

MP35 – MOTEURS

22 avril 2020

Aurélien Goerlinger & Yohann Faure

Commentaires du jury

- **2015-2017** : Ce montage a été présenté plusieurs fois lors de cette session et a conduit à plusieurs prestations de bonne qualité. Le jury a apprécié la présentation quantitative d'un moteur de Stirling. Néanmoins, il est important que les candidats, face à un moteur, soient à même d'expliquer pourquoi il tourne.
- **2013** : la notion de point de fonctionnement nominal est importante. D'autre part, les modèles utilisés pour décrire les convertisseurs sont souvent trop simplifiés. Il faut être capable d'interpréter l'écart entre le système idéal et le système réel.
- **2007** : Un effort pédagogique incluant une approche physique des phénomènes impliqués dans le fonctionnement des moteurs permet d'éviter un montage constitué d'une série de mesures sans logique apparente.

Bibliographie

⚡ <i>Thermodynamique</i> , Pérez	→ Stirling, pp182-183
⚡ <i>BUP 864</i> , <i>Mai 2004</i>	→ Stirling, pp663-687
⚡ <i>Electrotechnique, parcours IUT</i> , <i>Dunod</i> , C. Palermo	→ Fonctionnement de la MCC
⚡ <i>Moteurs à courant continu</i> , Quaranta IV	→ MCC
⚡ <i>Electronique II</i> , HPrépa	→ MCC
⚡ <i>BUP 846</i>	→ Principes et applications des moteurs électriques

Expériences



Table des matières

1	Moteur thermique : moteur de Stirling	2
1.1	Présentation	2
1.2	Étude à vide	3
1.3	Rendement	3
1.4	Moteur en charge (Tampon, ça marche pas)	4
2	Moteur électrique : MCC	4
2.1	Couplage électromécanique	4
2.2	Présentation du moteur	5
2.3	Étude à vide	6
2.4	Étude en charge	6
2.5	Rendement de la machine	7
3	Moteur à courant alternatif	8
3.1	Moteur synchrone	8
3.2	Moteur asynchrone	9

Introduction

Un moteur est un dispositif cyclique permettant de fournir du travail : sur un cycle, le travail donné par le reste de l'univers est négatif. Le but du moteur est donc de convertir de l'énergie chimique, électrique ou thermique en énergie mécanique, de façon la plus efficace possible.

On distingue deux types principaux (il en existe d'autres types) :

- les moteurs thermiques, qui fournissent du travail à partir de chaleur ;
- les moteurs électriques, qui fournissent du travail à partir de forces électromagnétiques.

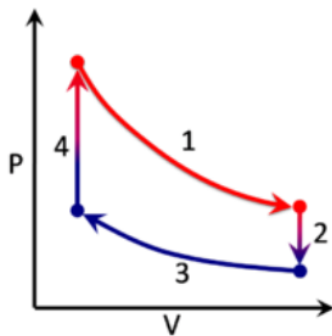
On va étudier ces deux types : avantages et inconvénients, rendement, applications.

1 Moteur thermique : moteur de Stirling

⚡ Pérez p.169 Éteindre le moteur après chaque expérience pour le laisser refroidir et le rendre de nouveau opérationnel.

1.1 Présentation

Principe de Carnot : il n'existe pas de moteur monotherme. On va donc essayer de faire au plus simple, *i.e.* avec deux sources de chaleur. Un exemple historique est le moteur de Stirling. Inventé par Stirling en 1818 pour remplacer la machine à vapeur. Il a la particularité de fonctionner en système fermé, c'est à dire que rien n'en sort ou ne rentre.



Le moteur de Stirling parcourt le cycle. Ce cycle est composé de quatre étapes :

1. détente isotherme
2. refroidissement isochore
3. compression isotherme
4. chauffage isochore

Le moteur réel est constitué de deux parties : une en contact avec une flamme (source chaude) et l'autre en contact avec des ailettes de refroidissement (source froide) liés par un petit conduit. Le volume total est fixé par un premier piston, un deuxième piston en quadrature assure des échanges de volume entre les deux parties.

