

Refaire chauffer le moteur 30 minutes avant la prise de mesure. Attention ce n'est pas très reproductible —> On veut une tendance. Esprit critique : montage electroteque, etre raisonnable en terme de reproductibilité. Mesure du KFI assez bonne, mais étude des pertes, plus de dispersion (à vide c'est pas mal) mais souvent on ne trouve pas le KFI de la datashift (il faut la même tension d'alimentation du stator sinon pas le meme KFI par rapport à celui de Philippe)

MOTEUR A COURANT CONTINU

Principe de fonctionnement

§ II.2.2

Pour comprendre le principe de fonctionnement des MCC (rôle des collecteurs). C'est qualitatif mais il n'est pas inutile de présenter le principe de fonctionnement des moteurs (cf. rapport 2007).

Vérification de la proportionnalité entre E et ω

II.3.4 →

détermination du $k\Phi$ du moteur (facultatif).

1) Etude à vide Piloter la vitesse grâce à la tension

II.3.5 : Courbe $U_0 = f(\omega_0)$; Montrer que $E_0 = f(\omega_0)$

droite

Etude du couple de perte global en fonction de la

vitesse → \approx constant.

2) Etude en charge à $U = cte$

II.3.6

Courbe $\omega_C = f(T_U)$: Identifier les parametres qui influent sur cette vitesse

Ce graphique permet de voir le peu d'influence qu'a une demande de couple mécanique sur la vitesse de rotation du moteur → intérêt que peuvent avoir les MCC dans le domaine de la traction.

KFI du moteur ?

Montrer que ω dépend d'autant moins de la charge que R est faible → et kFI fort !!!

qualité d'un moteur.

La vitesse ne depend plus trop de la charge mécanique appliquée

Courbe $\Gamma_U = f(I_C)$:

Ce graphique permet de vérifier que le couple mécanique est proportionnel au courant demandé comme l'indique la relation (3)

Rendement direct :

Ce graphique permet de définir le domaine de fonctionnement nominal (rendement max).

Moteur = Sy à conversion de puissance donc interessant de faire le rendement

Rendement par pertes séparées

On peut faire un calcul d'incertitude sur la relation $P_{primaire} =$

$P_{accrochisme} + P_{Fer} + P_{Cuivre}$

MOTEUR A COURANT ALTERNATIF

Asynchrone

III.1

Synchrone

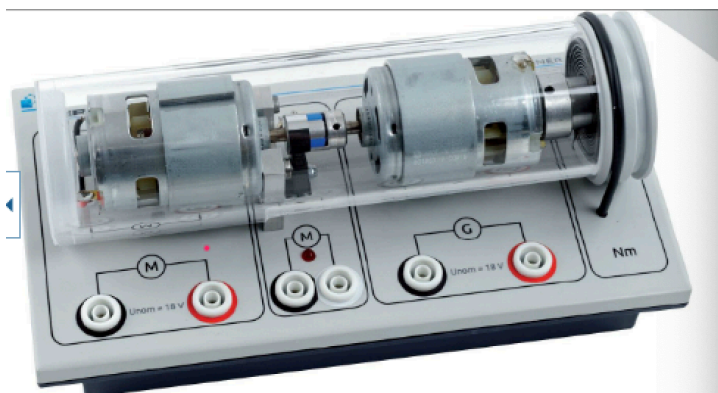
→ § 2.2.2

Les moteurs ont pour but de convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique. Si on excepte les moteurs linéaires, ils sont tous constitués d'une partie en mouvement de rotation appelée rotor (induit) et d'une partie fixe, le stator (inducteur). On peut classer les moteurs en deux grandes familles suivant le type de source employée : les moteurs à courant continu (MCC) et ceux à courant alternatif (MCA) pour lesquels on distingue les machines synchrones et asynchrones

I- Moteur à courant continu :

1- Principe de fonctionnement *(qualitatif, mais pas inutile, toutefois ne pas passer trop de temps dessus)*

Le stator (inducteur) crée un champ magnétique statique subi par le rotor (induit). Ce champ peut être créé par des aimants permanents ou par des bobines. Le rotor est composé d'au moins un enroulement (souvent beaucoup plus) parcouru par un courant continu. Placé dans le champ du stator, il subit un couple de forces qui s'annule et s'inverse suivant l'angle de rotation → un mouvement continu dans un seul sens n'est possible que si le sens du moment magnétique du rotor change en cours de rotation. L'alimentation du rotor s'effectue donc par un système collecteur-balais permettant cette inversion. Il existe plusieurs types de MCC suivant le mode d'excitation : à excitation séparée (deux sources différentes alimentent le stator et le rotor), MCC shunt (une seule source alimente en parallèle le stator et le rotor), MCC série (moteur universel : une seule source alimente en série le stator et le rotor), MCC Compound (excitation hybride). Le banc d'essai utilisé dans cette partie permet d'étudier le premier type de moteur. L'intérêt principal du moteur à courant continu est la facilité avec laquelle on peut contrôler sa vitesse dans des proportions importantes (rapport de 1 à 300 sans problèmes). Son inconvénient majeur est le prix : à puissance égale, il est 2 fois plus cher qu'un moteur asynchrone. Il est aussi plus fragile que ce dernier en raison du système de collecteur balais.



de la génératrice

Nouvelle maquette de moteur

- 1) Moteur (rotor du moteur et de la génératrice sur le même axe, tourne en même temps)
- 2) Capteur photoélectrique
- 3) Génératrice (comme un moteur en inverse, charge le moteur)
- 4) Lecture visuelle du couple utile

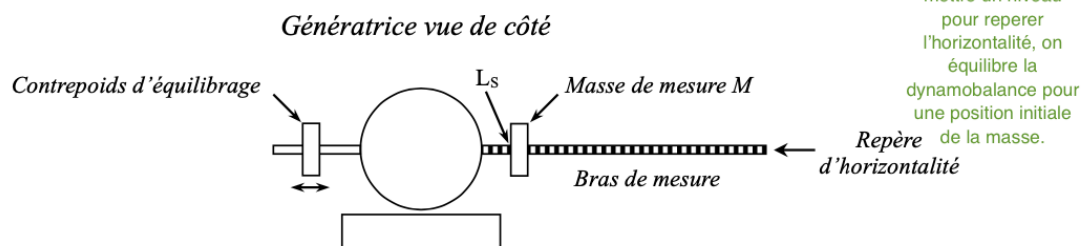
« charger » = imposer la consommation d'un couple utile à la génératrice

Ancien moteur :

C'est un moteur d'essuie-glace Bosch modifié. Le stator est constitué de deux aimants en ferrite. Il n'a donc pas besoin d'être alimenté. Le rotor est solidaire de l'axe de rotation du moteur. Des balais placés sur les contacts tournants du rotor permettent de faire débiter la génératrice sur une résistance de charge. La puissance électrique débitée demande alors du couple au rotor, ce qui charge mécaniquement le moteur (rôle de frein).

