

Conversion de puissance électromécanique

Niveau : CPGE 2ème année

Pré-requis :

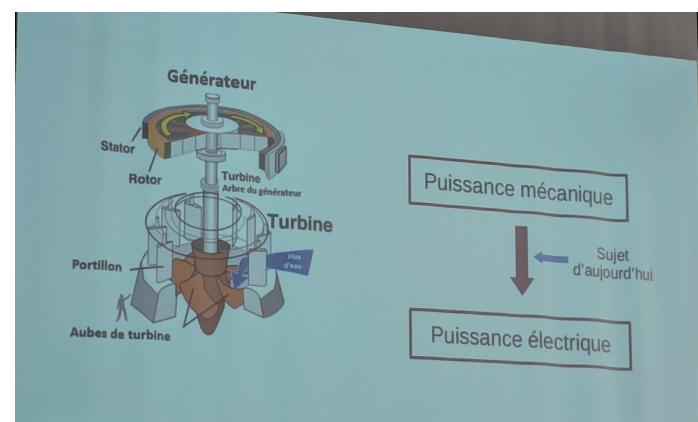
- Electromagnétisme (vue en 1ère et 2ème année)
- Induction (fin 1ère année)
- Mécanique du point (+ Méca du solide)

Bibliographie :

- Electronique II, H Prépa, 2e année PSI 1997
- Dunod PSI

Introduction

Slides type conversion meca-electrique par eau/air/ ..



La science relative aux machines tournantes date de la deuxième du XIX^e siècle, ce qui en fait une science assez jeune. Pour rappel, la dynamo a été inventé en 1869 et la fin du XIX^e siècle voit apparaître le transport de tensions continues et alternatives sur de grandes distances, permettant l'essor de ces machines électromécaniques. Elles nous entourent aujourd'hui, elles sont utilisées comme moteurs (vibrateurs de téléphones, trains...) ou comme génératrice (éoliennes, turbines...).

Dans cette leçon nous allons ainsi voir quel est le principe de ces machines; quels en sont les différents types; et comment les caractériser mathématiquement et les quantifier pour mieux comprendre leur mode de fonctionnement.

I. Rail et force de Laplace

A. Présentation du système

Quand on a variation du flux = fem (induction) : $e = - \frac{d\Phi}{dt}$

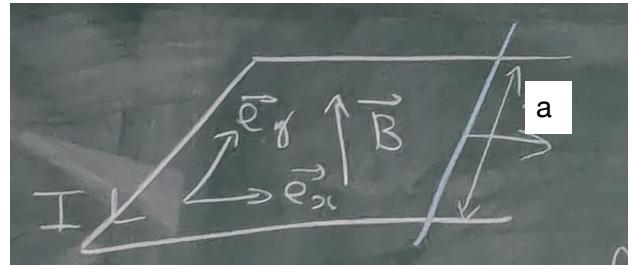
Force de Laplace $d\vec{F}_L = I d\vec{l} \wedge \vec{B}$

Circuit constitué de 4 côtés dont 1 peut bouger (rail mobile) de longueur a . En bougeant le rail on aura un courant et l'inverse, en imposant un courant, le rail bouge. Donc le rail peut présenter 2 modes de fonctionnement.

B. Modes de fonctionnement

- Mode générateur : conversion d'énergie méca vers électrique

Un champ magnétique uniforme \vec{B} est appliqué perpendiculairement au plan du circuit. Le rail se déplace à vitesse \vec{v} , par exemple sous l'action d'une force extérieure. Un courant I circule dans le circuit, induit par le mouvement du rail. C'est l'effet générateur



PFD appliquée au rail mobile dans référentiel labo supposé galiléen :

$$m \frac{dv}{dt} = F_{ext} + F_L = F_{ext} + IaB$$

Le flux à travers le circuit est : $\Phi = Bax(t)$ donc fem induite est :

$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - Bav(t)$ et l'intensité du courant est la fem divisée par la

résistance globale du circuit : $I = \frac{e}{R} = \frac{-1}{R} \frac{d\Phi}{dt} = \frac{-avB}{R}$

Donc $\frac{dv}{dt} + \frac{a^2 B^2}{mR} v = \frac{F_{ext}}{m}$ (une équation différentielle 1er ordre) avec $\tau = \frac{mR}{a^2 B^2}$

la solution : $v(t) = v_\infty(1 - e^{-t/\tau})$ donc $v(t) = \frac{RF_{ext}}{a^2 B^2} \left[1 - e^{-\frac{a^2 B^2}{mR} t} \right]$

(v_∞ est la vitesse limite atteinte par le rail mobile quand le système a atteint son régime permanent donc $e^{-t/\tau} \rightarrow 0$ et là $F_L = F_{ext} = \frac{a^2 B^2}{R} v_\infty$ et il n'y a plus d'accélération ($a=0$) et le rail glisse à vitesse constante)

A.N. : $m=100g / a=10cm / B=1T / R=50\Omega$ donc $\tau=500s=8min20s$

Donc régime permanent ($v \sim v_\infty$) à 99% (donc 4.7τ) est à partir de 39min10s.

En régime permanent, la puissance utile (électrique) $P_u = RI^2 = \frac{a^2 B^2 v^2}{R}$ et la puissance fournie (mécanique) $P_f = F_{ext}v$ donc rendement $\eta = \frac{P_u}{P_f} = \frac{a^2 B^2 v}{RF_{ext}}$

Et en régime permanent $v(t) = \frac{RF_{ext}}{a^2 B^2} [1]$ donc $\eta = 1$

Puissance fournie = Puissance utile.

C'est un cas idéal : toute la puissance mécanique est convertie en énergie électrique, qui est entièrement dissipée dans la résistance. Il n'y a aucune perte ailleurs (pas de frottement, pas de rayonnement, pas d'induction parasite...). Ce n'est pas un "moteur" qui récupère cette énergie, mais un système purement résistif : on produit du courant, mais pas de travail utile au sens industriel.

- Mode moteur : conversion d'énergie électrique vers méca

On impose un courant via un générateur (pile ou source de tension). Le mobile reçoit une force de Laplace et se met à bouger. Le mouvement du rail dans le champ magnétique génère une f.e.m. : $e = -aBv$

Cette f.e.m. est induite par le mouvement donc elle s'oppose au courant imposé (loi de Lenz). Elle est donc en convention récepteur.

$$m \frac{dv}{dt} = F_{ext} - IaB$$

Ici F_{ext} c'est pas ce qu'on fournit mais ce qu'on obtient

$$U = RI + e = RI - aBv \text{ et donc } I = \frac{U}{R} + \frac{aBv}{R}$$

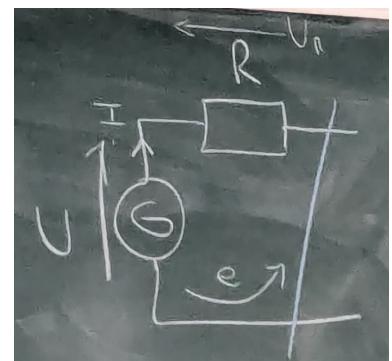
$$\frac{dv}{dt} + \frac{a^2 B^2 v}{mR} = \frac{F_{ext}}{m} - \frac{aBU}{mR} \text{ (ED 1er ordre) avec } \tau = \frac{mR}{a^2 B^2}$$

$$\text{la solution : } v(t) = v_\infty(1 - e^{-t/\tau}) \text{ donc } v(t) = \frac{RF_{ext} - aBU}{a^2 B^2} \left[1 - e^{-\frac{a^2 B^2}{mR} t} \right]$$

La puissance fournie par générateur $P_u = UI$ et celle utile (fournie au système extérieur) $P_f = F_{ext}v$ donc $\eta = \frac{F_{ext}v}{UI} = \frac{F_{ext}vR}{U(U + aBv)} = 1 - \frac{RF_{ext}}{aBU}$

On voit que le rendement $\neq 1$

- Si $R \rightarrow 0$ donc $\eta \rightarrow 1$: pas de pertes, rendement parfait.
- Si U est très grand donc aussi $\eta \rightarrow 1$
- Si F_{ext} est très grand donc le rendement chute : le système "force trop" donc gaspille du courant.



