

Conversion de puissance électromécanique

Dans tout ce qui suit, la structure des machines n'est pas à connaître. En revanche, les analyses qualitatives et les mises en équation éventuelles sont à savoir refaire si la machine est décrite par un énoncé.

III.2 - Machine à courant continu à entrefer plan (à rayons)

a) Structure

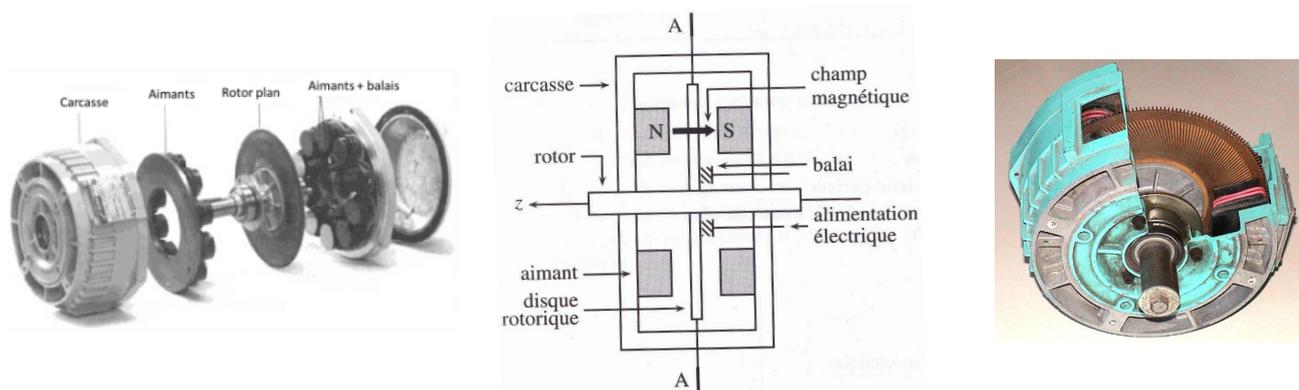


Figure 1 – MCC à entrefer plan. Vue éclatée (gauche), schéma en coupe (centre) et photo d'une machine ouverte (droite), permettant de bien voir les rayons assurant le transport du courant. L'axe de rotation de la MCC est l'axe (Oz).

Comme toute machine tournante, une MCC est constituée d'un **stator** fixe et d'un **rotor** mobile. Le stator est constitué d'une carcasse et de deux supports fixes circulaires sur lesquels sont montés des aimants qui produisent un champ magnétique stationnaire, parallèle à l'axe de rotation.

Le rotor est constitué d'un arbre et d'un disque, solidaire de l'arbre, sur lequel sont imprimés de nombreux circuits électriques radiaux (voir figure de droite), séparés par un isolant. Des contacts métalliques frottants appelés **balais** assurent le passage du courant entre les circuits électriques mobiles du rotor et l'alimentation, liée au stator. Un câblage astucieux du rotor couplé à une répartition bien choisie des aimants du stator permet une alimentation uniquement à partir des balais.

On appelle **entrefer** l'espace situé entre les aimants : il s'agit ici du plan du rotor, noté AA sur le schéma central, d'où la dénomination de MCC à entrefer plan.

b) Modélisation et analyse physique

La machine est modélisée par une roue d'axe \vec{e}_z plongée dans un champ magnétique $\vec{B} = -B\vec{e}_z$, voir figures 2 et 3. Un courant I continu (c'est-à-dire constant) circule le long des rayons.

- **Analyse en générateur**

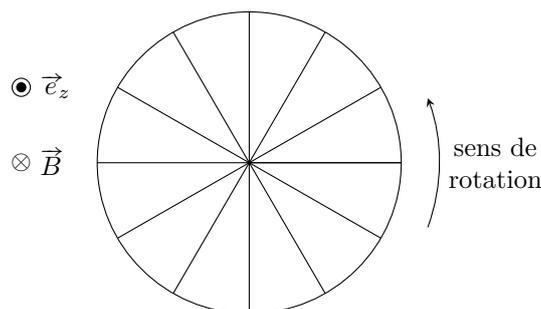


Figure 2 – Modélisation d'une MCC à entrefer plan dans le cas générateur. On suppose sur ce schéma que la rotation est forcée dans le sens positif autour de \vec{e}_z .