Des rajouts sur la carcasse permettent de mesurer en régime permanent le couple utile délivré par le moteur à la génératrice. Le principe utilisé est celui de la dynamo balance⁸ (cf. [1], p. 88 pour plus de précision sur ce point). La mesure d'un couple utile se fait en deux étapes.

Équilibrage statique de la balance :



Il faut commencer par repérer la position d'horizontalité du bras de mesure en plaçant un niveau à bulle sur le bras. On place alors un repère (tige fine fixée sur un pied par exemple) à l'extrémité du bras pour repérer cette position. L'équilibrage statique de la balance se fait à l'aide du contrepoids situé sur la tige opposée au bras. On peut placer la masse de mesure sur une graduation entière⁹ LS pour faciliter les lectures ultérieures, puis on déplace le contrepoids pour rétablir l'horizontalité. L'existence de frottements secs sur la machine complique un peu cette tâche¹⁰ → on peut secouer légèrement le banc en cours de réglage pour trouver au mieux la position d'équilibre.

Mesure d'un couple utile :

Le fait de charger la génératrice avec un rhéostat pour demander du couple mécanique au moteur entraîne un déséquilibre de la balance qui s'explique de la manière suivante : le moteur entraîne le rotor de la génératrice plongé dans le flux du champ magnétique BS de son stator → la rotation fait apparaître une f.é.m. induite dans les spires du rotor qui entraîne la circulation d'un courant puisque l'induit est refermé sur une résistance de charge. Ce courant circulant en présence de BS, des forces de Laplace apparaissent et créent un couple au niveau du rotor¹¹ qui s'applique aussi au stator en raison du principe de l'action et de la réaction. Pour mesurer ce couple qui déséquilibre la balance, il suffit de déplacer la masse M jusqu'à retrouver l'horizontalité. Le moment dû au poids sur le bras égalise alors le moment du couple des forces électromagnétiques agissant sur le stator, donc celui agissant sur le rotor. Celui-ci étant pratiquement égal au couple utile délivré par le moteur, on a, si LC est la nouvelle position de la masse M :

$$C_{\text{utile fournie par le moteur}} \approx C_{\text{balance}} = M \cdot g (L_C - L_S)$$

La masse sur le dispositif d'étude fait environ 100 grammes, soit un poids d'environ 1 N.

Couple résiduel demandé par la génératrice à vide :

Le déséquilibre étant provoqué par la circulation d'un courant dans le rotor, on peut s'attendre à ce que la balance reste en équilibre lorsque la génératrice en circuit ouvert. Ce n'est pas le cas en pratique car la machine présente des frottements assez importants (frottements secs sur les axes et paliers, pertes de ventilation liées aux brassages des couches d'air dans l'entrefer, ...) → Le moteur doit fournir en permanence un couple pour vaincre ces phénomènes dissipatifs qui déséquilibrent la balance même lorsque la machine est à vide. L'expérience montre que ce couple résiduel est loin d'être négligeable sur la maquette d'étude → Il faudra en tenir compte dans le calcul du rendement du moteur.

Formule de bases pour le MCC :

$$\text{F.é.m. aux bornes de l'induit : } E = k\Phi\omega \quad (1)$$

$$\text{Tension aux bornes de l'induit du moteur : } U_{\text{rotor}} = RI + E = RI + k\Phi\omega \quad (2)$$

Comme R faible on fait souvent l'hypothèse que $U = k\Phi I$

$$\text{Couple mécanique généré sur l'axe du rotor du moteur : } \Gamma_{\text{méca}} = k\Phi I \quad (3)$$

$$\text{Couple utile récupéré : } \Gamma_U = \Gamma_{\text{méca}} - \Gamma_C - K_V\omega \quad (4)$$

La relation (1) montre que **la f.é.m. aux bornes de l'induit est proportionnelle à la vitesse de rotation**. k est un paramètre constitutif du moteur, donc une constante pour une machine donnée. Φ est le flux magnétique utile sous un pôle du rotor. Il dépend du champ magnétique créé par l'inducteur, donc de sa tension d'alimentation. Φ peut aussi dépendre du courant circulant dans l'induit. On supposera cet effet négligeable donc la machine sera considérée à flux Φ constant si $U_{\text{inducteur}}$ est fixé.

La relation (3) montre que **le couple mécanique développé sur l'axe du moteur est proportionnel au courant I circulant dans l'induit**. Le principe de la conversion électromécanique d'énergie fait que la constante reliant $\Gamma_{\text{méca}}$ à I est la même que celle reliant E à ω .

Le couple utile Γ_U réellement récupéré n'est pas le couple mécanique $k\Phi I$ car un moteur tournant à vide ne devrait consommer aucun courant. Ce n'est pas le cas en pratique car les pertes dans le moteur (frottements secs, frottements fluides, pertes magnétiques par hystérésis et courants de Foucault, ...) l'obligent à fournir en permanence un couple pour maintenir le rotor en rotation, donc à demander du courant, même à vide. La modélisation de ces pertes d'origines multiples et complexes est délicate. Une approximation classique consiste à supposer qu'elles engendrent une demande de couple constante avec la vitesse (d'où la dénomination de pertes constantes rencontrée dans les ouvrages). Les expériences sur la maquette d'étude montrent cependant une légère tendance à l'augmentation avec la vitesse. On a donc développé le couple de pertes en deux termes :

- un couple Γ_C indépendant de ω (donc provoquant une dissipation de puissance $P_C = \Gamma_C\omega$ proportionnelle à la vitesse) qui inclut les frottements secs (la légère résistance qu'on peut ressentir quand on essaye de faire tourner un rotor à la main) et toutes les pertes équivalentes à un couple constant comme les pertes par hystérésis.

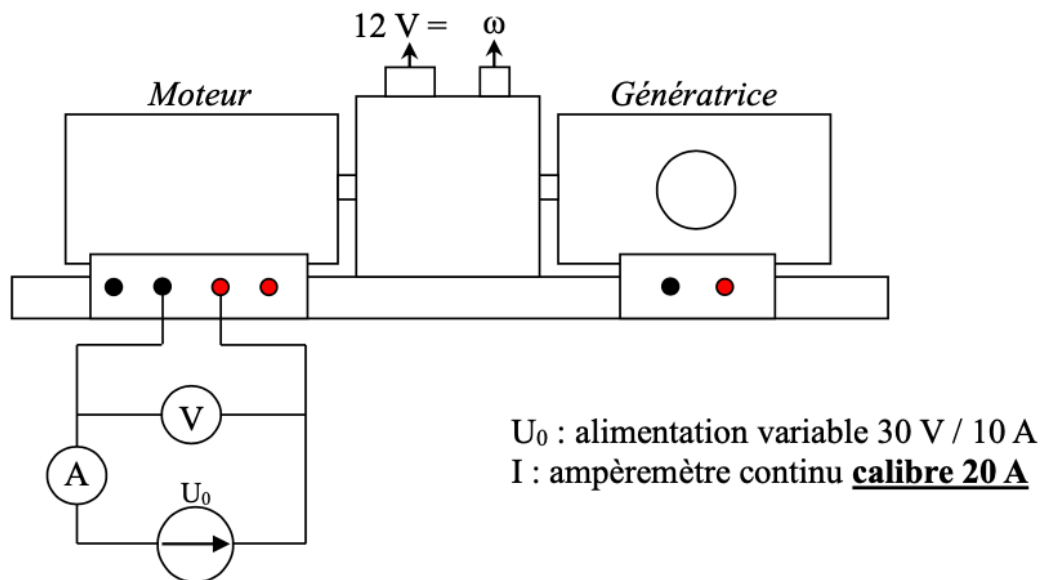
- un couple $\Gamma V = KV\omega$ proportionnel à la vitesse (donc provoquant une dissipation de puissance $PV = \Gamma V\omega$ proportionnelle au carré de la vitesse) qui inclut les frottements visqueux et toutes les pertes ayant ce type de propriété (courants de Foucault par exemple).

