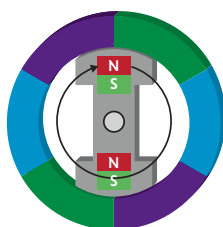


LES TROIS ARCHITECTURES DES MOTEURS ÉLECTRIQUES

Les moteurs le plus souvent montés dans les véhicules électriques présentent diverses architectures. Mais dans tous les cas, un champ magnétique tournant fait tourner le rotor, dont le champ magnétique est créé de diverses façons.

Dans les moteurs synchrones à aimants permanents, le champ magnétique du rotor est créé par des aimants permanents (les représentations ci-dessous sont schématiques : les moteurs réels ont bien plus de paires de pôles magnétiques).

MACHINE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS

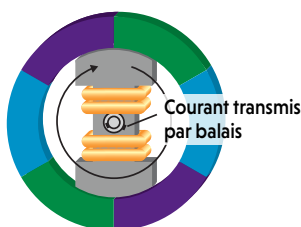


Le rotor comporte des aimants permanents.

Dans les moteurs synchrones à excitation bobinée, le champ du rotor est produit par des bobines intégrées au rotor. Le courant d'alimentation nécessaire parvient aux bobines par l'intermédiaire de contacts coulissants, des « balais ».

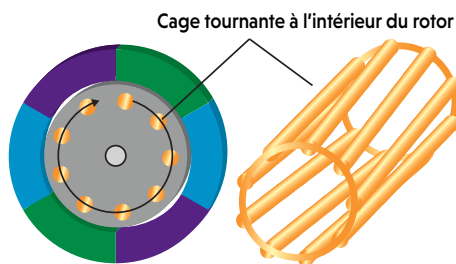
Dans les machines asynchrones, le champ du rotor est engendré par les courants qui circulent dans la masse des tiges métalliques dont est constitué le rotor. Le champ statorique tournant y crée une tension électrique, qui est court-circuitée par les anneaux constituant les extrémités de cette « cage d'écureuil ». Les courants qui la traversent engendrent le champ magnétique rotorique, dont le flux tend à s'opposer au champ statorique tournant. Il en résulte un couple de forces qui fait tourner la cage.

MACHINE SYNCHRONE À EXCITATION BOBINÉE



Le rotor intègre des bobines.

MACHINE ASYNCHRONE



Le champ tournant du stator induit des courants dans le rotor, qui induisent son champ magnétique.

> leur surface doit donc être soigneusement scellée, par exemple par une couche d'aluminium. Si ce revêtement est endommagé lors de l'installation du moteur, une panne prématurée de celui-ci peut survenir.

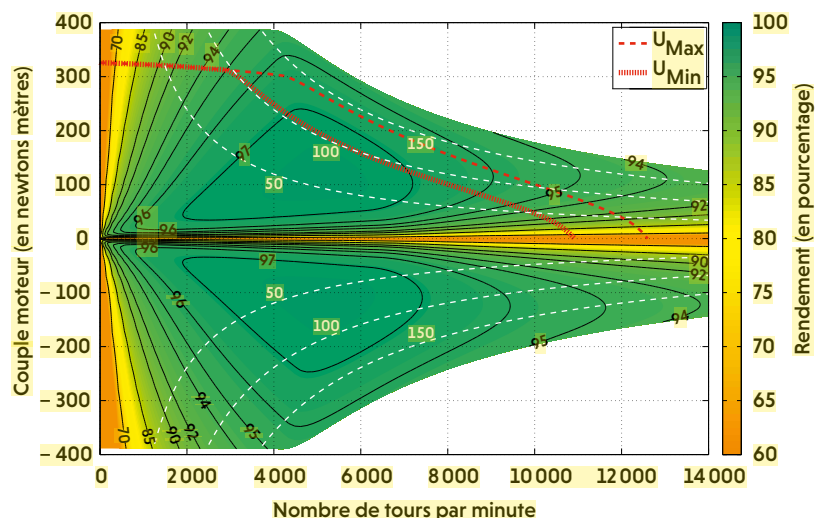
Un indicateur important de l'efficacité d'un moteur électrique est son rapport puissance/poids, déterminé par le poids nécessaire pour fournir une certaine puissance mécanique. Les moteurs industriels classiques – par exemple ceux des escaliers mécaniques, des ascenseurs, des systèmes de refroidissement et des compresseurs – pèsent environ 10 kilogrammes par kilowatt de puissance mécanique continue. Particulièrement robustes, ces moteurs peuvent fonctionner plusieurs décennies sans entretien, mais ils sont trop lourds pour motoriser des véhicules. De fait, dans les voitures ou les trains électriques actuels, les rapports poids/puissance des moteurs sont inférieurs à 1 kilogramme par kilowatt, valeurs comparables à celles des moteurs à explosion.

DES MOTEURS PLUS PUISSANTS QUE CEUX DE LA FORMULE 1

Des progrès ont cependant été réalisés, puisque des rapports poids/puissance de 0,1 kilogramme par kilowatt sont désormais possibles. De tels moteurs électriques sont plus puissants que les meilleurs moteurs à combustion interne utilisés en Formule 1. Outre les voitures, on prévoit qu'ils équiperont un jour les avions. Les ingénieurs n'envisagent pas seulement de petits appareils, mais aussi de petits porteurs de 50 à 100 passagers capables de couvrir jusqu'à 1 000 kilomètres. L'énergie électrique ne proviendra pas nécessairement de batteries, mais pourrait être produite par des générateurs, qui ont l'avantage d'avoir un rendement élevé dans la plage optimale des vitesses de rotation des moteurs.

