

LP20 - Conversion de puissance

Maria Ubero Gonzalez

Avril 2019

Pré-requis

- Electromagnétisme
- Induction
- Mécanique

Contents

1	Principe de la conversion électromécanique	2
1.1	Rails de Laplace	2
2	Machine à courant continu	3
2.1	Structure et principe de fonctionnement	3
2.2	Modes de fonctionnement	8
2.3	Bilan de puissance du moteur à courant continu	9
2.3.1	Schéma fonctionnel du moteur en régime variable	10
3	Machines à courant alternatif	11
3.1	Réalisation d'un champ magnétique tournant	12
3.2	Principe du moteur synchrone	13
3.3	Principe du moteur asynchrone	15

Introduction

Le phénomène d'induction électromagnétique découvert par Michael Faraday en 1821 met en évidence la possibilité de convertir de l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement. La machine à courant continu, inventée par Zénobe Gramme en 1871 et les machines synchrones et asynchrones inventées par Nikola Tesla dans les années 1880, reposent sur ce principe. Aujourd'hui ces machines sont très utilisées, et, dans cette leçon, nous allons expliquer leur fonctionnement et donner quelques exemples d'applications.

Pour comprendre comment ces machines fonctionnent, nous allons commencer par voir le principe de la conversion électromécanique à travers du dispositif des rails de Laplace.

1 Principe de la conversion électromécanique

1.1 Rails de Laplace

Le dispositif étudié comprend deux rails parallèles dans un plan horizontal, conducteurs et distants de L . On place sur ceux-ci une tige mobile conductrice NM . L'ensemble est placé dans un champ magnétique uniforme et constant.

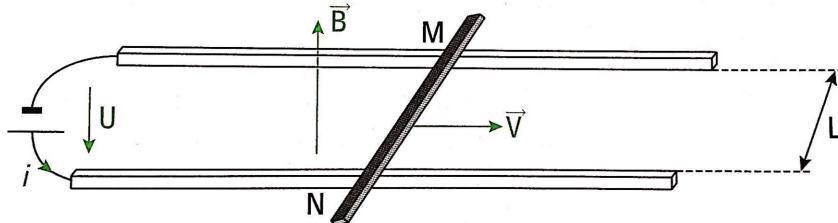


Fig. 2 – Dispositif des rails de Laplace.

Considerons un conducteur électrique dans lequel les porteurs de charges sont des électrons de charge notée $-q$. En conservant l'hypothèse du champ magnétique constant et en notant que la barre se déplace à la vitesse \vec{V} par rapport au référentiel R lié au laboratoire. Exprimons la puissance P de la force $\vec{f} = (-q(\vec{v} + \vec{V}) \wedge \vec{B})$ exercée sur les porteurs, qui se déplacent à la vitesse \vec{v} :

$$P = \vec{f} \cdot (\vec{v} + \vec{V}) = (-q(\vec{v} + \vec{V}) \wedge \vec{B})(\vec{v} + \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$P = -q(\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{v} - q(\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{V} - q(\vec{V} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{v} - q(\vec{V} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{V} = 0 \quad (2)$$

$$P = -q(\vec{v} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{V} - q(\vec{V} \wedge \vec{B}) \cdot \vec{v} \quad (3)$$

Le premier terme de l'expression de la puissance, représente la puissance d'une force $\vec{F}_L = -q\vec{v} \wedge \vec{B}$ orthogonale au plan formé par les vecteurs \vec{v} et \vec{B} : elle est donc colinéaire à \vec{V} . Cependant, les porteurs de charges sont liés au réseau cristallin qui constitue le conducteur mobile et ils ne peuvent s'extraire de ce dernier. Par conséquent, la quantité de mouvement associée à \vec{F}_L est transférée au réseau. Ce bilan donne lieu au mouvement macroscopique du conducteur. Ce mouvement est dû à la force de Laplace. On peut ainsi dire qu'il y a eu transfert d'une **énergie de nature électrique** (associé au mouvement des porteurs de charges mobiles) en une **énergie de nature mécanique**; c'est la **conversion électromécanique de puissance**.

Le second terme de l'expression de la puissance représente la puissance d'une force qui est dans ce cas dirigée selon l'axe du conducteur; elle met en mouvement les porteurs de charge et donne ainsi lieu à une puissance de nature électrique. Il convient à nouveau de noter que c'est un transfert d'énergie car $-q\vec{V} \wedge \vec{B}$ est une force due au mouvement mécanique de la tige. Il y a donc transfert de **l'énergie de nature mécanique en énergie de nature électrique**. C'est donc une conversion électromécanique de puissance.

Dans le second terme de la puissance on voit apparaître $\vec{E}_m = \vec{V} \wedge \vec{B}$

Le bilan complet s'écrit alors :

$$P_m + P_e = 0 \quad (4)$$

Cette équation résume ainsi la conversion électromécanique de la puissance ayant lieu à chaque instant, puisque $P_m = -P_e$. En autres termes, la puissance mécanique créée provient de la puissance électrique $-P_e$ perdue par les porteurs de charges. Elle traduit en outre la conservation de l'énergie.

Nous pouvons alors distinguer deux types de fonctionnement :

- Générateur : conversion de la puissance mécanique en puissance électrique.
- Moteur : conversion de la puissance électrique en mécanique

Le principe du rail de Laplace peut être utilisé pour convertir la puissance mécanique en électrique et vice versa. Cet effet est aujourd'hui exploité par des machines à l'échelle industrielle. Nous allons maintenant étudier le fonctionnement de ces machines.

2 Machine à courant continu

Les machines à courant continu font partie des convertisseurs électro-magnéto-mécanique réversibles. Elles ont été les premières à être utilisées massivement dans toutes les gammes de puissance du fait de la simplicité de leur commande en vitesse.

Actuellement, malgré la concurrence des machines à courant alternatif munies de leur commande électronique, les machines à courant continu restent néanmoins encore très présentes et utilisées dans une gamme de puissance allant, pour les moteurs de traction, jusqu'à quelques centaines de kilowatts.

2.1 Structure et principe de fonctionnement

Avant de décrire le principe de fonctionnement de cette machine, définissons dans ce qui suit, ses principaux éléments.

- Circuits électriques
 - **L'induit** : circuit électrique soumis au champ magnétique et placé sur la partie mobile.
 - **L'inducteur** : il constitue la source de champ magnétique dans la machine. Il peut être réalisé soit à partir d'aimants permanents, soit à l'aide d'un second bobinage qui se rajoute à celui du circuit induit.
- Circuits magnétiques
 - **Le stator** : partie fixe de la machine qui est suffisamment massive pour ne pas être mise en mouvement par l'action de la partie mobile.
 - **Le rotor** : partie mobile, solidaire de l'arbre mécanique.
 - **L'entrefer** : Espacement présent entre l'inducteur et l'induit. Il doit être suffisamment faible afin d'optimiser le couplage électromagnétique et de limiter la consommation énergétique de l'inducteur bobiné.

