

moteurs électriques de grande taille

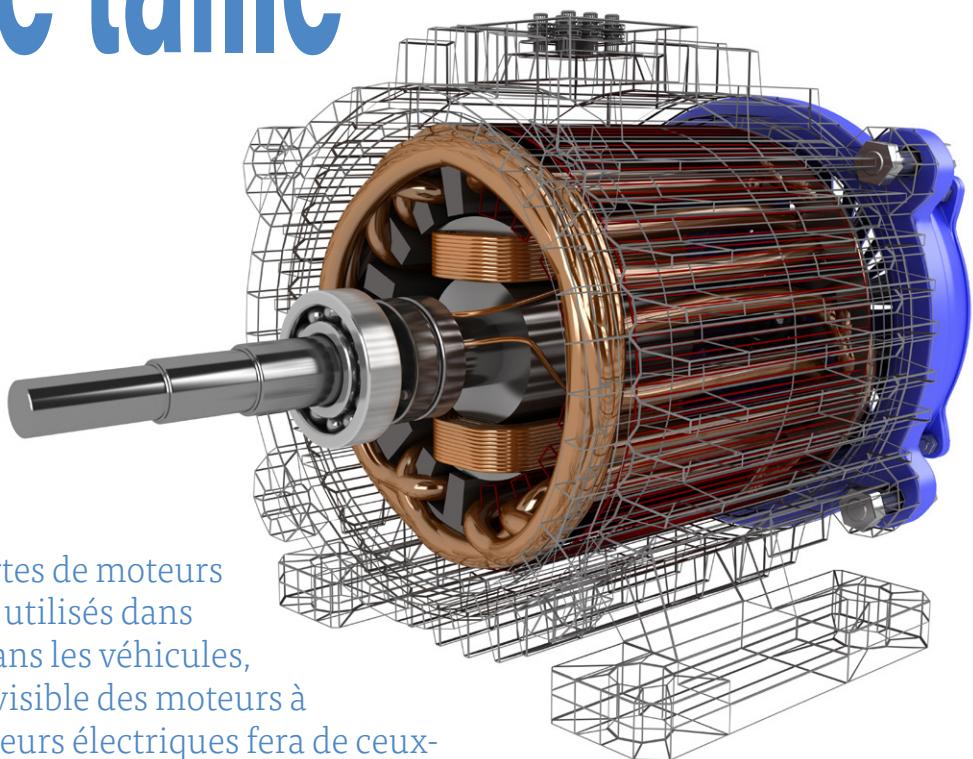
Principes de base et informations utiles



Thomas Scherer (Elektor)

Depuis des décennies, toutes sortes de moteurs électriques de toutes tailles sont utilisés dans une multitude d'applications. Dans les véhicules, le remplacement généralisé prévisible des moteurs à combustion interne par des moteurs électriques fera de ceux-ci le principal moyen de produire le mouvement mécanique. Cela justifie le fort regain d'intérêt dont ils sont l'objet.

La conversion d'énergie électrique en énergie mécanique est presque exclusivement confiée aux moteurs électriques. Les autres méthodes de production d'énergie mécanique comme les moulins à eau ou à vent et les moteurs thermiques sont loin d'avoir les avantages des moteurs électriques, à savoir faible encombrement, poids réduit, longue durée de vie et rendement élevé. Pour les grandes machines, le rendement peut nettement dépasser 90 %. Les montres non mécaniques de luxe sont mues par de minuscules moteurs. Jusqu'à 100 W de puissance, il y a les moteurs dits universels classiques, et les variantes particulières que sont les moteurs pas à pas, servos, moteurs à bague de déphasage, petits moteurs synchrones et à induction et autres moteurs BLDC (CC sans balais), de plus en plus répandus. Côté Elektor, l'article de Mathias Claussen [1] décrit comment piloter les petits moteurs, et mon article d'il y a trois ans [2] traite des techniques de pilotage des moteurs en général. Cet article se concentrera surtout sur les principes applicables aux gros moteurs de plus en plus utilisés en électroménager (par ex. aspirateurs et machines à laver), mais aussi dans les véhicules électriques et, surtout, par l'industrie (par ex. machines-outils).



