

Quelle que soit la source du courant - hydrogène, autre pile à combustible ou batterie chimique - un des enjeux du véhicule électrique est le choix du moteur permettant la propulsion des roues à partir de la puissance délivrée par la batterie. L'intérêt pour la traction électrique automobile est principalement dû aux performances des moteurs électriques (fort rendement, réversibilité, maîtrise du couple...), qu'il s'agisse des technologies classiques (Machines à Courant Continu : MCC, Machines Synchrones : MS, Machines ASynchrones MAS) ou plus confidentielles (Machines à Réductance Variable : MRV). Reconnus pour leur très bon rendement et pour leur réversibilité énergétique, les machines électriques tournantes possèdent une autre propriété très intéressante pour l'application à la traction automobile : la facilité de maîtrise de leur couple sur une très large plage de vitesses; dans le domaine de la traction automobile, que la motorisation soit thermique, électrique ou hybride, on souhaite disposer à basse vitesse d'un couple maximal, puis au-delà du point de fonctionnement nominal, on doit pouvoir augmenter le régime, tout en gardant la puissance constante.

Pour un moteur thermique, la propriété d'avoir du couple à basse vitesse est très difficile alors qu'elle apparait comme presque « naturelle » pour le moteur électrique. Cet « avantage concurrentiel » implique de savoir comment on génère un couple moteur à partir de l'énergie électrique.

1) - LA MACHINE À COURANT CONTINU (caractéristique de traction idéale)

Les MCC sont constituées d'un stator portant le circuit inducteur (un bobinage parcouru par un courant ou un aimant permanent) qui génère le champ magnétique constant et d'un rotor sur lequel est bobiné le circuit induit parcouru par le courant et d'un système balais-collecteur permettant l'inversion du courant. L'effet du champ magnétique sur chacune des spires de l'induit crée des couples de forces entraînant sa rotation. C'est la somme des moments des couples de forces qui constitue le moment du couple électromagnétique (C_{em}) de la MCC.

Celui-ci s'exprime par la formule $C_{em} = K\Phi I$ où : K est un coefficient de proportionnalité qui dépend du nombre de paires de pôles magnétiques, du nombre de conducteurs, et du nombre de voies d'enroulement ; Φ est le flux magnétique créé par l'inducteur, il est donc constant lorsque l'inducteur est à aimant permanent et dépend du courant d'excitation lorsque l'inducteur est bobiné ; I est l'intensité du courant traversant l'induit. Une seconde relation, $E = K\Phi\Omega$, permet de manière symétrique de lier la force électromotrice E (tension à vide) à la vitesse de rotation angulaire du rotor Ω . Ces deux relations permettent de comprendre pourquoi les moteurs électriques conviennent pour décrire la caractéristique de traction idéale. En effet, pour obtenir le fonctionnement à basse vitesse (voire nulle), il « suffit » de maîtriser le champ magnétique inducteur d'une part (et donc le flux), et l'intensité du courant induit d'autre part pour obtenir le couple voulu et ceci indépendamment de la vitesse du rotor qui est pilotée par la tension d'alimentation. En haute vitesse, on peut aussi travailler à puissance constante en diminuant le flux inducteur. En effet, si E est maintenu constant, une diminution du flux ? entraîne une augmentation de la vitesse angulaire Ω . On parle alors de défluxage.

La simplicité du pilotage de la vitesse des MCC a naturellement été exploitée dans les premières applications industrielles de traction électrique (automobile, ferroviaires...). Toutefois, deux handicaps majeurs ont rendu cette technologie obsolète. Tout d'abord, le système balais-collecteur est le siège d'arcs électriques d'autant plus importants que la puissance de la machine augmente. Il est par ailleurs fragile et limite la vitesse de fonctionnement de ces moteurs. De plus, la puissance de ces machines étant principalement liée à l'intensité des courants d'induit, une augmentation de la puissance implique un accroissement de la masse de cuivre et donc du poids du rotor. La puissance massique de la MCC est donc beaucoup plus faible que celle de ses concurrentes directes, à savoir, les Machines synchrones (MS) et asynchrones (MAS).