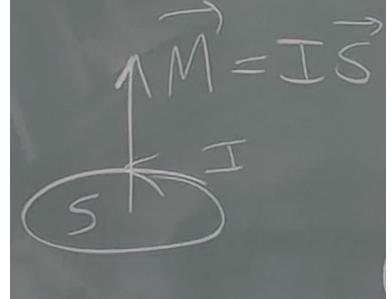
Dans les moteurs utilisés en pratique (électroménagers, moteurs d'usines...), la force de Laplace est toujours le principe fondamental mais on ne l'utilise pas sous la forme "fil dans champ B" comme dans le rail mobile. La conversion électromécanique repose sur des circuits magnétiques tournants, des bobines en rotation, et des modèles plus élaborés

II. Machines à champ tournant

A. Généralités

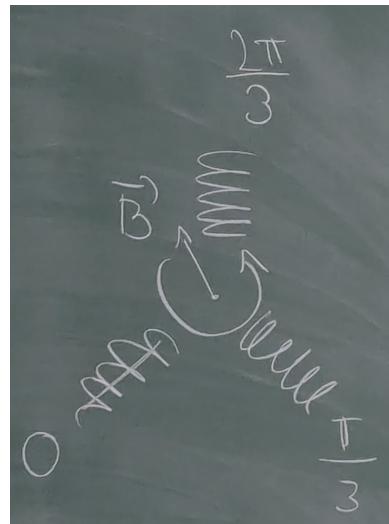
Soit une spire de section S parcouru par courant, il se crée un moment magnétique $\vec{M} = I\vec{S}$. Il y a donc une force $\vec{F} = (\vec{M} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B}$

Mais ce qui nous intéresse c'est le couple $\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}$. Le couple n'est pas nul si le moment magnétique et le champ ne sont pas colinéaires et est max s'ils sont orthogonaux.



- Moteurs à courant continu
- Faire tourner le champ \vec{B} (pour qu'il soit tjr \perp à M qui tourne)

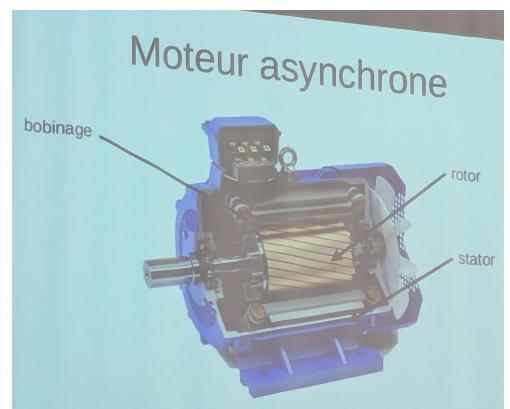
Théorème de Faraday : 3 bobines déphasées de $\frac{\pi}{3}$ et disposées tous les $\frac{\pi}{3}$ génèrent un champ \vec{B} tournant à la même fréquence.
(Il y a peut être une erreur là)



B. Machine asynchrone

Le bobinage correspond à 1 des 3 bobines qu'on a présenté juste avant. Le rotor est une bobine fermée et relié à rien, il va tourner par les courants induits. Si champ tourne à fréquence ω , donc le rotor ne peut pas tourner à cette fréquence sinon il sera en repos par rapport à la bobine et donc il n'y aura pas de courants induits.

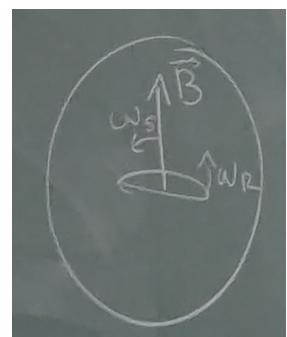
Alors le moteur fonctionne s'il y a mouvement relatif entre le rotor et le champ (d'où le nom asynchrone)



$$\theta_R(t) = \omega_R t$$

$$\theta_S(t) = \omega_S t$$

$$\Phi_R = \Phi_m \cos((\omega_S - \omega_R)t)$$
 donc si les 2 ω ne sont pas



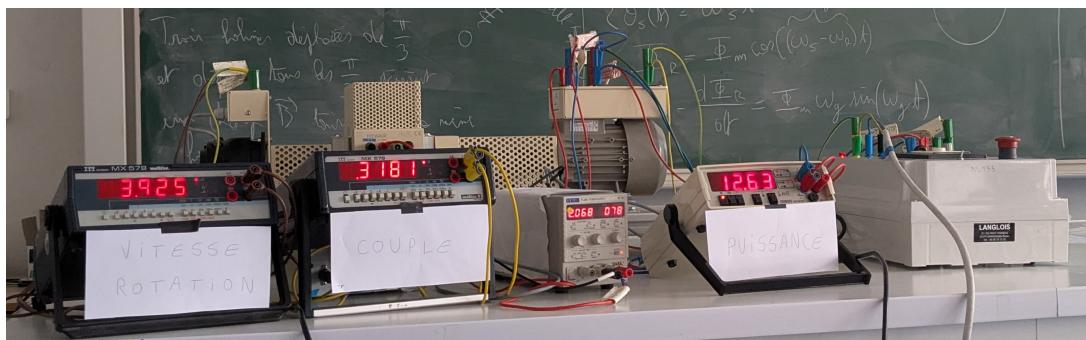
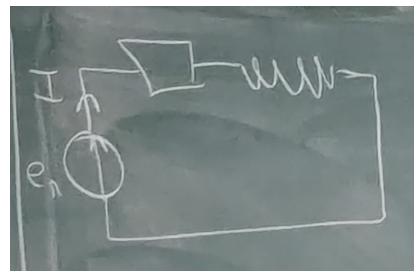
égales, Φ_R dépend de t et c'est ça qu'on cherche pour avoir une induction.

$$e = -\frac{d\Phi_R}{dt} = \Phi_m \omega_g \sin(\omega_g t) \quad \text{avec } \omega_g = \omega_s - \omega_R$$

$$\langle \Gamma(t) \rangle = \frac{\Phi^2}{2} \frac{R\omega_g}{R^2 + L^2\omega_g^2} \quad \text{donc le couple est non}$$

nul si $\omega_g \neq 0$

Regardons le rendement d'un moteur asynchrone expérimentalement.



3e de gauche change tension qui change viscosité des grains donc change couple de freinage.

La puissance réellement envoyée est 3x (car triphasé)

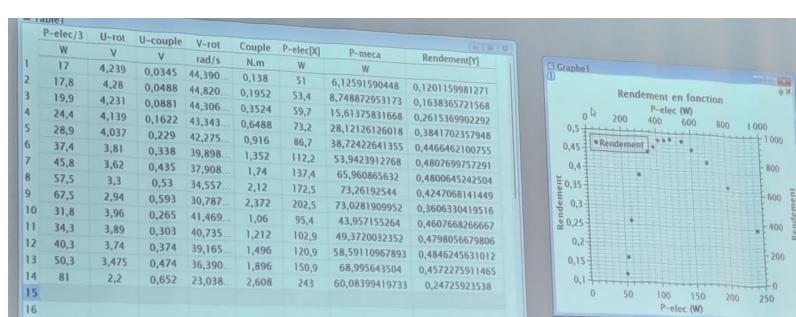
On choisit une tension pas très forte (autour de 2V), donc j'impose un certain couple de freinage au motor. Et on regarde quelle puissance de moteur à envoyer pour dépasser ce freinage ainsi que le couple et vitesse de rotation obtenues.

Il faut faire conversion d'unités ..

Ce qu'on fournit est puissance électrique et puissance utile est mécanique.

On trouve une fréquence d'alimentation pour laquelle le rendement est maximal qui est 0.48

Ce moteur a un rendement max de 0.7 mais on s'est pas mis dans la valeur efficace de conversion (vitesse moteur) car il fait un bruit bizarre.



Conclusion : quel type moteur = quel type électroménager comme batteur a besoin d'un petit moteur et pas besoin de tourner (i think) / machine à laver

Questions sur la Manip 1

Au tableau, le schéma indique que le moment magnétique induit est mis en rotation par la force de Laplace, quelle est l'expression du couple exercée par un champ B sur une spire de courant ?

R: Gamma = M x B, aucune force de Laplace

Quelle est l'expression du moment induit par le champ tournant ?

R: $\vec{M} = i\vec{S}$ avec une orientation du vecteur surface liée au choix du sens conventionnel du courant dans le circuit (tire-bouchon).

Lien entre induction et force de Laplace ?

R: A priori aucun car on peut tout à fait avoir l'un sans l'autre.

Questions sur la Manip 2

En introduction, vous avez dit «la plupart des moteurs utilisés fonctionnent sur une conversion électromécanique », expliquez ?

De nombreux moteurs du quotidien utilisent cette conversion mais pas tous : le moteur de Stirling convertit de l'énergie thermique en mécanique (**rappelons que ce n'est pas un moteur du quotidien !**), de même le moteur de voiture (énergie chimique).