2) Etude à vide

Le terme « à vide » signifie que le moteur n'a pas à fournir de couple utile (il doit juste vaincre ses propres phénomènes dissipatifs). L'affirmation est à nuancer avec le banc d'étude car le moteur doit fournir du couple pour entraîner le rotor de la génératrice. L'essai avec la génératrice en circuit ouvert n'est donc pas réellement un essai à vide (l'idéal serait de pouvoir découpler les deux machines mais c'est impossible) → les pertes totales obtenues à partir des mesures sont dues aux phénomènes dissipatifs présents dans le moteur, la génératrice et dans l'arbre de transmission.

Montage :

L'alimentation de l'inducteur n'est pas représentée pour plus de clarté mais elle doit évidemment être conservée avec les mêmes caractéristiques que précédemment. **Cette alimentation ne doit pas être arrêtée avant celle de l'induit (risque d'emballement du moteur).** En cas de besoin, les sources doivent être arrêtées progressivement !



L'inducteur ayant une résistance inférieure à 1Ω , les demandes en courant peuvent être importantes (surtout lors de l'étude en charge) → il faut mesurer la tension directement aux bornes de l'induit (montage courte dérivation) pour ne pas prendre en compte les chutes de potentiel aux bornes de l'ampèremètre et des fils de liaison.

Mesures :

On laisse tourner le moteur sous tension nominale ($U = 12 \text{ V} =$) pendant ≈ 10 minutes pour le mettre en température avec la génératrice en circuit ouvert. On mesure ensuite, pour différentes valeurs de U_0 :

- la vitesse de rotation ω_0 du moteur
- le courant I_0 absorbé par l'induit
- le couple Γ demandé au moteur en rééquilibrant la balance

La machine étant chaude, on peut mesurer dans la foulée la résistance de l'induit (sa valeur est nécessaire pour la suite). On propose deux méthodes simples mais imparfaites.

Mesure à l'ohmmètre :

Il faut faire une mesure en 4 fils car la résistance est faible, et effectuer plusieurs mesures en modifiant la position du rotor¹⁵ pour moyenner les résultats. On a obtenu :

$$R_{\text{induit}} = 0,62 \pm 0,03 \, \Omega$$

Mesure par $U = RI$:

Le moteur ne démarre qu'à partir d'une certaine tension $U_0 \rightarrow$ on a $U = RI$ d'après (2) tant qu'on reste en dessous de ce seuil puisque $k\Phi\omega = 0$. On peut alors obtenir R en faisant le rapport U/I pour plusieurs valeurs de U inférieures à U_0 . L'expérience a été réalisée pour deux positions différentes du rotor. On a obtenu les résultats suivants :

$$R_{\text{induit}} = 0,68 \pm 0,03 \, \Omega$$

$$R_{\text{induit}} = 0,62 \pm 0,03 \, \Omega$$

Ces deux résultats recoupent la valeur précédente. Le premier diffère légèrement des deux autres mais on était probablement sur une position de plus forte résistance au niveau du rotor. On a donc préféré retenir le résultat de $0,62 \, \Omega$. Il faut noter que cette méthode permet de détecter la présence éventuelle d'une chute de tension aux bornes des contacts glissants du rotor (on aurait alors $U = RI + \Delta U_{\text{contact}}$), soit une affine). On a tracé les courbes $U = f(I)$ et constaté qu'elles étaient quasiment linéaires. On peut donc supposer que la chute aux bornes des balais est négligeable.

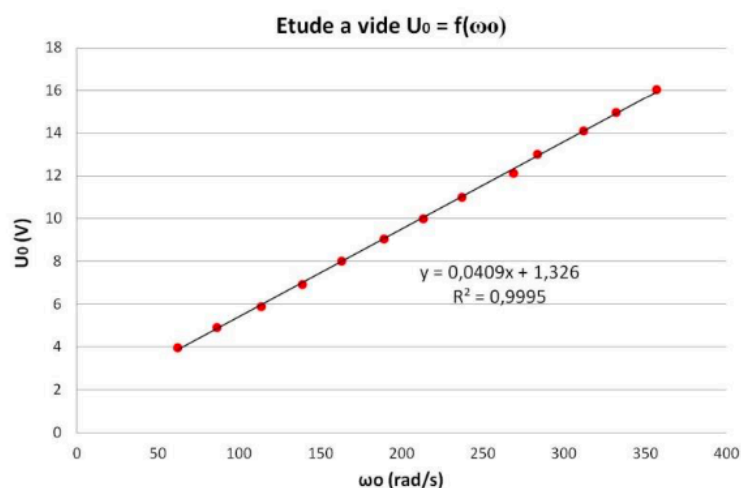
Courbe $U_0 = f(\omega_0)$:

Ne passe pas par l'origine \rightarrow
frottements secs (faut dépasser un certain seuil pour que ça se mette à tourner)

1,3V pour que ça démarre. On applique une tension inférieure au seuil comme ça ça ne tourne pas et on peut mesurer le rapport U/I . Comme ça on

OU : mesurer R_{ind} en ohmmètre en 4 fils

On l'obtient à partir des mesures sur l'essai « à vide » :



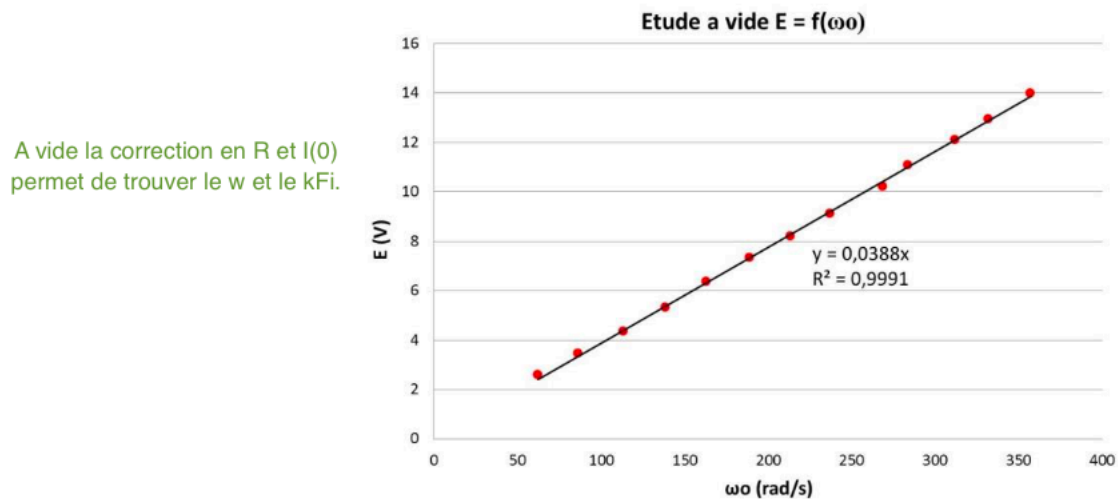
On constate que la vitesse à vide augmente régulièrement avec la tension appliquée. Ce résultat important montre la facilité avec laquelle on peut contrôler la vitesse d'un moteur à courant continu (c'est moins simple avec des moteurs synchrones ou asynchrones). On peut changer son sens de rotation en appliquant une tension négative et le moteur en charge tourne pratiquement à la même vitesse qu'à vide si R est faible puisqu'on a alors $U \approx k\Phi\omega$, donc ω indépendant de I , donc du couple demandé. Le moteur à courant continu est donc