Le moteur de Stirling dont nous disposons possède un système de mesure fait maison, comprenant un capteur de pression ainsi qu'un capteur de volume qui est un compteur, et qui nécessite donc de faire un zéro (compteur calibré avec le piston en position basse). Il faut faire attention : le comptage doit s'effectuer dans un sens uniquement (marqué par une flèche sur le moteur). Tout retour en arrière fausse le comptage, et il faut alors refaire le zéro après avoir débranché puis rebranché le moteur.

Fonctionnement des capteurs

La pression est mesurée de façon relative grâce à une jauge de contrainte, l'interface renvoie une tension U_P . Le volume est déduit de la position du piston vertical et des dimensions géométriques du moteur, transcrit par la tension U_V .

https://fr.wikipedia.org/wiki/Jauge_de_déformation#Piézorésistance

1.2 Étude à vide

Nous allons tracer le diagramme (P,V) de la bête.



Diagramme PV



⊗ 5mn

Le moteur est utilisé ici sans charge. Faire chauffer le moteur en avance. Après quelques minutes, le lancer et s'assurer qu'il tourne bien. Arrêter le moteur. Mettre le piston en position basse. Brancher le moteur : la diode clignote. Faire le zéro en appuyant sur le bouton rouge (avec le piston en position basse). La diode ne clignote plus. Lancer le moteur dans le sens de rotation indiqué. L'acquisition est faite via LatisPro (0.5 s). On exporte les tensions représentant pression et volume sur Régressi. On fait la conversion en unité de pression et volume grâce aux données de la fiche technique. On calcule le travail sur un cycle via la fonction AIRE (après vérification, cette fonction permet bien de calculer l'aire et ce sur UN cycle uniquement). La puissance s'obtient en utilisant la durée d'un cycle mesurée sur LatisPro :

$$\mathcal{P}_W = \frac{W_{\text{cycle}}}{T_{\text{cycle}}} \simeq 1 \text{ W} \quad (1)$$

Noter les valeurs de T_c et T_f , les caractéristiques du cycle sur le graphe. Expliquer pourquoi on n'a pas exactement le beau cycle à 4 phases : les hypothèses ne sont pas toujours vérifiées et les phases se chevauchent.

Quid de l'efficacité de cette chose ?

1.3 Rendement

Bilan énergétique : la source de chaleur n'est pas totalement utilisée comme source chaude : elle chauffe tout l'appareil et aussi l'air ambiant. Il y a des pertes thermiques aussi au niveau de chaque volume. Les frottements mécaniques doivent aussi être pris en compte (mais sont probablement négligeables).

On s'attend donc à avoir un rendement relativement faible dans ce dispositif, essayons de l'évaluer.

Le moteur étant un appareil essentiellement pédagogique, on doit garder à l'esprit que son rendement est nécessairement faible. Il est possible de calculer le rendement à partir de l'énergie de combustion de l'éthanol (qui *volens nolens* chauffe essentiellement l'air).



Mesurer la puissance fournie par la bougie



⊗

Allumez le brûleur après l'avoir pesé puis attendez un certain temps et refaites une pesée (un bon prétexte pour craquer une allumette de plus).

$\Delta_c H = -1368 \text{ kJ/mol}$, $M_{\text{eth}} = 46.07 \text{ g/mol}$;

$$Q = \frac{\Delta_c H \Delta m}{M} \quad (\text{en J.})$$

Tous calculs faits on trouve une puissance \mathcal{P}_c de la centaine de Watts.

rendement de la machine :

$$\eta = \frac{\mathcal{P}_W}{\mathcal{P}_c}$$

Ce qui fait un rendement de... 1%, on a bien chauffé la pièce. Pour info le rendement de Carnot serait de l'ordre de 75%.

↓ Dans la vraie vie on fait pas tourner un moteur pour rien.