Types de moteurs et règles empiriques

Comme indiqué ci-dessus, cet article laisse de côté les moteurs de faible puissance, en particulier les plus courants dans ce domaine : à bague de déphasage, à condensateur, pas à pas et servomoteurs. Nous n'étudierons pas non plus les moteurs linéaires, bien qu'ils soient fréquents dans les disques durs (positionnement des têtes) et dans les actionneurs (à une puissance plutôt élevée). Les moteurs linéaires de forte puissance (de l'ordre du MW) ne feront pas partie de notre propos : leurs applications militaires (par ex. dans les canons à rail) pour accélérer des projectiles nécessitent des techniques de pilotage trop spécifiques pour être abordées. Nous nous limiterons plutôt aux quatre types de moteurs du **tableau 1**. Ceux-ci couvrent plus de 90 % des applications pour des puissances comprises entre moins de 1 kW et des centaines de MW. En théorie, chaque type de moteur pourrait être fabriqué en petite ou grande taille, mais en raison de caractéristiques électriques et mécaniques différentes, chacun est adapté à des domaines d'application particuliers, avec des variations considérables entre types. Les ingénieurs non spécialisés se font de fausses idées sur les

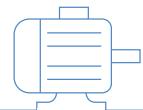


Tableau 1. Types de moteurs électriques de grande taille.

Type	Caractéristiques
Moteur universel	Un collecteur mécanique crée un champ alternatif ; nombreuses variantes, à enroulement en série et en dérivation ; couple de démarrage élevé.
Moteur à induction triphasé	Rotor passif (sans bagues collectrices) ; le rotor glisse derrière le champ du stator ; une protection contre les courants d'appel élevés (commutation étoile-triangle ou entraînement à fréquence variable) est nécessaire.
Moteur synchrone triphasé	Champ d'excitation permanent ou électrique requis ; le rotor se déplace de manière synchrone avec le champ tournant ; peut utiliser un entraînement à fréquence variable ; peut fonctionner comme un générateur ; peut être configuré avec des pôles internes ou externes.
Moteur BLDC	Variante du moteur synchrone à commutation électronique ; convient aux trains d'entraînement ; très fiable ; les aimants permanents sont souvent utilisés dans les applications de faible à moyenne puissance.

moteurs électriques, faisons d'abord tomber ces mythes. Prenons par ex. la proposition trop idéalisée selon laquelle, au démarrage (c.-à-d. à un régime de 0 tr/min), les moteurs électriques auraient en théorie un couple « infini ». C'est justement le « en théorie » qui pose un problème : cela supposerait un courant extrême, un champ magnétique extrême, une résistance d'enroulement nulle, des métaux hypersolides et une électronique de commande miraculeuse. En pratique tous ces paramètres trouvent vite leur limite. Le mythe devient une règle d'or selon laquelle la plupart des moteurs électriques peuvent en effet offrir un couple de démarrage élevé si le circuit de commande et l'alimentation sont conçus pour cela. Dans les véhicules électriques, cette caractéristique présente l'avantage, par rapport aux moteurs thermiques, de pouvoir en général se passer de boîte de vitesses manuelle ou automatique. La chaîne cinématique s'en trouve fiabilisée, simplifiée et plus légère : ce dernier aspect est important, même si le gain de poids est plus qu'annihilé par les batteries.

Une autre règle d'or sera utile à ceux qui ne sont pas familiers avec le sujet : à charge donnée, la relation couple/courant de fonctionnement d'un moteur électrique est très linéaire, car le champ magnétique produit est proportionnel au courant qui circule dans les enroulements ; la force magnétique d'attraction ou de répulsion et donc le couple qui en résulte sont proportionnels à ce champ. Une autre règle d'or, un peu plus grossière, dit que le régime maximal possible à vide (hors considérations mécaniques) dépend de la tension d'alimentation. Pourquoi ? Un moteur électrique en rotation crée ce que l'on appelle une « force contre-électromotrice » ou « FCEM » qui en théorie est bien proportionnelle au régime de rotation. Le terme « force électromotrice » ou « FEM » fut historiquement introduit pour décrire la tension produite par un générateur ; par FCEM, nous entendons la tension induite par la rotation d'un moteur et qui tend à s'opposer à la tension d'alimentation. En négligeant les inductances et les pertes, la tension effective présente aux bornes des enroulements du moteur est la *différence* entre la tension appliquée et la FCEM. Le courant résultant dépend presque exclusivement de cette différence et de la résistance ohmique des enroulements. Quand la différence = 0 V, le régime maximal possible est atteint : le petit courant résiduel ne fait que compenser les pertes par frottement.

