

> d'aujourd'hui, ce sont les pertes par effet Joule qui prédominent.

Le refroidissement joue donc un rôle crucial quant à l'intensité du courant électrique qui peut faire fonctionner un moteur sur une longue durée. Dans les moteurs actuels, le stator est à l'intérieur d'un boîtier dont les parois, creuses, sont traversées par de l'eau de refroidissement. Dans ceux que l'on développe, l'intérieur de l'arbre est aussi traversé par un liquide de refroidissement; ou un nuage de gouttelettes d'huile est pulvérisé sur les bobines à l'intérieur du moteur.

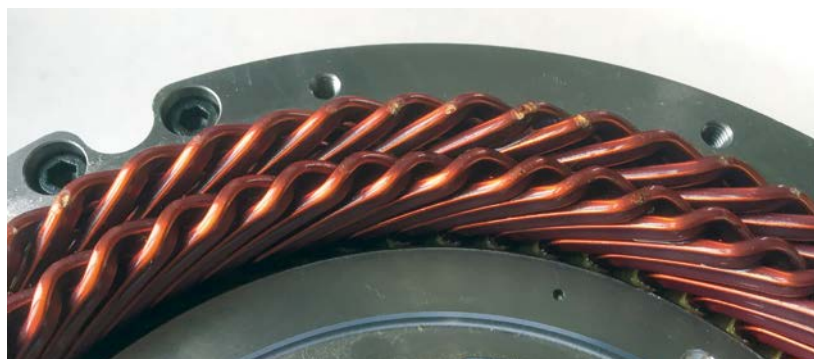
Dans les derniers systèmes en développement, on tente d'améliorer encore l'évacuation de la chaleur en amenant le liquide de refroidissement directement sur les conducteurs de cuivre, en la faisant passer par les interstices qui séparent les plaques dont est formé le stator. L'utilisation de fils conducteurs à section rectangulaire plutôt que ronde améliore aussi la compacité, c'est-à-dire qu'elle permet de disposer plus de cuivre par unité de surface (voir les photographies ci-contre). Toutes ces modifications posent des défis de conception et de production. Des prototypes existent déjà, mais on est encore loin d'une production en série.

ÉVACUER LA CHALEUR

Quelle que soit la solution technique adoptée, on ne peut évacuer qu'une certaine quantité maximale de chaleur. Ce maximum détermine la charge linéique, en d'autres termes la somme de tous les courants divisés par la circonférence du rotor. Les moteurs électriques modernes fonctionnent en régime continu avec des charges linéiques comprises entre 50 000 et 100 000 ampères par centimètre. S'agissant des pointes de charge linéique, celles qui se produisent pendant une accélération, on peut atteindre des valeurs de 200 000 ampères par centimètre. Lors des accélérations, la quantité de chaleur produite est stockée temporairement dans la pile de plaques statoriques, puis refroidie.

La troisième voie pour augmenter la puissance sans faire grossir le moteur consiste à augmenter la vitesse de rotation. Les moteurs industriels tournent, typiquement, jusqu'à 3 000 tours par minute. Les commandes de robots atteignent 6 000 tours par minute. Les moteurs des premières voitures électriques en phase de production fonctionnaient déjà à des vitesses deux fois plus élevées. Dans les systèmes développés actuellement, les vitesses sont plutôt de 20 000 tours par minute pour les moteurs produits en série, et vont jusqu'à 30 000 tours par minute pour certains prototypes.

Pour commander des moteurs à rotation aussi rapide, il faut disposer de tensions alternatives de fréquence élevée. La fréquence atteinte est actuellement de 1 kilohertz,



parfois plus. Ces valeurs sont obtenues en faisant hacher la tension continue, issue de la batterie, par des interrupteurs électroniques de puissance, dispositifs nommés onduleurs ou convertisseurs continu-alternatif. En pratique, on rencontre aujourd'hui couramment des fréquences d'horloge bien au-dessus des 10 kilohertz. Le contrôle n'est précis que si chaque impulsion de commutation est calculée avec précision par un ordinateur puissant, ce qui n'est devenu possible que depuis quelques années.

Il est peu probable que les vitesses dépasseront les 30 000 tours par minute. Tout d'abord, cette vitesse doit être ramenée, par des transmissions, aux quelque 1 500 tours par minute qui sont appliqués à la roue à la vitesse maximale. Par ailleurs, la structure du rotor doit résister à la force centrifuge. Selon les conceptions de rotor – à base d'aimants ou de cage d'écureuil – et les dimensions usuelles d'un moteur électrique (le noyau en tôles magnétiques du stator fait 20 à 30 centimètres de diamètre extérieur), la périphérie du rotor peut atteindre des vitesses de 100 à 150 mètres par seconde. De plus, les pertes dues à la remagnétisation constante du noyau de fer augmentent avec la vitesse, ce qui limite l'amélioration des performances.

Contrairement aux moteurs à combustion, les moteurs électriques créent à l'arrêt un couple puissant, qui suffit pour obtenir les nombres de tours par minute les plus élevés. Par conséquent, aucun embrayage ou boîte de vitesses à multiples rapports n'est nécessaire.

Les bobinages constituant le stator sont soit répartis (comme en haut), soit concentrés (comme en bas). Les bobinages répartis sont mieux adaptés aux machines tournant à grande vitesse. Presque tous les moteurs électriques puissants sont à bobinages répartis. Ceux qui sont particulièrement compacts mettent en œuvre des fils conducteurs à section carrée (en haut), forme qui permet de mieux occuper l'espace.

