

1. Principe de la conversion électromécanique de puissance

- 1.1. Porteurs de charge d'un circuit mobile dans un champ magnétique : bilan de puissance
- 1.2. Réversibilité de la conversion électromécanique de puissance

2. Principe de fonctionnement d'une MCC

- 2.1. Schéma du dispositif – Compréhension qualitative
- 2.2. Etude mécanique
- 2.3. Etude électrique
- 2.4. Généralisation : relations à retenir

3. Les différents modes de fonctionnement d'une MCC

- 3.1. Notions préalables de mécanique du solide
- 3.2. Fonctionnement en moteur à vide
- 3.3. Fonctionnement en moteur chargé
- 3.4. Fonctionnement en génératrice de courant
- 3.5. Fonctionnement en génératrice tachymétrique

Intro : Ce chapitre traite de la *conversion électromécanique de puissance*. Nous verrons d'autres types de conversion de puissance par la suite. Le principe consiste à transformer de l'énergie *électrique* en énergie *mécanique*. On s'intéresse ici aux *Machines à courant continu* (MCC) :

- branchée à une source d'énergie électrique, la machine se met à tourner (fonctionnement moteur)
- entraînée en rotation par un dispositif ext, elle fournit du courant électrique (fonctionnement générateur)

1. Principe de la conversion électromécanique de puissance

Si l'on néglige les pertes par frottement mécanique et par effet joule, le rendement de la conversion électromécanique *idéal* est parfait : 100%. A comparer au rendement théorique d'un moteur thermique idéal et réversible (30-40%). On comprend immédiatement l'intérêt du moteur électrique.

Dans un cas de conversion parfaite, on parle de *transduction*. Ce résultat est général et ne dépend pas de la technologie retenue pour construire la machine. C'est ce que nous montrons dans cette sous-partie.

1.1. Porteurs de charge d'un circuit mobile dans un champ magnétique : bilan de puissance

On considère un conducteur, de forme et de nature quelconque. Ce conducteur est mobile dans un champ magnétique permanent extérieur. Pour simplifier l'étude, on considère que ce conducteur est un morceau de métal en translation dans le référentiel R d'étude. Chacun de ses points se déplace avec la même vitesse. Pour rendre l'étude plus concrète, on pourra se référer à l'expérience des rails de Laplace, la tige de métal jouant le rôle du conducteur mobile. On rappelle qu'un métal est constitué d'électrons libres et de cations fixes. Le système étudié ci-dessous est constitué *des électrons contenus dans un volume élémentaire du conducteur*. Leur densité volumique est notée n .

- Donner l'expression de la force de Lorentz qui s'applique sur le système
- Exprimer la puissance mécanique reçue par ces électrons sous l'effet de cette force. Pourquoi est-elle nulle ?
- Soit R' le référentiel associé au conducteur. A l'aide de la loi de composition des vitesses, exprimer cette puissance en fonction de la vitesse relative du système et de la vitesse du conducteur dans R .
- Exprimer les deux termes restants en fonction de la densité volumique de courant, du champ électromoteur et de la force de Laplace.
- On revient à une modélisation linéique du circuit, en changeant $\vec{j}d\tau$ en $i\vec{dl}$. Interpréter physiquement les différents termes.

Remarque : Le terme nommé « force de Laplace » est en fait une force agissant sur les électrons. Par l'intermédiaire de l'effet Hall, cette force est aussi égale à la force de Laplace à laquelle sont soumis les cations du conducteur. En définitive, cette puissance reçue par les électrons est égale à la puissance des forces de Laplace reçue par les cations, d'où la validité de notre interprétation.

1.2. Réversibilité de la conversion électromécanique de puissance

Fonctionnement en moteur

*Le conducteur reçoit de la puissance électrique de la part du circuit d'alimentation ($P_{el} < 0$)
Egale à la puissance des forces motrices de Laplace ($P_{lap} > 0$), elle élève donc son stock d'énergie mécanique.*

En définitive, la puissance électrique reçue est stockée sous forme d'énergie mécanique.