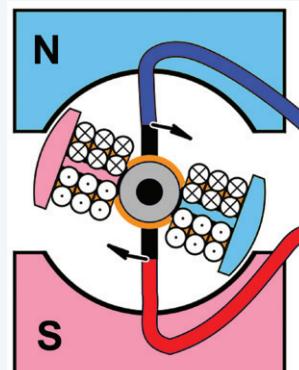


Figure 1. Principe de fonctionnement et construction d'un moteur électrique simple à aimants permanents. Le pôle nord se trouve en haut du stator, le pôle sud en bas. Le rotor est un électroaimant alimenté par un collecteur composé d'une bague segmentée et de balais de carbone. (Crédit dessin : Michael Frey, CC 3.0 [3])

Principes de fonctionnement

La forme de moteur la plus ancienne et, de fait, la plus simple est le moteur à aimant permanent illustré à la **figure 1**. Le rotor est constitué d'un électroaimant monté sur paliers pour pouvoir tourner. Le point noir au milieu représente l'axe de rotation et l'anneau gris un palier. La tension continue appliquée passe par une bague collectrice avec des contacts en cuivre (le collecteur) et des balais en carbone. La polarité de la tension appliquée à l'électroaimant, et donc du champ magnétique, dépend donc de la position du rotor. Si la polarité de la tension appliquée est inversée, le sens de rotation s'inverse également. Il est clair que ce type de moteur constitue un générateur si on entraîne mécaniquement son rotor : un signal continu pulsé apparaît alors sur les balais. En l'absence de collecteur, la machine devient un générateur de courant alternatif ; et en appliquant une tension alternative, on obtient en théorie un moteur synchrone monophasé, mais peu pratique, car il a bien du mal à démarrer.

Presque tous les autres types de moteurs dérivent de ce concept simple. Si l'aimant permanent du stator est remplacé par un enroulement (un autre électro-aimant), le moteur ainsi obtenu est dit universel. En introduisant plusieurs phases, nous pouvons

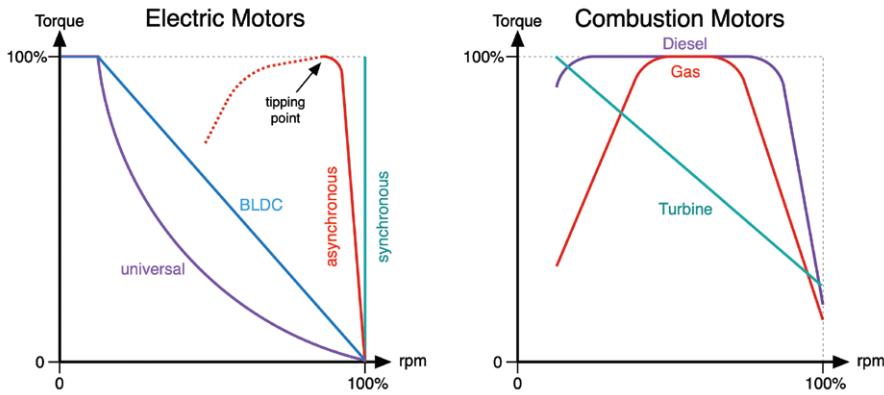


Figure 2. Comportement idéal du couple en fonction du régime pour différents types de moteurs électriques, comparé à trois types de moteurs thermiques. (Crédit dessins : Thomas Scherer)

construire des moteurs à induction, synchrones et BLDC qui utilisent un champ tournant produit électriquement. Le moteur simple a de mauvaises propriétés en roue libre (en l'absence de tension), car les lignes de champ des aimants permanents provoquent toujours un effet de freinage. Sur les moteurs à excitation séparée, ce problème est moindre.

Les caractéristiques principales de ces types de moteurs sont illustrées (dans le cas idéal) et comparées à celles des moteurs thermiques de conception actuelle à la **figure 2**. Les contrastes des courbes couple/régime sont particulièrement remarquables. Cette comparaison est loin d'être exhaustive, et chaque caractéristique a une influence notable sur l'adéquation de chaque type de moteur à différents scénarios d'application.

Le moteur universel

La **figure 3** montre le moteur universel, inventé il y a plus de 117 ans. C'est la variante la plus proche du moteur simple de la fig. 1. Ici, un 2^e enroulement constitue un électroaimant qui remplace simplement l'aimant permanent. Les avantages du moteur universel sont patentés, surtout dans le domaine des hautes puissances, où les aimants permanents requis deviennent non seulement très grands et lourds, mais aussi coûteux. Dans le moteur universel classique, l'enroulement d'excitation du stator est câblé en série avec celui du rotor, formant le moteur dit à enroulements série. Le principal avantage de ce moteur par rapport au moteur à enroulements shunt (non illustré), moins répandu, où l'enroulement du stator

est câblé en parallèle avec l'enroulement du rotor, est qu'il a un couple de démarrage très élevé.