1.4 Moteur en charge (Tampon, ça marche pas)



Étude en charge



⊖ 5mn

On branche l'alternateur du boîtier. On fait débiter dans une résistance avec un ampèremètre en série (il ne faut pas dépasser 80 mA). On fait la mesure pour plusieurs valeurs de résistances (qu'on aura mesurées précisément en préparation), rapidement pour éviter les problèmes de thermalisation. On trace alors $\mathcal{P} = RI^2 = C\omega$ en fonction de R (puissance fournie en fonction de la charge) et on trouve le fonctionnement nominal du système moteur + alternateur.

(On pourrait éventuellement faire l'étude sans l'alternateur avec un couple-mètre pour mesurer la puissance en sortie du moteur, mais cela semble délicat)

Question sans réponse : Comment prédire le couple et la vitesse de rotation du moteur indépendamment ?

Bilan du moteur Stirling : très simple et facilement optimisable pour le rendement. Il est d'ailleurs utilisé pour faire des groupes électrogènes notamment (en le reliant à un alternateur). Le gros désavantage est l'inertie thermique, ce qui le rend inadapté pour les véhicules (changer de vitesse sur une voiture c'est changer le couple qu'on exerce sur le moteur).

↓
Et l'électricité dans tout ça ?

2 Moteur électrique : MCC

2.1 Couplage électromécanique



Mise en évidence du couplage électromécanique

⚡ Quaranta tome 4 à "Laplace"

⊖ 2 min

On a deux possibilités pour cette manip qualitative :

- **première possibilité** : les rails de Laplace P65.5

Relier un microampèremètre Fluke P69.25 aux rails. Placer un aimant en U puissant P63 entre les rails de manière à créer un champ magnétique vertical ascendant (dirigé du Nord (branche rouge) au Sud (branche blanche)). Déposer une tige métallique P65 dans l'entrefer de l'aimant pour relier les rails.

Déplacer le rail, un courant algébrique de l'ordre du μA apparaît.

Remplacer le multimètre par un générateur de tension continue et appliquer quelques Volts : le rail se déplace tout seul \Rightarrow caractère réversible.

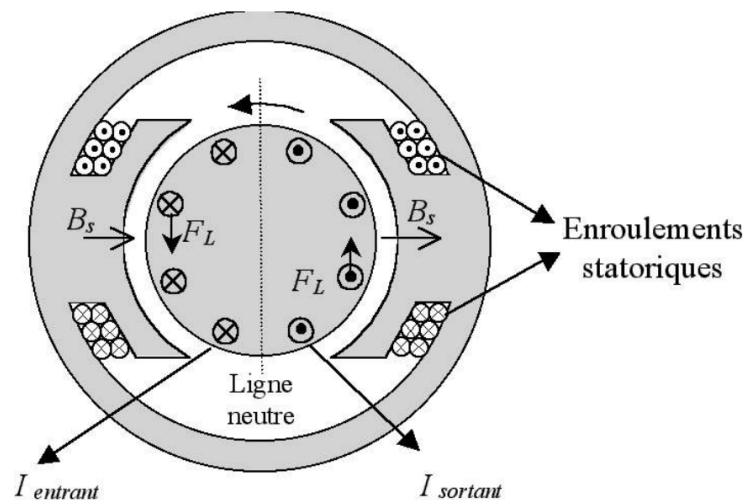
Si l'expérience ne marche pas très bien, on peut humidifier les rails.

- **seconde possibilité** : pendule mécanique dans un aimant

Avec une alimentation alternative, le pendule oscille spontanément à la bonne fréquence (manip efficace mais moins riche).

On voit que ça marche. On va donc pouvoir étudier des moteurs se basant sur ce principe. L'intérêt de ces moteurs réside dans le fait que leur rendement ne soit pas limité comme pour les moteurs thermiques, *i.e.* les moteurs électriques n'ont pas de rendement de Carnot. On peut donc en théorie atteindre un rendement de 100%.

2.2 Présentation du moteur



La machine à courant continu est composée de deux parties :

- d'un **inducteur** : c'est la source de champ magnétique. Il peut être réalisé soit à partir d'aimants permanents (cas des machines de faible puissance, qqes W), soit à l'aide d'un second bobinage. L'inducteur est souvent fixe et est appelé **stator**.
- d'un **induit** : c'est le circuit électrique soumis au champ magnétique et qui est mobile (**rotor**). **Dans le cas du fonctionnement de la machine en moteur, l'induit produit un mouvement de rotation.** Dans le cas du fonctionnement en génératrice, l'induit produit un courant électrique.