Schéma vue éclatée

La machine à courant continu comporte deux bobinages, l'un porté par le stator et l'autre par le rotor. Le stator et le rotor, constitués d'un matériau magnétique à base de fer, sont séparés par un entrefer.

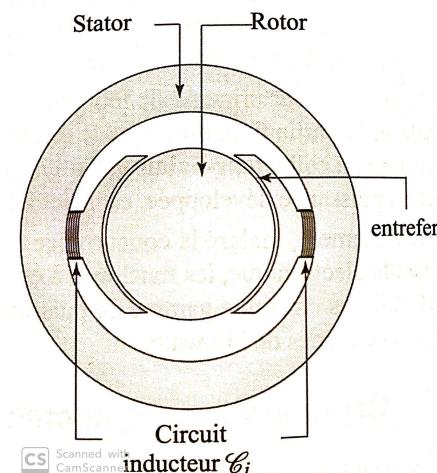
L'ensemble forme un circuit magnétique où les lignes de champ traversant l'entrefer et le rotor se referment dans le stator.

On se limite à l'étude de la machine à courant continu vérifiant les **hypothèses** suivantes :

- le matériau constituant le stator et le rotor est un matériau magnétique linéaire de perméabilité magnétique relative infinie.
- Machine à entrefer radial et d'épaisseur constante.
- chaque bobinage ne génère que deux pôles (nord et sud). Machine bipolaire

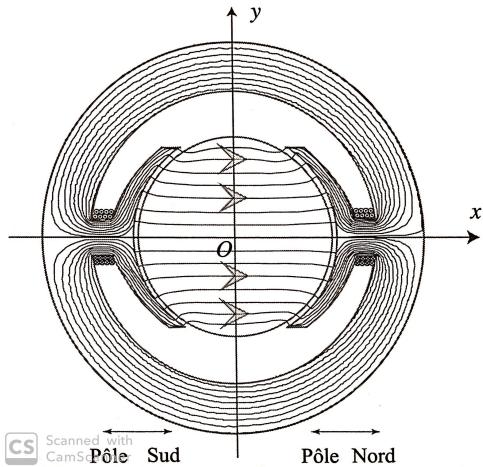
Etude du circuit statorique

Deux bobinages identiques portés par les deux cols situés de part et d'autre du rotor sont connectés en série et donc parcourus par le même courant inducteur permanent de d'intensité I_e .



Le champ magnétique inducteur est donc permanent. En négligeant les effets de bor, les plans orthogonaux à l'axe de rotation, tel que le plan de coupe étudié, sont des plans d'antisymétrie de la distribution de courant inducteur. Par conséquent, les lignes de champ magnétique sont contenues dans ce plan.

La simulation numérique des équations locales satisfaites par le champ magnétique permet de simuler la géométrie de ces lignes de champ.

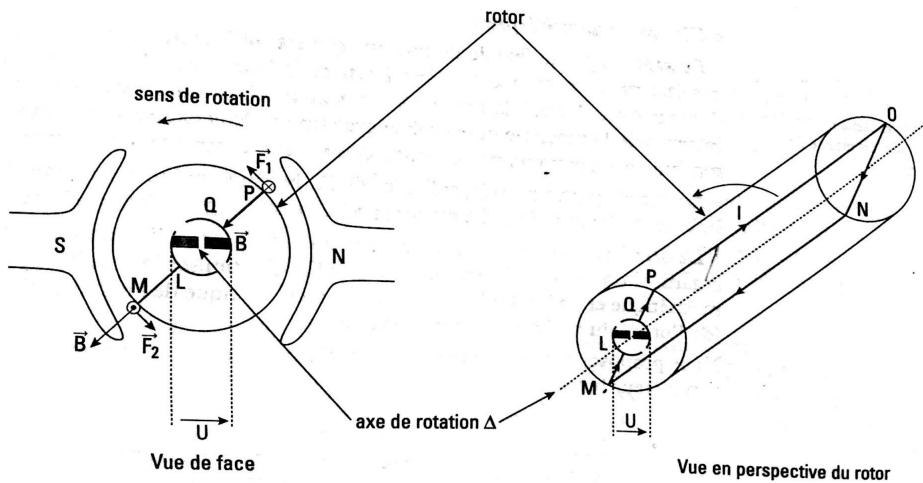


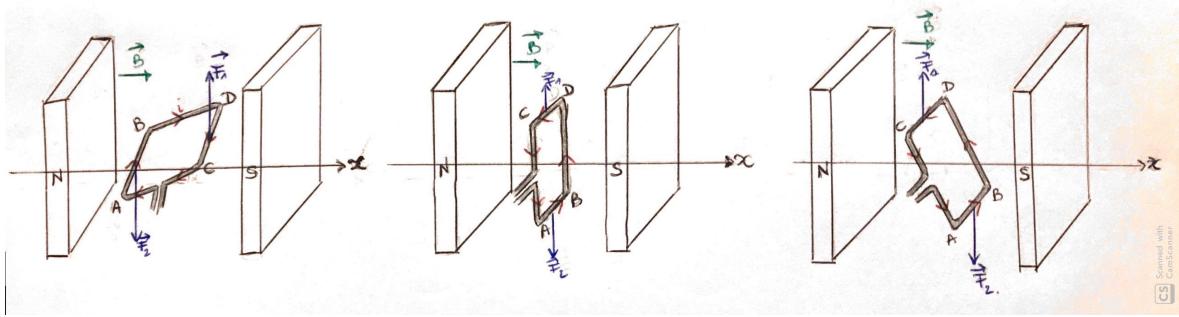
L'entrefer étant entouré de deux cylindres en matériau de perméabilité magnétique infinie, les lignes de champ dans l'entrefer, orthogonales aux cylindres, sont radiales.

Dans la figure précédente on voit que l'axe Ox constitue l'axe polaire orienté.

Etude du courant rotorique

Le circuit rotorique nommé circuit induit, est alimenté par le courant continu I qui entre dans le circuit à travers une alimentation externe. Dans la figure, nous voyons la représentation d'une spire parmi celles du circuit rotorique dont la position est repérée par l'angle θ .





La connexion de cette spire au circuit d'alimentation, montre que si cette connexion restait fixe, le sens de circulation du courant pour la partie gauche de la spire située à gauche du plan (O, y, z) s'inverserait en fonction de θ à la période de π .

Le principe de fonctionnement nécessite un contact glissant entre la partie mobile et la partie fixe, qui, dans le cas d'une machine à entrefer radial, est réalisé grâce à un système **collecteur-balais**. Ce système qui constitue une limitation en vitesse de rotation et en puissance développée, est sujet à l'usure et nécessite un entretien régulier.

