

MP35 – MOTEURS

11 avril 2019

Lagoin Marc & Ramborghi Thomas

Commentaires du jury

- Il faut pouvoir expliquer pourquoi un moteur tourne !
- La notion de point de fonctionnement est important ici.
- Il faut être capable d'interpréter l'écart entre système idéal et système réel.

Bibliographie

- ♣ *Fascicule de TP d'électromagnétisme*, **Jérémy Ferrand** Principale source de données pour les expériences.
- ♣ *Électrotechnique Parcours IUT*, **Christophe Palermo** Pour la théorie.
- ♣ *Le Bup n° 864*, **Alain Caillate** Pour le moteur de Stirling p663-681

Expériences

- ♣ Étude du moteur à courant continu
- ♣ Étude du moteur à courant alternatif (synchrone et/ou asynchrone)
- ♣ Étude du moteur de Stirling

Table des matières

1	Moteur à courant continu	2
1.1	Fonctionnement de la machine	2
1.2	Étude électrique à vide	2
1.3	Étude mécanique en charge	3
1.4	Rendement du moteur	3
1.5	Avantages et inconvénients d'une machine à courant continu	3
2	Machine à courant alternatif	4
2.1	Machine synchrone	5
2.2	Machine asynchrone	5
3	Moteur de Stirling	5

Introduction

1 Moteur à courant continu

1.1 Fonctionnement de la machine

La machine à courant continu est une machine réversible. En mode moteur, elle convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. En mode générateur, elle convertit à l'inverse le l'énergie méca en énergie élec (principe de fonctionnement d'une dynamo).

Elle est composée de 2 parties distinctes : le stator qui joue le rôle de l'inducteur et le rotor qui joue en rôle de l'induit. Le premier crée un champ magnétique \vec{B} constant à l'aide d'un bobinage traversé par un courant continu ou à l'aide un aimant permanent. La seconde composante est constitué d'un ensemble de spire pouvant être mises en rotation et relié à un arbre de transmission.

En fonctionnement moteur, un courant circule dans les spires induisant une force de Laplace en présence du champ \vec{B} et donc la création d'un couple responsable de la mise en rotation.

En fonctionnement génératrice, les spires tournent modifiant la surface par laquelle traverse le champs donc le flux. Cette variation au cours du temps est source d'une force électromotrice générant une tension.

Nous nous pencherons uniquement sur le premier mode de fonctionnement pour la suite du montage. Pour que la rotation perdure, il faut que le courant soit inversé à chaque demi-tour de la spire. De plus il faut pouvoir fournir un courant à un conducteur en rotation ! Pour cela nous utilisons ici un collecteur et des balais.

La machine que nous allons utiliser et caractériser ici est un montage à courant d'excitation séparé ; c'est à dire que l'inducteur et l'induit sont alimentés séparément. Ce mode est caractérisé par les caractéristiques suivantes : une résistance d'inducteur élevée, une vitesse stable avec la charge, un emballement possible si nous coupons l'excitation, une vitesse constante, un couple proportionnel à l'intensité, un démarrage à courant élevé, la possibilité de freinage. Il est principalement utilisé pour les machines-outils contrairement au montage en série utilisé pour la traction, le levage et l'électroménager.

Le moteur est caractérisé par deux grandeurs :

- le couple moteur en sortie C décomposé en 2 compo : le couple électromagnétique C_{EM} et le couple résistif dû aux frottements C_R . Nous avons donc la relation :

$$C = C_{EM} - C_R = k \phi_m I_m - C_R \quad (1)$$

- l'alimentation à l'induit du moteur permettant le maintient de la rotation U_m . Une partie permet de contrer la force électromotrice et l'autre la résistance interne du moteur. Il prend la forme :

$$U_m = k \phi_m \omega + r_{int} I_m \quad (2)$$

La constante k est une constante caractéristique de la géométrie du système et ω la pulsation associé à la rotation.

Attention : toujours éteindre l'induit avant l'inducteur pour éviter l'emballement de la machine.