Les deux variantes peuvent être alimentées en courant continu ou alternatif. Les modèles optimisés pour l'alternatif avec haut régime utilisent, pour le noyau du stator et du rotor, un empilement de feuilles métalliques isolées entre elles qui réduit les pertes par courant de Foucault et hystérésis. Avec les deux variantes, l'inversion de polarité de la tension d'alimentation en marche n'affecte pas le sens de rotation. Pour inverser le sens, il est nécessaire de changer la polarité du stator ou du rotor (et non des deux simultanément). Les gros moteurs universels (de l'ordre du kW) ont un courant de démarrage élevé. C'est pourquoi ils utilisent pour se protéger (et empêcher leurs fusibles de sauter), un contrôleur de démarrage. Le plus simple alimente initialement le moteur via une résistance série qui réduit le courant d'appel. Après un court laps de temps, ou dès qu'un régime donné est atteint, la résistance est shuntée. Sa valeur doit être choisie en fonction des conditions de fonctionnement particulières et elle doit être capable de dissiper la chaleur produite, soit l'intégrale de la courbe de puissance pendant la période de démarrage. En définitive, la résistance de démarrage requise peut être assez encombrante, nécessiter une construction spéciale, ou même prendre la forme d'un rhéostat liquide. Pour un très gros moteur universel, une seule résistance ne suffit pas : on utilise plusieurs résistances en série. On court-circuite une à une au fur et mesure de la montée en régime. Le plus simple contrôle de protection au démarrage est la temporisation illustrée à la **figure 4**. La mesure du régime couplée à la mise en court-circuit échelonnée des résistances, le cas échéant avec une augmentation progressive de la tension d'alimentation par un contrôleur électronique, est une approche plus intelligente.

Comme mentionné ci-dessus, les moteurs universels peuvent être alimentés par une source en CA ou CC. Le régime en charge et à vide dépend de la construction du moteur et de la tension appliquée. La puissance de sortie et le régime en charge peuvent donc être contrôlés à l'aide d'une commande MLI. Si un tel circuit de commande MLI est déjà disponible, il est facile de l'associer au microcontrôleur existant pour fournir une protection au démarrage. Pour ce faire, il suffit de démarrer le fonctionnement à l'aide d'un signal

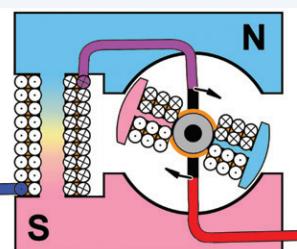


Figure 3. Principe de fonctionnement et construction d'un moteur universel, où l'aimant permanent d'un moteur simple est remplacé par un électroaimant.
(Modifications de la figure 1 : Thomas Scherer)

MLI avec un rapport cyclique élevé, puis de le réduire progressivement. Si le moteur se bloque à cause d'une charge excessive, ou même en cas de simple surcharge, des courants potentiellement très élevés et destructeurs circulent. Il est donc recommandé de surveiller non seulement le régime du moteur, mais aussi le courant d'entraînement, surtout pour les gros moteurs. Dans les cas simples, on peut se contenter d'un coupe-circuit thermique de surintensité. Si le régime tombe en deçà du seuil minimal ou si le courant dépasse une limite supérieure, le moteur est mis hors tension, protégeant le moteur lui-même, son électronique de commande et toute machine entraînée. Par rapport à un fusible, cette protection présente l'avantage de ne pas interrompre l'alimentation d'autres machines alimentées par les mêmes lignes.

Comme leur nom le suggère, les moteurs universels sont dans toutes sortes d'applications : des appareils électroménagers, perceuses et autres outils d'une puissance inférieure à 100 W jusqu'aux locomotives électriques et autres unités motrices de plusieurs MW, alimentées en CC ou CA.

La variante simple présentée à la figure 3 souffre d'un couple irrégulier en fonction de la position de rotation. Les schémas plus sophistiqués sont donc la règle. Les systèmes monophasés multipolaires avec une variété de dessins de stator et de rotor (voir **fig. 5**) sont courants avec divers types d'enroulements de compensation qui touchent la courbe du couple, mais aussi la quantité d'étincelles sur les balais. La fiabilité du collecteur et d'autres propriétés sont aussi touchées. Si l'on examine la relation entre le couple et le régime sur la figure 2, on constate qu'à une tension donnée, le régime varie en fonction de la charge. Pour stabiliser le régime, il faut une boucle de contrôle active et un capteur de régime.