La machine à courant continu est réversible et peut être utilisée soit en moteur (alimentation électrique de l'induit et de l'inducteur pour récupérer une énergie mécanique), soit en génératrice/dynamo (alimentation électrique de l'inducteur et mécanique de l'axe du rotor de l'induit pour récupérer une énergie électrique).

On utilise ici un ensemble de **deux génératrices**, l'une d'elles est utilisée en **moteur** pour entraîner le rotor de l'autre.

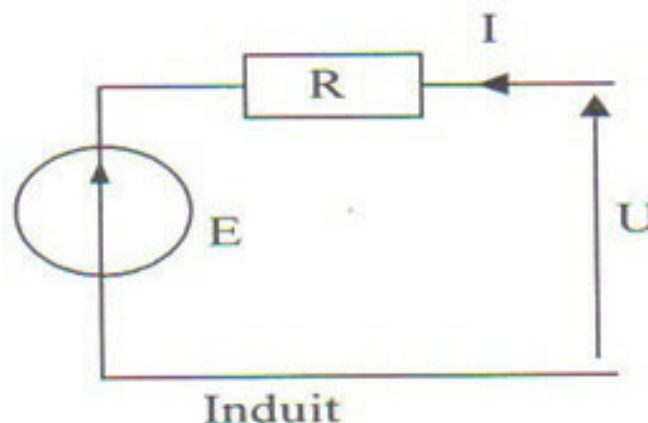
Pour toutes les mesures, il faut utiliser des voltmètres, la précision est meilleure pour le tachymètre et le capteur de couple.

Pour le démarrage de la MCC : Rhéostat de 10Ω en série avec l'induit.

En effet, au départ la vitesse de rotation est nulle et l'induit se comporte comme une résistance de très faible valeur (on la déterminera), il existe un risque aigu de surintensité.

Pour arrêter la MCC : il faut toujours couper l'induit en premier et ensuite l'inducteur, sinon risque d'emballement.

L'induit peut être modélisé par le circuit suivant :



On peut donc écrire $U_m = E + r_m I_m$ avec U la tension envoyée, $E = k\Phi_m \omega$ la fem créée par la rotation de la spire dans le champ magnétique et r_m la résistance interne. On peut également faire un bilan de puissance : $\mathcal{P}_{\text{elec}} = EI_m$ et $\mathcal{P}_{\text{rotation}} = \omega(C_m + C_r)$ avec C_m est le couple utile et C_r le couple résistif. On obtient donc deux relations pour le couple et la tension dans le rotor (⚡ Quaranta p164) :

$$U_m = k\Phi_m \omega + r_m I_m \quad (2)$$

$$C_m = k\Phi_m I_m - C_r \quad (3)$$

remarque : en mode générateur on inverse juste les deux signes apparent, ça donne $-rI$ et $+C_r$.

↓ Les deux équations présentées sont issues d'un modèle. On va vérifier s'il est acceptable.

2.3 Étude à vide

On réalise d'abord une étude à vide, sans freiner le moteur avec la génératrice, pour déterminer les caractéristiques électriques du moteur.



Étude à vide

⚡ Quaranta IV

⊙ 5mn

Alimenter l'inducteur du moteur avec $U_e = 110$ V. On n'y touchera plus. On utilisera des multimètres (ou un wattmètre) pour y mesurer U_e et I_e .

Brancher l'induit du moteur. On utilisera des multimètres (ou un wattmètre) pour y mesurer U_m et I_m . Brancher un rhéostat de démarrage de 10Ω en série avec l'induit (normalement pas besoin grâce aux pertes Joule mais question de sécurité devant le jury).

Pour démarrer le moteur, augmenter progressivement U_m . Une fois que le moteur tourne, court-circuiter le rhéostat.