2) - LES MACHINES À COURANT ALTERNATIF

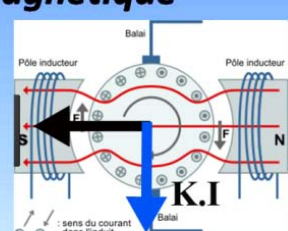
Les machines synchrones et asynchrones triphasées sont les plus fréquemment utilisées dans les applications de traction électrique moderne que ce soit en mode tout électrique (Twizy, Zoé, Leaf, e-Golf) ou hybrides (Prius, BMW i8, Mercedes-Benz S500 Plug-In Hybrid...). Le couple électromagnétique est

Couple électromagnétique

$$C_{em} = K \cdot I \cdot \phi \cdot \sin \psi$$

avec ψ angle entre le champ de l'inducteur et celui de l'induit.
Pour la machine à courant continu, cet angle est égal à $\pi/2$

$$\Rightarrow C_{em} = K \cdot I \cdot \phi$$



: sens du courant dans l'induit

Puissance électromagnétique

$$P_{em} = E \cdot I \qquad C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{E \cdot I}{\Omega} = K \cdot I \cdot \phi(\psi)$$

obtenu par l'interaction d'un champ inducteur généré dans le stator par un système de courants triphasés et d'un champ magnétique porté par le rotor qui peut être soit constant (machine synchrone à rotor bobiné ou à aimant permanent), soit induit (machine asynchrone).

a) - Obtention du couple dans une machine synchrone

La génération du couple dans une machine synchrone peut se comprendre simplement. Plaçons un aimant de moment magnétique M , libre de tourner autour d'un axe, dans un champ magnétique uniforme B . Le moment magnétique est alors soumis à un couple électromagnétique dont le moment est $C_e = M B \sin \theta$

On peut alors déduire aisément que : le moment du couple électromagnétique est maximal pour

$\theta = \pi/2$, le champ magnétique est alors perpendiculaire à l'axe magnétique de l'aimant ; si la direction de B est fixe, l'aimant s'aligne sur la direction de B et le mouvement s'arrête ; pour entraîner l'aimant en rotation continue, il faudra produire un champ magnétique tournant. Si de plus on veut conserver le couple constant il faudra conserver l'angle θ constant, autrement dit : l'aimant et le champ tournant doivent tourner à la même vitesse.

Dans un moteur synchrone, le rotor porte des aimants permanents (MSAP) ou un inducteur bobiné (MSRB) et tient le rôle de l'aimant dans l'expérience précédente.

Le stator porte trois bobines décalées de $2\pi/3$ dans l'espace et alimentées par trois courants triphasés équilibrés qui créent un champ tournant dans l'entrefer de la machine.

Ce champ tourne à la vitesse n_s (en tr.min-1) imposée par la fréquence des courants statoriques f et dépendant de p , nombre de paires de pôles magnétiques de la machine ($f = p.n_s/60$).

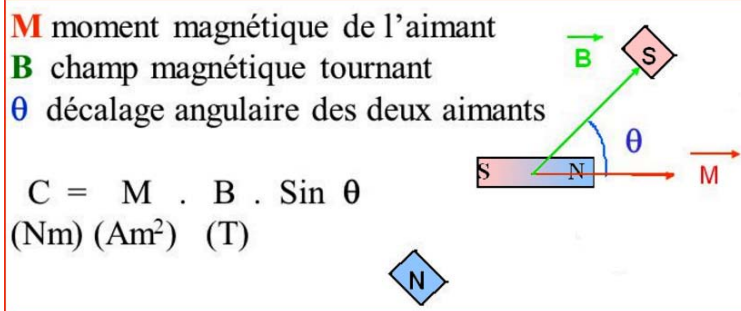
En régime permanent, l'expression du moment du couple électromagnétique (C_e) est alors très proche de celle donnée précédemment pour une MCC : $C_e = K \Phi I \cos \varphi$. Le coefficient K dépend des caractéristiques de la machine (nombre de paires de pôles magnétiques) ; Φ représente le flux magnétique produit par l'inducteur. Il est proportionnel à l'aimantation M de l'expérience précédente ; I correspond à la valeur efficace en régime permanent du courant dans une phase du stator. I permet de modifier l'amplitude du champ magnétique tournant au stator ; φ est relié à l'angle θ précédent par la relation $\varphi = \pi/2 - \theta$.