Cependant, la rotation de l'arbre moteur doit être ajustée, par un réducteur, à celle des roues. Cela se fait en général par des systèmes à deux étages de roues dentées. Compacts et moins volumineux que le moteur, ces réducteurs atteignent des rendements de plus de 90% grâce au petit nombre de pièces qui les composent.

On pourrait aussi construire des moteurs à rotation lente, entraînant directement les roues, mais ils auraient l'inconvénient d'une faible densité de puissance. À performances comparables, de tels entraînements directs devraient être plus volumineux, plus lourds et plus coûteux que des entraînements centraux à grande vitesse. Les grandes tailles de leurs composants auraient aussi l'inconvénient de réduire le rendement moteur à mesure que l'usure et le frottement augmenteraient. C'est pourquoi toutes les voitures électriques produites aujourd'hui fonctionnent avec des moteurs électriques rapides et une petite boîte de vitesses.

DES ENGRENAGES FIXES EN GÉNÉRAL

Certaines voitures électriques sont dotées de modificateurs de régimes, c'est-à-dire de plusieurs vitesses. C'est intéressant lorsqu'on souhaite combiner dans le même véhicule un couple de démarrage élevé avec une vitesse maximale élevée, ce qui est par exemple nécessaire dans les compétitions automobiles. Les engrenages nécessaires occupent trop de place et sont trop lourds, sans parler des pertes de puissance qu'ils occasionnent. Même le modèle S de Tesla, qui passe de 0 à 100 kilomètres par heure en 4,4 secondes et atteint une vitesse maximale de 225 kilomètres par heure, est livré avec des engrenages fixes.

Malgré les différences techniques entre les moteurs asynchrones, les moteurs synchrones à aimants permanents et les moteurs synchrones à excitation bobinée, les fonctionnements de tous ces dispositifs de propulsion électrique sont assez similaires.

Dans la plage des faibles nombres de tours par minute, donc des basses vitesses, les moteurs fonctionnent à flux magnétique constant, mais il faut ajouter de l'électronique pour le garantir. Dans le même temps, la quantité de chaleur évacuable et la puissance maximale du système de refroidissement limitent l'alimentation électrique totale possible. Le courant d'alimentation maximal et le flux magnétique sont donc constants dans la plage des basses vitesses, ainsi que le couple maximum atteignable (voir le diagramme page 71).

La puissance du moteur est égale au produit du couple par la vitesse de rotation. La puissance disponible augmente donc dans la plage des basses vitesses de 0 (à l'arrêt) jusqu'à un maximum, atteint pour la vitesse de

rotation maximale. La plupart du temps, elle correspond à des vitesses du véhicule comprises entre 40 et 60 kilomètres par heure, selon le type de moteur.

Au-delà de la vitesse maximale, on entre dans la plage des faibles champs. Le variateur – le composant qui dicte à chaque instant au moteur la fréquence de la tension alternative appropriée, exploite désormais toute la tension disponible aux bornes de la batterie. La fréquence augmente encore proportionnellement à la vitesse. Cependant, comme le flux magnétique varie comme le rapport tension/fréquence, il tend à diminuer. Le courant continu thermiquement admissible reste le même. Pour ces raisons, le couple diminue en raison inverse du nombre de tours par minute, tandis que la puissance mécanique disponible – produit du couple par la vitesse de rotation – reste constante.

Par ailleurs, la tension de la batterie diminue au fur et à mesure qu'elle se décharge. Les batteries typiques des véhicules produits en série aujourd'hui fournissent un maximum de 360 volts à pleine charge. La tension chute à 320 volts ou même à 300 volts lorsque la batterie est presque vide. Cela a un impact important sur le comportement du moteur. À tension plus basse, la plage de vitesses de base se termine à des vitesses plus basses, et la plage d'affaiblissement du champ commence plus tôt. La puissance maximale disponible diminue alors avec la tension disponible. Cette puissance disponible à plein régime s'affiche sur les tableaux de bord de certains véhicules électriques, telle la ZOE de Renault.

Au cours des deux dernières décennies, les ingénieurs ont exploité toutes ces possibilités de réglage du fonctionnement des systèmes de propulsion électrique afin de rendre les moteurs électriques suffisamment efficaces – en tout cas par rapport à leurs prédécesseurs industriels – pour être utilisés dans les voitures particulières. Des vitesses plus élevées, de meilleures solutions de refroidissement, des aimants plus puissants, une électronique moderne et la commande par ordinateur ont permis d'améliorer le rapport puissance/poids d'un facteur 10.

Les systèmes actuellement à l'essai dans les laboratoires et ceux développés pour la compétition suggèrent qu'une amélioration d'un autre ordre de grandeur sera possible. Par exemple, les semi-conducteurs en carbure de silicium devraient apporter bientôt de grandes améliorations aux électroniques de puissance, car ils résistent à des températures plus élevées, présentent de plus faibles pertes ainsi que des temps de commutation plus courts. À n'en pas douter, les systèmes de propulsion électrique de demain seront encore plus compacts et plus puissants. ■

BIBLIOGRAPHIE

M. Dopplebauer et P. Winzer, **A lighter motor for tomorrow's electric car**, *IEEE Spectrum*, vol. 54(7), pp. 26-31, 2017.

A. Hughes et B. Drury, **Electric Motors and Drives**, Newnes, 4^e édition, 2013.

R.-P. Bouchard et G. Olivier, **Conception de moteurs asynchrones triphasés**, Presses internationales Polytechnique, 1999.

J.-D. Chatelain, **Machines électriques**, Bordas, 1993.