Faire varier U_m jusqu'à 110 V et mesurer I_m ainsi que la fréquence de rotation $f = \frac{\omega}{2\pi}$ grâce au tachymètre. Vérifier la relation $U_m = k\Phi_m \omega + r_m I_m$. En déduire $k\Phi_m$.

On peut le faire pour différentes valeurs de U_e pour avoir la courbe d'aimantation $k\Phi_m = f(U_e)$, mais attention de parcourir U_m toujours dans le même sens (hystérésis).

Remarques

- $k\Phi_m$ dépend aussi de l'induit par la réaction magnétique de l'induit, mais c'est au moins d'ordre 1.
- La génératrice tachymétrique qui sert à mesurer la vitesse est en fait... une machine à courant continu.
- Pour le MCC, les multimètres font l'affaire ; attention cependant si vous vous attachez aux machines à courant alternatifs, car la puissance n'est plus directement le produit de la tension et du courant : il faut prendre en compte le déphasage, et les wattmètres sont alors bien pratiques.

↓ Bon c'est bien beau tout ça mais ce qui nous intéresse c'est de balancer de la puissance dans une charge.

2.4 Étude en charge

On va maintenant appliquer un couple au moteur via la génératrice, sans s'intéresser à sa capacité à générer du courant (cf MP21).



Étude de la machine à courant continu en charge



⊖ 10mn

Alimenter l'inducteur de la génératrice en parallèle de celui du moteur (avec voltmètre et ampèremètre), toujours avec $U_e = 110$ V.

Alimenter l'induit du moteur avec une tension constante ($U_m = 60$ V par exemple), toujours en faisant attention d'utiliser un rhéostat au démarrage qui sera ensuite court-circuité.

Brancher un rhéostat de $100\ \Omega$ en série avec un ampèremètre sur l'induit de la génératrice. La MCC ralentit.

Réduire la résistance R du rhéostat. On voit qu'il faut fournir plus de puissance à l'alimentation du moteur pour retrouver $U_m = 60$ V.

Pour différentes valeurs de R , ajuster la puissance fournie par l'alimentation du moteur pour retrouver $U_m = 60$ V puis mesurer C , I_m , I_e et f .

Tracer $C = f(I_m)$ pour trouver C_r et retrouver $k\Phi_m$.

Remarque

On a réalisé une étude à U_m constant, mais on peut aussi le faire en maintenant ω ou C constant.

La résistance R du rhéostat permet à un courant de circuler dans l'induit de la génératrice et donc de fournir un couple s'opposant à la rotation engendrée par le moteur.

2.5 Rendement de la machine

On peut également remonter au rendement η_m du moteur. Il est défini comme :

$$\eta_m = \frac{\text{Puissance utile}}{\text{Puissance fournie}} = \frac{C\omega}{U_m I_m + U_e I_e} \quad (4)$$



Rendement du moteur



⊖ 5mn

Tracer η_m fonction de la puissance utile $\mathcal{P}_u = C\omega$.

On obtient une courbe en cloche, dont le maximum (vers 30%) correspond au fonctionnement nominal du moteur pour la tension $U_m = 60$ V.

En déduire le couple nominal C_n , la vitesse nominale ω_n et l'intensité nominale dans l'induit $I_{m,n}$.

Pertes

- pertes cuivre (effet Joule) dans l'induit : $r_m I_m^2$
- pertes cuivre (effet Joule) dans l'inducteur : $r_e I_e^2$
- frottements mécaniques : $C_r \omega$
- pertes magnétique (hystérésis magnétique, courants de Foucault, perte de flux).

Avantages et inconvénients de la MCC

✚ Palermo pp111-112

La MCC présente plusieurs avantages : elle est facilement réversible (moteur-génératrice), la vitesse de rotation est contrôlée par la tension de l'induit, et elle s'adapte à différentes charges. Mais la fragilité des balais du collecteur nécessite un entretien régulier. Elles ont été largement utilisées par le passé, en particulier pour la propulsion des locomotives électriques (premiers TGV, métro lyonnais...). On les retrouve aujourd'hui plutôt dans des applications à faible puissance (ventilateur, photocopieuse, essuieglace...) avec des stators composés d'aimants permanents. Les moteurs à fortes puissances sont maintenant constitués de machines à courant alternatif.