idéal pour la traction électrique (pas d'embrayage, pas de boîte de vitesses). Ces qualités expliquent l'intérêt porté au MCC pendant de nombreuses années. Par contre, il lui faut une alimentation continue variable et son système de collecteur le rend plus fragile et plus cher à fabriquer que les autres moteurs.

On peut noter que la courbe ne passe pas par l'origine et que la pente de la régression linéaire est différente de celle obtenue au § II.3.4 pour la f.é.m. Ce dernier point peut sembler étonnant puisque la relation (2) indique qu'on a $U_0 = R I_0 + E = R I_0 + k\Phi\omega_0$. On pourrait donc s'attendre à retrouver la constante $k\Phi$ comme pente de la droite $U_0 = f(\omega_0)$. Mais c'est oublier que le courant I_0 dépend du couple demandé au moteur, donc des frottements et de sa vitesse de rotation.

Courbe $E = f(\omega_0)$:

La connaissance de la résistance d'induit permet de tracer la courbe $E = U_0 - R I_0 = f(\omega_0)$ avec les mesures précédentes :



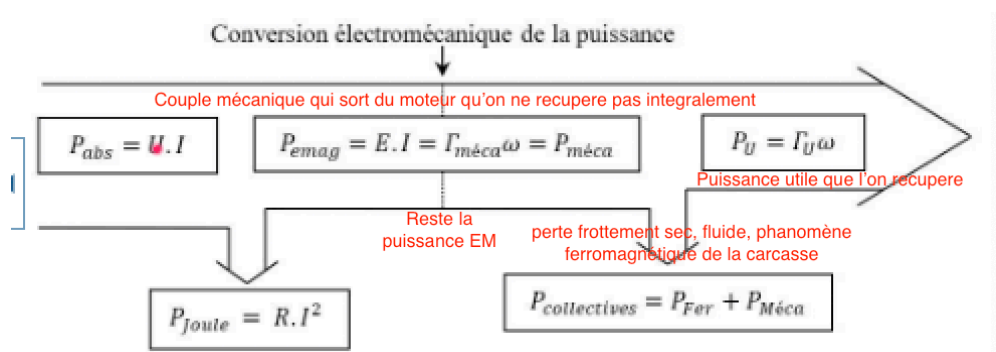
On obtient une droite passant par l'origine, avec un coefficient de pente proche du résultat du § II.3.4 (écart relatif d'environ 4 %) :

$$k\Phi = 0,0388 \text{ V}/(\text{rad.s}^{-1})$$

Le fait qu'on retrouve une droite malgré le courant demandé par le rotor montre que la réaction d'induit est négligeable sur cet essai.

Analyse des pertes :

Le bilan en puissance des différentes pertes dans un moteur peut se résumer par le schéma suivant :



Le principe de la conversion électromécanique fait que la puissance mécanique développée par le moteur correspond à la puissance électromagnétique EI , donc à la puissance électrique absorbée diminuée de l'effet Joule. Dans notre dispositif d'étude, cette puissance permet le maintien en rotation de l'ensemble moteur/génératrice en compensant les pertes d'origine mécanique et électromagnétique présentes dans les deux machines → ces pertes collectives peuvent s'estimer en terme de couple par la relation :

$$\Gamma_{\text{pertes globales à vide}} = \frac{U_0 I_0 - R I_0^2}{\omega_0}$$

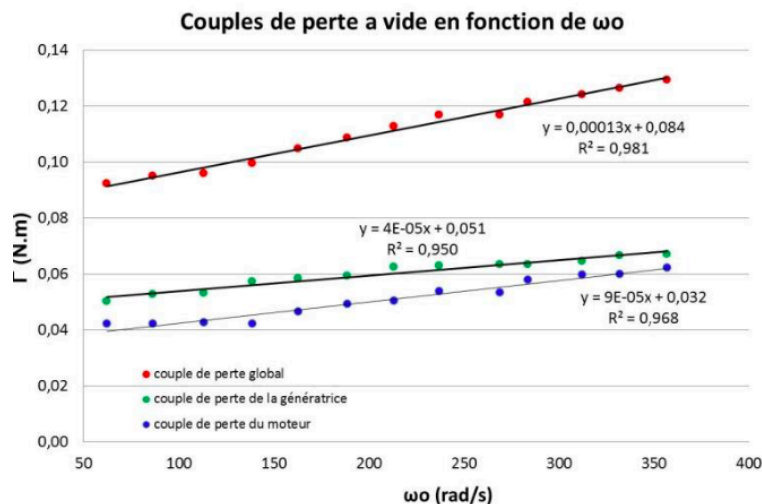
Les mesures de couple obtenues en rééquilibrant la dynamo balance sont quant à elles caractéristiques des pertes dans la génératrice car celle-ci ne reçoit que le couple utile du moteur :

$$\Gamma_{\text{dynamobalance à vide}} = \Gamma_{\text{pertes génératrice à vide}}$$

On peut alors estimer le couple de pertes du moteur en faisant la différence entre les deux termes :

$$\Gamma_{\text{pertes moteur}} = \Gamma_{\text{pertes globales}} - \Gamma_{\text{pertes génératrice}}$$

On s'est donc servi des mesures sur l'essai à vide pour représenter l'évolution des différents couples en fonction de la pulsation ω_0 :



Couple de perte de la generatrice :
masselotte.

On sinon on divise par deux le
couple de perte global en
supposant que le système est bien
symétrique (deux mêmes moteurs)

On note une légère tendance à l'augmentation qui justifie l'hypothèse faite au § II.3.3 sur les couples de pertes, avec un terme constant et l'autre proportionnel à ω . Ce modèle n'est pas parfait mais il permet une meilleure description des phénomènes observés. Les pertes sont du même ordre de grandeur dans les deux machines.

