

LP n° 20 : Conversion de puissance électromécanique

NIVEAU : CPGE

Cette leçon est au niveau du programme PSI, « esprit nouveau programme »

PRÉREQUIS :

- Induction
- Électromagnétisme dans les milieux

PLAN :

1. Le contacteur électromagnétique
2. Le moteur synchrone
3. Le moteur à courant continu

BIBLIOGRAPHIE :

- [22] *Physique Tout-en-un PSI/PSI**, Dunod 2017 (4e édition)
- Cours de conversion électro-magnéto-mécanique de la Spé 2 du Lycée Naval. ou encore .
- Electronique 2ème année PSI-PSI*, HPrépa, 2004

IDÉES À FAIRE PASSER :

Introduction : Cours de Naval, p. 1 - Le phénomène d'induction électromagnétique a mis en évidence la possibilité de convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement. L'étude d'une machine électromécanique nécessite de connaître l'expression de la force (translation) ou du couple (rotation) s'exerçant sur la partie mobile. Les machines réelles sont constituées de matériaux ferromagnétiques, le calcul direct des actions électromécaniques n'est alors pas envisageable. Sur un premier exemple en translation, on présente une méthode générale permettant de déterminer la force électromagnétique via une étude énergétique. Cette technique sera alors mise en œuvre pour l'étude des machines synchrone et à courant continu.

1 Le contacteur électromagnétique

1.1 Présentation

Relais, sert d'interrupteur dans les dispositifs de sécurité électrique (exemple du disjoncteur différentiel). Un noyau ferromagnétique fixe en forme de U est excité par une bobine de N spires parcourue par un courant d'intensité i (électro-aimant). Deux entrefers d'épaisseur x variable le séparent d'un bloc ferromagnétique mobile en translation selon Ox . On note S la section constante du circuit magnétique et l sa longueur moyenne en l'absence de l'entrefer (cf. slide). La bobine est constituée de N spires et parcourue par un courant $i(t)$.

[22], p. 707-710 et Cours de Naval, p. 1 - Lorsque l'intensité i est nulle dans la bobine, la partie mobile ne subit aucune force. En présence d'un courant, la partie fixe se comporte comme un électroaimant, elle attire la partie mobile avec une certaine force qu'on cherche à déterminer. Établissement du champ B et de l'inductance propre par théorème d'Ampère et conservation du flux de champ magnétique. Inductance = fonction décroissance de x . $E_{\text{magn}} = 1/2 L(x) i^2$.

1.2 Bilan énergétique

[22], p. 710 et Cours de Naval, p. 1-2 - On considère le système constitué de l'ensemble noyau + bobine. On suppose qu'un opérateur extérieur déplace le barreau en exerçant la force F_{op} , la bobine étant traversée par un courant i et soumise à la tension u (slide). schéma électrique équivalent. L'action de l'opérateur modifie le flux (inductance propre fonction de la position), ceci entraîne l'apparition d'une force électromotrice. Équation électrique + 1er principe (la puissance fournie par le générateur fait varier les énergies potentielle, cinétique et EB et compense les pertes par effet joule) + théorème de l'énergie cinétique. Il y a établissement de la force F_{em} , proportionnelle à i^2 , force de rappel. Ce type de dispositif peut servir de contacteur électromagnétique permettant de commander la fermeture ou l'ouverture d'un circuit électrique via le déplacement de la partie mobile qui, en l'absence de courant dans la bobine, est ramenée à sa position initiale par l'intermédiaire d'un ressort.

1.3 Intérêt et généralisation

[22], p. 708 et Cours de Naval, p. 2 - **Méthode systématique quelque soit le mode d'actionneur :** on détermine l'inductance vue par le circuit électrique au moyen du théorème d'Ampère et de la conservation du flux de champ

magnétique, on en déduit l'énergie magnétique stockée puis la force exercée sur la partie mobile :

$$dE_m = i d\Phi - F_{em} dx \iff \frac{dE_m}{dt} = -P_{meca} - P_e$$

illustre la conversion de puissance électromécanique. La variation d'énergie magnétique stockée est égale à la somme de la puissance perdue par induction et de la puissance mécanique fournie à la barre. On a une méthode pour trouver la force EB, si on est en rotation $P_{meca} = \Gamma \omega$, on en déduit la méthode de calcul du couple EB pour tout système.

Transition : on va utiliser ces résultats pour étudier les moteurs.