L'entraînement fourni par un moteur électrique résulte non seulement de la force de Lorentz (la force qu'exerce un champ magnétique sur une charge en mouvement), mais aussi de la force de réluctance, qui mesure la résistance d'un circuit magnétique (un conducteur de champ magnétique refermé sur lui-même) à être traversé par un champ magnétique. Cette dernière joue un rôle dans les matériaux ferromagnétiques doux, ceux qui s'aimantent facilement quand on les plonge dans un champ magnétique extérieur. Ce type de matériau conduit bien les champs magnétiques et permet, à taille égale, de transférer davantage de puissance. C'est pourquoi, en général, un électroaimant ne comporte pas seulement une bobine engendrant un champ magnétique, mais aussi un noyau de matériau ferromagnétique qui canalise le champ et l'amplifie.

À cette fin, on utilise ce qu'on appelle le fer doux ou une « tôle magnétique », qui est pour



Le couple d'un moteur électrique dépend du nombre de tours par minute et de la tension de la batterie. Cette simulation du fonctionnement d'une machine synchrone à aimants permanents montre que, d'abord constant dans la plage des basses vitesses, le couple décroît après que la tension maximale de la batterie a été atteinte. Cela se produit plus vite si la batterie est déchargée (courbe U_{Min} en petits pointillés rouges) que si elle est chargée (courbe U_{Max} en plus gros pointillés rouges). Les lignes blanches indiquent la puissance disponible en kilowatts et les couleurs le rendement en pourcents. On constate que le rendement est en général supérieur à 90 %, tant lorsque la machine synchrone fonctionne en moteur que lorsqu'elle fonctionne en générateur, pendant un freinage par exemple.

l'essentiel de l'acier allié à du silicium et à de l'aluminium. Ce matériau a une faible réluctance, de sorte qu'un faible courant dans la bobine suffit pour que le flux magnétique dans le noyau de fer doux soit élevé. La perméabilité magnétique relative (sa capacité à conduire les lignes de champ) du fer doux d'un moteur est, en fonction de son couple et de sa vitesse, environ 100 fois supérieure à celle de l'air. Cela signifie qu'à courant constant, la densité de flux magnétique (flux magnétique par unité de surface) y est quelque 100 fois supérieure à ce qu'elle est dans l'air. La tôle magnétique a malheureusement un défaut : au-dessus d'un certain courant d'induction, le flux magnétique n'y augmente plus.

C'est le flux magnétique, créé par la circulation du courant dans les bobines, qui engendre la force entraînant le moteur. Le couple créé résulte du produit de cette force par le bras de levier, ici la moitié du diamètre du rotor. Le produit du couple par la vitesse de rotation donne finalement la puissance mécanique fournie par le moteur.

DES RENDEMENTS DE 90 %

Toutes les machines électriques tournantes peuvent fonctionner dans les deux sens, donc autant comme moteur électrique que comme générateur d'électricité. Cette inversion permet de recharger la batterie du véhicule pendant les descentes et les phases de freinage qui précèdent l'arrivée devant un feu ou un bouchon. C'est pourquoi le rendement d'un moteur électrique bien conçu peut atteindre 90 % et plus (voir le diagramme ci-dessus), alors que celui des moteurs à explosion ne dépasse pas 30 %.

Comme les entraînements électriques convertissent déjà très bien l'énergie électrique en énergie mécanique, la recherche actuelle se concentre sur l'optimisation du rapport puissance/poids. Plus un moteur est léger, moins il

prend de place et moins il faut d'énergie pour accélérer la masse du véhicule.

Par exemple, le moteur électrique de la BMW i3 pèse environ 50 kilogrammes. Pour une puissance fournie en continu de 75 kilowatts, son rapport poids/puissance est de 0,67 kilogramme par kilowatt. Un prototype de haute performance développé à l'Institut de technologie de Karlsruhe pour propulser une voiture Audi A1 convertie ne pèse, lui, qu'environ 13 kilogrammes pour une puissance continue de 70 kilowatts. Son rapport poids/puissance n'est donc que de 0,19 kilogramme par kilowatt.

AUGMENTER LE FLUX MAGNÉTIQUE, LE COURANT OU LA VITESSE DE ROTATION

Trois voies s'offrent pour atteindre ces puissances élevées sans faire grossir le moteur : augmenter la densité de flux magnétique, alimenter les bobines avec des courants plus intenses ou faire tourner le moteur plus vite.

Comme nous l'avons déjà mentionné, la densité du flux magnétique est limitée par la saturation de la tôle magnétique. Les meilleurs types de tôles ne sont disponibles qu'en petites quantités et à des prix élevés. Il s'agit d'alliages d'acier contenant du cobalt. On les utilise dans les compétitions automobiles, mais ils sont bien trop chers pour convenir aux voitures de série.

Quant à la solution consistant à augmenter le courant, elle a l'inconvénient de présenter des pertes par effet Joule, puisque les bobines sont en fils de cuivre, qui ont une résistance électrique. Il existe d'autres sources de pertes, en particulier dans la tôle magnétique qui est sans cesse magnétisée dans des directions opposées et où circulent des courants de Foucault. Mais dans les moteurs ➤