Les trois bobines sont-elles disposées comme sur votre dessin dans le moteur ?

En réalité elles sont imbriquées les unes dans les autres mais le principe est le même.

De quelle forme est le champ magnétique créé dans le système ? (donner une forme mathématique)

La norme est constante et mais l'orientation change. La vitesse de rotation est constante. **Typiquement, on cherche à créer un champ en $\cos(\omega_s t - \theta)$ avec theta l'angle dans l'entrefer.**

Vous avez dû créer un courant triphasé à partir de monophasé. Comment s'appelle la boîte grise ? A-t-on des machines asynchrones dans le quotidien (si oui où) ? Est-ce qu'une machine asynchrone monophasée existe ?

Un variateur ? On a du monophasé chez nous donc il faudra créer un champ magnétique tournant, sans triphasé. **Les machines asynchrones monophasées existent bien, mais elles ont un couple de démarrage nul.**

Pourquoi EDF transporte du triphasé ?

Cela permet d'éviter de perdre de la puissance **en ligne**.

Quel type de pertes observe-t-on dans une machine asynchrone ?

il y a des pertes par frottements (du rotor sur son axe), des pertes par les bobines de l'énergie électrique (perte cuivre) et par le matériau ferromagnétique (pertes fer à cause du cycle d'hystérésis, guidage imparfait) + pertes par courants de Foucault (**réduites par le feuillement des matériaux magnétiques**).

Comment fonctionne la dynamo tachymétrique ?

Son fonctionnement est le contraire de celui du moteur. (on fait tourner le rotor, ce qui crée une tension dans le stator que l'on récupère)

frein. Habituel de faire le champ magnétique avec une tension ?

poudre magnétique dont la viscosité varie avec le champ magnétique qui lui est mise (en tension via une bobine)

Capteur de couple

jauge de contrainte (torsion du capteur faire varier l'équilibrage d'un pont)

Puissance nominale du moteur ?

Puissance pour laquelle le rendement est maximal, ici entre 300 et 400W (on ne peut pas être plus précis)

Quel sens de regarder des points à puissance très faible ?

Pas intéressante pour avoir le rendement max mais pour utiliser le moteur ça l'est. Avec la précision des appareils, on n'aurait pas pu avoir plus de précision

Pourquoi on veut un rendement élevé ? Autre argument ?

cher + chauffe (endommage le matos)

Qu'est-ce qui a changé entre la préparation et la mesure ?

Peut-être pris plus rapidement pendant la mesure ?

Titre : Conservation de puissance électromagnétique (E1)

Elément imposé : mettre en œuvre expérimentalement un champ magnétique tournant

Présentée par : Rudi VOGLER

Rapport écrit par : Aurélie BERGEM

Correcteur : Erwan ALLYS

Date : 08/11/2024

Bibliographie		
Titre	Auteurs	Éditeur
Problèmes d' Electrotechnique Conversion de Puissance 2 ^e année PC-PC*-PSI-PSI*	Lionnel JANNAUD	Ellipses
Electrotechnique et énergie électrique 2 ^e édition	Luc LASNE	Dunod
Machines électriques	J. NIARD, R. MOREAU. J. BATTUT	Nathan Technique

Compte-rendu détaillé de la leçon

Niveau choisi pour la leçon : PSI

Pré-requis :

- **Loi de Lenz**
- **Théorème d'Ampère**
- **Régime électrique continu**
- **Notion de couple**

Intro :

Dans la vie de tous les jours nous sommes confrontés à des convertisseurs d'énergie électrique en énergie mécanique

Ici on parle de puissance : énergie difficilement définissable, valeur en perpétuelle expansion

Puissance : quantité d'énergie par unité de temps

Comment ça marche, quels sont les moyens dont on dispose pour ces conversions et quelle est leur efficacité ?

I / Notion de Puissance

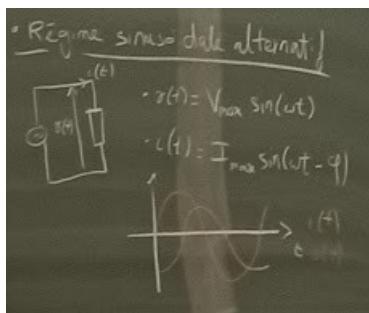
A] Généralités

Def : Puissance : $P(t) = dW(t)/dt$

B] Puissance électrique

$P=U^*I$ en régime continu

En régime sinusoïdal alternatif :



Notion de grandeur efficace : $A_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} a(t)^2 dt}$

On peut alors calculer : $V_{eff} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}}$

$$p(t) = i(t) \times v(t)$$

$$\text{On définit } P_{elec} = \langle p(t) \rangle = V^* I^* \cos(\varphi)$$

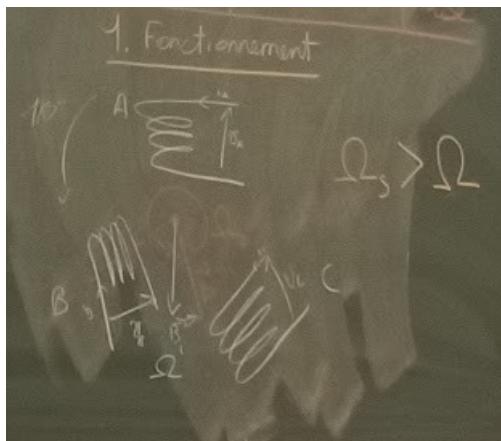
C] Puissance mécanique

On définit $P_{meca} = C \times \Omega$ avec C : couple en N.m et Ω : vitesse de rotation en rad.s⁻¹

Le moteur asynchrone est un des moteurs les plus courants et a plusieurs avantages : une grande stabilité, il est facile à construire et est robuste (pas besoin de maintenance et fiable)

II / Moteur asynchrone triphasé

A] Fonctionnement

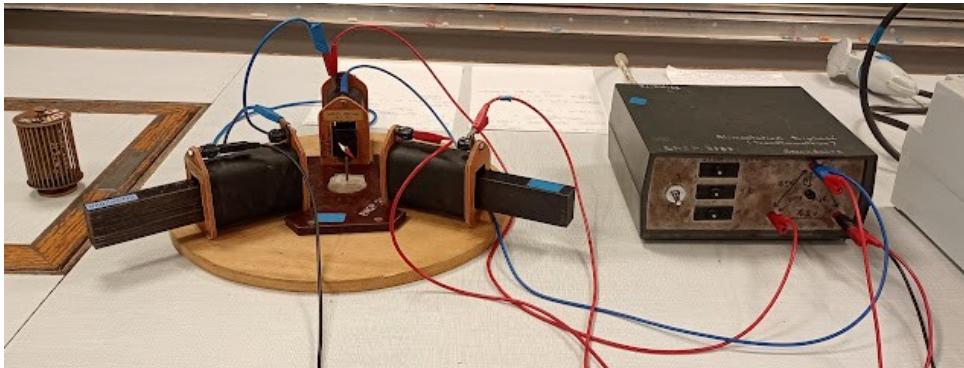


Champ magnétique dont on détermine le sens avec la règle de la main droite, se rejoignent en un point, et on obtient un champ magnétique tournant à Ω_s

Animation GéoGebra :

<https://www.geogebra.org/m/kdawr7d9>

Manipulation : 3 bobines alimentées par un transformateur et un générateur de triphasé on place l'aiguille d'une boussole au milieu



→ l'aiguille tourne

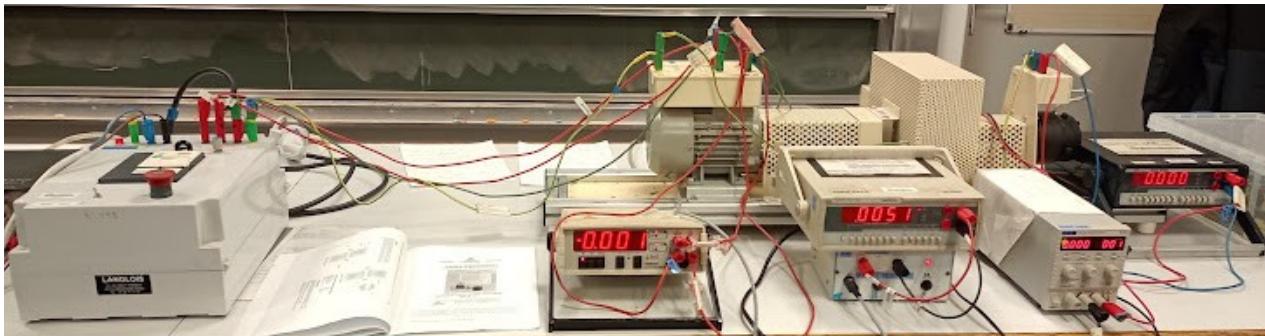
Les bobines représentent le stator, la partie immobile d'un moteur triphasé
On peut insérer à la place de l'aiguille une cage qui représente le rotor

Des courants de Foucault se créent dans les barres du rotor

D'après la Loi de Lenz : ces courants de Foucault créent un champ magnétique induit B_i qui va vouloir s'aligner sur B

Pourquoi moteur « asynchrone » : si B_i s'aligne => l'effet s'arrête, donc il faut que $\Omega_s > \Omega$

B] Puissance du moteur



Description des éléments :

On a un redresseur de tension, qui la rend également continue, et la hache pour la rendre triphasée.