Ce sont les forces de Laplace qui sont responsables du mouvement mécanique du rotor, comme dans le cas des rails de Laplace. Les brins BD et AC ne participent pas au mouvement de rotation car... Les conducteurs AB et CD sont soumis à une force de Laplace dont la résultante est nulle car ils sont de même longueurs et parcourus par des courants de même intensité et de sens opposé :

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0} \quad (5)$$

où

$$\vec{F}_1 = Il \wedge \vec{B} = IlBu_\theta = -\vec{F}_2 \quad (6)$$

Le torseur des actions mécaniques se réduit donc à un couple des forces électroimagnétiques.

On supposant la longueur des conducteurs AB et BC l , traversés par un courant I et le rayon du rotor R , le couple résultant exercé sur la spire $ABCD$ dans le repère cylindrique de base () :

$$\vec{\Gamma} = Ru_r \wedge \vec{F}_1 + (-Ru_r \wedge \vec{F}_2) \quad (7)$$

On obtient :

$$\vec{\Gamma} = 2RIlBu_z \quad (8)$$

Le module C de ce couple est appelé **moment du couple électromagnétique**, ou plus simplement **couple électromagnétique**, tel que : $C = 2RIlB$.

Il est possible de transformer cette dernière écriture en remarquant que le terme $2Rl$ est homogène à une surface et $2RlB$ à un flux magnétique que nous noterons par la suite Φ_0 .

On peut alors écrire que le **Couple de Laplace** qui s'exerce sur la spire $ABCD$ s'exprime par :

$$C = \Phi_0 I \quad (9)$$

Le flux s'exprime en $V.s$ ou en weber (Wb), le moment du couple en $N.m$ et l'intensité de courant en A .

Nous constatons que lorsque Φ_0 est constant, le couple électromagnétique C est directement proportionnel à l'intensité électrique I .

???En pratique c'est bien le cas car le circuit inducteur travaille à flux constant. Par conséquent, la grandeur qui contrôle le couple est l'intensité électrique I qui traverse le circuit induit.

D'autre part, il est important de comprendre qu'en régime permanent, c'est la charge mécanique du moteur qui imposera le couple résistant et, par conséquent, la valeur de C (aux éventuelles pertes près). Le débit de courant dans l'induit du moteur est donc l'image de cette charge entraînée par le moteur.

Le mouvement de rotation de la spire dans le champ magnétique créé par le stator entraîne l'apparition d'une force électromotrice dans le circuit induit

F.e.m d'induction E

Loi de conservation de la puissance électromagnétique $P_m + P_e = 0$ en tenant compte du signe des grandeurs en convention récepteur :

$$P_m = P_e \quad (10)$$

En notant Ω la vitesse angulaire de rotation du rotor, nous avons :

$$P_m = \vec{\Gamma} \vec{\Omega} = C\Omega = \Phi_0 I \Omega \quad (11)$$

$$P_e = EI \quad (12)$$

On obtient alors que $E = \Phi_0 \Omega$.

En régime établi, on peut en première approximation négliger la chute de tension résistive RI dans l'induit, ce qui permet d'écrire que $U \approx \Phi_0 \Omega$ car les conducteurs de l'induit sont choisis pour résistants (résistance du bobinage, dépendance de L, S, γ , donc on joue avec la section, la longueur...) afin de limiter les pertes par effet Joule. On peut alors piloter la vitesse de rotation du moteur par l'intermédiaire de la valeur de la tension U .

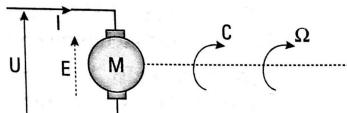


Fig. 12 – Modèle électromécanique du moteur à excitation indépendante.

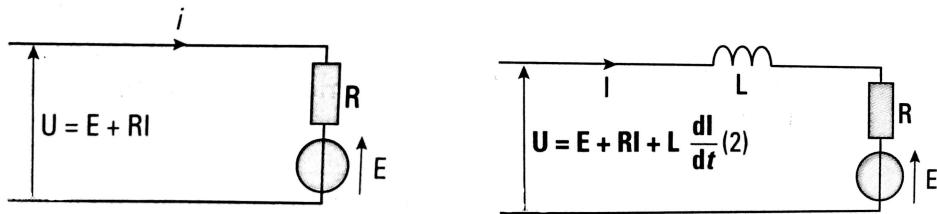
Les flèches indiquent le sens du mouvement associé à un signe positif pour les grandeurs C et Ω . Le sens positif de Ω est lié au sens du fléchage de E , le sens positif de C est lié au sens du fléchage de I . Pour simplifier, le circuit inducteur n'est pas représenté sur cette figure.

- Comportement en régime établi.

$$U = E + RI \quad (13)$$

- Comportement en régime dynamique ou transitoire.

$$U(t) = E(t) + RI(t) + L \frac{dI(t)}{dt} \quad (14)$$

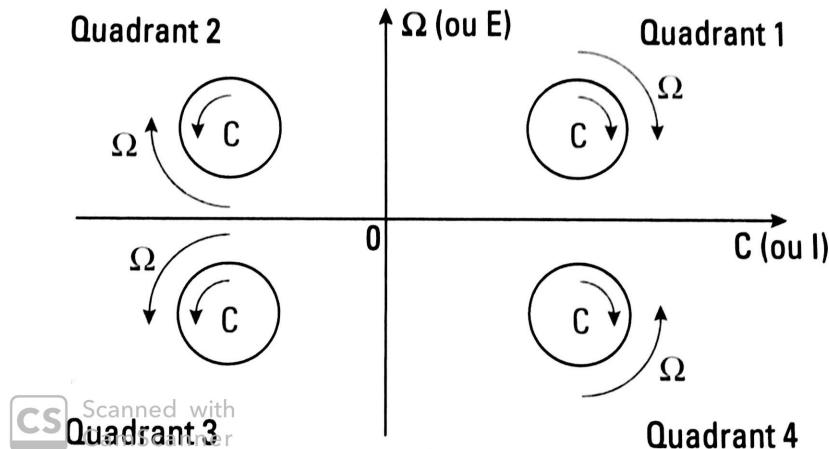


2.2 Modes de fonctionnement

En conservant toujours la même convention pour l'orientation de la f.e.m. induite E , nous avons :

- $E > 0$ et $I > 0$ (convention récepteur). Ainsi lorsque la machine fonctionne en moteur, $EI > 0$. La machine reçoit de la puissance électrique et fournit de la puissance mécanique.
- Au contraire, la machine fonctionne en mode génératrice lorsque $EI < 0$ (convention récepteur), la machine reçoit de la puissance mécanique et fournit de la puissance électrique.

