

MOTEURS

I INTRODUCTION

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.

II MCC A EXCITATION SEPARÉE

[1] ; [2] ; [4], p. 277 ; [6], p. 5 à 7

II.1 Introduction

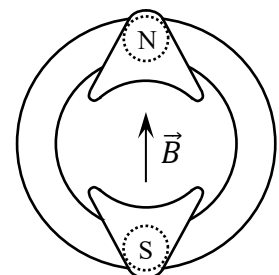
Le stator (inducteur) crée un champ magnétique statique subi par le rotor (induit). Ce champ peut être créé par des aimants permanents ou par des bobines. Le rotor est composé d'au moins un enroulement (souvent beaucoup plus) parcouru par un courant continu. Placé dans le champ du stator, il subit un 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.

II.2 Principe de fonctionnement

II.2.1 Réalisation du stator

On utilise un moteur de démonstration Leybold. Le champ inducteur statique \vec{B} est créé à l'aide d'aimants permanents :

On peut observer les lignes de champ dans l'entrefer¹ avec des plaques d'aiguilles ferromagnétiques et repérer le sens du champ à l'aide d'une boussole. Il est important pour la suite de vérifier **avec le disque prévu à cet effet que les pièces polaires sont parfaitement centrées.**

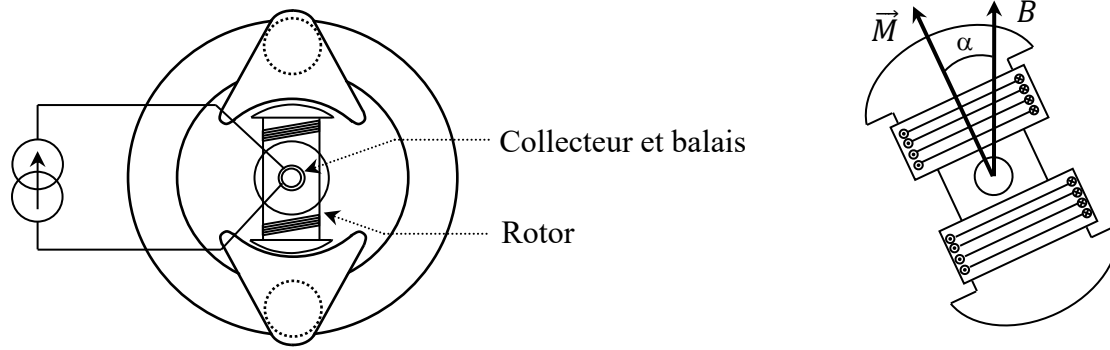


II.2.2 Utilisation avec un rotor bipolaire

L'axe et le collecteur du rotor doivent être **propres et lubrifiés** pour minimiser les frottements. On utilise une alimentation pouvant travailler en générateur de courant et on alimente les bobines du rotor avec un courant $I = 1,5 \text{ A}$

¹ Tout en sachant qu'elles seront modifiées par la présence du rotor.

maximum via le collecteur continu constitué des deux bagues pleines :



Si on tourne le rotor à la main, on constate l'existence d'une position d'équilibre stable et une position d'équilibre instable. Pour le comprendre, il suffit d'imaginer le rotor dans une position α quelconque par rapport au champ \vec{B} créé par le stator. Le flux magnétique de \vec{B} traversant le bobinage du rotor vaut $\Phi = N\vec{S} \cdot \vec{B} = NSB\cos\alpha$. La circulation du courant dans le bobinage crée quant à lui un moment magnétique $\vec{M} = N\vec{S}I$ orienté suivant l'axe principal du rotor (son sens dépend de celui du courant) → Ce moment mis en présence de \vec{B} crée un couple $|\vec{\tau}| = |\vec{M} \wedge \vec{B}| = NSIB\sin\alpha$ sur le rotor qui tend à orienter son axe principal dans le sens de \vec{B} pour avoir un flux coupé maximum² $\Phi_0 = NSB$.

II.2.3 Mise en rotation du rotor

Une rotation permanente est impossible avec le mode d'alimentation précédent puisque le rotor n'a aucune raison de continuer sa course lorsqu'il atteint la position d'équilibre stable³. Par contre, le mouvement peut se poursuivre si on inverse le sens du courant à cet instant car cela permute le rôle des deux pôles (la position stable devient instable et vice versa) et oblige le rotor à continuer sur sa lancée pour se diriger vers le pôle opposé devenu maintenant attracteur (il faut modifier une nouvelle fois le sens du courant lorsqu'il y parvient). Le moteur peut donc tourner en permanence si on inverse périodiquement le sens du courant. Pour ce faire, on alimente les bobines du rotor avec le collecteur à deux demi-bagues en orientant les balais d'arrivée du courant de façon à ce que les commutations se fassent aux moments adéquats, c'est-à-dire aux instants où le rotor atteint une position d'équilibre stable. Dans ce cas, les inversions périodiques de I condamnent le rotor à la rotation permanente en recherche d'un d'équilibre stable impossible à trouver.

Manipulation :

On reprend la manipulation précédente avec cette fois-ci le collecteur constitué des deux demi-bagues. On ajuste le courant dans le rotor à **0,5 A max**. Le démarrage peut être plus ou moins facile suivant la position initiale des balais. On commence par les orienter horizontalement (position la moins favorable), puis on passe progressivement en position verticale. Le rotor doit alors se mettre à tourner dans un sens⁴. On peut rechercher la position des balais qui maximise la vitesse de rotation **en ajustant la valeur du courant si le moteur tourne trop vite**. L'orientation optimale doit correspondre à la position verticale. Si on dépasse cette position, la vitesse commence à diminuer jusqu'à s'annuler lorsque les balais sont \approx horizontaux, puis elle s'inverse jusqu'à atteindre de nouveau une valeur maximum lorsque les balais sont à 180 ° de la position initiale. Si le moteur

² Il faut noter que la constitution du bobinage du rotor de ce moteur de démonstration est assez différente de celle d'un moteur réel. Cela oblige à une analyse différente de celle menée classiquement sur les MCC où on raisonne plutôt sur les forces de Laplace appliquées sur des conducteurs parallèles à l'axe de rotation. Se reporter par exemple aux références [1], [2], [3] p. 128 pour plus de précision.

³ Le couple devient en effet résistant quand cette position est dépassée.

⁴ On peut le lancer manuellement dans un sens puis dans l'autre en cours d'orientation afin de déterminer le sens de rotation naturel.

tourne très vite, on s'aperçoit que l'orientation optimale des balais ne correspond plus à la verticale. Elle se décale dans le sens de rotation du rotor. Cet effet est dû à la réaction d'induit qui déforme les lignes de champ (cf. [7], p. 353-378 pour plus de précision).

II.2.4 Utilisation avec un rotor multipolaire

L'introduction du collecteur en demi-bagues donne une valeur moyenne non nulle au couple mais il varie beaucoup avec l'angle de rotation (cf. annexe 1). On peut le maintenir au voisinage de sa valeur maximale en multipliant le nombre de pôles. Cela permet d'utiliser à chaque instant une paire de pôles produisant le couple le plus fort → On peut reprendre la manipulation précédente avec un rotor à 12 pôles en fixant le **courant à 0,2 A max.** Une fois les balais correctement orientés, le moteur doit tourner de manière plus régulière (moins d'à-coups) et moins bruyante (baisse des vibrations).

Influence d'une charge :

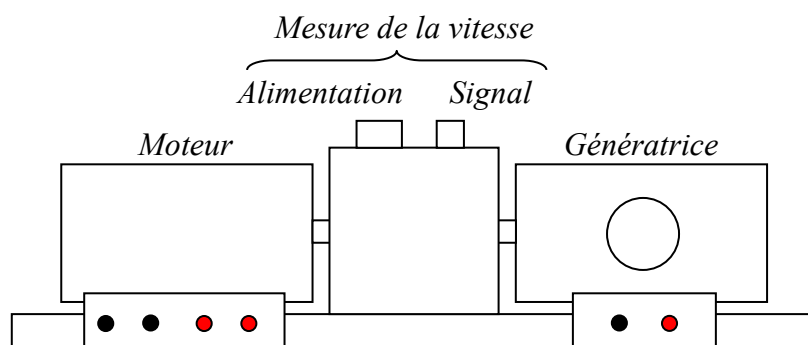
On alimente maintenant le rotor **en tension** (mode d'alimentation « naturel » des moteurs à courant continu) en inversant le rôle des potentiomètres sur le générateur (potentiomètre courant à fond, potentiomètre tension comme contrôle). On augmente progressivement la tension aux bornes de l'induit jusqu'à faire tourner le moteur avec une vitesse raisonnable. On note la valeur du courant en régime permanent, puis on freine manuellement le rotor. Le courant doit augmenter et devenir très important si on bloque complètement le rotor (**cette action doit être temporaire** sous peine d'endommager le moteur).

Explication :

La vitesse de rotation ω diminue lorsqu'on freine le moteur. Or, l'équation électrique du rotor est $U - \langle e \rangle = U - k\Phi_o\omega = RI$ (cf. annexe 1). Le courant doit donc augmenter si U est constant⁵ → cette manipulation met en évidence le couplage électromagnétique (influence du mécanique sur l'électrique). Elle montre aussi qu'il n'est pas souhaitable d'alimenter directement un moteur sous tension nominale lorsqu'il est à l'arrêt car cela provoque de très fortes intensités qui peuvent endommager le moteur. De même, il faut arrêter immédiatement un moteur qui se retrouve bloqué par une demande de couple résistant trop important.

II.3 Etudes quantitatives à l'aide d'un banc d'essais

Le banc est constitué d'un moteur relié par une transmission à une génératrice montée en dynamo balance. Un dispositif de mesure de la vitesse est situé entre les deux machines. Pour des raisons de sécurité, il est conseillé de ne pas dépasser une vitesse de rotation de 4 000 tours/minutes.



Le moteur utilisé est un moteur d'essuie-glace pour poids lourds SEV Marchal. Le champ magnétique de l'inducteur que subit le rotor n'est pas obtenu avec des aimants permanents mais via des bobines⁶.

⁵ C'est pourquoi il est impératif de travailler avec une source de tension lors de cette manipulation.

⁶ Les aimants permanents peuvent convenir dans les petits MCC mais ils ne sont pas adaptés aux machines de plus forte

On a donc besoin de deux alimentations, une pour le stator (l'inducteur), l'autre pour le rotor (l'induit).