Le moteur est composé d'un stator et d'un rotor similaire à ce qu'on a vu précédemment.

On mesure avec un Wattmètre la puissance électrique P_{elec} délivrée au moteur (Pour une phase donc à multiplier par 3).

On alimente également un frein : on créé un couple C qui s'oppose à la vitesse du rotor.

On mesure : P_{elec} , V_C et Ω (en tour/minutes)

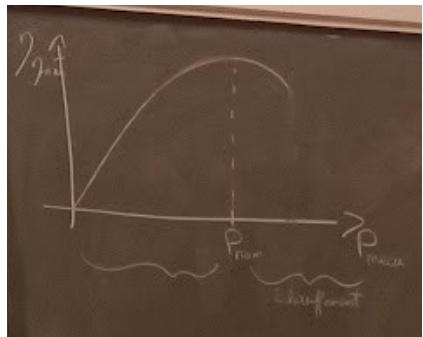
On se place à 50Hz, comme ce que délivre EDF

« à vide » puis on rajoute un couple : 2.38V sur l'alimentation (ne pas dépasser 4V)

Un Code python permet de trouver $P_{\text{elec,tot}}$, le couple de charge C , de convertir Ω en rad.s⁻¹ et de trouver P_{meca}

On définit et on calcule le rendement

$$\eta = P_{\text{meca}} / P_{\text{elec}} = 62\%$$



Comment évolue le rendement si on augmente le couple ?

On augmente V_c et on observe que η a augmenté

En général η évolue avec $P_{méca}$ selon le graphe $\eta=f(P_{méca})$ ci-contre

Puissance nominale : à cette charge le moteur fonctionne le mieux

Au-delà de P_{nom} on a des échauffements

En pratique on fait varier la taille des composants pour adapter le moteur à différentes charges

On connaît d'autres moteurs

Moteur synchrone triphasé : cas de l'aiguille

Aimant qui va s'aligner sur le champ, rendement de l'ordre de 80% mais ils se dérèglent assez facilement et cessent de tourner : entretien plus régulier nécessaire

Moteur à courant continu

Rendement de l'ordre de 90%

Expérience(s) réalisée(s) :

- Mise en œuvre d'un champ tournant (élément imposé)
- Mesure des puissances électriques et mécaniques d'un moteur asynchrone triphasé

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

Conversion électromécanique : se fait-elle dans un seul sens ?

Non c'est le principe de l'alternateur. Les barrages et les éoliennes sont des exemples de conversions dans l'autre sens.

Peut-on utiliser le moteur asynchrone pour faire la conversion inverse ?

Oui.

Moteurs réversibles : si on fait tourner le rotor dans le champ du stator avec une vitesse plus grande que Ω_S : création électrique. → mais très peu utilisé en pratique

Energie tend vers infini ? Pourquoi utiliser la puissance ? (plutôt que l'énergie)

On peut quantifier énergie sur une durée, donc la puissance permet de s'affranchir de la durée

Dépend aussi de la charge auxquelles on veut fournir de l'énergie.

Besoins peuvent être spécifiques en termes de puissance, point de fonctionnement en termes de puissance.

Il ne suffit pas de laisser tourner longtemps un moteur pour soulever n'importe quelle charge

Exemple : Machines thermiques réversibles pas souhaitable alors que rendement en énergie maximal, car la puissance tend vers zéro.

Pourquoi noter W l'énergie ? Travail et énergie pareil ?

→ lien avec le travail. Je déconseille cette notation. En thermodynamique, on sépare clairement une fonction d'état, l'énergie, et une grandeur liée à une transformation, le travail.

W énergie de quoi ? reçue ou fournie ?

Il faut définir le système, convention énergie reçue par le système >0 et fournie par le système <0

Pourquoi noter p ou P la puissance ?

Majuscule car ne dépend pas du temps

Pourquoi la formule « ne convient plus » en sinusoidal ?

$P=U*I$ valide en instantanée mais on veut des valeurs moyennées

Que veut dire acronyme RMS parfois présent au lieu de efficace ?

Root Mean Square

Sur le calcul de la valeur efficace : $\int_{t_0}^{t_0+T} \frac{\cos(2\omega t)}{2} dt$, pourquoi la moyenne est-elle 0?

intègre sur 2 périodes de ce cos donc toujours 0

D'où vient la définition $P_{méca}=C*\Omega$?

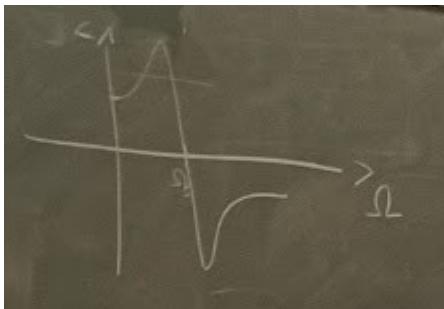
Mécanique du solide. Travail pour la rotation autour d'un axe fixe.

Moteur asynchrone triphasé : vitesse « très stable » ?

En cas de perturbations sa vitesse va rester stable

Point de fonctionnement moteur stables dans graphe couple Ω

S'annule pour vitesse de synchronisme Ω_S



Dans cas $\Omega < \Omega_S$ (partie moteur), si Ω augmente un peu dans la branche avant le pic (dû à une perturbation, le couple résistif est plus faible temporairement), la vitesse augmente, donc le couple augmente, ce qui augmente encore la vitesse de rotation, etc. => instable. Pour la branche après le pic, c'est le contraire, donc la branche est stable.

Donc la branche stable, on voit que la fonction donnant le couple en fonction de la vitesse de rotation est proche de verticale. Le moteur peut donc rester sur une grande plage de fonctionnement, et donc de couple, tout en ayant une vitesse de rotation proche de constante.

Pourquoi facile à construire :

Pas besoin d'avoir un rotor qui génère son propre moment magnétique, que cela soit un aimant avec des terres rares, ou bien un circuit qui reste connecté électriquement, ce qui requiert des contacts glissants.

Moteur triphasé ?

déphasage de $2\pi/3$ entre chaque bobine

Ici $V_a = V_b = V_c$: choix de construction → permet une réalisation simple d'un champ tournant

Schéma des trois bobines :

courants et tensions, / ! \ aux conventions récepteur ou générateur

A quoi servent les ferromagnétiques dans les bobines ?

conduisent les lignes de champs

Loi de Lenz : courants induits dans le rotor, génère moment magnétique qui veut s'aligner avec le champ, pourquoi ne s'aligne pas avec le champ ?

Qu'est-ce qui se rapproche ? en fait c'est le fonctionnement du moteur synchrone ?

Ce qui est important c'est la vitesse relative de rotation du rotor par rapport au champ tournant. Au début, la fem est très importante et donc la vitesse du rotor augmente, mais plus elle se rapproche de la vitesse de rotation du champ tournant plus l'écart relatif est faible et la fem aussi

Comment sont fait les branchements ?

dans le moteur : 3 bobines (stator). Ici, système en étoile

Fréquence du champ tournant la même que 50Hz fournit ? à quelle Fréquence tourne le champ au milieu du moteur ?

même fréquence d'après animation, peut mesurer avec sonde à effet Hall → pour le système d'étude du champ tournant.

1500tr/min → 25Hz dans le moteur à cause de la configuration géométrique des bobines, différente de celle du système didactique pour l'étude du champ tournant.

Rendement donné : où sont les pertes ?