1.2 Étude électrique à vide

Mise en marche de la machine : Nous alimentons l'inducteur du moteur sous sa tension nominal (écrite dessus) $U_e = 110V$ à l'aide d'une alimentation Langlois. Nous verrons qu'il s'agit de la tension pour laquelle le rendement est maximal. Il faut relever le disjoncteur ! On alimente également l'induit avec une autre alim avec un rhéostat de 10Ω dans le circuit. Il permet de protéger la machine d'éventuel surintensité au démarrage. En effet, à l'instant initial $\omega = 0$ donc le courant I_m peut être élevé car r_{int} petit. Nous le court-circuitons ensuite pour ne pas perdre en puissance. Nous positionnons 2 ampèremètres en série et 2 voltmètres en dérivation afin de mesurer I_e , U_e , I_m et U_m . Nous utilisons par ailleurs une génératrice tachymétrique pour remonter à la fréquence de rotation.

force électromotrice et résistance interne du moteur



⊖ 3 min

Nous avons tout d'abord déterminer la force électromotrice et la résistance interne du moteur. Pour cela, nous effectuons une étude électrique à vide.

Pour plusieurs tensions U_e entre 0 et 110V, nous mesurons l'intensité I_m dans l'induit et la fréquence de rotation f (ne pas oublier la multiplication par 2π pour remonter à la vitesse angulaire ω). Nous traçons alors $U_m(\omega)$ et nous effectuons une régression linéaire de 2 pour monter aux valeur de $k\phi_m$ (environ $0,55\text{V}\cdot\text{s}\cdot\text{rad}^{-1}$) et de r_{int} (de quelques Ω).

1.3 Étude mécanique en charge

Pour déterminer le couple résistif dû aux frottements, nous allons utiliser la machine en charge. Pour cela, nous ajoutons au circuit un rhéostat à la sortie de la génératrice afin de freiner la rotation du moteur par induction. Nous alimentons l'inducteur de la génératrice en parallèle à celui du moteur toujours à une tension de 110V. Comme la manip précédente, nous alimentons également l'induit du moteur avec la seconde alim à une tension de 110V avec rhéostat au démarrage.



couple résistif dû aux frottements



⊖ 3 min

Nous faisons varier la résistance du rhéostat et ajustons la puissance fournie par l'alim branchée à l'induit du moteur afin de retrouver une tension U_m de 110V. Nous mesurons alors le couple C , la vitesse angulaire ω et les intensités I_m et I_e . Nous traçons ensuite l'évolution de $C(I_m)$ et réalisons une régression linéaire de 1 afin d'obtenir C_r (nous retrouvons aussi la force électromotrice). Nous nous attendons à une valeur de l'ordre de 0,1N.m.

1.4 Rendement du moteur

Comme toute source de conversion d'énergie, nous pouvons calculer son rendement. Il est défini comme le rapport de la puissance mécanique utile P_u sur la puissance électrique totale fournie par les 2 alimentations P_f . D'où :

$$\eta = \frac{P_u}{P_f} \frac{C \omega}{U_m I_m + U_e I_e} \quad (3)$$



rendement (puissance utile)



⊖ 2 min

Nous traçons $\eta(P_u)$ et nous trouvons, si tout va bien, une courbe en cloche dont le max correspond au fonctionnement nominal du moteur pour $U_m = 110\text{V}$. Nous en déduisons les valeurs de $C_{nominal}$, $\omega_{nominal}$ et l'intensité nominale dans l'induit $I_{m,nominal}$.

Nous pouvons aussi évaluer les pertes cuivre dans l'induit et dans l'inducteur ainsi que les pertes par frottement. Elles sont obtenues grâce aux relations :

$$P_{m,cuivre} = r_{int} I_{m,n}^2, \quad P_{e,cuivre} = r_e I_e^2, \quad P_{frottement} = C_r \omega_n \quad (4)$$

Les autres pertes sont d'origine magnétique (hystérésis magnétique, courants de Foucault, perte de flux).