On peut regarder la conséquence d'une telle évolution sur la relation entre la tension à vide et la vitesse de rotation. On a vu que la prise en compte de la chute ohmique RI permettait de retrouver la relation $E = k\Phi\omega$, mais on peut s'interroger sur l'origine physique du seuil

présent sur la courbe $U_0 = f(\omega_0)$ ainsi que sur la différence de pente. Pour y répondre, il faut se rappeler que I est lié au couple mécanique (équation 3). Les phénomènes dissipatifs présents dans le moteur ont donc une influence sur son comportement électrique puisqu'ils le forcent à demander du courant pour fournir le couple nécessaire à la compensation de ses pertes :

$$(3) \text{ et } (4) \rightarrow \Gamma_{\text{méca}} = k\Phi I_0 = \Gamma_U + \Gamma_C + K_V \omega_0$$

On aurait $\Gamma_U = 0$ si le moteur était réellement à vide mais il doit entraîner la génératrice sur le banc d'étude. On a donc $\Gamma_U = \Gamma_{\text{pertes}}$ dans la génératrice. Le graphique précédent montrant qu'on peut développer ce couple d'une manière similaire à celui du moteur ($\Gamma_{\text{génératrice}} = \Gamma_{C\text{gén}} + K_V\text{gén}\omega$), on peut regrouper les termes de même nature dans l'équation précédente. L'équation finale reste formellement la même, mais avec des coefficients Γ_C et K_V représentatifs de l'ensemble moteur/axe de transmission/génératrice :

$$k\Phi I_0 = \Gamma_C + K_V \omega_0 \rightarrow I_0 = \frac{\Gamma_C + K_V \omega_0}{k\Phi}$$

$$\text{Dans (2)} \rightarrow U_0 = R \frac{\Gamma_C + K_V \omega_0}{k\Phi} + k\Phi \omega_0 = R \frac{\Gamma_C}{k\Phi} + k\Phi \left(1 + \frac{RK_V}{(k\Phi)^2}\right) \omega_0$$

$$\text{Soit } \boxed{U_0 = U_{\text{seuil}} + k\Phi(1+f)\omega_0} \quad \text{avec} \quad \boxed{U_{\text{seuil}} = R \frac{\Gamma_C}{k\Phi}} \quad \text{et} \quad \boxed{f = \frac{RK_V}{(k\Phi)^2}}$$

→ On voit que les pertes à couple constant (type frottements secs) justifient l'existence d'une tension de seuil U_{seuil} au démarrage, et que les pertes à couple proportionnel à la vitesse peuvent expliquer la différence de pente par rapport à $E(\omega_0)$ via le paramètre sans dimension f . On a ici :

$$U_{\text{seuil}} = 1,33 \text{ V} \quad \text{Et} \quad k\Phi(1+f) = 0,041 \text{ V}/(\text{rad.s}^{-1}) \rightarrow \boxed{f = 0,041/k\Phi - 1}$$

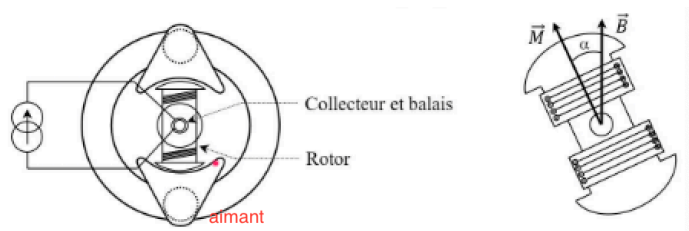
On a $k\Phi = 0,038 \text{ V}/(\text{rad.s}^{-1})$ et $R = 0,62 \Omega$ dans notre exemple. On peut en déduire Γ_C , f et K_V :

$$\boxed{\Gamma_C = U_{\text{seuil}} k\Phi / R = 0,081 \text{ N.m}} \quad \boxed{f = 0,075} \quad \boxed{K_V = f \times (k\Phi)^2 / R = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ N.m}/(\text{rad.s}^{-1})}$$

Ces résultats peuvent être comparés aux coefficients obtenus sur la régression linéaire du couple de perte global :

$$\boxed{\Gamma_C = 0,084 \text{ N.m}} \quad \boxed{K_V = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ N.m}/(\text{rad.s}^{-1})}$$

Les valeurs sont assez proches pour le couple de perte constant. La différence est un peu plus marquée pour K_V mais il faut noter que le calcul de K_V est très sensible à la valeur de $k\Phi$ (on peut faire l'application numérique avec les deux valeurs de $k\Phi$ pour s'en convaincre).



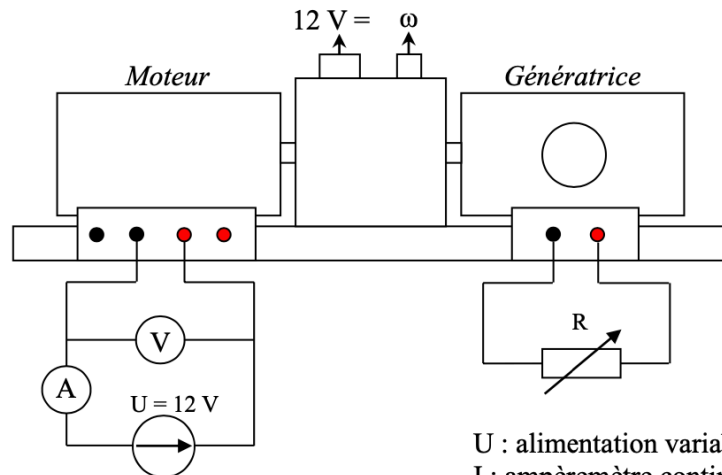
2) Etude en charge $U = \text{cte}$

On branche une résistance de charge aux bornes de la génératrice. Le courant qui circule va demander un surplus de couple mécanique au moteur.

On demande à la génératrice de débiter de la puissance électrique qui va demander un couple au moteur, donc charge le moteur.

Montage :

L'alimentation de l'inducteur doit être conservée avec les mêmes caractéristiques que précédemment. **Elle ne doit pas être arrêtée avant celle de l'induit. Les sources doivent être arrêtées progressivement !** Le moteur doit être « chaud » avant de commencer les mesures.



U : alimentation variable 30 V / 10 A

I : ampèremètre continu **calibre 20 A**

R : rhéostats 300, 33, et 10Ω

On commence avec la génératrice en circuit ouvert. La tension d'alimentation de l'induit fixe la vitesse à vide. On choisit la tension nominale de la machine (12 V). Le moteur tourne alors à $\approx 2\,500$ tours/mn pour une tension d'inducteur de 20 V sans échauffement excessif. On attend que le courant se stabilise pour mesurer le couple à vide. On éloigne ensuite la masse de mesure en la plaçant sur une graduation entière, on connecte la résistance de charge et on ajuste sa valeur pour

Quand on fixe U on fixe une tension à vide.