- effet joules : pertes cuivre
- pertes fer
- frottements mécaniques (roulement à bille)

Commentaires lors de la correction de la leçon

- Leçon réalisée avant d'avoir abordé le cours et les manips
- Plan en général : pour l'oral, passer moins de temps sur les rappels des notions de puissance, à voir ce qu'on met en prérequis
- Moteur asynchrone triphasé : pas forcément nécessaire, montre machine, mais substance mais prend du temps
- Ne revient pas assez sur la notion de conversion de puissance : conversion parfaite entre puissance mécanique de la force de Laplace, et la puissance électrique de la fem : couplage entre les équations mécaniques et électriques. Peut aussi être fait avec des bilans d'énergie avec les ferromagnétiques. Mettre plus l'accent sur où se produit la conversion de puissance.
- Démontrer +, être plus formel, calculer le champ au milieu des trois bobines, le mesurer au teslamètre pour être plus quantitatif
- Parler des points de fonctionnement des moteurs, (parler de la stabilité ?) mais ne pas trop s'écartez du sujet
- Rapports de Jury voudraient qu'on mentionne les ferro mais c'est compliqué, se renseigner et être prêt à répondre à ces questions mais probablement trop lourd en leçon
- Essayer de formuler en amont les questions auxquelles on va répondre
- Alternateurs et Haut-parleurs (un peu risqué) aussi des conversions électromécaniques
- Dans les livres : différentes approches sur le sujet
- Donner des exemples
-

Il y a toujours un couple à vide

Attention, l'échauffement n'est pas forcément restreint à la partie $P>P_{nom}$

Exemples de « passages obligés » sur cette leçon

- Mettre en œuvre expérimentalement une génératrice électrique

Titre : Conversion de puissance électromécanique**Présentée par :** Alain BONVALET**Rapport écrit par :** Maxime JUIN**Correcteur :** Arnaud RAOUX**Date :** 06/11/2023

Bibliographie

Titre	Auteurs	Éditeur
Moteurs et transformateurs électriques	Jérémy Neveu	
Physique tout-en-un PSI/PSI*	S.Cardini et al.	DUNOD

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : CPGE 2^{ème} année (PSI)

Pré-requis :

- Électromagnétisme
- magnétisme dans les milieux

Introduction : 2min 40

- *Production d'énergie par conversion électromécanique*
- *Utilités des moteurs*

Partie 1 – Contacteur électromécanique : 27 min 30

- *Schéma général*

a) Premier principe appliqué à la partie fixe

- *Définition des grandeurs thermodynamiques à l'aide du schéma*

b) Calcul du travail électrique

- *On suppose que les pertes sont seulement par effet Joule*
- *Utilisation de la loi de Lenz*

c) Calcul de l'inductance L puis de la force exercée sur la partie mobile

- *Flux de B constant à travers toute section d'un même tube de champ*
- *Théorème d'Ampère dans les milieux*

d) Application numérique et commentaires

- *Commentaire sur les différentes pertes*

Partie 2 – Moteur synchrone diphasé : 12 min 20

a) Champ glissant dans l'entrefer : nécessité d'un champ sinusoïdal

- *Animation pour expliquer la notion de champ glissant*

- *Utilisation d'une calculatrice graphique pour justifier la nécessité de deux circuits générant des champs sinusoïdaux dans l'entrefer*

b) Création d'un champ sinusoïdal dans l'entrefer

Champ créé par une spire dans l'entrefer, exemple d'une association de spire permettant d'approcher un champ sinusoïdal

c) Couple moyen et synchronisme

Utilisation de la formule liant couple et dérivée de l'énergie électromagnétique par rapport à un angle

d) Illustration expérimentale du synchronisme et accrochage

Moteur asynchrone de la collection utilisé en moteur synchrone triphasé (cage à écureuil remplacé par un barreau aimanté)

Conclusion : 1 min

Bref retour à l'introduction

(indiquer parties, sous-parties, 1 ou 2 phrases d'explications par sous-partie, et références)

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)

- Dans une centrale nucléaire, quelles sont les étapes de la production d'énergie ?

Tout d'abord, la fission nucléaire dégage de la chaleur et transforme une énergie « nucléaire » en une énergie thermique. L'augmentation de la température de l'eau du réacteur génère de la vapeur dont la pression agit sur une pièce mécanique, le rotor : conversion d'une énergie thermique en énergie mécanique. Enfin, le mouvement de rotation du rotor, entraîné par la vapeur d'eau, autour du stator convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

- Comment fonctionne un panneau solaire ?

Le panneau solaire convertit l'énergie des photons issus du rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie électrique, aux moyens de semi-conducteurs qui présentent l'avantage de posséder un gap, que les électrons franchissent grâce à l'apport énergétique des photons. Le principal matériau de fabrication des cellules photoélectriques est le silicium.

- Quel est la principale différence entre le disjoncteur électromagnétique et le contacteur électromagnétique présenté ?

La principale différence entre les deux est le mouvement de la pièce mobile : elle effectue un mouvement de rotation dans le cas du disjoncteur, et un mouvement de translation dans le cas du contacteur.

- Quelle est la différence entre disjoncteur thermique et disjoncteur électromécanique. Quel type de disjoncteur utiliser pour prévenir des risques d'électrocution ?

Le disjoncteur thermique prévient des risques de départ de feu : le fusible fond lorsqu'il est traversé par un courant trop intense, avant que les câbles ne commencent à fondre et ne risquent de déclencher un incendie.

Le disjoncteur électromécanique possède un temps de réponse bien plus court que celui du disjoncteur thermique. Celui-ci détecte des variations rapides de l'intensité du courant dans l'installation électrique et prévient des risques de court-circuit.

Pour la protection des personnes, on utilise un *disjoncteur différentiel*. Celui-ci compare le courant en entrée et en sortie de l'installation électrique. Si cette différence est supérieure à une intensité seuil (c'est-à-dire si cette valeur de l'intensité rejoint la terre par un autre moyen que l'installation), il se déclenche.

- **Dans le cas du contacteur, on a considéré comme pertes les pertes par effet Joule dans le bobinage. Quelles autres pertes pourraient on considérer ?**

Tout d'abord, certaines lignes de champ canalisées par le cœur ferromagnétique pourraient fuir. D'autre part, le cœur ferromagnétique n'a pas une relation excitation – aimantation linéaire et présente un cycle d'hystérésis. A chaque fois que le cycle est parcouru, le système dissipe une énergie proportionnelle à l'aire du cycle qu'on appelle *pertes par hystérésis*. Enfin, le flux de champ magnétique dans le cœur ferromagnétique génère des courants de surfaces appelés *courants de Foucault*, qui peuvent alors dissiper par effet Joule : ce sont les *pertes par courants de Foucault*. Pour limiter ces pertes, on peut choisir un matériau suffisamment doux pour réduire l'aire du cycle d'hystérésis. On utilise également un matériau feuilleté pour prévenir de l'apparition des courants de Foucault.

- **Pourquoi utiliser un conducteur pour canaliser les lignes de champ alors que des pertes apparaissent ?**

Pour canaliser efficacement les lignes de champ magnétique en limitant les fuites, on a besoin d'un matériau avec une grande permittivité relative. Or, les matériaux présentant les plus grandes permittivités relatives sont des métaux, et donc des conducteurs.

- **On constate par le calcul que l'inductance propre du système est proportionnelle au nombre de spires du bobinage au carré. Ce résultat était-il attendu ?**

Si on multiplie par 2 le nombre de spire du bobinage, on multiplie par 2, d'une part, l'amplitude du champ magnétique généré, et d'autre part, le flux du champ magnétique à travers le bobinage. Ce résultat est donc cohérent.

- **Pourquoi utiliser un contacteur électromagnétique plutôt qu'un système fonctionnant sur le principe des rails de Laplace ?**

Les rails de Laplace présentent un meilleur rendement que le contacteur électromagnétique, néanmoins le contacteur développe une force mécanique bien plus intense que les rails de Laplace. Or pour un moteur typiquement, on préfère perdre en rendement au profit d'une force ou d'un couple bien plus important.

- **Comment peut varier l'inductance propre d'une spire ?**

L'inductance propre d'une spire ne varie pas si on approche une autre spire (variation de la mutuelle). En revanche, elle varie beaucoup si on introduit un matériau ferromagnétique à l'intérieur de la spire.