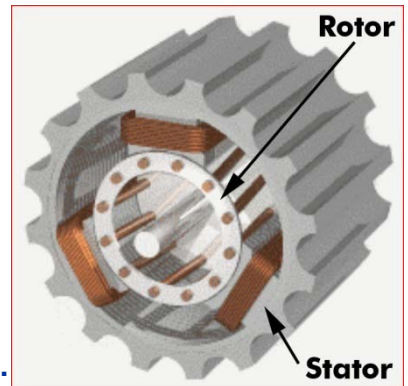
Un couple souhaité est alors obtenu, comme pour la MCC, en fixant : la valeur du champ magnétique créé par la roue polaire grâce au courant qui traverse son enroulement (dans le cas d'aimants cette valeur n'est pas réglable) ; la valeur du courant dans les enroulements statoriques ; la valeur de l'angle entre le rotor et le champ magnétique tournant (θ ou φ). La réalisation de cette dernière condition est confiée à l'autopilote. Un capteur de position est placé sur le stator pour repérer la position du rotor et provoquer l'alimentation des bobines qui convient afin de conserver le champ tournant statorique à la même distance angulaire du champ rotorique. Ce modèle d'autopilote est limité au fonctionnement en régime permanent ou lentement variable. Pour piloter la MS dans les régimes transitoires, il faut adopter un formalisme plus complexe mettant en jeu la transformée mathématique de Park.

Dans la machine synchrone, surtout si l'inducteur est à aimants, la quasi-totalité des pertes est localisée au stator ce qui facilite le refroidissement et la surveillance de température. Une machine synchrone MS, à puissance égale, est plus petite qu'une machine à courant continu MCC et moins coûteuse. En revanche, la nécessité d'un capteur, d'une électronique de commutation de puissance et d'un système de contrôle plus complexes font que, globalement, l'ensemble convertisseur machine reste souvent plus coûteux que celui à collecteur mécanique. Les performances d'accélération des moteurs à aimants sont améliorées grâce essentiellement à un moment d'inertie réduit. La Machine (Synchrone) à Commutation Electronique MCE a besoin d'une connaissance de la position relative du rotor par rapport au stator pour réaliser la synchronisation des courants d'induits avec le flux inducteur, c'est à dire l'autopilote.

b) - Obtention du couple dans une machine asynchrone

Le stator d'une machine asynchrone a la même structure que celui d'une machine synchrone. Les grandeurs statoriques sont alternatives, soit sinusoïdales, soit en forme de créneaux (alimentation par convertisseur). Lorsque les trois courants sont sinusoïdaux, ils créent un champ tournant





à la vitesse n_s (en tr.min-1), avec $n_s = f.60/p$ où f est la fréquence des courants statoriques et p le nombre de paires de pôles. Le rotor peut être à cage ou bobiné. Il est constitué d'un circuit de conducteurs en aluminium ou en cuivre court-circuités sur eux-mêmes et d'un circuit magnétique réalisé par un empilement de tôles magnétiques. Le champ tournant statorique crée des courants induits dans les conducteurs du rotor. Ces courants interagissent avec le champ statorique pour créer un couple qui tend à s'opposer à la cause qui lui a donné naissance (loi de Lenz). Le rotor est donc entraîné à la poursuite du champ statorique avec un glissement $g = (n_s - n)/n_s$. En fonctionnement le rotor tourne à une vitesse n .

3) - ANALYSE DES LIMITES ET OPTIMISATION DU RENDEMENT - Les pertes dans les machines -

En régime permanent, les rendements des moteurs électriques sont généralement très bons (supérieurs à 80 % pour les puissances supérieures à quelques dizaines de kW utilisées dans la traction automobile). Un effort constant est tout de même mené pour continuer à améliorer ces rendements dans toutes les phases de fonctionnement en diminuant les sources de pertes et en optimisant le refroidissement. Les pertes dans les machines sont de trois natures : pertes par effet Joule provoquées par la circulation des courants dans le stator et/ou le rotor ; pertes magnétiques qui sont dues aux courants de Foucault (induit) et au phénomène d'hystérésis ; pertes mécaniques dues aux frottements.