Espace 1

- **Analyse en moteur**

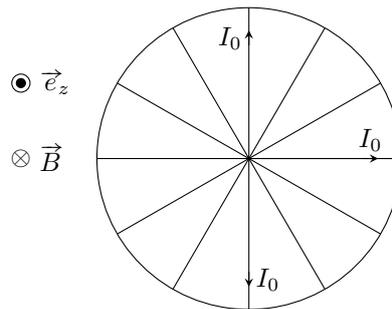


Figure 3 – Modélisation d'une MCC à entrefer plan dans le cas moteur. On suppose sur ce schéma que le sens réel du courant est forcé dans chaque rayon selon $+\vec{e}_r$.

Espace 2

c) **Lois de comportement de la machine à courant continu**

Remarque : Vous utilisez ces lois de comportement en les admettant en cours de SI. Les conventions utilisées ne sont pas forcément les mêmes, il peut donc y avoir un changement de signe.

- **Lien entre couple et courant**

Force de Laplace exercée sur un rayon :

Espace 3

Comme tous les rayons se comportent de la même façon, on en déduit la première loi de comportement.

Espace 4

- **Lien entre fém induite et vitesse de rotation**

La géométrie de la machine à courant continu en fait une exception à la loi de Faraday : le flux magnétique au travers du rotor est constant ... mais il y a bel et bien induction. On utilise donc directement la conservation de la puissance :

Espace 5

Espace 6

Remarque : Utiliser une force électromotrice e est le plus naturel du point de vue du physicien. En revanche, le plus naturel du point de vue des applications est d'introduire la force contre-électromotrice $e' = -e$, abrégée fcém, qui est donc orientée en convention récepteur. C'est le choix classique dans un énoncé de SI. La deuxième loi de comportement s'écrit donc $e' = +K\omega$.

d) Utilisations

Les MCC à entrefer plan permettent d'atteindre une vitesse de rotation très stable et très bien contrôlée. Ce contrôle se fait directement par la tension d'alimentation, ce qui est un gros avantage. Elles permettent en outre une très grande accélération angulaire. Leur géométrie plate les rend très appréciées lorsqu'il faut assurer un mouvement de rotation dans un volume limité. Leur limitation principale réside dans leur faible puissance, 1 kW environ, et dans l'entretien régulier qu'exige l'usure (par frottement) des balais.

On les retrouve ainsi dans la motorisation des fauteuils roulants, dans celle de pompes médicales, ou encore en informatique, par exemple pour assurer la mise en rotation de ventilateurs.

III.3 - Machine à courant continu à entrefer cylindrique (à spires)

┆ Voir aussi l'animation dont le lien est donné sur le site de la classe.

a) Structure et principe de fonctionnement

La géométrie d'une MCC à spires, représentée figure 4, diffère de celle d'une MCC à entrefer plan. Le stator est fait d'un matériau magnétique bobiné, permettant comme pour un transformateur de contrôler les lignes de champ pour produire un champ radial dans l'entrefer. Sur le rotor sont bobinées diamétralement plusieurs spires rectangulaires. Ces spires sont montées en série pour additionner les contributions en termes de couple et de force électromotrice. Les lois de comportement de la MCC à entrefer plan s'appliquent ici également, et des relations du type

$$e = -K\omega \quad \text{et} \quad \Gamma = Ki$$

sont toujours valable. Encore une fois, le câblage tant du rotor que du stator est à adapter à l'utilisation voulue de la machine. En fonction des valeurs de i et ω , une MCC peut fonctionner en moteur (consomme une puissance électrique et délivre une puissance mécanique) ou en génératrice (consomme une puissance mécanique et délivre une puissance électrique).

