

Les descriptions ci-dessous sont volontairement exemptes de formules. L'exercice de style a consisté à trouver des explications simples mais restant le plus près possible des phénomènes électromagnétiques. La lecture nécessite évidemment un certain effort de concentration pour « visualiser » ces explications imagées.

Les références données à la fin permettent d'aller plus loin, dans le domaine des réalités industrielles comme dans celui des lois de la physique et de leur cortège mathématique.

MOTEUR ASYNCHRONE

Le bobinage du **stator**, alimenté en courant alternatif, produit un **champ magnétique tournant** dont la vitesse est fixée par la fréquence du courant et le nombre de pôles du bobinage. Dans le **rotor** en fer, sont inclus des conducteurs en aluminium coulé, parallèles à l'axe (ou légèrement inclinés), leurs extrémités étant toutes reliées entre elles par des anneaux de même métal pour former ce qu'on appelle la « **cage à écureuil** » ou plus simplement la « cage ». Il n'y a aucun contact électrique entre le rotor et l'extérieur. Le mouvement du champ tournant provoque des **courants induits** dans la cage en aluminium du rotor, les forces de Laplace sur ces courants produisent la rotation.

La vitesse du rotor se stabilise spontanément à une valeur un peu plus faible (*glissement*) que celle du champ tournant, telle que les forces de Laplace produisent le couple moteur nécessaire à l'entraînement de la charge. **Le moteur s'adapte à une augmentation de la charge** par une faible diminution de la vitesse du rotor, ce qui conduit à une augmentation de la vitesse de glissement du champ tournant par rapport à la cage et par conséquent de l'intensité des courants induits : les forces de Laplace augmentent. Phénomènes inverses pour une diminution de la charge. Les adaptations aux variations de la charge se répercutent au stator. Celui-ci absorbe une puissance électrique active (en watts) qui suit, aux pertes près, les variations de la puissance mécanique fournie sur l'arbre du rotor, par des variations de l'intensité au stator et surtout du facteur de puissance $\cos \varphi$ (l'angle φ étant le déphasage entre l'intensité et la tension).

Les moteurs asynchrones industriels sont en général alimentés en triphasé mais il en existe en monophasé, de faible puissance, pour des usages où l'on ne dispose que du réseau domestique monophasé : circulateurs de chauffage central, pompes de vidange des machines à laver, turbines de VMC pour le renouvellement d'air dans l'habitat, ventilateurs de rétroprojecteurs, etc.

Le moteur asynchrone triphasé est le moteur « à tout faire » dans l'industrie : bon marché, robuste, sans entretien. Branché directement au réseau triphasé, sa vitesse varie seulement de quelques pour cent entre le fonctionnement à vide et la pleine charge, restant toujours un peu plus faible que la vitesse du champ magnétique tournant, fixée par la fréquence au stator. Dans la plupart des cas, ces petites variations de vitesse ne sont pas gênantes. En courant alternatif 50 Hz, les vitesses ne peuvent être que « un peu inférieures » à 3000, 1500, 1000, etc., tours par minute, pour des moteurs bipolaires,

tétrapolaires, hexapolaires. De nombreuses utilisations nécessitent donc un réducteur de vitesse par engrenages (groupes moto-réducteurs), ou un choix de vitesses par poulies étagées. Le rendement s'en ressent : pour une puissance utile de l'ordre du kW, le rendement du moteur seul est voisin de 80 %, celui d'un moto-réducteur peut chuter à 50 %. Le prix d'achat s'en ressent aussi, en raison du coût du réducteur ou de la « boîte à vitesses ».

Jusqu'aux années 80 le moteur asynchrone n'était pas utilisable pour les applications en vitesse variable, ni à des vitesses supérieures à 3000 tr/min. Actuellement, l'électronique de puissance permet de produire des tensions triphasées à **fréquence variable** : en quelques années, cette technologie a révolutionné l'utilisation des moteurs asynchrones. Les variateurs de première génération délivrent des tensions triphasées à rapport U/f constant, avec ou sans régulation de vitesse. Les variateurs de la génération actuelle sont à « commande vectorielle », et contrôlent séparément le couple (par la composante active de l'intensité) et le flux (par la composante réactive de l'intensité ou courant magnétisant). Les performances de ces variateurs permettent un réglage de la vitesse du rotor à 0,1 % près avec capteurs de vitesse et de position angulaire du rotor, et à 0,5 % près sans capteurs. Parmi ses multiples avantages, la commande vectorielle permet d'exercer le couple nominal (et même supérieur) avec le rotor à l'arrêt, et rend possible le freinage avec récupération, l'énergie étant alors renvoyée au réseau d'alimentation.