Inducteur (stator) :

Résistance $\approx 30 \Omega$

$I_{\max} \approx 1 \text{ A}$ (pendant un temps bref) \rightarrow Tension maximale $\approx 30 \text{ V}$

Induit (rotor) :

Tension nominale : 12 V ; tension maximale : 24 V

Résistance $\approx 0,5 \Omega$

$I_{\max} \approx 6 \text{ A}$ (jusqu'à 10 A pendant un temps bref)

II.3.1 Dispositif de mesure de la vitesse

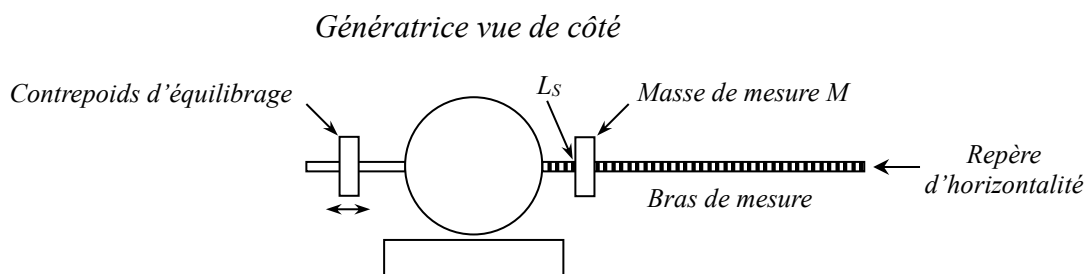
Le système s'alimente en 12 V continu (alimentation faible puissance) via une embase coaxiale UHF. Le pôle positif est au centre, la carcasse extérieure correspond à la masse. Le signal de sortie est récupéré sur une sortie coaxiale classique. Les masses sont communes entre l'entrée UHF et la sortie coaxiale. On peut donc relier le pôle - de l'alimentation à la masse de la sortie coaxiale pour plus de simplicité. Le dispositif envoie un faisceau lumineux sur un tambour solidaire de l'axe de transmission comportant 6 encoches noires. Lorsque les machines sont en rotation, la lumière réfléchiée par le tambour frappe une photodiode qui donne un signal ressemblant grossièrement à un signal carré centré sur une valeur moyenne d'environ $2\text{-}3 \text{ V}$. Grâce aux 6 encoches, la vitesse de rotation N en tours/minutes des machines s'obtient simplement en multipliant la fréquence du signal par 10. La pulsation ω s'obtient par la relation :

$$\omega(\text{rad.s}^{-1}) = \frac{2\pi}{60} N(\text{tours/minutes})$$

II.3.2 Génératrice Frein

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 rotor⁷, 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
puissance.

⁷ Principe du couplage électromécanique mis en œuvre dans les convertisseurs électromécaniques.

⁸ C'est le premier système à avoir été utilisé dans l'industrie ou dans les laboratoires pour les mesures de couple.

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 L_S 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 B_S 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 B_S , 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 L_C est la nouvelle position de la masse M :

$$C_{\text{utile fourni par le moteur}} \approx C_{\text{balance}} = Mg(L_C - L_S)$$

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 donc 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 faut en tenir compte dans le calcul du rendement du moteur.

II.3.3 Formules de bases pour le MCC

On rappelle les équations en régime permanent avec quelques remarques sur les différentes relations :

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

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

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

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

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

⁹ Des marques sont gravées tous les cm.

¹⁰ Ils peuvent, à la différence des frottements fluides, provoquer un arrêt avant la position d'équilibre statique.

¹¹ Cela explique pourquoi la génératrice demande du couple mécanique au moteur.

est le flux magnétique utile sous un pôle du rotor. Il dépend du champ magnétique créé par l'inducteur, donc de sa tension d'alimentation¹². Φ peut aussi dépendre du courant circulant dans l'induit¹³. 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 $\Gamma_V = K_V \omega$ proportionnel à la vitesse (donc provoquant une dissipation de puissance $P_V = \Gamma_V \omega$ 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).

II.3.4 Vérification de la relation proportionnalité entre E et ω

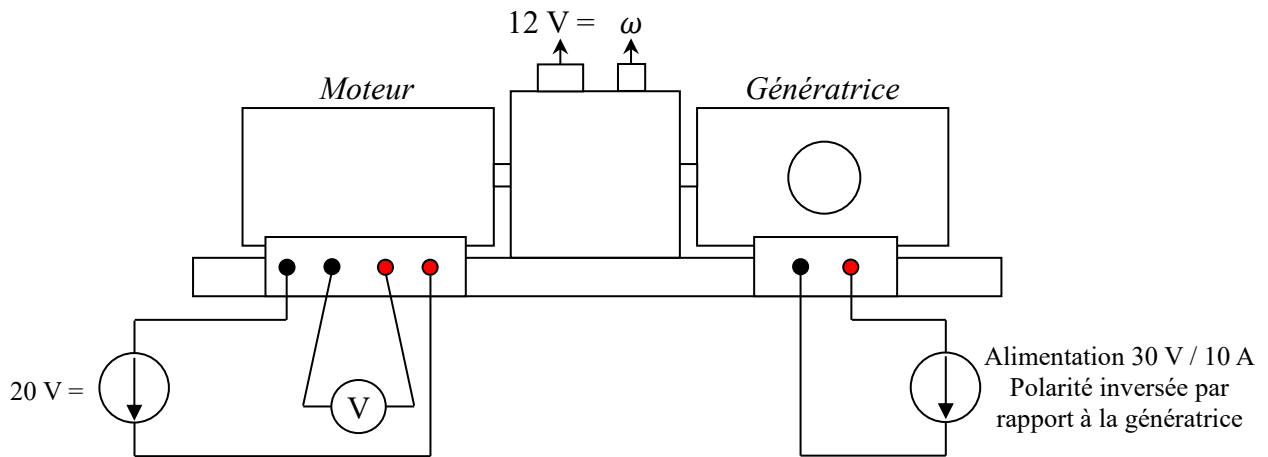
Elle s'effectue généralement sur un essai à vide car c'est là où l'appel en courant est minimum puisque le couple mécanique sert juste à compenser les pertes (pas de couple utile demandé). On peut alors considérer qu'on a $U_{\text{vide}} \approx E = k\Phi\omega$ d'après (2) car les rotors ont généralement une résistance faible. Cette simplification n'est pas possible avec le banc d'étude car le moteur doit vaincre ses pertes et celles de la génératrice qu'il entraîne donc la demande de courant à vide est trop importante pour pouvoir négliger le terme RI . On peut cependant contourner le problème en inversant le rôle des deux machines. On utilise la génératrice pour entraîner le moteur à la vitesse ω et on mesure la tension U aux bornes de l'induit. L'impédance d'entrée d'un voltmètre étant énorme, il n'y a pas de courant I à circuler dans l'induit et la relation (2) se résume directement à $U = E = k\Phi\omega$. Cette solution garantit aussi un travail à flux Φ constant puisqu'il n'y a pas de réaction d'induit lorsque $I = 0$.

Montage :

La température des machines a une influence notable sur les résultats. Il faut donc **faire tourner le moteur pendant au moins une dizaine de minutes avant de commencer les mesures**.

¹² Φ à vide est proportionnel au courant dans l'inducteur si le milieu magnétique n'est pas saturé.

¹³ C'est la réaction d'induit \rightarrow cf. [1], p. 51.



Alimentation de l'inducteur :

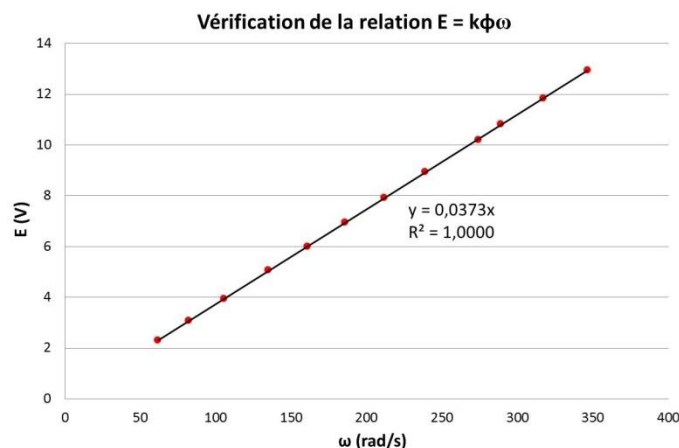
Source 30V/5A ; Elle sert à créer le champ B du stator responsable de Φ . Il n'y a pas de choix strict sur la tension à appliquer mais il vaut mieux prendre une valeur assez élevée pour avoir un flux important. Cela permet de limiter les demandes en courant pour une charge donnée d'après (3). On peut donc entrainer des charges plus importantes compte tenu du courant maximum supporté par l'induit. Un flux important limite aussi l'influence de la réaction d'induit et celle d'une charge sur la vitesse de rotation (cf. § II.3.6). Le courant maximal admissible dans l'inducteur étant de 1 A, on a choisi une tension de 20 V= (le stator demande alors $\approx 0,6$ A à chaud). **Cette tension doit être fixée une fois pour toutes et ne plus être modifiée par la suite !**

Mesure de ω :

La mesure de fréquence est délicate car le signal est peu stable et fortement bruité. Le plus simple consiste à utiliser un oscilloscope numérique pour filtrer et moyenner le signal.