2 Le moteur synchrone

Voir [22], p. 729 pour une introduction sur son utilisation.

2.1 Action d'un champ magnétique tournant

[16], p. 311 - Définition d'un champ tournant. Il existe plusieurs méthodes pour créer un champ tournant (les citer) et expliquer la deuxième : utilisation de champs magnétiques sinusoïdaux en quadrature spatiale et temporelle. Voir schémas explicatifs sur slide. Mouvement de rotation de l'aiguille synchrone. [16], p. 313-314 - L'action d'un champ tournant sur un aimant résulte en un couple de moment $\Gamma(\gamma) = M_0 B \sin(\gamma)$, moteur si θ est entre zéro et π et résistant entre $-\pi$ et zéro. Le moment magnétique et le champ tournent à la même vitesse : **machine synchrone**.

Transition : le champ B ainsi créé n'est tournant et homogène qu'au centre du système. En réalité, un tel champ ne peut pas être homogène sur tout le rotor, on ne peut donc pas le modéliser par un moment magnétique (approximation dipolaire du moment magnétique plus valable). Il faut une autre approche : calculer chacun des champs dans les différents endroits.

2.2 Champ statique, champ rotorique

Cours de Naval, p. 4 et [16] p. 314 - On s'intéresse à une machine synchrone à pôles lisses et à excitation séparée (voir slide). Présentation de la structure de la machine (rotor, stator). Le but est de déterminer le champ magnétique dans l'entrefer pour en déduire l'énergie magnétique afin de calculer le couple électromagnétique (on suit la méthode établie au I.) :

- [22], p. 731 et Cours de Naval, p. 5 - Champ magnétique créé par une spire statorique unique (slide). Les lignes de champs sont radiales dans l'air de l'entrefer et H est nul dans le fer. yOz est un plan de symétrie des courants. On applique le théorème d'Ampère pour H sur le contour Γ . PWP. On en déduit le champ B et son profil radial dans l'entrefer (à faire au tableau). Le champ créé dans l'entrefer par une seule spire n'est pas sinusoïdal. En plaçant d'autres spires parcourues par le même courant dans des encoches décalées, on approche une forme sinusoïdale. PWP du profil du champ approché puis de la représentation que l'on va choisir pour alléger le dessin (on ne va pas dessiner les N spires).
- [22], p. 734 et Cours de Naval, p. 6 - Ajout d'une deuxième phase statorique déphasée de $\pi/2$, calcul du champ glissant : se déplace à la vitesse angulaire ω dans le sens trigonométrique.
- [22], p. 736 et Cours de Naval, p. 6-7 - Champ glissant rotorique. Il faut créer, au niveau du rotor, l'équivalent du moment dipolaire permanent. PWP le rotor tourne autour de l'axe Oz , son mouvement est défini par l'angle θ_r , l'entrefer est repéré par l'angle γ . Champ rotorique = champ glissant qui tourne avec le rotor à la vitesse angulaire $\dot{\theta}_r$.

2.3 Couple électromagnétique

On a le champ B au sein de l'entrefer, on peut en déduire E_{EB} et Γ_{EB} .

[22], p. 736 et Cours de Naval, p. 7 - On intègre la densité d'énergie volumique, seulement dans l'entrefer car dans les ferro, $\mu_r \rightarrow \infty$ donc terme négligeable. On décompose le calcul de l'intégrale en trois termes : rotor, stator, couplage. (remarque Cours de Naval, p. 7 en bas!) faire au tableau une intégrale et un slide avec les deux autres. Le couple électromagnétique exercé sur le rotor se déduit par dérivation de l'énergie électromagnétique.

[22], p. 739 et Cours de Naval, p. 7 - Couple moyen et condition de synchronisme : la vitesse angulaire de rotation du rotor doit être égale à la pulsation du courant des phases du stator. Machine synchrone!

2.4 Utilisation

[22], p. 739 et Cours de Naval, p. 8 - Fonctionnement moteur et stabilité : schéma du couple en fonction de l'angle au tableau : dispositif moteur quand α est entre 0 et π . Point de fonctionnement : 2 positions, une stable et une instable. Notion de décrochage + difficulté de démarrage : prendre de l'énergie électrique. (rapide équations) Je ne pense pas qu'on ait le temps de faire le bilan de puissance (PWP) si on veut aussi parler du MCC. On peut parler de l'alternateur aussi.