(l'étudiant liste les questions posées, ainsi que les réponses données par l'enseignant. Si certaines réponses manquent, l'enseignant pourra compléter le document)

Commentaires lors de la correction de la leçon

- Leçon très intéressante à écouter
- Le jury attend du candidat qu'il traite des cas classiques de convertisseurs (moteur synchrone/asynchrone, éolienne...), il faut passer beaucoup moins de temps sur le contacteur qui reste un cas « anecdotique » de convertisseur.
- Intégrer d'avantage d'exemples concrets dans la leçon, moins de calculs.
- Soigner les schémas de référence : le schéma de référence du contacteur n'est pas dessiné assez rigoureusement, on a tendance à se perdre parmi tous les éléments introduits (courant, longueurs, transferts d'énergie...)
- Il faut d'avantage centrer la leçon sur la **conversion** de puissance (exemple d'approche : on ne s'intéresse pas à la génération technique du champ glissant dans la machine synchrone, mais à son effet sur la conversion de puissance)
- Certains éléments/certaines hypothèse sont introduit(es) trop rapidement (Excitation H à la place du champ magnétique B, linéarité entre B et H dans le ferromagnétique...)
- La manipulation réalisée (boussole entre trois bobinages triphasés) est importante et cohérente avec le sujet de la leçon
- Éléments à traiter dans la leçon : moteur, alternateur, rail de Laplace pour introduire les notions éventuellement...
- **ATTENTION** : la leçon porte sur la conversion de puissance, on ne peut pas se contenter de traiter les moteurs, il faut au moins aborder un autre moyen de conversion de puissance.

Titre : LP E2 Conversion de puissance électromécanique**Présentée par :** Basile Wurmser**CR rédigée par :** Thibaut Perdereau**Correcteur :** Clément Sayrin**Date :** 21 octobre 2022

Compte-rendu leçon de physique élève

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Editeur (année)	ISBN
Physique tout-en-un PSI		Dunod	
Physique spé PSI		Tec & Doc	
Machines électriques	Niard		
Machines électrique	Chatelain		
Génie électrique	Mérat		

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : CPGE PSI

Prérequis : Électricité, induction, mécanique

Déroulé détaillé de la leçon :

Introduction

L'électricité est une notion rencontrée au quotidien. La production française est de 510 TWh en 2020. L'électricité est convertie en lumière ou en énergie mécanique. (Et l'énergie mécanique peut aussi être convertie en énergie électrique).

En particulier, l'énergie mécanique utilisée est l'énergie mécanique de rotation, qui est possible grâce aux machines tournantes.

1min30s

I– Machines tournantes

Il existe deux grandes classes de machine tournante : le moteur à champ tournant et la machine à courant continu (MCC).

→ Slide pour illustrer les deux types de moteurs et leur description

2min20s

1– Structure

Il y a deux composants principaux :

- stator : partie fixe, carcasse du moteur

- rotor : partie mobile, en rotation autour de son axe

Il y a deux autres composants dans une machine tournante :

- entrefer : l'espace séparant le stator et le rotor. Il confine l'énergie magnétique
- ventilateur : pour refroidir le moteur et éviter de casser le matériel

4min40s

2– Types de machines

Les machines à champ tournant peuvent être synchrones ou asynchrones.

Elles utilisent du courant alternatif et ont peu de perte mécanique.

Elles sont principalement utilisées en alternateur pour produire du courant.

Les MCC fonctionnent en courant continu avec une pile ou batterie. On peut donc l'utiliser pour faire fonctionner des objets du quotidien.

Les MCC sont facilement contrôlables en vitesse, mais elles s'usent rapidement à cause des pertes mécaniques.

Les MCC sont utilisés principalement en moteur pour les petits appareillages et le ferroviaire.

Le MCC est très important. On va s'intéresser en particulier à ce type de moteur.

8min45s

II– Machine à courant continu

Expérience qualitative : illustration et explication du fonctionnement de la machine à courant continu avec le modèle d'illustration de la prépa.

11min15s

1– Couple de force

→ **Slide avec schéma du rotor considéré pour le calcul du couple de forces**

Schéma annoté sur le tableau avec :

- champ statorique \vec{B}_s
- rotation du rotor ωt
- courant dans le rotor i
- longueur de la spire L
- rayon de la spire r

$$F_{L_1} = \int i \vec{dl} \wedge \vec{B}_s$$

$$F = iLB_s (-\vec{u}_z) \wedge (-\vec{u}_x)$$

$$F = iLB_s \vec{u}_y$$

En appliquant le même principe pour F_{L_2} on a $F = -iLB_s \vec{u}_y$.

La résultante des forces s'annule, donc il n'y a qu'un couple : $\vec{\Gamma} = \sum \vec{M}$
17min10s

$$\vec{\Gamma} = +\vec{r} \wedge \vec{F}_{L_1} - \vec{r} \wedge \vec{F}_{L_2}$$

$$\vec{\Gamma} = irLB_s \vec{u}_r \wedge \vec{u}_y + irLB_s (-\vec{u}_r) \wedge (-\vec{u}_y)$$

$$\vec{\Gamma} = 2irLB_s \sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega t\right) \vec{u}_z$$

$$\vec{\Gamma} = i\Phi_0 \cos(\omega t) \vec{u}_z$$

20min15s

Si on ne fait rien, le couple $\vec{\Gamma}$ va s'annuler, et donc il n'y a plus de rotation. Il faut ajouter un élément en plus pour conserver un couple non nul. Pour cela il faut changer le sens du courant et donc le moment magnétique, à chaque demi rotation : c'est le collecteur.

Il y a alors un couple moyen dans le temps :

$$\langle \Gamma \rangle_t = \frac{i}{\Phi_0} \langle \cos(\omega t) \rangle \vec{u}_z$$

$$\langle \Gamma \rangle_t = \frac{2}{\pi} i\Phi_0 \vec{u}_z$$

Condition de synchronisme : changement du sens du courant à chaque demi rotation du rotor. Mais c'est pas gratuit, il se produit une nouvelle force : la force contre électromotrice.

23min10

2– Force contre électromotrice

$$\Phi_s(t) = \Phi_0 |\sin \omega t|$$

$$e = -\frac{d\Phi_s}{dt} = -i\Phi_0 \omega |\cos \omega t|$$

$$\langle e \rangle_t = -\frac{2}{\pi} \Phi_0 \omega$$

Il y a alors la force contre électromotrice suivante :

$$E_{cem} = -e = \frac{2}{\pi} \Phi_0$$

E_{cem} est la tension au borne du moteur.

26min15s

Expérience : mesure de la vitesse en fonction de la tension.

→ Slide sur l'expérience : Mesure de la vitesse de rotation du moteur

Explication du dispositif expérimental :

- alimentation variable,
- 2 multimètres,
- MCC,
- masses,
- chronomètre

Attention ici on fait $\omega(U)$ car l'incertitude maximale est sur ω (avec qtiplot).

28min45s

Expérience - Début de la mesure : avec masse 500g et 8V en entrée.

- Distance mesurée : 49,3cm,
- Temps mesuré : 6,60s (première mesure)

L'expérience est reproductible.

30min30s

- Tension mesurée : 8,1V (deuxième mesure)
- Intensité mesurée : 0,140mA (deuxième mesure)

Ajustement linéaire sous la forme $y = ax + b$ avec b justifié car le système est non idéal.

Lors de l'ajout du point, l'ajustement a un $R^2 = \inf$. Ce n'est pas normal, il doit y avoir une erreur dans l'ajustement. On observe une ordonnée à l'origine non négligeable : ce sont les pertes cuivre. On mesure en fait : $u = E_{cem} + R_r i$

33min40s

(Interprétation arrêtée car valeur de l'ajustement n'est pas cohérente)

34min00s

Il y a des pertes par effet joule dans les bobines du rotor. À partir de l'ordonnée à l'origine, on aurait pu retrouver la résistance des bobines du moteur, donnée par le constructeur.

35min00s

III– Bilan de puissance

1– Pertes

Type	Puissance	Pertes associées
Electrique	$P_e = U_i + V_s i$	Perte Joule $P_j = R_r i^2 + R_s i^2$
E-M	$P_{em} = E_{cem} i$	Perte fer P_{fer}
Mécanique	$P_M = \Gamma_m \omega$	$P_{frot} = \Gamma_{frot} \omega$
Utile	$P_{ut} = \Gamma_u \omega$	

38min21s

$$P_{ut} = P_e - P_j - P_{fer} - P_{frot}$$

39min00s

3.2 Rendement

On peut mesurer efficacité d'un moteur à partir de son rendement $\eta = P_{ut}/P_e$ qui peut se réécrire $\eta = 1 - \frac{P_j + P_{fer} + P_{frot}}{P_t}$.

39min40s

IV– Conclusion

On a vu les machines courants continues.

Deuxième types de machine : champ tournant.

Il y a des points communs et des différences.

40min20s

Questions posées par l'enseignant (avec réponses)**Q : Pourquoi on met du cuivre dans les bobines.**

Bon conducteurs. Il est rentable. Malléable, on peut l'enrouler sans le casser.