Un point important de la technologie des MCC à spires est l'existence d'un collecteur, aussi appelé commutateur, qui permet d'inverser le sens du courant circulant dans une spire à chaque demi-tour. S'il n'existait pas, les spires se bloqueraient dans leur position d'équilibre où leur moment magnétique s'alignerait avec le champ créé par le stator, comme représenté sur le schéma central de la figure 5. Le commutateur frotte sur la surface de la bague tournante, le contact électrique étant assuré à nouveau par des balais.

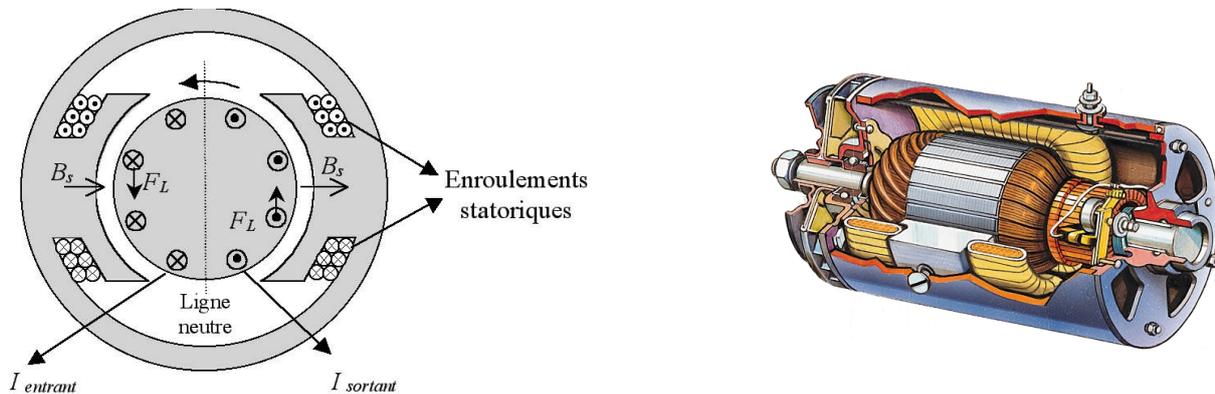


Figure 4 – Principe d’une MCC à spires. Vues en coupe et en perspective d’une machine à courant continu à spires.

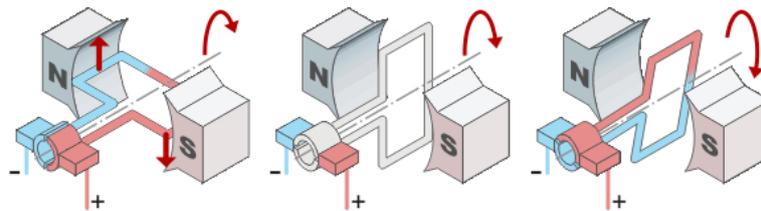


Figure 5 – Nécessité d’un collecteur. En l’absence de collecteur permettant d’inverser le sens du courant dans la spire rectangulaire, le couple de Laplace s’exerçant sur celle-ci s’inverserait à chaque demi-tour et tendrait à l’aligner en position « verticale », le long de la ligne neutre de la machine.

b) Utilisations

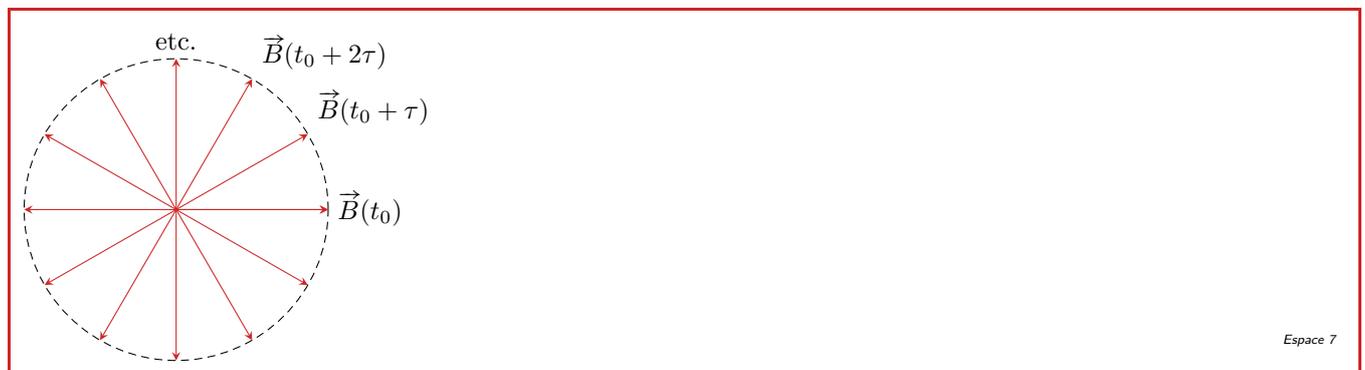
Jusqu’en 1975, la MCC à spires était la seule solution technique permettant d’obtenir une vitesse de rotation contrôlable, avec inversion possible de son sens. On en retrouvait donc à peu près partout, notamment dans les premiers trains électrifiés.

