que par la résistance des bobinages qui le constituent :

$$U = E + RI = 0 + RI$$

$$\Omega = 0 \Rightarrow E = 0$$

Par conséquent, le courant circulant dans l'induit est, dans ce cas, élevé puisqu'en pratique la résistance R est faible. Il est donc nécessaire de démarrer la machine sous tension réduite afin de ne pas dépasser le courant maximal admissible par l'induit. La solution industrielle classique consiste à augmenter progressivement la tension de l'induit U par variateur de vitesse.

Une deuxième conséquence est l'emballement de la machine

Emballement de la machine à excitation indépendante

$$U = E + RI$$

avec $E = \Phi_0 \Omega$. On obtient :

$$\Omega = \frac{U - RI}{\Phi_0} \quad (7)$$

Supposons que cette machine fonctionne à vide (son axe n'est soumis à aucun couple de charge résistant). Le flux Φ_0 est créé par le circuit inducteur. Si ce dernier est bobiné, il est alors alimenté par un circuit extérieur qui lui fournit un courant d'intensité I_e . Si au cours du fonctionnement, le courant inducteur I_e est supprimé (suppression de l'alimentation de l'inducteur), alors Φ_0 s'annule et la vitesse tend mathématiquement vers l'infini. En pratique, le surcroît d'énergie cinétique peut se traduire par un emballement de la machine. Il faut néanmoins veiller à ne jamais couper l'alimentation du circuit inducteur d'une machine à excitation indépendante.

2.3 Bilan de puissance du moteur à courant continu

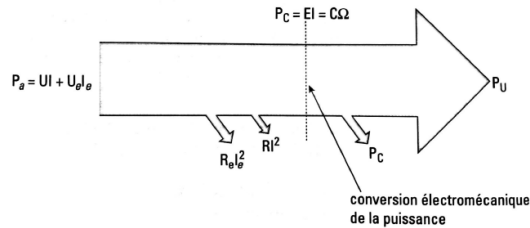
[Breal electrotechnique PSI p 135-138](#) La machine absorbe la puissance électrique UI absorbée à l'induit, ajoutée à celle éventuellement absorbée par l'inducteur $U_e I_e$, lorsque celui-ci est bobiné. La puissance $U_e I_e$ est entièrement dissipée par effet Joule, donc $U_e I_e = R_e I_e^2$.

La puissance absorbée à l'induit s'écrit $P = (E + RI)I = EI + RI^2$. Ceci montre qu'une puissance RI^2 est aussi perdue par effet Joule au niveau de l'induit du moteur. La puissance P_e alors disponible est alors EI , qui est aussi égale à $C\Omega$. Cette puissance est usuellement appelée puissance électromagnétique.

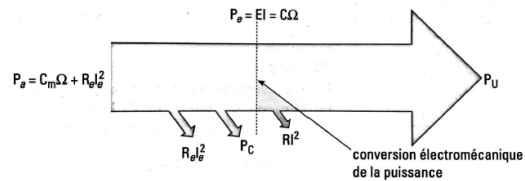
Pour un bilan complet, il faut tenir compte des éventuelles pertes mécaniques (frottements sur roulements par exemple) et magnétiques au rotor (par hystérésis ou courants de Foucault). Ces pertes sont appelées pertes collectives et notées P_c . La puissance mécanique réellement disponible est appelée puissance utile. Cette puissance utile est de nature mécanique, donc il est possible de un moment de couple utile C_u tel que $P_u = C_u \Omega$.

Le rendement d'un moteur à courant continu est le rapport de la puissance mécanique utile divisée par la puissance électrique totale absorbée :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + P_c + RI^2 + R_e I_e^2} \quad (8)$$



Dans le cas de fonctionnement en générateur;



Les moteurs à courant continu ont été longtemps utilisés pour leur vitesse réglable. La régulation de la vitesse et les asservissements de vitesse et de position ont été maîtrisés pour les moteurs à courant continu bien avant les autres types de moteurs.

À puissance égale, les moteurs à courant continu sont beaucoup plus coûteux que les moteurs asynchrones (bobinages au stator et au rotor, collecteur, balais). Le système balais-collecteur est fragile, il nécessite surveillance et entretien. Par exemple, les moteurs TGV Paris-Sud-Est doivent subir un démontage complet et un reprofilage du collecteur tous les 300.000 km, soit bon an mal an tous les ans. Les moteurs à courant continu sont donc actuellement réservés aux usages qu'ils sont seuls à pouvoir satisfaire.