Le moteur à induction

Le moteur à induction, dont la construction de base est illustrée à la **figure 6**, présente des avantages décisifs par rapport au moteur universel. Le plus important d'entre eux est l'absence totale de collecteur : l'absence d'usure (hormis des paliers) assure une très bonne fiabilité. Les plus gros moteurs à induction sont presque toujours triphasés, et les modèles multipolaires de ce type fournissent un couple régulier sur chaque rotation. Le dessin courant à rotor interne, tel qu'illustré, utilise le champ magnétique rotatif du stator : en charge, le rotor tourne un peu plus lentement que le champ du stator, induisant un courant dans ses enroulements et donc un champ magnétique. La FCEM correspondante induit à son tour un courant accru dans l'enroulement du rotor, d'où le terme « moteur à induction ». La **figure 7** montre un moteur à induction dont la puissance nominale est de quelques kW. Le nombre de pôles choisi détermine le régime nominal du moteur : doubler le nombre de pôles divise par deux le régime moteur à fréquence égale de l'alimentation triphasée.

Comme on le voit sur le graphique de la figure 2, la courbe de couple du moteur à induction est très raide et le rotor tourne toujours à un régime juste inférieur à la vitesse de rotation du champ appliqué. C'est ce qu'on appelle le « glissement ». Son importance dépend de la charge, mais il reste étroitement lié à la vitesse de rotation du champ (et donc à la fréquence de l'alimentation CA). Lorsque la charge du moteur augmente, un seuil est finalement atteint, après quoi le couple chute brusquement. Le moteur cale alors et

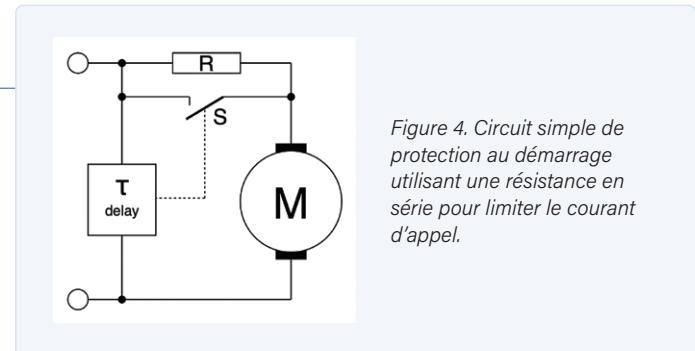


Figure 4. Circuit simple de protection au démarrage utilisant une résistance en série pour limiter le courant d'appel.

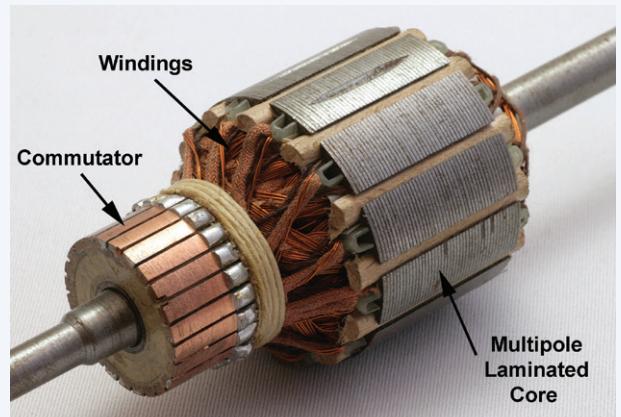


Figure 5. Rotor d'un moteur universel monophasé type. Le nombre de contacts sur le collecteur correspond aux nombres d'enroulements et de pôles. (Crédit photo : Sebastian Stabinger, CC 3.0 [4])

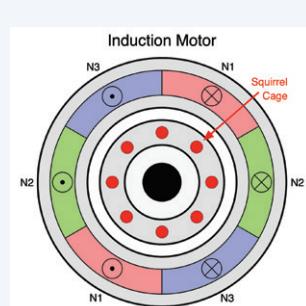


Figure 6. Schéma de construction d'un moteur à induction triphasé (rotor interne). Le rotor est constitué d'une « cage d'écureuil » à enroulements court-circuittés. (Crédit dessin : Thomas Scherer)

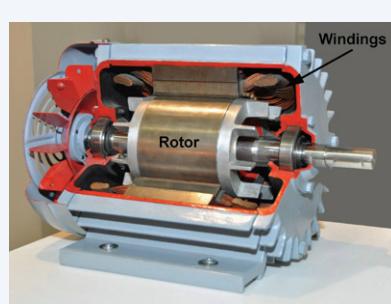


Figure 7. Moteur à induction de quelques kW de puissance nominale (coupe partielle). On distingue facilement les enroulements du stator et le rotor en court-circuit. (Crédit photo : S. J. de Waard, CC 3.0 [5])



Figure 8. Petit variateur de fréquence pour moteurs à induction de quelques kW. Ce circuit de commutation électronique permet de régler le régime. Des modèles plus conséquents offrant des fonctions avancées sont disponibles. (Crédit photo : C. J. Cowie, CC 3.0 [6])