A) - PERTES JOULE - Les pertes Joule dans les conducteurs électriques dépendent de la densité surfacique de courant, de la résistivité du conducteur considéré (cuivre ou aluminium), mais aussi de la géométrie de la section du conducteur.

Lorsqu'on souhaite augmenter la puissance d'une machine, on en vient rapidement à augmenter l'intensité du courant qui traverse ses bobinages. Il devient alors très intéressant d'optimiser la densité de courant admissible dans chaque conducteur.

Dans le cas des machines synchrones et asynchrones, la chaleur produite par effet Joule dans les conducteurs du stator se transfère essentiellement par convection et rayonnement au travers de la surface de l'entrefer et dans une moindre mesure par conduction au travers des matériaux constituant le stator. Au niveau du rotor, le transfert de chaleur se fera lui aussi par l'entrefer ou par conduction au travers de l'arbre moteur. L'augmentation de la densité de courant admissible dans les conducteurs sera directement liée à la capacité à évacuer efficacement l'énergie produite au travers de l'entrefer ou par conduction à l'intérieur des matériaux. La forme du conducteur est plus au moins propice à l'augmentation de la densité de courant admissible. En effet, plus la surface d'évacuation sera importante, plus le refroidissement sera aisé. Ainsi, si l'on souhaite augmenter le courant dans un conducteur cylindrique, il est préférable d'utiliser un grand nombre de petits conducteurs qu'un seul conducteur de section plus importante. Ce choix est conforté si l'on doit tenir compte de l'effet de peau qui apparaît lorsque la fréquence des courants atteint quelques kHz (automobile). D'autre part, on montre que la densité de courant atteignable dans des conducteurs de section rectangulaire très aplatie (circuits imprimés) est beaucoup plus importante que pour les conducteurs à section cylindrique. La diminution des pertes par effet Joule passe aussi par l'optimisation de la longueur active des bobines. Une bonne géométrie des pôles du rotor de la MS augmente le rapport entre longueur active et totale du conducteur. On définit le coefficient global de remplissage des encoches par le rapport de la surface de cuivre (surface active) sur la surface de l'encoche (classiquement 40 à 50 %). L'augmentation de la valeur du coefficient de remplissage a deux effets. D'une part, les pertes Joule augmentent car la concentration du bobinage n'est pas optimale ; d'autre part, l'évacuation de la chaleur est plus difficile. Enfin, les propriétés thermiques des isolants électriques présents dans les encoches joueront un rôle important dans l'évacuation des pertes par effet Joule.

B) - PERTES MAGNÉTIQUES - Les pertes magnétiques regroupent les pertes par courants de Foucault qui résultent de la circulation de courants induits dans le matériau magnétique et les pertes par hystérésis dues à l'effet mémoire du matériau magnétique qui entraîne des pertes énergétiques lors des cycles magnétiques. Les premières sont directement liées à la variation temporelle du champ magnétique, c'est-à-dire au phénomène d'induction. Un feuilletage des tôles magnétiques limite la circulation des courants induits. L'épaisseur de ces tôles est très importante car elle intervient au carré dans l'expression des pertes. Les pertes par hystérésis sont elles aussi dépendantes de la fréquence et

de la variation d'amplitude du champ magnétique. À titre d'exemple, pour des tôles usuelles de Fe-Si à 3 % à grains non orientés, et une épaisseur de tôle de 0,5 mm, on obtient sous une amplitude maximum de 1,5 tesla, à 50 Hz, des pertes fer de 6,5 W.kg-1. Par comparaison, des tôles de Fe-Ni (50-50), de 0,1 mm d'épaisseur limiteront dans les mêmes conditions ces pertes à 0,84 W.kg-1. On notera aussi que, ces pertes dépendant de la fréquence, l'utilisation de la ferrite, caractérisée par une forte résistivité à haute fréquence, limite ces pertes que l'on retrouve aussi dans les aimants permanents.

C) - PERTES MÉCANIQUES - Les frottements mécaniques dans les machines tournantes sont principalement causés par les points de contacts mécaniques localisés au niveau des systèmes collecteur-balais, bagues-balais ou des paliers.