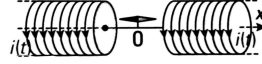
Néanmoins, les applications pour l'automobile, restent un grand marché pour les moteurs à courant continu : démarreur, refroidisseur du moteur thermique, pompe à carburant, essuie-glace, lève-vitre, ventilateur, climatiseur. Depuis, des nouvelles machines ont été conçues machines à courant alternatif

3 Machines à courant alternatif

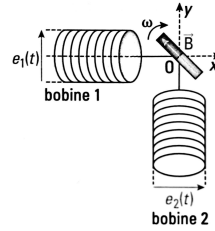
Pour toute machine alternative, on cherche à créer un champ magnétique tournant au niveau du stator qui permettra de mettre en rotation un rotor.

3.1 Réalisation d'un champ magnétique tournant

On considère une aiguille aimantée située entre deux bobines identiques face-à-face et connectées en série, à égale distance de celles-ci. Les bobines sont alimentées par un signal sinusoïdal de pulsation ω qui engendre un champ magnétique sinusoïdal, variable dans le temps, au niveau de l'aiguille aimantée.



Bobines en série



Bobines diphasées

L'aiguille vibre légèrement mais ne tourne pas, une légère impulsion est nécessaire pour la faire tourner (dans le sens de l'impulsion) à une vitesse ω égale à la pulsation du courant traversant la bobine. On dit qu'elle tourne au synchronisme.

On comprend alors mieux la nécessité d'un champ tournant qui permettrait d'un côté de contrôler dans quel sens on démarre le moteur et d'un autre côté de démarrer le moteur sans intervention extérieure.

Pour créer un champ tournant, nous pouvons utiliser deux bobines placées à 90° dont le courant est déphasé de $\frac{\pi}{2}$. Pour créer un déphasage de $\pi/2$ on peut connecter un condensateur en série.

Un champ magnétique tournant est un champ de norme constante dont la direction varie dans un plan avec une vitesse angulaire ω constante. On l'écrit :

$$\vec{B} = B_0 \cos(\omega t) \vec{u}_x + B_0 \sin(\omega t) \vec{u}_y \quad (9)$$

Les machines alternatives possèdent en règle générale plusieurs pôles. Si le stator possède p paires de pôles, la rotation du rotor s'effectue alors à la vitesse $\frac{\omega}{p}$, dans le cas des machines synchrones, où ω est la pulsation du courant créant le champ tournant.

3.2 Principe du moteur synchrone

Le moteur synchrone est constitué d'un rotor à aimants permanents ou un électroaimant à courant continu. Le rotor crée un champ magnétique que l'on peut assimiler au champ créé par un aimant permanent.

Le stator est constitué de bobinages qui sont alimentés par un courant alternatif. Ces bobinages produisent un champ magnétique tournant et à répartition spatiale sinusoïdale le long de l'entrefer.

Le champ magnétique évolue périodiquement de la manière suivante :

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

où θ_0 représente l'angle entre le champ tournant et le moment magnétique \vec{M} à l'instant $t = 0$.

Le rotor est considéré en rotation dans le plan (Oxy) . Notons :

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

où Ω représente la vitesse de rotation du rotor.

Le rotor subit un couple engendré par le champ tournant de la forme $\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}$. Soit:

$$\vec{\Gamma}(t) = M_0 B_0 (\cos(\Omega t) \sin(\omega t + \theta_0) - \sin(\Omega t) \cos(\omega t + \theta_0)) \vec{u}_z = M_0 B_0 \sin((\omega - \Omega)t + \theta_0) \vec{u}_z \quad (10)$$

Cette équation ne permet pas d'interpréter à elle seule les observations expérimentales

Expérience et interprétation Experimentalement :

- Lorsque le moteur synchrone est directement alimenté par une tension de fréquence 50Hz, celui-ci ne démarre pas.
- En réduisant la fréquence, le moteur démarre à des fréquences faibles. On peut ensuite augmenter la fréquence jusqu'à 50Hz sans que le moteur s'arrête de tourner.
- La constante de temps mécanique τ du moteur est important devant la période de la tension d'alimentation. Cette inertie mécanique fait que la machine n'est sensible en réalité qu'à la valeur moyenne des grandeurs électriques si la pulsation est trop importante (comportement de type filtre passe-bas).
- Lorsque le moteur est à l'arrêt ($\Omega = 0$ et $\omega = 100\pi \text{ rad.s}^{-1}$),