1.5 Avantages et inconvénients d'une machine à courant continu

Cette machine est plein d'avantages :

- Cette machine est facile à commander : la variation de vitesse s'effectue via la tension d'induit et la variation du couple par le courant.

- Cette machine est facile est réversible. Le passage d'un fonctionnement à l'autre est facile via la force électromagnétique induite.
- Le freinage est simple et l'énergie peut être récupérée sous forme électrique en passant la machine en mode génératrice.
- le couple du moteur lors du démarrage étant important et réglable, il peut démarrer sans aide extérieur.
- Cette machine est polyvalente puisqu'elle peut aussi bien travailler à vitesse constante pour un travail de précision ou à puissance constante si une brusque variation de couple est nécessaire.

cependant elle possède aussi son lot d'inconvénient (entretien et coût) :

- Le remplacement des balais est régulièrement nécessaire.
- Les lames doivent être positionnées avec précision pour éviter de faire sauter les balais et former des étincelles. Il en est de même pour le ressort dans les balais.

Le moteur à courant continu a été de plus en plus remplacé par le moteur asynchrone qui utilise un rotor induit en court-circuit (cage d'écureuil) ne nécessitant aucune collection de courant (ce qui est le gros point faible de la MCC!).

La dynamo a été, quant à elle, peu à peu remplacé par l'alternateur synchrone dans lequel le rotor est l'inducteur et il n'y a donc plus besoin non plus de communiquer le courant à l'autre partie.

L'étude de ces 2 alternatives sérieuses fait l'objet de notre prochaine partie.

Notons que cette machine est toujours utilisé lorsque de faibles puissances sont requises (ventilateur, photocopieuse, essuie glace, ect...) et ont permis la propulsions des premières locomotives électriques.

2 Machine à courant alternatif

Les machines synchrones et asynchrones sont des machines à courant alternatif fonctionnant grâce à un champ magnétique tournant produit par des courants triphasés (même amplitude, même fréquence mais déphasé $2\pi/3$). Nous définissons la tension composée comme la différences de tension entre 2 phases. Ce type de courant sera ici créé par un onduleur triphasé nous donnant 3 tensions composées en sortie pour notre montage en triangle représenté en figure .

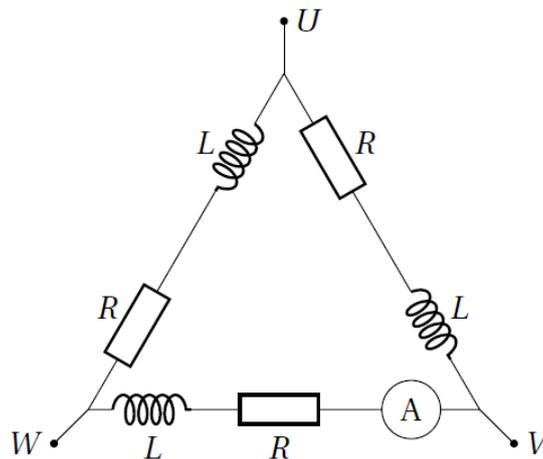


FIGURE 1 – Schéma général d'un montage en triangle permettant la création d'un champ tournant. Cette figure a été prise dans le poly de Jérémy Ferrand.

Il est composé de 3 bobines identiques de 500 spires dans lesquelles nous insérons un noyau ferromagnétique pour amplifier et diriger le champs. Elles sont positionnée chacune en série avec un tiers d'un rhéostat triple. Nous alimentons l'entrée de l'onduleur triphasé avec un câble secteur. Nous relierons ensuite chacune de ses sorties (U, V et W) à une extrémité du montage en triangle, et ajoutons un ampèremètre dans l'une des branches pour contrôler l'intensité.

2.1 Machine synchrone

Tout comme la MCC, le machine synchrone est composée d'un stator (ici les 3 bobines en triangle) et d'un rotor (aimant permanent ici la boussole que nous placerons au centre) et est réversible.