Les pertes aérodynamiques sont, elles, dues à la rotation du rotor. Pour fixer les idées, on peut en estimer l'importance dans le cas de l'air avec un entrefer de 5 mm. Alors que pour une vitesse périphérique de 100 m/s, on trouve des pertes aérodynamiques de 660 W par m² d'entrefer, pour une vitesse trois fois plus élevée, ces mêmes pertes atteignent 13,7 kW.m⁻². Les pertes aérodynamiques, à très grande vitesse, peuvent donc être responsables d'échauffements très importants. La saillance éventuelle du rotor accroît bien entendu ce type de pertes. On peut diminuer ces pertes aérodynamiques en remplaçant l'air par un fluide caloporteur mono ou multiphasique.

D) - ÉVACUATION DES PERTES - Les pertes Joule et magnétiques sont à l'origine d'échauffements à l'intérieur même des matériaux composants les moteurs. Pour un même matériau, les petits systèmes auront une plus grande capacité à accepter une plus forte densité de pertes. En effet, si par exemple on soumet un matériau magnétique (fer silicium) à un échauffement de 5 K entre le coeur et la surface extérieure, il sera capable d'évacuer un flux thermique de 2 kW.m⁻² si la distance coeur-surface est de 20 mm, alors que ce transfert ne sera que de 90 W.m⁻² pour une distance 5 fois plus grande. Cette limitation de la capacité à accepter des pertes volumiques importantes entraînera une limitation de la dimension de la machine ou la nécessité de modifier les conditions de refroidissement en surface.

E) - LIMITES EN VITESSES - La vitesse de rotation des moteurs est limitée par leur vitesse périphérique maximale qui dépend principalement de la géométrie et de la nature des matériaux utilisées (cuivre, aluminium, acier...). On peut calculer les ordres de grandeurs des vitesses périphériques maximales pour les principaux constituants des machines classiques. Ainsi, on trouve que le collecteur des MCC possède la vitesse périphérique la plus faible (80 m/s), que les MS à aimants permanents voient cette vitesse beaucoup varier en fonction du mode de pose des aimants sur le rotor (de 100 m/s pour des aimants tuiles collés à 230 m/s pour des aimants frettés collés en surface), et les vitesses périphériques maximales (300 m/s) sont atteintes avec des MAS à cage d'écureuil à encoches fermées et des machines à réluctance variable à rotor massif. Cette frontière de la vitesse périphérique maximale limitera d'autant plus la vitesse de rotation du moteur que le diamètre du rotor sera grand.

4) - LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES - Une comparaison des performances relatives des différentes technologies de moteur peut être synthétisée dans le plan couple-vitesse issu de la thèse d'Aïman Nouh (UTBM, 26 mars 2008). Il apparaît que, du point de vue des rendements, la MSAP est la plus performante en basses et moyennes vitesses. Elle atteint ses limites pour les hautes vitesses car son défluxage est délicat. À l'inverse, du fait de la facilité de défluxage, la MSRB est, elle, plus performante à haut régime. En comparaison, la MAS obtient des performances moins intéressantes sur tous les régimes. Elle reste tout de même très appréciée par les industriels car c'est la moins chère et la plus robuste des machines. Seule la machine à réluctance variable (MRV) semble réunir toutes les qualités pour convaincre les industriels. Elle allie la robustesse et le faible coût de la MAS aux bonnes performances de la MS. Toutefois, les recherches se heurtent à des problèmes de vibrations trop importants qui sont rédhibitoires pour en faire le moteur des voitures électriques modernes. Dans le cas des motorisations hybrides, les contraintes de dimensionnement sont encore plus sévères d'un point de vue thermique et de la compacité, car ces moteurs doivent fonctionner dans l'environnement proche d'un moteur thermique.

CONCLUSION - Les motorisations automobiles actuelles font appel aux machines synchrones, performantes, et asynchrones, économiques et robustes. - Outre les caractéristiques électromécaniques, le prix de revient et la fiabilité sont des critères déterminants pour le choix d'une technologie de moteur. - Les constructeurs automobiles conçoivent simultanément le moteur, son électronique de commande et d'interconnexion avec la batterie, ainsi que le réducteur associé, formant le groupe moto-propulseur. A ce jour la limitation de la traction tout électrique pour l'automobile réside encore pour l'instant dans la faible autonomie liée aux technologies actuelles des batteries.