Q : Qu'est-ce que ça signifie : "l'entrefer confine le champ magnétique" ?

L'énergie des pertes fer est négligeable devant l'énergie confiné dans l'entrefer. On peut faire un bilan énergétique pour s'en convaincre.

L'entrefer permet de canaliser les lignes de champ magnétique, et ainsi augmenter le flux du champ magnétique du stator dans les bobines du rotor.

Q : Un ferromagnétique vérifie toujours $\mu_r > 1$?

Oui par définition. On a les ferro mous (μ_r moins fort) et durs (μ_r très grand)

Il faut bien distinguer la notion de fer dur / fer doux et la valeur de la perméabilité magnétique. Un ferromagnétique est dur ou doux selon la valeur du champ coercitif, ou de façon équivalente, selon la taille de son cycle d'hystérésis. Un corps ferromagnétique avec un faible champ coercitif / un petit cylcle d'hystérésis est un fer doux, et les pertes fer sont faibles.

Dans tous les cas, pour les ferro, la « perméabilité magnétique » est élevée mais encore faut-il bien préciser ce qu'on entend par perméabilité magnétique. Un milieu ferromagnétique n'est pas un milieu linéaire, puisque B n'est pas proportionnel à H . On préserve la notion de perméabilité en écrivant que μ_r dépend de H . Mais μ_r dépend alors fortement de H . On donne alors parfois la perméabilité magnétique maximale.

Plus cette valeur de perméabilité est élevée, meilleure est la canalisation des lignes de champ. On a donc intérêt , pour les moteurs, à utiliser un fer doux de grande « perméabilité magnétique ».

Q : Pourquoi dans les moteurs il y a des ferros avec $\mu_r \gg 1$?

On veut canaliser les lignes de champ magnétique. On veut le rendre intense sur le rotor. C'est géométrique

Q : C'est quoi les pertes fer ?

À l'échelle microscopique l'aimantation n'est pas la même dans tout le ferro. Lorsqu'on applique un champ magnétique, puis qu'on le coupe, l'aimantation du ferro ne suit pas le même chemin : c'est un cycle d'hystérésis.

Microscopiquement parlant, quand on augmente le champ magnétique, les moments magnétiques microscopiques s'alignent peu à peu avec le champ. Quand on éteint le champ magnétique, malgré l'agitation thermique, une partie des moments magnétiques restent alignée et l'aimantation ne s'annule pas. Il faut donc appliquer un champ magnétique opposé pour retrouver une aimantation nulle : c'est le champ coercitif, responsable de l'hystéresis dans le ferromagnétique.

Q : C'est quoi l'expression des pertes fer ?

Ça dépend du matériau ferromagnétique. On peut les estimer dans un transformateurs en faisant un bilan de puissance. Tracer la courbe caractéristique d'aimantation est aussi une possibilité.

On peut donner ici l'expression mathématique des pertes, qui s'écrit comme l'intégrale sur un cycle de BdH .

Q : Comment choisir celui qui a le moins de perte ?

Il faut prendre un ferro doux avec le moins de perte fer.

Q : Il y a une compétition entre ferro dur et doux. Comment on les choisit ?

Ici on veut un aimant permanent, donc on prend un ferro dur pour le stator. Pour le rotor, un ferro doux.

Il faudrait préciser de quel moteur on parle : dans un moteur asynchrone par exemple, il n'y a pas d'aimant permanent. Et on peut aussi réaliser une machine synchrone sans aimant mais en faisant parcourir un courant dans une bobine.

Q : Pourquoi il faut un ventilateur ? Est-ce que c'est toujours un ventilateur ?

Il faut un ventilateur car il y a des pertes Joule, donc un échauffement du moteur. Le ventilateur est sur l'arbre du moteur (donc pas besoin de moteur supplémentaire). Il y a en plus un phénomène de conduite pour optimiser le refroidissement par air. Il y a aussi un refroidissement par liquide qui est possible.

Clairement, il ne faut pas mettre le ventilateur sur le même pied que le rotor ou le stator. C'est nécessaire de limiter l'échauffement du moteur mais ce n'est pas un élément de fonctionnement fondamental du moteur. Il faut bien hiérarchiser cela dans une leçon et une présentation pédagogique.

Q : C'est quoi l'exemple de refroidissement hydraulique ?

Dans les central nucléaires par exemple.

Q : C'est quoi la différence entre synchrone et asynchrone ? Pourquoi il y a cette différence.

Dans le moteur synchrone, le rotor tourne à la même vitesse que le champ magnétique \vec{B} . Dans le moteur asynchrone, le rotor tourne à une vitesse différente que le champ \vec{B} à cause de l'induction qui se produit dans la cage d'écureuil.

On peut être plus précis dans cette réponse : le fait que le rotor tourne à la même vitesse ou non que le champ tournant est une conséquence du fonctionnement de ces moteurs. Dans un cas, l'aimantation du rotor est induite (moteur asynchrone) et il faut bien que le flux du champ du stator à travers le rotor change dans le temps pour que l'induction ait lieu : le rotor ne tourne pas à la même vitesse que le champ tournant. Dans le cas du moteur synchrone, le moment magnétique du rotor est « permanent » et tourne à la même vitesse que le champ du stator.

Q : Il y a moins de perte mécanique avec moteur à champs tournant. C'est-à-dire ?

Dans le moteur à courant continu, il y a des balais, et c'est ce qui s'use le plus. Il peut être nécessaire de les changer. Dans un moteur à champ tournant, il n'y en a pas, donc pas besoin de les remplacer. Il est donc plus fiable et à moins d'usure.

C'est vrai mais il faut que cela soit clair dans une présentation et il y a plusieurs étapes de raisonnement entre « Il y a moins de perte mécanique avec moteur à champs tournant » et cette conclusion. Il faut donc prendre le temps d'expliquer cela dans la leçon si on veut en parler.

Q : Quel est le branchement du moteur CC présenté pour l'illustration ?

Alimentation en série.

Q : Pourquoi avoir mis un montage en série et pas en parallèle ? Quelle est la différence ?

On alimente deux bobines ici, et on veut a priori que le courant soit le même dans les deux bobines. Il faut dans ce cas faire le branchement où les deux bobines sont en série avec la source et non en parallèle. Si la résistance de l'une est différente de l'autre, avoir la même tension à leurs bornes ne permet pas d'assurer l'égalité du courant. Il faut faire attention à ces précautions en leçon, pour être le plus pédagogique possible.

Q : Est-ce qu'on peut contrôler la vitesse de rotation du MCC avec tous les montages ? Quel est l'argument physique qui permet de répondre à ça ? C'est la tension au borne de quoi qu'il faut contrôler le moteur ? Contrôle en courant ou tension ?

On se branche au rotor. J'ai un contrôle en tension.

Imposer la tension aux bornes du rotor revient à imposer, à la chute ohmique près, la variation du flux du champ magnétique à travers le rotor et donc la vitesse de rotation du rotor. On souhaite donc avoir un contrôle en tension ici, et pas un contrôle en courant. Il faut pouvoir expliquer ce type de raisonnements.

Q : Pourquoi les aimants du schéma avait cette forme arrondie ?

Ce sont les aimants qu'on trouve dans les MCC car on veut un champ B radial plutôt que tangentiel. C'est une question de géométrie du système.

Q : Pourquoi il n'y a que deux forces calculées alors qu'il y a quatre cadres ?

Il y a les vitesses du rotor (du cadre) qui s'annule en projetant. Ce sont des forces qui ne travaillent pas et qui n'ont pas de moments. Donc je ne les ai pas pris en compte. Dans une leçon, il faut expliquer cela, et ne pas le laisser comme quelque chose d'implicite et d'évident. Ce n'est pas du tout un raisonnement immédiat.

Q : Pourquoi ces forces n'ont pas de moments ?

Elles sont sur l'axe de rotation, donc par construction il n'y a pas de moments.

Là aussi un minimum de discussion serait utile : il y a une force sur chacun des éléments de force de la tige, donc a priori certains de ces éléments de force pourraient avoir un moment non nul. Toutefois, on peut montrer que la résultante des forces et le moment total sont ceux que l'on obtient en appliquant la résultante des forces au centre de la tige, donc sur l'axe de rotation. Autrement dit le moment total des forces est bien nul.

Q : Peut-on faire la même démarche pour obtenir le couple à partir d'un bilan énergétique ?

On peut calculer le potentiel magnétique.

Q : Sur le schéma sur slide, c'est quoi le collecteur et les balais ? Qu'est-ce qui tourne ?