Avantages	Inconvénients
Commande simple Facilement réversible Stabilisation de vitesse Stabilisation de puissance	Collecteur Coût de fabrication Coût d'entretien

↓ On utilise bien plus le courant alternatif que le courant continu donc bon on l'a dans l'os avec notre MCC.

3 Moteur à courant alternatif

Ils sont basés sur la création d'un champ magnétique tournant, et l'interaction de ce dernier avec un moment magnétique, générant un couple :

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

On en distingue deux types, les moteurs synchrones, qui tournent à la vitesse d'oscillation du champ magnétique car les moments magnétiques sont permanents, et les moteurs asynchrones, qui ont une vitesse légèrement inférieure, du fait que les moments sont induits par le champs tournant.

Nous allons ici en faire une description qualitative qui a plus pour vocation de répondre à de potentielles questions que d'être dans l'exhaustivité.

3.1 Moteur synchrone

On prend un aimant permanent de moment \vec{M} en équilibre si et seulement si il tourne à la même vitesse que le champ.

Pour cela, il doit être accroché au champ, c'est à dire lancé à la même vitesse que celui-ci.

3.1 Production d'un champ tournant

Un champ tournant est un champ magnétique de norme constante qui tourne à vitesse angulaire ω constante.

Au niveau industriel, la plupart des champs tournants sont produits par des courants triphasés. Pour rappel, un système de tension triphasé est constitué de trois tensions sinusoïdales, de même amplitude et de même fréquence, déphasées deux à deux de 120° . Les tensions simples V_i correspondent à la différence de potentiel entre une phase et le neutre (nœud central). Les tensions composées $U_{ij} = V_i - V_j$ correspondent à la différence de potentiel entre deux phases. Le réseau EDF est à la fréquence de 50 Hz, et l'amplitude des tensions vaut $V_i = 230$ V et $U_{ij} = 400$ V.

Un champ magnétique tournant peut être produit simplement à partir de trois bobines dont les axes sont décalés de 120° . Chaque bobine est alimentée par une tension simple V_i (montage en étoile) ou par une tension composée U_{ij} (montage en triangle). Le courant étant déphasé de 120° dans chaque circuit, il en résulte un champ magnétique tournant au centre :

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 = B_0 [\cos(\omega t) \vec{e}_x + \sin(\omega t) \vec{e}_y]$$

Réaliser le montage en triangle de la figure 4.5. Chacune des trois branches est constituée d'une bobine de 1000 spires P60.21 en série avec un tiers du rhéostat triple $3 \times 330 \Omega$ P62.2. Alimenter l'entrée de l'onduleur triphasé P0.14 sur le réseau électrique avec un câble secteur P57.20, sans l'allumer pour le moment. Relier chacune de ses sorties (U, V et W) à une extrémité du montage en triangle, et ajouter un ampèremètre dans l'une des branches pour contrôler l'intensité.

Placer les trois bobines autour du support P65.14 sur lequel on place une aiguille de boussole P63.8 au centre. Insérer un noyau ferromagnétique (P60.16 par exemple) dans chaque bobine pour amplifier le champ magnétique.

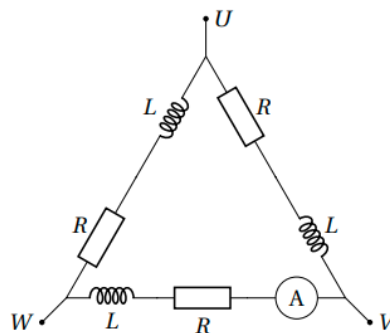


FIGURE 4.5 – Montage en triangle pour produire un champ tournant à l'aide d'un réseau triphasé.

Allumer l'onduleur et régler sa fréquence sur 5 Hz à l'aide des boutons ▲ et ▼. On règle l'amplitude à l'aide de la molette « vitesse ». Réduire progressivement la résistance du rhéostat triple pour augmenter le champ magnétique, tout en vérifiant que l'intensité dans le circuit ne dépasse pas 1 A. Mettre l'aiguille en mouvement en lui donner une petite impulsion avec le doigt. Une fois lancée, elle continue à tourner en indiquant la direction du champ magnétique.