L'inertie du moteur fait que :

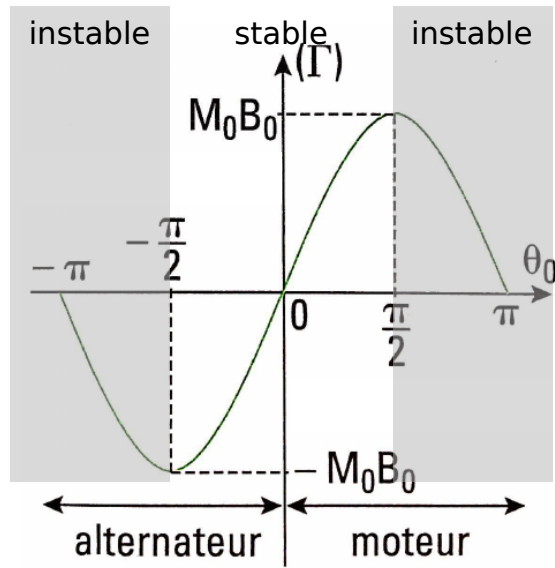
$$\langle \vec{\Gamma}(t) \rangle_\tau = M_0 B_0 \langle \sin(\omega t + \theta_0) \rangle \vec{u}_z = \vec{0} \quad (11)$$

Et le moteur ne démarre pas. Lorsque la fréquence est diminuée, la période T des grandeurs électriques (et donc du champ magnétique) se rapproche de τ . A partir d'un certain seuil, le rotor est sensible à la valeur instantanée du couple et la machine se met à tourner à la vitesse angulaire $\Omega = \omega$. Le rotor tourne au **synchronisme** d'où le nom de moteur **synchrone**. En régime permanent, le couple électromagnétique moyen exercé sur le rotor s'écrit donc :

$$\langle \vec{\Gamma}(t) \rangle = M_0 B_0 \langle \sin(\theta_0) \rangle \vec{u}_z \quad (12)$$

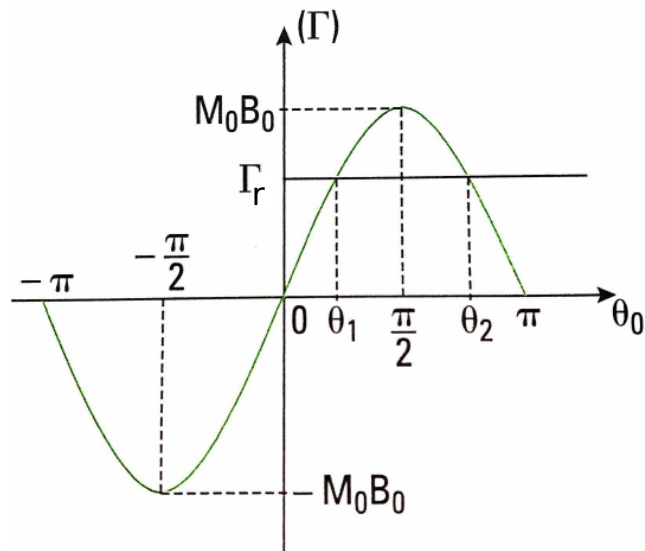
La valeur de θ_0 influe sur le couple. Cet angle est considéré comme la variable dont dépend le couple, c'est-à-dire que la machine adapte cette valeur qu'en régime permanent : il y a alors égalité du couple moteur et du couple résistant s'exerçant sur la machine.

Le signe de θ_0 permet de définir le mode de fonctionnement de la machine. Si θ_0 est positif, il s'agit d'un couple moteur (B en avance par rapport à M). S'il est négatif, il s'agit d'un couple résistant (génératrice, M en avance par rapport à B).



Si lors du fonctionnement du moteur, le couple résistant devient, en valeur absolue, supérieur à $\Gamma_c = M_0 B_0$, le moteur **décroche**, c'est-à-dire que ne pouvant pas fournir le couple nécessaire, il s'arrête.