Manipulation :

Il vaut mieux alimenter la génératrice en inversant la polarité afin de faire tourner le moteur dans le même sens que par la suite car on a constaté une légère différence dans la constante de flux $k\Phi$ suivant le sens de rotation. On mesure la f.é.m. induite (qui doit être positive) dans le rotor du moteur avec un voltmètre pour différentes vitesses de rotation, sans dépasser 4 000 tours/minutes. Voici à titre indicatif le résultat d'une série de mesure :



On a une droite passant par l'origine \rightarrow La relation (1) est donc vérifiée : **la f.é.m. aux bornes de l'induit est proportionnelle à la vitesse de rotation**. La pente de la droite correspond à $k\Phi$. On trouve ici :

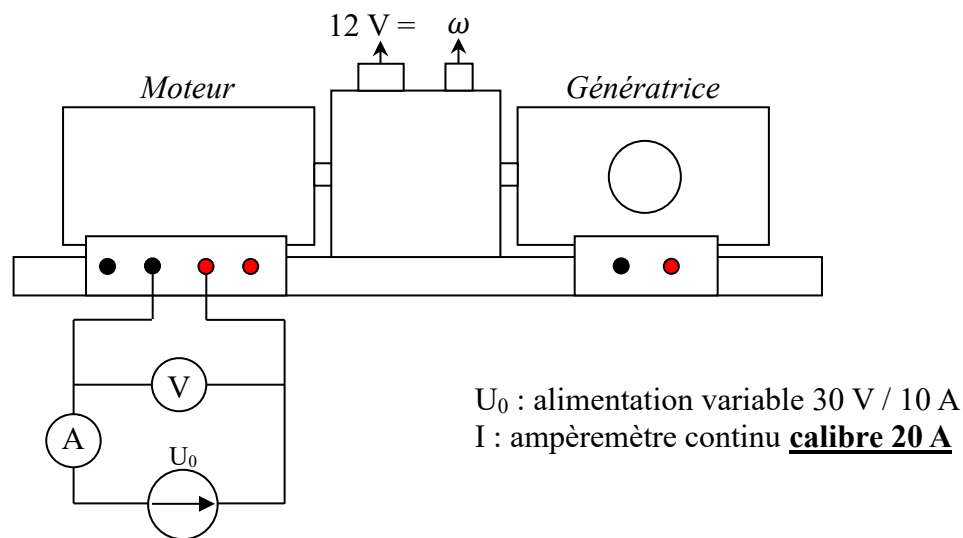
$$k\Phi = 0,0373 \text{ V}/(\text{rad.s}^{-1})$$

II.3.5 Etude du moteur « 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 $1\ \Omega$, 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 imparfaites¹⁴.

Mesure à l'ohmmètre :

Il faut utiliser une méthode en 4 fils car la résistance est faible, et effectuer

¹⁴ Elles ont l'inconvénient d'être statique, donc R n'est pas mesuré dans des conditions normales de fonctionnement du moteur, à savoir en rotation.

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 :

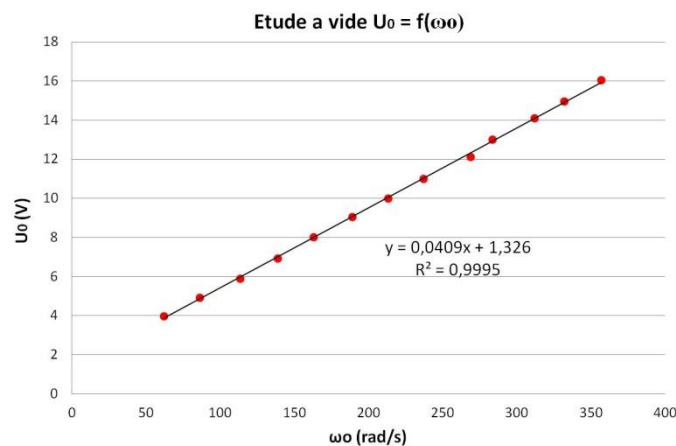
$$R_{\text{induit}} = 0,68 \pm 0,03 \, \Omega$$

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

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 $U_0 = f(\omega_0)$:

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 années¹⁶. 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 $U_0 = RI_0 + E = RI_0 + k\Phi\omega_0$. 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

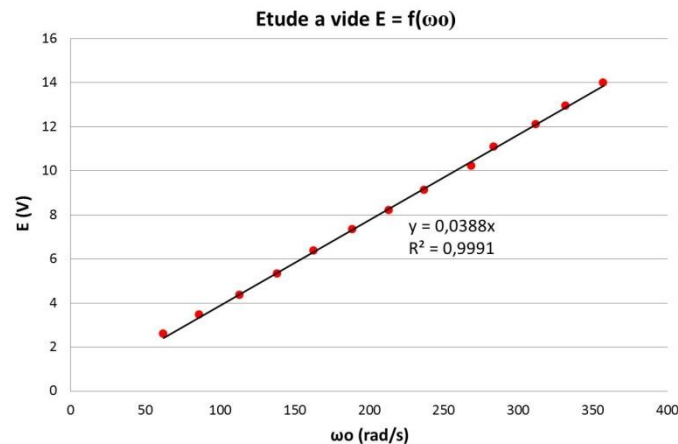
¹⁵ On peut le faire en alimentant la génératrice par à coup.

¹⁶ Ce n'est plus autant le cas aujourd'hui. Les progrès en électronique de puissance ont permis de réaliser des commandes de vitesses performantes pour les moteurs synchrones ou asynchrones.

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 $E = U_0 - RI_0 = f(\omega_0)$ avec les mesures précédentes :



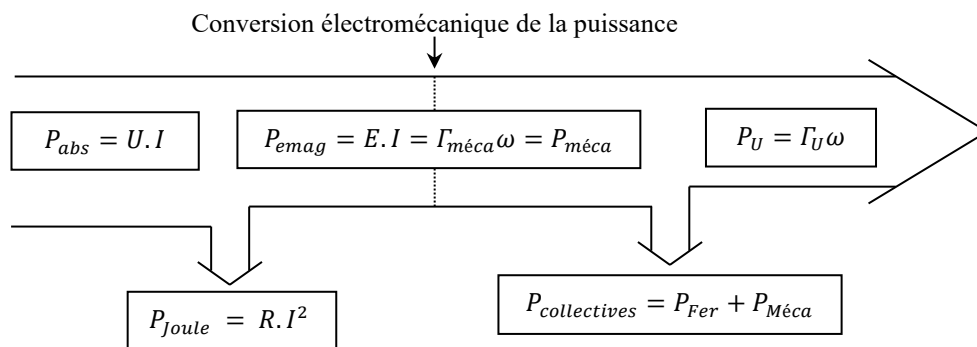
On obtient une droite passant par l'origine, avec un coefficient de pente proche du résultat du § II.3.4 (écart relatif d'environ 4 %) :

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

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 $E \cdot I$, 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 termes de couple par la relation :

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

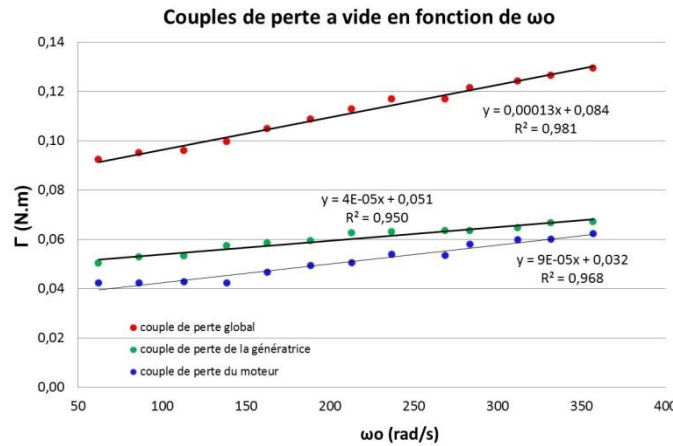
Les mesures de couple obtenues en rééquilibrant la dynamo balance sont quant à elles caractéristiques des pertes dans la génératrice car celle-ci ne reçoit que le couple utile du moteur :

$$\boxed{\Gamma_{\text{dynamo balance à vide}} = \Gamma_{\text{pertes génératrice à vide}}}$$

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

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

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 :



On note une légère tendance à l'augmentation justifiant 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 ($\Gamma_{\text{génératrice}} = \Gamma_C \text{ géné} + K_V \text{ géné} \omega$), 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 :

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

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

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

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 :

$$\boxed{\Gamma_C = U_{\text{seuil}}k\Phi/R = 0,081 \text{ N.m}} \quad \boxed{f = 0,075} \quad \boxed{K_V = f(k\Phi)^2/R = 1,7.10^{-4} \text{ N.m}/(\text{rad.s}^{-1})}$$

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

$$\boxed{\Gamma_C = 0,084 \text{ N.m}} \quad \boxed{K_V = 1,3.10^{-4} \text{ N.m}/(\text{rad.s}^{-1})}$$

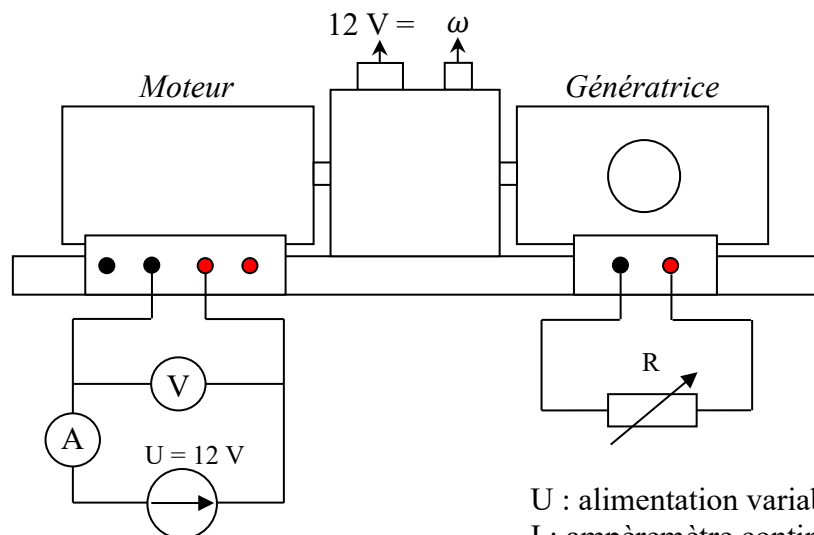
Les valeurs sont assez proches pour le couple de perte constant. La différence est un peu plus marquée pour K_V mais il faut noter que le calcul de K_V est très sensible à la valeur de $k\Phi$ (on peut faire l'application numérique avec les deux valeurs de $k\Phi$ pour s'en convaincre).

II.3.6 Etude en charge à $U = \text{cte}$

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

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 10 Ω

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 ≈ 2500 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 rétablir

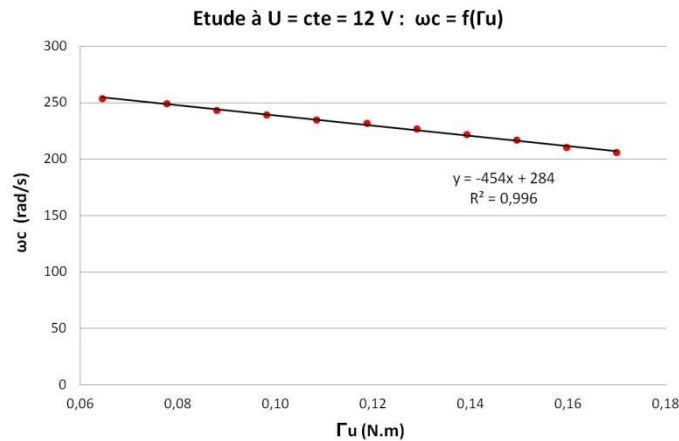
l'horizontalité de la balance¹⁷. On mesure alors :

- 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'affaïssement est relativement limité puisqu'il ne dépasse pas 20 % de la vitesse initiale au maximum des capacités en courant du rotor → **le couple demandé a 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 :

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

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

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) :

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

On a donc, avec cette hypothèse :

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

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).