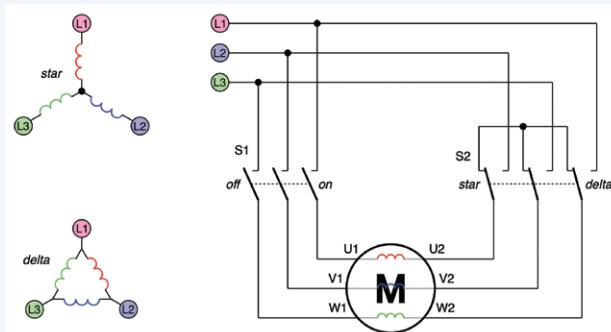


Figure 9. Commutation étoile-triangle de protection. C'est un moyen simple de réduire les forts appels de courant au démarrage du moteur.

le courant augmente rapidement. La plage de régimes utilisables peut être considérablement ajustée en alimentant le moteur par un variateur de fréquence (voir **fig. 8**). Ce type d'entraînement est très répandu sur les machines industrielles.

Les gros moteurs à induction nécessitent un courant élevé au démarrage : jusqu'à dix fois le courant nominal de fonctionnement.

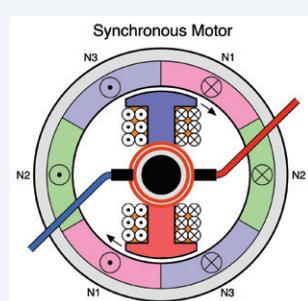


Figure 10. Schéma de construction d'un moteur synchrone triphasé simple. Le rotor peut être équipé d'aimants permanents pour éliminer le collecteur. (Crédit dessin : Thomas Scherer)

Il existe plusieurs façons de réduire le courant d'appel. Dans les cas simples, disons jusqu'à 11 kW, on utilise un commutateur étoile-triangle (**fig. 9**) : la configuration en étoile absorbe un courant et (donc) une puissance égale au tiers de ceux de la configuration en triangle. Le passage étoile-triangle de la configuration s'effectue généralement lorsque le moteur a atteint au moins 75 % de son régime nominal. Il faut veiller à ce que la charge ne soit pas trop élevée pendant le démarrage afin de rester en deçà du couple de décrochage. Avec un variateur, cette précaution n'est plus nécessaire, car la fréquence du variateur et donc le régime peuvent être augmentés progressivement au démarrage.

En raison de leur extrême robustesse et de leur haut rendement, on trouve ce type de moteur dans toutes sortes de machines en production industrielle ainsi que dans les chaînes cinématiques des véhicules électriques. Sur ses modèles actuels, Tesla utilise de tels moteurs, compacts, tournant à haut régime et couplés à un réducteur. Un système intelligent de contrôle du moteur combinant des circuits de surveillance du courant et du régime couvre la très vaste gamme de régimes requise. La commande électronique se charge de supprimer le principal inconvénient du moteur, à savoir son lien étroit entre régime et fréquence d'alimentation en CA. Si le rotor tourne plus vite que le champ tournant du stator, le moteur à induction fonctionne comme un générateur : cela permet de récupérer de l'énergie, ce qui est important pour les véhicules comme pour les machines fixes.

Moteurs synchrones et BLDC

Un moteur synchrone est essentiellement un moteur universel fonctionnant sur une alimentation triphasée. Selon un schéma répandu, l'enroulement du rotor est alimenté par des bagues collectrices séparées : un collecteur de type moteur universel n'est pas nécessaire et les bagues ne sont pas segmentées, réduisant les frottements. La **figure 10** montre un modèle de ce type ; le rotor peut être à aimants permanents, rendant les bagues totalement inutiles. Pour les gros moteurs fixes de grande taille, l'excitation séparée illustrée est plus économique et plus fiable d'un point de vue thermique : même brève, une exposition à une température élevée peut facilement endommager les aimants permanents. Il existe également des modèles à rotor externe, où le stator est interne et le rotor est équipé d'aimants permanents, donc sans bagues collectrices. Ces types ont une longue durée de vie et ne nécessitent aucun entretien. Comme on peut le voir sur le graphique du couple en fonction du régime, la vitesse reste constante et est rigidement couplée à la vitesse du champ tournant. Le rotor ne glisse pas sous la charge ; par rapport au champ tournant, il est décalé d'un angle de phase dont la valeur dépend de la charge. Comme les autres types, ce moteur peut être utilisé comme générateur. Les moteurs synchrones sont fabriqués avec des pôles multiples pour régulariser le couple sur une révolution ; ici aussi, le régime est inversement proportionnel au nombre de pôles.