Les tensions alternatives triphasées produites par les variateurs électroniques sont obtenues à partir de tensions continues symétriques, par découpage d'impulsions très fines de durées modulées de telle façon que le fondamental de la série de Fourier soit à la fréquence et à la valeur efficace désirée (onduleur MLI : à modulation de largeur d'impulsions). L'effet inductif du stator impose à l'intensité une forme proche de la sinusoïde.

MOTEUR SYNCHRONE

Le **stator** est le même que celui du moteur asynchrone : alimenté en courant alternatif, il produit un **champ magnétique tournant** dont la vitesse est fixée par la fréquence du courant et le nombre de pôles du bobinage. Le **rotor** est un aimant permanent ou un électroaimant à courant continu. On peut dire de façon imagée que l'aimant du rotor **s'accroche** au champ tournant du stator et tourne à la même vitesse. Ou encore, que les pôles magnétiques Nord et Sud du rotor sont entraînés à la même vitesse par les pôles de noms contraires du champ tournant du stator. Quand il fonctionne, le moteur synchrone **s'adapte aux variations de la charge** par de faibles variations de distance angulaire entre les pôles des champs tournants du stator et du rotor, conduisant au final à la variation de la puissance active absorbée par le stator. **La vitesse du rotor reste toujours égale à la vitesse du champ tournant.**

Si le moteur synchrone est alimenté par le réseau 50 Hz, la vitesse du rotor est exactement égale à un sous-multiple de 50 tours par seconde (autrement dit à un sous-multiple de 3000 tr/min). De nombreux petits moteurs synchrones monophasés, à rotor à aimant permanent, et dans une configuration à démarrage spontané, sont « depuis toujours » appréciés pour leur vitesse rigoureusement constante, liée à la fréquence du

réseau : **programmeurs en électroménager** par exemple (lave-linge, four, ...).

Pour les applications industrielles, le moteur synchrone est resté longtemps marginal car il présente deux inconvénients quand il est alimenté directement par le réseau :

- il ne démarre pas spontanément, car le rotor ne peut pas tourner instantanément pour suivre le champ tournant du stator qui démarre, lui, sans aucune inertie ;
- si la charge augmente trop, le rotor « décroche » du champ tournant statorique, il cale brusquement et se met à vibrer.

Dans les années 80, le développement des alimentations électroniques triphasées à fréquence réglable a d'abord révolutionné l'utilisation des moteurs synchrones, avec la génération des moteurs synchrones « auto-pilotés », avant d'atteindre le domaine des moteurs asynchrones une dizaine d'années plus tard. Dans les **moteurs synchrones auto-pilotés**, la fréquence des courants du stator (et par conséquent la vitesse du champ tournant entraînant le rotor) est contrôlée par des capteurs mesurant en permanence la position du champ magnétique du rotor par rapport à la position du champ magnétique tournant. Les problèmes de **démarrage et de décrochage sont résolus**, et la vitesse devient réglable par une action extérieure sur la fréquence.

La robotique, les centres d'usinage à commande numérique, l'usinage à très grande vitesse, utilisent des moteurs synchrones auto-pilotés à rotor à aimants permanents, en raison de leur très grande puissance massique (en kW/kg), des possibilités de vitesses de rotation élevées, et en raison de l'absence de pertes Joule et de pertes magnétiques au rotor. Les puissances peuvent aller jusqu'à la dizaine de kW. L'industrie textile les utilise pour la facilité qu'ils offrent de créer des mouvements parfaitement synchrones : tous les moteurs alimentés avec la même fréquence tournent exactement à la même vitesse.