Le champ oscillant \vec{B} à la fréquence ω_0 produit un couple sur le rotor C de la forme :

$$C = \vec{B} \wedge \vec{M} = B M \sin((\omega - \omega_0)t + \varphi) \vec{e}_z \quad (5)$$

Pour que la conversion en puissance soit réalisée, il faut que le couple possède une valeur non-nul. Ceci implique que $\omega = \omega_0$ et explique le nom de ce type de moteur. Nous pouvons noter qu'un dispositif auxiliaire à aider à se placer à la bonne vitesse au démarrage puisque le couple est initialement nul.



mise en évidence de la synchronisation



⊖ 1 min

Nous ajoutons une petite boussole au centre de nos 3 bobines. Puis nous observons le signal émis à l'aide d'un oscilloscope que nous comparons à la vitesse de rotation de la boussole déterminé par un stroboscope.

L'avantage ici est la précision sur la vitesse et pour légers inconvénient la mise en démarrage non-autonome.

2.2 Machine asynchrone

Le moteur asynchrone est, tout comme les 2 précédant, une machine réversible. Le stator reste identique à celui de la machine synchrone et le rotor est un bobinage fermé. Le moment magnétique n'est plus permanent ici et prend la forme : $\vec{M} = N I \vec{S}$. Le calcul du couple moyen nous montre qu'il est non nul au démarrage et ce moteur sera donc autonome.



mise en mouvement de la cage à écureuil



⊖ 1 min

Nous reprenons l'expérience précédente en remplaçant l'aiguille par une cage d'écureuil. Il faut retirer les rhéostats afin d'avoir suffisamment de puissance pour faire tourner la cage afin que l'ampèremètre qui ne supportera pas des courant pouvant atteindre jusqu'à 10A ! Les noyaux doivent être également fixé afin qu'il ne soit pas éventuellement projeté pendant l'expérience ! (Tout ça donne envie de faire cette expérience devant le jury). Il ne reste plus qu'à allumer le courant et regarder la cage tourné un dizaine de seconde maximum.

La machine asynchrone est actuellement utilisée pour l'électronique de puissance (TGV, machine industrielle, etc...). Son fonctionnement en génératrice est récent et se retrouve par exemple dans les éoliennes.

3 Moteur de Stirling

Nous avons, jusqu'ici, parlé de moteur électrique. Il ne s'agit pas de la seule énergie pouvant être convertie en énergie mécanique. Nous allons ici nous intéresser à une machine thermique appelée machine de Stirling. Il s'agit d'une machine ditherme dont la source de chaleur "chaude" est produite par un brûleur à l'éthanol. Le système est ici un fluide (de l'air) qui décrit un cycle composé par 2 transformations isothermes (une compression et une détente) et deux transformations isochores (un réchauffement et un refroidissement). L'idée est ici de faire passer l'air alternativement avec la source froide et la source chaude à l'aide d'un piston horizontal un peu plus petit que le tube. Notons qu'il faut un déplacement trapézoïdal de ce piston déplaceur pour que l'air reste en contact avec les sources un moment. Il y a un second piston appelé piston moteur se déplaçant à la même vitesse que le premier mais déphasé de 90° . Le piston permet, au cours de son mouvement, la modification du volume.

La pression est mesurée de façon relative grâce à une jauge de contrainte et le volume est obtenu via la position du piston vertical et des dimensions géométriques du moteur. Concrètement, nous avons accès à deux tensions reliées à ces grandeurs par :

$$P = P_0 + \frac{U_P}{20 \cdot 10^{-6}} \text{Pa} \quad \text{et} \quad V = 32 \frac{44 - 32}{4.096} U_V \text{cm}^3 \quad (6)$$

Diagramme de P(V)



⊖ 1 min

Une fois la machine mise en place, nous commençons par faire le zéro. Pour cela, nous plaçons le piston moteur (vertical) à sa position la plus basse et nous appuyons sur le bouton d'initialisation. Puis nous pouvons lancer le moteur manuellement pour le mettre en marche. Nous acquérons les tensions U_V et U_P sur quelques cycles à l'aide de Latis-Pro. Nous en déduisons V et P des formules 6 ce qui nous permet de tracer le diagramme P(V).