- Donner le signe des deux termes précédents dans le cas du fonctionnement en moteur

Fonctionnement en générateur

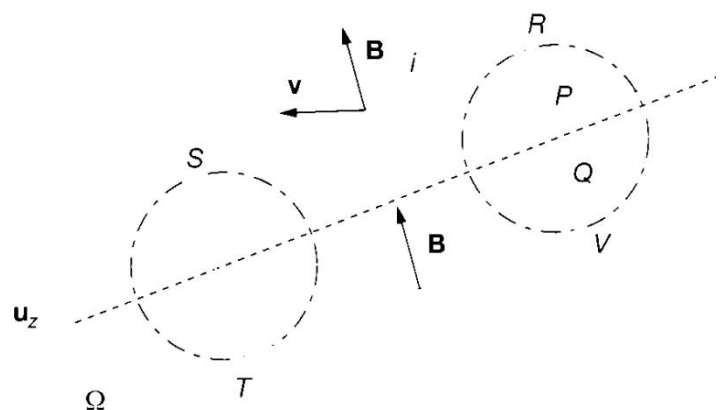
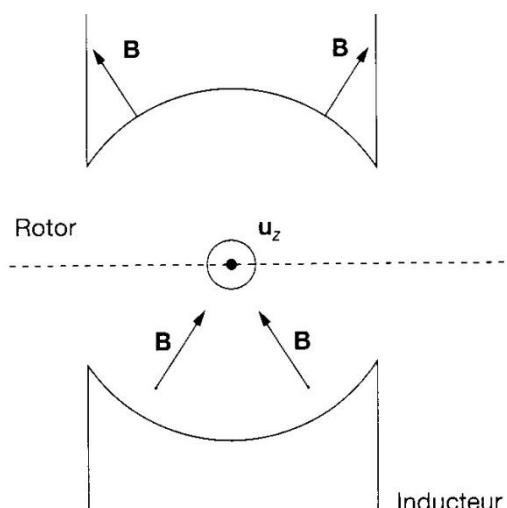
*Le stock d'énergie mécanique du conducteur diminue sous l'effet résistant des forces de Laplace ($P_{lap} < 0$).
Egale à la puissance électrique fournie au reste du circuit ($P_{el} > 0$), le conducteur joue le rôle de générateur.*

En définitive, la puissance électrique générée provient de la diminution du stock d'énergie mécanique.

- Donner le signe des deux termes précédents dans le cas du fonctionnement en générateur

2. Principe de fonctionnement d'une MCC

2.1. Schéma du dispositif – Compréhension qualitative



- **Stator** : C'est la partie fixe de la machine qui crée le champ magnétique (aimant, ou circuit inducteur)
- **Rotor** : C'est la partie qui tourne. C'est un solide à symétrie cylindrique sur lequel est enroulé un bobinage.
- **Circuit induit** : C'est le bobinage enroulé sur le rotor. L'induit subit les forces de Laplace, et est le siège d'une fém d'induction.
- **Circuit d'alimentation** : L'induit tourne avec le rotor, et est alimenté par un circuit... qui lui ne doit pas tourner. Le lien entre l'alimentation et l'induit est fait par des balais fixes par rapport au stator et qui frotte sur le collecteur, lui-même relié aux bornes de chaque spire de l'induit.
- **Collecteur** : Dispositif de commutation mécanique, permettant d'inverser à chaque demi-période le sens du courant dans chaque spire, afin que les forces de Laplace demeurent toujours motrices (si fonctionnement moteur) ou résistantes (si fonctionnement générateur).

Pour comprendre le fonctionnement d'une MCC, on considère le cas simple d'un induit constitué d'une seule spire. Dans l'entrefer, le champ magnétique est supposé radial uniforme et permanent, dirigé du nord de l'aimant vers le pôle sud.

- En fonctionnement moteur, expliquer qualitativement pourquoi la machine se met à tourner.

2.2. Etude mécanique

Le système est le rotor. L'induit parcouru par un courant subit les forces de Laplace.

- En vous appuyant sur le schéma 3D, exprimer le couple des forces de Laplace appliquées à la spire
- Montrer que sa projection suivant l'axe u_z est proportionnelle au courant circulant dans l'induit.
- Donner l'expression de la puissance totale reçue par l'induit de la part des forces de Laplace.
- Exprimer cette puissance en fonction du couple et de la vitesse angulaire de rotation.

2.3. Etude électrique

- Donner le schéma électrique équivalent de l'induit (on négligera l'inductance propre de l'induit)
- Montrer que la fém induite est proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation du rotor.
- Montrer que les deux facteurs de proportionnalité (couple-courant, et fém-vitesse angulaire) sont identiques et homogènes à un flux de champ magnétique.
- Vérifier que $P_{lap} + P_{el} = 0$

2.4. Généralisation : relations à retenir

Les résultats établis dans ce cas simple sont générales, elles ne dépendent pas de la géométrie de l'induit.

Expressions du couple et de la fém

$$e = -\Phi \omega$$

$$\Gamma = \Phi i$$

*Le coefficient Φ est une constante homogène au flux d'un champ magnétique (dépend géométrie de l'induit).
Les quantités e, i, Γ, ω sont des quantités **algébriques** : elles peuvent être négatives ou positives.*

- Dans le plan (e, i) associer à chacun des quadrants un mode de fonctionnement de la machine électrique.
- Idem dans le plan (Γ, ω) .

