

3 Les machines à courant alternatif

↗ [Quaranta IV] à « Moteurs à courant alternatif », [H-prépa Électronique II] p.101-121, [Précis Électrotechnique] p.177-193

Les machines à courant alternatif, synchrones et asynchrones, fonctionnent grâce à des champs magnétiques tournants.

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 :

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

Vous n'aurez pas accès au réseau électrique triphasé pour les oraux de l'agrégation. Cependant, il est possible de générer des tensions triphasées à l'aide d'un onduleur triphasé, alimenté sur le secteur électrique monophasé.

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.

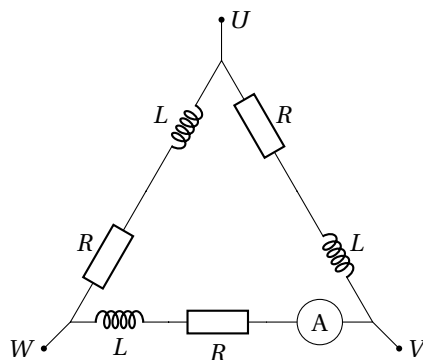


FIGURE 4.5 – Montage en triangle pour produire un champ tournant à l'aide d'un réseau triphasé.

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 donnant 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.

3.2 Principe du moteur synchrone

La machine synchrone est composée de deux parties :

- un stator qui est constitué de bobinages,
- un rotor qui possède un moment magnétique \vec{M} permanent (aimant permanent) ou induit par une source externe.

Comme la MCC, elle est réversible et peut fonctionner en moteur ou en génératrice.

Dans le cas du moteur synchrone, le stator produit un champ magnétique \vec{B} tournant à la vitesse angulaire ω . Il s'exerce alors sur le rotor un couple électromécanique :

$$\vec{C} = \vec{M} \wedge \vec{B} = MB \sin [(\Omega - \omega) t + \alpha] \vec{e}_z$$

avec Ω la vitesse angulaire du rotor et α un angle constant.

La conversion de puissance est réalisée lorsque la valeur moyenne du couple $\langle C \rangle$ est non-nul, c'est-à-dire lorsque $\Omega = \omega$. Le rotor tourne alors à la même vitesse que le champ, on parle de synchronisme.

Contrairement au moteur à courant continu, le moteur synchrone nécessite d'être lancé au démarrage. En effet, lorsque le rotor est immobile ($\Omega = 0$), le couple moyen $\langle C \rangle$ est nul. Un dispositif auxiliaire est nécessaire pour le mettre en rotation à la vitesse de synchronisme.

En régime permanent, le couple s'équilibre avec le couple résistif C_r , tel que :

$$\langle C \rangle = C_r = MB \sin \alpha$$

L'angle α correspond donc à l'angle d'équilibre entre \vec{M} et \vec{B} . On remarque que si le couple résistif est trop important, soit $C_r > MB$, le régime permanent ne peut pas être atteint.

La rotation d'une aiguille dans un champ tournant illustre le principe d'un moteur synchrone : les bobines alimentées en triphasé forment le stator, et l'aiguille qui possède un moment magnétique joue le rôle du rotor. Le moteur nécessite d'être démarré par un dispositif extérieur (impulsion donnée avec le doigt), puis tourne à la même vitesse angulaire que le champ.

Recommencer l'expérience précédente, puis mesurer la fréquence de rotation de l'aiguille à l'aide d'un stroboscope (P3.5 par exemple). On retrouve la fréquence du champ tournant ω , et donc celle en sortie de l'onduleur (5 Hz environ).

Le moteur synchrone présente l'avantage de maintenir une vitesse de rotation précise, constante et indépendante de la charge (tant qu'il n'y a pas de décrochage), mais il nécessite un dispositif auxiliaire pour le démarrage. Les machines synchrones sont aujourd'hui principalement utilisées en génératrice (centrale hydroélectrique, dynamo de vélo...), on ne les utilise en moteur que pour des applications nécessitant une vitesse contrôlée précisément (voiture électrique, commande de disque dur...).

3.3 Principe du moteur asynchrone (en seconde lecture)

La machine asynchrone est composée de deux parties :

- un stator qui est constitué de bobinages,
- un rotor qui est constitué d'un bobinage fermé sur lui-même, il ne possède pas de moment magnétique \vec{M} permanent et n'est pas relié à une source externe.