Nous constatons que le cycle obtenu est assez éloigné du modèle théorique. Ceci est dû, en grande partie aux différents frottements (frottement solide et visqueux), variation de pression et de volume rapide, etc... Par ailleurs la chaleur de la source chaude diffuse dans tous le cylindre (caractère non-idéal de la source bitherme). Enfin le mouvement des pistons n'est pas trapézoïdal donc les isochores seront surement réduites.

L'aire du cycle correspond à la quantité $\oint PdV$. Elle correspond, à un signe près, au travail reçu par le système (l'air) par le milieu extérieur au cours d'un cycle. Ici le cycle est parcouru dans le sens horaire (que nous pouvons vérifier en branchant les tensions en sortie en mode XY sur l'oscilo). L'aire est donc positive; ce qui induit que le travail est négatif. Il s'agit donc bien d'un moteur ici et l'énergie mécanique est cédée par le moteur. Nous allons donc pouvoir remonter à cette valeur.

Travail mécanique cédé par le moteur et puissance à vide



⊖ 1 min

Nous commençons par déterminer la période d'un cycle sur les courbe obtenues sur Latis-Pro. Puis nous exportons les tableaux de valeurs de P et V dans un fichier au format txt (Menu Fichier/Exportation) que nous ouvrons ensuite sur Régressi. Grâce à la feuille de calcul nous calculons le travail par la formule : $W = \text{aire}(P, V)$. La puissance est obtenu par l'expression : $P_{\text{sortie}} = \frac{W}{T_{\text{cycle}}}$ (nous nous attendons à une valeur de l'ordre de 1W).

Comme tout moteur, il est intéressant de calculer son rendement. Il est défini comme le rapport entre la puissance en sortie P_{sortie} sur la puissance fournie par la combustion de l'éthanol $P_{\text{combustion}}$. Nous obtenons alors, pour la combustion d'une masse $m_{\text{éthanol}}$ pendant un temps τ et possédant une enthalpie massique de combustion $\Delta_c H_{\text{éthanol}} \approx 29,8 \text{ kJ.g}^{-1}$, la relation :

$$\eta = \frac{P_{\text{sortie}}}{P_{\text{combustion}}} \text{ avec } P_{\text{combustion}} = \frac{m_{\text{éthanol}} \Delta_c H_{\text{éthanol}}}{\tau} \quad (7)$$

Rendement du moteur



⊖ 1 min

Nous prenons le bruleur à éthanol et nous mesurons sa masse. Puis nous l'allumons quelques minutes en mesurant le temps écoulé au chronomètre . Nous le repons afin de remonter à la masse d'éthanol consommé pendant ce petit temps et donc au rendement grâce à la formule ??.

Nous pouvons comparer la valeur max obtenue avec celle prévu par Carnot η_c :

$$\eta_c = 1 - \frac{T_f}{T_c} \quad (8)$$

Nous pouvons considérer que la température T_f est assimilable à la température ambiante (sauf si on a mis un glaçon pour refroidir l'extrémité) et la température chaude la température de flamme de l'éthanol qui est de l'ordre de 1000°C .

Le rendement obtenue expérimentalement est inférieur car une grande partie de de l'énergie est dissipée par le milieu ambiant. De plus la source chaude n'est pas exactement à la température de la flamme.

Nous finirons ce montage en donnant les domaines dans lequel nous utilisons ce type de moteur. NOus les retrouvons notamment dans les satellites et les groupes électrogènes. Ils ont l'avantage d'être relativement silencieux et non-polluant car le gaz évolue en système fermé (contrairement au moteur Diesel). En revanche, du fait de la grande inertie thermique des éléments, il résiste mal aux changements de couple et n'est donc pas adapté à la conception de véhicules.