Comme pour la MCC à entrefer plan, un atout majeur de la MCC à spires est le très bon contrôle de la vitesse de rotation, directement proportionnelle à la tension d’alimentation. De plus, une MCC peut être alimentée par une batterie continue autonome comme une pile. En contrepartie, leur vitesse de rotation et leur puissance sont limitées, pas suffisantes pour toutes les applications, et les frottements au niveau du collecteur induisent des pertes notables et imposent un entretien régulier des balais. On les rencontre aujourd’hui dans tous les systèmes tournants de petite taille, aussi bien dans un portail automatique qu’en voiture ou dans les jouets.

Une autre utilisation très répandue de la MCC mais cette fois en tant que générateur est la mesure d’une vitesse de rotation, grâce à la mesure de f.é.m. qui est lui est proportionnelle. On parle alors de génératrice tachymétrique.

IV - Convertisseurs en rotation dans un champ tournant

IV.1 - Production d’un champ magnétique tournant



Un champ tournant est produit ou bien par mise en rotation d’un aimant permanent, ou bien par superposition de champs variables judicieusement choisis.

Exemple : Utilisation de deux bobines perpendiculaires, voir figure 6. Chaque bobine crée un champ proportionnel à l'intensité qui la parcourt.

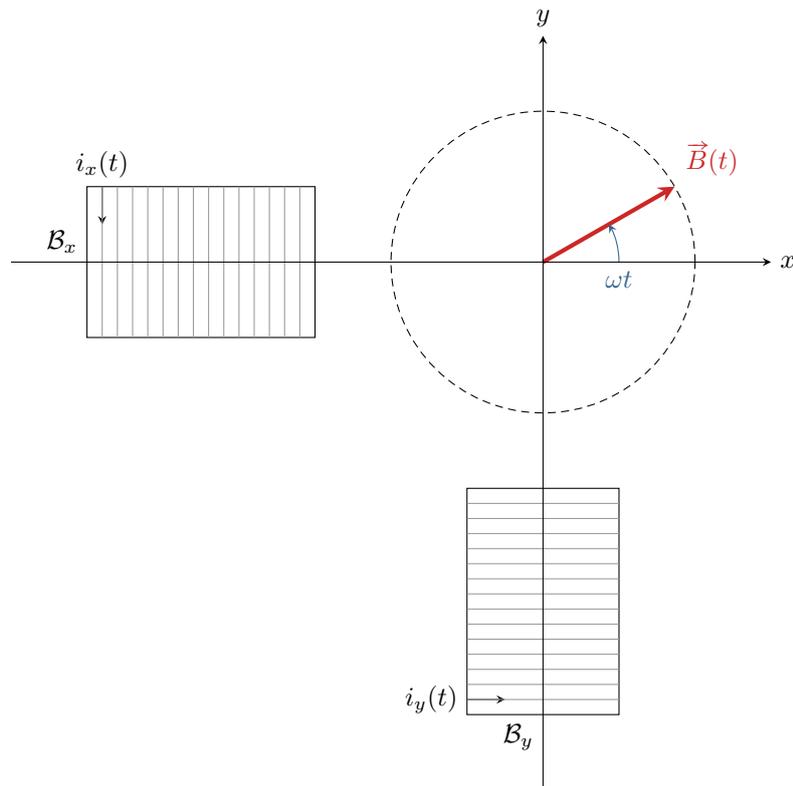


Figure 6 – Production d'un champ tournant.