Le grand avantage du moteur synchrone est indiqué par son nom : il permet d'obtenir un régime très précis, constant et indépendant de la charge, sans régulateur. Contrairement au moteur universel, les balais de charbon ne subissent que très peu d'usure, car les bagues collectrices ne sont pas segmentées et l'énergie d'excitation

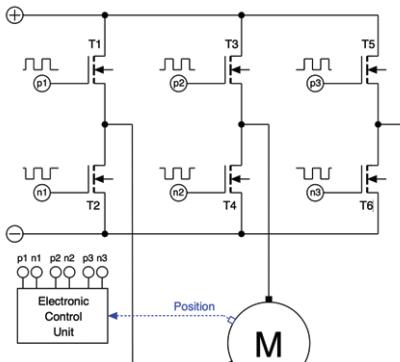


Figure 11. Principe de l'électronique de commutation sur un moteur BLDC. Chaque demi-pont MOSFET reçoit une paire de signaux de commande complémentaires avec un retard de phase approprié.

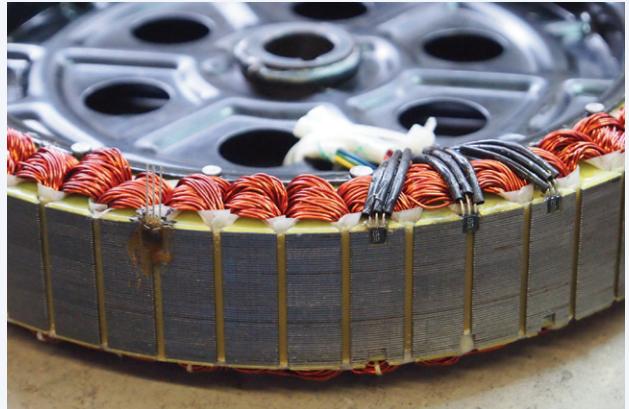


Figure 12. Stator d'un moteur BLDC de 2 kW pour moyeu de roue avec rotor externe. Les enroulements quadripolaires et les tôles sont facilement visibles, tout comme l'emplacement des capteurs à effet Hall utilisés pour déterminer la position angulaire du rotor. (Crédit photo : Thomas Scherer)

est relativement faible. Si le rotor utilise des aimants permanents, il est possible de construire des moteurs extrêmement robustes et de petite taille. Un inconvénient est une relative difficulté à démarrer le moteur : pour cette raison, un gros moteur synchrone comprend parfois sur le rotor un bobinage supplémentaire court-circuité, et peut ainsi être mis en vitesse comme un moteur à induction. Au démarrage, les techniques de protection (dont les fonctions de protection offertes par les variateurs de fréquence modernes) déjà utilisées sur le moteur à induction peuvent (parfois, doivent) être mises en œuvre. Le champ tournant des enroulements du stator d'un moteur synchrone peut être produit en alimentant les enroulements à partir d'une source de courant continu à l'aide de trois demi-ponts, plutôt qu'à courant alternatif triphasé (voir **fig. 11**). Les demi-ponts sont contrôlés électroniquement pour créer la forme d'onde triphasée, comme dans un variateur de fréquence. Un tel moteur est dit à courant continu sans balais (ou BLDC =brushless direct current). Un capteur détecte la position angulaire du rotor, et cette information permet de synchroniser la commande du demi-pont. On obtient ainsi un moteur quasi synchrone qui crée de manière autonome son propre champ tournant et dont le régime dépend de la tension d'alimentation et de la charge. Contrairement au moteur universel, la construction est simple et, si des aimants permanents sont utilisés, le moteur ne nécessite pratiquement aucun entretien. La caractéristique couple-vitesse est également supérieure. Si un contrôleur MLI est ajouté, le régime à vide peut être ajusté en modifiant le rapport d'espacement des signaux de commande. Si le signal MLI est réglé en utilisant le courant d'alimentation comme signal de référence, la relation courant/couple sera très linéaire à charge et vitesse données.

Les machines fixes utilisent les deux types de moteurs sur une large gamme de puissance. En général, les moteurs BLDC sont mieux adaptés à la propulsion des véhicules, car ils permettent de concevoir des solutions tout électroniques avec un contrôle sophistiqué. Le

« moteur de moyeu de roue » (voir **fig. 12**) utilisé dans les bicyclettes électriques et d'autres applications est une variante de puissance faible à moyenne. Ces moteurs comportent un rotor externe, généralement équipé d'aimants permanents. Avec un grand nombre de pôles, le régime est faible et le couple élevé. Le couple est indépendant de la position angulaire et la fiabilité est excellente. Cependant, pour les applications de forte puissance, les aimants permanents nécessaires sont à la fois chers et lourds. Le moteur de moyeu de roue constitue donc une masse non suspendue considérable qui nuit au confort de conduite. À cause de cela, les véhicules électriques utilisent le plus souvent des moteurs à induction rapides et compacts entraînant les roues par des accouplements flexibles.