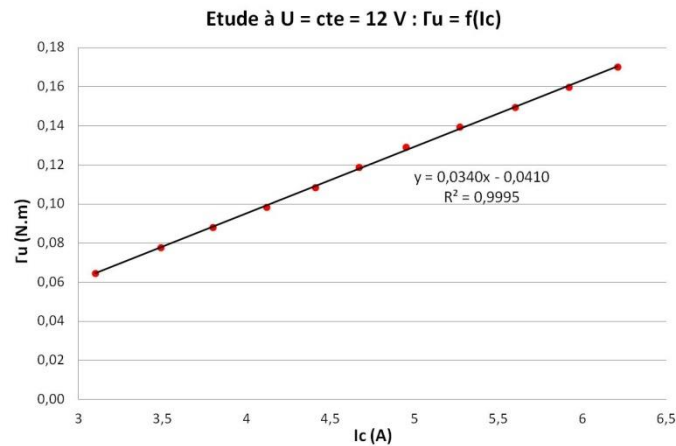
que la dépendance est d'autant moins marquée que la résistance d'induit est faible et que $k\Phi$ est fort. Ces deux caractéristiques sont donc des qualités pour un MCC. Les coefficients de la régression linéaire peuvent être comparés aux expressions qu'on vient d'obtenir :

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

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

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) :



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

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

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.

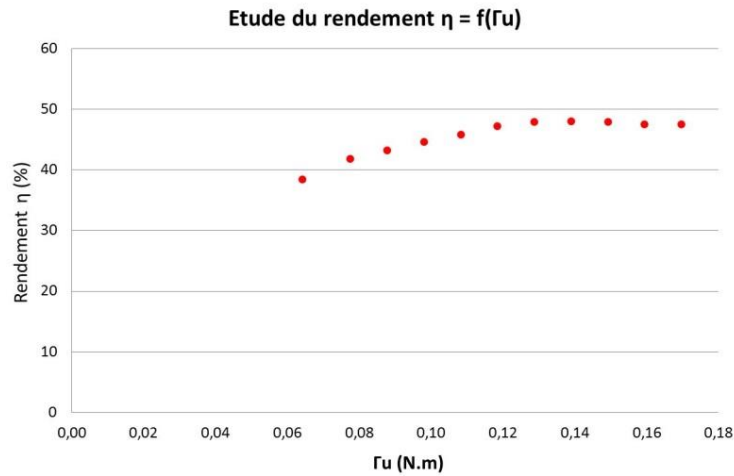
Mesure directe du rendement :

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 :

¹⁹ On peut s'étonner de voir des puissances exprimées sous la forme $P = U.I$ pour des systèmes fortement inductifs, mais on travaille ici en continu et en régime permanent. Les coefficients d'auto induction sont donc sans effets.

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

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



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 lorsqu'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 quand 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 :

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 $\rightarrow P_J = R \cdot I_C^2$
- 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

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} : $P_C = U_V I_V - R I_V^2$. 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

²⁰ L'expression se résume à $U_V I_V$ si on peut négliger la chute ohmique.

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

$U_C \text{ (V)}$	$I_C \text{ (A)}$	$N_C \text{ (Hz)}$	$\omega_C \text{ (rad/s)}$	$\Gamma_U \text{ (N.m)}$
12	4,82	2220	232	0,133

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

Essai « à vide »

$U_0 \text{ (V)}$	$I_0 \text{ (A)}$	$N_0 \text{ (Hz)}$	$\omega_0 \text{ (rad/s)}$	$\Gamma_{U0} \text{ (N.m)}$
10,73	2,94	2216	232	0,0696

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

III MOTEURS A COURANT ALTERNATIF

Le champ magnétique créé par le stator est tournant dans ce type de moteur. Ce champ a un rôle vis-à-vis du rotor qui dépend du mode de fonctionnement (asynchrone ou synchrone). Ces machines peuvent fonctionner en monophasé aux faibles puissances, ou en triphasé pour les plus fortes puissances²¹. On se limitera à une étude simple du principe et des propriétés des deux modes de fonctionnement avec le moteur de démonstration Leybold.

III.1 Moteur asynchrone

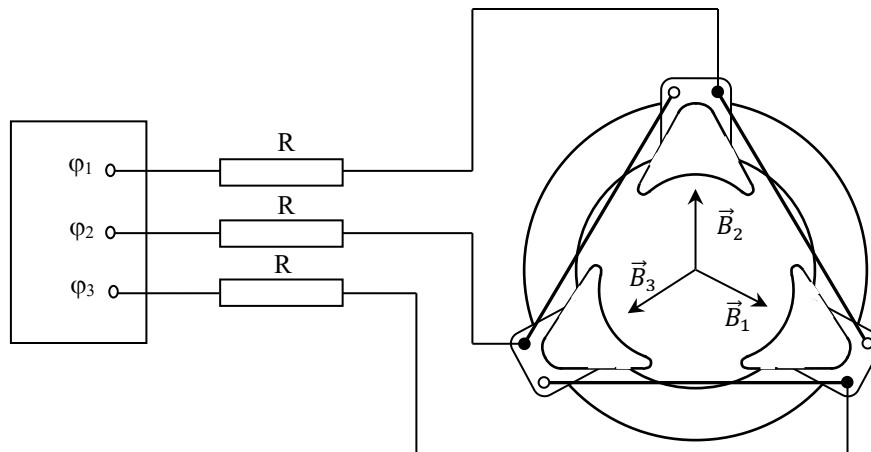
Aux faibles puissances (< 1 kW), le rotor est constitué de

²¹ L'utilisation du triphasé augmente le rendement à puissance égale.

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).

III.1.2 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'écureuil²² 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.

²² Cf. [4], p 101 pour une explication sur ce type d'induit.

Vitesse de rotation à vide :

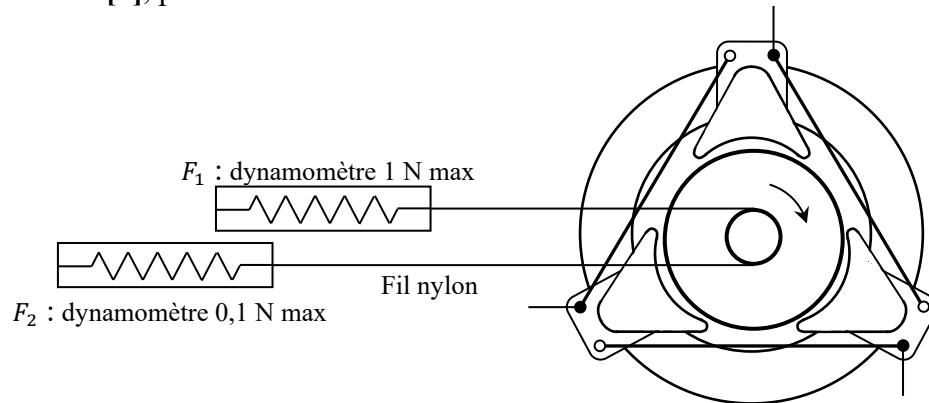
On peut la mesurer en régime permanent à l'aide d'un stroboscope ou d'un tachymètre laser (la deuxième solution est plus simple et plus rapide à mettre en œuvre mais moins visuelle). La machine doit forcément tourner à moins de 3 000 Tours/ min, valeur correspondant à la fréquence de 50 Hz du secteur, ce qui justifie la qualification de moteur asynchrone. Pour modifier le sens de rotation, il faut inverser le sens de rotation du champ statorique. On peut vérifier qu'il suffit de permuter deux phases pour y parvenir. On peut aussi calculer le glissement de la machine, qui correspond à l'écart relatif au synchronisme :

$$g = \frac{\omega_{\text{secteur}} - \omega_{\text{moteur}}}{\omega_{\text{secteur}}} \quad \text{avec} \quad 0 < g < 1$$

On obtient typiquement de l'ordre de 5-10 % avec le dispositif d'étude. A noter qu'un glissement faible est une qualité pour la machine car cela a un impact bénéfique sur son rendement et sur sa sensibilité à la charge.

Mesure du couple :

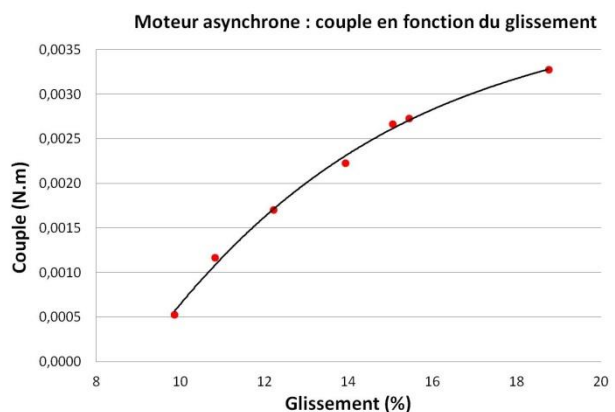
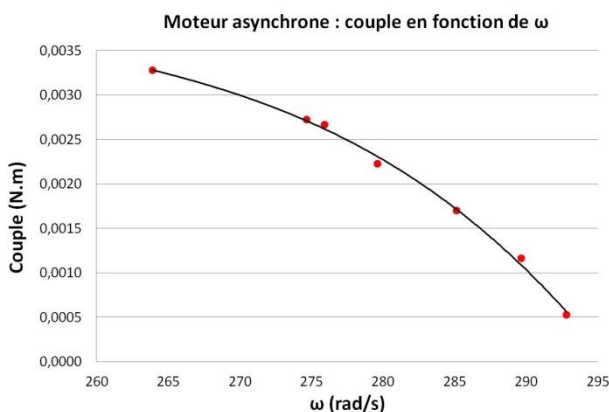
[4], p 288



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 :



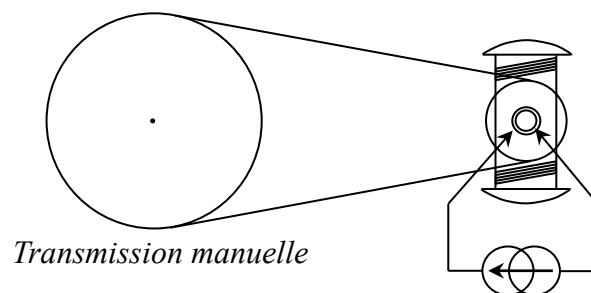
On constate que le moteur tourne à une vitesse proche du synchronisme lorsque la demande de couple est faible, et que la vitesse diminue lorsqu'on demande plus de couple, jusqu'à décrocher lorsqu'on freine trop le moteur (cette partie où le moteur décroche n'est pas représentée sur les graphiques car 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 y est inversé). On pourrait calculer la puissance mécanique $P = \Gamma\omega$ 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.