Nous pouvons détailler cette propriété en envisageant différents cas selon le signe de Ω . Ce sont les quatre quadrants de la machine à courant continu : **mettre moteur ou génératrice sur l'image et le prof a dit que c'est mieux de mettre le couple en ordonnées et la vitesse en abscisses**



- Quadrant 1: $EI > 0$ avec $E > 0$ (donc $\Omega > 0$) et $I > 0$. Moteur qui tourne dans le sens positif choisi.
- Quadrant 2: $EI < 0$ avec $E > 0$ et $I < 0$. La machine fonctionne en génératrice et tourne dans le sens positif.
- Quadrant 3: $EI > 0$ avec $E < 0$ et $I < 0$. La machine fonctionne en moteur et tourne dans le sens négatif.
- Quadrant 4: $EI < 0$ avec $E < 0$ et $I > 0$. La machine fonctionne en génératrice et tourne dans le sens négatif.

A partir des relations précédentes ($U = E + RI$) on peut voir une conséquence pour le démarrage de la machine

Démarrage de la machine

Par définition lorsqu'une machine démarre, sa vitesse initiale est nulle. Le courant de l'induit n'est donc limité que par la résistance des bobinages qui le constituent :

$$U = E + RI = RI(E = \Phi_0\Omega = 0) \quad (15)$$

Par conséquent, le courant circulant dans l'induit est, dans ce cas, élevé puisqu'en pratique la résistance R est faible. Il est donc nécessaire de démarrer la machine sous tension réduite afin de ne pas dépasser le courant maximal admissible par l'induit. La solution industrielle classique consiste à augmenter progressivement la tension de l'induit U par variateur de vitesse. Ceci peut être réalisé grâce au **montage hacheur**.

Une deuxième conséquence est l'emballlement de la machine

Emballlement de la machine à excitation indépendante

$$U = E + RI \quad (16)$$

avec $E = \Phi_0\Omega$. On obtient :

$$\Omega = \frac{U - RI}{\Phi_0} \quad (17)$$

Supposons que cette machine fonctionne à vide (son axe n'est soumis à aucun couple de charge résistant). Le flux Φ_0 est créé par le circuit inducteur. Si ce dernier est bobiné, il est alors alimenté par un circuit extérieur qui lui fournit un courant d'intensité I_e . Si au cours du fonctionnement, le courant inducteur I_e est supprimé (suppression de l'alimentation de l'inducteur), alors Φ_0 s'annule et la vitesse tend mathématiquement vers l'infini. En pratique, le surcroît d'énergie cinétique peut se traduire par un emballlement de la machine. Il faut néanmoins veiller à ne jamais couper l'alimentation du circuit inducteur d'une machine à excitation indépendante.

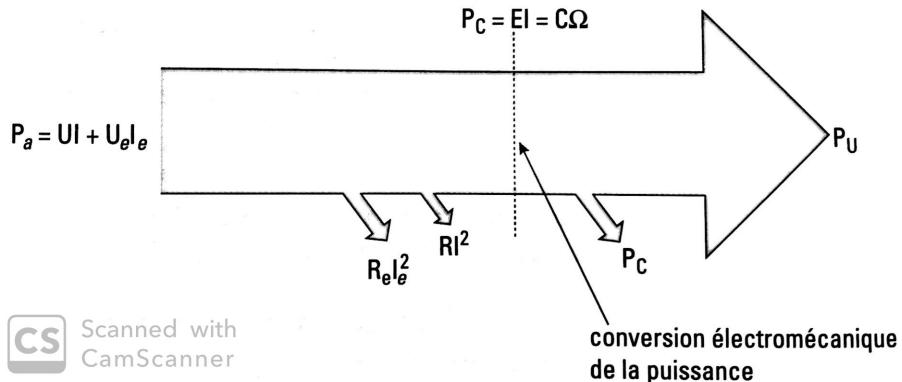
2.3 Bilan de puissance du moteur à courant continu

La machine absorbe la puissance électrique UI absorbée à l'induit, ajoutée à celle éventuellement absorbée par l'inducteur $U_e I_e$, lorsque celui-ci est bobiné. La puissance $U_e I_e$ est entièrement dissipée par effet Joule, donc $U_e I_e = R_e I_e^2$. La puissance absorbée à l'induit s'écrit $P = (E+RI)I = EI + RI^2$. Ceci montre qu'une puissance RI^2 est aussi perdue par effet Joule au niveau de l'induit du moteur. La puissance P_e alors disponible est alors EI , qui est aussi égale à $C\Omega$. Cette puissance est usuellement appelée puissance électromagnétique.

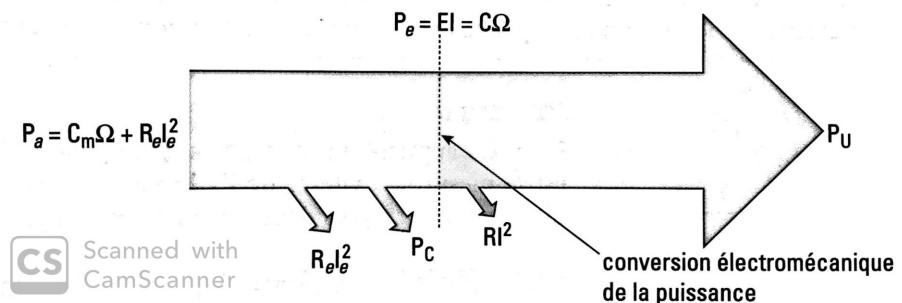
Pour un bilan complet, il faut tenir compte des éventuelles pertes mécaniques (frottements sur roulements par exemple) et magnétiques au rotor (par hystérésis ou courants de Foucault). Ces pertes sont appelées pertes collectives et notées P_c . La puissance mécanique réellement disponible est appelée puissance utile. Cette puissance utile est de nature mécanique, donc il est possible de définir un moment de couple utile C_u tel que $P_u = C_u\Omega$.

Le rendement d'un moteur à courant continu est le rapport de la puissance mécanique utile divisée par la puissance électrique totale absorbée :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + P_c + RI^2 + R_e I_e^2} \quad (18)$$



Dans le cas de fonctionnement en générateur:



2.3.1 Schéma fonctionnel du moteur en régime variable

Je ne l'ai pas fait dans la présentation, je n'ai pas eu le temps

Lorsqu'il s'agit de prévoir le comportement de la machine en régime transitoire lorsqu'elle évolue d'un premier point à un nouveau point de fonctionnement, la théorie des asservissements semble la plus appropriée pour traiter les variations d'état de la machine. Il s'agit de décrire les variations de grandeurs électriques et mécaniques autour d'un point de fonctionnement. Nous supposerons que le couple lié au frottements internes à la machine est proportionnel à la vitesse de rotation Ω . Nous noterons f le coefficient de frottement associé. On note aussi $-C_r$ le moment du couple résistant exercé sur l'axe de la machine. En utilisant le théorème du moment cinétique :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \sum C_i \quad (19)$$

$$J p \Omega(p) = C(p) - f \Omega(p) - C_r(p) \quad (20)$$

avec $C(p) = \Phi_0 I(p)$. On obtient alors :

$$\Omega(p) = \frac{1}{f + J p} (C(p) - C_r(p)) \quad (21)$$

Cette relation montre que la vitesse de la machine est la sortie d'un filtre passe bas d'ordre un, de constante de temps mécanique $\tau_m = \frac{J}{f}$ et dont l'entrée est la grandeur $C(p) - C_r(p)$.