De plus...

Les moteurs électriques sont largement utilisés et semblent devoir supplanter tous les autres types de moteurs, mais leur utilisation nécessite de tenir compte de quelques points. Les moteurs électriques sont aujourd'hui très raffinés et des innovations importantes semblent désormais peu probables. Cependant, les optimisations évolutives n'ont pas fini de voir le jour : elles viendront de l'amélioration des matériaux existants et des technologies de construction et de fabrication, mais aussi, et surtout, du contrôle électronique intelligent. Les semi-conducteurs de puissance ne cessent de s'améliorer en vitesse et en efficacité ; le coût de la puissance de calcul ne cesse de baisser. Cela signifie que des algorithmes complexes peuvent être mis en œuvre. Ils améliorent l'efficacité de la combinaison moteur électromécanique et système de contrôle électronique.

En fin de compte, le meilleur compromis entre un grand nombre de facteurs préside toujours au choix d'un moteur électrique pour une application particulière. Ce choix exige un vaste savoir-faire, et les clients se tournent vers les fabricants de moteurs électriques pour obtenir une assistance de qualité et des conseils spécialisés.

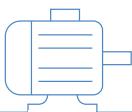


Tableau 2. Les vingt premiers fabricants de moteurs électriques (en 2019) [8].

Classement	Fabricant	Pays
1	Siemens	Allemagne
2	Toshiba	Japon
3	ABB	Suisse & Suède
4	Nidec Motor	Japon
5	Rockwell Automation	États-Unis
6	Ametek	États-Unis
7	Regal Beloit	États-Unis
8	Johnson Electric	Hong Kong
9	Franklin Electric	Inde
10	Allied Motion	États-Unis
11	Faulhaber	Allemagne
12	General Electric	États-Unis
13	Danaher Motion	États-Unis
14	CEW	Brésil
15	maxon motor	Suisse
16	TECO Westinghouse	Taiwan
17	Hitachi	Japon
18	Lincoln Electric	États-Unis
19	Piela Electric	États-Unis
20	Dumore Corporation	États-Unis

On compte des centaines de fabricants de moteurs électriques, il est difficile d'avoir une vue d'ensemble du marché. En 2020, le CA total de tous les fabricants de moteurs électriques avoisinait les 150 G\$ [7], et la croissance attendue pour les prochaines années est de 6 %/an. Le **tableau 2** énumère les vingt plus grands fabricants : les entreprises basées aux États-Unis dominent, mais le leader du marché est allemand. Si vous cherchez quelque chose sortant des sentiers battus, une simple connaissance des principes de base ne suffira pas : soyez prêt à une immersion de longue durée dans les finesse du sujet ! ↴

210555-04

Contributeurs

Auteur : Thomas Scherer

Rédaction : Jens Nickel

Mise en page : Giel Dols

Traduction : Yves Georges

Des questions, des commentaires ?

Contactez Elektor (redaction@elektor.fr).



PRODUITS

➤ **SmartPi 2 - Compteur intelligent pour Raspberry Pi (incluant trois sondes de courant)**
www.elektor.fr/18165

➤ **Sonde de courant pour SmartPi 2**
www.elektor.fr/18167

➤ **Pince de mesure PeakTech 4350**
www.elektor.fr/18161

LIENS

- [1] M. Claussen, « Commande de moteur avec des ponts en H », Elektor 01-02/2022 : <https://www.elektormagazine.fr/210491-04>
- [2] T. Scherer, « La commande des moteurs électriques », Elektor 01-02/2019 : <https://www.elektormagazine.fr/180558-04>
- [3] Moteur électrique simple : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Animation_einer_Gleichstrommaschine.gif
- [4] Rotor d'un moteur universel : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kommutator_universalmotor_stab.jpg
- [5] Moteur à induction en coupe : [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotterdam_Ahoy_Europoort_2011_\(14\).JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotterdam_Ahoy_Europoort_2011_(14).JPG)
- [6] Variateur de fréquence : https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Small_variable-frequency_drive.jpg
- [7] Le marché des moteurs électriques : <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/electric-motor-market>
- [8] Classement des fabricants de moteurs électriques : <https://blog.technavio.com/blog/top-20-electric-motor-companies>