III.2 Moteur synchrone

Le rotor a cette fois-ci le comportement d'un aimant bipolaire ou multipolaire qui le soumet, en présence d'un champ magnétique, à un couple $\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}$ tendant à l'orienter dans le sens de ce champ. Il faut donc lancer le rotor jusqu'à la vitesse de synchronisme pour faire fonctionner un moteur synchrone. Lorsqu'il est calé sur cette vitesse, le couple $\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}$ auquel il est soumis lui permet alors d'accompagner le champ tournant dans sa rotation.

III.2.1 Première manipulation possible

On reprend le stator utilisé au § précédent pour produire le champ tournant. On reprend aussi le rotor bipolaire mais on l'alimente maintenant avec un courant continu. On a alors intérêt à y faire passer le courant maximum 1,5 A (utiliser une alimentation de puissance réglée en générateur de courant) :



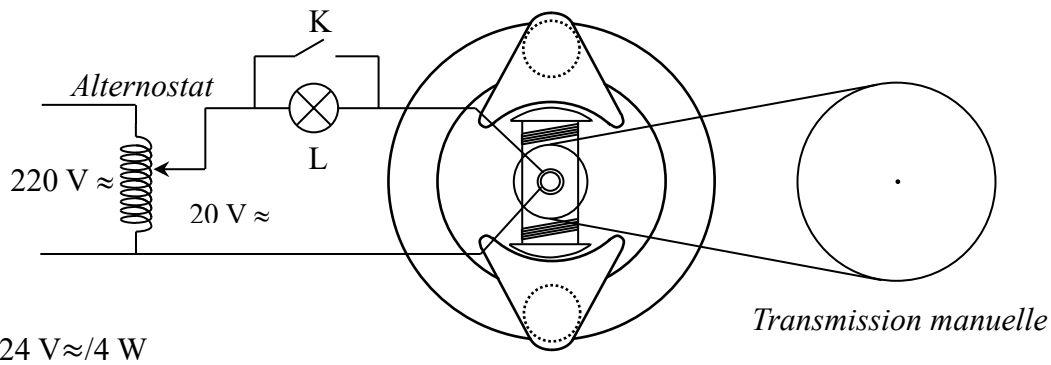
Le couple au démarrage étant nul, il faut accrocher le rotor à la fréquence du champ tournant avec une poulie et une courroie²⁴. L'ensemble doit être **fortement** fixé sur la paillasse, l'axe et le collecteur du rotor doivent être **parfaitement lubrifiés** et **la courroie doit être assez lâche** pour que le moteur ne soit pas trop freiné après le lancement. Les poulies d'entraînement de la transmission manuelle et du rotor sont dans un rapport 1/50^{ème}. **Il faut donc tourner la manivelle à 1 tours/seconde pour entraîner le rotor à 50 tours/seconde.** Un stroboscope réglé à la fréquence du secteur permet de vérifier l'accrochage du moteur synchrone. La difficulté consiste alors à tourner la manivelle le plus régulièrement possible pour permettre l'accrochage, et il faut la lâcher lorsqu'on est à la vitesse de synchronisme. Le rotor doit alors continuer à tourner en entraînant la transmission manuelle. Si l'accrochage ne se fait pas, il faut vérifier qu'on entraîne le rotor dans le bon sens (repéré en mode asynchrone). Que se passe-t-il si on inverse le sens du courant dans le rotor ?

III.2.2 Deuxième possibilité

Ce montage est moins conventionnel mais plus simple à mettre en œuvre (pas besoin d'alimentation triphasée). Le rajout d'une lampe permet aussi de repérer visuellement l'approche du synchronisme, la synchronisation, et le moment optimal pour abandonner le rotor à lui-même. On conseille donc cette solution plutôt que la première.

²³ Cette mesure s'effectue en intercalant un wattmètre monophasé entre deux fils amenant deux phases au stator. L'alimentation du moteur étant en triangle, la puissance totale consommée vaut alors $P_{mesurée} \times \sqrt{3}$.

²⁴ C'est une opération assez délicate à réussir lorsqu'on n'a pas l'habitude.

Montage :

L : lampe 24 V ≈ 4 W

Principe de fonctionnement :

On utilise le stator à aimant permanent du § II.2.1. Le champ inducteur \vec{B} étant statique, on alimente le rotor bipolaire avec une source de tension alternative via les bagues continues. Cela crée un moment magnétique \vec{M} variant sinusoïdalement dans le temps. On peut facilement montrer (cf. [4], p. 100) que ce moment est équivalent à deux moments \vec{M}_1 et \vec{M}_2 de norme constante deux fois plus petite, tournants en sens inverse à la pulsation de la source :

$$\vec{M} = M \cos \omega t \vec{e}_z$$

On inverse ainsi les rôles : il faut faire tourner le rotor à la pulsation de la source pour que, suivant le sens de rotation choisi, le moment \vec{M}_1 ou \vec{M}_2 reste en permanence « accroché » au champ statique \vec{B} . Un entraînement dans le sens trigonométrique permet l'accrochage sur \vec{M}_2 . Inversement, un entraînement dans le sens horaire conduit à l'accrochage sur \vec{M}_1 .

Rôle de la lampe :

Le rotor tournant dans un champ magnétique constant, il est le siège d'une f.é.m. induite se superposant à la tension appliquée par l'alternostat. Tant que le rotor ne tourne pas à la fréquence du synchronisme, le courant résultant de l'addition des deux tensions présente un phénomène de battement qui provoque un scintillement de la lampe. Lorsque le rotor tourne lentement, la f.é.m. induite est très faible et sa fréquence est très différente de celle du secteur. La tension globale présente un battement très léger et rapide donc le scintillement est imperceptible. Lorsque la vitesse augmente, la f.é.m. induite augmente et sa fréquence se rapproche du synchronisme : la fréquence des battements diminue, jusqu'à s'annuler au synchronisme. Si on continue alors à augmenter la vitesse de rotation du rotor, le scintillement de la lampe réapparaît et s'accélère de plus en plus. L'observation du scintillement de l'éclat de la lampe permet donc de repérer facilement le synchronisme.

Manipulation :

Il faut minimiser les frottements si on veut que le moteur ait une chance de rester en rotation une fois lancé. Il faut donc lubrifier l'axe avant de mettre le rotor et nettoyer ses collecteurs. On a aussi intérêt à prendre des balais les plus souples possibles. L'ensemble moteur/manivelle doit être fortement fixé à la paillasse et la courroie doit être lâche. On commence en laissant l'interrupteur K ouvert et on applique une tension alternative de 20 V sur le rotor. La lampe doit se mettre à briller. On lance progressivement le rotor avec la transmission manuelle. La lampe doit se mettre à scintiller rapidement, puis de plus en plus lentement. Quand on est près du synchronisme, il faut entraîner le

rotor le plus régulièrement possible et ajuster finement la vitesse de rotation pour faire disparaître le battement. Il faut à alors **lâcher la manivelle lorsque l'éclat de la lampe est stable et faible** tout en fermant au même moment l'interrupteur K pour éviter que la lampe ne consomme inutilement. Le rotor reçoit alors tout le courant et continue à tourner tout seul en entraînant la transmission manuelle. On peut mesurer la vitesse de rotation du moteur au tachymètre. Elle doit être synchronisée à la fréquence de l'alimentation. On peut vérifier que le moteur arrive à tourner dans les deux sens suivant le sens d'entraînement choisi initialement.

Remarque :

L'angle θ entre le champ \vec{B} et le moment magnétique \vec{M} doit être optimal, c'est-à-dire compris entre 0 et $\pi/2$, pour que l'accrochage se fasse au synchronisme (cf. annexe 2, § I). C'est pour cette raison qu'il faut lâcher la manivelle lorsque l'éclairement de la lampe est stable et faible car la f.é.m. induite s'oppose alors à la tension appliquée et cela correspond, d'après la loi de l'induction $e = -d\Phi/dt$, au moment où le moment magnétique choisi s'aligne avec le champ statique \vec{B} ($\theta = 0$). Le système adopte ensuite l'angle θ permettant de compenser le couple résistant. On peut vérifier que l'accrochage ne se fait pas si on lâche la manivelle lorsque l'éclat de la lampe est stable et brillant. Pour plus d'explication sur ce point, se reporter à l'annexe 3.

Bibliographie :

- [1] : Collection Herbert Le technicien : Machines électriques ; Electronique de puissance (édition 1985)
- [2] : Niard : Machines électriques Term F3
- [3] : Précis Bréal : Electrotechnique PSI
- [4] : Quaranta IV
- [5] : Châtelain : Machines électriques, tome 2
- [6] : Milsan : Machines électriques
- [7] : Théodore Wildi : Electrotechnique (deuxième édition)

ANNEXE 1 : MOTEUR A COURANT CONTINU

I ROTOR BIPOLAIRE AVEC BAGUES CONTINUES

En rotation, le rotor coupe un flux valant $\Phi = NSB \cos \omega t = \Phi_0 \cos \omega t$.

Ce flux engendre une f.é.m. induite :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \rightarrow \boxed{E = \Phi_0 \omega \sin \omega t}$$

La loi d'ohm appliquée au rotor en régime permanent est :

$$\boxed{U - E = RI}$$

La norme du couple mécanique auquel est soumis le rotor vaut $|\vec{\Gamma}| = |\vec{M} \wedge \vec{B}| = NSIB \sin \omega t$

$$\rightarrow \boxed{|\vec{\Gamma}| = \Phi_0 I \sin \omega t}$$

La valeur moyenne du couple sur un tour est nulle d'où l'impossibilité de rotation avec des bagues continues.