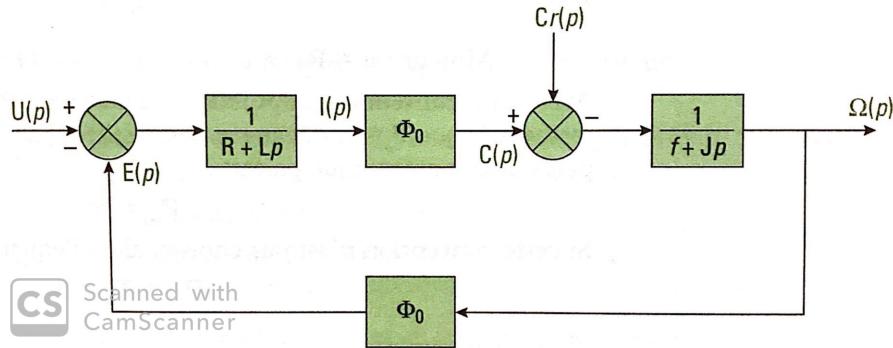
L'équation électrique de l'induit ($U(t) = E(t) + RI(t) + L \frac{dI(t)}{dt}$) conduit par ailleurs à la relation :

$$U(p) = E(p) + RI(p) + RpI(p) \quad (22)$$

avec $E(p) = \Phi_0\Omega(p)$. Nous obtenons donc :

$$I(p) = \frac{1}{R + Lp}(U(p) - E(p)) \quad (23)$$

Cette relation montre que l'intensité du courant traversant l'induit est la sortie d'un second filtre passe-bas d'ordre 1, de constante électrique $\tau_e = \frac{L}{R}$ et dont l'entrée est la grandeur $U(p) - E(p)$.



Conclusion MCC : Les moteurs à courant continu ont été longtemps les champions de la vitesse réglable. La régulation de la vitesse et les asservissements de vitesse et de position ont été maîtrisés pour les moteurs à courant continu bien avant les autres types de moteurs.

A puissance égale, les moteurs à courant continu sont beaucoup plus coûteux que les moteurs asynchrones (bobinages au stator et au rotor, collecteur, balais). Le système balais-collecteur est fragile, il nécessite surveillance et entretien. Par exemple, les moteurs TGV Paris-Sud-Est doivent subir un démontage complet et un reprofilage du collecteur tous les 300.000 km, grosso modo, tous les ans. Les moteurs à courant continu sont donc actuellement réservés aux usages qu'ils sont seuls à pouvoir satisfaire.

Néanmoins, les applications pour l'automobile, restent un grand marché pour les moteurs à courant continu : démarreur, refroidisseur du moteur thermique, pompe à carburant, essuie-glace, lève-vitre, ventilateur, climatiseur

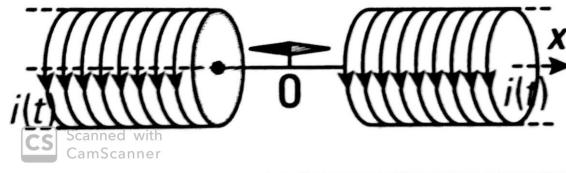
Depuis, des nouvelles machines ont été conçues (machines à courant alternatif

3 Machines à courant alternatif

Pour toute machine alternative, on cherche à créer un champ magnétique tournant au niveau du stator qui permettra de mettre en rotation un rotor.

3.1 Réalisation d'un champ magnétique tournant

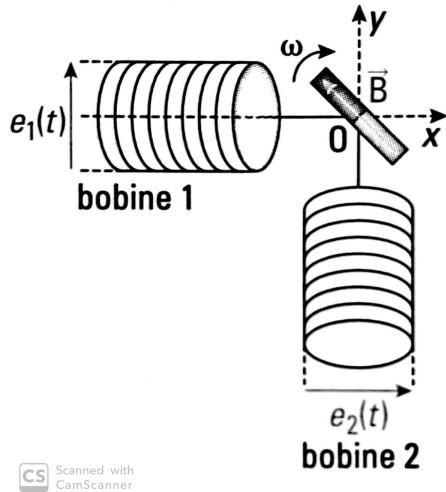
On considère une aiguille aimantée située entre deux bobines identiques face-à-face et connectées en série, à égale distance de celles-ci. Les bobines sont alimentées par un signal sinusoïdal de pulsation ω qui engendre un champ magnétique sinusoïdal, variable dans le temps, au niveau de l'aiguille aimantée.



L'aiguille vibre légèrement mais ne tourne pas, une légère impulsion est nécessaire pour la faire tourner (dans le sens de l'impulsion) à une vitesse ω égale à la pulsation du courant traversant la bobine. On dit qu'elle tourne au synchronisme.

On comprend alors mieux la nécessité d'un champ tournant qui permettrait d'un côté de contrôler dans quel sens on démarre le moteur et d'un autre côté de démarrer le moteur sans intervention extérieure.

Pour créer un champ tournant, nous pouvons utiliser deux bobines placées à 90° dont le courant est déphasé de $\frac{\pi}{2}$. Pour créer un déphasage de $\pi/2$ on peut connecter un condensateur en série.



Un champ magnétique tournant est un champ de norme constante dont la direction varie dans un plan avec une vitesse angulaire ω constante. On l'écrit :

$$\vec{B} = B_0 \cos(\omega t) \vec{u}_x + B_0 \sin(\omega t) \vec{u}_y \quad (24)$$

Les machines alternatives possèdent en règle générale plusieurs pôles. Si le stator possède p paires de pôles, la rotation du rotor s'effectue alors à la vitesse $\frac{\omega}{p}$, dans le cas des machines synchrones, où ω est la pulsation du courant créant le champ tournant.

3.2 Principe du moteur synchrone

Le moteur synchrone est constitué d'un rotor à aimants permanents ou un électroaimant à courant continu. Dans le cas d'utiliser la machine en mode générateur, les électroaimant sont utilisés plutôt que les aimants permanents. Par contre, si on utilise la machine en mode moteur, c'est le contraire : utilisation pour des systèmes embarqués. Le rotor crée un champ magnétique que l'on peut assimiler au champ créé par un aimant permanent.

Le stator est constitué de bobinages qui sont alimentés par un courant alternatif Ces bobinages produisent un champ magnétique tournant et à répartition spatiale sinusoïdale le long de l'entrefer.