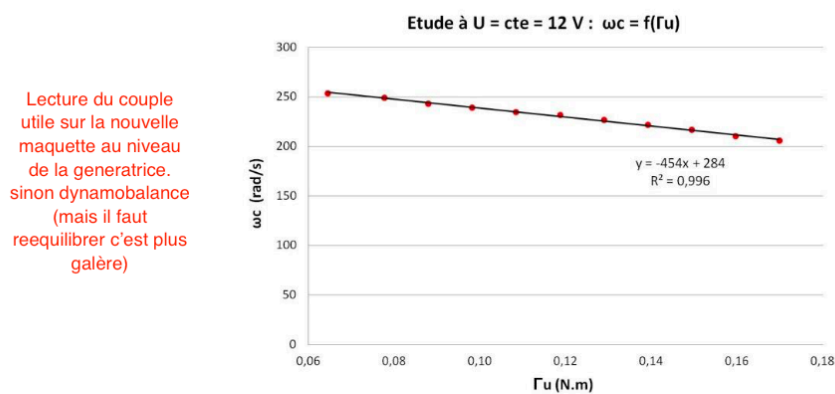
rétablir l'horizontalité de la balance¹⁷. On mesure alors :

- le courant I_C absorbé par l'induit pour la charge demandée
- la pulsation ω_C pour cette charge

On répète ce protocole en éloignant progressivement la masse, **sans dépasser un courant de 6 A** dans l'induit. La tension prise directement aux bornes de l'induit ayant légèrement tendance à chuter¹⁸, il faut réajuster le niveau d'alimentation pour qu'elle reste à 12 V.

Courbe $\omega_C = f(\Gamma_U)$:

Ce graphique permet de voir l'influence qu'à une demande de couple mécanique sur la vitesse de rotation du moteur.



La vitesse chute avec le couple mais l'affaissement est relativement limité puisqu'il ne dépasse pas 20 % de la vitesse initiale au maximum des capacités en courant du rotor → **le couple demandé à peu d'influence sur la vitesse de rotation**. On confirme ainsi l'intérêt que peuvent avoir les MCC dans le domaine de la traction (cf. § II.3.5). La diminution de vitesse est proportionnelle à l'augmentation du couple. Cette propriété peut se vérifier avec les équations du moteur :

Chute de la vitesse est proportionnelle au couple utile que donne le moteur. Peut se vérifier compte tenu des lois que l'on a.

$$(2) \quad U_C = RI_C + k\Phi\omega_C \quad \rightarrow \quad k\Phi U_C = Rk\Phi I_C + (k\Phi)^2\omega_C$$

Avec (3) : $k\Phi U_C = R\Gamma_{\text{méca}} + (k\Phi)^2\omega_C$

Le couple mécanique se répartit entre le couple utile et le couple de pertes. Ce dernier a une légère dépendance en vitesse qui peut être négligée ici puisque le moteur garde une vitesse relativement constante en charge (le couple de pertes global varie de moins de 4 % entre 200 et 250 rad/s d'après la courbe du § précédent et vaut 0,113 N.m en moyenne) :

$$\rightarrow k\Phi U_C = R(\Gamma_U + \Gamma_C) + (k\Phi)^2\omega_C$$

On a donc, avec cette hypothèse :

$$\omega_C = \frac{k\Phi U_C - R\Gamma_C}{(k\Phi)^2} - \frac{R}{(k\Phi)^2} \Gamma_U$$

constante

Ce résultat confirme la relation affine entre la vitesse de rotation et le couple demandé, et il montre

¹⁷ On pourrait fixer arbitrairement la résistance de charge et ajuster ensuite la masse pour rétablir l'horizontalité mais la lecture de la position de la masse est moins facile dans ce cas car elle peut se retrouver n'importe où entre deux graduations.

¹⁸ Ce phénomène est dû aux chutes de tension dans les fils de liaison et dans l'ampèremètre (il faut se rappeler que l'induit a une résistance très faible).

que la dépendance est d'autant moins marquée que la résistance d'induit est faible et que $k\Phi$ est fort. Ces deux caractéristiques sont donc des qualités pour un MCC. Les coefficients de la régression linéaire peuvent être comparés aux expressions qu'on vient d'obtenir :

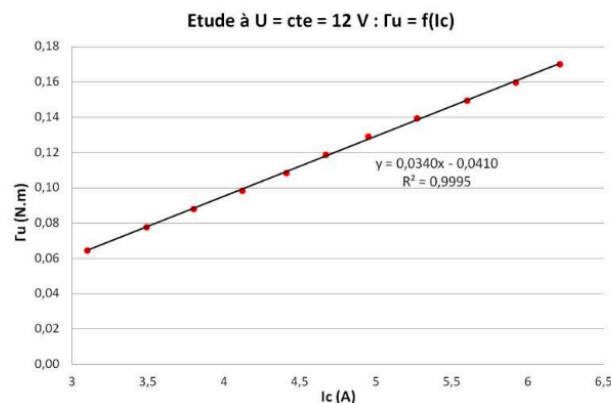
Comparer la pente avec le coefficient lié au couple utile.

$$\frac{R}{(k\Phi)^2} = \frac{0,62}{(0,038)^2} = 428 \text{ rad.s}^{-1}/(\text{N.m}) \quad \text{pour } 454 \text{ rad.s}^{-1}/(\text{N.m}) \text{ expérimentalement}$$

$$\frac{k\Phi U_c - R\Gamma_c}{(k\Phi)^2} = \frac{0,038 \times 12 - 0,62 \times 0,113}{(0,038)^2} = 267 \text{ rad.s}^{-1} \quad \text{pour } 284 \text{ rad/s expérimentalement}$$

Courbe $\Gamma_U = f(I_c)$:

Ce graphique permet de vérifier si le couple est proportionnel au courant demandé comme l'indique la relation (3) :



Qu'est ce qui va conditionner de la qualité du moteur : R très faible et être très inductif (Kf FORT)

Si c'est le cas, on a, avec l'hypothèse d'un couple de perte constant :

$$\Gamma_{\text{méca}} = k\Phi I = \Gamma_U + \Gamma_c \rightarrow \boxed{\Gamma_U = k\Phi I_c - \Gamma_c}$$

La pente de la courbe doit donc correspondre à $k\Phi$. On obtient le bon ordre de grandeur mais la valeur obtenue est inférieure à celle attendue. Les courants étant plus forts dans cette expérience, on pourrait invoquer la réaction d'induit pour expliquer cette différence car elle tend à diminuer le flux vu par le rotor, donc à abaisser la valeur de Φ . Mais on devrait alors avoir un fléchissement progressif de la courbe (cf. [1], p. 61) qu'on ne détecte pas vraiment sur le graphique. L'explication est donc à chercher ailleurs.

Le terme constant de la régression linéaire doit correspondre au couple de perte mais il faut considérer le couple du moteur seul puisque celui de la génératrice est inclus dans la mesure du couple utile (cf. § II.3.2). Le graphique du § II.3.5 montre qu'il vaut $\approx 0,05 \text{ N.m}$ dans la gamme de vitesse de cette étude, soit une valeur proche des $0,04 \text{ N.m}$ obtenus ici.