La machine asynchrone est également réversible.

Dans le cas du moteur asynchrone, le stator produit un champ magnétique \vec{B} tournant à la vitesse angulaire ω . La variation du flux magnétique à travers le rotor induit une force électromotrice, d'où il résulte une intensité I . En modélisant le rotor par une bobine de N spires de surface orientée \vec{S} , d'inductance L et de résistance R , celui-ci possède un moment magnétique :

$$\vec{M} = NI \vec{S}$$

Il s'exerce sur le rotor un couple électromécanique moyen :

$$\langle \vec{C} \rangle = \langle \vec{M} \wedge \vec{B} \rangle = \frac{N^2 B^2 S^2 R (\omega - \Omega)}{2(R^2 + L^2 (\omega - \Omega)^2)} \vec{e}_z$$

avec Ω la vitesse de rotation du rotor.

Le couple est moteur lorsque $\Omega < \omega$, puis s'annule pour $\Omega = \omega$. En régime permanent, on montre que le couple s'équilibre avec le couple résistif $\langle C \rangle = C_r$ pour une vitesse Ω légèrement inférieure à ω (contrairement au moteur synchrone où $\Omega = \omega$).

On remarque que le couple est positif lorsque le rotor est immobile ($\Omega = 0$). Il n'est donc pas nécessaire de lancer le moteur asynchrone pour le démarrer (contrairement au moteur synchrone).

On peut illustrer le principe du moteur asynchrone avec un rotor à « cage d'écurie » (circuit fermé constitué d'un ensemble de tiges parallèles en forme de cylindre) placé dans un champ tournant.

- ☛ Contrairement à l'aiguille de boussole, la cage d'écurie demande une forte puissance pour tourner. Pour l'atteindre, il est nécessaire de dépasser l'intensité maximale indiquée sur les bobines. L'expérience doit donc être réalisée rapidement (quelques dizaines de secondes au maximum) pour éviter de surchauffer les bobines.

Reprendre l'expérience précédente en remplaçant le support à aiguille par la cage d'écurie 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'écurie.

Le moteur asynchrone est le moteur le plus utilisé aujourd'hui en électronique de puissance (TGV, machine industrielle...). Il n'a pas besoin d'être lancé pour démarrer, et s'adapte facilement à une variation de sa charge. En revanche, la vitesse de rotation est moins bien contrôlée. Le fonctionnement en génératrice est récent, il est employé pour certaines applications où la vitesse évolue fortement, comme des éoliennes par exemple, et il nécessite une électronique de puissance complexe.

3.4 Étude d'un moteur asynchrone (en seconde lecture)

L'étude détaillée d'un moteur asynchrone peut être réalisée sur le banc CC/asynchrone P0.22 de façon analogue à celle du moteur à courant continu.

Le banc est constitué de deux parties :

- un moteur asynchrone (à droite), que l'on alimente en triphasé (montage en triangle) à la fréquence ω , on utilise le rhéostat P0.27 pour le démarrage,
- une génératrice à courant continu (à gauche), dont l'inducteur est alimenté par une tension continue, où il est possible de relier une charge sur son induit.

La mesure du couple C et de la vitesse de rotation Ω pour différentes charges sur la génératrice, permet de tracer la caractéristique $C(\Omega)$ du moteur, et de remonter à son rendement.

L'étude de la génératrice à courant continu (caractéristique à vide, en charge, rendement) est également réalisable sur ce banc.

4 Un exemple de moteur thermique : le moteur de Stirling

☞ [Notice du moteur de Stirling P103.49], [BUP 864] p.663-687, [Pérez Thermo] p.182-183

4.1 Description du moteur de Stirling

Un moteur thermique produit de l'énergie mécanique à partir d'une différence de température entre deux sources. Le moteur de Stirling réalise cette conversion en parcourant le cycle de Stirling, composé de deux isothermes et de deux isochores.