Champ produit par la bobine \mathcal{B}_x :

Espace 8

Champ produit par la bobine \mathcal{B}_y :

Espace 9

Conclusion :

Espace 10

Espace 11

En pratique : EDF délivre du courant triphasé, c'est-à-dire qu'un câble électrique contient en fait trois câbles, appelés phases, parcourus par des courants déphasés de $2\pi/3$. Dans un usage domestique, les phases sont réparties entre les différentes habitations. Dans un usage industriel, les trois phases peuvent être reliées à une même machine.

↪ schématiquement, les champs tournants industriels sont produits par trois bobinages décalés de $2\pi/3$, chaque bobine étant alimentée par une phase de la tension d'alimentation de la machine.

IV.2 - Machine synchrone

Une machine synchrone consiste à placer un rotor aimanté (aimant permanent ou spire parcourue par un courant constant) au centre de plusieurs bobines pouvant créer un champ tournant. Elle peut être utilisée en moteur ou en génératrice.

a) Principe de fonctionnement

• Analyse en générateur

En fonctionnement générateur, c'est le mouvement du rotor aimanté qui est imposé de l'extérieur, mais les bobines ne sont parcourues par aucun courant extérieur. Le flux magnétique créé par le rotor au travers des bobines du stator dépend du temps, il y a donc induction ... et création dans les bobines d'un courant induit dépendant du temps. Si le rotor tourne à vitesse angulaire constante, le courant induit créé est sinusoïdal de même fréquence.

• Analyse en moteur

| Voir aussi l'animation dont le lien est donné sur le site de la classe.

En fonctionnement moteur, un courant est imposé dans les bobines et crée un champ tournant.

Espace 12

Le champ et le rotor d'une machine synchrone tournent à la même vitesse angulaire, d'où la dénomination.

Si le moteur entraîne une charge exerçant sur le rotor un couple $\vec{\Gamma}_r$ constant, alors l'application du TMC au rotor en régime permanent donne

$$\vec{\Gamma}_{\text{magn}} + \vec{\Gamma}_r = \vec{0}.$$

Conséquences :

Espace 13

b) Utilisations

Par rapport à une machine à courant continu, une machine synchrone est plus robuste et plus simple à fabriquer. Comme elle ne comporte pas de balais, son rendement est également nettement supérieur. Les principaux mérites du moteur synchrone sont l'excellent contrôle qu'il permet sur la vitesse de rotation (il suffit de contrôler la fréquence du champ), tout en pouvant fournir une très forte puissance. L'inconvénient majeur réside dans son démarrage : en raison de l'inertie du rotor, il ne peut pas se mettre à tourner spontanément à n'importe quelle fréquence. Une augmentation progressive de la fréquence de commande ou l'utilisation d'une autre machine (par exemple à courant continu) sont donc nécessaires pour démarrer un tel moteur.

La principale application des machines synchrones est, de loin, celle des alternateurs qui équipent toutes les centrales électriques. On retrouve également des moteurs synchrones dans des systèmes industriels exigeant une forte puissance (broyeur de minerai par exemple), et dans les motrices du TGV Atlantique.

IV.3 - Machine asynchrone

Une machine asynchrone a une structure très proche de celle d'une machine synchrone, à ceci près que le rotor est désormais composé d'un conducteur en court-circuit, c'est-à-dire non-alimenté. Les rotors habituellement utilisés sont ou bien bobinés sur eux-mêmes, ou bien en cage d'écureuil, voir figure 7.



Figure 7 – Rotor en cage d'écureuil. Un rotor en cage d'écureuil est formé d'un ensemble de barres métalliques conductrices parallèles à l'arbre de la machine et reliant deux anneaux conducteurs. La photographie est celle du rotor d'une éolienne, générateur asynchrone.

a) Principe de fonctionnement en moteur

Espace 14

Point essentiel :

La vitesse angulaire du rotor d'un moteur asynchrone est nécessairement plus faible que celle du champ, d'où la dénomination de machine asynchrone, c'est-à-dire non-synchrone.