II ROTOR BIPOLAIRE AVEC DEMI-BAGUES

$\Phi = NSBI \cos \omega t$ sur un demi-tour. Après inversion, $\Phi = -NSBI \cos \omega t$ puisque \vec{S} change de sens avec le courant. On a donc sur un tour complet :

$$|\vec{\Phi}| = \Phi_0 |\cos \omega t| \quad \text{d'où} \quad E = \Phi_0 \omega |\sin \omega t| \quad \text{et} \quad |\vec{\Gamma}| = \Phi_0 I |\sin \omega t|$$

Le collecteur en demi bagues permet d'obtenir un couple moyen non nul ayant idéalement la forme d'une sinusoïde redressée double alternance. Il en est de même pour la f.é.m. induite. On peut en déduire l'expression de la vitesse de rotation du rotor :

$$U - \langle E \rangle = RI \quad \text{avec} \quad \langle E \rangle = \Phi_0 \omega \langle |\sin \omega t| \rangle = \Phi_0 \omega \frac{2}{\pi} = k \Phi_0 \omega \rightarrow \boxed{\omega = \frac{U - RI}{k \Phi_0}}$$

Remarque :

L'introduction du collecteur en demi-bagues donne une valeur moyenne non nulle au couple mais il varie beaucoup avec l'angle de rotation (sinusoïde redressée double alternance). Pour maintenir ce couple en permanence au voisinage de sa valeur maximale, on bobine plusieurs enroulements différemment orientés sur le rotor. Le collecteur possède alors autant de lames que d'enroulements, ce qui permet de donner au moment magnétique du rotor autant d'orientations différentes et on alimente à chaque instant l'enroulement qui donne la valeur la plus élevée au couple. La f.é.m. évolue de manière similaire. Au lieu de se composer d'arches de sinusoïdes ($E = E_M |\sin \omega t|$), elle reste voisine de sa valeur maximale E_M , l'ondulation résiduelle qui s'y superpose étant toujours négligée. La formule donnant l'expression de la vitesse de rotation reste la même ; seule la valeur du coefficient k change.

III RENDEMENT D'UN MCC A EXCITATION SEPARÉE

III.1 Bilan de la conversion électromécanique

Ce bilan est classique (cf. [3], p. 123 par exemple). Il suffit de développer le calcul de la puissance de la force de Lorentz $\vec{F} = q(\vec{v} + \vec{V}) \wedge \vec{B}$ s'exerçant sur les porteurs qui se déplacent à la vitesse \vec{v} dans un conducteur lui-même en mouvement à la vitesse \vec{V} pour démontrer l'égalité des puissances électromagnétiques et mécaniques (résultat fondamental pour toute conversion électromécanique). Appliqué au moteur, cela donne :

$$P_{emag} = E \cdot I = P_{méca} = \Gamma_{méca} \cdot \omega$$

III.2 Inventaire des différentes pertes

Les pertes peuvent être classées en deux catégories :

- les pertes par effet Joule dues aux chutes ohmiques dans les bobinages de l'induit et de l'inducteur dues. Dans le cas d'un moteur à aimants permanents, on ne tient compte que de la résistance de l'induit :

$$P_{Joule} = R \cdot I^2$$

Les enroulements doivent être faiblement résistifs pour minimiser ces pertes. On a aussi intérêt à assurer un bon refroidissement du rotor pour éviter l'augmentation de la résistance R avec la température (cf. [1], p. 377).

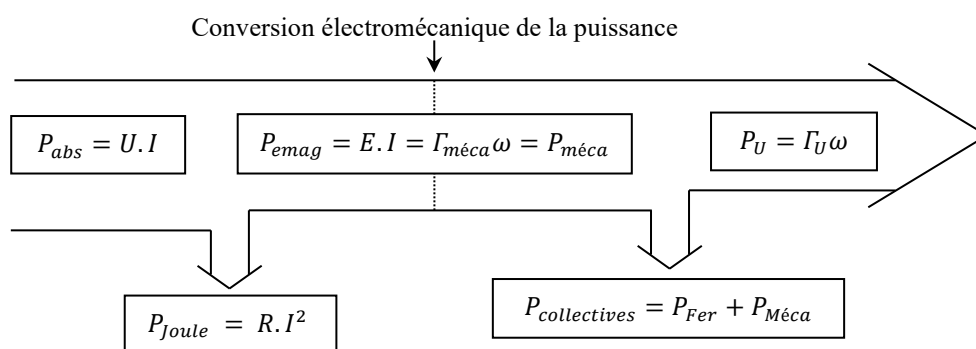
- les pertes collectives P_C . On regroupe sous cette dénomination deux types de pertes : les pertes mécaniques dues aux frottements des différentes pièces en mouvement et les pertes ferromagnétiques (pertes fer) dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault. On a donc :

$$P_C = P_{méca} + P_{Fer}$$

Ces pertes sont dites « collectives » ou « constantes » (dénomination ambiguë) car le couple équivalent est approximativement constant et indépendant de la charge si le moteur travaille à flux constant²⁵.

III.3 Résumé

Le bilan des puissances peut se résumer par le schéma synoptique suivant :



²⁵ Les pertes mécaniques dépendent de la vitesse. Les pertes fer dépendent par nature du champ inducteur B et de la vitesse de rotation du moteur \rightarrow si on considère que ces évolutions sont proportionnelles à ω , le couple de pertes collectives $\Gamma_C = P_C/\omega$ est alors effectivement constant si le champ inducteur est constant.

III.4 Mesure du rendement par la méthode des pertes séparées

Cette méthode de mesure indirecte du rendement consiste à évaluer les différentes pertes.

III.4.1 Mesure des pertes Joules

On calcule ce terme en mesurant le courant d'induit dans les conditions de fonctionnement, la résistance d'induit R ayant été préalablement mesurée sur la courbe $U = f(I)$ de l'essai en charge $\omega = cte$.

III.4.2 Mesure des pertes Fer

Les pertes Fer se mesurent sur un essai à vide, le moteur tournant à la même vitesse qu'en charge. Dans ces conditions, la puissance dissipée par effet Joule est minimum car il n'y a aucun couple résistant appliqué ($\Gamma = k\Phi_o I$) et le courant est donc très faible (en théorie) \rightarrow la puissance utile sert juste à vaincre les pertes collectives. On a avec cette hypothèse :

$$P_{abs} = U_V \cdot I_V \approx P_C$$

Cette mesure à vide doit se faire impérativement avec **la même vitesse** qu'en charge puisque les pertes collectives sont fonction de la vitesse.

III.4.3 Calcul du rendement

Il vaut :

$$\eta = \frac{P_{méca}}{P_{abs}} = \frac{P_{utile}}{P_{abs}}$$

La puissance absorbée en charge se calcule à partir des valeurs U_C et I_C dans les conditions de fonctionnement : $P_{abs} = U_C I_C$. La puissance utile correspond à la puissance absorbée diminuée des différentes pertes : $P_{utile} = P_{abs} - P_{Joule} - P_C$. On a donc, compte tenu des expressions des différentes pertes :

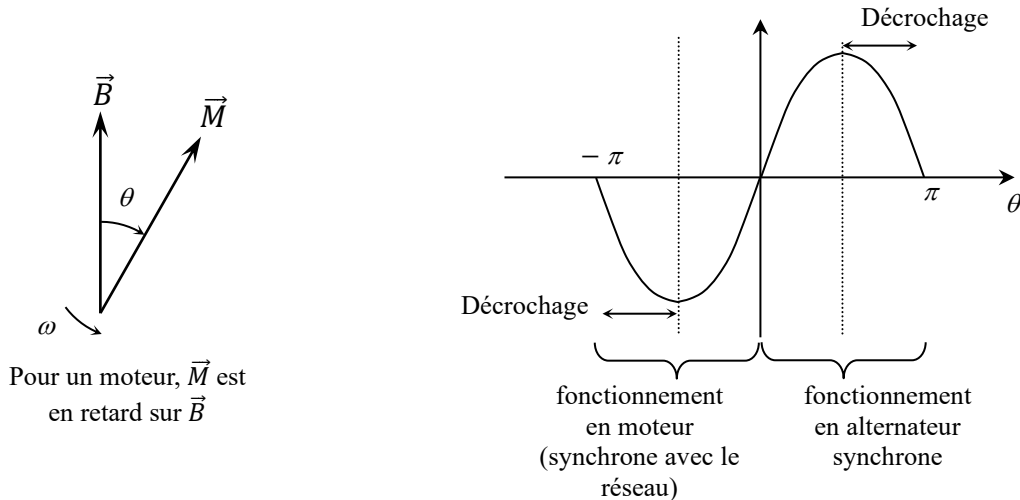
$$\eta \approx \frac{U_C \cdot I_C - R \cdot I_C^2 - U_V \cdot I_V}{U_C \cdot I_C}$$

ANNEXE 2 : MOTEURS A COURANT ALTERNATIF

I MACHINE SYNCHRONE

[2], p. 218-219

Le stator, alimenté en triphasé, fournit un champ magnétique \vec{B} tournant à la pulsation ω_0 . Le rotor, un aimant permanent ou un bobinage alimenté en continu, est assimilable à un moment dipolaire \vec{M} et tourne à la vitesse ω .



Le couple moyen n'est non nul que si $\omega = \omega_0$. Il vaut alors $\Gamma = MB \sin \theta$. Pour le démarrage, se reporter à [2], p. 219.