Suivant le mode de fonctionnement apparaissent une zone de fonctionnement stable et une zone instable grisée sur la figure. En effet, lorsque le moteur est soumis à un couple de charge $\Gamma_r < \Gamma_c = M_0 B_0$, on obtient deux positions de fonctionnement θ_1 et θ_2 qui sont intersection de la droite $y = \Gamma_r$ et de l'équation 12. Étudions la stabilité de ces deux points en fonctionnement moteur :



- Pour $\theta_0 = \theta_1$: si le moteur accélère, le moment magnétique tourne plus rapidement que le champ tournant et le rattrape, donc l'angle θ_0 diminue. Si cet angle diminue, le graphe indique que le couple moteur diminue. Donc le moteur ralentit. Cette position d'équilibre est donc **stable**.
- Pour $\theta_0 = \theta_2$: si le moteur accélère, le moment magnétique tourne plus rapidement que le champ tournant et le rattrape, donc l'angle θ_0 diminue. Si cet angle diminue, le graphe indique que le couple moteur augmente, donc le moteur accélère. Cette position d'équilibre est donc **instable**.

Les moteurs synchrones sont appréciés pour leur vitesse rigoureusement constante, liée à la fréquence du réseau (garanti par le fournisseur). Ils sont utilisés en tant que programmeurs dans les électroménagers (lave-linge, four). Pour les applications industrielles, le moteur synchrone est resté longtemps marginal car il présente des inconvénients :

- il ne démarre pas spontanément lorsqu'on le branche au réseau.
- si la charge augmente trop, le rotor décoche (il cale brusquement et se met à vibrer).
- sa vitesse de rotation est celle du réseau donc on ne peut pas la faire tourner à une vitesse variable

Dans les années 80, le développement des alimentations électroniques triphasées à fréquence réglable a révolutionné l'utilisation des moteurs synchrones, avec la génération des moteurs auto-pilotés. Dans ce type de moteurs, la fréquence des

courants du stator est contrôlée par des capteurs mesurant en permanence la position du champ magnétique du rotor par rapport à la position du champ magnétique tournant. Les problèmes de démarrage et de décrochage sont alors résolus, et la vitesse devient réglable par une action extérieure sur la fréquence.

Les moteurs synchrones sont utilisés pour la motorisation des véhicules réduits hybride, des vélos à assistance électrique ou des TGV.

Conclusion

Dans cette leçon nous avons mis en évidence l'égalité entre la puissance électrique et la puissance mécanique dans un cas sans pertes, puis nous avons montré que placé une spire dans un champ magnétique génère un couple sur cette spire. Nous avons appliqué ce résultat à la machine à courant continu que nous avons caractérisée et pour finir nous avons étudié le fonctionnement d'une machine synchrone.

Nous avons étudié des machines convertissant l'énergie électrique en énergie mécanique mais il y en a d'autres tels que la machine asynchrone. Chaque machine présente des avantages et inconvénients permettant un choix par les industriels de quel machine utiliser en fonction de leurs applications.

Conclusion

Type de moteur	Caractéristiques générales	Remarques	Emploi
Moteur à courant continu (MCC)	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse de rotation facilement commandée par la dpp d'alimentation - S'adapte au couple résistant par faible diminution de vitesse. - Possibilité de régulation 	<ul style="list-style-type: none"> - Fragilité du système collecteur-balais - Le moteur série fonctionne en alternatif (moteur universel) - Depuis années 80, progrès de l'électronique de puissance. 	<ul style="list-style-type: none"> - Grande vitesse de rotation possible - Utilisation en faible puissance dans l'automobile (essuie-glaces, lève-vitres...). En grande puissance (traction électrique, laminoirs)
Moteur synchrone	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse de rotation cte w/n (limité à 3000 tr/min pour alimentation 50 Hz) - Décrochage si charge trop importante - Nécessité d'un moteur auxiliaire de démarrage - Le rendement peut dépasser 90 % 	<ul style="list-style-type: none"> - Depuis années 80, progrès de l'électronique de puissance : variation de vitesse par alimentation à fréquence variable, résolution des problèmes de démarrage et de décrochage (moteurs autopilotés). 	<ul style="list-style-type: none"> - Emploi en très faible puissance (programmeurs, commande de disques durs d'ordinateur) et en haute puissance dans les machines où on désire une synchronisation de vitesse
Moteur asynchrone	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse de rotation légèrement inférieure à w/n (limité à 3000 tr/min pour alimentation 50 Hz) - Adaptation à augmentation de la charge avec faible perte de vitesse - Rendement voisin de 80 % 	<ul style="list-style-type: none"> - Actuellement vitesses plus élevées grâce à des alimentations à fréquence variable - Possibilité de régulation de vitesse 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible puissance (pompes de vidange, ventilateurs...) et grande puissance en alimentation triphasée.