Le champ tournant est noté :

$$\vec{B} = B_0 \cos(\omega t + \theta_0) \vec{u}_x + B_0 \sin(\omega t + \theta_0) \vec{u}_y \quad (25)$$

où θ_0 représente l'angle entre le champ tournant et le moment magnétique \vec{M} à l'instant $t = 0$.

Le rotor est considéré en rotation dans le plan (Oxy). Notons :

$$\vec{M} = M_0 \cos(\Omega t) \vec{u}_x + M_0 \sin(\Omega t) \vec{u}_y \quad (26)$$

où Ω représente la vitesse de rotation du rotor.

Le rotor subit un couple engendré par le champ tournant de la forme $\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}$. Soit ici :

$$\vec{\Gamma}(t) = M_0 B_0 (\cos(\Omega t) \sin(\omega t + \theta_0) - \sin(\Omega t) \cos(\omega t + \theta_0)) \vec{u}_z = M_0 B_0 \sin((\omega - \Omega)t + \theta_0) \vec{u}_z \quad (27)$$

Cette équation ne permet pas d'interpréter à elle seule les observations expérimentales

Expérience et interprétation

Experimentalement :

- Lorsque le moteur synchrone est directement alimenté par une tension de fréquence $50Hz$, celui-ci ne démarre pas.
- En réduisant la fréquence, le moteur démarre à des fréquences faibles. On peut ensuite augmenter la fréquence jusqu'à $50Hz$ sans que le moteur s'arrête de tourner.
- La constante de temps mécanique τ du moteur est important devant la période de la tension d'alimentation. Cette inertie mécanique fait que la machine n'est sensible en réalité qu'à la valeur moyenne des grandeurs électriques si la pulsation est trop importante (comportement de type filtre passe-bas).
- Lorsque le moteur est à l'arrêt ($\Omega = 0$ et $\omega = 100\pi rad.s^{-1}$),

$$\langle \vec{\Gamma}(t) \rangle = M_0 B_0 \langle \sin(\omega t + \theta_0) \rangle \vec{u}_z = \vec{0} \quad (28)$$

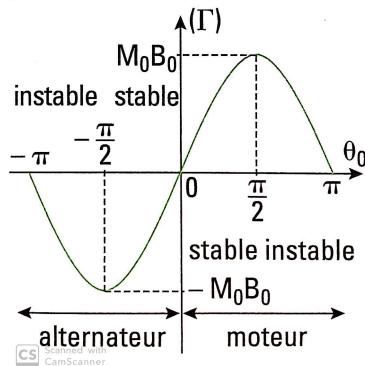
Et le moteur ne démarre pas. Lorsque la fréquence est diminuée, la période T des grandeurs électriques (et donc du champ magnétique) se rapproche de τ . A partir d'un certain seuil, le rotor est sensible à la valeur instantanée du couple et la machine se met à tourner à la vitesse angulaire Ω . En régime permanent, le couple électromagnétique moyen exercé sur le rotor s'écrit :

$$\langle \vec{\Gamma}(t) \rangle = M_0 B_0 \langle \sin(\theta_0) \rangle \vec{u}_z \quad (29)$$

puisque alors le rotor tourne au **synchronisme** ($\omega = \Omega$) d'où le nom de moteur **synchrone**.

D'après la valeur de $\langle \vec{\Gamma}(t) \rangle$, la valeur de θ_0 influe sur le couple. Cet angle est considéré comme la variable dont dépend le couple, c'est à dire que la machine adapte cette valeur pour qu'en régime permanent il y ait égalité du couple moteur et du couple résistant s'exerçant sur la machine.

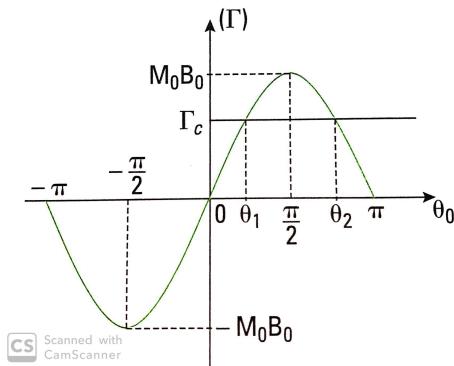
Le signe de θ_0 permet de définir le mode de fonctionnement de la machine. Si θ_0 est positif, il s'agit d'un couple moteur (B en avance par rapport à M). S'il est négatif, il s'agit d'un couple résistant (génératrice, M en avance par rapport à B).



Suivant le mode de fonctionnement apparaissent une zone de fonctionnement stable et une zone instable.

Si lors du fonctionnement du moteur, le couple résistant devient, en valeur absolue, supérieur à M_0B_0 , le moteur **décroche**, c'est à dire que ne pouvant pas fournir le couple nécessaire, il s'arrête.

Lorsque le moteur est soumis à un couple de charge $-\langle \vec{\Gamma}(t) \rangle$ inférieur à M_0B_0 , on obtient deux positions de fonctionnement θ_1 et θ_2 comme montre la figure.



- Pour $\theta_0 = \theta_1$: si le moteur accélère, le moment magnétique tourne plus rapidement que le champ tournant et le rattrape, donc l'angle θ_0 diminue. Si cet angle diminue, le graphe indique que le couple moteur diminue. Donc le moteur ralentit. Cette position d'équilibre est donc **stable**.
- Pour $\theta_0 = \theta_2$: si le moteur accélère, le moment magnétique tourne plus rapidement que le champ tournant et le rattrape, donc l'angle θ_0 diminue. Si cet angle diminue, le graphe indique que le couple moteur augmente, donc le moteur accélère. Cette position d'équilibre est donc **instable**.

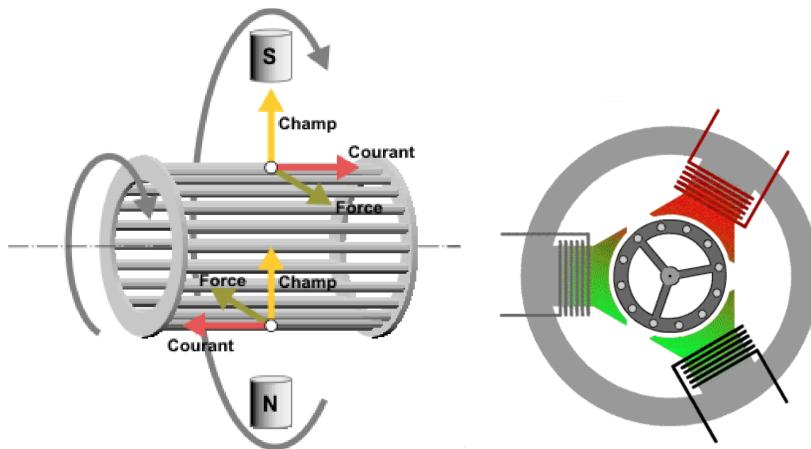
Conclusion moteurs synchrones : Les moteurs synchrones sont appréciés pour leurs vitesse rigoureusement constante, liée à la fréquence du réseau, par exemple ils sont utilisés en tant que programmeurs dans les électroménagers (lave-linge, four,...). Pour les applications industrielles, le moteurs synchrones est resté longtemps marginal car il présente deux inconvénients quand il est alimenté directement par le réseau : il ne démarre pas spontanément; si la charge augmente trop, le rotor décroche (il cale brusquement et se met à vibrer). Mettre en tant qu'inconvenient le fait que la machine ne démarre pas spontanément et aussi que sa vitesse de rotation est celle du réseau donc on pouvait pas la faire tourner à une vitesse variable (après on a découvert comment faire). La décrochage arrive dans toutes les machines quand on impose un couple plus grand que celui qu'elles peuvent supporter donc ce n'est pas une caractéristique qui définit la machine synchrone.