En très petite puissance, ils donnent aux disques durs de micro-ordinateurs et aux têtes de lecture de magnétoscopes, des vitesses de rotation parfaitement maîtrisées. Les lecteurs de disquettes informatiques et les cabestans de magnétoscopes (entraînement de la bande) sont en général à moteur synchrone triphasé auto-piloté à champ **axial**, pour être les plus plats possible. Les bobines du stator, l'électronique de commande, les capteurs à effet Hall, tout est sur le même circuit imprimé. Le champ se referme par une plaque de fer opposée, et le rotor est un disque en aimant permanent, entre les deux plans parallèles du stator.

Les moteurs synchrones de forte puissance ont un rotor à électroaimant excité en courant continu. De tels moteurs, auto-pilotés, sont utilisés en traction électrique (TGV Atlantique, locomotives Sybic) où ils ont assuré la transition, pour les matériels fabriqués dans les années 80, entre les moteurs à courant continu et les moteurs asynchrones. Dans certaines applications de grande puissance et de fonctionnement permanent comme l'entraînement de pompes en pétrochimie, de compresseurs ou de gros ventilateurs, des moteurs synchrones de l'ordre des MW étaient utilisés bien avant l'arrivée des moteurs auto-pilotés, malgré le problème du démarrage. Ils étaient appréciés pour leur **excellent rendement** (pouvant être supérieur à 95 %), leur alimentation sous plusieurs kV ainsi que

leurs possibilités de **réglage de la puissance réactive**. En effet, pour une même puissance mécanique fournie sur l'arbre et une même puissance électrique active absorbée (en watts), le moteur synchrone peut fonctionner sans puissance réactive (en var), il peut aussi en absorber, ou en fournir au réseau, suivant les besoins, par un réglage de l'intensité d'excitation de l'électroaimant rotorique en courant continu (*ça se complique, n'est-ce pas ?!*).

Si les problèmes de démarrage et de décrochage ont longtemps exclu les moteurs synchrones de la plupart des usages industriels et les ont cantonnés à quelques applications seulement, on pourrait maintenant en trouver partout, grâce aux alimentations électroniques auto-pilotées à fréquence réglable. En fait, s'il y a le choix, les moteurs asynchrones retiennent la préférence des industriels car ils sont beaucoup moins coûteux et peuvent dorénavant couvrir la plupart des besoins. Après une décennie de gloire, les moteurs synchrones semblent donc à nouveau dévolus à occuper seulement quelques « niches » où leurs qualités sont irremplaçables.

Quand le rotor est à aimant permanent, les moteurs synchrones sont en général qualifiés de « **moteurs brushless** » (sans balais). Bien sûr, les moteurs asynchrones sont eux aussi sans balais, mais l'appellation brushless ne les concerne pas. Elle a commencé d'être utilisée quand les moteurs synchrones auto-pilotés et à aimants permanents sont apparus, à cause de leurs propriétés très voisines de celles des moteurs à courant continu, qui ont des balais. Depuis, le nom a été conservé, et même, certains moteurs synchrones auto-pilotés à aimants permanents ont des comportements tellement proches des moteurs à courant continu qu'on les appelle « moteurs brushless à courant continu » !

On ne peut finir cet exposé sans mentionner que les alternateurs des centrales hydro-électriques réversibles fonctionnent en moteurs synchrones pour remonter l'eau dans le lac supérieur pendant les heures creuses (les turbines fonctionnent alors en pompes). Les puissances en jeu sont considérables.

MOTEUR À COURANT CONTINU

Le **stator** produit un **champ magnétique fixe dans l'espace et constant dans le temps**. Dans les petits moteurs, le stator est à aimants permanents. Dans les moteurs plus puissants, il est formé de bobinages parcourus par du courant continu.

Le **rotor** comprend des conducteurs parallèles à l'axe (ou légèrement inclinés), reliés à un ensemble de lames de cuivre, le collecteur. Dans le champ magnétique fixe du stator, les courants rotoriques subissent des forces de Laplace qui provoquent la rotation. Le rotor est alimenté en courant continu, mais le **système balais-collecteur** fait circuler dans les conducteurs rotoriques des **courants alternatifs synchronisés avec la rotation** : le courant change de sens dans un conducteur du rotor chaque fois qu'il passe d'un pôle du stator au pôle suivant, pour que les forces de Laplace soient toutes orientées dans le même sens.