

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.