Transition : l'alternateur permet d'enchaîner sur les machines réversibles

3 Le moteur à courant continu

3.1 Structure

[22], p. 775 et Cours de Naval, p. 10 - stator + rotor et leur champs. PWP Nécessité d'un collecteur : c'est ce qui fait l'usure du moteur!

Expérience : Présenter le MCC avec l'inversion de sens du courant : collecteur. PWP schéma des angles et du sens du courant.

3.2 Fonctionnement

Cours de Naval, p. 11 et [22], p. 781 - On assimile le moteur à courant continu à une machine synchrone pour laquelle l'angle entre le champ statorique et le champ rotorique est en permanence égal à $\pi/2$. Couple proportionnel à l'intensité i du courant qui circule dans le rotor $\Gamma_{em} = \Phi_0 i$. Φ_0 est la constante du couplage, caractéristique du moteur et proportionnelle au champ produit par l'inducteur. Force contre électromotrice + schéma électrique équivalent. PWP bilan énergétique du moteur réel.

3.3 Etude en fonctionnement moteur

Cours de Naval, p. 12 et [22], p. 784 - Équation électrique + équation mécanique. Démarrage et régime permanent : contrairement au moteur synchrone, le MCC peut démarrer sans dispositif annexe (couple non nul lorsque le moteur est à l'arrêt). Démarrage possible si le couple moteur dépasse le couple résistant. Point de fonctionnement.

3.4 Réversibilité : fonctionnement en générateur

Cours de Naval, p. 13 et [22], p. 784 - Principe + convention d'orientation + PWP bilan énergétique de la génératrice. Applications : génératrice tachymétrique, Freinage d'une machine.

Conclusion : on n'a pas parlé du rendement de ces machines (il faut évaluer les différents types de pertes et la puissance utile). Important de comprendre le fonctionnement de ces moteurs car sont très utilisés à différentes échelles : motorisation de modèles réduits jusqu'aux TGV.

BONUS :

- **Le but du contacteur :** Le relais est un contacteur électromagnétique, servant d'interrupteur dans certains dispositifs de sécurité électrique, le disjoncteur différentiel par exemple. Le principe d'un tel disjoncteur est représenté ci-contre. Un tore cylindrique ferromagnétique entoure la ligne bifilaire EDF qui entre dans une pièce. Une ligne assure l'arrivée du courant dans la pièce, l'autre assure son retour. Vu les dimensions considérées, l'ARQS est vérifiée et en fonctionnement normal $i_{aller}(t) = i_{retour}(t)$ à chaque instant. Si une électrocution a lieu dans la pièce, une partie du courant passe par le corps de la personne et s'enfuit par le sol. Ce courant d'électrocution ne ressort pas par la ligne bifilaire EDF. Donc $i_{aller} > i_{retour}$. La ligne bifilaire crée alors un champ magnétique non nul dans son environnement, notamment à l'intérieur du tore. Si un bobinage est enroulé sur une section de ce tore ferromagnétique, une fem d'induction y est générée par le champ magnétique variable (50 Hz). C'est pourquoi le disjoncteur est qualifié de différentiel : il mesure la différence de courant entre l'entrée et la sortie. La deuxième partie du disjoncteur est constituée par le contacteur électromagnétique, qui est une sorte d'interrupteur. Ce dernier est un dispositif similaire à l'électroaimant de levage étudié précédemment, et c'est la fem discutée ci-dessus qui alimente le bobinage du contacteur. Lorsque la fem est non-nulle, la partie mobile du contacteur subit une force magnétique, ce qui provoque l'ouverture du circuit EDF sur lequel est branché le disjoncteur différentiel : l'électrocution est donc stoppée, et en général la personne n'a pas subi de dommages

physiques importants car l'électrocution a été de très courte durée, et de faible intensité. Les disjoncteurs différentiels visibles en salle de TP sont ceux imposés par les normes de sécurité (les mêmes que chez vous), et limitent la différence de courant « aller-retour » à 30 mA efficace. Si on a plusieurs circuits :

$$E_{magn} = \frac{1}{2} \sum i_k \Phi_k \quad \text{et} \quad \Phi_k = L_k i_k + \sum_j M_{jk} i_j$$

Le bilan de puissance global ne fait pas intervenir la puissance mécanique P_{meca} due à la fem et la puissance électrique P_{el} due à l'induction qui sont des puissances internes.

- Leçon très très longue : enlever le MCC, pas grave on sait qu'on n'a pas le temps.