Nous allons étudier le moteur de Stirling P103.49/2. Il est constitué d'un volume d'air isolé V qui se déplace par l'intermédiaire de deux pistons (l'un vertical et l'autre horizontal) reliés par un système de bielle-vilebrequin au disque en rotation. Un petit brûleur à éthanol, placé sous l'extrémité droite du moteur, permet de maintenir une différence de température avec la partie gauche à température ambiante. Le piston vertical (en bas) est de même diamètre que le tube en verre, son déplacement réduit le volume accessible par l'air lorsqu'il descend, et augmente le volume lorsqu'il monte. Le piston horizontal a un diamètre inférieur à celui du tube, il permet de faire circuler l'air entre la partie chaude (à droite) et la partie froide (à gauche).

Le cycle théorique du moteur est représenté en figure 4.6, il est constitué de quatre phases :

1. détente isotherme : le piston horizontal est immobile à gauche, ce qui maintient l'air à droite à la température chaude $T = T_2$, et le piston vertical monte (V augmente de V_1 à V_2),

2. refroidissement isochore : le piston horizontal se déplace vers la droite, et chasse l'air vers la gauche qui se refroidit (T passe de T_2 à T_1), le piston vertical est immobile ($V = V_2$),
3. compression isotherme : le piston horizontal est immobile à droite ($T = T_1$), et le piston vertical descend (V passe de V_2 à V_1),
4. chauffage isochore : le piston horizontal se déplace vers la gauche (T passe de T_1 à T_2), et le piston vertical est immobile ($V = V_1$).

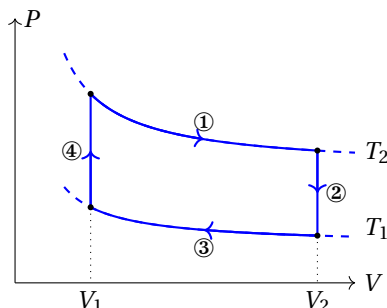


FIGURE 4.6 – Cycle théorique du moteur de Stirling.

Le dispositif P103.49/2 est équipé d'un boîtier d'interface permettant de remonter à la pression P et au volume V du gaz au cours du temps. 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 (V est compris entre 32 cm^3 et 44 cm^3), l'interface renvoie une tension U_V . On remonte à P et V avec les formules indiquées sur l'une des notices P103.49 (U_P et U_V sont exprimées en volts) :

$$\begin{cases} P = P_0 + \frac{U_P}{\frac{20 \cdot 10^{-6}}{44 - 32}} & \text{en Pa} \\ V = 32 + \frac{U_V}{4,096} & \text{en cm}^3 \end{cases}$$

Le disque en rotation peut être relié à une petite génératrice à l'avant du dispositif en installant une courroie. La puissance fournie par le moteur est alors convertie pour allumer une petite ampoule (si elle est branchée) ou être transférée à une charge. Un couplemètre mécanique peut également être installé sur le disque en rotation, mais la mesure étant de très mauvaise qualité, nous ne l'utiliserons pas dans ce TP.

4.2 Étude à vide

Demander le moteur de Stirling P103.49/2 aux techniciens s'il n'est pas déjà sorti.

Retirer la courroie qui relie le disque du moteur à sa génératrice si elle est installée. Relier le boîtier d'interface au moteur avec le cordon de liaison, puis alimenter le boîtier avec le cordon secteur, la diode clignote. Relier les tensions U_P et U_V à une carte d'acquisition.

Remplir le brûleur d'éthanol, puis attendre quelques instants que le liquide monte dans la mèche par capillarité. Allumer la mèche avec un briquet P101.39 ou une allumette. Placer le brûleur sous l'extrémité droite du moteur pour former la source chaude.

Après quelques minutes de chauffage, tourner le disque de façon à placer le piston vertical dans sa position basse. Appuyer sur le bouton rouge pour initialiser le boîtier d'interface, la diode s'arrête de clignoter.

- ☛ À partir de cet instant, ne toucher plus au disque à part pour lancer le moteur. Si vous faites tourner le disque dans le sens inverse de celui indiqué par la flèche, il faudra recommencer l'initialisation en débranchant l'alimentation du boîtier.

Lancer le moteur dans le sens indiqué par la flèche avec un mouvement rapide de la main sur le disque. Si la source est assez chaude et le lancement assez rapide, le moteur démarre. Si ce n'est pas le cas, laisser chauffer plus longtemps puis recommencer l'initialisation en débranchant l'alimentation du boîtier.