II MOTEUR ASYNCHRON

[4], p.180 à 186

Le stator est identique à celui des moteurs synchrones (il fournit un champ magnétique B tournant à la pulsation ω_0). Le rotor est constitué d'un bobinage de N spires de surface individuelle S , fermé sur une résistance R' (résistance totale R , inductance L). En supposant qu'il tourne à la vitesse angulaire ω dans le champ tournant du stator et en prenant l'origine des temps à l'instant où l'angle (\vec{B}, \vec{S}) est nul, le flux embrassé par le rotor vaut :

$$\Phi = N \vec{B} \cdot \vec{S} = NBS \cos[(\omega_0 - \omega)t]$$

La f.é.m. induite dans le rotor est donnée par la loi de Lenz :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = NBS(\omega_0 - \omega) \sin[(\omega_0 - \omega)t] = E_M \sin[(\omega_0 - \omega)t] \quad \text{avec} \quad \boxed{E_M = NBS(\omega_0 - \omega)}$$

Le courant induit correspond est $I = I_M \sin[(\omega_0 - \omega)t + \varphi]$ avec (le dénominateur de I_M correspond à l'impédance du rotor à la pulsation des courants induits) :

$$\boxed{I_M = \frac{E_M}{\sqrt{R^2 + L^2(\omega_0 - \omega)^2}}} \quad \text{et} \quad \boxed{\varphi = -\arctg \left[\frac{L(\omega_0 - \omega)}{R} \right]}$$

Ce courant crée un moment magnétique $\vec{M} = N\vec{S}I$, donc un couple de force de module :

$$|\vec{\Gamma}| = |\vec{M} \wedge \vec{B}| = MB \sin(\vec{M}; \vec{B}) = NSBI \sin(\omega_0 - \omega) t$$

$$= NSBI_M \sin[(\omega_0 - \omega)t] \sin[(\omega_0 - \omega)t + \varphi] = \frac{1}{2} NSBI_M [\cos \varphi - \cos(2(\omega_0 - \omega)t + \varphi)]$$

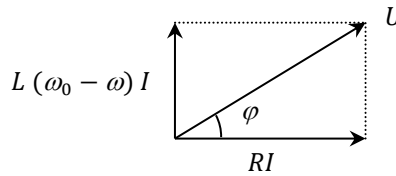
La valeur moyenne de ce couple vaut :

$$\langle |\vec{\Gamma}| \rangle = \frac{1}{2} NSBI_M \cos \varphi$$

Avec l'expression de I_M et E_M , on obtient :

$$\langle |\vec{\Gamma}| \rangle = \frac{1}{2} \frac{(NSB)^2 (\omega_0 - \omega)}{\sqrt{R^2 + L^2 (\omega_0 - \omega)^2}} \cos \phi$$

L'expression de $\cos \phi$ se déduit du diagramme de fresnel :

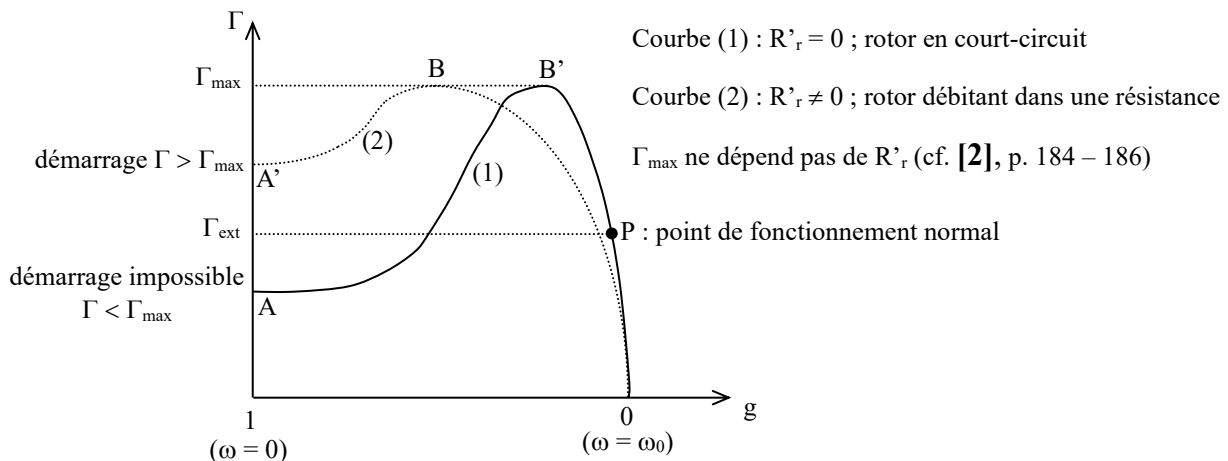


$$\cos \phi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2 (\omega_0 - \omega)^2}} \quad \text{d'ou} \quad \langle |\vec{\Gamma}| \rangle = \frac{1}{2} \frac{(NSB)^2 R (\omega_0 - \omega)}{R^2 + L^2 (\omega_0 - \omega)^2}$$

En introduisant la grandeur sans dimension $g = (\omega_0 - \omega)/\omega_0$ appelée glissement, on obtient finalement :

$$\langle |\vec{\Gamma}| \rangle = \frac{1}{2} (NSB)^2 \frac{R g \omega_0}{R^2 + L^2 g^2 \omega_0^2}$$

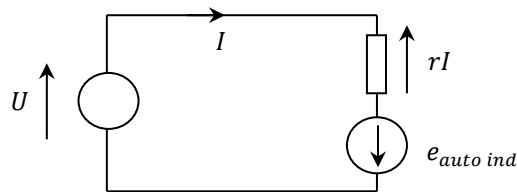
L'évolution du couple moyen en fonction du glissement à l'allure générale suivante :



Ce schéma indique pourquoi on utilise un rhéostat de démarrage. On le supprime ensuite sinon la vitesse dépendrait beaucoup de la charge. En fonctionnement normal, le glissement est très faible (inférieur à 10%). On peut terminer en signalant que la partie A B (ou A'B') de la courbe n'est pas étudiable en régime permanent car elle correspond à un fonctionnement instable du moteur (un accroissement de vitesse provoque un accroissement du couple moteur qui accroît la vitesse etc...).

ANNEXE 3 : CONDITION D'ACCROCHAGE POUR LE MOTEUR SYNCHRON

I COURANT DANS LE BOBINAGE D'UN ROTOR

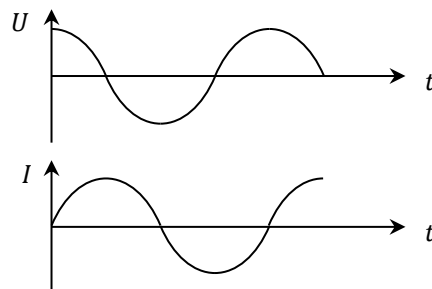


$$U - rI + e_{autoind} = 0 = U - rI - L \frac{dI}{dt}$$

Dans les bobinages d'un moteur, comme dans ceux des transformateurs, on peut négliger le terme résistif par rapport au terme auto inductif d'où :

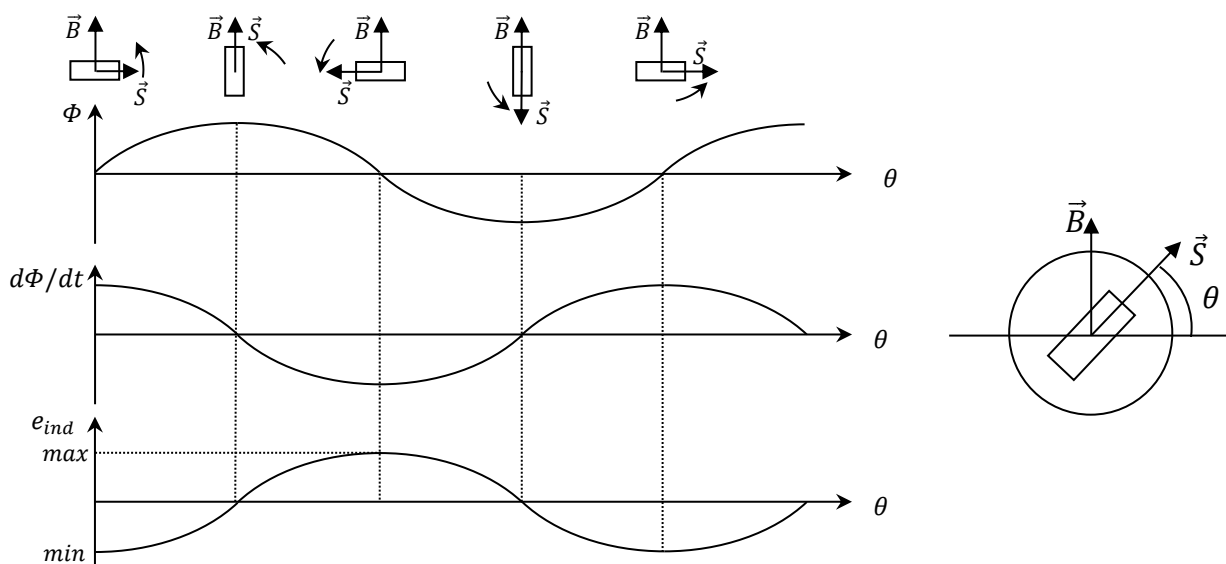
$$U = U_0 \cos \omega t \approx L \frac{dI}{dt} \rightarrow I = \frac{U_0}{L} \int \cos \omega t dt = \frac{U_0}{L\omega} \sin \omega t = \frac{U_0}{L\omega} \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

→ Le courant dans le bobinage d'un rotor est déphasé de $\pi/2$ par rapport à la tension U aux bornes de la bobine :



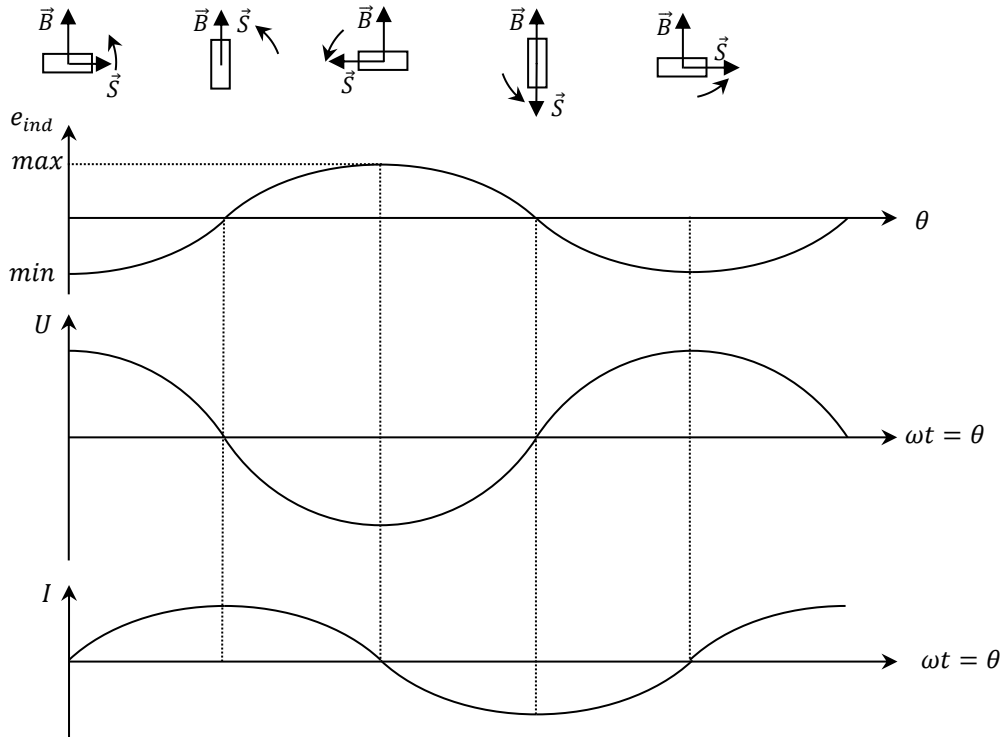
II FEM INDUITE PAR LA ROTATION DU ROTOR

$$e_{ind} = -d\Phi/dt \text{ avec } \Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$$