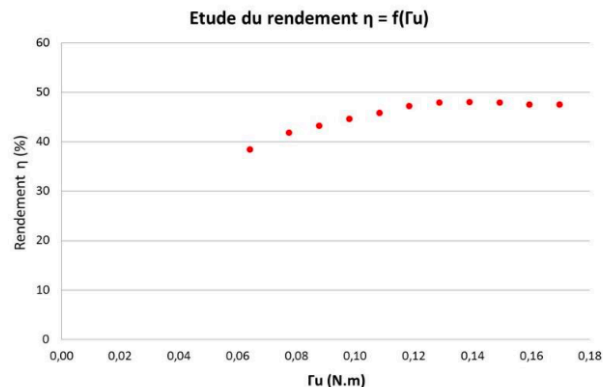
Mesure directe du rendement :

Il suffit de faire le rapport entre la puissance électrique absorbée par le moteur et la puissance mécanique qu'il délivre. Le moteur utilisant des bobines pour créer le champ magnétique inducteur, la puissance fournie au stator doit être prise en compte dans la puissance consommée. On a donc¹⁹ :

$$\eta = \frac{P_{utile}}{P_{abs}} = \frac{\Gamma_U \cdot \omega_C}{P_{induit} + P_{inducteur}} = \frac{\Gamma_U \cdot \omega_C}{U_C I_C + U_{Stator} I_{Stator}} \quad (5)$$

Dans la nouvelle
maquette pas de
Pinducteur car ce sont
des aimants permanents

Voici à titre indicatif la courbe obtenue avec les mesures précédentes :



Moteur électrique peuvent
avoir de bon rendement →
intérêt des moteurs
électriques (moteur
thermique rendement plus
faible)

Le rendement est compris entre 40 et 50 % sur l'étendue de mesure. Il augmente quand on demande plus de couple au moteur et semble tendre vers une limite quand on s'approche du courant maximal admissible dans le rotor. Les phénomènes dissipatifs relativement importants dans le dispositif d'étude empêchent d'avoir des points au début du graphique car le couple utile demandé vaut déjà $\approx 0,06$ N.m lorsque la génératrice est à vide. On peut noter que le rendement tendrait vers 0 lorsque $\Gamma_U \rightarrow 0$ puisqu'on fournit alors de l'énergie pour vaincre des pertes sans récupérer de couple utile.

Mesure indirecte :

Si on fait machine asynchrone pas besoin de faire une mesure
comme ça, A lire quand même Mais sinon on peut faire !

Le schéma du § II.3.5 résume les transferts de puissance dans le moteur. La puissance $U_C I_C$ fournie en charge à l'inducteur se sépare en trois formes :

- des pertes par effet Joule dans l'inducteur $\rightarrow P_J = R \cdot I_C^2$ le courant en charge et on connaît la résistance
- des pertes collectives P_C dans le moteur incluant les pertes mécaniques et les pertes fer.
- la puissance utile P_U délivrée par le moteur Mesuré par la dynamobalance

D'où le bilan : $U_C \cdot I_C = P_U + R \cdot I_C^2 + P_C$

Et l'expression du rendement : $\eta = \frac{P_U}{U_C I_C + U_S I_S} = \frac{U_C \cdot I_C - R \cdot I_C^2 - P_C}{U_C I_C + U_S I_S}$

Le terme qui pose problème dans ce calcul est celui des pertes collectives. La méthode des pertes séparées consiste à les estimer en réalisant un essai à vide. Dans ce cas, il n'y a pas de puissance utile demandé au moteur et le bilan de puissance permet d'exprimer P_C^{20} : $P_C = U_V \cdot I_V - R \cdot I_V^2$

Le rendement pour l'expérience en charge peut alors se réécrire sous la forme :

$$\eta = \frac{U_C \cdot I_C - U_V I_V - R(I_C^2 - I_V^2)}{U_C I_C + U_S I_S}$$

Pour utiliser cette formule, il faut **faire l'essai à vide avec la même vitesse qu'en charge** car on a vu que les pertes collectives du moteur dépendent de la vitesse. Le banc d'essai utilisé oblige aussi à

apporter une correction car le moteur entraîne la génératrice et lui fournit déjà de la puissance pour compenser ses pertes lors de l'essai à génératrice en circuit ouvert → le bilan de puissance du moteur sur cet essai « à vide » doit s'écrire :

$$U_0 I_0 = P_{U0} + R \cdot I_0^2 + P_C = \Gamma_{U0} \cdot \omega + R \cdot I_0^2 + P_C$$

On en déduit l'expression de P_C qu'on réinjecte dans celle du rendement. On obtient alors :

$$\eta = \frac{U_C \cdot I_C - (U_0 I_0 - \Gamma_{U0} \cdot \omega) - R(I_C^2 - I_0^2)}{U_C I_C + U_S I_S} \quad (6)$$

On peut comparer les deux méthodes en appliquant le protocole suivant :

- on mesure U_{Stator} et I_{Stator} .
- on alimente l'induit sous une tension U_C . On place la masse sur une graduation entière du bras de mesure pour fixer une valeur de couple. On charge la génératrice avec un rhéostat jusqu'à ce que la balance retrouve son équilibre. Le moteur fournit alors le couple utile souhaité. On mesure U_C , I_C , et ω_C .
- on calcule Γ_U avec l'éloignement de la masse par rapport à l'équilibre statique de la balance. On en déduit la mesure directe du rendement avec la relation (5).
- on passe à l'essai « à vide » en enlevant le rhéostat de charge et on modifie U pour retrouver la même vitesse qu'auparavant. On ajuste alors la position de la masse pour retrouver l'équilibre de la balance. On mesure U_0 , I_0 , et on calcule le couple utile à vide Γ_{U0} . On en déduit le rendement par la relation (6).

Exemple de résultats ($U_S = 20 \text{ V}$; $I_S = 0,57 \text{ A}$) :

Essai en charge

U_C (V)	I_C (A)	N_C (Hz)	ω_C (rad/s)	Γ_U (N.m)
12	4,82	2220	232	0,133

On obtient un rendement de 45 % avec (5).

Essai « à vide »

U_0 (V)	I_0 (A)	N_0 (Hz)	ω_0 (rad/s)	Γ_{U0} (N.m)
10,73	2,94	2216	232	0,0696

On obtient un rendement de 48 % avec (6).

II- Moteur à courant alternatif

Le champ magnétique créé par le stator est tournant dans ce type de moteur. Ce champ à un rôle vis-à-vis du rotor qui dépend du mode de fonctionnement (asynchrone ou synchrone).

Ces machines peuvent fonctionner en monophasé aux

21

faibles puissances, ou en triphasé pour les plus fortes puissances. On se limitera à une étude simple du principe et des propriétés des deux modes de fonctionnement avec le moteur de démonstration Leybold.