Espace 15

b) Caractéristique couple-vitesse angulaire

Plaçons-nous en régime permanent, sans préjuger du fonctionnement en moteur ou en génératrice de la machine asynchrone.

Il est possible de calculer explicitement le couple magnétique Γ subi par le rotor en fonction de sa vitesse (algébrique) angulaire de rotation ω_r . En calculant sa valeur moyenne $\langle \Gamma \rangle$ (seule pertinente à cause de l'inertie du rotor), on obtient la courbe représentée figure 8.

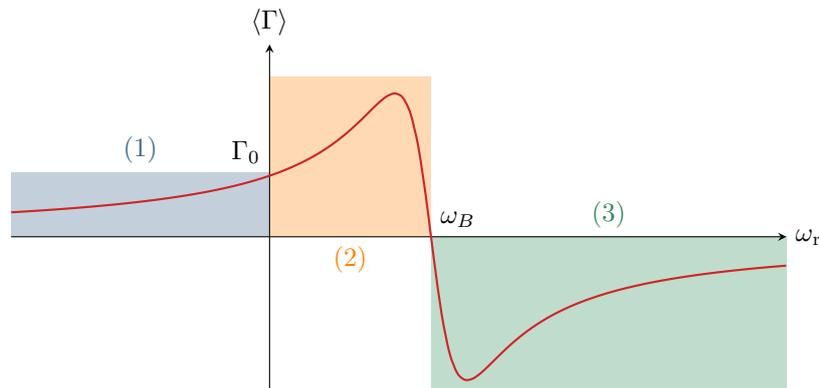


Figure 8 – Couple magnétique moyen subi par le rotor d’une machine asynchrone. $\langle \Gamma \rangle$ est la valeur moyenne du couple magnétique subi par le rotor, ω_r la vitesse angulaire algébrique du rotor et $\omega_B > 0$ la vitesse angulaire du champ tournant.

On y distingue plusieurs zones, correspondant à plusieurs fonctionnements possibles de la machine asynchrone :

▷ Zone (1) : $\omega_r < 0$ donc le rotor tourne en sens opposé au champ.

Espace 16

▷ Γ_0 est le couple au démarrage de la MAS, c’est-à-dire lorsque $\omega_r = 0$: si la charge mise en rotation exerce un couple supérieur à Γ_0 , la MAS ne peut pas démarrer seule.

▷ Zone (2) :

Espace 17

▷ Cas de synchronisme $\omega_r = \omega_B$:

Espace 18

▷ Zone (3) :

Espace 19

c) Utilisations

Les moteurs asynchrones sont les moteurs les plus largement utilisés, grâce à leur rapport coût/puissance le plus faible et des rendements très proches de 1 rendus possibles par l’absence de balais. Ces moteurs sont utilisés dans de nombreuses machines tournantes nécessitant un couple important sans pour autant requérir une vitesse de rotation précise. Ils sont robustes, bon marché (pas d’aimant !), sans entretien. Un inconvénient est le faible couple au démarrage, souvent inférieur au couple résistant dû à la charge à entraîner voire même aux frottements. Cependant, des solutions techniques simples existent pour résoudre ce problème qui n’en est pas vraiment un. Au quotidien, on trouve des moteurs asynchrones dans toutes les applications industrielles et domestiques de moyenne puissance : machines outils, congélateurs, climatiseurs, machines à laver, pompes diverses, etc. Ils équipent aussi de nombreux TGV, dont la ligne Eurostar.

Une machine asynchrone ne possède pas d’aimants permanents. Ainsi, si le stator n’est pas alimenté, une machine asynchrone ne peut pas fonctionner en génératrice. Si la vitesse de rotation du rotor devient supérieure à la vitesse de rotation du champ tournant produit par le stator, il y a alors production d’énergie électrique. Ces génératrices sont très utilisées dans l’industrie éolienne.