Dans les années 80, le développement des alimentations électroniques triphasées à fréquence réglable a révolutionné l'utilisation des moteurs synchrones, avec la génération des moteurs autopilotés. Dans ce type de moteurs, la fréquence des courants du stator est contrôlée par des capteurs mesurant en permanence la position du champ magnétique du rotor par rapport à la position du champ magnétique tournant. Les problèmes de démarrage et de décrochage sont alors résolus, et la vitesse devient réglable par une action extérieure sur la fréquence.

Utilisés pour la motorisation des véhicules réduits, des vélos à assistance électrique, des véhicules hybrides ou des TGV

3.3 Principe du moteur asynchrone

Le bobinage du stator, alimenté en courant alternatif, produit un champ magnétique tournant dont la vitesse est fixée par la fréquence du courant et le nombre de pôles du bobinage. Dans le rotor en fer, sont inclus des conducteurs en aluminium coulé, parallèles à l'axe, leurs extrémités étant toutes reliées entre elles par des anneaux de même métal pour former ce qu'on appelle la **cage à écureuil**. Il n'y a aucun contact électrique entre le rotor et l'extérieur. Le mouvement du champ tournant provoque des courants induits dans la cage en aluminium du rotor, les forces de Laplace sur ces courants produisent la rotation.

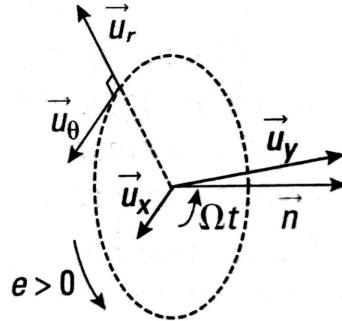


Le rotor peut être assimilé à un bobinage de résistance R , d'inductance propre L , comportant N spires, de section S et dans lequel on peut considérer le champ uniforme.

Le rotor tourne à la vitesse de rotation Ω et le champ tournant est de la forme :

$$\vec{B} = B_0 \cos(\omega t + \theta_0) \vec{u}_x + B_0 \sin(\omega t + \theta_0) \vec{u}_y \quad (30)$$

où θ_0 représente l'angle entre le champ tournant et l'axe de la spire à $t = 0$.



Cette bobine est le siège d'une f.é.m calculée à partir de la loi de Faraday :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (31)$$

où

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} \quad (32)$$

D'après la figure on a :

$$\Phi = NS \vec{B} \cdot \vec{n} \quad (33)$$

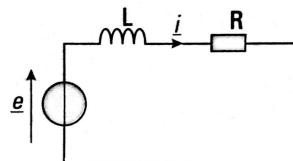
où $\vec{n} = \cos(\Omega t) \vec{u}_x + \sin(\Omega t) \vec{u}_y$ est le vecteur normal à la spire.

$$e = -\frac{d}{dt}(NSB_0(\cos(\omega t + \theta_0)\cos(\Omega t) + \sin(\omega t + \theta_0)\sin(\Omega t))) \quad (34)$$

$$e = -\frac{d}{dt}(NSB_0 \cos((\omega - \Omega)t + \theta_0)) = (\omega - \Omega)NSB_0 \sin((\omega - \Omega)t + \theta_0) \quad (35)$$

Cette f.é.m présente dans le bobinage en circuit fermé engendrant l'apparition d'un courant induit i . Elle est sinusoïdale et de pulsation $\omega - \Omega$. Nous pouvons alors utiliser la notation complexe pour définir ce courant induit.

Le bobinage peut être modélisé comme dans la figure suivante :



$$\underline{e} = (R + jL(\omega - \Omega))\underline{i} \quad (36)$$

d'où

$$i = \frac{(\omega - \Omega)NSB_0}{\sqrt{R^2 - L^2(\omega - \Omega)^2}} \sin\left((\omega - \Omega)t + \theta_0 - \text{Arctan}\left(\frac{L(\omega - \Omega)}{R}\right)\right) \quad (37)$$

On suppose par la suite $\varphi = \text{Arctan}\left(\frac{L(\omega - \Omega)}{R}\right)$.

Le bobinage parcouru par le courant i est assimilé à un moment magnétique :

$$\vec{M} = NSi\vec{n} = NSi(\cos(\Omega t)\vec{u}_x + \sin(\Omega t)\vec{u}_y) \quad (38)$$

\vec{M} subit un couple engendré par le champ tournant de la forme $\vec{\Gamma} = \vec{M} \wedge \vec{B}$. D'où :

$$\vec{\Gamma}(t) = NSiB_0(\cos(\Omega t)\sin(\omega t + \theta_0) - \sin(\Omega t)\cos(\omega t + \theta_0))\vec{u}_z \quad (39)$$

Or $\cos(\alpha)\sin(\beta) - \sin(\alpha)\cos(\beta) = \sin(\beta - \alpha)$, donc :

$$\vec{\Gamma}(t) = NSiB_0\sin((\omega - \Omega)t + \theta_0)\vec{u}_z \quad (40)$$

D'où :

$$\vec{\Gamma}(t) = \frac{(\omega - \Omega)(NSB_0)^2}{\sqrt{R^2 + L^2(\omega - \Omega)^2}} \sin((\omega - \Omega)t + \theta_0 - \varphi)\sin((\omega - \Omega)t + \theta_0)\vec{u}_z \quad (41)$$

Or, $2\sin(a)\sin(b) = \cos(a - b) - \cos(a + b)$, ce qui donne :

$$\vec{\Gamma}(t) = \frac{(\omega - \Omega)(NSB_0)^2}{2\sqrt{R^2 + L^2(\omega - \Omega)^2}} (\cos(\varphi) - \cos(2(\omega - \Omega)t + 2\theta_0 - \varphi))\vec{u}_z \quad (42)$$

De même que pour la machine synchrone, le rotor du fait de son inertie, n'est sensible qu'à la valeur moyenne du couple, c'est à dire :

$$\langle \vec{\Gamma}(t) \rangle = \frac{(\omega - \Omega)(NSB_0)^2}{2\sqrt{R^2 + L^2(\omega - \Omega)^2}} \cos(\varphi)\vec{u}_z \quad (43)$$

On pose : $(\omega - \Omega) = g\omega$, où g est appelé le glissement.