Nous reviendrons sur la nécessité de lancer l'aiguille dans la partie suivante.

Le sens de rotation du champ magnétique (horaire ou antihoraire) dépend de l'alimentation des bobines et de l'enroulement des spires.

Inverser les branchements de l'une des bobines, et observer que le sens de rotation de l'aiguille s'est inversé.

L'avantage résulte dans le grand rendement de ces moteurs, et d'une vitesse de synchronisation très précise. Cependant, il nécessite d'être lancé. Le moteur synchrone a beaucoup été utilisé pour la conception de machines-outil des anciens TGV mais tend à être supplanté par la machine asynchrone. Il est encore utilisé pour des applications de forte puissance (Renault Zoé et Peugeot iOn par exemple) ou de faible puissance (commande de disque dur d'ordinateur).

3.2 Moteur asynchrone

Le moment est induit par les courants de Foucault, d'après la loi de Lenz, l'objet va s'opposer à la variation de flux magnétique en se mettant à tourner dans le même sens. On a alors ω qui tend vers ω_0 , mais l'objet n'atteindra jamais cette vitesse à cause des frottements. Il permet d'obtenir des vitesses assez élevées, n'a pas besoin d'être lancé initialement, mais il est difficile d'avoir une vitesse de rotation précise. Il est de plus en plus utilisée grâce au développement de l'électronique de puissance (TGV récents, machines-outils, propulsion des navires...).



Machine asynchrone



Reprendre l'expérience précédente en remplaçant le support à aiguille par la cage d'écureuil P65.12. Retirer le rhéostat de chaque branche du triangle afin d'atteindre une intensité suffisante pour faire tourner la cage. Retirer également l'ampèremètre du montage car l'intensité dans chaque branche va dépasser 10 A ! Fixer les noyaux ferromagnétiques P60.16 à l'aide des bloqueurs P60.14 pour éviter qu'ils soient projetés durant l'expérience. Une fois votre câblage vérifié, allumer l'onduleur (quelques dizaines de secondes seulement) pour faire tourner la cage d'écureuil.

Conclusion

Les moteurs ont une importance considérable dans la société moderne, il faut choisir le type de moteurs approprié en fonction de la tâche à réaliser, des contraintes économiques, écologiques... De plus, la plupart des moteurs électriques sont réversibles, on peut les faire fonctionner en génératrice et produire ainsi de l'énergie électrique (barrages, éolienne).

Commentaires pratiques

- Attention à ne pas mettre de trop grosses charges sur le Stirling, il a un faible couple (on l'arrête à la main). Donc on veut des faibles courants dans la charge, donc des grosses résistances.
- Le Hprépa sur la MCC remet très bien les idées en place.
- Lorsque l'on fait une mesure de fréquence par stroboscopie, ne pas oublier la contre-mesure à $f/2$.
- Pour la qualité des mesures et de la présentation, ne pas mettre un électroaimant puissant à côté d'un oscilloscope.
- Pour voir la réaction magnétique d'induit : http://l2ep.univ-lille1.fr/pagesperso/francois/files/ITEEM1_02_mcc.pdf
- Le couple résistif C_r est constant, c'est pas si trivial non ? Ce sont principalement des frottements solides qui dépendent de l'état des balais, ce qui peut varier. A ça il faut rajouter des pertes de lubrification dépendant de ω . Si en plus on a un ventilateur, il existe d'autres pertes en $\omega/2$. Mais tout ça ne domine pas dans notre MCC.

- Sur la charge de la MCC : on se met à 60 V, ce qui n'est pas opti. Si on fait l'étude à U_m fixé, c'est un peu dommage car on n'est pas en régime nominal, donc autant passer à 110 V. Attention à ne pas dépasser les intensités limites de la génératrice cependant. Mais si on travaille à ω fixé, U_m va s'ajuster et il faut bien partir de 60 V.