III ECLAIRAGE FAIBLE DE LA LAMPE

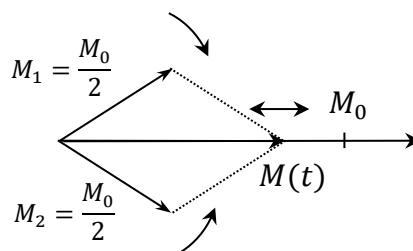
Deux sources de tensions sont présentes : la tension U imposée par le générateur (de pulsation ω) et la f.é.m. induite e_{ind} générée par la rotation du rotor dans le champ du stator (de pulsation $d\theta/dt$) → Pour que la lampe brille peu, il faut que ces 2 sources s'opposent mutuellement à tout instant pour avoir un courant global $I = I_U + i_{induit}$ minimum → elles doivent être synchrones ($d\theta/dt = \omega$) et déphasées de π :

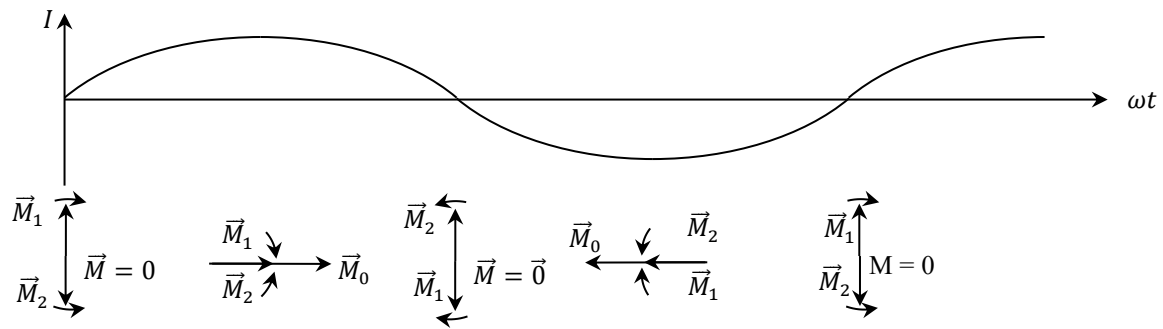


On suppose que la tension U délivrée par le générateur est supérieure en amplitude à la fém induite e_{ind} générée par la rotation du rotor dans le champ du stator → comme elles doivent être synchrones et déphasées de π pour que la lampe brille peu, la tension globale $E = U + e_{ind}$ présente donc la même évolution que U en étant plus faible. L'allure du courant global I se déduit de celle de E , donc celle de U , par un déphasage de $\pi/2$ (cf. § I) → $I(t) = I_0 \cos(\omega t - \pi/2) = I_0 \sin \omega t$.

IV ORIENTATION DU MOMENT MAGNETIQUE

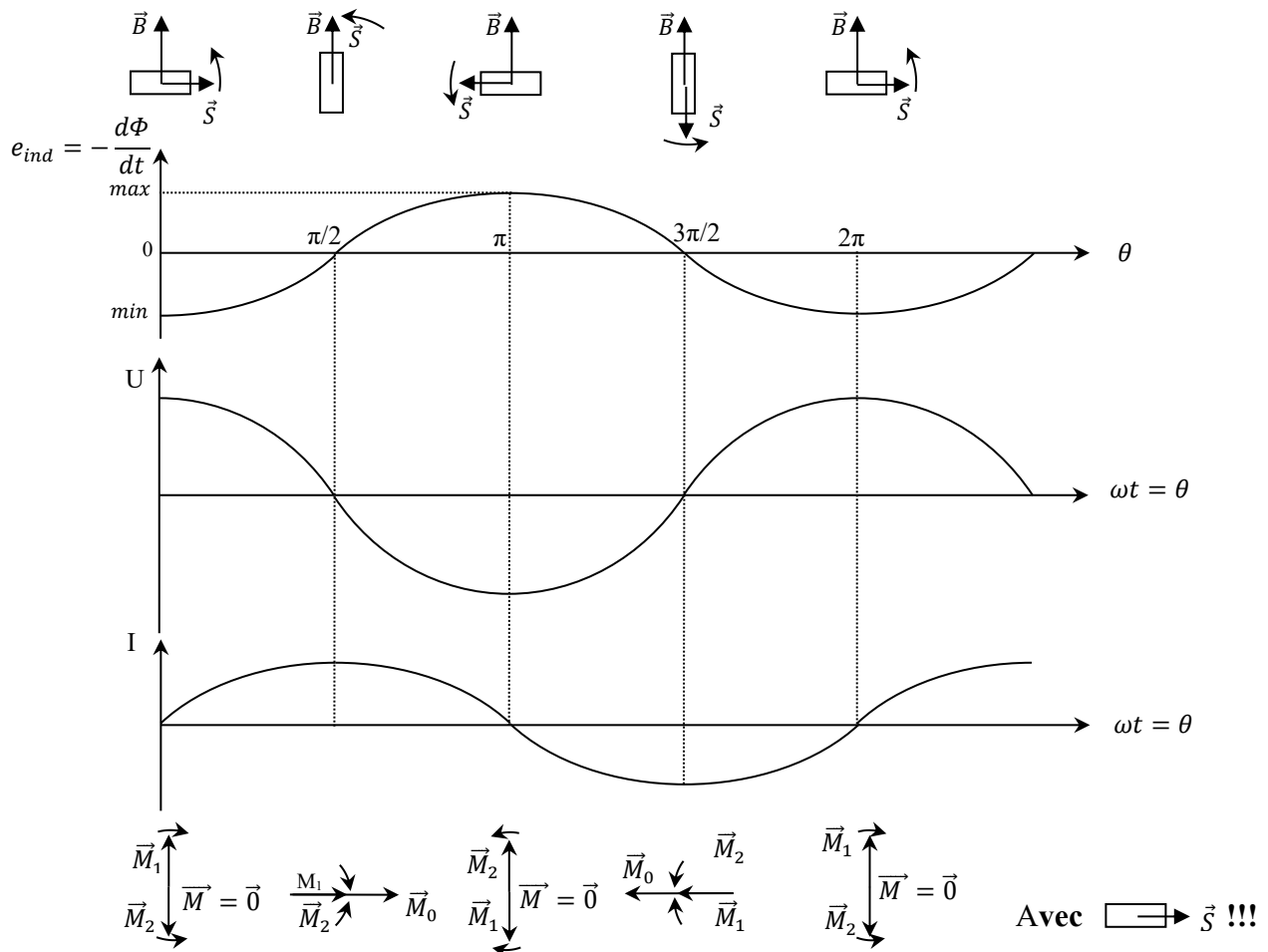
$\vec{M} = I \cdot \vec{S} \rightarrow$ le courant $I(t)$ crée un moment magnétique $\vec{M}(t)$ aligné avec \vec{S} et variable dans le temps à la pulsation ω . Ce vecteur peut se décomposer en deux moments magnétiques \vec{M}_1 et \vec{M}_2 constants dans le temps et d'amplitude deux fois plus faible mais tournants spatialement à la pulsation ω en sens inverse l'un de l'autre par rapport à \vec{M} :





Si on tourne le rotor dans le sens trigonométrique à la pulsation ω , on voit que cette rotation compense celle du moment magnétique \vec{M}_1 qui garde alors une direction constante dans le temps. S'il est dans une position favorable, il donne un couple moteur. Le moment magnétique \vec{M}_2 , lui, tourne à la pulsation 2ω et n'a pas d'effet de couple.

V ORIENTATION DE \vec{M}_1 SUIVANT L'ANGLE DE ROTATION



$\theta = 0 \rightarrow$ bobine orientée à -90° par rapport à \vec{B} , e_{ind} minimum $\rightarrow U$ maximum pour que la lampe brille peu $\rightarrow I_U = 0$ car déphasé de $\pi/2 \rightarrow \vec{M}_1$ orienté à $+90^\circ$ par rapport à $\vec{S} \rightarrow$ orienté suivant \vec{B} .

$\theta = \pi/2 \rightarrow$ bobine orientée suivant \vec{B} , $e_{ind} = 0 \rightarrow U = 0$ pour que la lampe brille peu $\rightarrow I_U$ maximum car déphasé de $\pi/2 \rightarrow \vec{M}_1$ orienté suivant $\vec{S} \rightarrow$ orienté suivant \vec{B} .

$\theta = \pi \rightarrow$ bobine orientée à $+90^\circ$ par rapport à \vec{B} , e_{ind} maximum $\rightarrow U$ minimum pour que la lampe brille peu $\rightarrow I_U = 0$ car déphasé de $\pi/2 \rightarrow \vec{M}_1$ orienté à -90° par rapport à $\vec{S} \rightarrow$ orienté suivant \vec{B} .

$\theta = 3\pi/2 \rightarrow$ bobine orientée à l'opposé de \vec{B} , $e_{ind} = 0 \rightarrow U = 0$ pour que la lampe brille peu $\rightarrow I_U$ maximum car déphasé de $\pi/2 \rightarrow \vec{M}_1$ orienté à l'opposé de $\vec{S} \rightarrow$ orienté suivant \vec{B} .

Conclusion :

On s'aperçoit que quel que soit l'angle que fait la bobine avec le champ \vec{B} , la condition pour que la lampe brille peu correspond à chaque fois à l'alignement de \vec{M}_1 avec \vec{B} , ce qui correspond à la condition d'accrochage du moteur synchrone. On peut remarquer dans ce cas que suivant la valeur de cet angle (position du rotor), le courant global I peut être max, nul, min,