Modélisation électrique de l'induit

En général, on modélise l'induit par une inductance propre, une résistance interne, et une fém.

- Justifier la pertinence de cette modélisation.

3. Les différents modes de fonctionnement d'une MCC

La méthode d'étude est toujours la même : écrire les équations mécaniques et électriques, puis former une équation différentielle vérifiée par la grandeur que l'on cherche à déterminer (puis la résoudre).

3.1. Notions préalables de mécanique du solide

On admet ces deux théorèmes, valables pour un solide à symétrie de révolution, en rotation autour d'un axe fixe dans un référentiel galiléen.

Théorème du moment cinétique, solide en rotation autour d'un axe fixe (R galiléen)

$$J \frac{d\omega}{dt} = \Gamma_{lap} + \Gamma_{frot} + \Gamma_{autre}$$

- J est le *moment d'inertie* du solide autour de son axe de révolution ($kg.m^2$). Il représente l'inertie du solide à sa mise en rotation, plus J est grand plus le solide est « inerte », donc difficile à faire tourner. Le moment dépend de la masse du solide, *et de la répartition de la masse autour de l'axe*. Plus la masse est loin de l'axe, plus l'inertie est grande
- Toutes les grandeurs du théorème sont algébriques. Les autres couples sont dus à la « charge mécanique » (i.e. le dispositif sur lequel on 'branche' l'arbre du rotor, une autre MCC par exemple)
- On retiendra cette formule facilement... car elle ressemble à la RFD

Théorème de l'énergie cinétique, solide en rotation autour d'un axe fixe (R galiléen)

$$\frac{dE_c}{dt} = P_{lap} + P_{frot} + P_{autre}$$

$$E_c \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{2} J \omega^2$$
$$P \stackrel{\text{def}}{=} \Gamma \omega$$

- Toutes les grandeurs du théorème sont algébriques
- On retiendra cette formule facilement... car elle ressemble au TEC pour un point matériel

3.2. Fonctionnement en moteur à vide

Le moteur est utilisé à vide, i.e. pas de couple autre que Laplace et éventuellement les frottements.

- En négligeant les frottements, montrer qu'en régime permanent la vitesse angulaire est proportionnelle à la tension d'alimentation.
- Déterminer le temps caractéristique du régime transitoire entre l'arrêt initial du moteur et l'atteinte du régime permanent.
- Refaire l'étude en incluant des frottements fluides (couple proportionnel à la vitesse angulaire)

3.3. Fonctionnement en moteur chargé

Lorsque l'on « branche » l'arbre du rotor sur un dispositif en aval du moteur, on dit que le moteur est « chargé » (noter l'analogie avec l'étude des circuits électriques). L'étude est similaire au cas précédent, et ne peut être faite que si la relation $\Gamma_c(\omega)$ est connue.

Comme en électricité, en régime permanent il est possible d'adopter une résolution graphique pour trouver le point de fonctionnement du « circuit » constitué par le moteur et la charge. Il faut alors se placer dans le plan (ω, Γ) .

Si la relation $\Gamma_c(\omega)$ est linéaire, il est possible de résoudre analytiquement le problème en régime variable quelconque, en utilisant le formalisme complexe.

3.4. Fonctionnement en génératrice de courant

Soit un dispositif extérieur qui fait tourner le rotor (le couple de charge est alors moteur). On branche l'induit sur une résistance de charge électrique.

- En négligeant l'inductance propre de l'induit, donner l'expression du courant généré par la MCC en fonction de la vitesse angulaire de rotation

3.5. Fonctionnement en génératrice tachymétrique

On reprend la même situation que précédemment, mais l'induit est en circuit ouvert : un voltmètre est placé à ses bornes.

- Montrer que la tension mesurée par le voltmètre est proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation du rotor

Notions clefs

Savoirs :

- Somme des puissances de Laplace et fém est nulle
- Discussion sur les différents modes de fonctionnement (en fonction des signes des puissances)
- Définitions stator, rotor, inducteur, induit
- Relations proportionnalité couple-intensité et fém-vitesse angulaire + dimension de Φ
- Modélisation électrique de l'induit
- TEC et TEM pour solide en rotation autour axe fixe

Savoirs faire :

- Utiliser les savoirs ci-dessus pour étudier fonctionnement d'une machine : établissement EDiff
- Refaire l'étude simplifiée de la MCC à une spire (avec énoncé)
- (bonus : démontrer la relation $P_{lap} + P_{el} = 0$)