Acquérir les tensions U_P et U_V sur quelques cycles sous Latis-Pro. Utiliser la Feuille de Calcul pour remonter à P et V avec les formules précédentes. Mesurer la période des cycles T_{cycle} (de l'ordre de 0,1 s), puis tracer le diagramme (P, V) du moteur.

Une fois les mesures effectuées, éteindre le brûleur et arrêter le moteur.

Le diagramme (P, V) réel du moteur est assez éloigné du cycle de Stirling théorique. On peut remonter au travail W fourni par le moteur au cours d'un cycle en mesurant l'aire balayée par son diagramme (P, V) . Latis-Pro n'ayant pas de fonction permettant de calculer une aire, on exportera les données sous Régressi.

Exporter les données de P et V dans un fichier au format txt (Menu Fichier/Exportation). Ouvrir le fichier sous Régressi. Dans l'onglet Expression, calculer le travail avec la formule : $W = \text{aire}(P, V)$.

En déduire la puissance du moteur à vide $P_{\text{vide}} = W / T_{\text{cycle}}$ (de l'ordre de 1 W).

Après quelques dizaines de minutes de fonctionnement, il est normal que le moteur ralentisse puis s'arrête. Cela est dû à la diffusion progressive de la chaleur depuis la source chaude jusqu'à la source froide. Lorsque la différence de température devient trop faible, le moteur s'arrête, et il faut alors attendre qu'il refroidisse pour le relancer. On peut placer un petit béccher contenant de la glace sur la partie gauche du moteur pour le refroidir plus vite.

4.3 Rendement du moteur (en seconde lecture)

Le rendement η du moteur est défini comme le rapport de sa puissance en sortie P_{vide} sur la puissance fournie par la combustion de l'éthanol P_c . Nous pouvons l'estimer en ordre de grandeur. On rappelle que la combustion d'une masse m d'éthanol durant un temps τ fournit une puissance :

$$P_c = \frac{m \Delta_c H_{\text{éth}}}{\tau}$$

avec $\Delta_c H_{\text{éth}} \approx 29,8$ kJ/g l'enthalpie massique de combustion de l'éthanol.

Lorsque le brûleur est froid, le remplir d'éthanol, puis mesurer sa masse avec une balance de précision. Allumer le brûleur pendant un temps τ de quelques minutes, puis le peser à nouveau.

La différence de masse m permet de remonter à la puissance P_c fournie par la combustion (de l'ordre de 100 W), on estime alors le rendement du moteur $\eta = P_{\text{vide}} / P_c$.

Le rendement théorique maximal d'un moteur de Stirling est donné par le rendement de Carnot :

$$\eta_C = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

avec T_f et T_c les températures des sources froide et chaude. La température d'une flamme d'éthanol étant de l'ordre de 1000°C, et en considérant que la source froide est à température ambiante, on obtient un rendement de Carnot η_C proche de 1.

Le rendement obtenu en pratique est bien inférieur car la majorité de l'énergie fournie par la combustion est dissipée dans le milieu ambiant, la source chaude n'est pas non plus à la température de la flamme. Ce moteur n'a pas pour but d'avoir un bon rendement, c'est un moteur pédagogique.

4.4 Étude en charge

On réalise une étude en charge en reliant le moteur à la génératrice.

Relier le disque du moteur à la génératrice avec la courroie en caoutchouc. Placer l'interrupteur sur la position générateur, et dévisser la petite ampoule. Allumer le brûleur, faire chauffer le moteur plusieurs minutes, puis le lancer.

Lorsque le moteur tourne, brancher sur la sortie Output de la génératrice une résistance à décade P56.14 (initialement réglée sur 1 k Ω) en série avec un ampèremètre. Pour différentes résistances R , mesurer l'intensité I tout en veillant à ne pas dépasser pas 80 mA, et mesurer ω en reliant la tension correspondante à P ou V à un multimètre en mode fréquencemètre.

Représenter la puissance utile $P_u = RI^2$ fournie par le moteur en fonction de la charge R ou de la vitesse ω . On obtient une courbe en cloche, dont le maximum correspond au fonctionnement nominal du moteur.

Au niveau industriel, le moteur de Stirling est utilisé dans de nombreux systèmes : satellite, groupe électrogène... Il présente 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.