→ Met en avant des moteurs à champ tournant mais attention au temps

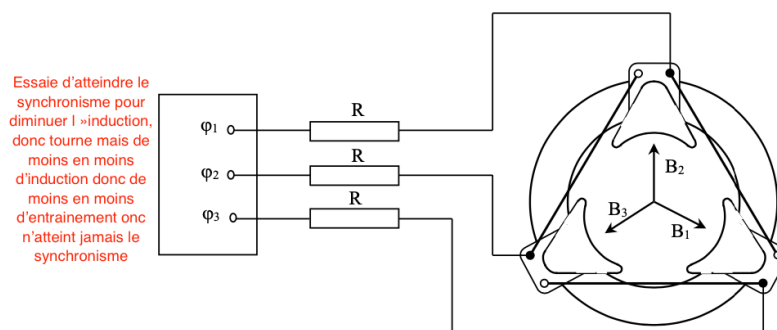
Moteur synchrone : On déconseille, long à montrer et pas très quantitatif

Moteur asynchrone :

Aux faibles puissances ($< 1 \text{ kW}$), le rotor est constitué de barres conductrices mises en court-circuit et noyées dans des tôles ferromagnétiques pour réduire l'entrefer au minimum et augmenter l'induction. Aux puissances plus élevées, il est constitué d'un bobinage refermé sur une résistance de démarrage extérieure. Le rotor subit dans les deux cas des phénomènes d'inductions du au champ tournant du stator → Il est parcouru par des courants induits souvent intenses qui le poussent à accompagner la rotation du champ magnétique pour s'opposer à la cause qui a créé ces courants. Le rotor tourne donc toujours à une vitesse inférieure à celle du champ car les phénomènes d'induction qui le mette en mouvement diminuent au fur et à mesure qu'on s'approche du synchronisme. On propose ici de réaliser un moteur fonctionnant en triphasé.

III.1.1 Constitution du stator

[4], p 287



$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$: alimentation triphasée Genetri Pierron $3 \times 12 \text{ V} / 2 \text{ A}$

R : rhéostats $11,5 \Omega / 8,5 \text{ A}$ ajustés à $\approx 3 \Omega$ chacun.

Le générateur proposé est légèrement sous dimensionné car l'impédance des bobines du stator fait qu'elles demandent pratiquement 2 A sous 12 V . On a donc rajouté des résistances de quelques ohms en série sur chaque bobine pour éviter de surcharger

l'alimentation. Cela influe sur l'intensité du champ statorique qui est plus faible que prévu → Le moteur ne fonctionnera pas dans des conditions optimales.

Le courant circulant dans chaque bobine crée un champ magnétique alternatif renforcé par les pièces ferromagnétiques du rotor. L'orientation des bobines fait que les trois champs sont orientés à 120 ° l'un de l'autre. Ils sont aussi déphasés temporellement d'un même angle puisqu'on utilise une source triphasée. On peut alors montrer (cf. [4], p 101) que la résultante donne un champ magnétique tournant à la fréquence de la source (50 Hz ici).

Manipulation

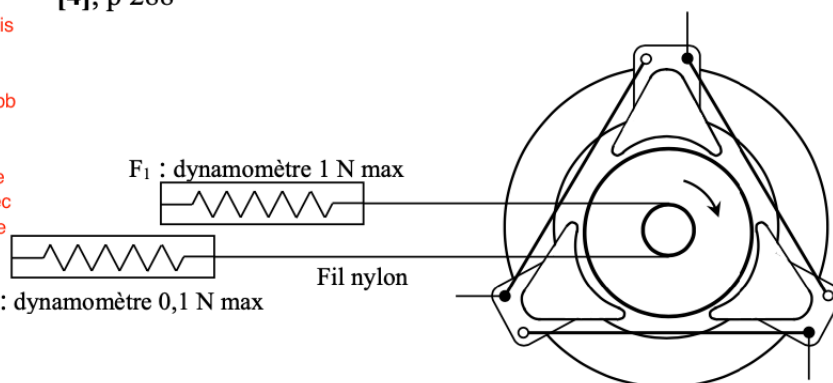
La puissance limitée de l'alimentation et l'âge du dispositif limite les expériences possibles. Plusieurs rotors sont disponibles avec cette maquette mais seul celui en cage d'écureuil arrive à démarrer facilement. La mise en œuvre est alors très simple puisqu'il suffit de placer le rotor sur l'axe du moteur pour qu'il se mette à tourner. On en déduit tout de suite l'intérêt d'une telle machine. Elle est relativement simple à fabriquer, moins chère et moins fragile qu'un MCC puisqu'elle n'a pas besoin de balais et collecteurs. Par contre, le réglage en vitesse est moins simple qu'avec un MCC puisqu'il faut modifier la fréquence de la source, alors que le paramètre d'ajustement pour les moteurs à courant continu est la tension.

Mesure du couple :

[4], p 288

Avantage: pas de balais à charbon, système robuste et bcp plus solide que MCC mais pb = monovitesse

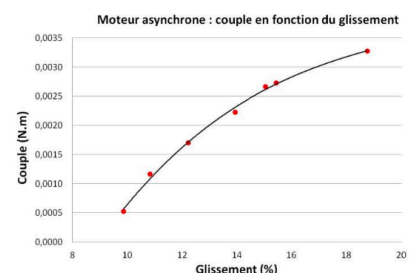
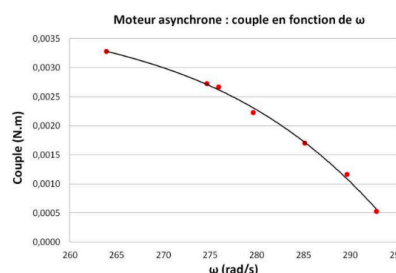
Faudrait imaginer une alim en puissance avec variation de fréquence qui fait que l'on va pouvoir moduler la vitesse



On lance le moteur à vide et on attend qu'il atteigne sa vitesse de croisière. Le couple de force Γ agissant sur le rotor peut alors se mesurer à l'aide de deux dynamomètres reliés par un fil en nylon enroulé sur la poulie du rotor (rayon $R = 12,5 \text{ mm}$). On fixe les deux dynamomètres sur des pieds et on commence à les éloigner du moteur pour tendre le fil à minima. On recule alors le dynamomètre F_1 pour appliquer une force résistante donnée et on réajuste éventuellement la position du dynamomètre F_2 pour maintenir la partie inférieure du fil en tension. On a alors :

$$\Gamma = (F_1 - F_2)R$$

On calcule Γ pour différentes valeurs de force F_1 appliquée. On mesure à chaque fois la vitesse de rotation et on trace la courbe $\Gamma = f(\omega)$. Voici à titre indicatif le résultat d'une série de mesure :



On constate que le moteur tourne à une vitesse proche du synchronisme lorsque la demande de couple est faible, et que la vitesse diminue lorsqu'on demande plus de couple, jusqu'à décrocher lorsqu'on freine trop le moteur (cette partie où le moteur décroche n'est pas représentée sur les graphiques car elle ne correspond pas à un régime de fonctionnement stable). Ces résultats sont à comparer à la théorie développée en [4], p 287 et au § II de l'annexe 2 (attention, l'axe du glissement γ est inversé). On pourrait calculer la puissance mécanique $P = \Gamma \times \omega$ développée par le moteur et calculer le rendement en mesurant la puissance électrique²³ mais la puissance utile ne dépasse pas 1 W pour une consommation de l'ordre de 25 W. Le rendement de cette machine de démonstration est donc très faible et limite l'intérêt d'une telle mesure.