De plus, $\cos(\varphi) = \sqrt{\frac{1}{1+\tan^2(\varphi)}} = \frac{R}{\sqrt{R^2+L^2(\omega-\Omega)^2}}$, soit :

$$\langle \vec{\Gamma}(t) \rangle = \frac{g\omega(NSB_0)^2 R}{2(R^2 + g^2 L^2 \omega^2)} \vec{u}_z \quad (44)$$

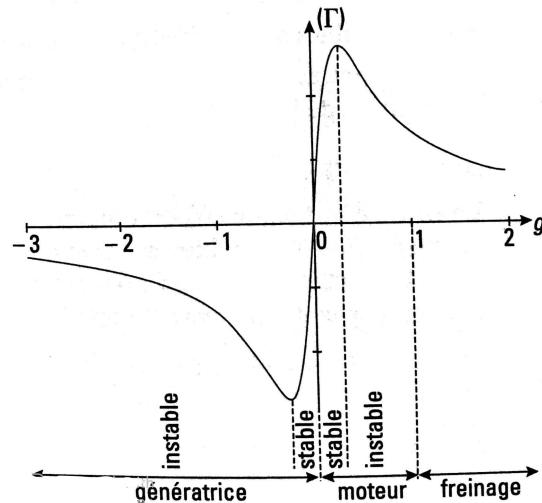
Contrairement au moteur synchrone, le moteur asynchrone possède un couple nul au synchronisme ($g=0$). Il tourne donc à une vitesse différente de la pulsation d'alimentation, d'où sa dénomination, moteur asynchrone.

En règle générale, la valeur du glissement est faible et le rotor tourne à une vitesse de rotation proche de la valeur de pulsation. La valeur du glissement dépend de la charge mécanique (tout comme l'angle θ_0 du moteur synchrone dépend de la charge).

Remarquons que le couple de démarrage, obtenu pour $g = 1$, est non nul :

$$\langle \vec{\Gamma}(t) \rangle = \frac{\omega(NSB_0)^2 R}{2(R^2 + L^2\omega^2)} \vec{u}_z \quad (45)$$

Tracer plutôt la caractéristique du couple en fonction de la vitesse. Dans le cas où la machine fonctionne en mode générateur, hyperchronisme. Dans le cas où elle fonctionne en mode moteur, ?. Dans cette machine il n'est pas nécessaire de feuilleter le rotor car il n'y a pas de pertes fer au rotor car la vitesse du stator est de l'ordre de la vitesse du rotor donc le stator voit $\Omega - \Omega_s \sim 0$ donc feuilleter n'est pas nécessaire, il y aura des pertes par effet Joule. La fabrication de ces machines est plus simple car il n'y a pas d'alimentation dans le rotor.



Sur la figure on observe :

- Lorsque la vitesse de rotation est positive et le couple positif, la machine fonctionne en moteur puisque l'étude est réalisée en convention récepteur : ce qui correspond à la zone $g \in (0, 1)$.
- Lorsque la vitesse de rotation est négative (rotation du rotor en sens inverse du champ tournant) et le couple moyen positif, le couple est résistant et freine la machine : c'est ce qui correspond à la zone $g > 1$. Une étude détaillé dans cette zone montre que la machine ne peut fournir aucune puissance électrique à l'extérieur Il ne s'agit donc pas d'un comportement génératrice. La machine fonctionne en mode freinage.
- Lorsque la vitesse de rotation est positive et supérieure à la pulsation du champ tournant et le couple négatif, la machine fonctionne en génératrice : c'est ce qui correspond à la zone $g < 1$

Nous remarquons que le moteur asynchrone possède un couple maximal et que la zone de fonctionnement stable est réduite. Nous vérifions ainsi que le glissement doit être faible en régime établi.

Conclusion asynchrone : Les moteurs asynchrones triphasés sont très utilisés dans l'industrie car il sont bon marché, robustes et sans entretien. Branchés directement au réseau triphasé, sa vitesse varie seulement de quelques pour cent entre le fonctionnement à vide et à plein charge, restant toujours un peu plus faible que la vitesse du champ magnétique tournant. De la même façon que pour les moteurs asynchrones, jusqu'aux années 80 le moteur asynchrone n'était pas utilisable pour les applications en vitesse variable. Actuellement, l'électronique de puissance permet de produire des tensions triphasées à fréquence variable.

Conclusion

Type de moteur	Caractéristiques générales	Remarques	Emploi
Moteur à courant continu (MCC)	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse de rotation facilement commandée par la dpp d'alimentation - S'adapte au couple résistant par faible diminution de vitesse. - Possibilité de régulation 	<ul style="list-style-type: none"> - Fragilité du système collecteur-balais - Le moteur série fonctionne en alternatif (moteur universel) - Depuis années 80, progrès de l'électronique de puissance. 	<ul style="list-style-type: none"> - Grande vitesse de rotation possible - Utilisation en faible puissance dans l'automobile (essuie-glaces, lève-vitres...). En grande puissance (traction électrique, laminoirs)
Moteur synchrone	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse de rotation cte w/n (limité à 3000 tr/min pour alimentation 50 Hz) - Décrochage si charge trop importante - Nécessité d'un moteur auxiliaire de démarrage - Le rendement peut dépasser 90 % 	<ul style="list-style-type: none"> - Depuis années 80, progrès de l'électronique de puissance : variation de vitesse par alimentation à fréquence variable, résolution des problèmes de démarrage et de décrochage (moteurs auto-pilotés). 	<ul style="list-style-type: none"> - Emploi en très faible puissance (programmateurs, commande de disques durs d'ordinateur) et en haute puissance dans les machines où on désire une synchronisation de vitesse
Moteur asynchrone	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse de rotation légèrement inférieur à w/n (limité à 3000 tr/min pour alimentation 50 Hz) - Adaptation à augmentation de la charge avec faible perte de vitesse - Rendement voisin de 80 % 	<ul style="list-style-type: none"> - Actuellement vitesses plus élevées grâce à des alimentations à fréquence variable - Possibilité de régulation de vitesse 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible puissance (pompes de vidange, ventilateurs...) et grande puissance en alimentation triphasée.

Questions que je me pose

- Transformateur
- Alternateur
- Dynamo : génératrice à courant continu, inventé par Zénobe Théophile Gramme (1826-1901)
- avantages et inconvénients de la machine à courant continu par rapport aux moteurs synchrones et asynchrones.
- montage hacheur
- galvanomètre : mesure le courant induit
- différence entre force de Lorentz et force de Laplace
- moteur universel
- moteur pas à pas
- xq toute la puissance est dissipée par effet Joule dans l'inducteur de la MCC ?

- sens courant induit dans la cage à écureuil ?