Le collecteur tourne avec le cadre. Les ballais restent statiques.

Q : Est-ce que c'est vrai que $|\sin(\omega t)|$ est toujours croissant ?

C'est une fonction non monotone. Il faut faire une distinction de cas.

Q : Pouvez - vous faire un schéma qui reprend toutes les pertes énoncées ?

Dessin du circuit électrique modélisant le moteur avec annotations dessus.

Q : Peut-on mesurer les pertes cuivres ? Quel est l'ordre de grandeur des pertes cuivre ? Laquelle des pertes est la plus grandes ?

Pour les pertes cuivre, pertes de l'ordre de 0,100 mA.

Il faut donner une puissance, donc connaître aussi la résistance des fils. La donnée seule du courant ne permet pas de caractériser les pertes.

Q : D'où viennent les incertitudes ?

La plus grande incertitude : c'est la mesure du temps de remontée d'une masse. À cause du régime transitoire du moteur, de la parallaxe entre les yeux et les repères. Possibilité d'utiliser une vidéo pour avoir une meilleure mesure du temps et donc de la vitesse.

Q : Comment réduire l'incertitude du temps mesuré ?

Répéter plusieurs fois la mesure.

Q : Pour un moteur synchrone, la vitesse n'est pas déterminée par la tension d'alimentation ?

Q : C'est quoi la différence entre MCC et Machine à champs tournants en régime permanent ?

Q : Qu'est - ce que le constructeur ne connaît pas sur les MCC ? De quoi dépend la vitesse de rotation ?

Elle dépend de la charge. On peut tracer le rendement en fonction de la charge pour le voir. La puissance du moteur est maximale pour une charge donnée.

Q : Vitesse du moteur et rendement sont équivalents ?

Non ça n'a rien à voir.

Q : Comment vérifier que la vitesse du moteur est bien celle que tu veux ?

Les moteurs sont asservis pour que le moteur tourne à une valeur de consigne. Si la charge est plus lourde, alors on consomme plus pour tourner à la bonne vitesse, en suivant la consigne ?

Q : Quelles sont les contraintes d'un système bouclé ?

Commentaires lors de la correction de la leçon

La leçon n'est pas facile, pas évidente. On peut parler de beaucoup de choses. Il faut faire des choix. Ici le choix de ne parler que du moteur à courant continu, c'est bon, c'est valable. Le MCC a plusieurs avantages, en particulier les calculs sont les plus simples.

On peut aussi parler de la machine synchrone, asynchrone et MCC. Il est possible de faire des mesures quantitatives dans les trois cas. Si on parle de machine asynchrone, il faut mettre niveau licence.

Il faut parler P_{util} et P_{elec} dans cette leçon. Faire au moins un calcul ou une mesure de rendement paraît indispensable. Auquel cas, utiliser des termes précis comme « pertes fer », « pertes cuivre », mentionner les frottements...

Il est aussi possible d'étudier la conversion de puissance électromécanique dans l'autre sens : l'alternateur, donc la conversion de puissance mécanique en puissance électrique. Ou expliquer que la machine synchrone peut fonctionner dans un sens ou dans un autre par exemple.

Dans tous les cas, il est souhaitable de toujours ratacher l'objet d'étude à une situation réelle : dans quels cas tel ou tel moteur / alternateur est-il utilisé ? Quelles limitations peut-il y avoir ?

Machine à courant continu : Dans l'étude de la machine à courant continu, il est utile de s'intéresser aux deux branchements possibles. Si le rotor et le stator sont alimentés en série, on maximise le couple à vitesse réduite, ce qui est particulièrement utile à la traction électrique. En revanche, la vitesse de rotation n'est plus contrôlée. C'est le cas d'une excitation parallèle, où la tension aux bornes du rotor est imposée. Idéalement, la vitesse de rotation est alors indépendante de la charge. Ce n'est vrai en toute rigueur que si la chute ohmique est faible devant la tension d'alimentation, ce qui est le plus souvent le cas (le courant dans le rotor dépend, lui, de la charge). Ce branchement est particulièrement utile pour les machines outils.

On peut ici discuter les problèmes de variation temporelle du couple et comment on les corrige.

Machine synchrone Elles sont particulièrement utiles pour les alternateurs. Elles permettent aussi de contrôler la vitesse de rotation par, par exemple, la vitesse du secteur qui est très stable. On obtient ainsi des déplacements très bien contrôlés.

On peut évoquer l'intérêt de réduire la vitesse de rotation dans le moteur (par exemple comment passer du secteur à 50 Hz à un champ tournant à 25 Hz) : on réduit la force centrifuge, proportionnelle à ω^2 .

Il faut passer plus du temps sur certains points. L'introduction et la partie I) étaient trop longues. Ce sont des propriétés floues car on voyait trop rapidement les choses. Ça serait plutôt l'ouverture de la leçon.

Par exemple la discussion sur le ventilateur et sur l'entrefer. Ce sont deux éléments supplémentaires pas nécessaire pour comprendre le fonctionnement du moteur. Il vaut mieux les garder pour une ouverture ou bien pour les questions.

Il ne faut pas trop en dire, en garder pour les questions. Il vaudrait mieux aller directement à la partie II).

Dans la partie I), parler de la différence des pertes mécaniques c'est trop tôt dans la leçon. À ce moment là de la leçon on ne peut pas encore comprendre cette notion. C'est vrai que le moteur synchrone est le plus souvent utilisé comme alternateur, mais ce n'est pas le cas du moteur asynchrone (il n'est pas utilisé en alternateur). Il faut mieux séparer les deux notions.

Il faut être très rigoureux et précis dans les calculs et le langage. Surtout pour le calcul du couple : il faut bien poser le problème, dire les approximations, donner l'orientation des courants, indiquer les paramètres et les quantités utilisées. C'est le point le plus central, donc bien le faire est nécessaire. Dans le calcul du couple, il faut tout calculer, toutes les forces. Aucune des quatre forces n'est nulle. Seules 2 forment un couple, les deux autres non. Mais il faut quand même calculer le cadre et faire les calculs des deux forces.

Pour l'orientation des fem et pour le bilan de puissance, il faut faire des dessins explicatifs. Dans le calcul de la fem, il y a un soucis dans la dérivée. Il faut vraiment faire le lien entre E_{elec} et E_{meca} et montrer que s'il n'y a pas de perte, alors $E_{elect} = E_{meca}$. On peut faire ça sur la MCC et la MS.

Pour l'expérience du contrôle de vitesse en tension, il vaut mieux faire varier les masses. D'où l'intérêt d'utiliser la MCC. Il est également possible de mesurer un rendement.

Le jour de l'épreuve, il ne faut pas hésiter à demander au technicien de faire les mesures répétitives à notre place pour gagner du temps.

Il faut bien préciser les incertitudes estimées et comment elles sont estimées. Il faut écrire les résultats des mesures sur le tableau, et les discuter. S'il y a des valeurs aberrantes, des incertitudes nulles etc, il faut en parler et commenter. Si on montre les résidus, il faut bien expliquer ce qui est tracé et pourquoi en a ça, les discuter.

Sur les questions, quand on pose une question, c'est qu'on attend une réponse précise derrière. Le plus souvent les questions sont là pour corriger nos erreurs. Il faut

alors bien prendre le temps pour comprendre l'erreur et la corriger.
Il faut rester très précis pendant les questions, bien répondre à la question posée, ne pas répondre à coté.

Corrections questions :

Un grand μ_r sont pour les fers doux, avec un petit cycle d'hysteresis.

Un petit μ_r sont pour les fers durs, avec un grand cycle d'hysteresis.

Attentions les cycles d'hysteresis et μ_r n'ont rien à voir.

Pour canaliser les lignes de champs, il faut des ferros doux.

Dans les MCC il y a deux branchements : série ou parallèle.

Si on veut contrôler en vitesse avec tension U : montage parallèle.

Si on veut contrôler en couple : montage série

On peut étudier les différences entre les deux dans cette leçon.

En leçon, il faut être didactique, donc il faut faire attention à la façon dont les sources de tension/courant sont utilisées : si on souhaite varier le courant, alors la source doit être en contrôle de courant, et inversement.

Exemples de « passages obligés » sur cette leçon

- On étudiera le rendement d'une machine synchrone / On étudiera le rendement d'une machine à courant continu.
- On illustrera expérimentalement l'intérêt des machines à courant continu pour le contrôle de la vitesse de rotation.
- On dédiera une partie de la leçon à l'étude d'un alternateur.